POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Applicazione dei dati satellitari del programma Copernicus per indagare l'effetto del suolo sulla dinamica delle strutture



RelatoreProf. Rosario CERAVOLO

Laureando Marta Congedo

CorrelatoreGaetano MIRAGLIA

Giorgia COLETTA Stefania COCCIMIGLIO

Anno Accademico 2020/2021

All'amore dei miei genitori e a quello di mio fratello...

Il successo non è mai definitivo, il fallimento non è mai fatale; è il coraggio di continuare che conta.

Sir Winston Churchill

Sommario

Nell'ambito dello Structural Health Monitoring (SHM) delle strutture civili, l'effetto che il suolo esercita sulla dinamica del sistema rappresenta un argomento di grande interesse. Infatti, a differenza di altre strutture tipicamente oggetto di monitoraggio come per esempio quelle meccaniche, aerospaziali e aeronautiche, le strutture civili costituiscono un unico sistema con il suolo su cui sono fondate e il non considerare la loro interdipendenza potrebbe incrementare l'incertezza o determinare errori nella diagnosi. Tuttavia, lo studio della relazione tra i due elementi in molti casi viene ostacolato dall'insufficienza, o addirittura totale assenza, di dati relativi alle caratteristiche del terreno e alle loro variazioni nel tempo, poiché l'istallazione di sistemi di monitoraggio del terreno risulta costosa e talvolta tecnicamente difficoltosa.

Negli ultimi tempi si sta diffondendo sempre più l'utilizzo di dati ottenuti da telerilevamento satellitare, i quali potrebbero rappresentare una valida alternativa per la conoscenza del terreno. Tali dati, grazie alla loro ampia disponibilità temporale e spaziale, versatilità e basso costo potrebbero costituire un utile strumento quando è impossibile ottenere le caratteristiche del suolo tramite le classiche indagini in situ.

Precedenti ricerche hanno esplorato l'uso dei dati del programma europeo Copernicus del European Space Agency (ESA), pensati per il monitoraggio ambientale, nell'ambito dello SHM, ottenendo risultati promettenti. In particolare, era stato esaminato il parametro satellitare denominato Land Surface Temperature (LST) riguardante la condizione termica del terreno e lo studio ha evidenziato correlazioni significative con le frequenze naturali del caso studio considerato.

Nel lavoro qui presentato, viene esplorato l'utilizzo di un altro parametro, il Soil Water Index (SWI), rappresentativo delle condizioni di umidità del suolo dalla superficie alla profondità; al dato satellitare sono stati affiancati i dati di umidità del terreno ottenuti da misurazioni in situ, ricavate dal progetto proposto dall'International Soil Moisture Network (ISMN). Una volta raccolti entrambi i dati relativi a diversi anni di osservazione, questi sono stati analizzati e confrontati al fine di validare il dato satellitare per l'utilizzo proposto. Le

informazioni geofisiche così ricavate sono state incrociate con i dati sperimentali raccolti dal sistema di monitoraggio dinamico del caso studio selezionato ed è stato sfruttato un modello numerico per simulare variazioni di umidità del terreno e quantificare l'effetto di esse sulle frequenze naturali della struttura.

Il Santuario di Vicoforte, chiesa monumentale italiana del XVIII secolo e opera tra le principali del barocco piemontese che si contraddistingue per la sua imponente cupola ovale, è stato scelto come caso di studio di questa analisi. I sistemi di monitoraggio strutturale statico e dinamico dell'opera, entrambi permanenti, in concomitanza con le indagini geotecniche e geofisiche del terreno sottostante, hanno permesso una visione integrale del sistema nel suo complesso, alla quale si è aggiunto il punto di vista satellitare.

Abstract

In the context of Structural Health Monitoring (SHM) of civil structures, the effect of the soil on the dynamics of the system is an issue of great interest. In fact, unlike other structures typically subject to monitoring such as mechanical, aerospace and aeronautical ones, civil structures represent a single system with the ground on which they are based; not considering their interdependence could increase uncertainty or lead to errors in the diagnosis. However, the study of the relationship between the two elements is often hindered by the insufficiency, or total absence, of data relating to the characteristics of the soil and their variations over time, since the installation of soil monitoring systems is expensive and sometimes technically difficult.

In recent years the use of data obtained from satellite remote sensing has become increasingly widespread, which could represent a valid alternative for knowledge of the soil; thanks to their wide temporal and spatial availability, versatility and low cost, these data could be a useful tool when it is impossible to obtain the characteristics of the soil through classical in situ surveys.

Previous research has explored the use of data from the European Space Agency's (ESA) Copernicus program, originally designed for environmental monitoring, in the context of the SHM, with promising results. In particular, the satellite parameter called Land Surface Temperature (LST) concerning the thermal condition of the ground was examined and the study highlighted significant correlations with the natural frequencies of the case study considered.

In the present work, the use of another parameter is explored, the Soil Water Index (SWI), representative of the soil moisture conditions from the surface to the depth; the satellite data has been combined with soil moisture data obtained from in situ measurements, collected from the project proposed by the International Soil Moisture Network (ISMN). Once both data relating to several years of observation were collected, they have been analyzed and compared in order to validate the satellite data for the proposed use. The obtained geophysical information was crossed with the experimental data collected by the dynamic monitoring system of the case study and a numerical

model has been used to simulate the soil moisture variations and quantify their effect on the natural frequencies of the structure.

The Sanctuary of Vicoforte has been chosen as a case study for this analysis. It is an Italian monumental church of the 18th century and one of the main baroque buildings in Piedmont, which is known for its imposing oval dome. The static and dynamic structural monitoring systems of the building, both permanent, with the geotechnical and geophysical investigations of the underlying ground have allowed an integral view of the system as a whole, to which the satellite point of view has been added.

Indice

1	Int r 1.1	roduzione Struttura della tesi	1 3
2	Il S	antuario di Vicoforte	5
	2.1	Cenni storici	6
	2.2	Caratterizzazione del terreno	8
	2.3	Modelli FE del Santuario di Vicoforte	10
3	Dat	ci satellitari	17
	3.1	Soil Water Index (SWI)	18
4	Dat	ci in situ	23
	4.1	ISMN	23
	4.2	Soil Moisture	24
		4.2.1 Acquisizione dei dati SM dall'ISMN	
5	Elal	borazione ed analisi dei dati satellitari e misure in situ	29
	5.1	Scelta stazioni	30
	5.2	Scelta SWI (T)	32
	5.3	Risultati	35
6	App	plicazione dei risultati sul caso studio	47
	6.1	Grado di saturazione predetto	48
	6.2	Parametri elastici del terreno	53
	6.3	Applicazione su FEM del Santuario di Vicoforte	56
		6.3.1 Procedura adottata e risultati	
7	Disc	cussione e conclusioni	73
\mathbf{A}	NE'	TWORK : UMBRIA	81
В	NE'	TWORK : HOBE	91

vi		INDICE
\mathbf{C}	NETWORK : SMOSMANIA	99
D	NETWORK: TERENO	119
${f E}$	NETWORK: HOAL	127
\mathbf{F}	${f NETWORK: FR-Aqui}$	149
\mathbf{G}	NETWORK : MOL-RAO	157
н	NETWORK : NVE	163

Elenco delle figure

2.1	Santuario di Santa Maria Montis Regalis a Vicoforte	5
2.2	Santuario di Santa Maria Montis Regalis a Vicoforte (prospet-	
	tiva del Tempio dal piazzale nel 1896).	5
2.3	Diagrammi assonometrici degli strati di marna e limo-argilloso .	7
2.4	Quadro fessurativo e vista assonometrica delle fondazioni	8
2.5	Sistema di monitoraggio statico del Santuario di Vicoforte	8
2.6	Sistema di monitoraggio statico del Santuario di Vicoforte	9
2.7	Layout delle prove geotecniche e geofisiche eseguite a Vicoforte	
	nel 1976, 2004 e 2008	11
2.8	Modello agli elementi finiti del Santuario [3]	13
2.9	Modello agli elementi finiti del Santuario [4]	14
2.10	Modulo di Young calibrato [4]	15
3.1	Struttura generale dell'algoritmo SCATSAR-SWI per SWI1km, conle procedure offline dell'algoritmo in blu, e procedure NRT in rosa	19
4.1 4.2	Interfaccia web dell'ISMN (stato attuale - Agosto 2021) Esempio della finestra di visualizzazione della stazione Petrelle - network UMBRIA	2627
5.1	Classificazione climatica mondiale secondo il sistema Köppen-Geiger [12]	34
5.2	Rappresentazione grafica dei modelli $SWI(T=2)$ - SM predetta .	44
5.3	Sovrapposizione risultati derivanti dai 5 modelli SWI (T=2) -	11
0.0	Umidità del terreno predetta	45
6.1	Rappresentazione grafica dei modelli SWI (T=2) - Umidità del terreno predetta, sito Vicoforte	51
6.2	Sovrapposizione risultati derivanti dai 9 modelli SWI ($T=2$) -	
	Umidità del terreno predetta, sito Vicoforte	51

