

**DISTRIBUCIÓN DE LA
HUMEDAD DE SUELO
MEDIANTE OBSERVACIONES
DEL SATÉLITE SMOS,
MODELIZACIÓN CON SURFEX
Y MEDIDAS IN SITU SOBRE LA
VALENCIA ANCHOR STATION**



UNIVERSIDAD DE VALENCIA

FACULTAD DE FÍSICA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA TIERRA Y TERMODINÁMICA

DOCTORADO EN TELEDECCIÓN

**PhD Thesis :
M^a Amparo Coll Pajarón**

**PhD Advisors:
Ernesto López Baeza
Samiro Khodayar Pardo**

Valencia, Mayo del 2017

**DISTRIBUCIÓN DE LA
HUMEDAD DE SUELO
MEDIANTE OBSERVACIONES
DEL SATÉLITE SMOS,
MODELIZACIÓN CON SURFEX
Y MEDIDAS IN SITU SOBRE LA
VALENCIA ANCHOR STATION**



UNIVERSIDAD DE VALENCIA

FACULTAD DE FÍSICA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA TIERRA Y TERMODINÁMICA

DOCTORADO EN TELEDECCIÓN

**PhD Thesis:
M^a Amparo Coll Pajarón**

**PhD Advisors:
Ernesto López Baeza
Samiro Khodayar Pardo**

Valencia, Mayo del 2017

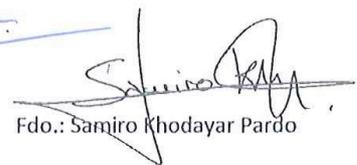
Ernesto López Baeza, Profesor Titular de Física Aplicada del Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica de la Facultad de Física de la Universitat de València, y Samiro Khodayar Pardo, Jefa del Grupo de investigación "Extreme Weather in a Changing Climate" del Departamento de Investigación Troposférica del Instituto de Meteorología y Climatología del Instituto Tecnológico de Karlsruhe (KIT).

CERTIFICAN: Que la presente Memoria titulada "*Distribución de la humedad de suelo mediante observaciones del satélite SMOS, modelización con SURFEX y medidas in situ sobre la Valencia Anchor Station*", ha sido realizada bajo nuestra dirección en el Programa de Doctorado en Teledetección del Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica de esta Facultad, por Dña. María Amparo Coll Pajarón, y constituye su Tesis Doctoral para optar al grado de Doctora en Teledetección.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente firmamos el presente certificado en Burjassot, a 30 de Mayo de 2016.



Fdo.: Ernesto López Baeza



Fdo.: Samiro Khodayar Pardo

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a mis Directores, Ernesto López Baeza y Samiro Khodayar Pardo por su confianza y apoyo, por guiarme en el camino, por sus sugerencias y consejos y sobretodo por hacerme las cosas un poco más fáciles.

A mi familia. A mis padres y mi hermana por su apoyo incondicional, su paciencia y su esfuerzo por entender lo que hago. Sin su apoyo esta tesis no hubiera sido posible.

No puedo olvidarme de todos los que forman y han formado parte del grupo de Climatología desde Satélite y de becarios del departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, que juntos formamos una gran familia que sufre por los plazos de entrega, congresos, tesis....

Quisiera hacer mención especial a Niobe y Roberto con quien tantas horas hemos compartido en el despacho, estábamos más tiempo juntos que separados, se os echa de menos... y como no a mi compañera de aventura en esta andadura, Carol, juntas sufrimos los continuos papeleos, burocracia y demás. Por nuestros descansitos, nuestras cenitas y nuestras charlas para desahogarnos.

Y por último a mis amigos por entender mi poco tiempo disponible y por seguir estando ahí siempre apoyándome en todo.

GRACIAS a todas aquellas personas que han confiado en mi.

INDICE GENERAL

	PÁGS
Lista de Acrónimos.....	IX
Lista de Figuras.....	XI
Lista de Tablas.....	XV
Resumen/Abstract.....	XVII
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1. Introducción.....	3
CAPÍTULO II: ZONA DE ESTUDIO Y DATOS UTILIZADOS	7
1. Introducción.....	9
2. Zona de estudio.....	10
3. Datos utilizados.....	12
3.1. Humedada del suelo in situ	12
3.2. Datos de Precipitación	15
3.3. Datos del Satélite SMOS.....	16
3.3.1. Humedad del suelo de SMOS nivel 2.....	17
3.3.2. Humedad del suelo de SMOS nivel 3.....	17
3.3.3. Humedad del suelo de SMOS nivel 4.....	18
CAPÍTULO III: ADAPTACIÓN DEL MÓDELO DE SIMULACIÓN SURFEX A LA VALENCIA ANCHOR STATION	21
1. Introducción.....	23
2. Modelo de simulación SURFEX.....	23
2.1. ISBA.....	25
2.2. Ecoclimap.....	27
3. Calculo de la humedad del suelo en SURFEX.....	28
4. Adaptación del modelo de la simulación SURFEX a la zona de estudio.....	32
4.1. Datos de entrada de las estaciones meteorológicas.....	33
4.2. Datos de entrada de la espacialización.....	34
4.2.1. Datos de entrada del ECMWF.....	34
4.2.2. Datos de entrada del SAFRAN.....	34
5. Datos de salida del modelo de simulación SURFEX.....	35

CAPÍTULO IV: SMOS: HUMEDAD DEL SUELO SOBRE LA VAS, INTERCOMPARACIÓN DE LOS PRODUCTOS A DISTINTOS NIVELES Y VALIDACIÓN CON MEDIDAS IN SITU	37
1. Introducción.....	39
2. Intercomparación de los datos de SMOS	41
2.1. Datos de nivel 2 de SMOS.....	41
2.2. Datos de nivel 3 de SMOS.....	43
2.3. Datos de nivel 4 de SMOS.....	44
3. Validación de los datos de SMOS con medidas in situ.....	46
CAPÍTULO V: MODELIZACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO CON SURFEX	63
1. Introducción.....	65
2. Validación de las simulaciones locales con medidas in situ y comparación con SMOS.....	65
3. Espacialización de la humedad del suelo en la zona de estudio.....	71
3.1. Espacialización con datos del ECMWF.....	72
3.2. Espacialización con datos de SAFRAN.....	77
4. Sensibilidad de las simulaciones locales y regionales a una inicialización real con SM-SMOS.....	83
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONS	89
1. Conclusions.....	91
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	103
ANEXO I: Calibración de las sondas de humedad.....	105
ANEXO II: Clasificación del Ecoclimap.....	109

LISTA DE ACRÓNIMOS

AEMet Agencia Estatal de Meteorología
ASC Órbita ascendente
CATDS Centre Aval de Traitement des Données SMOS
CERES Clouds and the Earth's Radiant Energy System
CESBIO Centre d'Études Spatiales de la Biosphère
CoE Council of Europe
CNRM Centro Nacional de Recherches météorologiques
DES Órbita descendente
DJF Diciembre-Enero-Febrero
ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecast
ESA Agencia Espacial Europea
EUMETSAT European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
GCS Grupo de Climatología desde Satélite
GERB Geostacionary Earth Radiation Budget
HYMEX Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment
ISBA Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère
JJA Junio-Julio-Agosto
KIT Karlsruher Institut für Technologie
LAI Leaf Area Index
LST Land Surface Temperature
MAM Marzo-Abril-Mayo
MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NATO North Atlantic Treaty Organisation.
NDVI Normalized Difference Vegetation Index
OECD Organisation for Economic Co-operation and Development
OLCI Ocean and Land Colour Instrument
RIBOLA Räumlich integrierte Bodenfeuchtemessungen unter Verwendung von Radiofrequenzen im Langwellenbereich
SAFRAN Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige
SAR Radar de Apertura Sintética
SM Soil Moisture
SMAP Soil Moisture Active Passive
SMOS Soil Moisture and Ocean Salinity
SON Septiembre-October-Noviembre
SURFEX SURFace EXternalisée
SVAT Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer
TEB Town Energy Balance
UEV Universitat de València Estudi General

VAS Valencia Anchor Station

INDICE DE FIGURAS

	PÁGS
Figura 1: a) Zona de estudio de la Península Ibérica, b) zona de estudio del 50x50 km ² (VAS), c) zona de estudio del 10x10km ²	9
Figura 2: Usos del suelo de la zona del 10x10 km ²	11
Figura 3: Unidades ambientales de la zona de estudio del 50x50 km.....	11
Figura 4: ThetaProbe ML2x (fuente: Manual ML2x)	14
Figura 5: Precipitación en la zona de estudio del 50x50 km ²	15
Figura 6: Distribución espacial de la precipitación en la Península Ibérica para periodos hidrológicos de JJA y SON.....	16
Figura 7: Satélite SMOS (fuente ESA)	16
Figura 8: Producto N4 de la versión 2.0 y N4' de la versión 3.0 para el día 19 de septiembre del 2012.....	19
Figure 9: Esquema del modelo de simulación SURFEX.....	23
Figura 10: Componentes del modelo SURFEX en mosaico y acoplados a un modelo atmosférico.....	24
Figura 11: Descripción de la transferencia hidrológica en la versión ISBA 2-L..	26
Figura 12: Esquema ISBA-Standard vs ISBA-A-gs.....	27
Figura 13: Ecoclimap-II sobre Europa.....	28
Figura 14: Distribución de los pixeles de SMOS del nivel 2 (rejilla azul), nivel 3 (rejilla amarilla) y distribución las estaciones de medida in situ de la humedad del suelo en la zona de la VAS (puntos rojos). (Fuente Google Earth).....	39
Figura 15: Imagen de SMOS nivel 2 de la península y de la zona de estudio a) Órbita ascendente b) Órbita descendente c) Combinación de las órbitas ascendente y descendente.....	42
Figura 16: Imagen de SMOS nivel 3 de la península y de la zona de estudio: a) Orbita ascendente b) Orbita descendente c) Combinación de ambas órbitas ascendente y descendente.....	44
Figura 17: Diferencia entre las imágenes de SMOS de nivel 4 afectadas por la presencia de nubes y las imágenes de nivel 4 nuevas cuya presencia de nubes no le afecta para la combinación de imágenes de 19 al 20 de noviembre.	45
Figura 18: Imagen de SMOS nivel 4 de la península y de la zona de estudio: a) Orbita ascendente b) Orbita descendente c) Combinación de la orbita ascendente y descendente.....	46
Figura 19: Correlaciones de las estaciones de medida con SMOS nivel 2 y nivel 4 para los días con y sin precipitación.....	47
Figura 20: Intercomparación en la Península Ibérica y en el 50x50 km ² por estaciones hidrológicas del producto de: a) SMOS L3 (25 km) con el producto re-escalado de nivel L4'(1 km) a L3 (25 km), b) SMOS L2 (15 km) con el producto re-escalado de nivel L4'(1 km) a L2 (15 km).....	48
	XI

Figura 21: Evolución temporal de la humedad del suelo en la Península Ibérica con una resolución espacial de 25 km.....	49
Figura 22: Evolución temporal de la humedad del suelo en la zona de estudio con una resolución espacial de 15 km.....	50
Figura 23: BIAS del producto de SMOS de nivel 2 con respecto de la estaciones de media.....	52
Figura 24: Evolución temporal de la humedad del suelo en la zona de las estaciones con una resolución espacial de 1 km.....	53
Figura 25: Comportamiento de la humedad del suelo de SMOS nivel 4 en cada estación de medida in situ.....	54
Figura 26: BIAS entre el producto de SMOS de nivel 4' y las observaciones....	56
Figura 27: Productos de SMOS a 25 km en la Península Ibérica: a) desviación estándar b) índice diario de la humedad del suelo c) coeficiente de variación.....	58
Figura 28: Productos de SMOS a 15 km en la zona de estudio: a) desviación estándar b) índice diario de la humedad del suelo c) coeficiente de variación.....	60
Figura 29: Simulación del SURFEX con diferentes valores iniciales de la humedad del suelo, el valor real, el máximo y el mínimo en Melbex_I.....	66
Figura 30: Simulación del SURFEX con diferentes valores iniciales, el valor real, el valor estacional y el valor mensual de la humedad del suelo en: a) Melbex_I b) Stations.....	67
Figura 31: Media de las simulaciones SURFEX de la humedad del suelo en las estaciones de medida in situ (Stations).....	68
Figura 32: Simulación SURFEX de la humedad del suelo en Melbex_I.....	70
Figura 33: Simulación SURFEX de la humedad del suelo en Melbex_II.....	70
Figura 34: Comparación de la humedad del suelo de SURFEX con a) Melbex_II, b) Melbex_I, c) Stations.....	71
Figura 35: Mapa de humedad del suelo obtenido con modelo de simulación SURFEX usando los datos de entrada del ECMWF.....	73
Figura 36: Mapas de humedad del suelo obtenidos con modelo de simulación SURFEX usando los datos de entrada del ECMWF para las diferentes estaciones hidrológicas.....	74
Figura 37: Simulación de la humedad del suelo con SURFEX_ECMWF en: a) Stations b) Melbex_I c) Melbex_II.....	75
Figura 38: Comparación de la humedad del suelo de SURFEX-ECMWF con la estaciones de medida in situ de la humedad del suelo por periodos hidrológicos en: a) Melbex_I b) Melbex_II c) Stations.....	76
Figura 39: Mapa de humedad del suelo obtenido con modelo de simulación SURFEX usando los datos de entrada del SAFRAN.....	78

Figura 40: Mapas de humedad del suelo obtenidos con modelo de simulación SURFEX usando los datos de entrada del SAFRAN para las diferentes estaciones hidrológicas.....	79
Figura 41: Simulación de la humedad del suelo con SURFEX_SAFRAN en a) Stations b) Melbex_I.....	80
Figura 42: BIAS de la humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN con la estaciones meteorológicas a) Melbex_I b) La cubera c) Stations.....	81
Figura 43: Simulación SURFEX-SAFRAN par el periodo del 1 Diciembre del 2011 hasta el 4 de Marzo del 2012 con la inicialización de: a) estaciones in situ b) valor de SMOS cercano a la observación c) valor de SMOS alejado de la observación	84
Figura 44: Evolución temporal de la humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN para el periodo del 1 Diciembre del 2011 hasta el 4 de Marzo del 2012 diferentes inicializaciones de la humedad del suelo...	85
Figura 45: Evolución temporal del RMSED de la humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN para el periodo del 1 Diciembre del 2011 hasta el 4 de Marzo del 2012 de diferentes inicializaciones de la humedad del suelo.....	85
Figura 46: Simulación SURFEX-SAFRAN para el 29 de Julio del 2012 con la inicialización de: a) estaciones in situ b) valor de SMOS cercano a la observación c) valor de SMOS alejado de la observación	86
Figura 47: Evolución temporal de la humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN para el periodo del 24 de Julio al 30 de Noviembre del 2012 con diferentes inicializaciones de la humedad del suelo.....	87
Figura 48: Evolución temporal del RMSED de la humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN para el periodo del 24 de Julio al 30 de Noviembre del 2012 con diferentes inicializaciones de la humedad del suelo.....	87
Figura 49: Relación entre SURFEX-SAFRAN inicializado con las estaciones y el producto de SMOS de nivel 4 re-escalado a 8 km.....	88
Figura 50 :Respuesta de la constante dieléctrica con la variación de Voltaje de la sonda ThetaPro.....	106
Figura 51: Respuesta de la constante dieléctrica con la humedad del suelo.....	106
Figura 52: Calibración de las sondas ThetaProbe situadas en estaciones de medidas.....	107

INDICE DE TABLAS

	PÁGS
Tabla 1: Clasificación del usos del suelo.....	12
Tabla 2: Fisiología del suelo.....	12
Tabla 3: Características de las estaciones meteorológicas	13
Tabla 4: Esquema de las principales versiones de ISBA.....	26
Tabla 5: Datos de entrada necesarios para la simulación SURFEX.....	32
Tabla 6: Parámetros de las estaciones de humedad del suelo.....	33
Tabla 7 : Distribución temporal de las estaciones hidrológicas.....	40
Tabla 8 : Distribución de imágenes SMOS de nivel 2 con más del 50% de cobertura sobre la Península Ibérica para el periodo de SON.....	41
Tabla 9: Distribución de imágenes SMOS de nivel 3 con más del 50% de cobertura sobre la Península Ibérica para el periodo de SON	43
Tabla 10: Distribución de imágenes SMOS de nivel 4 con más del 50% de cobertura en la Península Ibérica para el periodo de SON.	45
Tabla 11: Correlaciones de las estaciones con SMOS nivel 2 y nivel 4 en días con y sin precipitación.....	47
Tabla 12: Humedad del suelo y desviación estándar de los productos a 25 km de resolución espacial por periodos hidrológicos para la Península Ibérica.....	48
Tabla 13: Humedad del suelo y desviación estándar de los productos a 15 km de resolución espacial por periodos hidrológicos para la zona del 50x50 km ²	49
Tabla 14: Correlaciones entre las estaciones y SMOS nivel 2 órbita descendente para cada periodo hidrológico	51
Tabla 15: Correlaciones entre las estaciones y SMOS nivel 4 órbita descendente para cada periodo hidrológico.....	56
Tabla 16: Correlaciones del modelo de simulación SURFEX en cada una de las estaciones de medida in situ para cada periodo hidrológico.....	69
Tabla 17: Correlaciones entre las estaciones y la humedad del suelo de SURFEX para todo el periodo de estudio.....	71
Tabla 18: Datos de entrada del modelo de simulación SURFEX disponibles.....	72
Tabla 19: Correlaciones entre las estaciones y la humedad del suelo de SURFEX-ECMWF para cada periodo hidrológico y para el periodo de estudio.....	77
Tabla 20: Correlaciones entre las estaciones y la humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN por estaciones hidrológicas y para todo el periodo de estudio.....	82
Tabla 21: Correlaciones entre SURFEX-SAFRAN inicializado con las estaciones y el producto de SMOS de nivel 4 re-escalado para todo el periodo de estudio.....	88

ABSTRACT

Soil moisture is an important variable in agriculture, hydrology, meteorology and related disciplines. Despite its importance, it is complicated to obtain an appropriate representation of this variable, mainly because of its high temporal and spatial variability. In situ observations are scarce, but SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer) models, which can be used to simulate the temporal behaviour and spatial distribution of soil moisture over a given area, and satellite measurements could complement this information.

The main objective of this thesis is to generate fields of soil moisture using the SURFEX (SURFace EXternalisée) simulation model, surface modeling platform developed at the Centre National of Recherches Meteorologiques (CNRM) on Météo-France. This is a SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer) model that allows simulating the temporal behavior and the spatial distribution of the moisture of the soil in a given area. The meteorological stations located in the area of study of the Valencia Anchor Station (VAS) contain direct measurements of soil moisture and the products of the satellite SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) of ESA (European Space Agency) at different spatial resolutions obtained from CATDS (Centre Aval de Traitement des Données SMOS) and SMOS-BEC (Barcelona Expert Center), the product of level 2 of 15 km of spatial resolution, the product of level 3 of 25 km of spatial resolution and the product of level 4 of 1 km of spatial resolution will help to understand the behavior of soil moisture in the study area and will be fundamental for the generation of fields of soil moisture in the study area.

In this thesis, the period of investigation extends from December 2011 to December 2012. In this period, the HyMeX (Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment) campaign took place over the Western Mediterranean region focusing on the investigation of extreme precipitation events and related processes. Two strong episodes of precipitation occur in the Iberian Peninsula in the hydrological period of September-October-November, one located in the northwest and another in the south of the Iberian Peninsula. The different products of SMOS for the Iberian Peninsula collect these high episodes of soil moisture in a different way. The distinction between the different orbits of SMOS is important when analyzing the variability of soil moisture. The separation by hydrological periods of the soil moisture of SMOS allows to analyze in a more detailed way the variation of soil moisture. There are fewer available SMOS images of soil moisture, whose coverage is greater than 50% of data available on the Iberian Peninsula, in ascending orbit or descending orbit. The product SMOS Level 2 which is 15 km spatial resolution in ascending orbit has an availability of 17% of the images and shows the high episode of soil moisture in the south of the Iberian Peninsula and in descending orbit, where the availability of images for the Iberian Peninsula is 60%, shows both episodes of elevated soil moisture, both in the south and northwest, so

that when combining both orbits is reflected the episode of high soil moisture in the south but is accentuated episode in the northeast of the Iberian Peninsula. The SMOS level 3 product with 25 km of spatial resolution in ascending orbit, whose availability of images with more than 50% coverage on the Iberian Peninsula is 19%, shows the episode of precipitation in the south, and in descending orbit whose availability of images is 57%, shows two episodes of precipitation in the south and in the northeast of the Iberian Peninsula. The SMOS soil moisture level 3 product reflects the soil moisture episodes more sharply than the level 2 product because its spatial resolution is lower. The SMOS level 4 product with a resolution of 1 km has greater availability of images in both ascending orbiting and descending orbit than previous products. In ascending orbit there are 40% of the images available in the Iberian Peninsula and in descending orbit there is a 47% availability. The soil moisture variability in precipitation events is not reflected in ascending orbiting because the SMOS level 4 product is obtained which combines Brightness Temperature from ESA SMOS, with LST (Land Surface Temperature) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) from NASA Terra/Aqua MODIS, introducing LST from ERA-Interim to the MODIS LST/NDVI space, which allows providing soil moisture estimates independently of cloud cover, therefore, because there are fewer products available from SMOS in orbits ascending does not reflect episodes of high precipitation.

By analyzing the impact of precipitation on SMOS products it is observed that the product level 4 SMOS remains close to observations in days with precipitation as in days without precipitation.

The re-scaling of the products of SMOS allows to analyze them of more detailed form in the Iberian Peninsula as in the zone of study of the 50x50 km². The level 4 product (1km) is re-scaled at 15km and 25km, matching the SMOS pixel size at level 2 (15 km) and level 3 (25 km) respectively and the level 2 product (15 km) is re-scaled to 25 km making it coincide with the level 3 SMOS pixel (25 km). When the SMOS products are intercompared at 25 km resolution for the Iberian Peninsula, the re-scaled product of level 4 (1km) to 25 km has a correlation coefficient of 0.9 and a standard deviation of 0.012 for the hydrological period of SON and product rescaled level 2 (15 km) to 25 km has a higher standard deviation (0.03) and a correlation coefficient of 0.08. The intercomparison of SMOS products for the 50x50 km² study area for the level 4 product (1 km) re-scaled at 15 km has lower correlation values. Level 3 SMOS products (25 km) show correlation coefficients with low soil moisture measurement stations (0.003 to 0.2) as their spatial resolution is lower. The analysis of the SMOS data in the area of 50x50 km² is done with the data at 15 km of spatial resolution. The largest differences between level 2 product (15 km) and re-scaled product level 4 (1km) at 15 km are observed in the period from December to May, during this period the vines are peeled and the moisture content of the strain influences the soil moisture measure of SMOS (M.

Schwank et al., 2012). The SMOS level 2 product (15 km) underestimates soil moisture relative to the product level 4 (1 km) and its soil moisture values are more variable than those of the level 4 product (1 km).

SMOS level 2 (15 km) soil moisture is the same for all measurement stations from the study area falls within the same SMOS pixel of level 2 (15 km), has better correlations in the period of SON, being the stations of Nicolas, Cubera and Melbex_I the best values of slope shown is the whole period of study, these stations are very representative of the type of soil and vegetation of the whole area (almond, Mediterranean scrub and vines). For the SMOS level 4 product, having 1 km of spatial resolution, each in situ soil moisture measuring station is located at a different pixel for this product. When comparing the average soil moisture for all the in situ measurement stations and the average level 4 SMOS pixels for these stations, it is obtained that level 4 SMOS underestimates the soil moisture during wet periods and in the dry periods presents a good correlations. The periods where we find most variation of soil moisture is when the vines are peeled and major precipitation events occur. The best correlations are found in the stations of Nicolas, VAS and Cubera, these stations are located in vineyards.

In general for the different products of SMOS we obtain better results in the hydrological period of September, October and November. The products of SMOS of level 2 (15 km) and level 3 (25 km) to have greater spatial resolution than the product of level 4 (1km) have measures with greater variation. The SMOS product that shows the best results in the study area is level 4 (1 km), so the SMOS level 4 product (1 km) has a great potential to determine soil moisture in the zone of study. Because of its high resolution, good results are obtained when compared to in situ measurements of soil moisture

The most relevant of this thesis is to generate soil moisture maps that allow the spatialization of the point measurements of the stations and for this the SURFEX simulation model is used and the meteorological stations located in the study area that contain direct measurements soil moisture To know well the characteristics of the study area allow to define in a more accurate way the soil moisture content and its evolution throughout the study period.

SURFEX is a suitable instrument to obtain soil moisture fields in the study area. The simulation of SURFEX soil moisture is influenced by the initial soil moisture value in the model. The study of stations measuring soil moisture shows that entering a correct value in the model initialization influences the simulation of soil moisture markedly until the first heavy precipitation events occur where the model reduces these differences significantly of soil moisture since it is simulated in the surface layer of the soil that is strongly influenced by precipitation. Soil moisture simulations at each of the stations individually show good performance

with *Correlation Coefficient* (R^2) near 1. The average soil moisture of all the in situ measurement stations with respect to the mean of the simulations of each of the stations shows good results, adequately reflecting the soil moisture at the in situ measurement stations. In order to spatialize soil moisture in the study area, ECMWF data of 0.125 degrees of spatial resolution and SAFRAN data of 8 km of spatial resolution are used as input data. SURFEX soil moisture simulation using ECMWF data has worse results than SURFEX simulation using SAFRAN data because SAFRAN has higher spatial resolution and has more input data than ECMWF simulation. The soil moisture fields obtained with the SURFEX-SAFRAN combination show higher spatial variability, and values closer to in situ observations, than using SURFEX-ECMWF. SURFEX_ECMWF simulation underestimates soil moisture in each of the in situ soil moisture measurement. The SURFEX-SAFRAN simulation has a low BIAS in each of the soil moisture measurement stations and slopes very close to one along the entire hydrological period (from 0.7 to 0.9). The mean of the simulation for all soil moisture measurement stations reflects the good performance of the simulation with SURFEX-SAFRAN products.

The re-scaling of the SMOS product of level 4 to 8 km of spatial resolution allows a direct comparison of the soil moisture fields obtained with the SURFEX-SAFRAN simulation model. To determine if it is positive to use the soil moisture value to initialize the SURFEX simulation model and to analyze the sensitivity of the SURFEX simulations both local and regional, a experiment with different soil moisture initialization values of SMOS Level 4 is performed. For a wet period from 1 December 1, to 4 March, soil moisture is initialized with a value of SMOS near from the real value of soil moisture and SMOS far of the real value of soil moisture in the study area. It is obtained that when initializing with a value remote from the real soil moisture in the study area, the SURFEX_SAFRAN simulation shows high differences in the simulation of soil moisture up to the first precipitation episode where the simulation model reduces these differences significantly. The RMSED shows high values for the SURFEX-SAFRAN simulation initialized with a SMOS value far from reality. When performing the average soil moisture for this period, the moisture fields that are obtained reflect that difference in the simulations. When initializing soil moisture in a drier period from July 24 with a value of SMOS near to the actual value of soil moisture and a value of SMOS far from the actual value of soil moisture in the area, it is observed that the simulation SURFEX-SAFRAN with the initial value of SMOS near to the real value adequately reflects the evolution of soil moisture in the area with low RMSED values. On the other hand, the SURFEX-SAFRAN simulation with the initialization of the value SMOS far from the real value of the soil moisture shows greater differences until the first precipitation event in the study area.

The initialization of the SURFEX simulation model depends on the period of initialization. So, after having performed different experiments for the area of studies with different values of initialization of soil moisture, it is concluded that when we have soil moisture observations the initialization of the SURFEX simulation model with real values of soil moisture is the best result we can get. As soil moisture measurements are not available for the entire study area to perform spatialisation if we use the initial soil moisture value of SMOS in a dry period where SMOS adequately represents soil moisture the SURFEX-SAFRAN simulation adequately represent the soil moisture fields in the study area.

CAPÍTULO I

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los componentes más importantes de nuestro planeta, está presente en la naturaleza de diferentes formas, tanto en la atmósfera como en la superficie de la tierra o en los océanos. El estudio de la repartición del agua en la superficie de la tierra es muy importante tanto a nivel climático como humano. La evolución de las reservas de agua es una preocupación mundial difícil de resolver ya que los procesos de almacenamiento del agua son extremadamente variables a lo largo del tiempo. El contenido de humedad del suelo representa el almacenamiento temporal del agua en la superficie terrestre procedente de la precipitación, y generalmente está limitada a la zona de aireación. El contenido de humedad del suelo es una variable significativa en hidrología, meteorología y en los modelos climáticos, pero es difícil de caracterizar, ya que es muy variable en el tiempo y en el espacio. Adquiere gran importancia para la representación adecuada de otras variables atmosféricas y también es fundamental para establecer la interacción de los flujos de energía superficie-atmosfera (Fu et al., 1999; Mannstein, 1987; Ran et al., 2005; Sellers et al., 1988; Yao et al., 2004) y en la precipitación. La humedad del suelo en agricultura de precisión es importante para poder optimizar la cantidad de agua utilizada en el regadío. También los estudios de estrés hídrico requieren el conocimiento de este parámetro (Peñuelas et al., 1993), así como los trabajos dirigidos a la determinación de la susceptibilidad de los bosques a los incendios forestales (Pyne et al., 1996).

El principal objetivo de esta tesis es generar campos de humedad del suelo mediante la utilización del modelo de simulación SURFEX (SURFace EXternalisé) para la obtención de valores integrados en área que podrán utilizarse en actividades de validación de la humedad del suelo desde satélite en la zona de estudio de la VAS (Valencia Anchor Station) (50x50 km²) y para su utilización en modelos numéricos de generación de sistemas convectivos en los que se requiere el conocimiento de la cantidad de agua disponible. Los datos de teledetección tienen un gran potencial para establecer la variabilidad espacio-temporal de la humedad del suelo. En los últimos años se han realizado muchos estudios con el fin de determinar con precisión la humedad del suelo. Por ejemplo, SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) fue lanzado al espacio por la ESA (*Agencia Espacial Europea*) el 2 de Noviembre del 2009 para determinar la humedad del suelo y la salinidad de los océanos a escala global. Existen otras misiones espaciales relacionadas con este parámetro, como por ejemplo SMAP (Soil Moisture Active Passive), satélite de NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), que se lanzó al espacio el 31 de Enero del 2015 y que tenía como objetivo determinar la humedad del suelo a escala global. Desafortunadamente, el radar de SMAP dejó de funcionar al poco tiempo del lanzamiento perdiendo su capacidad de proporcionar estimaciones de la humedad del suelo con una resolución tan significativa de 9 km x 9 km. Los satélites Sentinel-1A y 1B, que forman parte del programa Copernicus de la

Comisión Europea y ESA, lanzados por esta Agencia en 2014 y 2016 también proporcionan productos de humedad del suelo mediante su instrumento radar Apertura Sintética (SAR) que permite obtener imágenes independientemente de las condiciones climáticas.

El modelo de simulación SURFEX (SURFace EXternalisée), plataforma de modelado de superficies desarrollada en el Centro Nacional de Recherches Météorologiques (CNRM) en Météo-France (<http://www.cnrm.meteo.fr/surfex>) es un modelo SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer) que permite simular el comportamiento temporal y la distribución espacial de la humedad del suelo en un área determinada. SURFEX se compone de varios modelos independientes como el modelo ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) para la superficie de la tierra y sus opciones de carbono, TEB (Town Energy Balance) para las zonas urbanas, y modelos independientes para lagos y océanos. La cobertura de cada una de estas superficies se obtiene con la base de datos ECOCLIMAP global (Masson et al. 2003), que combina mapas de cobertura terrestre e información por satélite. Todos estos modelos se pueden utilizar en un modo independiente o acoplado a un modelo atmosférico, en este caso, utilizamos estos modelos para crear campos de humedad de suelo en la zona de la VAS (Valencia Anchor Station).

En el capítulo 2 se presenta la zona de estudio que es la zona de validación de la misión SMOS en la Valencia Anchor Station (VAS) sobre la que se generará los mapas de humedad del suelo y se describen los diferentes datos que se utilizan a lo largo de la tesis para generar los de campos de humedad del suelo. Los datos que se utilizan son los datos in situ de las estaciones meteorológicas que se encuentran en la zona de la Valencia Anchor Station, los datos de precipitación se obtienen de las estaciones meteorológicas automáticas de AEMet (Agencia Estatal de Meteorología), a través de la base de datos de HYMEX (Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment) y los datos de humedad del suelo de SMOS en sus diferentes productos de resolución espacial (25 km, 15 km y 1km) obtenidos de CATDS (Centre Aval de Traitement des Données SMOS) y del SMOS-BEC (Barcelona Expert Center).

A continuación en el capítulo 3 se describe y se analiza el modelo de simulación SURFEX, así como también se explica los cambios realizados en el modelo de simulación para adaptarlo a la zona de estudio. En el modelo de simulación SURFEX se utilizan diferentes datos de entrada, los datos in situ de las estaciones para las simulaciones locales de las estaciones de medida de humedad del suelo y los datos de ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasting), y los datos del SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) para la espacialización de la humedad del suelo a toda la zona de estudio.

En el siguiente capítulo se analiza los diferentes productos de SMOS (nivel 2 de 15 km, nivel 3 de 25 km y nivel 4 de 1km de resolución espacial) y se estudia su comportamiento en la zona del estudio. En primer lugar se analiza cada producto de SMOS por separado tanto para la Península Ibérica como para la zona de estudio intercomparándolos con los datos de humedad del suelo in situ de las estaciones de medida. Se analizan sus ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos y se determina que producto es el más adecuado para la generación de campos de humedad en la zona de estudio. Finalmente se comparan los diferentes productos de SMOS en la zona de estudio con los datos in situ de las estaciones de medida de humedad del suelo.