6.3	Istogramma e PDF dei dati predicted SM minimo, medio e
0.4	massimo
6.4	Schema del modello lineare assunto per il grado di saturazione S_r lungo la profondità z. [19]
6.5	Legge del modulo di taglio in funzione del Grado di saturazione
	superficiale e l'altezza di falda
6.6	Legge del coefficiente di Poisson in funzione del Grado di saturazione superficiale e l'altezza di falda
6.7	Legge del modulo di Young in funzione del Grado di saturazione
0.7	superficiale e l'altezza di falda
6.8	Rappresentazione grafica della prima frequenza naturale otte-
	nuta dal FEM, funzione di S_{rc} e z_0
6.9	Rappresentazione grafica della seconda frequenza naturale otte-
C 10	nuta dal FEM, funzione di S_{rc} e z_0
	Contour plot per il primo modo del Santuario di Vicoforte 60
	Contour plot per il secondo modo del Santuario di Vicoforte 6:
6.12	Relazione tra le frequenze naturali sperimentali e la temperatura dell'aria
6.13	Rappresentazione delle frequenze sperimentali tenendo conto
C 1 4	dell'effetto della temperatura dell'aria
6.14	Legge grado di saturazione medio - frequenze numeriche da analisi su FEM
6.15	Rappresentazione delle frequenze sperimentali private dell'effet-
	to della temperatura dell'aria
6.16	Sovrapposizione frequenze sperimentali nelle 3 configurazioni:
	con l'effetto della temperatura dell'aria e grado di saturazione e frequenze con il solo effetto del grado di saturazione
6 17	
	1 10, 0 1,10
0.18	Metodo per la determinazione del grado di saturazione associato ai valori sperimentali di frequenza, sfruttando la legge dei valori
0.10	numerici
6.19	Grado di saturazione stimato associato ai valori sperimentali di
6 20	frequenza, sfruttando la legge dei valori numerici
0.20	Esempio estrapolazione della stima del dato della profondità di falda
6.21	Stima dell'altezza di falda di Vicoforte 6'
	Legge sperimentale di $S_{rc},z_0,$ frequenze senza l'effetto termico . 68
	Sovrapposizione risultati numerici e sperimentali - primo modo . 69
	Sovrapposizione 3D risultati numerici e sperimentali - secondo
	modo

6.25	Sovrapposizione risultati numerici e sperimentali - primo modo .	70
6.26	Sovrapposizione risultati numerici e sperimentali - secondo modo	71
6.27	Frequenze sperimentali senza effetto termico	71
6.28	Frequenze sperimentali senza effetto termico e della saturazione	72
6.29	Sovrapposizione delle frequenze sperimentali con effetto termi-	
	co, senza effetto termico, senza effetto termico e di saturazione.	72

Elenco delle tabelle

4.1	Definizione del formato del set di dati CEOP [9]	25
4.2	Intervalli delle variabili plausibili per i dati meteorologici me-	
	morizzati nell'ISMN [9]	25
5.1	Layer di riferimento dei modelli [11]	33
5.2	Classi climatiche [11]	33
5.3	Valori di T consigliati in base al layer e alla classe climatica [11]	34
5.4	Tabella riassuntiva dei risultati derivanti dalla regressione linea-	
	re delle 20 stazioni in esame	37

Capitolo 1

Introduzione

Un punto cruciale per quanto riguarda lo Structural Health Monitoring (SHM) è quello di riuscire a distinguere il reale danneggiamento della struttura; in particolare, le frequenze naturali che si registrano, spesso potrebbero riportare dei falsi negativi o falsi positivi, dove i primi sono quelli meno gravosi in quanto lanciano un falso allarme di intervento nei confronti di un danneggiamento non reale, mentre i secondi sono quelli maggiormente pericolosi in quanto tendono a mascherare la presenza di un danneggiamento reale, aumentando così il rischio. Lo scopo dello studio degli effetti ambientali sulla dinamica della struttura è proprio quello di stabilizzare le frequenze per una migliore lettura ed interpretazione.

Negli ultimi anni, l'uso dei dati di telerilevamento satellitare sta diventando una fondamentale alternativa per lo Structural Health Monitoring di opere civili e monumentali. La risposta dinamica di una struttura dipende in misura maggiore o minore da alcune variazioni ambientali, nonché dalle caratteristiche strutturali. Questi fattori esterni hanno un duplice effetto perché agiscono direttamente sulla struttura emergente, e inevitabilmente influenzano il suo terreno di fondazione, alterando e modificandone le proprietà, questo, potrebbe dare luogo a una modifica delle condizioni di vincolo, che influisce sulla rigidezza dell'intero sistema vibrante.

Il telerilevamento (*Remote sensing*) è una tecnica che permette di ottenere e raccogliere informazioni attraverso l'utilizzo di diverse tipologie di sensori i quali possono trovarsi su satelliti o su velivoli, posti ad una determinata distanza dalla superficie della Terra.

È noto che, lo studio dell'influenza del terreno sulla struttura è un fattore non trascurabile nel comportamento strutturale delle opere, ma spesso risulta critico ed ostacolato dalla limitata disponibilità o completa assenza di dati di monitoraggio continuo del terreno provenienti dalle classiche indagine in situ, che talvolta possono essere di difficile esecuzione, per difficoltà di accesso o installazione degli strumenti a causa di problematiche legate alla configurazione del luogo in esame. A tal proposito, i dati satellitari per il monitoraggio ambientale costituiscono una fonte di informazioni sullo stato del suolo, i quali riguardano le condizioni termiche, saturazione e altri parametri utili. Inoltre, sono disponibili con campionamento variabile su quasi tutta la superficie del pianeta, la possibilità di accedere e raccogliere in modo più semplice i dati su piattaforme online garantisce un beneficio in termini economici, in quanto i costi per le indagine standard risultano maggiormente impegnativi.

Il caso studio della tesi qui presentata è quello del Santuario di Vicoforte (CN), complesso monumentale del XVIII secolo che rappresenta una delle opere piemontesi più importanti, in quanto ospita la cupola ovale più grande al mondo. Pertanto, la Basilica è da tempo oggetto di studi improntati sulla sua salvaguardia.

Nel presente lavoro, il quesito che ci si pone è se specifici dati satelliari possono o meno essere uno strumento utile per il monitoraggio strutturale. In un precedente lavoro è stato indagato e studiato l'utilizzo di un parametro quale il Land Surface Temperature (LST) [1], relativo all'influenza della temperatura del suolo sulla dinamica della struttura. Qui, sono stati raccolti ed analizzati due differenti tipologie di dati: quelli di Soil Water Index (SWI) dei satelliti Sentinel-1 e Metop e quelli misurati in situ dell'umidità del terreno forniti dall'International Soil Moisture Network (ISMN). Questo è stato fatto per ricercare dapprima la relazione che lega i due parametri in modo da poter utilizzare, nel modo corretto, direttamente il dato satellitare nel monitoraggio strutturale. In particolare, lo studio iniziale è stato effettuato poiché per il terreno di Vicoforte l'unico dato disponibile tra i due indagati era quello ottenuto da telerilevamento, quindi vi è la completa assenza di misurazioni in situ per l'arco temporale analizzato nella presente tesi. A tal proposito, studiando la relazione che intercorre tra i suddetti parametri sulla base di siti in cui vi era la disponibilità di entrambi, si è ricercato un modello predittivo, dal quale conoscendo il dato satellitare si può facilmente dedurre il valore della misure in situ ad esso associato.

Tutto ciò è stato fatto per ottenere il grado di saturazione del sito in esame, e studiare l'influenza di questo effetto ambientale sulle frequenze naturali della struttura. Quanto appena detto, è stato possibile grazie all'utilizzo di un modello agli elementi finiti (FEM) in grado di simulare il comportamento della Basilica; in tale simulazione sono stati modificati i parametri del terreno in funzione del grado di saturazione per considerarne intrinsecamente l'effetto. Infine, si è effettuato un confronto tra le frequenze ottenute numericamente dallo studio proposto e quelle sperimentali, con le opportune considerazioni.

3

1.1 Struttura della tesi

La tesi qui presentata è costituita da sette capitoli ed è organizzata come segue.

Nel presente Capitolo 1 è riportata un'introduzione del lavoro svolto in cui è riassunto ciò che è stato fatto e l'obiettivo sulla base del quale è stata improntata la tesi.

Nel Capitolo 2 è presentata l'opera monumentale del caso studio, con alcuni cenni storici, indagini geofisiche e geotecniche effettuate nel passato e illustrati due recenti modelli agli elementi finiti usati per la simulazione del comportamento dinamico del Santuario di Vicoforte.

Nel $Capitolo\ 3$ viene presentato il primo parametro utilizzato per l'analisi proposta, ossia il dato satellitare Soil Water Index (SWI).

Nel Capitolo 4 invece, è presentato il secondo parametro utile per lo studio, relativo alle misurazioni in situ dell'umidità del suolo volumetrica Soil Moisture (SM).

Nel Capitolo 5 è riportata l'intera procedura adottata per la raccolta, elaborazione ed analisi dei due parametri indagati.

Nel Capitolo 6, a seguito dell'analisi dei dati, è presentata l'applicazione sul caso studio, la Basilica Regina Montis Regalis, compresa l'analisi agli autovalori effettuata nel modello FE e i risultati da essa ricavati sulla base dei valori ottenuti dallo studio definito in precedenza.

Nel Capitolo 7 sono riportati un riepilogo e le conclusioni tratte dal lavoro svolto, e proposte per lavori futuri.

Alla fine della tesi sono riportate le appendici con alcuni risultati grafici ottenuti dall'analisi.

Capitolo 2

Il Santuario di Vicoforte



Figura 2.1: Santuario di Santa Maria Montis Regalis a Vicoforte



Figura 2.2: Santuario di Santa Maria Montis Regalis a Vicoforte (prospettiva del Tempio dal piazzale nel 1896).

2.1 Cenni storici

La Basilica "Regina Montis Regalis" è situata a Vicoforte (CN), in Piemonte nel nord Italia. È un monumento di grande valore artistico, storico e strutturale costruito tra il 1596 ed il 1750. Un aspetto rilevante è l'eccezionale cupola ellittica che sormonta il Santuario, la più grande al mondo di tale forma, con un asse maggiore di 37.23 m e un asse minore di 24.89 m, e la quinta se messa a confronto con quelle a pianta circolare costruite in muratura.

Il progetto di tale monumento fu assecondato dal Duca Carlo Emanuele I di Savoia, il quale pensò alla chiesa come luogo di sepoltura del casato, affidandolo all'architetto Ascanio Vitozzi. La posa della prima pietra del monumento avvenne in forma solenne il 7 luglio 1596; nel 1599 l'opera aveva raggiunto il livello d'imposta dei grandi archi, i cedimenti erano dell'ordine dei 25-30 cm. Pertanto, l'avanzamento dei lavori di costruzione furono interrotti e venne posizionato un sistema di drenaggio nella parte più bassa della fondazione, affinché potesse drenare l'acqua dal materiale argilloso ed evitare in questo modo ulteriori assestamenti pericolosi. Nel 1615 Vitozzi morì e i lavori rallentarono fino ad essere sospesi in seguito alla morte del Duca nel 1630 e alle generali condizioni di crisi sociale ed economica del tempo, così, il cantiere del Santuario si fermò per quasi un secolo. L'opera era ferma a 12 metri, all'imposta degli arconi.

Nel 1672, la costruzione riprese sotto la guida dei monaci cistercensi. Il santuario era giunto quasi a 18 metri e mezzo di altezza, compresi gli archi e per la prima volta risuonò l'invocazione "Regina Montis Regalis, ora pro nobis" [2].

Nel 1701, l'architetto di grande valore Francesco Gallo, assunse la cura della costruzione; l'imponente tamburo che sorregge la cupola ellittica fu costruito nei primi anni del Settecento e si erge a definire il corpo centrale della splendida costruzione. La grande cupola, record nella sua forma, fu costruita nel 1731. I contrafforti vennero realizzati contemporaneamente alla gran volta, quelli collocati lungo l'asse maggiore della cupola furono costruiti cavi così da ricavare spazio per le scale, ma anche per evitare dispendio di materiale lì dove non si prevedevano spinte orizzontali eccessive; furono realizzate le nervatura sull'estradosso della cupola per irrigidirla e per permettere che gli sforzi fossero scaricati sui contrafforti. Nel 1734 si dispose un sistema di cerchiaggio disposto su 3 livelli per contenere e gestire le spinte orizzontali. Negli anni successivi furono completati gli spazi interni e la facciata ed i lavori durarono fino al 1917, quando fu indetto il concorso per la progettazione dei nuovi campanili. La diversità nello stile dei quattro campanili fa da testimone al lungo percorso costruttivo dell'opera.

La Basilica, sin dai primi tempi, fu soggetta a problemi strutturali legati

2.1 Cenni storici 7

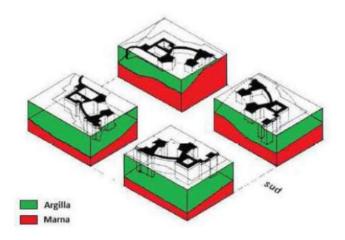


Figura 2.3: Diagrammi assonometrici degli strati di marna e limo-argilloso

a cedimenti differenziali delle fondazioni dovuti alla tipologia di terreno al di sotto dell'opera.

Il Santuario infatti, è situato su uno strato superficiale variabile di limo argilloso con caratteristiche meccaniche modeste al di sopra di uno strato di marna più resistente (Figura 2.3). Tre di otto pilastri di fondazione ricadono sullo strato marnoso, mentre i restanti cinque si trovano sul materiale alluvionale.

Sulla base di documentazioni storiche, è noto che i fenomeni di fessurazione iniziarono a manifestarsi a partire dalle prime fasi della sua costruzione. In particolare, ci sono due zone che destano maggiore preoccupazione: la zona delle finestre del tamburo e la zona alla base dei contrafforti (Figura 2.4). Il primo presenta una fitta rete di fessure che corrono in direzione verticale, per lo più concentrate nella porzione muraria appena sopra l'imposta. Nel 1985, le preoccupazioni per una fessurazione così grave hanno spinto la decisione di intraprendere lavori di monitoraggio e rafforzamento. Nel 1987, fu inserito un ulteriore sistema di cerchiaggio su 4 livelli, costituito da 56 tiranti attivi, post-tesi da martinetti, questo è stato applicato all'interno della muratura alla sommità del tamburo lungo 14 tangenti che interessano il perimetro. Inoltre, è stato predisposto un complesso sistema di monitoraggio per misurare i movimenti della struttura e la propagazione delle fessurazioni, nonché le sollecitazioni nei tiranti d'armatura.

Negli ultimi anni è stato avviato un nuovo progetto per un profondo rinnovamento del sistema di monitoraggio e l'aggiornamento dei modelli strutturali, originariamente adottato per esplorare la configurazione statica e l'integrità

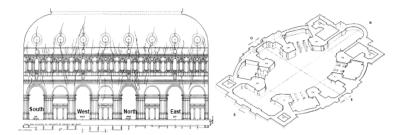


Figura 2.4: Quadro fessurativo e vista assonometrica delle fondazioni

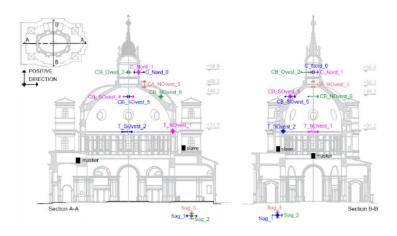


Figura 2.5: Sistema di monitoraggio statico del Santuario di Vicoforte

della costruzione e per definire le caratteristiche del sistema di rinforzo. In particolare, in tempi recenti, esattamente nel 2004, furono aggiunti vari strumenti di tecnologia più avanzata per il monitoraggio statico, quali strumenti per la misurazione di stati tensionali, spostamenti e deformazioni posizionati direttamente all'interno dell'opera affiancati a strumenti per la misurazione delle condizioni ambientali.

Successivamente, nel 2015,a quello statico fu accoppiato anche un sistema di monitoraggio dinamico costituito da accelerometri monoassiali, tutto questo con lo scopo di ottenere un quadro sempre più preciso della "salute" della Basilica, si vedano Figure 2.5 e 2.6.

2.2 Caratterizzazione del terreno

Un'accurata conoscenza delle proprietà del terreno di Vicoforte è un aspetto fondamentale per comprendere al meglio la risposta dinamica di quest'opera monumentale [2]. Nel caso del Santuario questa tematica risulta particolarmen-

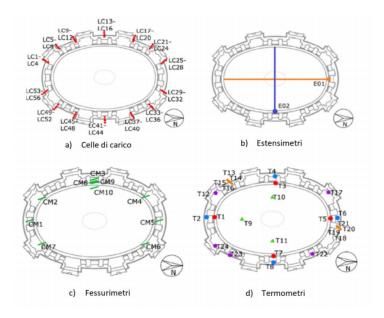


Figura 2.6: Sistema di monitoraggio statico del Santuario di Vicoforte

te importante in quanto si sono presentate sin dall'inizio difficoltà in termini di fessurazioni. A tal proposito, nel passato, sono state eseguite 3 principali campagne d'indagine.

La prima è stata fatta nel 1976 e consisteva in perforazioni di sondaggio, Standard Penetration Test (SPT), prove di laboratorio eseguite su campioni di terreno indisturbati e un rilievo della geometria della fondazione.

Nasceva però la necessità di eseguire una campagna d'indagine geotecnica sempre più raffinata, per tale ragione, nel 2004, per la seconda campagna d'indagine fu stipulato un accordo tra l'amministrazione del Santuario di Vicoforte e il Politecnico di Torino per il monitoraggio e la verifica della stabilità della Basilica. I test previsti e messi in opera per questa ulteriore campagna includevano il campionamento del suolo, test di laboratorio e un test Cross Hole.

Il passo successivo, nel 2008, fu eseguire la caratterizzazione geofisica del sito utilizzando tecniche di test all'avanguardia, quali: prove MASW (*Multi-station Analysis of Surface Waves*), REMI (*Refraction Microtremor*), Nakamura test, tomografia elettrica 3D e tomografia sismica 2D.

Le campagne d'indagine del 2004 e 2008 sono state suddivise in due principali categorie, la prima riguarda le prove geotecniche convenzionali, inclusi il campionamento del suolo e le prove di laboratorio (cyclic triaxial test) dei campioni di suolo recuperati per definire la stratigrafia, mentre la seconda categoria copre le indagini geofisiche, comprendenti il test MASW, REMI e Nakamura.

Lo scopo principale delle indagini è quello di identificare le unità litostrati-

grafiche e le caratteristiche geofisiche del suolo sottostante la Basilica così da poter ricostruire con precisione la geometria del sottosuolo, protagonista del suo comportamento strutturale. La Figura 2.7 mostra in modo schematico tutte le prove geotecniche e geofisiche effettuate nel sito di Vicoforte durante le campagne di indagine, nonché la nomenclatura utilizzata per identificarle.

Riassumendo, da queste campagne di indagine svolte nel passato, si sotto ottenute informazioni relative a: analisi granulometrica, contenuto d'acqua e limiti di Attemberg, peso specifico, resistenza, modulo di taglio e coefficiente di smorzamento, compressibilità, permeabilità, informazioni ottenute da prove sismiche geofisiche quali velocità di propagazione delle onde di taglio e di compressione.

Alla fine di queste campagne d'indagine si è riusciti a riprodurre una ricostruzione della configurazione del suolo sottostante la Basilica e successivamente si è riusciti ad ottenere un modello 3D del substrato evidenziando la stratigrafia suddivisa in limo argilloso da 0 a 5 m, un modesto strato di materiale di transizione con spessore che va da un paio di centimetri sul lato Est fino ad un metro sul lato Ovest e un terzo strato costituito da marna. Tale modello 3D è stato verificato in seguito usando i risultati delle indagine geofisiche in modo da controllare se si aveva riscontro con l'interfaccia fornita dal sondaggio di tomografia elettrica effettuato nel 2008; il riscontro fu positivo.

2.3 Modelli FE del Santuario di Vicoforte

Oggigiorno, per il monitoraggio del comportamento di una struttura uno strumento sempre più diffuso per la sua utilità è la definizione di un modello affidabile e predittivo di una determinata struttura esistente, il quale per raggiungere un livello di affidabilità più alto comporta tecniche di aggiornamento che vengono solitamente eseguite sulla base di campagna operative di analisi modale. Tutto ciò è reso possibile grazie a strategie di calibrazione del modello che sfruttano i dati raccolti da sistemi di monitoraggio sia statici che dinamici posizionati in corrispondenza dell'opera. Infatti, l'aggiornamento del modello agli elementi finiti (FEM) è un punto fondamentale per le applicazioni ingegneristiche al fine di ridurre le discrepanze tra le misurazioni di prove sperimentali e le previsioni ottenute dal comportamento simulato del modello, e quindi per incrementare l'affidabilità di quest'ultimo. Il FEM aggiornato è impiegato per analisi strutturali e dinamiche e per lo Structural Health Monitoring (SHM), dove questo non è altro che il processo di sviluppo e applicazione delle strategie di rilevamento dei danni strutturali per salvaguardare la salute dell'opera. I metodi di aggiornamento possono essere di due tipi, diretti o iterativi; i pri-

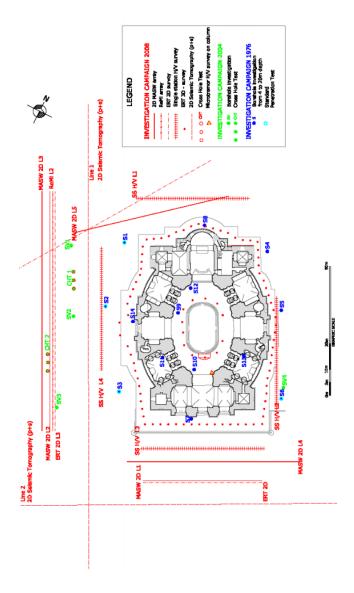


Figura 2.7: Layout delle prove geotecniche e geofisiche eseguite a Vicoforte nel 1976, 2004 e 2008

mi comunemente utilizzati per sistemi semplici attraverso una formulazione chiusa, in quelli iterativi, invece, si utilizzano algoritmi di ottimizzazione per risolvere il problema inverso della calibrazione dei parametri.