En el capítulo 5 se modeliza la humedad del suelo con el modelo de simulación SURFEX. En primer lugar se simula la humedad del suelo en cada una de las estaciones de medida in situ y a continuación se validan estas simulaciones con los datos de humedad del suelo in situ de las estaciones de medida. Una vez se tiene la simulación para todas las estaciones de medida se espacializa la simulación de la humedad del suelo, generando campos de humedad del suelo para toda la zona de estudio. Para realizar la espacialización se utilizan dos tipos de datos de entrada para el modelo, datos del ECMWF con una resolución espacial de 0.125° y datos del SAFRAN con una resolución espacial de 8 km. Una vez se tiene la espacialización de la humedad del suelo para toda la zona de estudio se analiza sensibilidad de las simulaciones locales y la sensibilidad de las simulaciones regionales a diferentes inicializaciones de la humedad del suelo. Para realizar este análisis se inicializa el modelo de simulación tanto con datos in situ de la humedad del suelo como con datos de SMOS de la humedad del suelo con el fin de estudiar el impacto de la humedad del suelo de SMOS en la zona a partir de los campos de humedad del suelo generados por el modelo de simulación SURFEX. Finalmente se valida las simulaciones espaciales de la humedad del suelo con los datos de las estaciones de medida in situ.

La humedad del suelo proporcionada por SMOS en la zona de la VAS con diferentes resoluciones espaciales (25km, 15km y 1km) permite analizar la variabilidad de la humedad del suelo en la zona de estudio a distintas resoluciones espaciales según el nivel de producto y la creación de campos de humedad del suelo mediante las simulaciones de SURFEX validados con las estaciones de medida de la VAS es el principal objetivo de esta Tesis Doctoral.

Esta tesis se ha desarrollado en el marco de los proyectos MIDAS-6 (MIDAS-6/UVEG. SMOS Ocean Salinity and Soil Moisture Products. Improvements and Applications Demonstration. Ministry for Science and Innovation, Spanish Space Research Programme (MICINN AYA2010-22062-C05-03) (1 Jan 2011-31 Dec 2012)) y MIDAS-7 (SMOS and Future Missions Advanced Products and Applications (MIDAS-7/UVEG) UVEG Part. Productos y

Capítulo I

Aplicaciones Avanzadas de SMOS y Futuras Misiones (MIDAS-7/UEVEG).
Ministry for Economy and Competitiveness, Spanish Space Research Programme
(AYA2012-39356-C05-02) (1 Feb. 2013- 31 Dec 2015)) del Plan Nacional de
Investigación sobre Espacio del Ministerio de Economía, Industria y
Competitividad.

CAPÍTULO II

Zona de estudio y datos utilizados

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas de estudio que se utilizan en esta tesis son la Península Ibérica, la zona del 50x50 km², y la zona del 10x10 km² (figura 1). La Península Ibérica se utiliza para el análisis de la humedad del suelo de los diferentes productos de SMOS. La zona del 50x50 km² es la zona de validación de la misión SMOS en la Valencia Anchor Station (VAS), en dicha zona de estudio se encuentra la zona del 10x10 km² donde están las estaciones meteorológicas pertenecientes al Grupo de Climatología desde Satélites de la Universidad de Valencia.

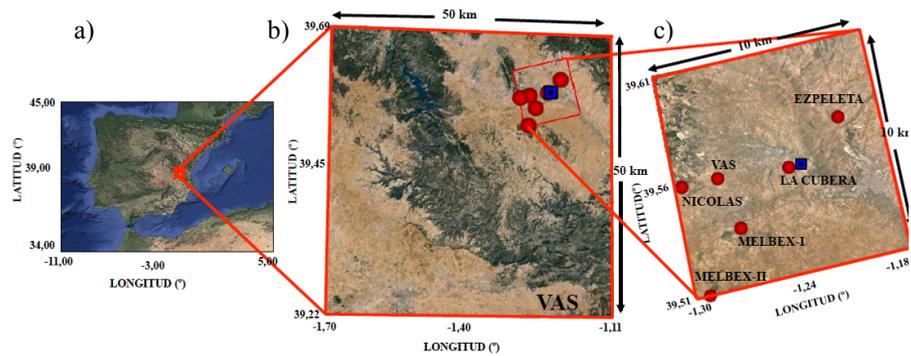


Figura 1: a) Zona de estudio de la Península Ibérica, b) zona de estudio del 50x50 km²(VAS), c) zona de estudio del 10x10km².

En la zona del 50x50km² y en la zona del 10x10 km² se realizaron las simulaciones de la humedad del suelo con el modelo de simulación SURFEX y se analizarán los diferentes productos de SMOS en una región más local con el fin de obtener una distribución espacial de la humedad del suelo. En dichas zonas se encuentran las estaciones meteorológicas de medidas de humedad del suelo in situ por tanto se validará tanto el modelo de simulación SURFEX en dicha zona.

Los datos utilizados para el desarrollo de esta tesis son los datos in situ de la humedad del suelo obtenidos de las estaciones meteorológicas pertenecientes al Grupo de Climatología desde Satélites de la Universidad de Valencia, los datos de precipitación obtenidos de las estaciones meteorológicas automáticas de AEMet (Agencia Estatal de Meteorología), a través de la base de datos de HYMEX (Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment) y los datos de humedad del suelo de SMOS en sus diferentes productos obtenidos de CATDS (Centre Aval de Traitement des Données SMOS) y del SMOS-BEC (Barcelona Expert Center).

2. ZONA DE ESTUDIO

La principal zona de estudio de esta tesis es el área de validación de SMOS que incluye la Valencia Anchor Station (VAS), representa un área de 50x50 km². Esta zona cumple con las características óptimas para ser lugar de calibración/validación de diferentes misiones de observación de la Tierra de baja resolución espacial, ya que es un lugar extenso y razonablemente homogéneo. Dicha área comprende el oeste de la Comunidad Valenciana y el este de Castilla la Mancha, esta delimitada por las siguientes coordenadas:

Latitud: 39,69° – 39,22° N

Longitud: -1,70° – -1,11° W

Es un área razonablemente homogénea, con pendientes inferiores al 2% y en algunas zonas ligeramente onduladas (8% al 15%) lo que la hace propicia para la calibración y validación de los productos de diferentes misiones espaciales como son GERB (Geostacionay Earth Radiation Budget), CERES (Couds and the Earth's Radiant Energy System), SMAP (Soil Moisture Active Passive) o SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) y, ahora más recientemente, también OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) a bordo de Sentinel-3.

Gran parte de la zona está dedicada a cultivos de secano, dominada mayoritariamente por vid y compaginada con olivos, almendros y cereal, además de ser una zona típica de matorral mediterráneo. Los cultivos de regadío son escasos. La topografía está definida por un conjunto de llanuras cuya altitud oscila entre 750-950 metros, lo que da lugar a un perfil uniforme. Estas pequeñas variaciones en la topografía hacen que el tipo de clima varíe entre semi-árido y seco-subhúmedo. La diferencia entre ambos climas está entre 800-850 metros. Las heladas y nevadas son frecuentes en invierno y los veranos son frescos y cortos. Las máximas precipitaciones tiene lugar en primavera y otoño; en verano cuando las hay suelen ser tormentas con granizada.

Durante la campaña de validación/calibración del satélite SMOS se realizó un estudio de la zona, clasificándola en unidades ambientales cuyas características son las siguientes (figura 2 y 3):

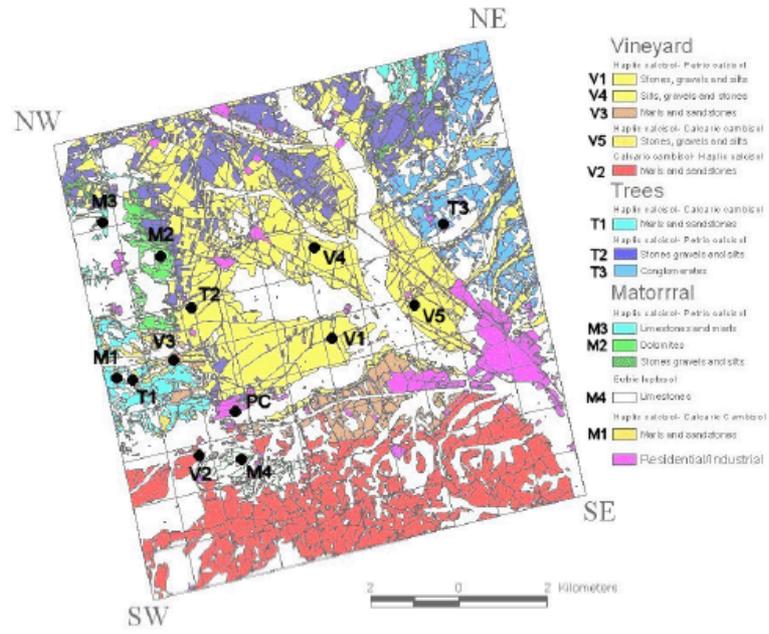


Figura 2: Usos del suelo de la zona del 10x10 km²

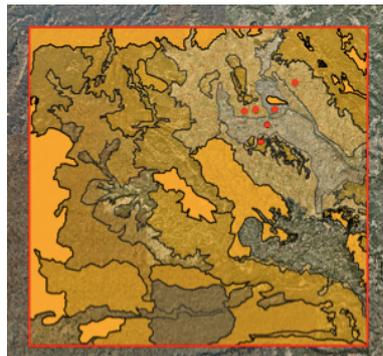


Figure 3: Unidades ambientales de la zona de estudio del 50x50 km.

Capítulo II

Los usos del suelo y la fisiología de la zona viene determinado por las tablas 1 y 2.

C.USO	
Cxg Cfq	Xerorthent/Xerochrept
Dxg Cxg	/Xerorthent
Bxg Cfq	/Xerochrept
Cxg	Xerorthent
Dxg Cxg	/Xerorthent
Cxg	Xerorthent

Tabla 1: Clasificación del usos del suelo

SC10/2 SI 4	SC10-2 Margas y areniscas	SI 4 Limos
SI 2/4 SC10/2	SI 2-4 Cantos, gravas y limos	SC10-2 Margas y areniscas
SI 2/4 SI4/2	SI 2-4 Cantos, gravas y limos	SI 4-2 Limos, gravas y cantos
SC 1 SI2/4	SC1 Conglomerados	SI 2-4 Cantos, gravas y limos
SI 2/4 SC10/2	SI 2-4 Cantos, gravas y limos	SC10-2 Margas y areniscas
SC 5/10	SC5-10 Calcáreas y margas	

Tabla 2: Fisiología del suelo

3. DATOS UTILIZADOS

Los datos que se utilizan a lo largo de esta tesis ya sean de humedad del suelo como de otros parámetros meteorológicos tales como la precipitación, la radiación, velocidad del viento etc. se obtienen de diferentes fuentes, por un lado tenemos los datos in situ obtenidos a partir de las estaciones meteorológicas y por otra parte tenemos los datos de humedad del suelo del satélite SMOS.

3.1. HUMEDAD DEL SUELO IN SITU

Los datos de humedad del suelo in situ los obtenemos de la red de estaciones de medición de la humedad del suelo del Grupo de Climatología desde Satélite (GCS) perteneciente al Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica de la Universidad de Valencia. En la tabla 3 se describen todas las características de dichas estaciones de medida.

NOMBRE	ID.	USO DEL SUELO	ESTACIÓN	TIPO DE SUELO			UNIDADES AMBIENTALES			
				AREN A	LIMO	ARCILLA	UNIDAD	C.USO	FISIGRAFIA (FAO, 1990)	LITOLOGÍA
Melbex_I	M4	Matorral		0,47	0,38	0,15	2	Cxg Cíq	Fuertem. ondulado	SC10/2 SI 4
Nicolas	M1	Matorral		0,47	0,35	0,18	91	Dxg Cxg	Fuertem. ondulado	SI 2/4 SC10/2
	T1	Árbol(almendro)								
La Cubera	V1	Viña		0,45	0,35	0,20	89	Bxg Cíq	Plano/ Ondulado	SI 2/4 SI4/2
Ezpeleta	T3	Árbol(olivo)		0,44	0,39	0,17	4	Cxg	Fuertem. ondulado	SC 1 SI2/4
VAS	VAS	Viña		0,46	0,37	0,17	91	Dxg Cxg	Fuertem. ondulado	SI 2/4 SC10/2
Melbex_II	17701	Viña(cepa)		0,45	0,29	0,26	7	Cxg	Fuertem. ondulado	SC 5/10
	17702	Viña (entre dos hileras)								

Tabla 3: Características de las estaciones meteorológicas.

Estas estaciones poseen sondas que miden la humedad del suelo en los 5 primeros centímetros cada 10 minutos. Dichas sondas son ThetaProbe ML2x de la compañía Delta-T (Gran Bretaña). Las sondas ThetaProbe, constituyen una forma precisa de medir el contenido de agua del suelo.



Figura 4: ThetaProbe ML2x (fuente: Manual ML2x)

ThetaProbe consta de una carcasa resistente al agua y, en un extremo presenta cuatro electrodos de acero inoxidable afiladas que se insertan en el suelo (figura 4). La sonda genera una señal sinusoidal de 100 MHz en el interior, que se extiende en el suelo mediante los cuatro electrodos. La impedancia que registra la sonda varía con la impedancia del suelo, que tiene dos componentes: la constante dieléctrica (ϵ) y la conductividad iónica (σ). La señal de 100 MHz de frecuencia minimiza el efecto de la conductividad iónica, de modo que los cambios en la impedancia dependen casi únicamente de la constante dieléctrica aparente del suelo, esto es debido a que la constante dieléctrica de agua (~ 81) es mucho más alta que la del suelo (normalmente 3 a 5) y que la del aire (1), de esta forma, la constante dieléctrica del suelo viene determinada principalmente por su contenido de agua.

Las sondas ThetaProbe, constituyen una forma precisa de medir el contenido de agua del suelo, ya que la salida de la sonda es de tensión proporcional a la diferencia en la amplitud de esta onda en dos puntos. En diferentes trabajos publicados por Whalley, White, Knight Zegelin, Topp y otros, (Topp et al., 1980) se muestra una correlación lineal entre la raíz cuadrada de la constante dieléctrica, ($\sqrt{\epsilon}$), y el contenido de humedad volumétrica, (θ_v).

La relación empírica entre ϵ y θ es univoca y según estos autores se expresa por:

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \epsilon - 5,5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4,3 \times 10^{-6} \epsilon^3 \quad (1)$$

ML2x Theta Probe es en realidad un sensor de detección de la constante dieléctrica (ϵ) de los suelos. La sonda ThetaProbe mide el contenido volumétrico de humedad del suelo, θ_v , lo que hace es responder a

los cambios aparentes de la constante dieléctrica en el suelo. Estos cambios se convierten en tensión de corriente, prácticamente proporcional al contenido de humedad del suelo en una amplia gama de trabajo. En el Anexo I podemos ver la calibración que se realizó para las sondas ThetaProbe situadas en la VAS.

3.2. DATOS DE PRECIPITACIÓN

Uno de los parámetros que más influye en la humedad del suelo es la precipitación. El balance hídrico relaciona de una forma directa la humedad del suelo con la precipitación. Por tanto es fundamental tener bien definido este parámetro para el análisis de la humedad del suelo. La humedad del suelo en la capa superficial del suelo esta ligada fuertemente a la precipitación y como nuestras medidas de humedad del suelo son de los primeros 5 cm la precipitación un parámetro importante a lo largo de estudio de la humedad del suelo en esta Tesis. La precipitación en la zona de estudio del 50x50 km² viene determinada por la figura 5.

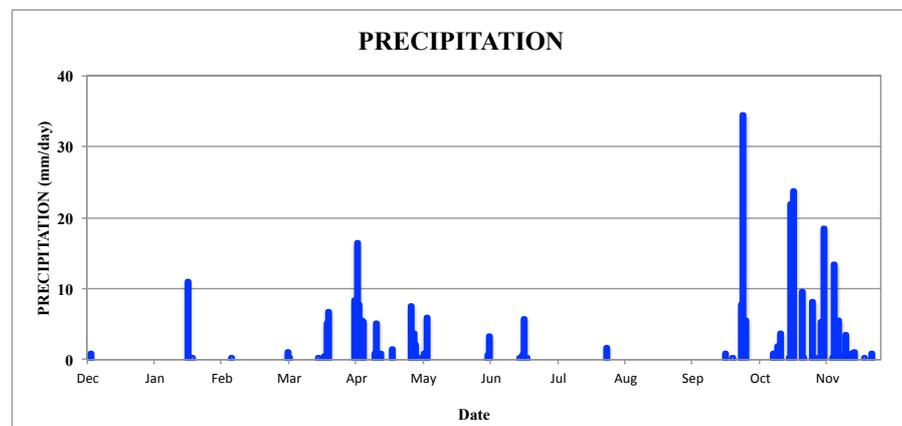


Figura 5: Precipitación en la zona de estudio del 50x50 km².

Durante todo el periodo de estudio la mayor cantidad de precipitación se produce en los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre y los meses con menor precipitación son Julio y Agosto. A finales de Septiembre se produce un evento fuerte de precipitación alcanzando el valor de 34 mm/día en pocas horas. Los datos pluviométricos se obtuvieron de las estaciones meteorológicas automáticas de AEMet (Agencia Estatal de Meteorología), a través de la base de datos de HYMEX (Hydrological cycle in the

Mediterranean Experiment). Los datos de precipitación tienen una frecuencia de 10 minutos. Sólo existe una estación de medida de la precipitación para toda la zona de las estaciones ($10 \times 10 \text{ km}^2$).

En la figura 6 se observa la distribución de la precipitación de la Península Ibérica en el periodo hidrológico más seco (JJA) y en el periodo hidrológico más húmedo (SON). En el periodo de SON refleja los eventos fuertes de precipitación que tuvieron lugar en nuestra zona de estudio y en el sur de la Península Ibérica. Estos eventos de precipitación están relacionados de forma directa con la humedad del suelo tal y como se ha mencionado anteriormente.

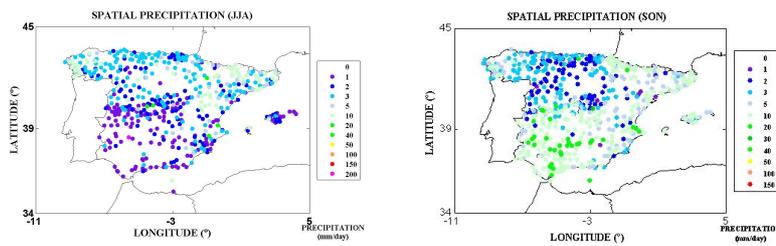


Figura 6: Distribución espacial de la precipitación en la Península Ibérica para periodos hidrológicos de JJA y SON

3.3. DATOS DE SATÉLITE SMOS

SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) es la misión de ESA dedicada a hacer observaciones globales de la humedad del suelo sobre la tierra y la salinidad de los océanos.



Figura 7: Satélite SMOS (fuente ESA)

Este satélite tiene como función monitorizar de forma sistemática dos componentes importantes en el ciclo del agua para la comprensión de los

procesos de intercambio entre la superficie y la atmósfera de la Tierra y ayuda a mejorar los modelos meteorológicos y climáticos. El satélite SMOS, que se lanzó el 2 de noviembre de 2009 y, aunque se diseñó como una misión de cinco años, se ha extendido su aprovechamiento hasta por lo menos el 2017. SMOS es una de las misiones de exploración de la Tierra de ESA, que forman el elemento de la ciencia y la investigación del programa Living Planet. Esta familia de misiones de satélites supone un avance en las técnicas de observación. El satélite SMOS posee un radiómetro interferométrico que opera en el rango de las microondas en banda L para capturar imágenes de temperatura de brillo. Estas imágenes se utilizan para obtener mapas globales de la humedad del suelo cada tres días, al conseguir una precisión de 4% y una resolución espacial de unos 50 km.

A partir de las observaciones de SMOS, se obtienen datos y productos de diferentes niveles: Nivel 2 de 15 km² de resolución espacial, Nivel 3 de 25 km² de resolución espacial y Nivel 4 de 1 km² de resolución espacial. Se considera que SMOS se satura si esta fuera del rango de valores (0-0.6m³m⁻³ de humedad del suelo).

3.3.1. HUMEDAD DEL SUELO DE SMOS NIVEL 2

El producto de nivel 2 de SMOS comprende las mediciones de humedad del suelo geo-localizada en el sistema de proyección en rejilla de igual área ISEA 4H9 (Icosahedral Snyder Equal Area) (Snyder, 1992). El producto contiene no sólo la humedad del suelo, sino también una serie de datos auxiliares (espesor óptico nadir, la temperatura superficial, parámetros de rugosidad, constante dieléctrica y la temperatura de brillo en el techo de la atmósfera y en superficie) con sus correspondientes incertidumbres. El producto de humedad del suelo está formado a partir de la órbita y la proyección en rejilla ISEA de ESA a 15 km de resolución espacial.

3.3.2. HUMEDAD DEL SUELO DE SMOS NIVEL 3

Este nivel corresponde a un re-muestreo temporal de datos acumulados. Se calcula a partir de datos del nivel 1C con una agregación espacial y temporal y una reducción de los errores cometidos por el instrumento (calibración)- CATDS (Centre Aval de Traitement des Données SMOS). Con el fin de generar productos de humedad del suelo de nivel 3 se filtra el producto de humedad del suelo de nivel 2. A continuación, se combinan en mapas donde la resolución espacial es la misma que el nivel 2 de productos SMOS (producto ISEA) o en un promedio espacial regular de rejilla lat-lon de 25 km (productos agrupados).

Los quality flags permiten descartar los valores de humedad del suelo poco fiable. Los productos ISEA son mapas diarios de la humedad del suelo, espesor óptico y la constante dieléctrica (parte real e imaginaria) se construyen a partir de productos de nivel 2. Las orbitas ascendentes y descendentes se procesan por separado.

3.3.3. HUMEDAD DEL SUELO DE SMOS NIVEL 4

Una línea de investigación clave en el SMOS-BEC es el desarrollo de algoritmos de fusión de datos para proporcionar información reducida de la humedad del suelo de SMOS a 1 km de resolución espacial. Se ha desarrollado un enfoque innovador para la reducción de la escala de SMOS, que combina datos MODIS del infrarrojo y visible con datos de SMOS de temperaturas de brillo en mapas de humedad del suelo de alta resolución. Hasta la fecha, los resultados de validación de la comparación con los datos in situ sobre un conjunto seleccionado de sitios representativos apoyan el uso de esta técnica. Los mapas de humedad del suelo de alta resolución muestran muy bien la dinámica de la humedad del suelo a 1 km sin una degradación significativa del error cuadrático medio con respecto al producto SMOS de nivel 2. (Piles et al., 2011), (Sanchez-Ruiz et al., 2014), (Piles et al., 2014). Este algoritmo ha sido implementado en las instalaciones de SMOS-BEC. Estos mapas ya están siendo utilizados como información de apoyo para las brigadas forestales dentro de la región de Cataluña. (Piles et al., 2013).

Al inicio de esta tesis el producto de SMOS de nivel 4 disponible era el de la versión 2.0 que se obtenían utilizando el algoritmo de reducción de escala (Piles et al., 2014), que combina las mediciones de temperatura de brillo de SMOS, con los datos de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), LST (Land Surface Temperature) de Aqua MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (<http://www.lpdaac.usgs.gov>). Este producto esta afectado por las nubes ya que MODIS no mide ante la presencia de nubes.

Durante el desarrollo de la tesis se lanzó la nueva versión 3.0 que tiene la novedad de introducir la LST de ERA-Interim a LST/NDVI de MODIS, de modo que proporciona estimaciones de humedad del suelo independientemente de la cobertura de nubes. A lo largo de la tesis distinguiremos ambos de productos, de forma que el producto de nivel 4 de la versión 2.0 afectado por la presencia de nubes se llamará SMOS N4 y el producto de nivel 4 de la versión 3.0 al que no le afecta la presencia de nubes se llamara SMOS N4'.

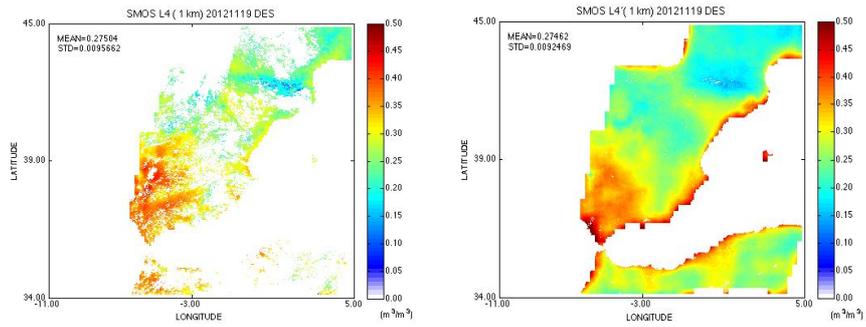


Figura 8: Producto N4 de la versión 2.0 y N4' de la versión 3.0 para el día 19 de septiembre del 2012

En la figura 8 para el día 19 de septiembre del 2012 el producto de SMOS N4 esta afectado por la presencia de nubes y el producto N4' no se ve afectado por la presencia de nubes.

CAPÍTULO III

Adaptación del Modelo de Simulación SURFEX a la Valencia Anchor Station

1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de proporcionar un instrumento adecuado para la modelización de la humedad del suelo en la zona de estudio es importante entender el funcionamiento del modelo de simulación SURFEX (SURFace EXternalisée). En este capítulo se describe el funcionamiento y adaptación del modelo de simulación SURFEX a la zona de estudio y se analizan los diferentes datos de entrada en modelo de simulación SURFEX, tales como datos de SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) (Durand et al., 1993, 2009), datos del ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasting), así como datos de las estaciones meteorológicas.

2. MODELO DE SIMULACIÓN SURFEX

Los modelos SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer) se pueden utilizar, entre otras aplicaciones, para simular el comportamiento temporal y la distribución espacial de la humedad del suelo en un área determinada. SURFEX (SURFace EXternalisée) es la plataforma de modelado de superficies desarrollada en el Centro Nacional de Recherches Météorologiques (CNRM) en Météo-France (<http://www.cnrm.meteo.fr/surfex/>), y es resultado de la externalización de parametrizaciones físicas de superficie (<http://www.umr-cnrm.fr/surfex/>) (Figura 9).

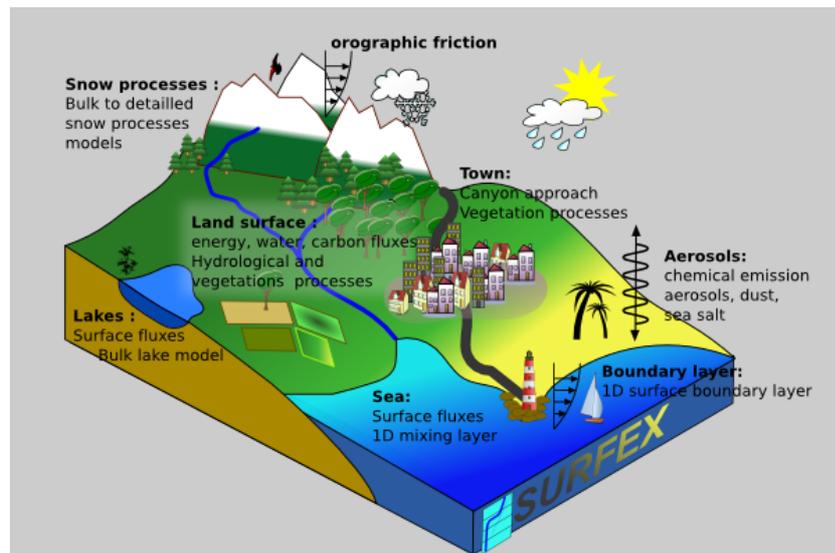


Figure 9: Esquema del modelo de simulación SURFEX

SURFEX se compone de varios modelos independientes tales como el módulo ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) (<http://www.umr-cnrm.fr/surfex/spip.php?article377>) para la superficie de la tierra y sus opciones suplementarias de carbono (<http://www.umr-cnrm.fr/surfex/spip.php?article380>), TEB (Town Energy Balance) para las zonas urbanas (<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article199&lang=en>), y los modelos independientes para lagos y océanos (<http://www.umr-cnrm.fr/surfex/spip.php?article378>). La cobertura de cada una de estas superficies se obtiene con la base de datos global de ECOCLIMAP (Masson et al. 2003), que combina mapas de cobertura terrestre e información por satélite. Todos estos modelos se puede utilizar en un modo independiente o acoplado a un modelo atmosférico (Figura 10).

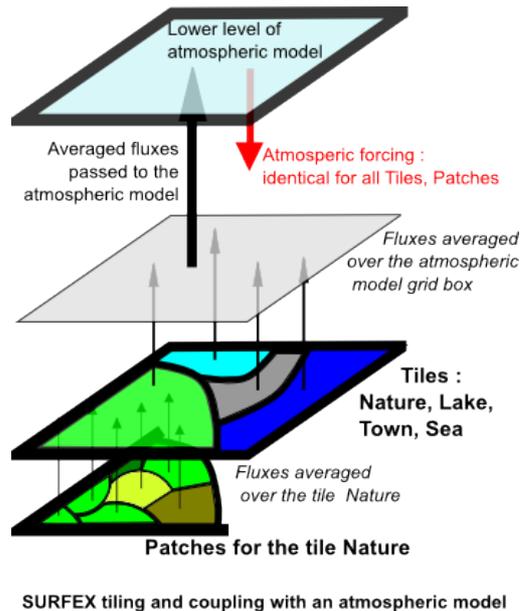


Figura 10: Componentes del modelo SURFEX en mosaico y acoplados a un modelo atmosférico

Las componentes del modelo SURFEX son:

1. Capa Naturaleza: ISBA (Interaction Soil-Biosphère-Atmosphère)
2. Capa Pueblo: TEB (Town Energy Balance)
3. Capa Mar y Océano: Flujos de la superficie por encima de la capa del mar y del océano que pueden ser tratados de una manera muy simple o mediante el uso de modelo.
4. Capa Lago: Flujos de la superficie por encima de la capa de lago que se puede tratar de una manera muy simple o mediante el modelo.

5. Capa Química y Aerosoles: Emisiones, deposición de polvo y aerosoles emitidos por la tierra y los océanos
6. Capa Asimilación de Superficie: La asimilación de las variables meteorológicas cerca de la superficie y de las variables de teledetección se puede llevar a cabo utilizando una interpolación óptima o un esquema de filtro Kalman.
7. Ecoclimap: base de datos del ecosistema terrestre.

Las variables de asimilación de cerca de la superficie y de teledetección se realizan utilizando dos técnicas de asimilación:

- El esquema de OI permite corregir el contenido de humedad del suelo y las temperaturas del suelo a partir del conocimiento del pronóstico de corto alcance de temperatura y humedad relativa a 2 metros. Los coeficientes analíticos de OI se han derivado de los experimentos Monte-Carlo en columnas individuales en situaciones de cielo despejado.

-El esquema de EKF (Ensemble Kalman Filter) permite la asimilación de las mismas variables, pero además es capaz de asimilar los datos derivados de satélite, como observaciones superficiales de humedad del suelo de AMSR-E/Aqua. Con respecto al seguimiento de la superficie terrestre, el EKF se ha utilizado para asimilar en forma conjunta el Índice de Área Foliar y mediciones de humedad del suelo en la versión ISBA-Ags donde los depósitos de biomasa son variables pronósticas.

2.1. ISBA

En nuestro estudio utilizamos el modelo ISBA que calcula los intercambios de energía y agua entre el continuo suelo-vegetación-nieve y la atmósfera. En su versión inicial, la evapotranspiración de la vegetación se controla mediante una resistencia como propuso Jarvis (1976). El modelo ISBA-A-gs (Calvet 1998) representa un modelo simplificado de la fotosíntesis, donde la evaporación se controla mediante la abertura de los estomas, el componente de las hojas que regula el equilibrio entre la transpiración y la asimilación de CO₂.

ISBA incluye varios módulos que simulan las transferencias de calor y agua en el suelo, la vegetación, la nieve y la hidrología de superficie (escorrentía superficial y profunda) (Tabla 4).

ISBA	Sol	Force restore, 2 couches, temp, eau, glace Force restore, 3 couches, temp, eau, glace Diffusion, N couches, temp, eau, glace
	Végétation	Noilhan et Planton 89 (~Jarvis) A-gs (photosynthèse et flux de CO2) A-gs et végétation interactive
	Hydrologie	Pas de processus sous maille Ruissellement de surface sous maille Drainage profond sous maille
	Neige	1 couche, albédo, densité variables (ARP/Climat, Douville 95) 3 couches, albédo, densité, eau liquide (Boone and Etchevers 2000) 1 couche, albédo, densité variables (ARP/ALD, Bazile)

Tabla 4: Esquema de las principales versiones de ISBA

ISBA-Standard

La versión estándar del ISBA utiliza un número limitado de variables que representan el estado del suelo y los intercambios de suelo-planta-atmósfera como se observa en la figura 11. Una temperatura de superficie única caracteriza la rejilla compuesta de superficies con vegetación y suelo desnudo. En cuanto al contenido del agua, el suelo está representado por 2 o 3 capas.

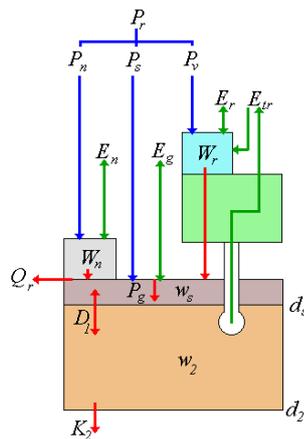


Figura 11: Descripción de la transferencia hidrológica en la versión ISBA 2-L

ISBA-A-gs

ISBA-A-gs simula conjuntamente la fotosíntesis y la conductancia estomática, junto con la respuesta de la transpiración de la hoja a la concentración de dióxido de carbono atmosférico, y permite cuantificar las incertidumbres de primer orden de la respuesta de las plantas al cambio climático. El modelo utiliza la descripción original de la respuesta de las plantas a la sequía, en base a dos estrategias contrastantes

(evitar y tolerar). ISBA-A-gs simula la biomasa sobre el suelo y el LAI (Leaf Area Index, Índice de Área Foliar), gracias a un modelo de crecimiento de la planta simple.

En la figura 12 se observa las diferencias que existen entre el ISBA-Standard y el ISBA-A-gs. El ISBA-A-gs tiene en cuenta la biomasa y el flujo de CO₂.