Per il Santuario di Vicoforte i dati acquisiti dal sistema di monitoraggio statico, nel decennio 2004-2014, sono stati oggetto di un'analisi sistematica che ha dimostrato che le fessure non si erano allargate ulteriormente, dimostrando così l'efficacia del sistema di rinforzo messo in atto nel 1897. Successivamente, nell'anno 2016, è stato installato un sistema di monitoraggio dinamico e sismico entrambi permanenti per indagarne i fenomeni globali; in quanto un monitoraggio continuo permette di apprezzare le variazioni stagionali in termini di parametri modali, sfruttando queste nuove registrazioni per ottenere risultati di calibrazione dei modelli sicuramente con maggiore affidabilità rispetto alle precedenti campagne. Si è riscontrato che nell'ultimo decennio non si è verificata alcuna progressione del danno significativa.

Il primo modello aggiornato della Basilica è stato eseguito da Chiorino et al. (2011) e si basava principalmente sui risultati di una campagna di test dinamici condotta nel 2008; questo primo modello non tiene conto però dei diversi tipi di materiali, trascurando in aggiunta l'interazione suolo-struttura. In seguito, al fine di considerare le tante peculiarità strutturali, storiche e tipologiche di ogni componente facente parte dell'opera, è stato realizzato un modello agli elementi finiti sul software di simulazione ANSYS più accurato [3] composto da nove macroelementi omogenei: sette per l'edificio (lanterna, cupola, tamburo, basamento, contrafforti, campanili e traversine in ferro) e due per il suolo (marna e limo argilloso), vedere la Figura 2.8. La parte inferiore del FEM, comprendente terreno, fondazioni e pilastri, è stata modellata utilizzando elementi solidi esaedrici. Per tale modello è stata usata la calibrazione iterativa MMU (modal model updating) la quale viene usata quando le matrici di massa e rigidezza del sistema globale vengono aggiornate da quantità modali identificate sperimentalmente. Pertanto, preventivamente è stata fatta una MMU dalla quale sono state ottenute le caratteristiche meccaniche dei macroelementi al termine di tale calibrazione preliminare, ovvero valori di modulo di Young, coefficienti di Poisson e densità di massa.

A seguire, in accoppiamento alla MMU è stato fatto un aggiornamento del modello termomeccanico denominato T-MEMU, dove i parametri termici e meccanici vengono aggiornanti in un quadro olistico; è stato utilizzato per calibrare le proprietà elastiche del modello parziale, minimizzando la differenza tra le forze interne misurate e calcolate nel sistema. Questo è stato il primo esempio di un aggiornamento del modello FE termoelastico applicato agli edifici monumentali.

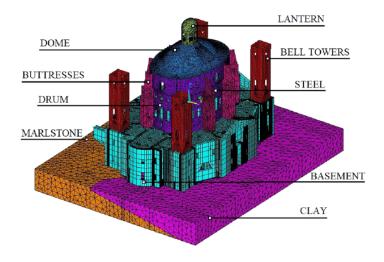


Figura 2.8: Modello agli elementi finiti del Santuario [3]

Il FEM appena discusso è stato quello utilizzato per il presente lavoro, nel quale attraverso l'aggiornamento di parametri elastici del terreno in funzione a loro volta del grado di saturazione medio si sono ottenute le frequenze naturali del sistema vibrante.

In un lavoro recente [4], è stata eseguita un'altra modellazione, tramite l'utilizzo del software DIANA FEA. Si è partiti dapprima con un modello meccanico con caratteristiche dei materiali e del terreno di partenza definite dal modello calibrato nello studio precedente [3] per poi stimare a fine lavoro i nuovi valori ottenuti. Il modello che è stato scelto in questo studio è stato il modello elastico lineare composto da tre parametri: il modulo di Young, il coefficiente di Poisson e la densità di massa. Il numero totale di elementi creati nel modello sono stati più di 265000 come illustrato in Figura 2.9.

Le condizioni di vincolo sono state assegnate alla parte inferiore del blocco rappresentativo del suolo di fondazione e alla facce laterali. Il parametro che è stato aggiornato alla fine di questo progetto è stato il modulo di Young (Figura 2.10) basato sui valori della frequenza naturale sia del modello numerico che sperimentale oltre alle forme modali, e quindi solo il peso proprio è stato considerato come carico globale impostato durante la modellazione e l'esecuzione dell'analisi per il Santuario di Vicoforte.

Successivamente, in DIANA è stata eseguita l'analisi agli autovalori, in quanto la stima delle frequenze naturali e delle forme modali della struttura identificano il comportamento della stessa quando risulta essere sottoposta ad un carico dinamico. È noto che questi due parametri sono funzione delle proprietà strutturali, delle caratteristiche dei materiali e delle condizioni di vincolo. l'ot-

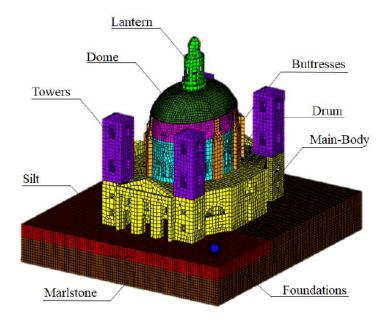


Figura 2.9: Modello agli elementi finiti del Santuario [4]

tenimento di frequenze e forme modali è necessario per effettuare un confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali. La prima analisi ha comunque mostrato valori di frequenze naturali elevati rispetto a quelli sperimentali; ciò significava che i parametri del modulo di Young erano in qualche modo sopravvalutati.

Lo step successivo è stato il Model Updating (ossia l'aggiornamento del modello) che è il processo di aggiornamento delle matrici di massa e rigidità al fine di abbinare sperimentalmente il comportamento misurato della struttura. I rapporti delle frequenze naturali numeriche e le frequenze naturali sperimentali hanno mostrato rapporti quasi costanti a seguito dell'aggiornamento. Ciò ha significato che anche la "Fine Tuning" poteva essere un buon approccio per aggiornare i parametri, in cui tutte le proprietà del materiale erano destinate ad essere aggiornate e modificate per corrispondere ai valori sperimentali. Infine i risultati numerici hanno mostrato un buon accordo con quelli sperimentali.

Element	Initial Young Modulus (GPa)	Calibrated Young Modulus(GPa)
Silt	0.75	0.53
Marl Stone	5.6	3.99
Foundation	2	1.42
Basement	2	1.42
Drum	2.3	1.63
Buttresses	5.5	3.91
Dome	5.6	3.99
Lantern	5.6	3.99
Towers	4.5	3.20
Wood	8.1	5.77

Figura 2.10: Modulo di Young calibrato [4]

Capitolo 3

Dati satellitari

Un tema di grande interesse e sempre più discusso è quello relativo all'utilizzo dei dati satellitari nell'ambito dello Structural Health Monitoring (SHM). Tali dati potrebbero essere una valida alternativa alle classiche prove da effettuare in situ o in laboratorio, in quanto quest'ultime potrebbero essere insufficienti o completamente assenti poiché la loro esecuzione, in taluni casi, risulta essere difficoltosa ed onerosa, in particolare se messe a confronto con il telerilevamento che rimane una strada più immediata e con più facile accesso. Lo scopo principale dell'analisi iniziale è quello di confrontare con apposite tecniche i dati satellitari (Soil Water Index) con i dati derivanti da prove in situ (volumetric soil moisture); da tale confronto si vuole determinare la principale relazione che li lega e rendere più affidabile l'utilizzo del dato satellitare in sostituzione a quello ottenuto dalle classiche prove.

I dati satellitari che verranno trattati nel presente lavoro di tesi fanno parte del programma europeo Copernicus dell'ESA (European Space Agency). Il Copernicus Global Land Service (CGLS) è una componente del Land Monitoring Core Service (LMCS) di Copernicus, il programma di punta europeo sull'osservazione della Terra. Il Global Land Service produce sistematicamente una serie di prodotti bio-geofisici qualificati, relativi allo stato e l'evoluzione della superficie terrestre, su scala globale e con risoluzione spaziale medio-bassa, integrati da serie temporali a lungo termine. I prodotti vengono utilizzati per monitorare la vegetazione, il ciclo dell'acqua, il bilancio energetico e la criosfera terrestre. Nel presente lavoro, sono stati presi in considerazione i dati che forniscono i parametri di umidità del suolo SWI dalla superficie in profondità, provenienti dall'unione delle acquisizioni dei Sentinel-1 in collaborazione con quelle dei sensori dei satelliti Metop-ASCAT dell'EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites).

3.1 Soil Water Index (SWI)

Il tipo di dato in questione è il Soil Water Index (SWI), esso quantifica lo stato di umidità a varie profondità nel suolo . È principalmente guidato dalla precipitazione attraverso il processo di infiltrazione. L'umidità del suolo è una variabile molto eterogenea e varia su piccola scala con le proprietà del suolo e modelli di drenaggio. Le misurazioni satellitari si integrano su aree a larga scala, con la presenza di vegetazione che aggiunge complessità all'interpretazione.