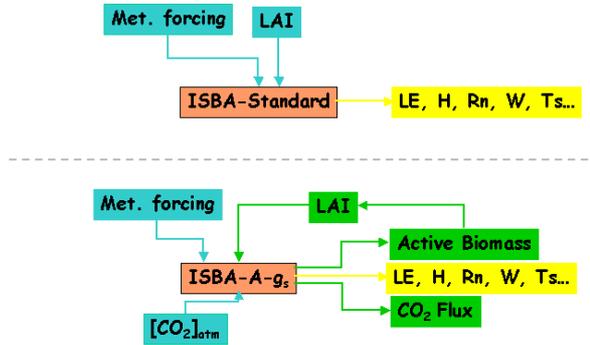


Figura 12: Esquema ISBA-Standard vs ISBA-A-gs

2.2. ECOCLIMAP

Es una base de datos global numérica del ecosistema terrestre. Tiene una resolución espacial de 1 kilómetro y se basa en gran medida en observaciones por satélite. En Europa y la cuenca mediterránea, ECOCLIMAP incluye 273 tipos de paisajes. Estas categorías son el resultado de la fusión de las bases de datos existentes, CORINE-2000, que abarca países de la UE, con una resolución espacial de 100 metros, y GLC-2000 que es una base de datos global. Mediante el uso de técnicas de clasificación automática, se pueden distinguir 273 clases. (Ver Anexo I).

En la figura 13 se observa un ejemplo de clasificación del ECOCLIMAP sobre Europa.

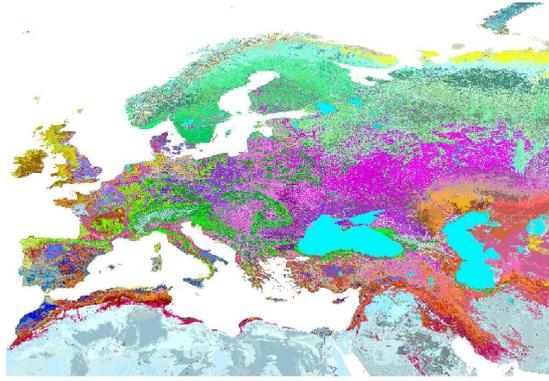


Figura 13: Ecoclimap-II sobre Europa

3. CALCULO DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN SURFEX

Al introducir en el modelo de simulación SURFEX diferentes parámetros de entrada como la temperatura del aire, humedad específica, componentes horizontales del viento, presión, precipitación total, radiación de onda larga, radiaciones directa y difusa de onda corta, SURFEX a cambio, nos devuelve flujos de momento, flujos de calor sensible y latente, temperatura de la superficie, humedad del suelo, además de otros muchos más parámetros de superficie y atmósfera.

En esta tesis nos centramos en el cálculo de la humedad del suelo.

Las ecuaciones para el contenido de humedad del suelo ω_g y ω_2 se derivan del método de fuerza-restauración (force-restored method) aplicado por Deardorff (1977) a la humedad en el suelo:

$$\frac{\partial \omega_g}{\partial t} = \frac{c_1}{\rho_\omega d_1} (P_g - E_g) - \frac{c_2}{\tau} (\omega_g - \omega_{geq}) \quad 0 \leq \omega_g \leq \omega_{sat} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega_2}{\partial t} = \frac{1}{\rho_\omega d_2} (P_g - E_g - E_{tr}) - \frac{c_3}{d_2 \tau} \max[0., (\omega_2 - \omega_{fc})] \quad 0 \leq \omega_2 \leq \omega_{sat} \quad (3)$$

donde P_g es el flujo de agua líquida que alcanza la superficie del suelo, E_g es la evaporación en la superficie del suelo, E_{tr} es la tasa de transpiración, ρ_ω es la densidad del agua líquida, y d_1 es una profundidad arbitraria de 1 centímetro. En la presente formulación, toda el agua líquida a partir del flujo P_g entra en los depósitos de ω_g y ω_2 , incluso cuando la nieve cubre las fracciones del suelo y la vegetación. El primer término de la ecuación (2) representa la influencia de los flujos atmosféricos superficiales. Los coeficientes C_1 y C_2 , y la humedad del suelo

volumétrica en equilibrio ω_{geq} , pueden calibrarse para diferentes texturas de suelo y humedades (Noilhan y Planton [1989]).

La expresión de C_1 varía en función del contenido de humedad del suelo. Para los suelos húmedos (es decir, $\omega_g \geq \omega_{wilt}$), este coeficiente se expresa como

$$C_1 = C_{1sat} \left(\frac{\omega_{sat}}{\omega_g} \right)^{b/2+1} \quad (4)$$

Para suelos muy secos (es decir, $\omega_g < \omega_{wilt}$), la transferencia en fase de vapor debe tenerse en cuenta con el fin de reproducir la física del intercambio de agua. Estas transferencias se parametrizan en función del punto de marchitez ω_{wilt} , el ω_g contenido en humedad del suelo, y la temperatura de la superficie T_s , utilizando la expresión de Gauss (Braud et al. [1993], Giordani [1993])

$$C_1 = C_{1max} \exp \left[\frac{(\omega_g - \omega_{max})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (5)$$

donde ω_{max} , C_{1max} , y σ son, respectivamente, el máximo de la abscisa, la moda y la desviación estándar de las funciones gaussianas. El otro coeficiente, C_2 , y el equilibrio del contenido en humedad, ω_{geq} , están dadas por

$$C_2 = C_{2ref} \left(\frac{\omega_2}{\omega_{sat} - \omega_2 + 0.01} \right) \quad (6)$$

$$\omega_{geq} = \omega_2 - a\omega_{sat} \left(\frac{\omega_2}{\omega_{sat}} \right)^p \left[1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_{sat}} \right)^{8p} \right] \quad (7)$$

Para la evolución ω_2 , la ecuación (3) representa el contenido de humedad sobre la capa de suelo a profundidad d_2 . El drenaje, que es proporcional a la cantidad de agua mayor a la capacidad de campo (es decir, $\omega_2 - \omega_{fc}$) se considera en el segundo término de la ecuación (ver Mahfouf y Noilhan [1994]). El coeficiente C_3 no depende de ω_2 , sino de la textura del suelo como veremos a continuación. Del mismo modo, la escorrentía se produce cuando la columna de agua o ω_2 excede el valor de saturación ω_{sat} o cuando se utiliza un esquema de escurrimiento sub-red. Los coeficientes C_{1sat} , C_{1max} , C_{2ref} y p dependen de la textura del suelo (Noilhan a Mahfouf [1996]).

De acuerdo con Giordani [1993], y Noilhan Lacarrère [1995], la composición de arena y arcilla (es decir, SAND y CLAY) se expresa en porcentaje.

El contenido volumétrico de agua saturado (m^3m^{-3}):

$$\omega_{sat} = (-1.08SAND + 494.305)x10^{-3} \quad (8)$$

El contenido volumétrico de agua en el punto de marchitez (m^3m^{-3}):

$$\omega_{wilt} = 37.1342x10^{-3}(CLAY)^{0.5} \quad (9)$$

El contenido volumétrico de agua en la capacidad de campo (m^3m^{-3}):

$$\omega_{fc} = 89.0467x10^{-3}(CLAY)^{-0.3496} \quad (10)$$

La pendiente de la curva de retención:

$$b = 0.137CLAY + 3.501 \quad (11)$$

El coeficiente térmico del suelo a saturación (Km^2J^{-1}):

$$C_{Gsat} = -1.557x10^{-2}SAND - 1.441x10^{-2}CLAY + 4.7021 \quad (12)$$

El valor de C_1 a saturación:

$$C_{1sat} = (5.58CLAY + 84.88)x10^{-2} \quad (13)$$

El valor de C_2 para $\omega_2 = 0.5\omega_{sat}$:

$$C_{2ref} = 13.815CLAY^{-0.954} \quad (14)$$

El coeficiente C_3 :

$$C_3 = 5.327CLAY^{-1.043} \quad (15)$$

El coeficiente C_{4b} :

$$C_{4b} = 5.14 + 0.115CLAY \quad (16)$$

El coeficiente C_{4ref} :

$$C_{4ref} = \frac{2(d_3-d_2)}{(d_2d_3^2)} \log_{10}^{-1} [\beta_0 + \sum_{j=1}^3 (\beta_j SAND^j + \alpha_j CLAY^j)] \quad (17)$$

donde β_j ($j = 0, 3$) son los coeficientes de 4.42×10^{-0} , 4.88×10^{-3} , 5.93×10^{-4} y -6.09×10^{-6} . Los coeficientes α_j ($j = 1, 3$) se define , -2.57×10^{-1} , 8.86×10^{-3} y 8.13×10^{-5} .

Los coeficientes para la formulación ω_{geq} :

$$a = 732.42 \times 10^{-3} CLAY^{-0.539} \quad (18)$$

$$p = 0.134 CLAY + 3.4 \quad (19)$$

En la versión estándar de ISBA de dos capas de suelo, no es posible distinguir la zona de la raíz y el total de las reservas de agua del suelo. Con la versión de tres capas, la capa más profunda del suelo puede proporcionar agua a la zona de la raíz y el contenido de agua disponible para la transpiración se define como $(\omega_{sat} - \omega_{sat}) \times d_2$.

La capa de suelo más profunda (ω_2) se divide en una capa de zona de la raíz (con una profundidad d_2) y la capa de flujo de base (con un espesor definido como $d_3 - d_2$). Las ecuaciones que rigen la evolución temporal de la humedad del suelo para las dos capas de suelo bajo la superficie están escritas por Boone et al. [1999] como:

$$\frac{\partial \omega_2}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w d_2} (P_g - E_g - E_{tr}) - \frac{C_3}{d_2 \tau} \max[0., (\omega_2 - \omega_{fc})] - \frac{C_4}{\tau} (\omega_2 - \omega_3) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega_3}{\partial t} = & \frac{d_2}{(d_3 - d_2)} \left\{ \frac{C_3}{d_2 \tau} \max[0., (\omega_2 - \omega_{fc})] - \frac{C_4}{\tau} (\omega_2 - \omega_3) \right\} \\ & - \frac{C_3}{(d_3 - d_2) \tau} \max[0., (\omega_3 - \omega_{fc})] \quad 0 \leq \omega_3 \leq \omega_{sat} \end{aligned} \quad (21)$$

donde C_4 representa el coeficiente de difusión vertical. Este se define como:

$$C_4 = C_{4ref} \bar{\omega}_{2,3}^{C_{4b}} \quad (22)$$

donde $\bar{\omega}_{2,3}$ representa la interpolación del contenido volumétrico de agua de los valores en la capa interfaz (d_2). Los coeficientes C_{4ref} y C_{4b} se definen utilizando los contenidos de arena y arcilla del suelo.

4. ADAPTACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN SURFEX A LA ZONA DE ESTUDIO

Dentro del modelo de simulación SURFEX nos centramos en el módulo ISBA, ya que esta tesis se centra en el estudio de la humedad del suelo. Para ello, se utiliza el ISBA-A-gs, que permite calcular la humedad del suelo y otros parámetros a diferentes profundidades, en concreto a 5 cm de profundidad que es lo miden en las estaciones de humedad del suelo. El modelo de simulación SURFEX necesita como datos de entrada para la simulación los descritos en la tabla 5.

Variable name	Unit	Description
Fecha de inicio		
Fecha de finalización		
PCO2	kg/m ³	Concentración de CO2
PDIR_SW	W/m ²	Radiación directa de onda corta
PSCA_SW	W/m ²	Radiación difusa de onda corta
PLW	W/m ²	Radiación de onda larga
PWINDSPEED	m/s	Velocidad del viento
PWINDDIR	Deg N	Dirección del viento
PRAIN	kg/m ² /s	Precipitación
PSNOW	kg/m ² /s	Nieve
PTA	K	Temperatura del aire
PQA	kg/kg	Humedad específica del aire
PPS	Pa	Presión en superficie
PZREF	m	Altura
PUREF	m	Altura del viento
PZS	m	Superficie orografía
PLON	degrees	Longitud
PLAT	degrees	Latitud

Tabla 5: Datos de entrada necesarios para la simulación SURFEX

No son necesarios estos parámetros para que la simulación funcione, aunque lógicamente cuantos más datos de entrada mejor funcionara el modelo de simulación SURFEX. Aparte de estos valores, también se modifica tanto el contenido de arena y arcilla así como el valor del índice de escorrentía para la zona. En cada una de las estaciones de mediada conocemos el valor de arena y arcilla pero el valor del índice de escorrentía que utilizamos para toda la zona en general no lo conocemos, de forma que utilizamos el que viene dado por “Runoff Coefficients Method. General MAUCO”.

4.1. DATOS DE ENTRADA DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Al simular la humedad del suelo en las estaciones de humedad del suelo del grupo de Climatología desde Satélite utilizamos como datos de entrada la radiación solar directa, radiación de onda corta, velocidad del viento, dirección del viento, precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, presión, altitud, longitud, latitud, porcentaje de arena y arcilla.

El modelo pide como dato de entrada la humedad específica, así que para transformar la humedad relativa en específica se utiliza:

$$ZES = 611 \exp \left[\frac{2.46 \times 10^6}{461} \left(\frac{1}{273.15} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (23)$$

$$ZE = \frac{RH}{100ZES} \quad ZRATIO = \frac{0.622ZE}{P} \quad (24)$$

$$ZQ = \frac{1}{\left(\frac{1}{ZRATIO} + 1 \right)} \quad (25)$$

donde ZQ es la humedad específica en (kg/kg), T es la temperatura del aire en (K), RH es la humedad relativa en (%) y P es la presión en (Pa).

Para cada una de las estaciones modificamos los parámetros que vienen dados en la tabla 6 en el modelo de SURFEX:

NOMBRE	ID.	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (m)	TIPO DE SUELO	
					ARENA	ARCILLA
Melbex_I	M4	1,2769 W	39,5481 N	849	0,47	0,15
Nicolas	M1	1,3074 W	39,5673 N	859	0,47	0,18
	T1					
La Cubera	V1	1,2514 W	39,5734 N	762	0,45	0,20
Ezpeleta	T3	1,2133 W	39,6003 N	781	0,44	0,17
VAS	VAS	1,2883 W	39,5707 N	804	0,46	0,17
Melbex_II	17701	1,2897 W	39,5251 N	797	0,45	0,26
	17702					

Tabla 6: Parámetros de las estaciones de humedad del suelo.

Los datos de entrada de todas estas estaciones son horarios y los datos de salida son datos diarios. Cuando se simulan las estaciones se realiza la simulación en un punto en concreto.

4.2. DATOS DE ENTRADA DE LA ESPACIALIZACIÓN

Para realizar una simulación espacial de la humedad del suelo en la zona del 50x50 km² con modelo de simulación SURFEX necesitamos datos de entrada para cada uno de los píxeles. Para esto se dispone de dos tipos de datos diferentes: los datos del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) es una organización intergubernamental independiente con el apoyo de 34 estados y los datos del SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) es un sistema de análisis de mesoescala que proporciona variables atmosféricas cercanas a la superficie. Además el modelo tiene implementado el ECOCLIMAP que nos proporciona información sobre la cobertura de la zona y el modelo GTOPO para tener información sobre la altitud del terreno. En cuanto a las texturas del suelo, es decir, para la arena y la arcilla, el modelo tiene implementada la base de datos FAO ya que no disponemos de esa información en toda la zona de simulación. Estos modelos no se utilizan cuando se simula en las estaciones de medidas ya que para cada estación tenemos todos los datos necesarios.

4.2.1. DATOS DE ENTRADA DEL ECMWF

La simulación de la humedad del suelo usando como datos de entrada los datos de ECMWF nos permite realizar una simulación de toda la zona de 50x50 km². Con una resolución espacial de 0,125°x0,125° y una resolución temporal de 12 horas, teniendo una medida a las 6:00h y otra a las 18:00h. Los datos del ECMWF que se utilizan como datos de entrada del modelo de simulación SURFEX son el punto de rocío a 2m, temperatura a 2m, presión, precipitación, componente u de la dirección del viento componente v de la dirección del viento (<http://www.ecmwf.int>).

4.2.2. DATOS DE ENTRADA DEL SAFRAN

La cadena SAFRAN-ISBA-MODCOU se ha desarrollado a través de una cooperación entre la CNRM-GAME y el Centro de Geociencias ParisTech (Habets et al., 2008). Simula el flujo de agua y energía en la superficie, y la evolución de los caudales de los ríos y de los acuíferos principales. Se desarrolló en 2003 en Météo-France. Se compone de tres modelos:

SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) es un sistema de análisis de mesoescala que proporciona variables atmosféricas cercanas a la superficie. Utiliza las observaciones de superficie, en combinación con el análisis de los modelos meteorológicos para

producir los datos meteorológicos de entrada del modelo de superficie ISBA. Estos parámetros (humedad temperatura, viento, precipitación de sólidos y líquidos, radiación solar e infrarroja), se analizan cada 300 metros sobre el nivel del mar. A continuación, se interpolan en una rejilla regular (8 x 8 km²).

ISBA (Interaction Soil-Biosphere-Atmosphere) simula el intercambio de agua y energía entre el suelo y la atmósfera. La versión utilizada simula 3 capas de suelo (superficie, zona de las raíces, zona profunda) y dos temperaturas (temperatura de la superficie global de la vegetación y la temperatura de profundidad del suelo). ISBA simula los flujos de agua con la atmósfera (evaporación, intercepción, transpiración) y el suelo (escorrentía de la lluvia y el drenaje en el suelo). Su paso de tiempo es de 5 minutos.

MODCOU utiliza como datos de entrada la escorrentía y drenaje de ISBA para calcular la evolución de las aguas subterráneas y la descarga de los ríos (en la actualidad 900 puntos simulados). Su malla varía de 64 a 1 km en función de los límites de las cuencas hidrográficas y de la red fluvial. Su paso de tiempo es de tres hora.

Los datos del SAFRAN obtenidos a través de la base de datos de HYMEX (Quintana Segui, Pere; 2015), de la base de datos MISTRAL(<http://mistrals.sedoo.fr/>) tienen una resolución espacial de 8x8 km² y una resolución temporal horaria. Los datos del SAFRAN que se introducen como datos de entrada en el modelo de simulación SURFEX son velocidad del viento, radiación de onda corta, precipitación, temperatura del aire, humedad relativa y presión.

5. DATOS DE SALIDA DEL MODELO DE SIMULACIÓN SURFEX

Los datos de salida del modelo de simulación SURFEX tienen una resolución espacial igual que los datos de entrada en cada caso y una resolución temporal diaria. La resolución temporal se puede variar y ponerla igual que los datos de entrada pero con el objetivo de poder intercomparar las simulaciones de SURFEX con los datos de SMOS se fija la resolución temporal diaria. Como datos de salida del modelo SURFEX, nos centramos en la humedad del suelo, aunque el modelo proporciona muchos más parámetros como por ejemplo, la temperatura del suelo, de la vegetación, flujos de energía, evapotranspiración, calor sensible, calor latente, flujos de drenaje, radiación neta, etc.

CAPÍTULO IV

SMOS: Humedad del suelo
sobre la VAS,
intercomparación de los
productos a distintos
niveles y validación
con medidas in situ

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se intercomparan los productos de SMOS de humedad del suelo a distintos niveles y se validan con las medidas in situ de humedad del suelo de la VAS. En primer lugar se analizan los productos de SMOS tanto de nivel 2 (resolución espacial $15 \times 15 \text{ km}^2$) como de nivel 3 (resolución espacial $25 \times 25 \text{ km}^2$) y nivel 4 (resolución espacial $1 \times 1 \text{ km}^2$) para la Península Ibérica y para la zona de estudio de la VAS ($50 \times 50 \text{ km}^2$).

Los píxeles de SMOS en la zona de estudio de la VAS están delimitados en la figura 14, donde la cuadrícula roja representa la zona de estudio de $50 \times 50 \text{ km}^2$, la rejilla amarilla corresponde al píxel de SMOS de nivel 3 ($25 \times 25 \text{ km}^2$), la rejilla azul corresponde al píxel de SMOS de nivel 2 ($15 \times 15 \text{ km}^2$) aproximado ya que en realidad no es un cuadrado como ya se menciona en el capítulo 2 y los puntos rojos son las estaciones de medida in situ de humedad del suelo.



Figura 14: Distribución de los píxeles de SMOS del nivel 2 (rejilla azul), nivel 3 (rejilla amarilla) y distribución las estaciones de medida in situ de la humedad del suelo en la zona de la VAS (puntos rojos). (Fuente Google Earth)

SMOS tiene dos orbitas, una órbita ascendente y una órbita descendente. El paso de la órbita ascendente sobre la Península Ibérica es alrededor de las 6 am y el paso de SMOS en órbita descendente sobre la Península Ibérica es alrededor de las 6 pm. Por tanto tenemos dos imágenes de SMOS sobre la Península Ibérica al día, una ascendente y otra descendente. Por una parte se analiza las imágenes diarias ascendentes y por otra parte las imágenes diarias descendentes para todo el periodo de estudio. Posteriormente se promedian ambas orbitas ascendente y descendente para obtener una sola imagen al día. De esta forma se analizan los valores de humedad del suelo en cada una de las estaciones de medida in situ pertenecientes a la zona de la VAS y se estudia de forma detallada su correlación con los diferentes niveles de SMOS. Ya que se dispone de medidas in situ cada 10 minutos en cada

una de las estaciones pertenecientes a la VAS, se analizan las correlaciones con SMOS dependiendo de la órbita que se este estudiando, es decir cuando se analiza la órbita ascendente se utilizan las medidas in situ correspondientes a la hora de medida de SMOS en órbita ascendente, 6 am, y cuando se analiza las imágenes descendentes de SMOS se utilizan las medidas in situ corresponde a las hora de pasada de SMOS en órbita descendente, es decir las 6 pm. A la hora de analizar las imágenes de SMOS resultado de la combinación de ambas órbitas (ascendente y descendente) la humedad del suelo in situ utilizada en este caso es la media diaria.

Una vez se tiene todo el periodo de estudio dividido en órbitas ascendentes y descendente se procede a dividir dicho periodo en estaciones hidrológicas (tabla 7) para poder estudiar de una forma adecuada la variabilidad de SMOS en cada uno de sus diferentes niveles y determinar que nivel de SMOS se adecua mejor a nuestra zona de estudio. De modo que el periodo de tiempo que comprende desde el 1 de Diciembre del 2011 al 29 de Febrero del 2012 corresponde a la estación hidrológica DJF (December-January-February), este periodo de tiempo esta caracterizado por sus bajas temperaturas (5°C) y eventos esporádicos de precipitación. El periodo de temporal que abarca desde el 1 de Marzo al 31 de Mayo corresponde a la estación hidrológica MAM (March-April-May), es un periodo caracterizado por sus frecuentes eventos de precipitación suave y temperaturas suaves (11°C), por otra parte el periodo más seco con menor precipitación y temperaturas más elevadas corresponde a la estación hidrológica de JJA (June-July-August) que corresponde desde el 1 de Junio al 31 de Agosto, llegando alcanzar temperaturas de 30°C y con una media de temperatura para todo el periodo de 22°C y por último el periodo hidrológico de SON (September-October-November) abarca desde el 1 de Septiembre al 30 de Noviembre del 2012, siendo este un periodo con fuertes eventos de precipitación y su temperatura media es de 8°C. En este periodo se espera que hallar una mayor variación de la humedad del suelo debido a la correlación existente entre la precipitación y la humedad del suelo en la capa superficial terrestre.

ESTACIÓN HIDROLÓGICA	INICIO DEL PERIODO	FIN DEL PERIODO
DJF	1 de diciembre del 2011	29 de febrero del 2012
MAM	1 de marzo del 2012	31 de mayo del 2012
JJA	1 de julio del 2012	31 de agosto del 2012
SON	1 de septiembre del 2012	30 de noviembre del 2012

Tabla 7 : Distribución temporal de las estaciones hidrológicas

A lo largo de nuestro periodo de estudio comprendido entre el 1 de Diciembre del 2011 hasta el 30 de Noviembre del 2012 ocurren dos eventos fuertes de precipitación en la Península Ibérica, uno situado en el nort-oeste y otro en el

SMOS: Humedad del suelo sobre la VAS, intercomparación de los productos a distintos niveles y validación con medidas in situ

sur, ambos se producen durante la estación hidrológica de SON. Estos eventos de precipitación tienen especial significación en el marco del Programa HyMEX (Ducroq et al., 2013) en lo que se refiere a la mejora del conocimiento y modelización de la generación de sistemas convectivos (Khodayar, S et al., 2016).

Una vez analizados los diferentes productos de SMOS por separado se realiza un re-escalado de los mismos para poder comparar los productos de SMOS a una misma resolución espacial. Se re-escala realizando un promedio de los píxeles que caen dentro del píxel de mayor escala espacial. Los productos de SMOS de nivel 4 (1 km) se re-escalán a nivel 2 (15 km) y a nivel 3 (25 km) para poder analizar el producto a 15 km y 25 km de resolución espacial. Los productos de nivel 2 (15 km) se re-escalán a nivel 3 (25 km) para su análisis con los productos de nivel 3 a 25 km de resolución espacial

2. INTERCOMPARACIÓN DE LOS DATOS DE SMOS

En primer lugar se analizan los datos de SMOS de nivel 2(15 km) tanto para la península como para el 50x50 de nuestra zona de estudio, tanto en órbita ascendente, descendente como el promedio de ambas. A continuación se realiza el mismo análisis para el nivel 3 (25 km) y para el nivel 4 (1 km).

2.1 DATOS DE NIVEL 2 DE SMOS

Los productos de nivel 2 de SMOS tienen una resolución espacial de 15 km. La tabla 8 indica el porcentaje de imágenes cuya cobertura es mayor al 50% de datos disponibles en la Península Ibérica. Se observa que se dispone de más imágenes en órbita descendente que en órbita ascendente y el mes donde más imágenes hay disponibles dentro del periodo de SON es Noviembre. Para todo el periodo hidrológico SON se dispone de un 76% de imágenes de SMOS entre órbita ascendente y órbita descendente.

NIVEL 2 (15 km) >50%	ORBITA ASCENDENTE	ORBITA DESCENDENTE	ASCENDENTE Y DESCENDENTE
SEPTIEMBRE(28 días)	7%	54%	61%
OCTUBRE (31 días)	19%	58%	77%
NOVIEMBRE (30 días)	23%	67%	90%
SON (89 días)	17%	60%	76%

Tabla 8 : Distribución de imágenes SMOS de nivel 2 con más del 50% de cobertura sobre la Península Ibérica para el periodo de SON.

En la figura 15 el producto de nivel 2 de SMOS en órbita ascendente muestra un episodio alto de humedad del suelo para el periodo hidrológico de SON en el sur

de la península que también se ve reflejado en el producto de nivel 2 de órbita descendente dando valores mayores de humedad del suelo, así como otro episodio de aumento de la humedad del suelo en el noroeste de la península que no se ve reflejado en órbita ascendente, esto es debido a que hay menos imágenes disponibles en órbita ascendente (17%) que en órbita descendente (60%) por este motivo al realizar el promedio de ambas imágenes no se recoge dicho episodio elevado de humedad del suelo.

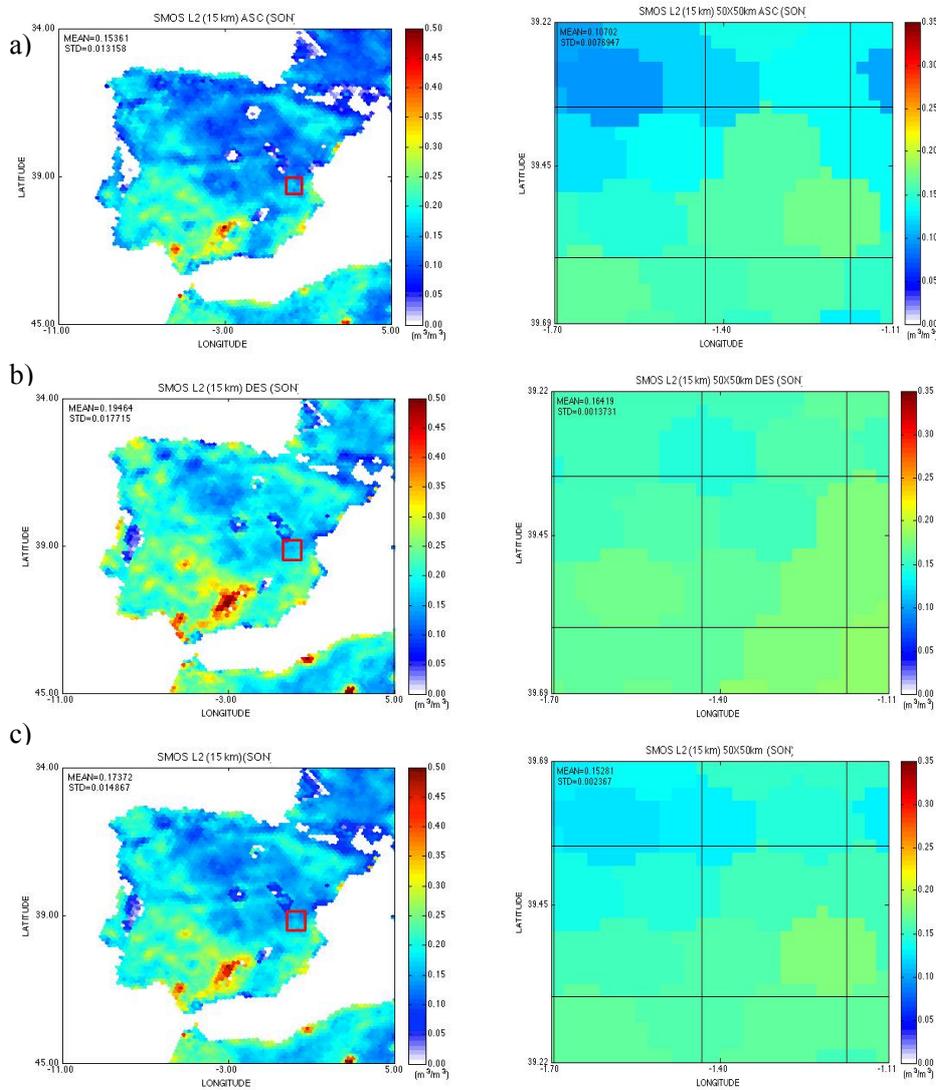


Figura 15: Imagen de SMOS nivel 2 de la península y de la zona de estudio a) Órbita ascendente b) Órbita descendente c) Combinación de las órbitas ascendente y descendente

SMOS: Humedad del suelo sobre la VAS, intercomparación de los productos a distintos niveles y validación con medidas in situ

2.2. DATOS DE NIVEL 3 DE SMOS

Los datos de SMOS de nivel 3 poseen una resolución espacial de 25 km. Para los datos de SMOS de nivel 3 durante el periodo hidrológico de SON se dispone del 79% de las imágenes con más del 50% de datos en la Península Ibérica (tabla 9). El mes donde menos información se tiene es septiembre que coincide con un episodio fuerte de precipitación pero a pesar de eso no es el mes más lluvioso.

NIVEL 3 (25 km) >50%	ORBITA ASCENDENTE	ORBITA DESCENDENTE	ASCENDENTE Y DESCENDENTE
SEPTIEMBRE(28 días)	11%	54%	68%
OCTUBRE (31 días)	19%	61%	77%
NOVIEMBRE (30 días)	27%	57%	90%
SON (89 días)	19%	57%	79%

Tabla 9: Distribución de imágenes SMOS de nivel 3 con más del 50% de cobertura sobre la Península Ibérica para el periodo de SON.

En la figura 16 los productos de SMOS de nivel 3 en órbita descendente muestra dos episodios de aumento de humedad del suelo en el noreste y sur de la Península Ibérica y en órbita ascendente sólo es capaz de representar el episodio del sur de la Península, debido nuevamente a poca disponibilidad de datos en órbita ascendente 19% frente a al 57% de órbita descendente. La combinación de ambas órbitas tal y como ocurre en el producto de SMOS de nivel 2 suaviza dichos episodios. Los productos de nivel 3 no muestran los episodios de humedad del suelo de forma tan marcada como los productos de nivel 2, esto es debido a que SMOS de nivel 3 tiene mayor resolución espacial que SMOS nivel 2.