Attualmente per l'Europa è disponibile il prodotto indicato come SWI1km che si basa sull'esistente SWI del CGLS (Copernicus Global Land Services). Esso descrive le condizioni di umidità del suolo con una risoluzione spaziale di 1 km ed è derivato dalla fusione dei dati registrati dai sensori radar a microonde osservati dal Metop ASCAT (Advanced SCATterometer) A, B e C e dai sensori CSAR (Synthetic Aperture Radar C-band) dei satelliti Sentinel-1 A e B; viene indicato, quindi, come SCATSAR SWI (Scatterometer-Synthetic Aperture Radar Soil Water Index) (Figura 3.1) e il suo livello di elaborazione è il 3, in quanto si basa su dati di SSM (Surface Soil Moisture) di livello 2 che derivano da misurazioni e che già a loro volta sono stati elaborati.

L'umidità contenuta in uno strato di terreno è principalmente governata dalle precipitazioni attraverso il processo d'infiltrazione. Il dato satellitare SWI1km usa un modello d'infiltrazione che descrive tale processo [5], definendo la relazione tra la superficie e il profilo di umidità come una funzione del tempo. L'algoritmo è basato su un modello di bilancio idrico a due strati per stimare il profilo di umidità del terreno a partire dai dati di umidità del suolo superficiale, che sono ricavati dai coefficienti di retrodiffusione radar misurati dallo strumento ASCAT a bordo dei satelliti Metop; il primo strato è rappresentativo del livello superficiale del suolo accessibile agli scatterometri in banda C e il secondo strato è la parte del profilo che si estende verso il basso dal fondo dello strato superficiale del suolo. Si presume che il secondo funga da serbatoio collegato all'atmosfera tramite il primo strato. Le condizioni di umidità nel primo strato, il quale risulta essere a diretto contatto con l'atmosfera, sono temporalmente molto dinamiche. Tuttavia, all'aumentare della profondità la dinamica temporale delle condizioni di umidità diminuisce, poiché la quantità di acqua immagazzinata nel serbatoio dipende dall'infiltrazione di acqua aggiunta al primo strato durante gli eventi di precipitazione. Pertanto il contenuto d'acqua dello strato del serbatoio è controllato esclusivamente dalle condizioni di umidità passate nello strato superficiale e quindi dalla storia delle precipitazioni.

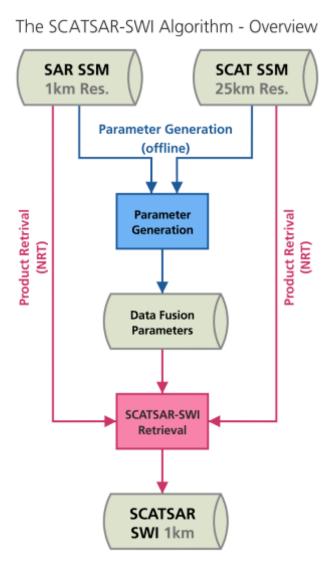


Figura 3.1: Struttura generale dell'algoritmo SCATSAR-SWI per SWI1km, conle procedure offline dell'algoritmo in blu, e procedure NRT in rosa.

20 Dati satellitari

Il parametro SWI rappresenta il contenuto di umidità del suolo nel primo metro di terreno, espresso in percentuale, con valori che spaziano dallo 0 al 100% (terreno drenato e in completa saturazione rispettivamente). Si è visto che un parametro significativo per modellare l'infiltrazione negli strati più profondi del suolo, e conseguentemente calcolare SWI, è la lunghezza temporale caratteristica detta T-value [6].

Come già introdotto, il Soil Water Index utilizza i dati SAR ad alta risoluzione sull'umidità del suolo superficiale (SSM) generati dai satelliti Sentinel-1 lanciati nell'anno 2014 e li combina con i dati SSM dello scatterometro ASCAT; il prodotto risultante da questa combinazione raggiunge una elevata risoluzione sia temporale che spaziale, fornendo in contemporanea una maggiore affidabilità e precisione.

I dati di SWI sono disponibili sulla piattaforma VITO Earth Observation del CGLS, il quale produce una serie di prodotti bio-geofisici sullo stato e l'evoluzione della superficie terrestre accessibili dall'utente in modo diretto. La raccolta di tali dati relativi all'interno territorio europeo è stata eseguita in un precedente lavoro [8]; ciò che serviva per l'attuale analisi erano i valori del dato satellitare per uno specifico arco temporale, ovvero da gennaio 2015 fino a gennaio 2021.

Si è visto [8] che i file forniti sono in formato netCDF e all'interno di ognuno di essi sono contenute le informazioni di seguito elencate:

- latitudine e longitudine;
- data di inizio e fine registrazione;
- SSF (State Surface Flag);
- 8 valori di SWI in funzione del T-value;
- 8 valori di QFLAG (Quality Flag) per ogni valori di SWI(T).

Nello specifico, il SSF è indicativo dello stato in cui si trova la superficie al momento dell'acquisizione, può assumere i seguenti valori:

- SSF = 0 stato della superficie non noto;
- SSF = 1 superficie non ghiacciata;
- SSF = 2 superficie ghiacciata;
- SSF = 3 presenza di acqua nella superficie;
- SSF = 255 stato della superficie non classificabile.

Mentre, il QFLAG, valutato per ogni T-value, è legato al numero disponibile di dati SSM per il calcolo di SWI; esso quindi, descrive il livello di fiducia, ovvero se per il valore di T ci sono stati abbastanza dati di SSM e di qualità sufficiente per ritenere affidabile il relativo valore di SWI. Per ogni valore di T si ha un valore minimo soglia di QFLAG [7], se esso è maggiore della soglia allora il valore di SWI si può considerare significativo. Le soglie minime sono state empiricamente identificate durante valutazioni sperimentali, risultano essere: 35%, 40%, 45%, 50%, 53%, 55%, 60%, 65%, 70%, per i T-value 2, 5, 10, 15, 20, 40, 60, 100, rispettivamente. Nell'analisi proposta è stato effettuato un controllo dei valori di QFLAG per ogni T-value per valutare criticamente l'affidabilità dei dati esaminati; tale controllo ha riportato esito positivo. Nella proposta analisi i dati sono stati elaborati in Matlab.

Pertanto, per lo scopo della presente tesi, sono stati scelti 20 siti europei, ossia 20 stazioni appartenenti a diversi Network facenti parte dell'ISMN. Tramite latitudine e longitudine di queste stazioni, delle quali si parlerà approfonditamente in seguito, attraverso l'uso di un codice Matlab si è resa possibile l'estrapolazione dei dati di SWI per lo specifico sito di interesse. La procedura utilizzata per eseguire questa operazione, utile per l'analisi prevista, consiste nell'inserire nel codice usato le coordinate esatte del sito selezionato, all'interno delle matrici di latitudine e longitudine sono stati ricercati tramite interpolazione gli indici dei valori di coordinate più simili a quelle della specifica stazione scelta, dunque quelli con errore minore. In tal modo, si sono ottenuti tutti i valori del dato satellitare per ogni sito in esame; nello specifico, si è ottenuto un set di vettori con all'interno i valori di SWI per tutti gli 8 T-value, i vettori tempo relativi alla data in cui è stata registrata l'acquisizione del dato e vettori con i valori di QFLAG per tutti gli 8 T-value con i quali, come già accennato, sono stati eseguiti i controlli necessari per confermare o no l'affidabilità del dato ricavato.

Dai dati di SWI estrapolati sono stati eliminati i valori con valore maggiore del 100 %, in quanto fisicamente non ammissibile.

Capitolo 4

Dati in situ

Il secondo parametro utile per la trattazione proposta è quello relativo alle misurazioni in situ dell'umidità del suolo volumetrica, ovvero il volumetric soil moisture (SM) espresso in $[m^3/m^3]$. L'acquisizione, raccolta e analisi di questo parametro risulta indispensabile per proporre una validazione del dato satellitare.

4.1 ISMN

Le misure in situ dell'umidità del suolo (SM) sono indispensabili per convalidare e calibrare i modelli della superficie terrestre e i recuperi di tale dato con telerilevamento satellitare. Nonostante ciò, a livello mondiale il numero di reti e stazioni meteorologiche che misurano l'umidità del suolo, in particolare in modo continuativo, è ancora limitato e i dati che vengono forniti mancano di standardizzazione di tecnica e protocollo. A tal proposito, per superare queste limitazioni, l'International Soil Moisture Network (ISMN) è stata avviata per fungere da struttura centralizzata per l'hosting dei dati lì dove sono disponibili a livello globale misure dell'umidità del suolo da reti operative e le campagne di validazione vengono raccolte, armonizzate, e messe a disposizione degli utenti. Le reti di raccolta dati condividono i loro set di informazioni con l'ISMN su base volontaria e gratuita. I dati sull'umidità del suolo in entrata vengono automaticamente trasformati in comuni unità volumetriche di umidità del suolo e controllati per valori anomali e non plausibili [9].

Pertanto, si può dire che, l'International Soil Moisture Network è una cooperazione internazionale che garantisce e fornisce un database globale di misure in situ dell'umidità del suolo [10]; dove questa raccolta è uno strumento necessario per convalidare e migliorare i prodotti ottenuti via satellite e modelli della superficie terrestre, climatici ed idrologici. 24 Dati in situ

Oggigiorno, il numero totale di Network disponibili all'interno di questa rete globale, localizzati tra Nord America, Sud America, Europa, Asia e Australia, sono 72, ad ognuno di questi appartengono diverse stazioni operative per un totale di 2878. Il database raccoglie dati dal 1952 fino ad oggi, sebbene l'iniziativa ha preso piede a partire dagli ultimi due decenni.

4.2 Soil Moisture

L'umidità del suolo è comunemente definita come l'acqua presente nella parte insatura del profilo del terreno, ovvero tra la superficie del terreno e la falda, e può essere espressa in diverse unità di misura. La più comune definizione di questo parametro è quella di umidità del suolo volumetrica, ossia espressa come la frazione di volume d'acqua in un dato volume di terreno $[m^3$ di acqua in m^3 di terreno], poiché, la più diffusa unità di misura è quella di frazione volumetrica espressa in $[m^3/m^3]$, questa viene adottata all'interno dell'ISMN; pertanto, quando i dati, forniti alla rete, presentano differente unità di misura, vengono opportunamente convertiti.

Il dato SM può essere considerato anche come una forma di grado di saturazione; una parte del terreno, tipicamente meno dello 0.5, consiste in pori che sono riempiti d'aria o acqua, questa frazione viene chiamata porosità (n), se questa fosse completamente riempita d'acqua, il suolo raggiungerebbe il suo massimo contenuto di umidità o saturazione. Il rapporto di saturazione varia tra 0 (nessuna umidità del suolo) e 1 (piena saturazione).

Molteplici tecniche sono disponibili per misurare il contenuto di umidità del suolo in situ; si possono classificare come metodi diretti o indiretti. I più diffusi risultano essere: il metodo gravimetrico, le sonde di neutroni, tecniche elettromagnetiche quali i sensori TDR e FDR, neutroni a raggi cosmici, ed altre.

4.2.1 Acquisizione dei dati SM dall'ISMN

Il database (o archivio) è il nucleo dell'ISMN data hosting, attraverso questo strumento si è in grado di ottenere i dati relativi ai parametri che ci interessano.

All'ISMN si può facilmente accedere tramite il link https://ismn.geo.tuwien.ac.at/en/. Consiste di due parti principali: un sito Web che fornisce dettagli sui network, partner e il progetto stesso e il centro di immagazzinamento dei dati in cui gli utenti possono visualizzare e scaricare i dati contenuti nel database, sulla base delle proprie necessità. In Figura 4.1 è riportata la vista della pagina iniziale per l'acquisizione dei dati, mentre in Figura 4.2 è

Variable name	C format	Missing Value	Final Units/Equations/Notes
UTC Nominal Date/Time	16 chars	N/A	yyyy/mm/dd HH:MM, where MM is 00 or 30, only
UTC Actual Date/Time	16 chars	N/A	yyyy/mm/dd HH:MM
CSE Identifier	10 chars	N/A	Fill name with underscores, not spaces.
Reference Site Identifier	15 chars	N/A	Fill name with underscores, not spaces.
Station Identifier	15 chars	N/A	Fill name with underscores, not spaces.
Latitude	f10.5	-99.99999	decimal degrees. South is negative.
Longitude	f11.5	-999.99999	decimal degrees. West is negative.
Elevation	f7.2	-999.99	meters
Sensor Height	f7.2	-999.99	meters; height of sensor. Positive above ground level.
			Negative below ground.
Soil Temperature	f8.2	-999.99	Celsius
Soil Temperature Flag	1 char	M	See Sect. 3.4
Soil Moisture	f8.2	-999.99	Percent. Volumetric water content.
Soil Moisture Flag	1 char	M	See Sect. 3.4

Tabella 4.1: Definizione del formato del set di dati CEOP [9].

Variable name	Variable range
Soil moisture	$0 - 0.6 \mathrm{m}^3 \mathrm{m}^{-3}$
Soil temperature	-60-60°C
Air temperature	-60-60°C
Precipitation	$0-100\mathrm{mm}\mathrm{h}^{-1}$
Soil suction*	0–2500 kPa

Tabella 4.2: Intervalli delle variabili plausibili per i dati meteorologici memorizzati nell'ISMN [9].

riportata l'interfaccia che si presenta una volta selezionata la stazione che si vuole analizzare, per avere un'anteprima della disponibilità e qualità dei dati forniti.

Dopo aver selezionato il set di dati richiesto per il download, l'output viene preparato secondo gli standard di dati e metadati del Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project (*CEOP*). Questi standard non solo specificano i formati dei dati (Tabella 4.1), ma forniscono anche prescrizioni sui formati dei metadati e sulle convenzioni di denominazione dei file. La Tabella 4.2 riporta i possibili range di valori in cui le variabile meteorologiche devono ricadere per essere ritenute affidabili.

Una volta registrati all'interno del sito dell'ISMN, selezionata l'area e quindi i network a cui riferirsi, si possono facilmente richiedere i dati da scaricare; questi ultimi vengono successivamente inviati all'utente sotto forma di file; nelDati in situ

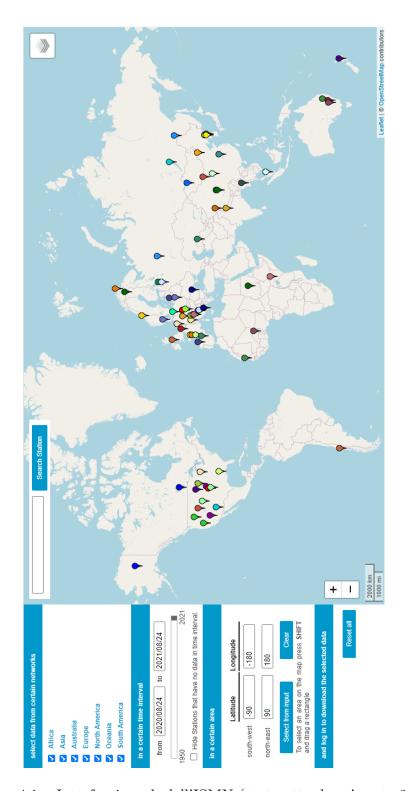


Figura 4.1: Interfaccia web dell'ISMN (stato attuale - Agosto 2021)

4.2 Soil Moisture 27

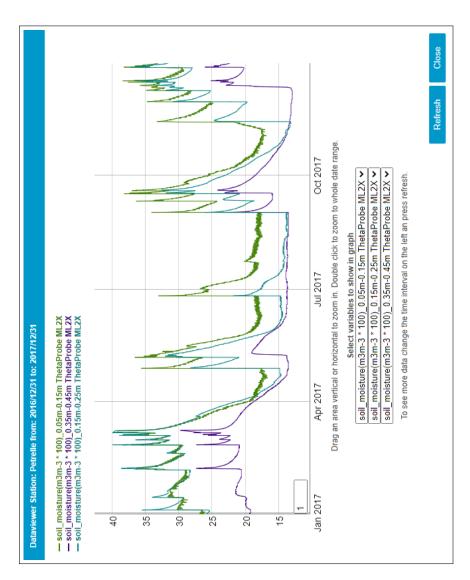


Figura 4.2: Esempio della finestra di visualizzazione della stazione Petrelle - network UMBRIA

Dati in situ

la presente tesi sono stati richiesti i dati relativi alle stazioni di tutta Europa. Il file fornito contiene, in apposite cartelle denominate con la rete di appartenenza, altre sottocartelle per ogni stazione, le quali al loro interno presentano i vari parametri richiesti.

In aggiunta, oltre al materiale appena elencato, nella cartella principale sono presenti dei documenti di testo nei quali vengono riportate alcune specificazioni utili per la lettura ed interpretazioni dei risultati scaricati.

Capitolo 5

Elaborazione ed analisi dei dati satellitari e misure in situ

L'obiettivo del lavoro qui presentato, è quello di comparare due tipologie di dati, quali quelli ottenuti via satellite e quelli derivanti dalle misure in situ, per ricavare una relazione che li lega, per poter favorire in modo più affidabile l'utilizzo dei dati satellitari in sostituzione alle prove classiche da eseguire in loco che talvolta risultano essere insufficienti o non realizzabili. L'utilizzo del telerilevamento si presenta quindi come una valida ed innovativa alternativa, grazie all'ampia disponibilità temporale e spaziale dei dati, versatilità e basso costo di acquisizione, poiché facilmente scaricabili con accesso semplice e gratuito da piattaforme online.

Il caso studio, è quello della Basilica "Regina Montis Regalis" situata a Vicoforte (CN); del sito appena citato erano disponibili unicamente i dati derivanti da telerilevamento ossia di SWI(T). A tale proposito si è cercata una relazione diretta tra questi ultimi con il grado di saturazione; per fare ciò, sono state analizzate 20 diverse stazioni distribuite in tutto il territorio europeo, dalle quali sono derivati dei modelli in grado di relazionare i dati satellitari con quelli derivanti dall'ISMN, ovvero dalle misurazioni in situ. Si è sfruttata l'analogia delle caratteristiche del terreno di Vicoforte con alcune delle stazioni prese in esame, adottando così il modello, da esse ricavato, per ottenere i dati predetti di umidità del terreno che nel caso di Vicoforte erano assenti.

Pertanto, ciò che è stato fatto operativamente è stato selezionare, dal progetto fornito dall'ISMN, tutti i network che ricoprono il territorio europeo e sono stati scaricati i dati appartenenti a tale area; di seguito a questa operazione, sono state scelte 20 stazioni, che verranno presentate a seguire, appartenenti a diverse reti (network), che potessero essere significative per l'analisi ipotizzata. Ogni stazione presenta risultati di misure in situ di umidità del

terreno, espresse in $[m^3/m^3]$, associate a diversi strati, quindi rilevate a varie profondità.

In parallelo, come già accennato in precedenza, sono stati scaricati i corrispondenti dati di SWI (rilevati da satellite) ed estrapolati per le stazioni e l'intervallo temporale d'interesse tramite l'aiuto di Matlab.

Per poter effettuare l'analisi, entrambi i dati ricoprono gli stessi archi temporali, a partire dall'anno 2015 sino ad oggi ove possibile, in quanto alcune stazioni presentano disponibilità di misure fino agli anni 2019 e 2020, al massimo. Nell'elaborazione dei dati, sono stati eliminati gli SWI > 100%, in quanto fisicamente non ammissibile, e sono stati considerati solo gli SM compresi tra i valori 0 e $0.6~m^3/m^3$, si veda Tabella 4.2; in aggiunta, negli scatter plot presentati nelle Appendici A-H, se in un determinato giorno uno dei due parametri studiati presentava valore mancante o non valido anche il secondo dato non è stato considerato per avere una corrispondenza coerente.

5.1 Scelta stazioni

Nella seguente sezione vengono introdotte le reti europee scelte per la trattazione, con alcune delle loro principali caratteristiche (https://ismn.geo.tuwien.ac.at/en/networks/?id=AACES).