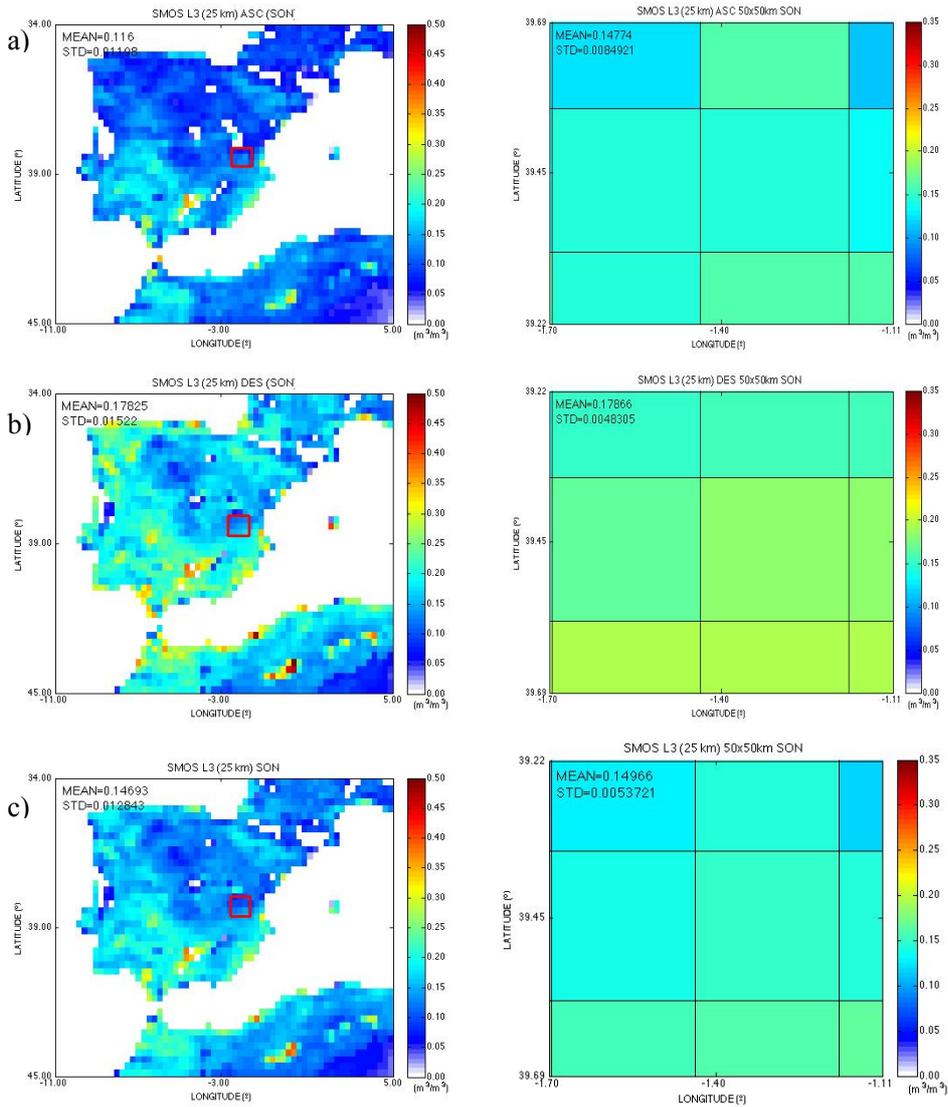


Figura 16: Imagen de SMOS nivel 3 de la península y de la zona de estudio: a) Órbita ascendente b) Órbita descendente c) Combinación de ambas órbitas ascendente y descendente

2.3. DATOS DE NIVEL 4 DE SMOS

Los datos de SMOS de nivel 4 tienen 1 km de resolución espacial. Cuando se comenzó esta tesis los productos de nivel 4 disponibles estaban afectados por las nubes, ya que como se explica en el capítulo 2, el producto de nivel 4 de SMOS es la combinación de productos de MODIS con SMOS y por tanto MODIS no mide cuando hay presencia de nubes. El resultado era una imagen de SMOS de nivel 4 afectada por la presencia de nubes. Durante el desarrollo de esta tesis se desarrolló

SMOS: Humedad del suelo sobre la VAS, intercomparación de los productos a distintos niveles y validación con medidas in situ

un producto de nivel 4 con 1 km de resolución espacial el cual no estaba afectado por la nubes, este producto introduce la LST de ERA-Interim a LST/NDVI de MODIS, de modo que proporciona estimaciones de humedad del suelo independientemente de la cobertura de nubes (figura 17), inmediatamente se pasó a analizar este nuevo producto.

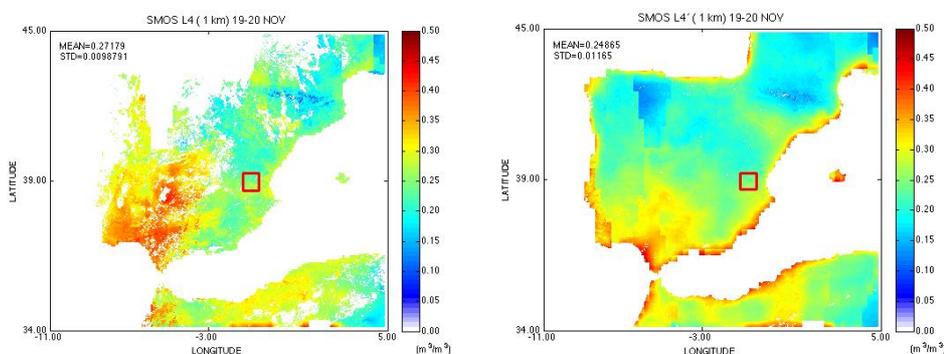


Figura 17: Diferencia entre las imágenes de SMOS de nivel 4 afectadas por la presencia de nubes y las imágenes de nivel 4 nuevas cuya presencia de nubes no le afecta para la combinación de imágenes de 19 al 20 de noviembre.

Para el periodo de SON el nivel 4 de SMOS se tienen un 92% de las imágenes disponibles en la Península Ibérica (tabla 10). Hay más imágenes disponibles en orbita descendente (47%) que en orbita ascendente (40%), siendo Noviembre el mes con mayor numero de imágenes disponibles en este periodo hidrológico y Septiembre el mes con menos disponibilidad de imágenes.

NIVEL 4 (1 km) >50%	ORBITA ASCENDENTE	ORBITA DESCENDENTE	ASCENDENTE Y DESCENDENTE
SEPTIEMBRE(28 dias)	36%	46%	82%
OCTUBRE (31 dias)	32%	45%	94%
NOVIEMBRE (30 dias)	53%	50%	100%
SON (89 dias)	40%	47%	92%

Tabla 10: Distribución de imágenes SMOS de nivel 4 con más del 50% de cobertura en la Península Ibérica para el periodo de SON.

El producto de SMOS de nivel 4 en orbita ascendente no refleja la variabilidad en la humedad del suelo, ya que tanto en nivel 2 como en nivel 4 el numero de imágenes disponibles para esta orbita son mucho menores, por tanto a la hora de realizar la media del producto de nivel 4 en orbita ascendente hace que sea más homogéneo, en cambio el producto de orbita descendente si que nos permite distinguir el episodio alto de humedad en el sur de la Península Ibérica, al combinar ambas orbitas hace que dicho episodio no sea tan significativo debido a la homogeneidad de la orbita ascendente (Figura 18).

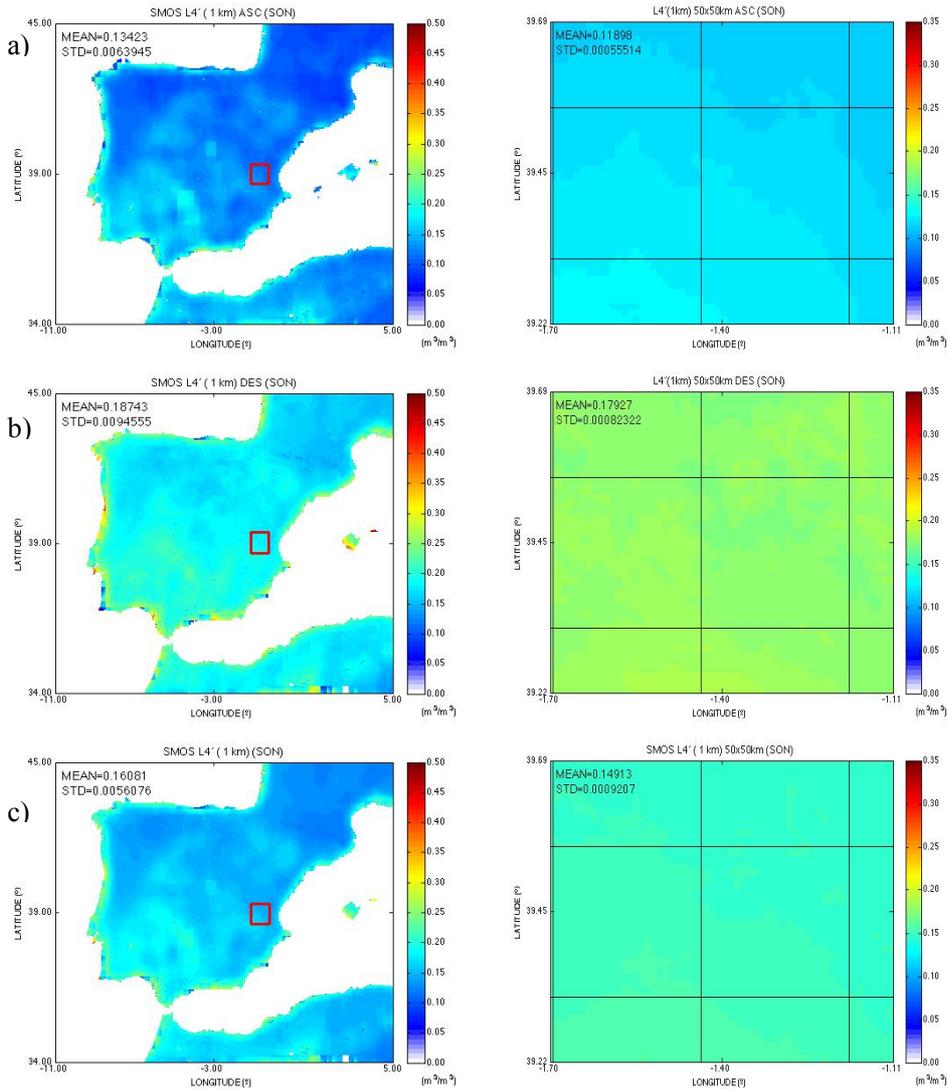


Figura 18: Imagen de SMOS nivel 4 de la península y de la zona de estudio: a) Órbita ascendente b) Órbita descendente c) Combinación de la órbita ascendente y descendente

3. VALIDACIÓN DE LOS DATOS DE SMOS CON LAS MEDIDAS INSITU

En primer lugar se analiza el impacto de la precipitación en SMOS, tanto a nivel 2 como a nivel 4, dividimos el periodo de estudio en días con precipitación y días sin precipitación. En la figura 19 se observa la relación entre SMOS tanto para

SMOS: Humedad del suelo sobre la VAS, intercomparación de los productos a distintos niveles y validación con medidas in situ

nivel 2 como para nivel 4 en orbita descendente para la media de todas las estaciones de medidas para los días con y sin precipitación.

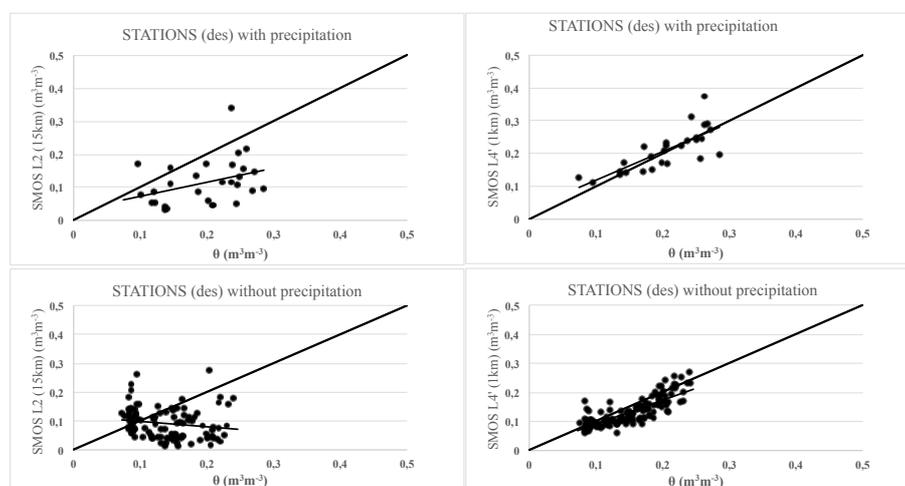


Figura 19: Correlaciones de las estaciones de medida con SMOS nivel 2 y nivel 4 para los días con y sin precipitación

Hay menos días con precipitación que sin precipitación. Para las estaciones de medida de la humedad del suelo la correlación con la medida de SMOS nivel 4 es mucho mejor que para SMOS de nivel 2 (tabla 11).

(DES) with precipitation	R²	BIAS	PENDIENTE	RMSD
VAS STATIONS vs SMOS L2	0,13	-0,08	0,3	0,08
VAS STATIONS vs SMOS L4'	0,6	0,005	0,7	0,015

(DES) without precipitation	R²	BIAS	PENDIENTE	RMSD
VAS STATIONS vs SMOS L2	0,03	-0,05	-0,14	0,05
VAS STATIONS vs SMOS L4'	0,7	-0,017	0,8	0,015

Tabla 11: Correlaciones de las estaciones con SMOS nivel 2 y nivel 4 en días con y sin precipitación.

Los días con y sin precipitación con respecto a SMOS de nivel 4 muestran una pendiente próxima a 1 lo cual indica que SMOS de nivel 4 refleja de una forma adecuada la humedad del suelo en las estaciones de medida. El producto de nivel 4' de SMOS funciona correctamente tanto los días con precipitación como los días sin precipitación.

Con el fin de analizar de una forma más detallada los diferentes productos de SMOS para toda la Península Ibérica re-escalamos los productos de SMOS de nivel 4 que tienen 1 km de resolución espacial a 25 km haciéndolos coincidir con el pixel

de SMOS de nivel 3 (25 km) y también se re-escala el producto de nivel 2 de SMOS de resolución espacial 15 km a 25 km. Del mismo modo para la zona del 50x50 km² re-escalamos el producto de nivel 4 (1km) a 15 km para hacerlo coincidir con el producto de nivel 2 (15 km) (figura 20).

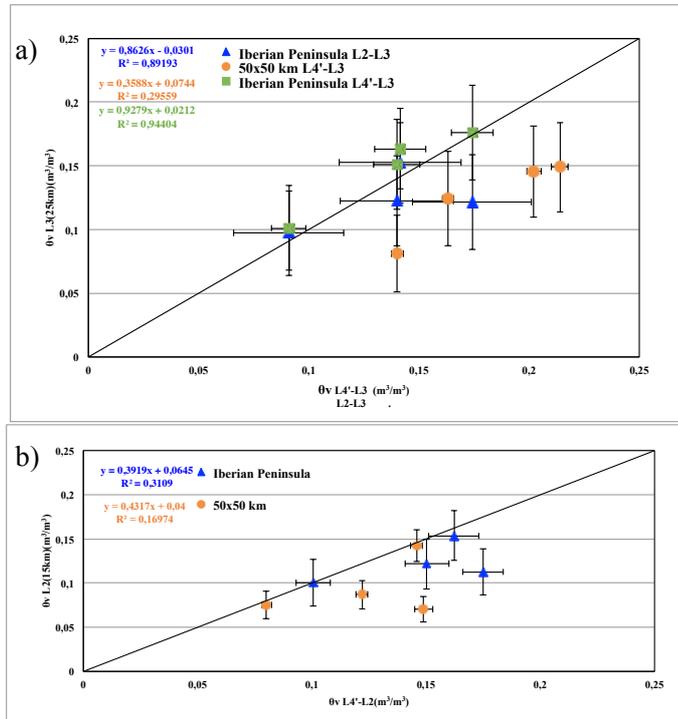


Figura 20: Intercomparación en la Península Ibérica y en el 50x50 km² por estaciones hidrológicas del producto de: a) SMOS L3 (25 km) con el producto re-escalado de nivel L4'(1 km) a L3 (25 km), b) SMOS L2 (15 km) con el producto re-escalado de nivel L4'(1 km) a L2 (15 km)

En la Península Ibérica el producto re-escalado de nivel 4'(1 km) a nivel 3 (25 km) tiene una coeficiente de correlación de 0.9 y una desviación estándar de 0,012 para el periodo hidrológico de SON (tabla 12). El producto re-escalado de nivel 2 de 15 km a 25 km tiene la una desviación estándar mayor (0.03) y un coeficiente de correlación de 0.08.

IBERIAN PENINSULA	SM_SMOS N3	STD_SMOS N3	SM_SMOS N2_N3	STD_SMOS N2_N3	SM_SMOS N4'_N3	STD_SMOS N4'_N3
DJF	0,19	0,04	0,15	0,03	0,19	0,010
MAM	0,16	0,04	0,15	0,03	0,17	0,011
JJA	0,11	0,04	0,12	0,03	0,12	0,008
SON	0,18	0,03	0,19	0,03	0,19	0,012

Tabla 12: Humedad del suelo y desviación estándar de los productos a 25 km de resolución espacial por periodos hidrológicos para la Península Ibérica.

SMOS: Humedad del suelo sobre la VAS, intercomparación de los productos a distintos niveles y validación con medidas in situ

En la zona del 50x 50 km² el producto de SMOS de nivel 2 tiene valores bajos de humedad del suelo. La re-escala del producto de nivel 4 a 15 km tiene una correlación de 0.17 y una desviación estándar de 0.003 (tabla 13).

50 x50 km ²	SM_SMOS N2	STD_SMOS N2	SM_SMOS N4'_N2	STD_SMOS N4'_N2
DJF	0,05	0,006	0,16	0,004
MAM	0,08	0,006	0,14	0,003
JJA	0,07	0,007	0,10	0,003
SON	0,17	0,009	0,18	0,003

Tabla 13: Humedad del suelo y desviación estándar de los productos a 15 km de resolución espacial por periodos hidrológicos para la zona del 50x50 km².

La re-escala de los productos de SMOS de nivel 4' (1km) muestran un comportamiento adecuado con los productos de nivel 2 (15 km) y nivel 3 (25 km). La evolución temporal en la Península Ibérica de los datos re-escalados a 25 km es consistente con los datos de SMOS de nivel 3 (figura 21), el sombreado azul es la STD de los datos de los datos re-escalados de SMOS de nivel 4 a nivel 3. Los datos de SMOS de nivel 3 tiene un coeficiente de correlación (r^2) con las estaciones de observación de la humedad del suelo del orden de 0.003 a 0.2, esto es lógico ya que el pixel es mayor y, por tanto, el error en su estimación también lo es. Se está comparando un área de 25x25 km² con un punto determinado por lo tanto el error es grande.

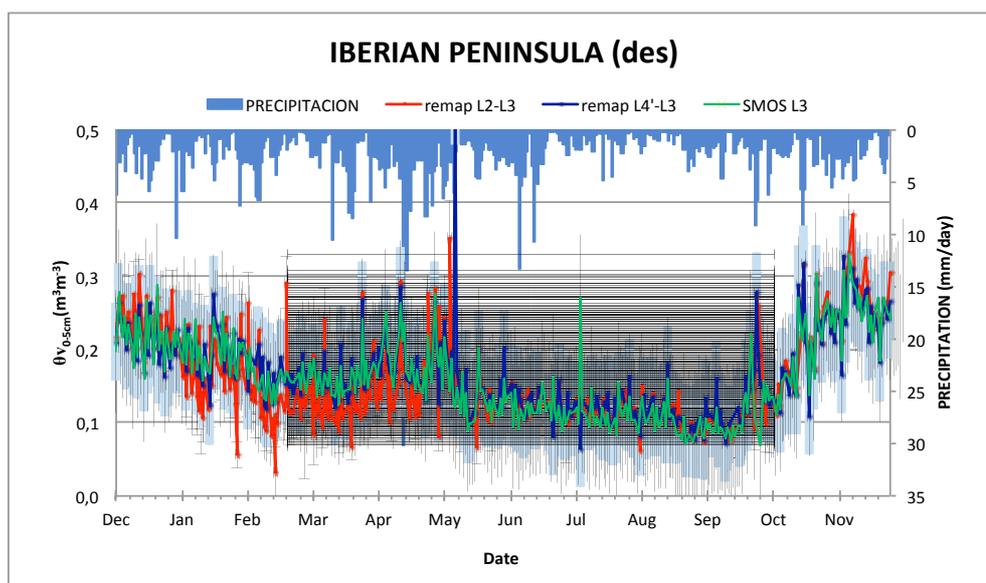


Figura 21: Evolución temporal de la humedad del suelo en la Península Ibérica con una resolución espacial de 25 km.

Para analizar los datos de SMOS en la zona de estudio de 50x50 km² utilizamos los productos a 15 km (figura 22).

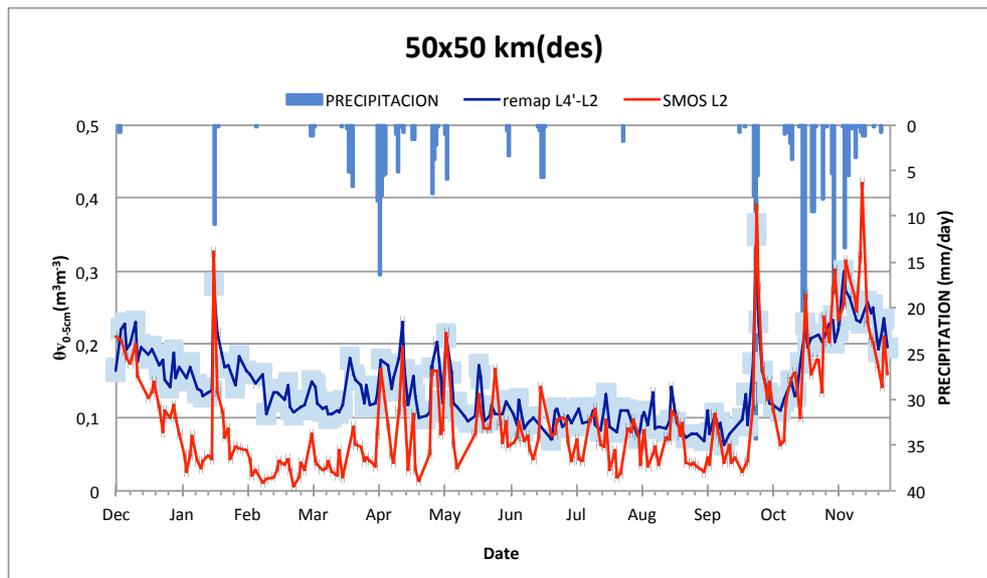


Figura 22: Evolución temporal de la humedad del suelo en la zona de estudio con una resolución espacial de 15 km.

El sombreado azul de la figura 22 es la STD de los datos re-escalados de SMOS de nivel 4 a nivel 2. Al re-escalar SMOS de nivel 4 (1 km) a nivel 2 (15 km) se observan que las mayores diferencias con respecto a SMOS nivel 2 se producen en el periodo DJF y MAM. Esto es debido a que durante ese periodo la viña esta pelada, solo se muestra la cepa, y según muestran las campañas realizadas en la zona de estudio de estudio (M. Schwank et al., 2012), el contenido en agua de la cepa de la viña influye en las medidas de SMOS. SMOS de nivel 2 subestima la humedad del suelo con respecto a SMOS de nivel 4 y las medidas de SMOS de nivel 2 de humedad del suelo son mucho más dispersas que las medidas de humedad del suelo de SMOS de nivel 4.

Al analizar el producto de humedad del suelo de SMOS de nivel 2 en cada una de las estaciones, teniendo en cuenta que solo hay una medida de SMOS para todas las estaciones ya que caen dentro del mismo pixel de SMOS de nivel 2 vemos sus diferencias significativas en la tabla 14. El periodo hidrológico donde mejores correlaciones se obtiene con las estaciones de medidas es SON, siendo las estaciones de Nicolás, y la Cubera y Melbex I las que mejores valores de pendiente muestran en todo el periodo de estudio, ya son estaciones situadas en zonas muy homogéneas y representativas del tipo de suelo y vegetación de la zona del 50x50 km² (almendro, matorral mediterráneo y viñas).

SMOS: Humedad del suelo sobre la VAS, intercomparación de los productos a distintos niveles y validación con medidas in situ

DJF(DES)	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SMOS L2	-0,07	0,011	-0,08	0,08
MELBEX_II vs SMOS L2	1,8	0,5	-0,14	0,13
VAS vs SMOS L2	2,2	0,5	-0,04	0,04
NICOLAS vs SMOS L2	1,6	0,7	-0,05	0,10
EZPELETA vs SMOS L2	0,8	0,2	-0,02	0,02
LA CUBERA vs SMOS L2	1,7	0,7	-0,05	0,04
OBSERVATIONS vs SMOS L2	1,7	0,5	-0,09	0,07

MAM(DES)	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SMOS L2	0,4	0,08	-0,08	0,04
MELBEX_II vs SMOS L2	0,4	0,04	-0,11	0,08
VAS vs SMOS L2	0,8	0,15	-0,03	0,004
NICOLAS vs SMOS L2	0,9	0,5	-0,03	0,04
EZPELETA vs SMOS L2	0,5	0,14	-0,02	0,02
LA CUBERA vs SMOS L2	0,9	0,2	-0,05	0,012
OBSERVATIONS vs SMOS L2	0,8	0,2	-0,07	0,03

JJA(DES)	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SMOS L2	0,7	0,011	-0,03	0,027
MELBEX_II vs SMOS L2	0,3	0,005	-0,05	0,053
VAS vs SMOS L2	0,2	0,002	0,012	0,008
NICOLAS vs SMOS L2	0,3	0,17	0,002	0,039
EZPELETA vs SMOS L2	0,3	0,012	0,04	0,031
LA CUBERA vs SMOS L2	0,06	0,003	0,02	0,013
OBSERVATIONS vs SMOS L2	0,3	0,009	-0,02	0,012

SON(DES)	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SMOS L2	1,1	0,6	-0,04	0,040
MELBEX_II vs SMOS L2	1,3	0,6	-0,05	0,048
VAS vs SMOS L2	1,8	0,8	0,03	0,029
NICOLAS vs SMOS L2	0,9	0,7	0,006	0,043
EZPELETA vs SMOS L2	0,8	0,7	0,011	0,019
LA CUBERA vs SMOS L2	1,0	0,7	0,02	0,029
OBSERVATIONS vs SMOS L2	1,2	0,8	-0,02	0,018

Tabla 14: Correlaciones entre las estaciones y SMOS nivel 2 órbita descendente para cada periodo hidrológico.

En la figura 23 se observa que las estaciones de la VAS y la Cubera tienen un BIAS con valores próximos al cero y la estación de Melbex_II es la que tiene los BIAS mayores.

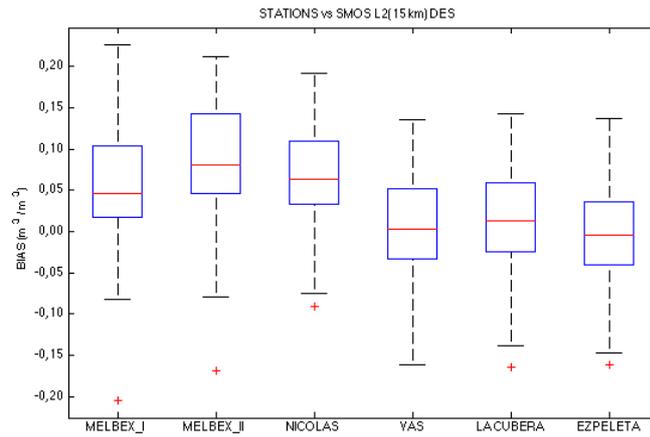


Figura 23: BIAS del producto de SMOS de nivel 2 con respecto de la estaciones de media

Para analizar la humedad del suelo en la zona de las estaciones de medida de humedad del suelo se utiliza el producto de SMOS de nivel 4 ya que tiene una resolución espacial de 1 km, por tanto a la hora de validar los datos de SMOS con medidas in situ se realiza la media los pixeles donde se encuentran cada una de las estaciones de medida de humedad del suelo in situ. En la figura 24 la evolución de la humedad del suelo de SMOS de nivel 4 (1km) para la zona de las estaciones, subestima la humedad del suelo con respecto a los valores in situ para periodos de precipitación y para los periodos secos SMOS de nivel 4 el periodo donde más variación con los valores reales de humedad del suelo coinciden cuando las viñas están peladas y hay mayores eventos de precipitación. El producto de SMOS de nivel 4 (1 km) muestra una buena correlación (0.7) con respecto a las medias de humedad del suelo in situ.

SMOS: Humedad del suelo sobre la VAS, intercomparación de los productos a distintos niveles y validación con medidas in situ

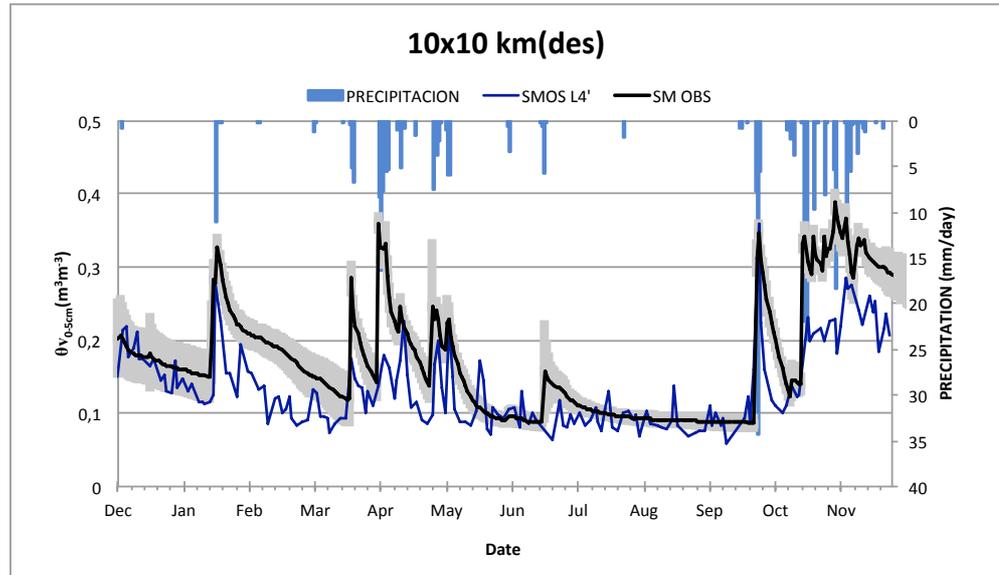


Figura 24: Evolución temporal de la humedad del suelo en la zona de las estaciones con una resolución espacial de 1 km.

La medida de humedad del suelo de SMOS de nivel 4 en cada una de las estaciones de medida de humedad del suelo in situ corresponde a un pixel de medida diferente. Cuando se analiza todas las estaciones de medida in situ en conjunto se realiza una media de todas las observaciones y una media de todos los pixeles correspondientes a cada una de las estaciones. En la figura 25 se muestra el comportamiento de cada una de las estaciones con las medidas de humedad del suelo de SMOS de nivel 4 para cada una de las estaciones de medidas separadas por periodos hidrológicos.

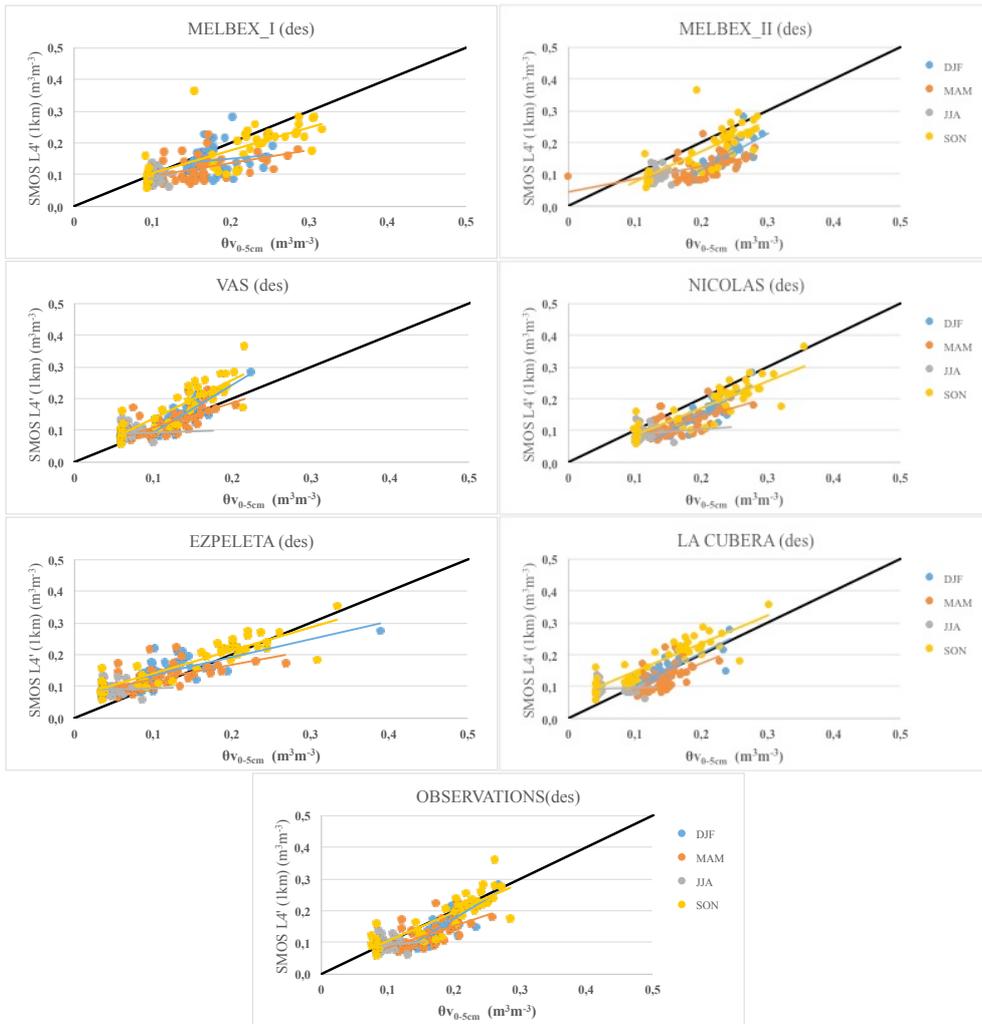


Figura 25: Comportamiento de la humedad del suelo de SMOS nivel 4 en cada estación de medida in situ.

SMOS: Humedad del suelo sobre la VAS, intercomparación de los productos a distintos niveles y validación con medidas in situ

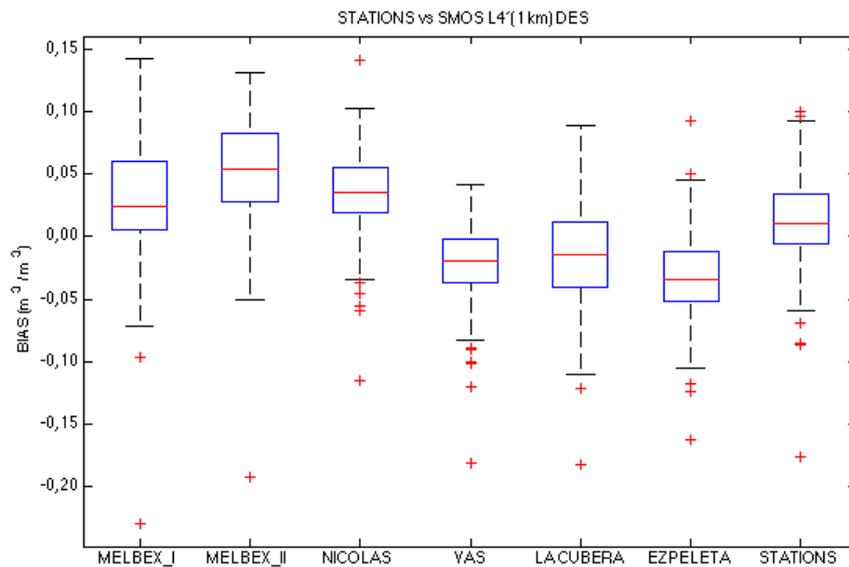


Figura 26: BIAS entre el producto de SMOS de nivel 4^o y las observaciones

En la figura 26 las estaciones que menor BIAS tienen son Nicolás y Melbex_I, teniendo BIAS próximos a cero y el BIAS mayor lo encontramos en Melbex_II.

Las mejores relaciones de la humedad del suelo se obtienen para las estaciones de Nicolás, la VAS y la Cubera con pendientes de 0,8, 1,2, 0,9 respectivamente para el periodo hidrológico de SON, todas estas estaciones tienen en común el tipo de suelo, ya que todas están situadas en viñas. Y en general cuando tomamos la media de todas las estaciones de medida in situ juntas (observaciones) también se obtiene una correlación 0,7 para nivel 4 tal como se muestra en la tabla 15.

DJF(DES)	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SMOS L4'	0,2	0,02	-0,03	0,03
MELBEX_II vs SMOS L4'	1,1	0,6	-0,08	0,08
VAS vs SMOS L4'	1,5	0,8	0,012	0,011
NICOLAS vs SMOS L4'	1,1	0,9	0,006	0,05
EZPELETA vs SMOS L4'	5,6	0,5	0,03	0,03
LA CUBERA vs SMOS L4'	1,0	0,7	0,004	0,009
OBSERVATIONS vs SMOS L4'	1,3	0,7	-0,03	0,02

MAM(DES)	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SMOS L4'	0,4	0,2	-0,04	0,07
MELBEX_II vs SMOS L4'	0,6	0,3	-0,08	0,10
VAS vs SMOS L4'	0,8	0,5	0,005	0,02
NICOLAS vs SMOS L4'	0,6	0,9	0,003	0,07
EZPELETA vs SMOS L4'	0,5	0,3	0,02	0,007
LA CUBERA vs SMOS L4'	0,8	0,4	-0,02	0,04
OBSERVATIONS vs SMOS L4'	0,7	0,4	-0,03	0,06

JJA(DES)	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SMOS L4'	0,4	0,02	-0,012	0,013
MELBEX_II vs SMOS L4'	0,4	0,04	-0,04	0,038
VAS vs SMOS L4'	0,07	0,0014	0,03	0,026
NICOLAS vs SMOS L4'	0,16	0,8	0,013	0,025
EZPELETA vs SMOS L4'	0,07	0,003	0,05	0,044
LA CUBERA vs SMOS L4'	0,06	0,009	0,03	0,027
OBSERVATIONS vs SMOS L4'	0,17	0,013	-0,003	0,003

SON(DES)	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SMOS L4'	0,7	0,5	-0,02	0,020
MELBEX_II vs SMOS L4'	0,9	0,6	-0,03	0,027
VAS vs SMOS L4'	1,2	0,7	0,04	0,050
NICOLAS vs SMOS L4'	0,8	0,9	0,03	0,023
EZPELETA vs SMOS L4'	0,7	0,8	0,03	0,038
LA CUBERA vs SMOS L4'	0,9	0,8	0,04	0,047
OBSERVATIONS vs SMOS L4'	0,9	0,7	-0,003	0,002

Tabla 15: Correlaciones entre las estaciones y SMOS nivel 4 orbita descendente para cada periodo hidrológico.

Los datos con mayor correlación son los de nivel 4 ya que su resolución espacial es menor. En general para los tres niveles el periodo que mejores correlaciones tiene es SON, este es un periodo de gran variabilidad con respecto a la humedad del suelo, por tanto SMOS refleja de un modo adecuado esa variabilidad.

Con el fin de analizar más detalladamente estos datos de SMOS calculamos la desviación estándar (STD), el índice diario de la humedad del suelo ($SM_{\text{index},i}$) y el coeficiente de variación (C_v).

El índice diario de humedad del suelo ($SM_{\text{index},i}$) viene dado por la siguiente formula:

$$SM_{\text{index},i} = \frac{(SM_{i+1} - SM_i)}{SM_i} \quad (26)$$

SMOS: Humedad del suelo sobre la VAS, intercomparación de los productos a distintos niveles y validación con medidas in situ

Donde SM_{i+1} es la humedad del suelo del día siguiente y SM_i es la humedad del suelo del día que se considera.

El coeficiente de variación (C_v) se define como el cociente de la desviación estándar (STD) por el valor medio (\bar{x}).

$$C_v = \frac{STD}{\bar{x}} \quad (27)$$

En la Península Ibérica al re-escalar todos los productos de SMOS a 25 km observamos que el producto de nivel 4 re-escalado a 25 km muestra una desviación estándar (STD) menor que el producto de nivel 3 y el producto de nivel 2 que al tener mayor dispersión en las medidas de humedad del suelo muestra desviaciones estándar más dispersas aunque menores que las de nivel 3. En cuanto al índice diario de humedad del suelo ($SM_{index,i}$) los productos de SMOS son consistentes pero el que mayor diferencias muestra es el producto re-escalado de nivel 2 a 25 km debido a su dispersión en los datos de humedad del suelo. Por tanto el producto que tiene un coeficiente de variación (C_v) mejor es el producto de nivel 4 a 25 km (Figura 27).

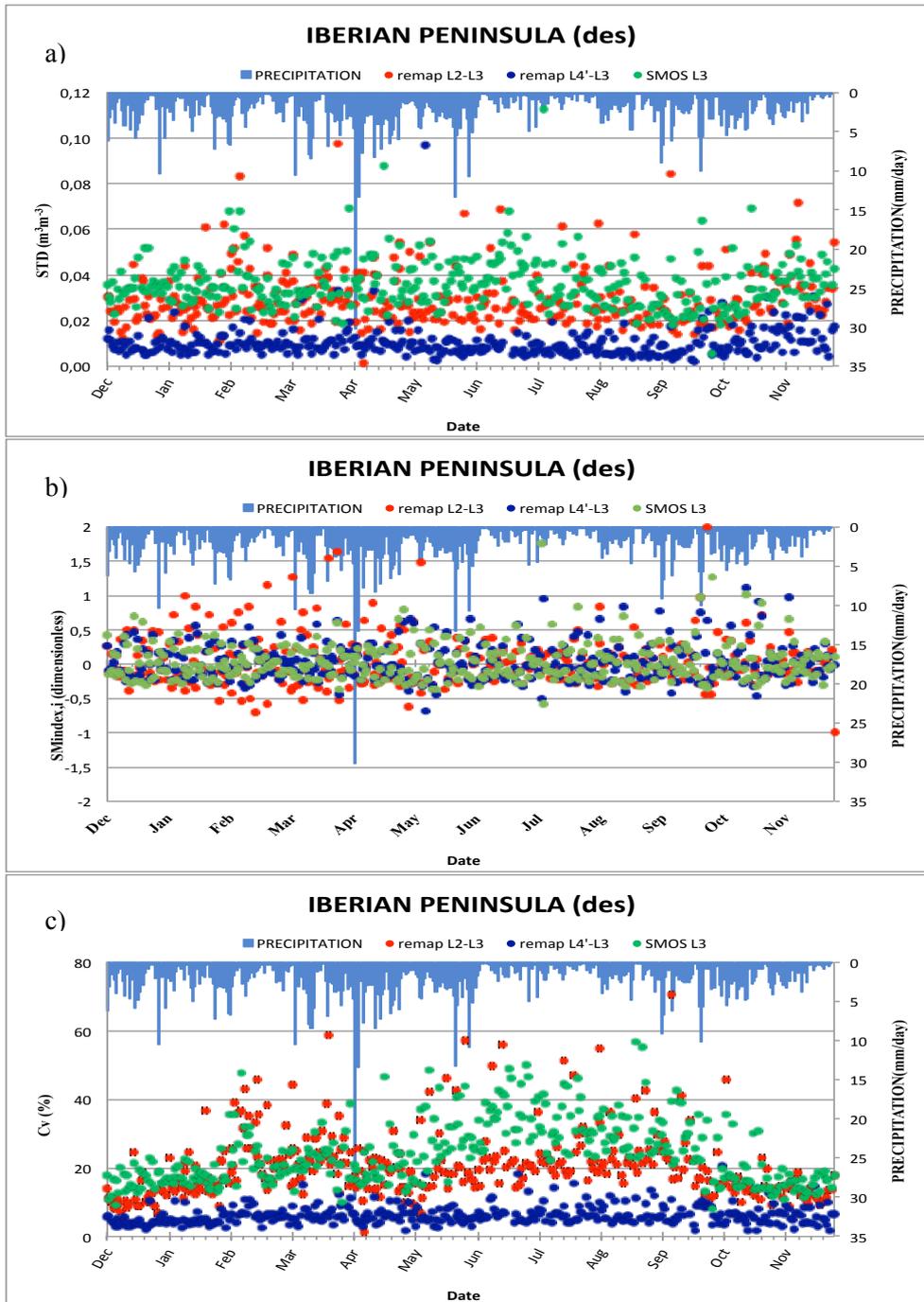


Figura 27: Productos de SMOS a 25 km en la Península Ibérica: a) desviación estándar b) índice diario de la humedad del suelo c) coeficiente de variación

SMOS: Humedad del suelo sobre la VAS, intercomparación de los productos a distintos niveles y validación con medidas in situ

El cálculo de la desviación estándar (STD), el índice diario de la humedad del suelo ($SM_{index,i}$) y el Coeficiente de variación (C_v) en la zona de estudio (figura 28) muestra que la re-escala de SMOS nivel 4 (1 km) a 15 km tiene una desviación estándar menor que el producto de nivel 2 de SMOS, el índice diario de humedad del suelo en la zona del 50x50 km es mejor para la re-escala de nivel 4 a 15 km que para el nivel 2 por tanto los datos de nivel 4 son más consistentes respecto al día anterior que los datos de nivel 2 y en cuanto al coeficiente de variación es mucho menor para la re-escala de nivel 4 a 15 km que para el nivel 2.

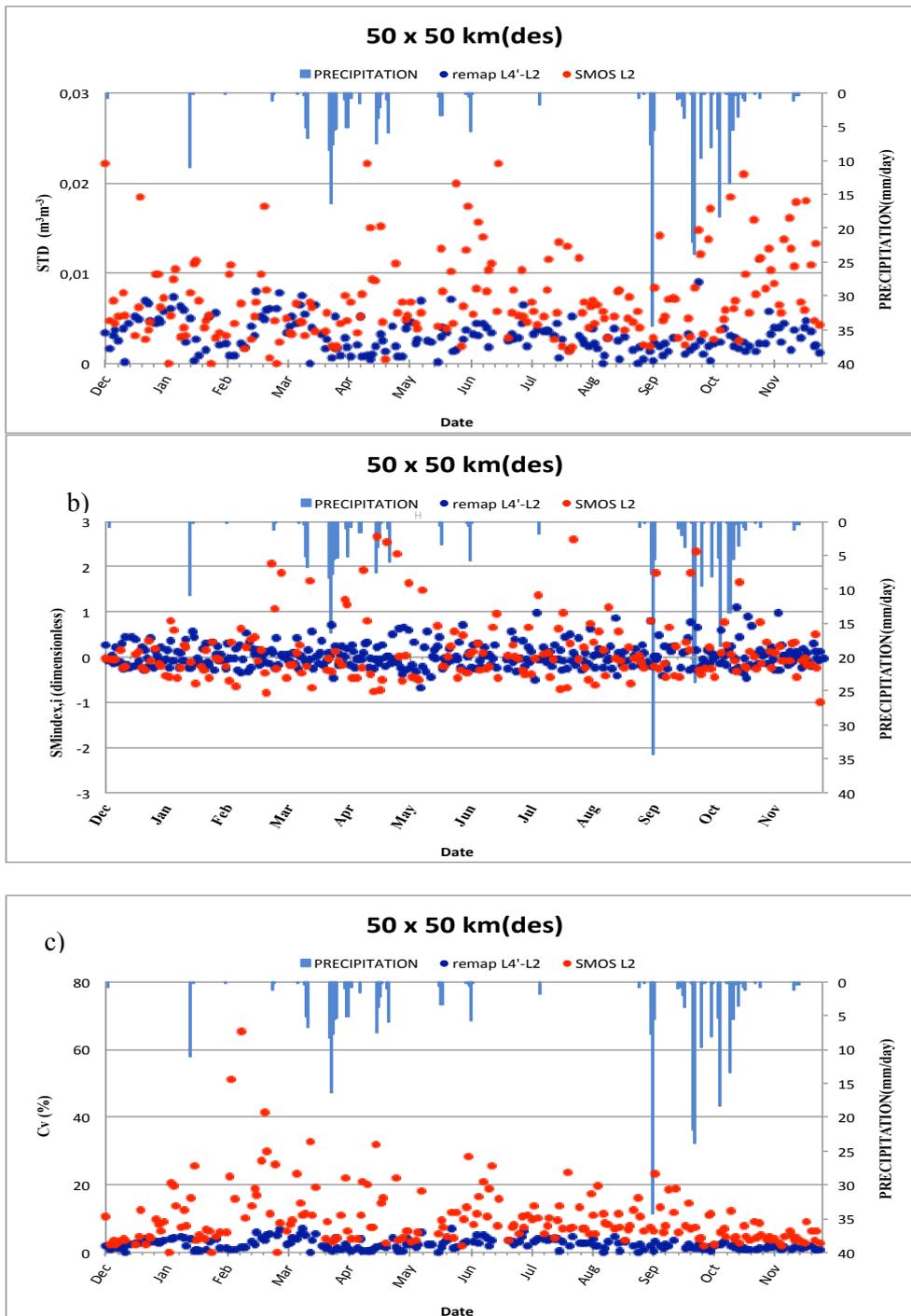


Figura 28: Productos de SMOS a 15 km en la zona de estudio: a) desviación estándar b) índice diario de la humedad del suelo c) coeficiente de variación

SMOS: Humedad del suelo sobre la VAS, intercomparación de los productos a distintos niveles y validación con medidas in situ

Los productos de humedad del suelo de nivel 3 de SMOS y de nivel 2 al tener unas resoluciones espaciales mayores que el producto de nivel 4, producen una mayor dispersión en las medidas de humedad del suelo. El nivel 4 de SMOS de 1 km de resolución espacial es un producto adecuado para la medida de la humedad del suelo en la zona de estudio, este producto tiene gran potencial a la hora de determinar la humedad del suelo, tiene un buen comportamiento tanto para la zona de medida como para cada una de las estaciones de medidas in situ. Su baja resolución hace que sea el más adecuado a la hora de validarlo con las estaciones de medida y refleja un buen comportamiento de la humedad del suelo en cada una de las estaciones.

CAPÍTULO V

Modelización de la humedad del suelo con SURFEX

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se modeliza la humedad del suelo utilizando el modelo de simulación SURFEX (SURFace EXternalisé). Para analizar el buen comportamiento del modelo SURFEX en la zona de estudio se utilizan las diferentes estaciones de medida in situ de la humedad del suelo. En primer lugar se adapta el modelo de simulación SURFEX a la zona de estudio (ver capítulo 3) y se simula la humedad del suelo en todas las estaciones de medida in situ disponibles en la zona. Para simular en las estaciones de medida de humedad del suelo, se utilizará diferentes valores iniciales de humedad del suelo para investigar el impacto en la simulación y determinar que valor inicial de humedad del suelo es el más adecuado y con el que se obtiene mejores simulaciones.

Una vez determinado el valor más adecuado para la inicialización procedemos a espacializar la humedad del suelo para toda la zona de estudio del 50x50 km². El objetivo es proporcionar un instrumento adecuado para la creación de campos de humedad del suelo en la zona ya que nunca se dispone de suficientes medidas in situ. El modelo de simulación SURFEX necesita datos de entrada en cada pixel para simular la humedad del suelo en cada uno de ellos, como no se disponen de datos de entrada en cada uno de los pixeles de la zona de estudio se utiliza en primer lugar para la espacialización como datos de entrada los datos del ECMWF que tiene una resolución espacial de 0.125°x0.125°. Una vez se tiene la espacialización para toda la zona de estudio con los datos de entrada del ECMWF se analiza su comportamiento en cada una de las estaciones de medida de humedad del suelo in situ. Posteriormente se simula la humedad del suelo con datos de entrada del SAFRAN que es un sistema de análisis de mesoescala que proporciona variables atmosféricas cercanas a la superficie (ver apartado 4.2.2 del capítulo 3) y tiene una resolución espacial de 8x8 km² y finalmente se valida las simulaciones espaciales con las observaciones. Posteriormente se procede a determinar la sensibilidad de las simulaciones tanto locales como regionales a una inicialización real de la humedad del suelo con SMOS. Para finalizar se realizan unos experimentos de sensibilidad para determinar el impacto de la utilización de datos de SMOS de alta resolución como inicialización en el modelo SURFEX. Este experimento se realizarán en dos periodos, uno húmedo y otro seco con el fin de determinar la sensibilidad del modelo y el impacto de la inicialización en la simulación.

2. VALIDACIÓN DE LAS SIMULACIONES LOCALES CON MEDIDAS IN SITU Y COMPARACIÓN CON SMOS

El modelo de simulación SURFEX necesita datos de entrada tal como se explica en el apartado 4 del capítulo 3 (ver tabla 5). Para la simulación de la

humedad del suelo en cada una de las estaciones meteorológicas se utilizan datos meteorológicos reales de dichas estaciones y datos de precipitación del AEMET, tal y como se explica en el apartado 4.1 del capítulo 3. El modelo de simulación SURFEX se ha adaptado a cada una de las estaciones de medida de humedad del suelo, ya que se conoce las características fisiológicas en cada estación de medida in situ.

Para determinar la influencia del valor inicial de la humedad del suelo en la simulación SURFEX en cada una de las estaciones de medida se realiza la simulación con el valor máximo de humedad del suelo de las estaciones para todo el periodo de estudio, el valor mínimo y el valor real. En la figura 29 la simulación de la humedad del suelo en la estación Melbex_I se ve influenciada por el valor inicial de la humedad del suelo hasta el mes de marzo donde ocurren las primeras precipitaciones importantes. En la precipitación ocurrida en el mes de Enero se produce un acercamiento en el comportamiento de la humedad del suelo de las tres simulaciones pero es con las precipitaciones siguientes donde el modelo recupera la tendencia de la humedad del suelo en todas las simulaciones, debido a que simulamos en la capa superficial del suelo la humedad viene determinada por la precipitación, la respuesta de la humedad del suelo es inmediata frente a los eventos de precipitación, por lo tanto cuando la precipitación es suficientemente alta el modelo responde a esos cambios de manera correcta. De modo que el modelo de simulación muestra un valor diferente de la humedad del suelo hasta que ocurre los primeros eventos de precipitación, desde ese momento la tendencia de la humedad del suelo es muy similar hasta el final de la simulación.

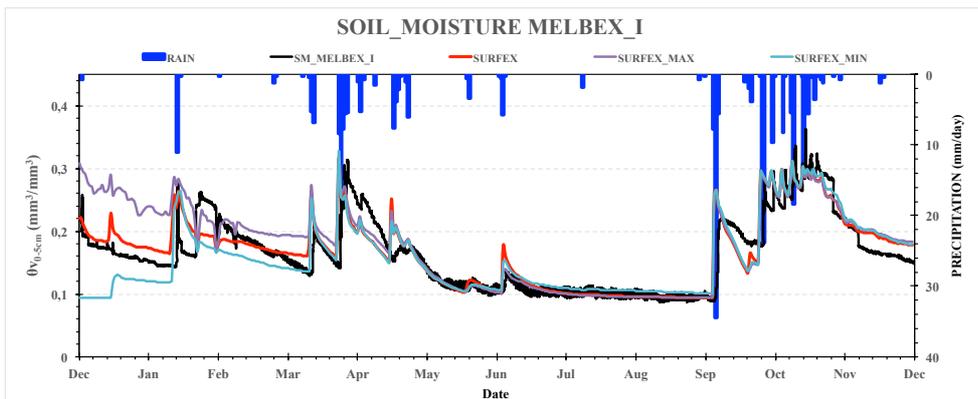


Figura 29: Simulación del SURFEX con diferentes valores iniciales de la humedad del suelo, el valor real, el máximo y el mínimo en Melbex_I

En la figura 29 se observa que el valor con que se inicializa la humedad del suelo influye en la simulación del modelo SURFEX, por tanto con el fin de ver cual es el mejor valor de entrada de la humedad del suelo en el modelo de simulación se

realizaron varias simulaciones. Se simula con el valor inicial real de la humedad del suelo que será la media de la humedad del suelo para ese día, con la media de la humedad del suelo de los meses de Diciembre-Enero-Febrero (1ª de las estaciones hidrológicas) y por último con la media de la humedad del suelo del mes de Diciembre.

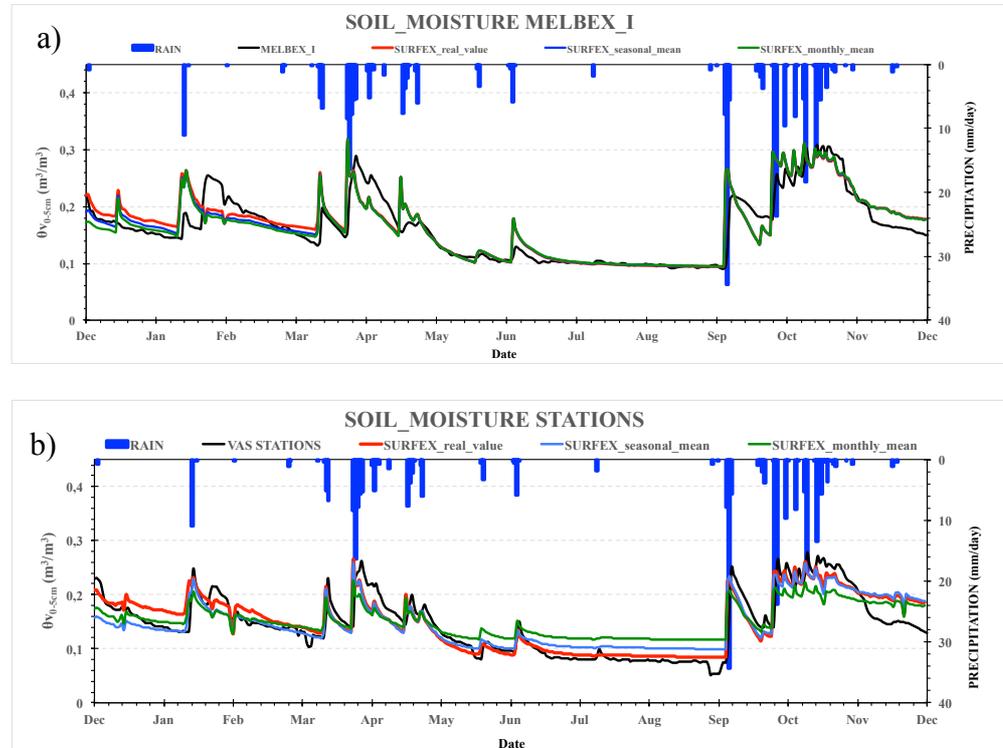


Figura 30: Simulación del SURFEX con diferentes valores iniciales, el valor real, el valor estacional y el valor mensual de la humedad del suelo en: a) Melbex_I b) Stations

En la figura 30 la simulación que más se aproxima a los valores reales de humedad del suelo es la simulación que se realiza usando como valor inicial de la humedad del suelo el valor real, por tanto todas las simulaciones se inician con el valor real de la humedad del suelo en cada estación.

En la figura 31 se realiza la media de las simulaciones de la humedad del suelo con SURFEX para todas las estaciones de medida in situ (Stations). Existe un buen comportamiento de la humedad del suelo a lo largo de todo el periodo excepto en el mes de Noviembre después de un fuerte evento de precipitación donde la simulación no desciende de manera tan rápida como los valores in situ de la humedad del suelo siendo este mes donde mayores diferencias encontramos en las simulaciones en todas las estaciones de medida. Esto es debido a que no conocemos

el valor de escorrentía de la zona de las estaciones por tanto se utiliza un valor general de escorrentía para toda la zona (Método de los coeficientes de escorrentía. Maucó Generalizado).

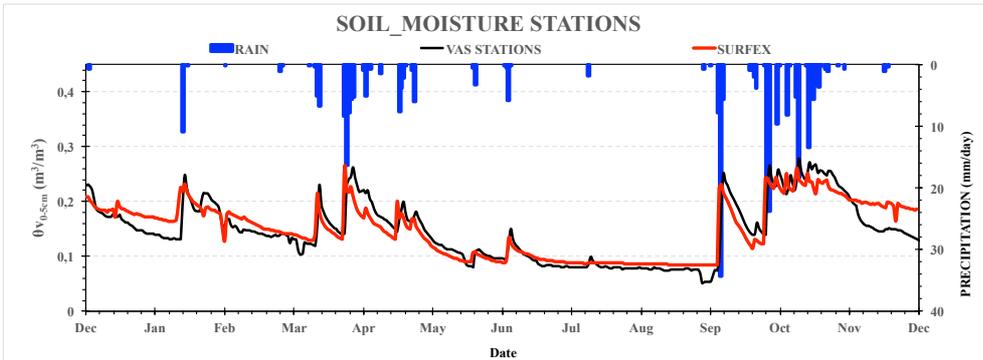


Figura 31: Media de las simulaciones SURFEX de la humedad del suelo en las estaciones de medida in situ (Stations).

A continuación se simula la humedad del suelo en cada una de las estaciones meteorológicas por separado y cada una de estaciones se analiza sus correlaciones (tabla 16) con la humedad del suelo in situ de esa estación. La mejor simulación se obtiene para en Melbex_I (figura 32) que muestra un comportamiento adecuado con respecto a la humedad del suelo de los valores in situ. El periodo que mejor comportamiento tiene la simulación es el periodo de (SON) con una pendiente de 0.8 y un coeficiente de correlación de 0.8

Modelización de la humedad del suelo con SURFEX

DJF	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX	0,2	0,03	0,009	0,011
MELBEX_II vs SURFEX	1,3	0,4	-0,03	0,05
VAS vs SURFEX	0,8	0,4	0,02	0,011
NICOLAS vs SURFEX	1,2	0,7	0,03	0,03
EZPELETA vs SURFEX	1,2	0,7	0,019	0,02
LA CUBERA vs SURFEX	1,1	0,5	0,03	0,03
STATIONS vs SURFEX	1,1	0,6	0,013	0,013

MAM	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX	0,8	0,5	0,002	0,015
MELBEX_II vs SURFEX	1,0	0,4	-0,02	0,02
VAS vs SURFEX	1,0	0,6	0,002	0,02
NICOLAS vs SURFEX	0,7	0,4	0,01	0,02
EZPELETA vs SURFEX	0,8	0,6	0,01	0,004
LA CUBERA vs SURFEX	0,7	0,5	-0,019	0,0003
STATIONS vs SURFEX	0,9	0,6	-0,004	0,015

JJA	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX	0,4	0,7	0,004	0,004
MELBEX_II vs SURFEX	0,8	0,8	0,009	0,0006
VAS vs SURFEX	1,6	0,7	0,012	0,013
NICOLAS vs SURFEX	3	0,5	-0,017	0,02
EZPELETA vs SURFEX	1,6	0,7	0,02	0,016
LA CUBERA vs SURFEX	2	0,6	0,005	0,02
STATIONS vs SURFEX	1,5	0,8	0,005	0,003

SON	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX	0,8	0,8	0,02	0,002
MELBEX_II vs SURFEX	1,0	0,7	0,02	0,12
VAS vs SURFEX	0,9	0,8	0,03	0,009
NICOLAS vs SURFEX	0,8	0,8	0,03	0,009
EZPELETA vs SURFEX	1,0	0,8	0,04	0,03
LA CUBERA vs SURFEX	1,1	0,8	0,03	0,02
STATIONS vs SURFEX	1,0	0,8	0,003	0,13

Tabla 16: Correlaciones del modelo de simulación SURFEX en cada una de las estaciones de medida in situ para cada periodo hidrológico

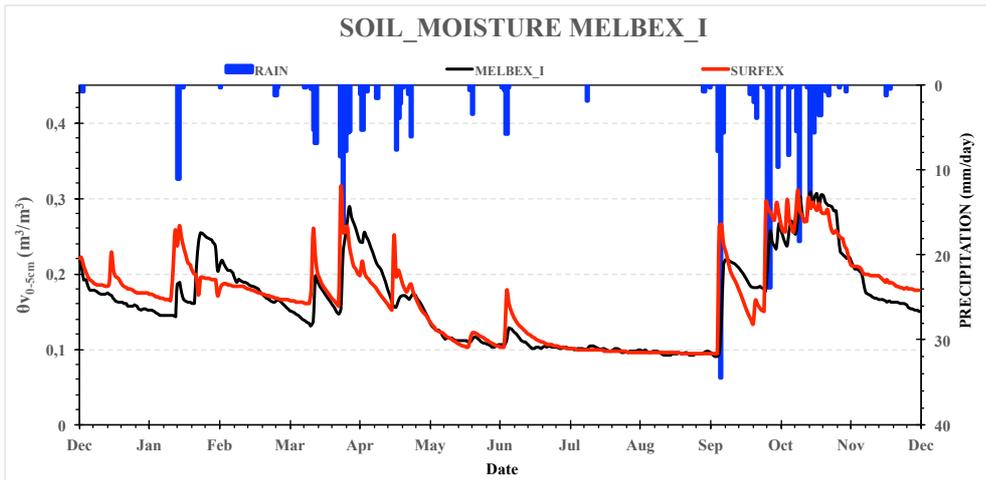


Figura 32: Simulación SURFEX de la humedad del suelo en Melbex_I

En la figura 33 la simulación en la estación de medida de la humedad del suelo de Melbex_II es la que peores resultados obtiene, subestima la humedad del suelo y en el periodo seco muestra una buena representación de la humedad del suelo con una pendiente de 0.8 y un bias de 0.009.

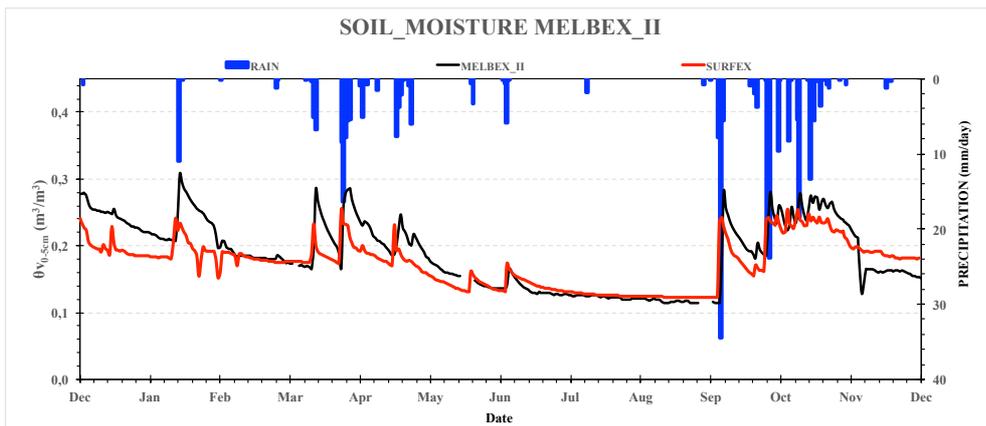


Figura 33: Simulación SURFEX de la humedad del suelo en Melbex_II

En la figura 34 y tabla 17 observamos las buenas correlaciones que muestran las estaciones de medida in situ con la humedad del suelo simulada con SURFEX en las estaciones de Melbex_I y Melbex_II, corroborando de esta forma el buen comportamiento de las simulaciones del modelo SURFEX en cada una de las estaciones de medida de la humedad del suelo con valores de correlación de 0.7 a 0.8 en cada una de las estaciones de medida.

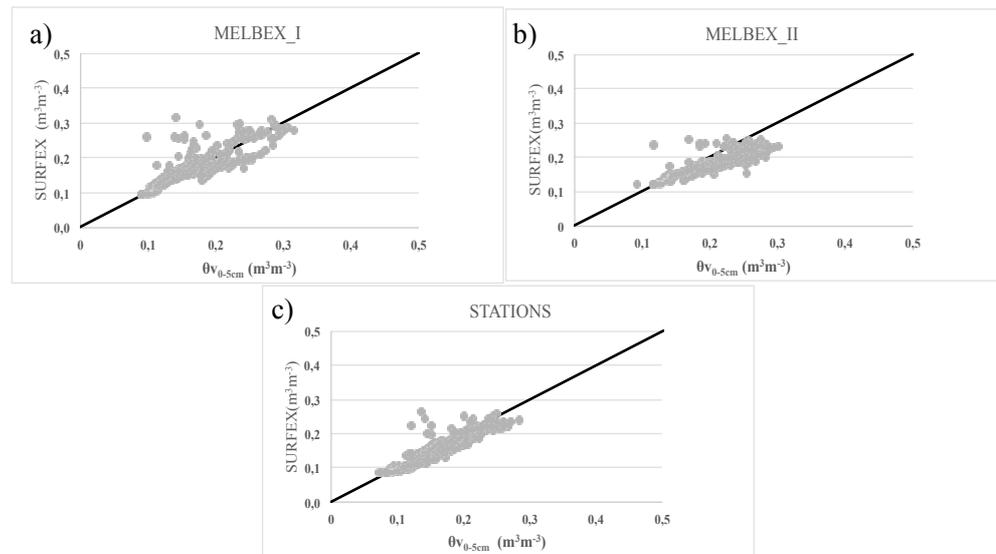


Figura 34: Comparación de la humedad del suelo de SURFEX con a) Melbex_II, b) Melbex_I, c) Stations

	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX	0,9	0,8	0,004	0,16
MELBEX_II vs SURFEX	1,3	0,8	-0,012	0,18
VAS vs SURFEX	0,9	0,8	0,011	0,12
NICOLAS vs SURFEX	0,7	0,8	0,006	0,17
EZPELETA vs SURFEX	1,0	0,8	0,017	0,11
LA CUBERA vs SURFEX	0,9	0,7	0,006	0,12
STATIONS vs SURFEX	1,0	0,9	0,005	0,14

Tabla 17: Correlaciones entre las estaciones y la humedad del suelo de SURFEX para todo el periodo de estudio.

3. ESPACIALIZACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN LA ZONA DE ESTUDIO

Hemos visto que el modelo funciona bien para los valores locales, por tanto se quiere hacer una especialización y para estudiar la variabilidad espacial. Uno de los objetivos principales de esta tesis es crear mapas de humedad del suelo para toda la zona de estudio del 50x50 km². Una vez simulada la humedad del suelo en las estaciones de medida de la humedad del suelo, el siguiente paso es simular la humedad del suelo en toda la zona de estudio del 50x50 km². Para realizar la simulación espacial en la zona de estudio el modelo de simulación SURFEX necesita datos de entrada en cada pixel. Ante la ausencia de estaciones

meteorológicas en cada punto de simulación se utiliza como datos de entrada en el modelo dos tipos de datos diferentes, en primer lugar se simulará con datos de entrada del ECMWF (SURFEX-ECMWF) que tiene una resolución espacial de 0.125°, y en segundo lugar se simulará con datos del SAFRAN como datos de entrada del modelo de simulación SURFEX (SURFEX-SAFRAN).

INPUTS SURFEX	SAFRAN	ECMWF
PRECIPITATION	X	X
AIR TEMPERATURE	X	X
SURFACE PRESSURE	X	X
AIR SPECIFIC HUMIDITY	X	
WIND DIRECTION		
WIND SPEED	X	X
DOWNWARD LONGWARE RADIATION	X	X
DOWNWARD DIFFUSE SHORTWARE RADIATION	X	
DOWNWARD DIRECT SHORTWARE RADIATION	X	
SNOWFALL RATE		
CO2 CONCENTRATION		

Tabla 18: Datos de entrada del modelo de simulación SURFEX disponibles.

En la tabla 18 se muestran los datos de entrada utilizados para las dos simulaciones, al utilizar los datos de SAFRAN se introducen más datos de entrada que al utilizar los datos del ECMWF. Estos datos influyen en la simulación de la humedad del suelo de SURFEX, a mayor número de datos de entrada mejor se espera que sea la simulación de la humedad del suelo de SURFEX.

Para obtener una buena representación en la zona de estudio se debe determinar el tipo de vegetación, usos del suelo y la topografía. Para la simulación espacial, el modelo utiliza el ECOCLIMAP determinar los usos del suelo y el GTOPO para establecer la topografía de la zona.

3.1. ESPACIALIZACIÓN CON DATOS DEL ECMWF

Al simular SURFEX con datos de entrada del ECMWF se introducen datos de entrada con una resolución temporal de 6 h y obtenemos datos de humedad del suelo diarios con una resolución espacial de 0,125x0,125°.

La humedad del suelo media con la simulación SURFEX-ECMWF para todo el periodo de estudio es de 0.18 ± 0.007 (figura 35), muestra una humedad del suelo más elevada que las observaciones (0.14 ± 0.005).

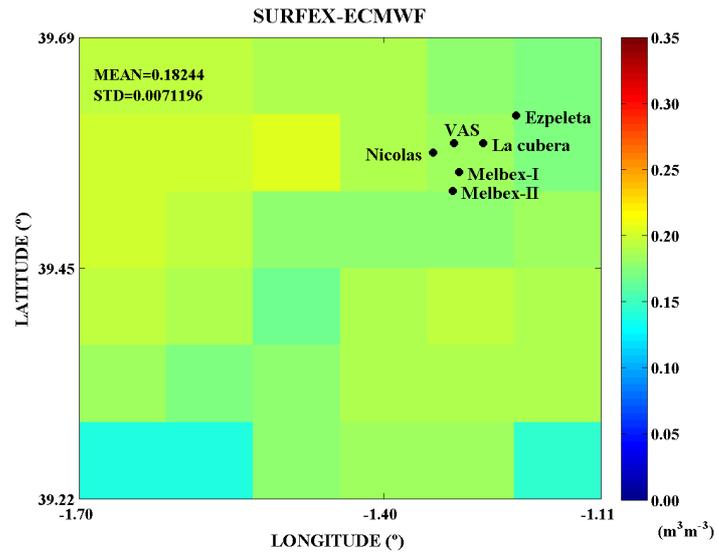


Figura 35: Mapa de humedad del suelo obtenido con modelo de simulación SURFEX usando los datos de entrada del ECMWF

En la figura 36 se analiza la simulación de la humedad SURFEX-ECMWF para los diferentes periodos hidrológicos siendo DJF (0.19 ± 0.004) el periodo hidrológico con mayores valores de humedad del suelo y el periodo de JJA (0.15 ± 0.008) el que menores valores de humedad del suelo tiene. Esto no concuerda con la humedad del suelo real ya que el periodo hidrológico que posee mayor humedad del suelo es el de SON (0.17 ± 0.007) que es el periodo con mayor numero de precipitaciones (ver figura4) y el periodo de DJF (0.11 ± 0.03).

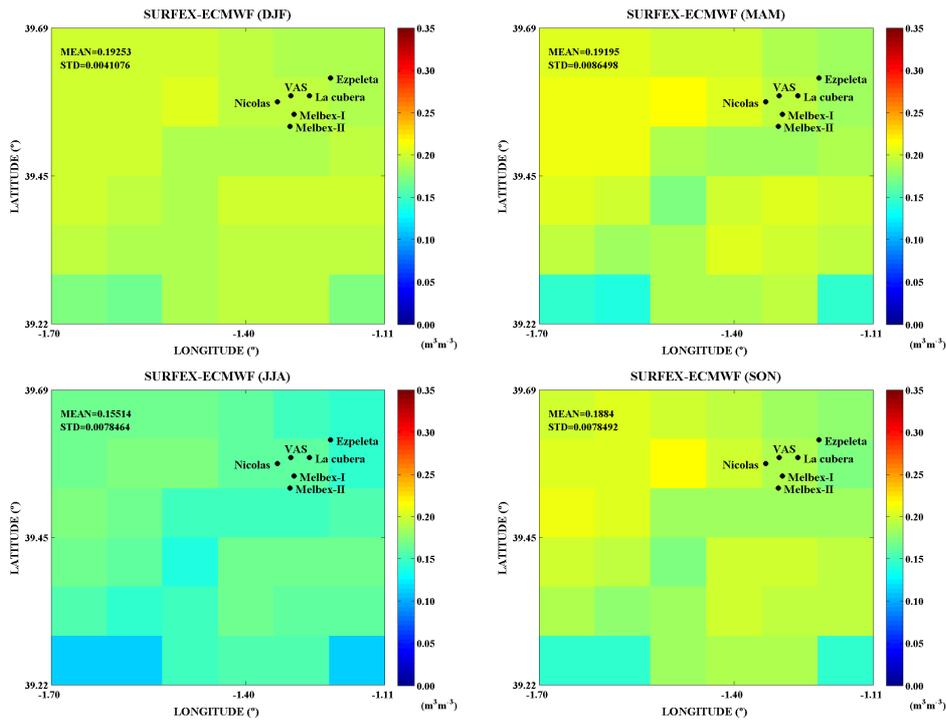


Figura 36: Mapas de humedad del suelo obtenidos con modelo de simulación SURFEX usando los datos de entrada del ECMWF para las diferentes estaciones hidrológicas.

La simulación de la humedad del suelo en SURFEX-ECMWF para media de todas las estaciones de medida in situ de humedad del suelo muestra una sobreestimación de la humedad del suelo en todo el periodo de estudio (figura 37) Al estudiar el comportamiento de la humedad del suelo del modelo de simulación SURFEX-ECMWF en cada una de las estaciones de medida de humedad del suelo in situ se obtiene humedades del suelo que sobrestiman la humedad del suelo real en Melbex_I obteniendo valores elevados de la humedad del suelo para todo el periodo de estudio. Y en Melbex_II subestima la humedad del suelo en el periodo hidrológico de DJF y sobrestima la humedad del suelo en los periodos hidrológicos de JJA y SON, teniendo una buena estimación de la humedad del suelo en el periodo de MAM.

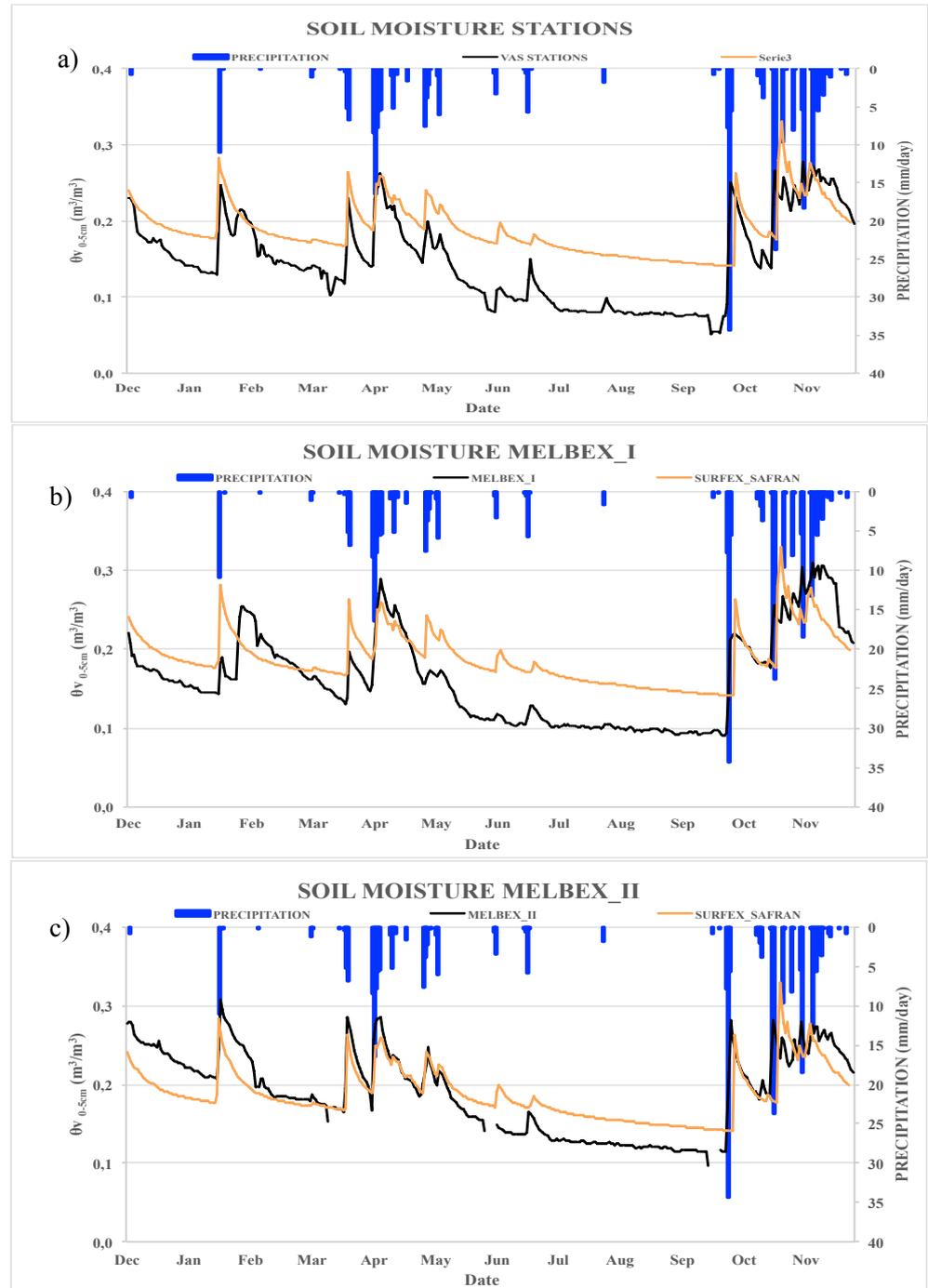


Figura 37: Simulación de la humedad del suelo con SURFEX_ECMWF en: a) Stations b) Melbex_I c) Melbex_II

El análisis de la correlaciones de la estaciones de medida in situ con la humedad del suelo simulada con datos de entrada del ECMWF viene dado en las figura 38.

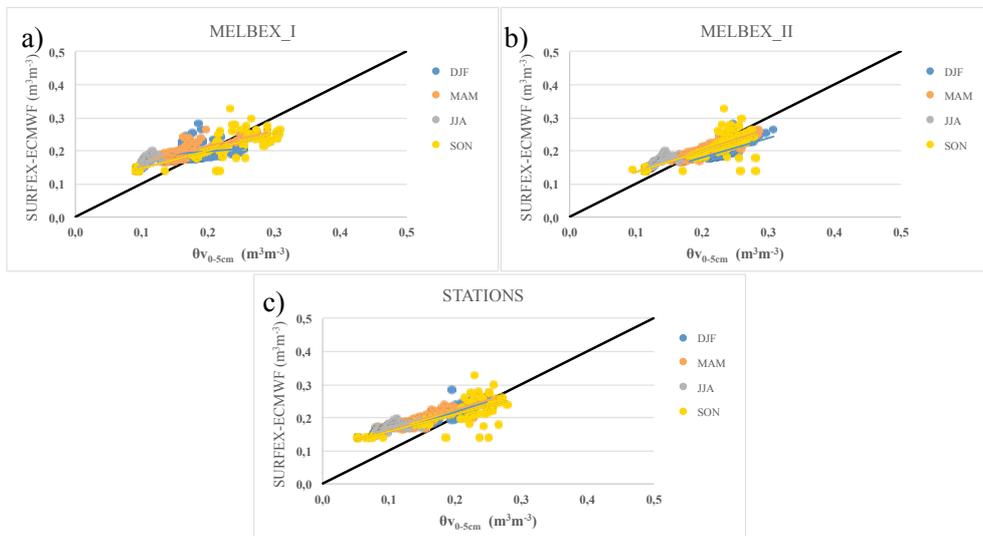


Figura 38: Comparación de la humedad del suelo de SURFEX-ECMWF con la estaciones de medida in situ de la humedad del suelo por periodos hidrológicos en: a) Melbex_I b)Melbex_II c)Stations

Las pendientes que muestran un tendencia próxima a 1 las encontramos en los meses de SON con coeficientes de correlación de 0.6-0.7. (tabla 19). Para todo el periodo de estudio la estación que muestra un mejor comportamiento es Nicolás con un BIAS de 0.02. Esta estación de medida esta situada en una zona muy homogénea y alejada de núcleos urbanos, por tanto es una representación del tipo de suelo de la zona.

DJF	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX-ECMWF	0,3	0,04	0,015	0,03
MELBEX_II vs SURFEX-ECMWF	1,2	0,7	-0,03	0,05
VAS vs SURFEX-ECMWF	0,9	0,8	0,06	0,05
NICOLAS vs SURFEX-ECMWF	1,2	0,8	0,00006	0,02
EZPELETA vs SURFEX-ECMWF	1,5	0,8	0,08	0,07
LA CUBERA vs SURFEX-ECMWF	1,2	0,7	0,06	0,04
STATIONS vs SURFEX-ECMWF	1,0	0,8	0,03	0,017

MAM	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX-ECMWF	1,4	0,6	0,03	0,02
MELBEX_II vs SURFEX-ECMWF	1,2	0,8	0,003	0,018
VAS vs SURFEX-ECMWF	1,1	0,8	0,08	0,08
NICOLAS vs SURFEX-ECMWF	1,5	0,9	0,03	0,03
EZPELETA vs SURFEX-ECMWF	1,5	0,7	0,09	0,09
LA CUBERA vs SURFEX-ECMWF	1,1	0,9	0,06	0,06
STATIONS vs SURFEX-ECMWF	1,3	0,9	0,05	0,05

JJA	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX-ECMWF	0,4	0,6	0,06	0,07
MELBEX_II vs SURFEX-ECMWF	0,7	0,7	0,04	0,04
VAS vs SURFEX-ECMWF	0,7	0,3	0,10	0,12
NICOLAS vs SURFEX-ECMWF	1,0	0,4	0,05	0,06
EZPELETA vs SURFEX-ECMWF	1,1	0,4	0,11	0,12
LA CUBERA vs SURFEX-ECMWF	2	0,8	0,09	0,08
STATIONS vs SURFEX-ECMWF	1,0	0,6	0,07	0,08

SON	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX-ECMWF	1,4	0,7	0,0010	0,05
MELBEX_II vs SURFEX-ECMWF	1,0	0,6	0,004	0,03
VAS vs SURFEX-ECMWF	0,8	0,6	0,07	0,09
NICOLAS vs SURFEX-ECMWF	1,2	0,6	0,00	0,04
EZPELETA vs SURFEX-ECMWF	1,3	0,6	0,05	0,11
LA CUBERA vs SURFEX-ECMWF	1,1	0,6	0,06	0,10
STATIONS vs SURFEX-ECMWF	1,2	0,7	0,03	0,07

	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX-ECMWF	1,4	0,6	0,03	0,18
MELBEX_II vs SURFEX-ECMWF	1,3	0,7	0,004	0,19
VAS vs SURFEX-ECMWF	1,0	0,7	0,08	0,15
NICOLAS vs SURFEX-ECMWF	1,4	0,7	0,02	0,18
EZPELETA vs SURFEX-ECMWF	1,5	0,7	0,08	0,14
LA CUBERA vs SURFEX-ECMWF	1,3	0,7	0,07	0,15
STATIONS vs SURFEX-ECMWF	1,3	0,7	0,05	0,17

Tabla 19: Correlaciones entre las estaciones y la humedad del suelo de SURFEX-ECMWF para cada periodo hidrológico y para el periodo de estudio.

3.2. ESPACIALIZACIÓN CON DATOS DE SAFRAN

La simulación de SURFEX con datos de entrada del SAFRAN con una resolución temporal de 1 hora y una resolución espacial de 8x8 km², obtiene datos de humedad del suelo diarios con una resolución espacial igual que los datos de entrada y una resolución temporal diaria.

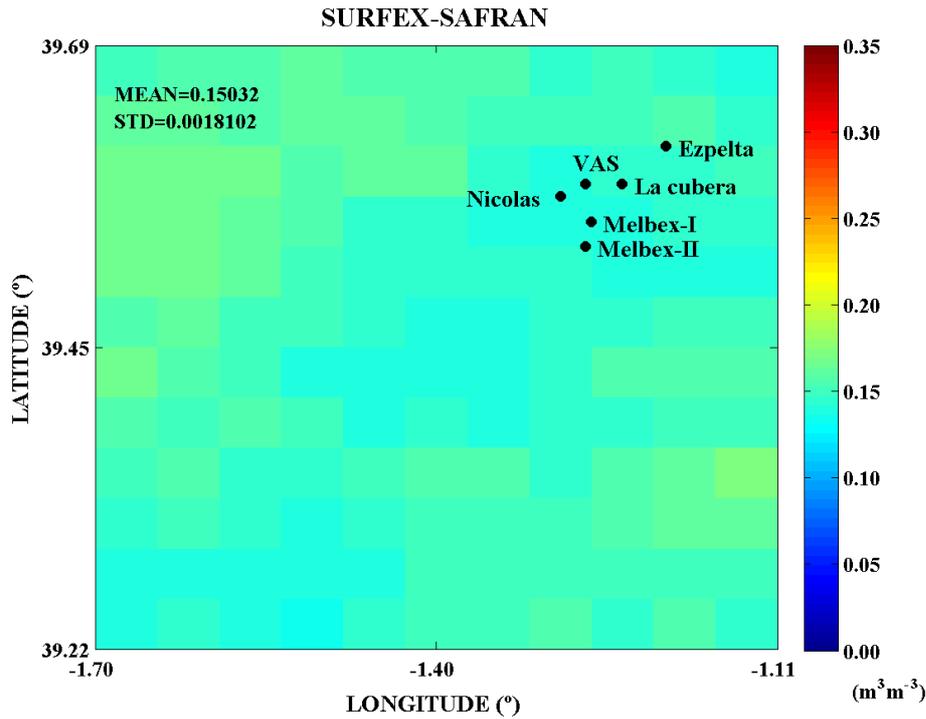


Figura 39: Mapa de humedad del suelo obtenido con modelo de simulación SURFEX usando los datos de entrada del SAFRAN

La humedad del suelo media con la simulación SURFEX-SAFRAN para todo el periodo de estudio es de 0.15 ± 0.0018 (figura 39) se aproxima más a la humedad del suelo de la observación que la simulación de SURFEX-ECMWF (SURFEX-ECMWF = 0.18 ± 0.007 y observaciones = 0.14 ± 0.005). Al dividir el periodo de estudio en estaciones hidrológicas, el periodo hidrológico con mayor valor de la humedad del suelo es SON con un valor de 0.21 ± 0.0017 (SURFEX-ECMWF= 0.18 ± 0.007 observaciones= 0.17 ± 0.007) y el periodo hidrológico con menor humedad del suelo es el JJA con un valor de la humedad del suelo de 0.13 ± 0.003 (SURFEX-ECMWF= 0.15 ± 0.008 y observaciones = 0.009 ± 0.014) (figura 40).

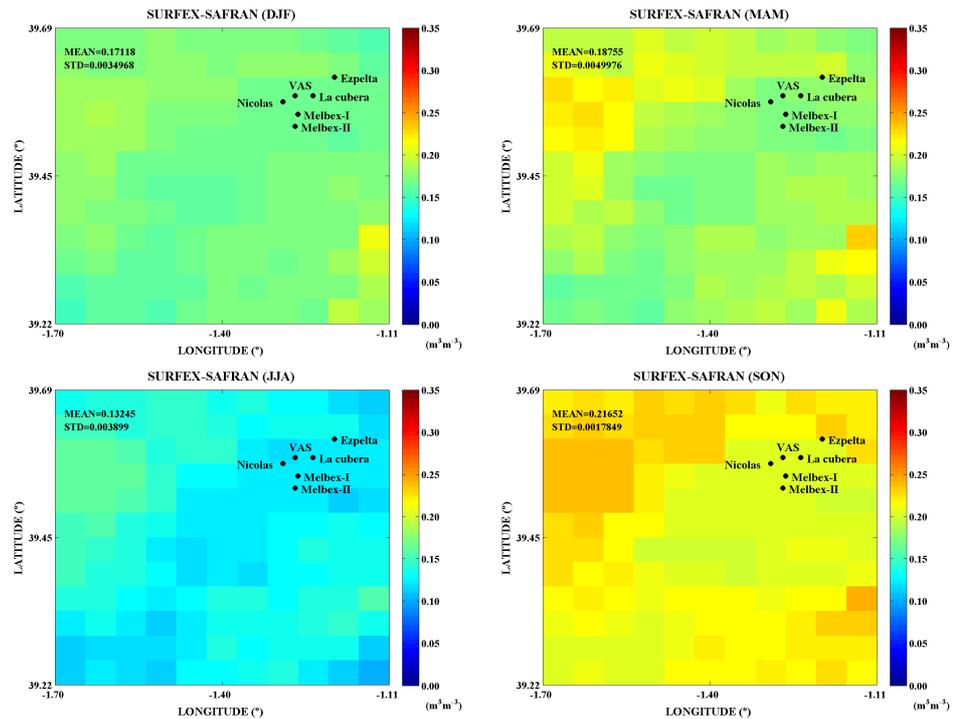


Figura 40: Mapas de humedad del suelo obtenidos con modelo de simulación SURFEX usando los datos de entrada del SAFRAN para las diferentes estaciones hidrológicas.

La figura 41 muestra la evolución temporal de la humedad del suelo de la simulación SURFEX con datos de entrada del SAFRAN en las estaciones de medida de la humedad del suelo in situ de Melbex_I, la Cubera y la media de las estaciones de medida in situ (Stations). En Melbex_I el modelo de simulación subestima la humedad del suelo y La Cubera sobrestima la humedad del suelo. La simulación de la humedad del suelo para todas las estaciones de medida in situ se ajusta a los valores reales de humedad del suelo sobre todo en el periodo hidrológico de SON donde más variación de la humedad del suelo se produce debido a que es el periodo hidrológico donde mayores eventos de precipitación se producen.

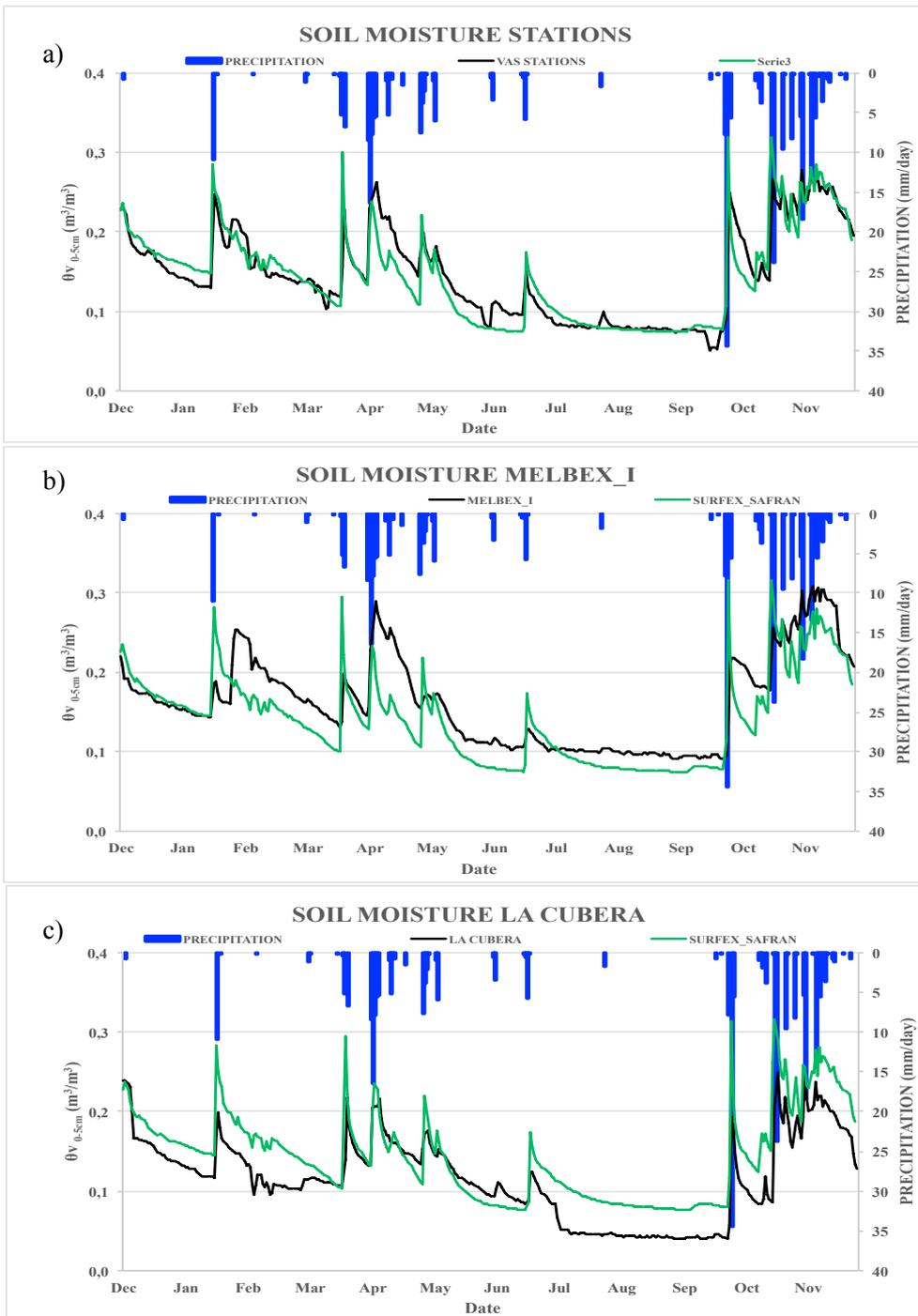


Figura 41: Simulación de la humedad del suelo con SURFEX_SAFRAN en a) Stations b) Melbex_I c) La Cubera

SURFEX-SAFRAN espacializa de una forma apropiada humedad del suelo en la zona de estudio, reflejando valores de BIAS (0.02-0.05) para cada una de las estaciones (tabla 20). El BIAS en Melbex_I (0.02), la Cubera (0.05) es pequeño exceptuando algunos días donde hay precipitación grande que hace que el modelo no refleje de forma tan marcada esos picos de humedad del suelo (figura 42).

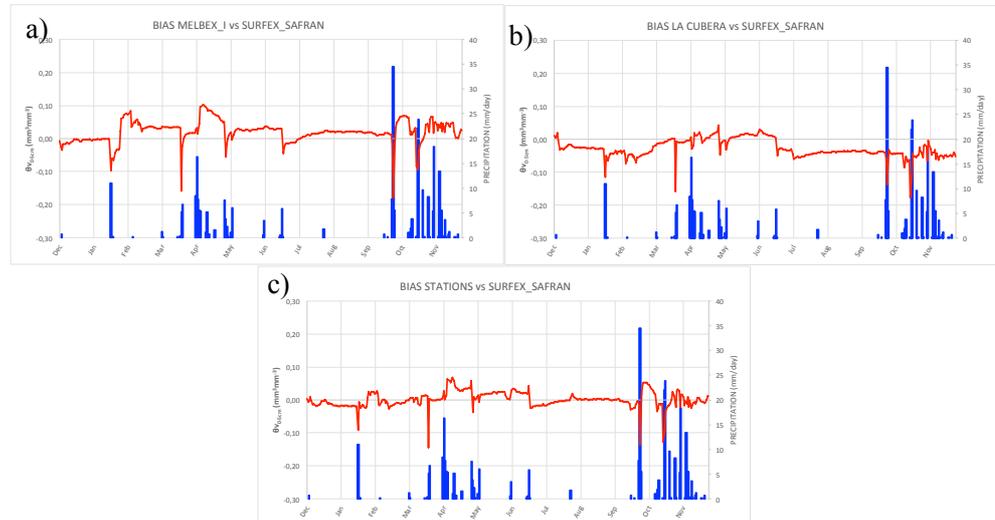


Figura 42: BIAS de la humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN con la estaciones meteorológicas a) Melbex_I b) La cubera c) Stations.

El modelo de simulación SURFEX con datos de entrada del SAFRAN en cada una de las estaciones de medida in situ de la humedad del suelo muestra valores de pendiente muy próximos a 1 y coeficientes de correlación elevados, mostrando valores entre 0.7 y 0.9. La media de todas las estación tiene un coeficiente de correlación de 0.9 y un RMSED de 0.14 reflejando de este modo el buen comportamiento de la humedad del suelo obtenida con el modelo de simulación con datos de entrada del SAFRAN (tabla 20).

DJF	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX-SAFRAN	0,3	0,06	-0,010	0,012
MELBEX_II vs SURFEX-SAFRAN	1,0	0,7	-0,06	0,07
VAS vs SURFEX-SAFRAN	0,7	0,8	0,04	0,03
NICOLAS vs SURFEX-SAFRAN	1,0	0,8	-0,02	0,04
EZPELETA vs SURFEX-SAFRAN	1,2	0,9	0,07	0,06
LA CUBERA vs SURFEX-SAFRAN	1,0	0,7	0,03	0,017
STATIONS vs SURFEX-SAFRAN	0,9	0,8	0,010	0,005

MAM	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX-SAFRAN	0,7	0,4	-0,03	0,03
MELBEX_II vs SURFEX-SAFRAN	0,8	0,7	-0,06	0,04
VAS vs SURFEX-SAFRAN	0,7	0,7	0,02	0,02
NICOLAS vs SURFEX-SAFRAN	0,7	0,5	-0,03	0,03
EZPELETA vs SURFEX-SAFRAN	0,9	0,8	0,04	0,06
LA CUBERA vs SURFEX-SAFRAN	0,6	0,7	0,0008	0,0006
STATIONS vs SURFEX-SAFRAN	0,7	0,7	-0,010	0,005

JJA	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX-SAFRAN	0,2	0,5	-0,02	0,03
MELBEX_II vs SURFEX-SAFRAN	0,3	0,5	-0,04	0,06
VAS vs SURFEX-SAFRAN	0,6	0,5	0,02	0,01
NICOLAS vs SURFEX-SAFRAN	0,8	0,6	-0,03	0,04
EZPELETA vs SURFEX-SAFRAN	0,7	0,5	0,04	0,03
LA CUBERA vs SURFEX-SAFRAN	0,6	0,3	0,03	0,01
STATIONS vs SURFEX-SAFRAN	0,6	0,5	-0,0005	0,02

SON	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX-SAFRAN	0,9	0,8	-0,02	0,014
MELBEX_II vs SURFEX-SAFRAN	0,7	0,8	-0,02	0,04
VAS vs SURFEX-SAFRAN	0,6	0,9	0,04	0,02
NICOLAS vs SURFEX-SAFRAN	0,9	0,9	-0,03	0,02
EZPELETA vs SURFEX-SAFRAN	0,9	0,9	0,05	0,05
LA CUBERA vs SURFEX-SAFRAN	0,9	0,9	0,05	0,04
STATIONS vs SURFEX-SAFRAN	0,8	0,9	0,013	0,008

	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
MELBEX_I vs SURFEX-SAFRAN	0,9	0,7	-0,02	0,15
MELBEX_II vs SURFEX-SAFRAN	0,8	0,8	-0,04	0,17
VAS vs SURFEX-SAFRAN	0,7	0,9	0,03	0,13
NICOLAS vs SURFEX-SAFRAN	0,9	0,8	-0,03	0,16
EZPELETA vs SURFEX-SAFRAN	0,9	0,9	0,05	0,13
LA CUBERA vs SURFEX-SAFRAN	0,8	0,8	0,03	0,13
STATIONS vs SURFEX-SAFRAN	0,8	0,9	0,003	0,14

Tabla 20: Correlaciones entre las estaciones y la humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN por estaciones hidrológicas y para todo el periodo de estudio.

La simulación SURFEX-SAFRAN ($r^2= 0.9$ para SON) muestra mejores resultados que la simulación SURFEX-ECMWF ($r^2= 0.7$ para SON) en las estaciones meteorológicas (tabla 20). Se tiene más datos de entrada de SURFEX-SAFRAN y con resoluciones espaciales menores que los datos de entrada del SURFEX-ECMWF.

4. SENSIBILIDAD DE LAS SIMULACIONES LOCALES Y REGIONALES A UNA INICIALIZACIÓN REAL CON LA HUMEDAD DEL SUELO DE SMOS

Como se ha visto en los apartados anteriores al simular SURFEX en cada una de las estaciones de medida, la inicialización de la humedad del suelo influye en el buen funcionamiento de la simulación. Por tanto para estudiar dicha inicialización de la humedad del suelo en la simulación espacial de SURFEX_SAFRAN vamos a realizar dos experimentos. Uno en un periodo húmedo y otro en un periodo seco. Para llevar a cabo estos experimentos en primer lugar se procederá a la re-escala del producto de SMOS de nivel 4 de 1 km de resolución espacial a 8 km para que tenga la misma resolución espacial que los datos de humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN.