1. UMBRIA

Il network *UMBRIA* è situato in Italia, presenta 13 stazioni ad esso appartenenti; questa rete è a cura dell' *Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica* del Consiglio Nazionale delle Ricerche (*CNR*). Di questa rete sono state scelte 3 stazioni, in quanto erano le sole ad avere i requisiti necessari per la trattazione proposta, vengono elencate di seguito:

- Petrelle;
- Cerbara;
- Torreolmo.

Le loro misure ricoprono un arco temporale che va dall'anno 2015 al 2019.

2. **HOBE**

Il network HOBE è situato in Danimarca, è costituito da 32 stazioni,

5.1 Scelta stazioni 31

l'organizzazione ad esso associata è la *Hydrological Observatory*. Di tale rete sono state selezionate le seguenti stazioni:

- 1.01;
- 1.07.

L'intervallo di misurazione è 2015-2019.

3. SMOSMANIA

La rete *SMOSMANIA* interessa la Francia, ad essa appartengono 23 stazioni di misura, a cura di *CNRM/GAME*, *METEO-FRANCE*, *CRNS*. Dal suddetto network sono stati estrapolati i dati dal 2015 al 2020, delle seguenti stazioni:

- Cabrieres d'Avignon;
- Condom;
- La Grand Combe;
- Mazan-Abbaye;
- Urgons.

4. TERENO

Il network *TERENO* è situato in Germania, con un totale di 5 stazioni, l'organizzazione ad esso associato è la *Helmholtz Gemeinschaft Forschungszentrum Jülich*; le stazioni selezionate da questa rete, con dati a partire dal 2015 sino ad 2020, sono:

- Gevenich;
- Merzen Hausen.

5. HOAL

L'Austria ospita la rete HOAL, ad essa appartengono 33 stazioni, sotto l'organizzazione TU Wien; dal presente network sono state scelte 5 stazioni di misura, con misure che vanno dal 2015 al 2019, quali:

- Hoal-8;
- Hoal-18;

- Hoal-24;
- Hoal-26;
- Hoal-27.

6. FR Aqui

Appartenente alla nazione della Francia è il network FR_Aqui , per opera di *Institute of Agricultural Research*; le stazioni in totale risultano essere 5, ne è stata selezionata una, denominata Hillan2, con dati di SM che vanno dal 2016 al 2020.

7. MOL-RAO

La rete MOL-RAO si trova in Germania, con 2 stazioni ad essa appartenenti, gestita da German Meteorological Service.

La stazione scelta è Falkenberg con misure che coprono il medesimo arco temporale: 2015-2020.

8. **NVE**

In Norvegia troviamo il network *NVE*, l'organizzazione ad esso associata è *Norwegian water resources and energy directorate*, con un totale di 3 stazioni, del quale è stata selezionata la Kvarstadseter, con dati che vanno dal 2015 al 2020.

5.2 Scelta SWI (T)

Successivamente alla scelta delle stazioni da trattare, di queste ultime sono stati evidenziati la Classe Climatica di appartenenza e alcune caratteristiche del terreno. Questi aspetti appena citati, sono stati utili per assegnare il paramento T, ovvero la lunghezza temporale caratteristica, per il dato SWI. Per tale scelta, ovvero degli SWI(T) più adatti a questa analisi, si è fatto riferimento alle raccomandazioni riportate nel QAR [11] di SWI a cui si può fare riferimento nei casi in cui non si hanno a disposizione informazioni locali specifiche per la scelta di SWI(T). Operativamente, le scelte effettuate sono state fatte sulla base di tabelle, che vengono riportare in Tabella 5.1, 5.2 e 5.3.

	GLDAS	ERA-Land
Layer 1	0,00m - 0,10m	0,00m - 0,07m
Layer 2	0,10m - 0,40m	0,07m - 0,28m
Layer 3	0,40m - 1,00m	0,28m - 1,00m
Layer 4	1,00m - 2,00m	1,00m - 2,89m

Tabella 5.1: Layer di riferimento dei modelli [11]

	Main Climate	Köppen-Geiger Classification
Class 1	Tropical	Af, Am, As, Aw
Class 2	Hot	BWk, BWh, Dsa, Dsb, Dsc, Dsd
Class 3	Subtropical	Csa, Csc, Cwa, Cwb, Cwc
Class 4	Temperate & Transitional	Cfa, Cfb, Cfc, Dfa, Dfb, Dwa, Dwb, Dwc, Dwd, BSk, BSh, Csb
Class 5	Cold	Dfc, Dfd, ET, EF

Tabella 5.2: Classi climatiche [11]

Dalla prima tabella si può notare la suddivisione in layer dei due diversi dataset usati per validare i valori di SWI; i due dataset provengono dai due modelli GDLAS e ERA-Land, il primo è stato realizzato da studiosi della NA-SA, mentre il secondo è europeo. In particolare, nella tesi qui presentata, sono stati analizzati diversi strati di terreno per 20 stazioni distribuite sul suolo europeo; per tale ragione, come primo step, ad ogni strato, di ogni stazione, è stato attribuito un layer di appartenenza. Successivamente, grazie alla documentazione ottenuta dall'ISMN sono state registrate le classi climatiche di ogni sito in esame; queste informazioni sono state utili per entrare nella tabella (Figura 5.2), la quale presenta una suddivisione in classi dalla 1 alla 5, nelle quali sono state raggruppate le classi climatiche della classificazione mondiale di Köppen-Geiger [12].

A questo punto ogni stazione, per ogni suo strato, presenta la coppia di dati layer-classe di appartenenza; con tali informazioni tramite l'utilizzo dell'ultima tabella riportata in Figura 5.3 si è potuto assegnare il valore di T, e consecutivamente di SWI(T).

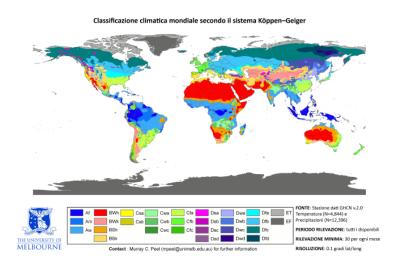


Figura 5.1: Classificazione climatica mondiale secondo il sistema Köppen-Geiger [12]

		GLI	DAS		ERA-Land					
	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4		
Class 1	1,5,10	5-20	15-60	40-100	1-5	5-20	20-60	60-100		
Class 2	-	-	-	-	-	-	-	-		
Class 3	1-20	20-40	40-100	100	1-10	5-40	60-100	100+		
Class 4	1-5	5-40	20-100	40-100	1-5	5-20	20-100	60-100		
Class 5	1	1-10	-	-	1	1-5	-	-		

Tabella 5.3: Valori di T consigliati in base al layer e alla classe climatica [11]

5.3 Risultati 35

5.3 Risultati

Nella presente sezione sono riportati i risultati ottenuti dall'analisi precedentemente presentata. In primo luogo, dopo aver determinato i range di T plausibili per ogni caso, sono state rappresentate le serie temporali, dei parametri in funzione del tempo di osservazione, e ad esse sono stati affiancati i diagrammi a dispersione che presentano sull'asse delle ascisse i valori di SWI(T) espressi in [%] e su quello delle ordinate i valori del volumetric soil moisture espressi in $[m^3/m^3]$, per evidenziarne l'andamento.

Questa procedura è stata fatta per ogni stazione scelta, per ogni strato di terreno studiato e, per non limitare la rappresentazione dell'umidità del suolo in relazione ad un solo SWI(T), sono stati diagrammati i dati satellitari relativi a tutti i T-value del possibile range ottenuto in considerazione della classe climatica di appartenenza e dello strato considerato di ogni sito in esame; tutto ciò è stato possibile tramite l'utilizzo di Matlab. I risultati grafici di questo primo step sono riportati nelle Appendici dalla A alla H poste alla fine del lavoro.

Per adempiere allo scopo della presente tesi, sono state effettuate diverse procedure per valutare quale tra queste potesse essere la più adatta a determinare una relazione il più possibile veritiera tra i parametri sotto esame.

In primo luogo, si sono prese in considerazione le 20 stazioni scelte; per la scelta di SWI(T) definitivo, sono state fatte delle considerazioni, poiché la tabella finale (Figura 5.3) non riporta valori univoci del parametro cercato, ma dei range di plausibili valori di T. Per tale ragione, dopo aver analizzato i suddetti grafici, è stato calcolato il coefficiente di correlazione R(T) per ogni caso specifico; il valore di T definitivo, e quindi di SWI(T), è stato scelto prendendo quello tale per cui si otteneva la massima correlazione tra SWI(T)-SM (ossia R(T) più alto).

A questo punto, è stata tracciata per ogni scatter plot la retta di regressione lineare con il metodo dei minimi quadrati, e con essa si sono calcolati pendenza e intercetta ad essa associate. I risultati della siffatta analisi sono riportati nella tabella 5.3, la quale rappresenta un quadro riassuntivo in cui sono stati riportati in ordine:

- Nazione di appartenenza della rete;
- Network dell'ISMN;
- Denominazione della stazione scelta appartenente alla rete selezionata;
- Classificazione del terreno [13];

- Classe climatica;
- Profondità dello specifico strato in cui è stata rilevata la misura in situ;
- Range di T plausibili;
- T scelto in base al valore di R(T) più alto derivante dalla regressione lineare;
- Valore di R(T);
- Valore della pendenza della retta di regressione;
- Valore dell'intercetta della retta di regressione.

Tabella 5.4: Tabella riassuntiva dei risultati derivanti dalla regressione lineare delle 20 stazioni in esame.