Una vez se ha re-escalado el producto de SMOS de nivel 4(1km) a 8km se realizan dos experimentos para estudiar la influencia de la inicialización en el modelo de simulación SURFEX-SAFRAN. Hasta el momento se ha inicializado con valores reales de la humedad del suelo dados por las estaciones de medida in situ de humedad del suelo. Al simular la humedad del suelo en cada una de las estaciones de medida in situ se utiliza el valor diario real del día en que empieza la simulación y cuando se espacializaba la humedad del suelo se inicializaba la humedad del suelo del modelo de simulación con la media de la humedad del suelo de las estaciones de medida in situ en ese día. Pero supongamos que no tenemos medidas de humedad in situ en la zona de estudio, entonces el valor inicial de la humedad del suelo que introduciríamos en el modelo de simulación SURFEX sería el valor de la humedad del suelo de SMOS.

En primer experimento se realiza en un periodo húmedo comprendido entre el 1 de Diciembre del 2011 y el 4 de Marzo del 2012 e inicializamos con un valor de humedad del suelo de SMOS de nivel 4 (1 km) re-escalado a 8km alejado de valor que marcan las observaciones (que llamaremos SMOS N4'_far) y por otra parte inicializamos con un valor de SMOS de nivel 4 (1 km) re-escalado a 8km próximo a la humedad del suelo de las observaciones (que llamaremos SMOS N4'_near). En la figura 43 se muestra la media de la humedad del suelo en este periodo para las ambas simulaciones. La simulación de referencia en este caso la simulación SURFEX-SAFRAN que es la realizada con el valor real de las estaciones de medida in situ de la humedad del suelo muestra un valor de la humedad del suelo de 0.17 ± 0.004 , es similar al valor de la simulación de SMOS N4'_near (0.17 ± 0.003), en cambio hay grandes diferencias con la simulación SMOS N4'_far (0.014 ± 0.003).

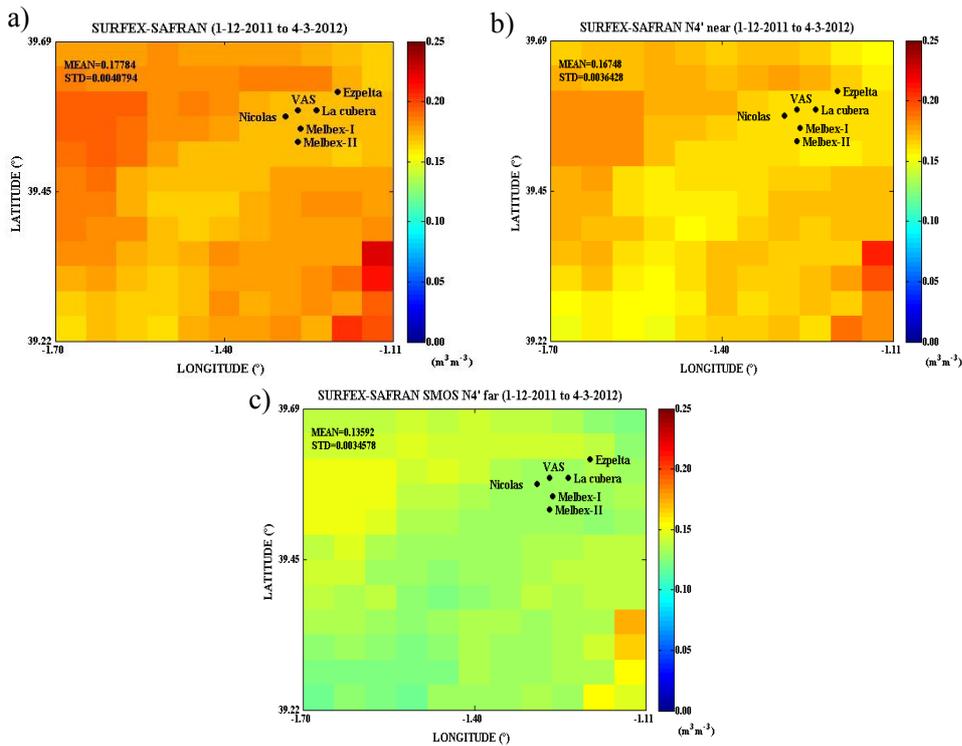


Figura 43: Simulación SURFEX-SAFRAN par el periodo del 1 Diciembre del 2011 hasta el 4 de Marzo del 2012 con la inicialización de: a) estaciones in situ b) valor de SMOS cercano a la observación c) valor de SMOS alejado de la observación

La simulación SMOS N4'_far de se aleja de la observación y la simulación SMOS N4'_near se aproxima a la observación. En la figura 44 se observa que si se inicializa con valores de SMOS alejados de la observación la simulación de la humedad del suelo muestra diferencia significativas con respecto a los valores reales de la humedad del suelo hasta el primer evento de precipitación donde el modelo corrige la humedad del suelo y las diferencias son menores. El RMSED es de la simulación inicializada con SMOS N4'_far es elevado comparado con el RMSED de la simulación SMOS N4'_near, y a partir del primer episodio de precipitación esa diferencia se reduce (figura 45).

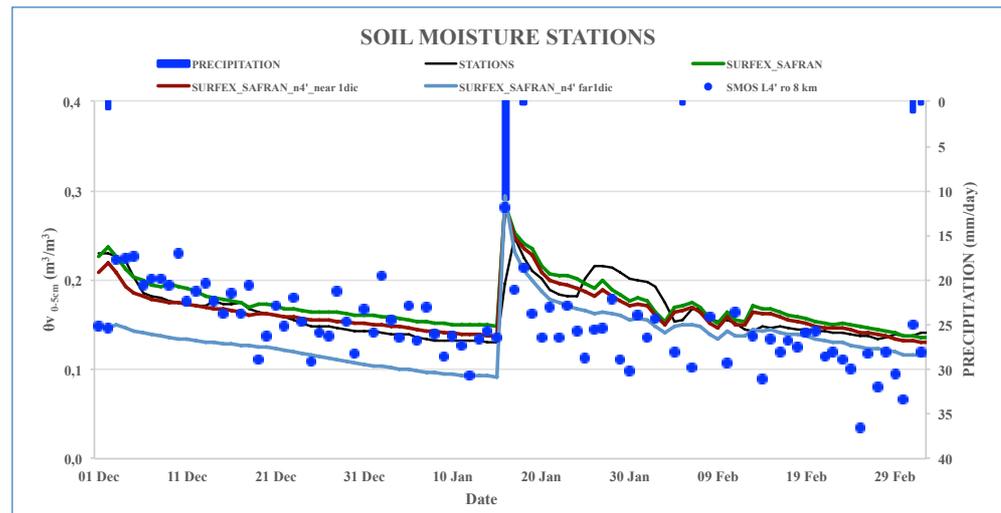


Figura 44: Evolución temporal de la humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN para el periodo del 1 Diciembre del 2011 hasta el 4 de Marzo del 2012 diferentes inicializaciones de la humedad del suelo.

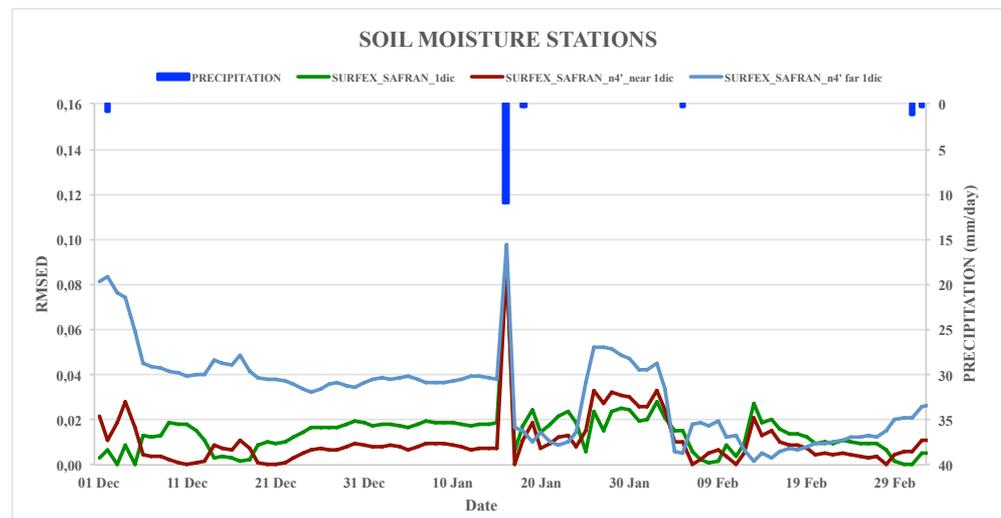


Figura 45: Evolución temporal del RMSED de la humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN para el periodo del 1 Diciembre del 2011 hasta el 4 de Marzo del 2012 de diferentes inicializaciones de la humedad del suelo.

Por tanto si inicializamos con un valor de SMOS próximo a la observación las simulaciones de la humedad del suelo SURFEX-SAFRAN muestra un comportamiento adecuado.

El segundo experimento se realiza es en un periodo seco que empieza desde el 24 de julio de 2012 hasta el final del periodo de estudio. En la figura 46 se

muestra la evolución espacial para el día 29 de julio donde observamos que la simulación SURFEX-SAFRAN inicializada con SMOS N4'_near es próxima a la simulación inicializada con valores reales de las observación con un valor de la humedad del suelo de 0.10 siendo 0.09 la humedad del suelo de la simulación inicializada con las observaciones y la simulación inicializada con un valor SMOS N4'_far es diferente de las observaciones con un valor de humedad del suelo de 0.14.

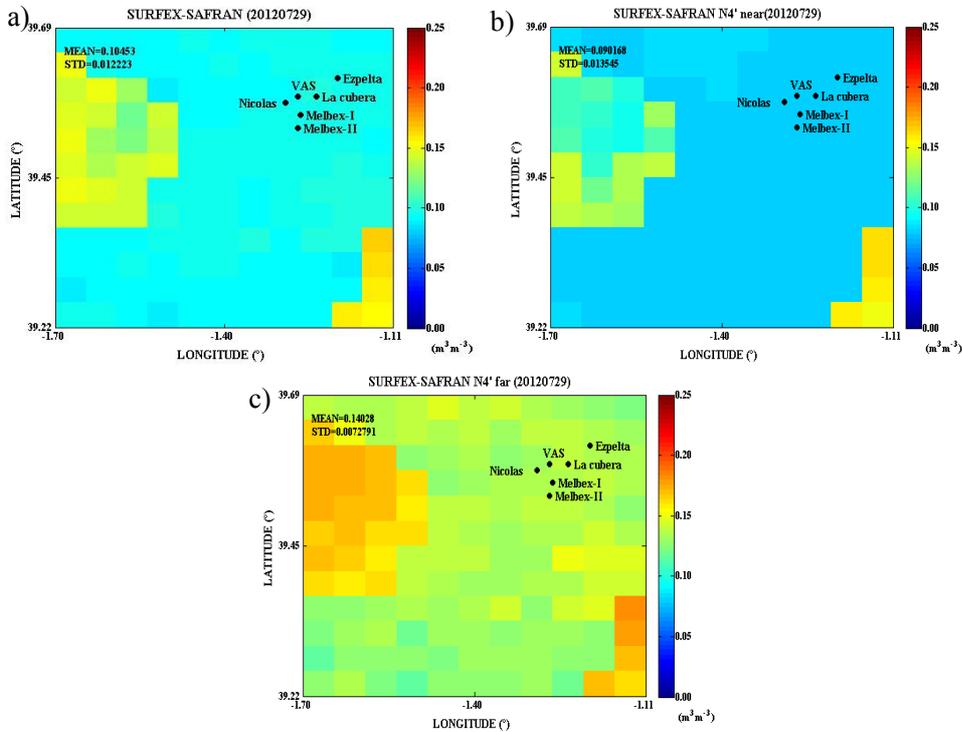


Figura 46: Simulación SURFEX-SAFRAN para el 29 de Julio del 2012 con la inicialización de:
 a) estaciones in situ b) valor de SMOS cercano a la observación
 c) valor de SMOS alejado de la observación

La simulación de SURFEX-SAFRAN inicializada con SMOS N4'_near es muy parecida a la de la observación y la simulación SMOS N4'_far es diferente de la observación. En la figura 47 se observa que si se inicializa un día en el que SMOS muestre valores próximos de la humedad del suelo la simulación es muy parecida a la de las observaciones y la simulación inicializada con valores de SMOS alejados de las observaciones muestra diferencias hasta el primer evento de precipitación donde el modelo corrige la tendencia de la humedad del suelo.

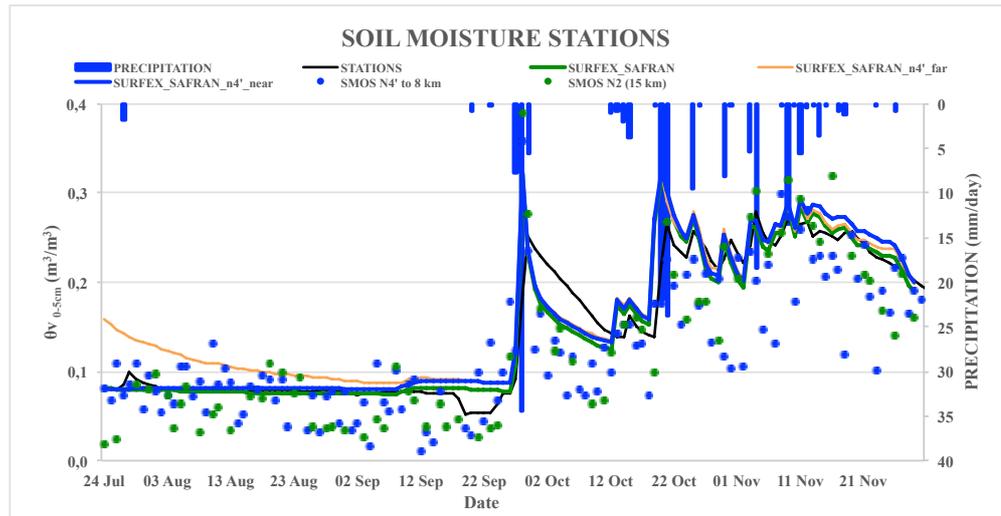


Figura 47: Evolución temporal de la humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN para el periodo del 24 de Julio al 30 de Noviembre del 2012 con diferentes inicializaciones de la humedad del suelo.

En la figura 48 el RMSED de la simulación inicializada con SMOS próximo a la observación es prácticamente igual que el RMSED de la simulación inicializada con los valores reales de la humedad del suelo y el RMSED de la simulación inicializada con valores de SMOS alejados de la observación muestra diferencias hasta llegar a la primera precipitación y a partir del primer episodio de precipitación esa diferencia se reduce.

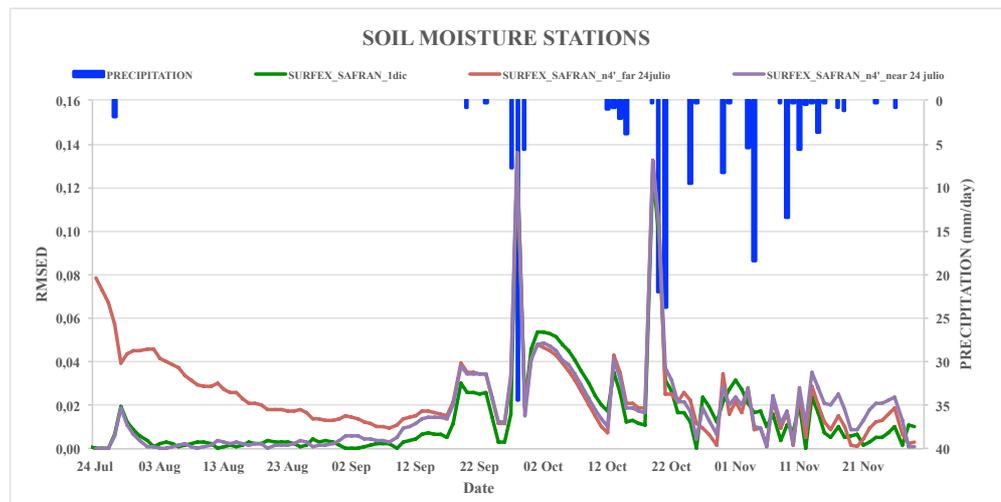


Figura 48: Evolución temporal del RMSED de la humedad del suelo de SURFEX-SAFRAN para el periodo del 24 de Julio al 30 de Noviembre del 2012 con diferentes inicializaciones de la humedad del suelo.

Cuando el producto de SMOS de nivel 4 (1 km) muestra valores cercanos a las medidas in situ, es apropiado para la inicialización del modelo de simulación SURFEX. El modelo de simulación SURFEX depende tanto del valor de inicialización como de los periodos donde se empieza la simulación. El modelo de simulación SURFEX es una herramienta adecuada para la espacialización de la humedad del suelo utilizando como valor inicial la humedad del suelo de SMOS de nivel 4 (1 km).

En la figura 49 y en la tabla 21 se observa el buen comportamiento entre SURFEX-SAFRAN inicializado con las estaciones y SMOS de nivel 4 re-escalado a 8 km, con pendiente de 0.9 y BIAS de 0.08.

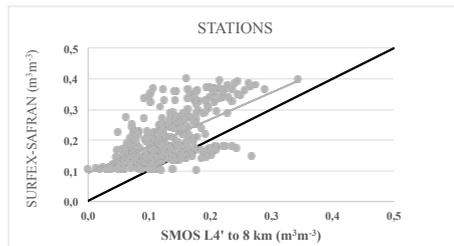


Figura 49: Relación entre SURFEX-SAFRAN inicializado con las estaciones y el producto de SMOS de nivel 4 re-escalado a 8 km.

	PENDIENTE	R ²	BIAS	RMSED
SURFEX_SAFRAN vs SMOS L4' to 8 km (stations)	0,9	0,4	-0,08	0,08

Tabla 21: Correlaciones entre SURFEX-SAFRAN inicializado con las estaciones y el producto de SMOS de nivel 4 re-escalado para todo el periodo de estudio.

CAPÍTULO VI

Conclusions

In accordance with Article 9 of the Regulations on the deposit, evaluation and defense of the doctoral thesis of the University of Valencia, the conclusions have been written in English in order to qualify for the international mention of the doctoral degree

1. CONCLUSIONS

The generation of continuous soil moisture fields is fundamental for the interpretation of satellite observations of this parameter. This is particularly significant in low-resolution remote sensing soil moisture products. SURFEX model simulations have shown this capacity in a reliable way, both for temporal and spatial soil moisture distributions in the Valencia Anchor Station area of 50 km x 50 km. Moreover, we have checked that SURFEX simulations improve when initialized with real remote sensing observations. The main conclusions of the comparisons between different SMOS products and SURFEX simulations can be drawn as follows:

- The different products of SMOS for the Iberian Peninsula represent high soil moisture episodes differently.
- The distinction between the different orbits of SMOS is important when analyzing the variability of soil moisture in the Iberian Peninsula and in the study area. There is less availability of images in ascending orbit than in descending orbit.
- The SMOS level 4 product reproduces well the soil moisture observations at each point station within our study area of 50x50 km² both for precipitation days, with a correlation coefficient 0.6 and slope of 0,7, and for non-precipitation days with a correlation coefficient of 0.7 and slope of 0.8.
- The temporal evolution of the re-scaled SMOS data at 25 km in the Iberian Peninsula is consistent with the SMOS level 3 product (25 km).
- Level 3 SMOS products (25 km) show low correlation coefficients with soil moisture measurement stations (0.003 to 0.2) since its spatial resolution is low.
- The SMOS level 2 product (15 km) underestimates soil moisture with respect to the in situ observations and its soil moisture values present a much larger STD than that of the level 4 product (1 km).
- The SMOS product of level 4 (1 km) is the one that shows the best correlations with in situ observations ($R^2=0.7$), and has great potential to determine soil moisture variability in the study area.
- Knowing well the characteristics of the study area allows defining the soil moisture content and its evolution throughout the study period in a more accurate way by means of SVAT modelling.

- Soil moisture in situ measurement stations with respect to the SURFEX simulations of each of the stations show good agreement.
- SURFEX soil moisture spatialized simulation using ECMWF data has worse results than SURFEX simulation using SAFRAN data because SAFRAN has higher spatial resolution and more input data than the ECMWF simulation.
- In general the SURFEX_ECMWF simulation overestimates soil moisture in each of the in situ soil moisture measurement stations.
- SURFEX-SAFRAN simulation has a low bias in each of the soil moisture measurement stations and slopes are close to one along the entire hydrological period (from 0.7 to 0.9). The mean of the simulation for all soil moisture measurement stations reflects the good performance of the simulation with SURFEX-SAFRAN products.
- SURFEX soil moisture simulations are influenced by the initial soil moisture value in the model.
- Initialization with a value far from the real soil moisture in the study area for the SURFEX_SAFRAN simulation shows significant differences in the simulation of soil moisture up to the first precipitation episode where the simulation model reduces these differences significantly.
- Initialization with a SMOS soil moisture value close to the real value of soil moisture reflects adequately the evolution of soil moisture in the area with low RMSED values.
- The initialization of the SURFEX simulation model depends on the period the initialization begins. Initializing in a wet period produces higher RMSE values than initializing in a dry period.
- The SURFEX-SAFRAN simulation with initialization from the soil moisture measurement stations and the re-scaling SMOS level 4 to 8 km has a slope of 0.9 and BIAS of 0.08.
- SMOS level 4 (1km) soil moisture values can be used to initialize the SURFEX simulation model and create soil moisture fields in the study area.

In summary, with this thesis we have shown that the synergetic use of in situ soil moisture observations, high-resolution measurements from SMOS and SURFEX SVAT modelling is suitable to adequately reproduce soil moisture distributions and variability in the study area.

CAPÍTULO VII

Bibliografía

- Andersen, J., Sandholt, I., Jensen, K. H. Refsgaard, J. C. and Gupta, H. (2002). Perspectives in using a remotely sensed dryness index in distributed hydrological models at the riverbasin scale. *Hydrological Processes*, 16: 2973-2987.
- Andersen, J., Sandholt, I., Jensen, K. H. Y Refsgaard, J. C. (2001). Improving the basis for validation of large scale distributed hydrological models using remotely sensed dryness index. *Remote sensing and Hydrology 2000 (Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, USA)*. IAHS Red Books, 267.
- Boone, a., Masson, V., Meyers, T., & Noilhan, J. (2000). The Influence of the Inclusion of Soil Freezing on Simulations by a Soil–Vegetation–Atmosphere Transfer Scheme. *Journal of Applied Meteorology*, 39(9), 1544–1569. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<1544:TIOATIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1544:TIOATIO>2.0.CO;2)
- Boone, A., Calvet, J.-C., & Noilhan, J. (1999). Inclusion of a Third Soil Layer in a Land Surface Scheme Using the Force–Restore Method. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 1611–1630. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1611:IOATSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1611:IOATSL>2.0.CO;2)
- Braud, I., Noilhan, J., Bessemoulin, P., Mascart, P., Haverkamp, R., & Vauclin, M. (1993). Bare-ground surface heat and water exchanges under dry conditions: Observations and parameterization. *Boundary-Layer Meteorology*, 66(1–2), 173–200. <https://doi.org/10.1007/BF00705465>
- Calvet, J.-C., Noilhan, J., & Bessemoulin, P. (1998). Retrieving the Root-Zone Soil Moisture from Surface Soil Moisture or Temperature Estimates: A Feasibility Study Based on Field Measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 37(1995), 371–386. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1998\)037<0371:RTRZSM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1998)037<0371:RTRZSM>2.0.CO;2)
- Deardorff, J.W., 1977: A parameterization of ground surface moisture content for use in atmospheric prediction models. *J. Appl. Meteor.*, 16, 1182-1185.
- Dirmeyer, P.A., Dolman, A.J. and Sato, N. (1999). The Pilot Phase of the Global Soil Wetness Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(5), 851- 878.
- Ducrocq, V., Braud, I., Davolio, S., Ferretti, R., Flamant, C., Jansa, A., ... Tamayo, J. (2013). HyMeX-SOP1: The Field Campaign Dedicated to Heavy Precipitation and Flash Flooding in the Northwestern Mediterranean. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(7), 1083–1100.

<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00244.1>

- Durand, Y., E. Brun, L. Mérindol, G. Guyomarc'h, B. Lesaffre, E. Martin, A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Ann. Glaciol.* 18 (1993) 65–71.
- Durand, Y., G. Giraud, M. Laternser, P. Etchevers, L. Mérindol, B. Lesaffre, Reanalysis of 47 Years of Climate in the French Alps (1958–2005): Climatology and Trends for Snow Cover, *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 48 (2009) 2487–2512.
- Entekhabi, D., G. R. Asrar, A. K. Betts, K. J. Beven, R. L. Bras, C. J. Duffy, T. Dunne, R. D. Koster, D. P. Lattenmaier, D. B. McLaughlin, W. J. Shuttleworth, M. T. van Genuchten, M. Wei, and E. F. Wood, (1999). An agenda for land surface hydrology research and a call for the Second International Hydrological Decade. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80, 2043-2058.
- Friedl, M.A. and Davis, F.W. (1994) Sources of variation in radiometric surface temperature over a tall grass prairie, *Remote Sensing of Environment* 48 , 1–17.
- Fu, B.J. , Chen, L.D. , Ma, K.M., Zhou H.F. and Wang, J.(2000). The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi, China, *Catena* 39 , 69–78.
- Fu, B.J., Wang J. and Ma, K.M.. (1994). Effect of land use on soil water in Loess hill area. *Science Foundation in China* 13, (4): 225–227.
- Gillies, R.R., Kustas, W.P. and Humes, K.S..(1997). A verification of the ‘triangle’ method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature, *International Journal of Remote Sensing* 18 (15): 3145–3166.
- Giordani, H.: Expériences de validation unidimensionnelles du schéma de surface NP89 aux normes Arpège sur trois sites de la campagne EFEDA 91, Note de travail 24 GMME/M'et'eo-France, 1993.
- Habets F., A. Boone, J.L Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E. Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana Segui, F. Rousset-Regimbeau, P. Viennot, 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU

- hydrometeorological model applied over France, *Journal of Geophysical Research D : Atmospheres* 113, D06113 (2008) 18
- Hsu, K., Gupta, H.V., Gao, X. and Sorooshian, S. (1999) Estimation of physical variables from multichannel remotely sensed imagery using a neural network: Application to rainfall estimation. *Water Resour*, 35, (5): 1605-1618.
- Hydrology and Earth System Science*, 14, 831-846, (2010) doi: 10.5194/hess-14-831-2010
- Jackson, T. J., et al. Profile soil moisture from space measurements. *In: Journal of the Irrigation and Drainage Division. American Society of Civil Engineers*, 106, 81-92, 1980
- Juglea, S., Kerr, Y., Mialon, A., Lopez-Baeza, E., Braithwaite, D., & Hsu, K. (2010). Soil moisture modelling of a SMOS pixel: Interest of using the PERSIANN database over the Valencia Anchor Station. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(8), 1509-1525. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1509-2010>
- Juglea, S., Kerr, Y., Mialon, A., Wigneron, J. P., Lopez-Baeza, E., Cano, A., ... Delwart, S. (2010). Modelling soil moisture at SMOS scale by use of a SVAT model over the Valencia Anchor Station. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(5), 831-846. <https://doi.org/10.5194/hess-14-831-2010>
- Kerr, Y.H., Waldteufel, P., Richaume, P., Wigneron, J.-P., Ferrazzoli, P., Mahmoodi, A., Al Bitar, A., Cabot, F., Gruhier, C., Juglea, S. E., et al.. The smos soil moisture retrieval algorithm. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 50 (5), 1384-1403, 2012
- Khodayar, S., Raff, F., Kalthoff, N. and Bock, O. (2016), Diagnostic study of a high-precipitation event in the Western Mediterranean: adequacy of current operational networks. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 142: 72-85. doi:10.1002/qj.2600
- Lopez-Baeza, E., Antolin M.C., Carbo E., Coll A., Juglea S., Kerr Y.H., Mätzler C., Millan-Scheiding C., Novello N., Saleh K., Schwank M., Voelksch I., Wigneron J.-P., Asensi S., Belda F., Buil A., Ferrer J., Fidalgo A., Gabaldon O., Monsoriu A., Tamayo J., Torre E., 2010. ESA ELBARAII-3 L-band Radiometer System deployed for SMOS Cal / Val at the Valencia Anchor Station. ESTEC ELBARA Loan Agreement 21013/07/NL/FF. Progress

Report March 2010. Universitat de València

- López Baeza, E., 2011. MIDAS-5. Validación de Productos, Explotación de Datos y Centro Experto para la Misión SMOS. Parte UVEG (MIDAS- 5/UVEG). Plan Nacional de Investigación sobre Espacio. Informe Final Universidad de Valencia, 30 Marzo 2011
- López Baeza, E., 2013. MIDAS-6. SMOS Ocean Salinity and Soil Moisture Products. Improvements and Applications Demonstration. Parte UVEG (MIDAS- 5/UVEG). Plan Nacional de Investigación sobre Espacio. Informe Final Universidad de Valencia, 31 Marzo 2013
- M.A. Coll, Estimación del TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) y su relación con la humedad del suelo en la zona de validación de SMOS de la Valencia Anchor Station. Proyecto de investigación del Máster en Teledetección, curso 2009-2010, Universidad De Valencia, Facultad De Física, Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica
- Mahfouf, J.-F. and Noilhan, J., 1994. Modélisation des échanges de surface dans les modèles météorologiques. In: *10th Journ6es Hydrol., ORSTOM, Montpellier*, pp. 1354-1365.
- Mannstein,H. (1987). Surface energy budget, surface temperature and thermal inertia. *Mathematical and Physical Sciences*, 201, 391–410.
- Masson, V. (2000). A physically based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary Layer Meteorology*, 94(3), 357–397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>
- Masson, V., Champeaux, J. L., Chauvin, F., Meriguet, C., & Lacaze, R. (2003). A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *Journal of Climate*, 16(9), 1261–1282. <https://doi.org/10.1175/1520-0442-16.9.1261>
- Mo, T., Choudhury, B., Schmugge, T., Wang, J., Jackson, T., A model for microwave emission from vegetation-covered fields. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) 87 (C13), 11229–11237, 1982
- Noilhan, J., & Lacarrere, P. (1995). GCM grid-scale evaporation from mesoscale modeling. *Journal of Climate*. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<0206:GGSEFM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<0206:GGSEFM>2.0.CO;2)
- Noilhan, J., & Mahfouf, J. F. (1996). The ISBA land surface parameterisation

- scheme. *Global and Planetary Change*, 13(1–4), 145–159.
[https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00043-7)
- Noilhan, J., & Planton, S. (1989). A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Monthly Weather Review*.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2)
- Oke, T.R. Boundary layer climates. 2nd edition. Methuen, London, 1987. 435pp.
- P. Le Moigne, Boone, a, Calvet, J.-C., Decharme, B., Faroux, S., Gibelin, a.-L., ... Hurk, D. Van Den. (2009). Surfex Scientific documentation.
- Penuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L. and R. Save, R. (1993). The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status, *International Journal of Remote Sensing*14, 1887–1905.
- Pere, Q. S. (2015). SAFRAN analysis over Spain. ESPRI/IPSL.
<https://doi.org/10.14768/MISTRALS-HYMEX.1388>
- Piles, M., Camps, A., Vall-Llossera, M., Corbella, I., Panciera, R., Rudiger, C., ... Walker, J. (2011). Downscaling SMOS-derived soil moisture using MODIS visible/infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), 3156–3166. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2120615>
- Piles, M., Sánchez, N., Vall-Llossera, M., Camps, A., Martínez-Fernandez, J., Martínez, J., & Gonzalez-Gambau, V. (2014). A downscaling approach for SMOS land observations: Evaluation of high-resolution soil moisture maps over the Iberian peninsula. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(9), 3845–3857.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2325398>
- Piles, M., Vall-Llossera, M., Camps, A., Sanchez, N., Martinez-Fernandez, J., Martinez, J., ... Riera, R. (2013). On the synergy of SMOS and Terra/Aqua MODIS: High resolution soil moisture maps in near real-time. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 3423–3426.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723564>
- Pyne,S.J., Andrews, P.L., and Laven, R.D. (1996). Introduction to Wildland Fire (second ed.), New York, Wiley.
- Quintana Segui, P. (2008). Simulation hydrologique en région méditerranéenne avec SAFRAN-ISBA-MODCOU. Amélioration de la physique et évaluation des risques dans le cadre du changement climatique. *Thesis*.

- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., ... Morel, S. (2008). Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1), 92–107. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>
- Ran, Q., Zhang, Z.X., Zhang G.P., and Zhou, Q.B.(2005). DEM correction using TVDI to evaluate soil moisture status in China, *Science of Soil and Water Conservation*3, (2): 32–36.
- Sánchez-Ruiz, S., Piles, M., Sánchez, N., Martínez-Fernández, J., Vall-llossera, M., & Camps, A. (2014). Combining SMOS with visible and near/shortwave/thermal infrared satellite data for high resolution soil moisture estimates. *Journal of Hydrology*, 516, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.047>
- Schulz, M., G. deLeeuw, and Y. Balkanski, Sea-salt aerosol source functions and emissions. emissions of atmospheric trace compounds, P.A.C. Granier and C.E. Reeves, Eds., Kluwer, pp. 333359, 2004.
- Schwank, M., J.-P. Wigneron, et al. L-Band Radiative Properties of Vine Vegetation at the SMOS Cal/Val Site MELBEX III. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50(5): 1587-1601, 2012
- Schwank M., Wiesmann A., Werner C., Mätzler C., Weber D., Murk A., Völksch I. and Wegmüller U., 2010. ELBARA II, an L-Band Radiometer System for Soil Moisture Research. *Sensors* 2010, 10(1), 584-612; doi:10.3390/s100100584
- Sellers, P.J., Hall, F.G., Asrar, G., Strebel, D.E. and Murphy, R.E. (1988). The first ISLSCP Field Experiment (FIFE), *Bulletin of the American Meteorological Society* 69 (1): 22–27.
- Snyder, J.P. (1992), "An equal-area map projection for polyhedral globes," *Cartographica* 29(1):10-21)
- ThetaProbe SOIL MOISTURE SENSOR TYPE ML2x USER MANUAL ML2x-UM-1.21
- Topp, G. C., J. L. Davis, A. P Annan 1980 Electromagnetic determination of soil water content *Water Resour. Res* 16(3) 574-582

- Tsintikidis, D., Georgakakos, K.P., Artan, G.A. and Tsonis, A.A. (1999) A feasibility study on mean areal rainfall estimation and hydrologic response in the Blue Nile region using METEOSAT images. *Journal of Hydrology*, 221, 97-116.
- Vignati, E., G. DeLeeuw, and R. Berkowicz, Modeling coastal aerosol transport and effects of surfproduced aerosols on processes in the marine atmospheric boundary layer., *J. Geophys. Res.*, 106(D17), 20,225-20,238, 2001.
- Wang, P.X., Wan, Z.M., Gong, J.Y, Li, X.W. and Wang, J.D. (2003).Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products, *Advance in Earth Sciences* 18 (8):527–533.
- Wigneron, J.-P., Y. Kerr, P. Waldteufel, K. Saleh, M.-J. Escorihuela, P. Richaume, P. Ferrazzoli, P. de Rosnay, R. Gurney, J.-C. Calvet, J.P. Grant, M. Guglielmetti, B. Hornbuckle, C. Mätzler, T. Pellarin and M. Schwank (2007): L-band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB) Model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields. *Remote Sensing of Environment*, Volume 107, Issue 4, 30 April 2007, Pages 639-655
- Yao, C.S., Zhang, Z.X. and Wang, X. (2004). Evaluating soil moisture status in Xinjiang using the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI), *Remote Sensing Technology and Application* 19 (6):473–478.
- Zender, C., H. Bian, and D. Newman, The mineral dust entrainment and deposition (dead) model: Description and global dust distribution, *J. Geophys. Res.*, 108(D14), 4416, <http://dust.ess.uci.edu/dead/>, 2003.

Anexos

ANEXO I: CALIBRACIÓN DE LAS SONDAS DE HUMEDAD

Hay gran necesidad de realizar una calibración de las sondas fijas de las que se dispone, para comprobar su buen funcionamiento y poder así convertir los datos que nos proporcionan las sondas que vienen dados en voltios en términos de humedades del suelo.

Para realizar la calibración debemos tener en cuenta que las sondas son en realidad sensores de detección de constante dieléctrica (ϵ) de los suelos. Por ello se debe recoger muestras in-situ en el terreno. Se toman cuatro muestras alrededor de cada una de las sondas de humedad fijas, con la suficiente precaución de no dañar ni alterar la medida de la sonda. Estas cuatro muestras de suelo deben ser de igual tamaño con el fin de facilitar la calibración, se trata de un cilindro cubico de 5 cm, este tamaño se debe a que las sondas ThetaProbe miden los 5 primeros centímetros de la superficie del suelo.

Las muestras se recogieron para diferentes estados de humedad con el fin de que la calibración albergara el mayor número de posibilidades de calibración. Inmediatamente después de su recogida las muestras se pesaron y posteriormente se sometieron a un proceso de secado (en un horno). Después se volvieron a pesar obteniendo de esta forma el contenido de humedad real del suelo.

De forma que el contenido en humedad del suelo θ es:

$$\theta = (P_h - P_s) / V$$

Siendo P_h el peso de la tierra húmeda, P_s el peso de la tierra seca y V el volumen de la muestra.

De forma paralela se obtienen los datos de humedad de las sondas que vienen dados en voltios; de allí la necesidad de realizar la calibración para poder convertir esos datos de voltios a unidades de humedad ($m^3 m^{-3}$). Existe una relación entre la constante dieléctrica del suelo y la humedad del suelo y, como ya se ha mencionado anteriormente, las sondas son en realidad sensores de detección de constante dieléctrica de los suelos. Así pues, para realizar la calibración, es necesario pasar los datos que nos dan las sondas a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica y de esta forma se obtiene la ecuación de calibración para cada sonda.

Para la sonda ML2x ThetaProbe se obtiene un ajuste polinómico de 3er grado

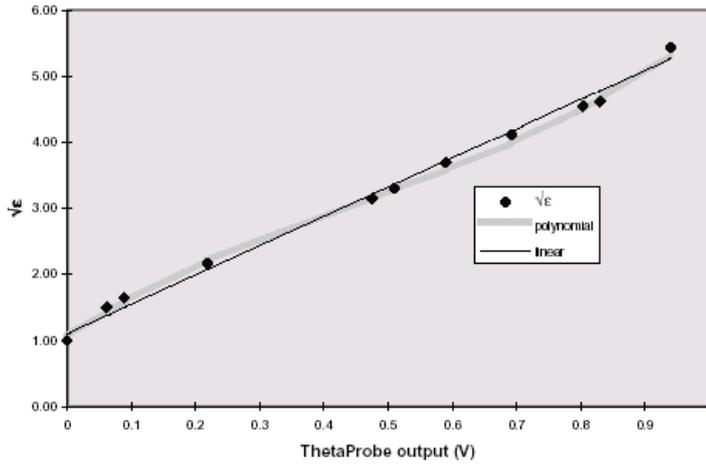


Figura 50 :Respuesta de la constante dieléctrica con la variación de Voltaje de la sonda ThetaPro

$$\sqrt{\epsilon} = 1,07 + 6,4 V - 6,4V^2 + 4,7 V^3 \quad (R^2 = 0,998) \text{ (respuesta polinómica)}$$

$$\sqrt{\epsilon} = 1,1 + 4,44 V \quad (R^2 = 0,99) \text{ (respuesta lineal)}$$

Se representan los datos de humedad que se obtienen de las muestras del suelo frente a los datos que nos proporcionan las sondas ya transformados a la raíz cuadrada de la contante dieléctrica y así se obtiene una simple ecuación lineal de calibración.

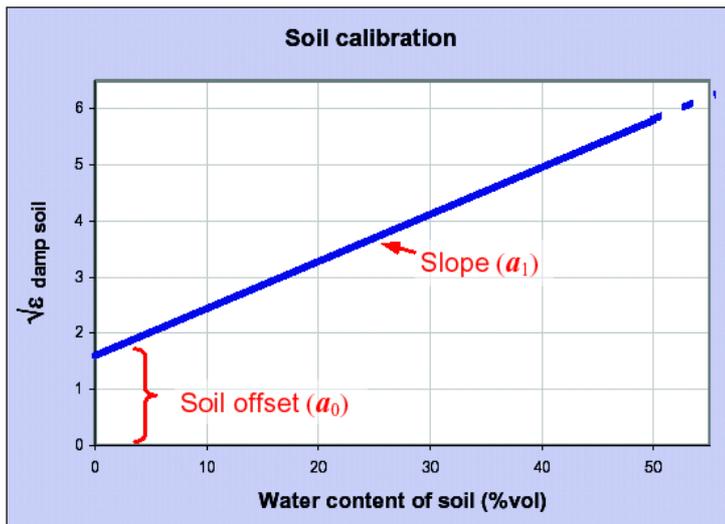


Figura 51: Respuesta de la constante dieléctrica con la humedad del suelo

$$\sqrt{\epsilon} = a_0 + a_1\theta$$

Todo este proceso se realizó para cada una de las sondas situadas en las estaciones de medidas y se obtienen los siguientes resultados de calibración:

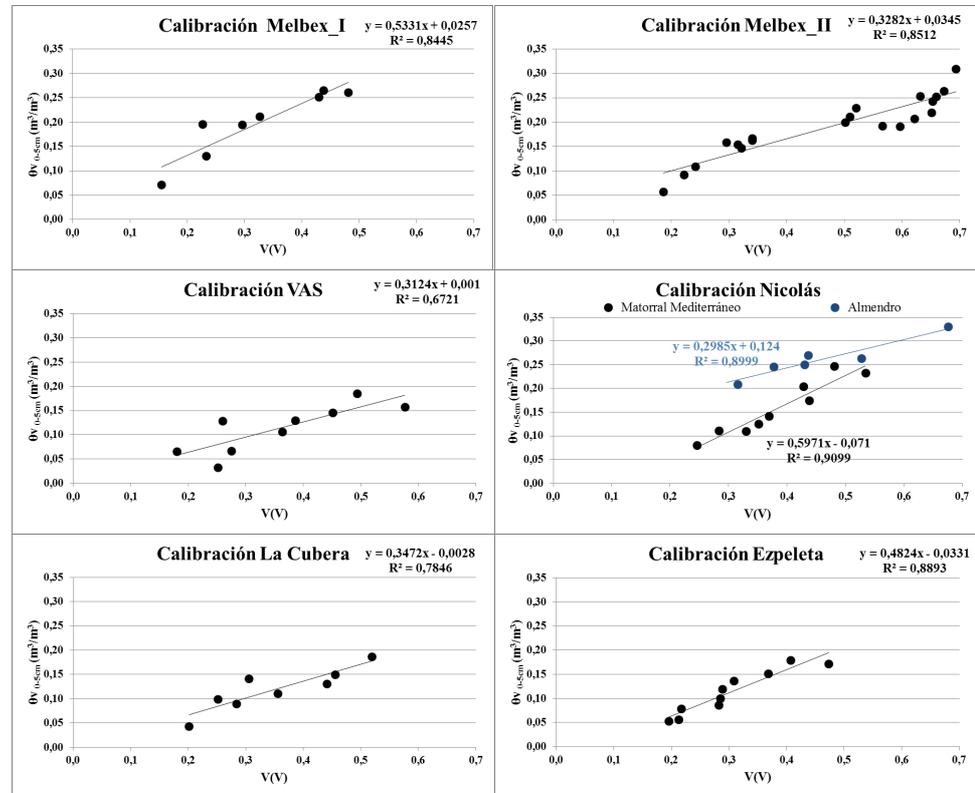


Figura 52 : Calibración de las sondas ThetaProbe situadas en estaciones de medidas

ANEXO II: CLASIFICACIÓN DEL ECOCLIMAP (P. Le Moigne, 2009)

ECOCLIMAP I

COVER 1 : Sea and ocean
COVER 2 : Inland waters
COVER 3 : Rivers
COVER 4 : Bare land
COVER 5 : Rocks
COVER 6 : Permanent snow and ice
COVER 7 : Urban and built-up

COVER 8 : Tropical undefined islands
COVER 9 : Subpolar undefined islands

ENF = Evergreen Needleleaf Forest

COVER 10 : S-America cool ENF
COVER 11 : Boreal ENF
COVER 12 : Asia subtropical ENF
COVER 13 : American Continental ENF
COVER 14 : American Subtropical ENF
COVER 15 : American Cool Marine ENF

EBF = Evergreen Broadleaf Forest

COVER 16 : Africa Equatorial EBF
COVER 17 : Africa Tr. wind EBF
COVER 18 : Oceania Equatorial EBF
COVER 19 : Asia tropical EBF
COVER 20 : Oceania tropical EBF
COVER 21 : Amazonian EBF
COVER 22 : SH subtropical EBF
COVER 23 : Cent. America Tr. wind EBF

DNF = Deciduous Needleleaf Forest

COVER 24 : Asian boreal DNF

DBF = Deciduous Broadleaf Forest

COVER 25 : S-America tropical DBF
COVER 26 : N-America humid continental DBF
COVER 27 : Cent. America Tr. wind DBF
COVER 28 : S-America humid subtropical DBF

MF = Mixed Forest

COVER 29 : Africa dry tropical MF
COVER 30 : S-America cool MF
COVER 31 : NH Subpolar MF
COVER 32 : NH Humid subtropical MF
COVER 33 : NH Continental MF

WL = Wood Land

COVER 34 : NH Africa WL
COVER 35 : SH Africa WL
COVER 36 : Tr. wind humid and subtrop. WL
COVER 37 : Oceania Equatorial WL
COVER 38 : Asia wet tropical WL
COVER 39 : S-America tropical WL
COVER 40 : S-America humid subtropical WL
COVER 41 : NH Subpolar WL
COVER 42 : NH Continental WL
COVER 43 : Asia humid subtropical WL
COVER 44 : N-America Semi arid WL
COVER 45 : N-America moderate polar WL
COVER 46 : S-America moderate polar WL
COVER 47 : N-America humid subtropical WL

WG = Wooded Grassland

COVER 48 : NH Africa semiarid WG
COVER 49 : NH Africa dry tropical WG
COVER 50 : Africa dry equatorial WG
COVER 51 : SH Africa dry tropical WG
COVER 52 : Oceania tropical WG
COVER 53 : Oceania semiarid WG
COVER 54 : Oceania subtrop. cool marine WG
COVER 55 : Asia humid and subtropical WG
COVER 56 : S-America trop. and subtrop. WG
COVER 57 : S-America Tr. wind WG
COVER 58 : S-America semiarid WG
COVER 59 : NH Subpolar WG
COVER 60 : NH Continental WG
COVER 61 : Asia wet and dry tropical WG
COVER 62 : N-America semi arid WG
COVER 63 : N-America humid subtropical WG
COVER 64 : S-America moderate polar WG
COVER 65 : Cent. Amer. Tr. wind & trop. WG
COVER 66 : NH Africa dry summer subtrop. WG

CS = Closed Shrubland

COVER 67 : NH Africa arid CS
COVER 68 : NH Africa semiarid CS
COVER 69 : SH Africa semiarid CS
COVER 70 : Oceania arid CS
COVER 71 : Oceania, S-America semiarid CS

Anexo II

COVER 72 : Oceania Tr. wind CS
COVER 73 : SH dry summer subtropical CS
COVER 74 : Asia polar CS
COVER 75 : Asia continental CS
COVER 76 : Asia tropical CS
COVER 77 : N-America polar CS
COVER 78 : N-America continental CS
COVER 79 : NH Africa dry summer subtrop. CS

OS = Open Shrubland

COVER 80 : NH arid OS
COVER 81 : NH semiarid tropical OS
COVER 82 : SH Africa and Oceania arid OS
COVER 83 : S-America semiarid tropical OS
COVER 84 : Asia dry tropical OS
COVER 85 : NH Polar OS
COVER 86 : N-America Subpolar OS
COVER 87 : N-America semiarid continental OS

G = Grassland

COVER 88 : Africa wet Tropical G
COVER 89 : NH Africa Semiarid G
COVER 90 : SH Africa Semiarid G
COVER 91 : S-America, Oceania equatorial G
COVER 92 : S-America, Oceania Semiarid G
COVER 93 : Oceania cool littoral G
COVER 94 : Asia wet and dry tropical G
COVER 95 : NH S-America wet tropical G
COVER 96 : SH S-America wet tropical G
COVER 97 : S-America semiarid G
COVER 98 : S-America moderate polar G
COVER 99 : NH semiarid Continental G
COVER 100 : Asia Subpolar G
COVER 101 : Asia humid Continental G
COVER 102 : Asia semiarid tropical G
COVER 103 : N-America continental G
COVER 104 : Asia humid subtropical G

C = Crops

COVER 105 : NH Africa arid C
COVER 106 : NH Africa, Asia wet and dry trop. C
COVER 107 : SH Africa wet and dry tropical C
COVER 108 : SH Afr. Tr. wind & semiarid trop. C
COVER 109 : Oceania dry summer subtropical C
COVER 110 : Cent. & S-Amer., Oceania Tr.

wind C
COVER 111 : S-America humid subtropical C
COVER 112 : SH S-America tropical C
COVER 113 : N-Amer., Asia semiarid continental C
COVER 114 : Asia humid continental C
COVER 115 : Asia humid subtropical C
COVER 116 : Asia subpolar C
COVER 117 : Asia semiarid tropical C
COVER 118 : N-America humid continental C
COVER 119 : N-America humid subtropical C
COVER 120 : NH dry summer subtropical C
COVER 121 : NH Africa dry summer subtropical C
COVER 122 : SH Africa dry summer subtropical C

COVER 123 : Bare soil with sparse polar vegetation

COVER 124 : Warm subtropical wetlands
COVER 125 : Subpolar wetlands

COVER 151 : Dense urban
COVER 152 : Mediterranean sub-urban
COVER 153 : Temperate sub-urban
COVER 154 : Cold sub-urban
COVER 155 : Industries and commercial areas
COVER 156 : Road and rail networks
COVER 157 : Port facilities
COVER 158 : Airport
COVER 159 : Mineral extraction, construction sites
COVER 160 : Urban parks
COVER 161 : Sport facilities

COVER 162 : Spanish crops
COVER 163 : Estremadura crops
COVER 164 : Mediterranean crops
COVER 165 : Atlantic coast crops
COVER 166 : Temperate crops
COVER 167 : Po plain crops
COVER 168 : Warm temperate crops
COVER 169 : Ukrainian crops
COVER 170 : Subpolar crops
COVER 171 : Mountain crops
COVER 172 : Central Europe crops
COVER 173 : Turkish crops

- COVER 174** : Mediterranean irrigated crops
COVER 175 : Irrigated crops
COVER 176 : Rice fields
- COVER 177** : Mediterranean vineyards
COVER 178 : Temperate vineyards
COVER 179 : Mediterranean fruit trees
COVER 180 : Temperate fruit trees
COVER 181 : Olive groves
- COVER 182** : Temperate pastures
COVER 183 : Atlantic border pastures
COVER 184 : Central and Eastern Europe pastures
COVER 185 : Ukrainian pastures
COVER 186 : Subpolar pastures
- COVER 187** : Spanish complex cultivation pattern
COVER 188 : Mediter. complex cultivation pat.
COVER 189 : Temperate complex cultivation pat.
COVER 190 : French complex cultivation pat.
COVER 191 : Balkanish complex cultivation pat.
- COVER 192** : Mediterranean crops and woodland
COVER 193 : Crops and woodland
COVER 194 : French crops and woodland
COVER 195 : Balkanish crops and woodland
COVER 196 : Spanish crops and woodland
COVER 197 : Baltic states crops and woodland
- COVER 198** : Agro-forestry areas
- COVER 199** : Spanish broad-leaved forest
COVER 200 : Estremadura broad-leaved forest
- COVER 201** : Mediterranean broad-leaved forest
COVER 202 : Atlantic coast broad-leaved forest
COVER 203 : Temperate broad-leaved forest
COVER 204 : Moutain broad-leaved forest
COVER 205 : Balkanish broad-leaved forest
- COVER 206** : Subpolar broad-leaved forest
COVER 207 : Black Sea broad-leaved forest
- COVER 208** : Mediterranean pines
COVER 209 : Landes forest
COVER 210 : Moutain coniferous forest
COVER 211 : Temperate coniferous forest
COVER 212 : Subpolar Taiga
COVER 213 : Russian Taiga
COVER 214 : Turkish coniferous forest
- COVER 215** : Mediterranean mixed forest
COVER 216 : Atlantic coast & french mixed forest
COVER 217 : Subpolar mixed forest
COVER 218 : Mountain mixed forest
COVER 219 : Eastern Europe mixed forest
- COVER 220** : Mediterranean GR
COVER 221 : Atlantic coast GR
COVER 222 : Balkanish GR
COVER 223 : Estremadura GR
COVER 224 : Subpolar GR
COVER 225 : Tundra
- COVER 226** : Turkish moors
COVER 227 : Mediter. moors & heath lands
COVER 228 : Moutain moors & heath lands
COVER 229 : Atlantic coast moors & heath lands
- COVER 230** : Turkish shrubland
COVER 231 : Mediterranean maquis
COVER 232 : Moutain maquis
- COVER 233** : Spanish woodland
COVER 234 : Mediterranean woodland
COVER 235 : Temperate woodland
- COVER 236** : Sparsely vegetated areas
COVER 237 : Burnt areas
COVER 238 : Temperate wetlands
COVER 239 : Subpolar wetlands
COVER 240 : Peat bogs
COVER 241 : Salines and salt marshes
- COVER 242** : Intertidal flats
COVER 243 : Coastal lagoons

ECOCLIMAP II

forests

COVER 301 : N SCANDINAVIA
TUNDRA1
COVER 302 : OURAL BF1
COVER 303 : CARELIE BF1
COVER 304 : NORTH RUSSIAN TAIGA1
COVER 305 : NORTH RUSSIAN TAIGA2
COVER 306 : CARELIE BF2
COVER 307 : RUSSIAN TAIGA3
COVER 308 : RUSSIAN BF1
COVER 309 : RUSSIAN TAIGA4
COVER 310 : S SCANDINAVIA TAIGA1
COVER 311 : SOUTH FINLANDIA MF1
COVER 312 : SOUTH NORWAY MF1
COVER 313 : BALTIC BF1
COVER 314 : BALTIC MF1
COVER 315 : SOUTH SWEDEN CF1
COVER 316 : BALTIC MF2
COVER 317 : SOUTH SWEDEN CF2
COVER 318 : SOUTH SWEDEN CF3
COVER 319 : SOUTH SWEDEN MF1
COVER 320 : MOUNTAIN MF1
COVER 321 : MOUNTAIN BF1
COVER 322 : TEMPERATE BF1
COVER 323 : TEMPERATE COMPLEX1
COVER 324 : MOUNTAIN CF1
COVER 325 : TEMP HERBACEOUS CF1
COVER 326 : ATLANTIC COAST BF1
COVER 327 : TURKISH CF1
COVER 328 : BALKAN CF1
COVER 329 : N SPAIN HERBAC MF1
COVER 330 : TEMP SW HERBAC CF1
COVER 331 : ATLANTIC COMPLEX1
COVER 332 : N SPAIN HERBAC MF2
COVER 333 : MEDITER COMPLEX1
COVER 334 : MEDITER COMPLEX2
COVER 335 : MEDITER COMPLEX3
COVER 336 : MEDITER COMPLEX4
COVER 337 : MEDITER COMPLEX5
COVER 338 : BURNT PORT HERBAC CF1
COVER 339 : BURNT PORT HERBAC BF1
COVER 340 : EGEE COAST COMPLEX1
COVER 341 : W MED COAST COMPLEX1
COVER 342 : MAGHR HERBACEOUS
MF1
COVER 343 : ESTREM HERBACEOUS
MF1

herbaceous / shrub covers

COVER 344 : POLAR MOUNT TUNDRA1
COVER 345 : POLAR MOUNT TUNDRA2
COVER 346 : S SCANDINAVIA
TUNDRA1
COVER 347 : NORTH TUNDRA1
COVER 348 : S SCANDINAVIA
TUNDRA2
COVER 349 : NORTH RUSSIA TUNDRA1
COVER 350 : ARAL CONTINENTAL GR1
COVER 351 : MOUNTAIN TAIGA
MOORS1
COVER 352 : SCOTTISH SWAMP
MOORS1
COVER 353 : ATLANTIC COMPLEX2
COVER 354 : ATLANTIC GR1
COVER 355 : IR SCOT SWAMP MOORS1
COVER 356 : ASIAN SPARSE GR1
COVER 357 : AS SPARSE SW COMPLEX1
COVER 358 : N CASPIAN DES OS1
COVER 359 : ATLAS AS SPARSE COMP1
COVER 360 : SPARSE SCO CEN EU GR1
COVER 361 : TEMPERATE COMPLEX2
COVER 362 : ATLANTIC COMPLEX3
COVER 363 : ATLANTIC COMPLEX4
COVER 364 : N ATLANTIC PASTURES1
COVER 365 : SPARSE SCO CEN EU GR2
COVER 366 : SPARSE MOUNT E EU GR1
COVER 367 : TUR N CASP CONT GR1
COVER 368 : N CASPIAN CONT GR1
COVER 369 : IRA N CASP CONT GR1
COVER 370 : TUR IRA MOUNT CONT
GR1
COVER 371 : E CASPIAN DES OS1
COVER 372 : N CASPIAN COMPLEX1
COVER 373 : IRAN MOUNT CONT GR1
COVER 374 : ASIAN SPARSE DES OS1
COVER 375 : E CASPIAN DES OS2
COVER 376 : N MEDITER COMPLEX1
COVER 377 : N MEDITER COMPLEX2
COVER 378 : ASIAN MEDIT CONT GR1
COVER 379 : SOUTH RUSSIA CONT GR1
COVER 380 : BLSEA SPARSE CONT GR1
COVER 381 : BLSEA SPARSE CONT GR2
COVER 382 : TURK MOUNT CONT GR1
COVER 383 : TURKISH COMPLEX1
COVER 384 : CAUCASIAN COMPLEX1
COVER 385 : N CASPIAN CONT GR2
COVER 386 : VOLGA VALLEY CONT
GR1

COVER 387 : VOLGA VALLEY CONT
GR2
COVER 388 : W CASPIAN CONT GR1
COVER 389 : CAUCASIAN COMPLEX2
COVER 390 : CAUCASIAN COMPLEX3
COVER 391 : BLSEA SPARSE CONT GR3
COVER 392 : CENT MASSIF COMPLEX1
COVER 393 : CENT MASSIF COMPLEX2
COVER 394 : TURK COAST COMPLEX1
COVER 395 : MESOPOTAMIA GR1
COVER 396 : TURK CILICIA COMPLEX1
COVER 397 : ASIAN COMPLEX1
COVER 398 : N MED SPARSE
COMPLEX1
COVER 399 : MEDITER COMPLEX6
COVER 400 : MEDIT SPARSE
COMPLEX1
COVER 401 : MEDIT SPARSE
COMPLEX2
COVER 402 : MEDIT SPARSE
COMPLEX3
COVER 403 : MEDIT SPARSE
COMPLEX4
COVER 404 : N MED HERBACEOUS CF1
COVER 405 : ESTREMADURA GR1
COVER 406 : TUNISIA COMPLEX1
COVER 407 : TUNISIA HERBACEOUS1
COVER 408 : ALGERIA HERBACEOUS1
COVER 409 : DESERTIC HERBACEOUS1
COVER 410 : DESERTIC HERBACEOUS2
COVER 411 : SPAIN DES COMPLEX1
COVER 412 : MED SPARSE COMPLEX5
COVER 413 : MED SPARSE COMPLEX6
COVER 414 : MED SPARSE COMPLEX7
COVER 415 : ME SPARSE DES COMPL1
COVER 416 : NORTH ARABIA GR1
COVER 417 : N ARABIA DES COMPLEX1
COVER 418 : N ARABIA DESERTIC GR1
COVER 419 : MOROCCO HERBACEOUS1
COVER 420 : S MED COAST HERBAC1
COVER 421 : W MEDITER WOODLAND1
COVER 422 : S MED COAST HERBAC2
COVER 423 : MESOP DES
HERBACEOUS1
COVER 424 : MAG COAST DES
HERBAC1
COVER 425 : TU AR SPARSE HERBAC1
COVER 426 : MEDIT SPARSE
COMPLEX8
COVER 427 : MED SPARSE HERBAC1
COVER 428 : MEDIT SPARSE
COMPLEX9
COVER 429 : SPAIN SPARSE COMPLEX1

COVER 430 : N MED SPARSE
COMPLEX2
COVER 431 : N MED SPARSE
COMPLEX3
COVER 432 : MAGHRE DES HERBAC1
COVER 433 : MAGHRE DES HERBAC2
COVER 434 : MAGHRE DES HERBAC3
COVER 435 : N ARAB DES HERBAC1
COVER 436 : MESOPO DES HERBAC2
COVER 437 : TOURAN DES HERBAC1
COVER 438 : MESOPO DES HERBAC2
COVER 439 : TOURAN DES HERBAC2
COVER 440 : NEW ZEMBLE HERBAC1
COVER 441 : NEW ZEMBLE HERBAC2

crops

COVER 442 : TRANS SIBERIAN CROPS1
COVER 443 : PO PLAIN CROPS1
COVER 444 : PO PLAIN CROPS2
COVER 445 : SPANISH FRENCH CROPS1
COVER 446 : SPANISH FR ITAL CROPS1
COVER 447 : DANUBE PLAIN CROPS1
COVER 448 : N MED SPARSE
COMPLEX4
COVER 449 : BALKAN CROPS1
COVER 450 : SPAIN FR ITAL CROPS2
COVER 451 : ATLANTIC CROPS1
COVER 452 : FR MED SPARSE CROPS1
COVER 453 : FR MED SPARSE CROPS2
COVER 454 : ATL MED SPARSE CROPS1
COVER 455 : BENE BLACK SEA CROPS1
COVER 456 : FRENCH ITALIAN CROPS1
COVER 457 : FR MED SPARSE CROPS3
COVER 458 : MEDITER SPARSE CROPS1
COVER 459 : ATLANTIC CROPS2
COVER 460 : NORTH ATLANTIC
CROPS1
COVER 461 : SOUTH RUSSIA CROPS1
COVER 462 : S RUSSIA BALTIC CROPS1
COVER 463 : UKRAINIAN CROPS1
COVER 464 : EAST CARPATES CROPS1
COVER 465 : E CENT EUROPE CROPS1
COVER 466 : W CENT EU SW CROPS1
COVER 467 : HUNGARIAN CROPS1
COVER 468 : N BLACK SEA CROPS1
COVER 469 : HUNG BULG CAUC
CROPS1
COVER 470 : SOUTH SWEDEN CROPS1
COVER 471 : SW RUSSIA CROPS1
COVER 472 : SOUTH RUSSIA CROPS1
COVER 473 : IRAN N CASPIAN CROPS1
COVER 474 : FR TEMP SPARSE CROPS1
COVER 475 : BULGARIAN CROPS1

COVER 476 : BULGARIAN CROPS2
COVER 477 : SP TURK SPARSE CROPS1
COVER 478 : FRENCH CENT EU CROPS1
COVER 479 : N BLACK SEA CROPS2
COVER 480 : BULGARIAN CROPS3
COVER 481 : POLE CROPS1
COVER 482 : POLE CROPS2
COVER 483 : N BLACK SEA CROPS3
COVER 484 : CENT EU SPARSE CROPS1
COVER 485 : GERMAN CROPS1
COVER 486 : BEAUCE CROPS1
COVER 487 : DANE CROPS1
COVER 488 : DANE CROPS2
COVER 489 : NEU ATL SPARSE CROPS1
COVER 490 : SYRIAN CROPS1
COVER 491 : GERMAN CROPS2
COVER 492 : CHANNEL CROPS1
COVER 493 : CHANNEL CROPS2
COVER 494 : ITALIAN CROPS1
COVER 495 : TURKISH CROPS1
COVER 496 : N MEDIT SPARSE CROPS1
COVER 497 : SPAIN TUR ARAB CROPS1
COVER 498 : NORTH SPAIN CROPS1
COVER 499 : MOROCCO TUNIS CROPS1
COVER 500 : MOROCCO CROPS1
COVER 501 : MOROCCO CROPS2
COVER 502 : ALGERIAN CROPS1
COVER 503 : MOROCCO CROPS3
COVER 504 : WEST SPAIN CROPS1
COVER 505 : MOROCCO CROPS4
COVER 506 : NORTH MEDITER CROPS1
COVER 507 : SOUTH SPANISH CROPS1
COVER 508 : SICILIAN CROPS1
COVER 509 : MAGHREB SPARSE
CROPS1
COVER 510 : N MEDIT SPARSE CROPS2
COVER 511 : N MEDIT SPARSE CROPS3
COVER 512 : SP IT WCOAST CROPS1
COVER 513 : ESTREMADURA CROPS1
COVER 514 : ESTREMADURA CROPS2
COVER 515 : SP IT WCOAST CROPS2
COVER 516 : ESTREMADURA CROPS3
COVER 517 : MEDIT ISLANDS CROPS1
COVER 518 : SPAIN W COAST CROPS1
COVER 519 : ESTREMADURA CROPS4
COVER 520 : MECOAST SPARSE
CROPS1
COVER 521 : BRITTANY CROPS1
COVER 522 : SYRIAN CROPS2

irrigated crops

COVER 523 : NIL VALLEY CROPS1
COVER 524 : NIL VALLEY CROPS2

COVER 525 : NIL VALLEY CROPS3
COVER 526 : NIL VALLEY CROPS4
COVER 527 : SPANISH IRR CROPS1
COVER 528 : NIL VALLEY CROPS5
COVER 529 : EGEE IRR CROPS1
COVER 530 : MEDITER IRR CROPS1
COVER 531 : S SPAIN IRR CROPS1
COVER 532 : NIL VALLEY CROPS6

bare land

COVER 533 : BARE ROCK1
COVER 534 : BARE ROCK2
COVER 535 : SANDY DESERT1
COVER 536 : BARE LAND1
COVER 537 : BARE LAND2
COVER 538 : BARE LAND3
COVER 539 : BARE LAND4
COVER 540 : BARE LAND5
COVER 541 : BARE LAND6
COVER 542 : BARE LAND7
COVER 543 : BARE LAND8
COVER 544 : BARE LAND9
COVER 545 : BARE LAND10
COVER 546 : BARE LAND11
COVER 547 : BARE LAND12
COVER 548 : PERMANENT SNOW1

swamp areas and inland waters

COVER 549 : INLAND WATERS1
COVER 550 : UNDEFINED1
COVER 551 : INLAND WATERS2
COVER 552 : POLAR WETLANDS1
COVER 553 : INLAND WATERS3
COVER 554 : INLAND WATERS4
COVER 555 : INLAND WATERS5
COVER 556 : INLAND WATERS6
COVER 557 : POLAR WETLANDS2
COVER 558 : SUBPOLAR WETLANDS1
COVER 559 : SUBPOLAR WETLANDS2
COVER 560 : SUBPOLAR WETLANDS3

urban

COVER 561 : TEMPERATE SUBURBAN1
COVER 562 : TEMPERATE SUBURBAN2
COVER 563 : TEMPERATE SUBURBAN3
COVER 564 : TEMPERATE SUBURBAN4
COVER 565 : TEMPERATE SUBURBAN5
COVER 566 : COLD SUBURBAN1
COVER 567 : WARM SUBURBAN1
COVER 568 : WARM SUBURBAN2
COVER 569 : TEMPERATE SUBURBAN6

COVER 570 : TEMPERATE SUBURBAN7
COVER 571 : WARM SUBURBAN3

added classes of permanent crops

COVER 572 : SPANISH VINEYARDS1
COVER 573 : LANGUEDOC
VINEYARDS1