NAZIONE	NETWORK	STAZIONE	CLASS. TERRENO	CLIMA	PROFONDITÀ	RANGE DI T	T SCELTO	R(T)	PENDENZA	INTERCETTA
Italia	UMBRIA	Petrelle	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfa	5-15 cm	2-5; 5-40; 5-20;	5	0.6510	0.0022	0.14721
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfa	15-25 cm	5-40; 5-20;	5	0.7050	0.0029	0.0944
			Franco Argillosa-27-40% di argilla e 20-45% di sabbia totale.	Cfa	35-45 cm	5-40; 20-100;	20	0.7015	0.0027	0.1192
Italia	UMBRIA	Cerbara	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfa	5 -15 cm	2-5; 5-40; 5-20;	5	0.5909	0.0017	0.1456
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfa	15-25 cm	5-40; 5-20;	10	0.6729	0.0027	0.1625
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfa	35-45 cm	5-40; 20-100;	20	0.7005	0.0027	0.1192
Italia	UMBRIA	Torreolmo	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Csa	5-15 cm	2-20; 20-40; 5-40;	20	0.701	0.0046	0.0285
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Csa	15-25 cm	20-40; 5-40;	40	0.6845	0.0009	0.0620
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Csa	35-45 cm	20-40; 40-100; 60- 100;	40	0.6661	0.0043	0.1970
Danimarca	НОВЕ	1.01	Sabbioso Franca-al limite superiore contiene 85-90% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o più; al limite inferiore non contiene meno del 70-85% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte quella dell'argilla, è 30 o meno.	Dfb	0-5 cm	2-5;	5	0.5951	0.0025	0.1217
			Sabbioso Franca-al limite superiore contiene 85-90% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o più; al limite inferiore non contiene meno del 70-85% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte quella dell'argilla, è 30 o meno.	Dfb	20-25 cm	5-40; 5-20;	5	0.271	0.0010	0.1293

			Sabbioso Franca-al limite superiore contiene 85-90% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o più; al limite inferiore non contiene meno del 70-85% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte quella dell'argilla, è 30 o meno.	Dfb	50-55 cm	20-100;	20	0.7064	0.0013	0.0750
Danimarca	НОВЕ	1.07	Sabbioso Franca-al limite superiore contiene 85-90% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o più; al limite inferiore non contiene meno del 70-85% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte quella dell'argilla, è 30 o meno.	Dfb	0-5 cm	2-5;	5	0.5161	0.0025	0.0596
			Sabbioso Franca-al limite superiore contiene 85-90% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o più; al limite inferiore non contiene meno del 70-85% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte quella dell'argilla, è 30 o meno.	Dfb	20-25 cm	5-40; 5-20;	20	0.634	0.0038	-0.0107
			Sabbioso Franca-al limite superiore contiene 85-90% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o più; al limite inferiore non contiene meno del 70-85% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte quella dell'argilla, è 30 o meno.	Dfb	50-55 cm	20-100;	100	0.8181	0.0112	-0.5002
Francia	SMOSMANIA	Cabrieres d'Avignon	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Csb	5 cm	2-5;	5	0.4682	0.0027	0.0282
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Csb	10 cm	2-5; 5-20;	5	0.4849	0.0025	0.1005
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Csb	20 cm	5-40; 5-20;	5	0.5319	0.0017	0.0754
			Franco Sabbiosa Argillosa-20-35% di argilla, <28% di limo e 45% o più di sabbia totale.	Csb	30 cm	5-40; 20-100;	20	0.5701	0.0024	0.0380
Francia	SMOSMANIA	Condom	Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo.	Cfb	5 cm	2-5;	5	0.4807	0.0017	0.1868

		Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo.	Cfb	10 cm	2-5; 5-20;	5	0.52	0.0017	0.2199
		Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo.	Cfb	20 cm	5-40; 5-20;	20	0.6918	0.0054	-0.0750
		Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo.	Cfb	30 cm	5-40; 20-100;	<u>40</u>	0.6859	0.0079	-0.1991
TERENO	Gevenich	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfb	5 cm	2-5;	5	0.4807	0.0029	0.0169
		Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfb	20 cm	5-40; 5-20;	20	0.5817	0.0026	0.0317
		Franco Argillosa-27-40% di argilla e 20-45% di sabbia totale.	Cfb	50 cm	20-100;	100	0.6282	0.0046	-0.1400
HOAL	Hoal-8	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	5 cm	2-5;	5	0.7391	0.0034	0.1079
		Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	10 cm	2-5; 5-20;	5	0.7575	0.0027	0.1906
		Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	20 cm	5-40; 5-20;	20	0.8106	0.0037	0.1489
		Franco Argillosa-27-40% di argilla e 20-45% di sabbia totale.	Dfb	50 cm	20-100;	100	0.8915	0.0059	0.0237
HOAL	Hoal-18	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	5 cm	2-5;	2	0.3977	0.0008	0.2632
		Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	10 cm	2-5; 5-20;	5	0.3937	0.0008	0.2698
		Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	20 cm	5-40; 5-20;	20	0.785	0.0026	0.1909
		Franco Argillosa-27-40% di argilla e 20-45% di sabbia totale.	Dfb	50 cm	20-100;	40	0.2998	0.0008	0.3494
HOAL	Hoal-24	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	5 cm	2-5;	2	0.3185	0.0011	0.2567
		Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	10 cm	2-5; 5-20;	5	0.4406	0.0010	0.3011
		Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	20 cm	5-40; 5-20;	20	0.5438	0.0010	0.3275
		Franco Argillosa-27-40% di argilla e 20-45% di sabbia totale.	Dfb	50 cm	20-100;	40	0.4449	0.0007	0.3629
	HOAL	HOAL Hoal-18	totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla e 20-45% di Phb	totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28	totale e <40% di limo. Argillosa-00% o più di argilla, <45% di sabbia cotale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia cotale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia cotale e <40% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Fra	totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo. Argillosa-40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale. Franca-7-27% di argilla e 20-45% di Dib	totale e 40% di limo. Argillosa 40% o più di argilla, 45% di sabbia totale e 40% di limo. Argillosa 40% o più di argilla, 45% di sabbia totale e 40% di limo e 42% di sabbia totale e 40% di limo e 42% di sabbia totale e 40% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di sabbia totale. Franca 7-27% di argilla, 28-50% di limo e 42% di di argilla e 20-45% di 42% di argilla, 28-50% di limo e 42% di argilla, 28-50

Austria	HOAL	Hoal-26	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	5 cm	2-5;	5	0.5637	0.0018	0.2160
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	10 cm	2-5; 5-20;	5	0.6262	0.0018	0.2581
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	20 cm	5-40; 5-20;	20	0.6813	0.0015	0.2975
			Franco Argillosa-27-40% di argilla e 20-45% di sabbia totale.	Dfb	50 cm	20-100;	100	0.187	0.0002	0.3947
Austria	HOAL	Hoal-27	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	5 cm	2-5;	5	0.5872	0.0015	0.2275
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	10 cm	2-5; 5-20;	5	0.6625	0.0016	0.2380
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	20 cm	5-40; 5-20;	20	0.7757	0.0025	0.2277
			Franco Argillosa-27-40% di argilla e 20-45% di sabbia totale.	Dfb	50 cm	20-100;	60	0.1747	0.0003	0.3862
Norvegia	NVE	Kvarstadseter	Sabbioso Franca-al limite superiore contiene 85-90% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o più; al limite inferiore non contiene meno del 70-85% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte quella dell'argilla, è 30 o meno.	Dfc	10 cm	2; 2-10; 2-5;	2	-0.1803	-0.0003	0.2298
			Sabbioso Franca-al limite superiore contiene 85-90% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o più; al limite inferiore non contiene meno del 70-85% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte quella dell'argilla, è 30 o meno.	Dfc	20 cm	2-10; 2-5;	5	0.0577	0.0002	0.2286
			Sabbioso Franca-al limite superiore contiene 85-90% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o più; al limite inferiore non contiene meno del 70-85% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte quella dell'argilla, è 30 o meno.	Dfc	30 cm	2-10; 2-5;	10	-0.0472	-0.0001	0.1782

			Sabbioso Franca-al limite superiore contiene 85-90% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o più; al limite inferiore non contiene meno del 70-85% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte quella dell'argilla, è 30 o meno.	Dfc	40 cm	2-10;	10	-0.0883	-0.0003	0.2225
Francia	SMOSMANIA	La Grand Combe	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfb	5 cm	2-5;	2	0.4246	0.0006	0.1071
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfb	10 cm	2-5; 5-20;	5	0.4943	0.0007	0.1218
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfb	20 cm	5-40; 5-20;	5	0.3755	0.0008	0.1489
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfb	30 cm	5-40; 20-100;	5	0.2619	0.0005	0.1331
Francia	SMOSMANIA	Mazan Abbaye	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	5 cm	2-5;	2	0.4479	0.0021	0.1595
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	10 cm	2-5; 5-20;	5	0.3027	0.0011	0.1674
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfb	20 cm	5-40; 5-20;	5	0.4586	0.0016	0.1409
			Franco Sabbiosa-20% o meno di argilla e 52% o più di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte la percentuale dell'argilla, è >30%; oppure contiene <7% di argilla,<50% di limo e 43-52% di sabbia totale.	Dfb	30 cm	5-40; 20-100;	5	0.3479	0.0013	0.1845
Germania	TERENO	Merzen Hausen	Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfb	5 cm	2-5;	5	0.6649	0.0024	0.1185
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Cfb	20 cm	5-40; 5-20;	20	0.784	0.0025	0.1407
			Franco Argillosa-27-40% di argilla e 20-45% di sabbia totale.	Cfb	50 cm	20-100;	100	0.5772	0.0029	0.1339
Francia	SMOSMANIA	Urgons	Franco Limosa-50% o più di limo, 12-27% di argilla; oppure 50-80% di limo e <12% di argilla.	Dfc	5 cm	2;	2	0.7893	0.0031	0.1651
			Franco Limosa-50% o più di limo, 12-27% di argilla; oppure 50-80% di limo e <12% di argilla.	Dfc	10 cm	2; 2-10; 2-5;	2	0.7918	0.0020	0.1781

			Franco Limosa-50% o più di limo, 12-27% di argilla; oppure 50-80% di limo e <12% di argilla.	Dfc	20 cm	2-10; 2-5;	5	0.7556	0.0023	0.1417
			Franca-7-27% di argilla, 28-50% di limo e <52% di sabbia totale.	Dfc	30 cm	2-10; 2-5;	10	0.8372	0.0021	0.1528
Germania	MOL-RAO	Falkenberg	Franco Sabbiosa-20% o meno di argilla e 52% o più di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte la percentuale dell'argilla, è >30%; oppure contiene <7% di argilla,<50% di limo e 43-52% di sabbia totale.		8 cm	2-5; 5-20;	5	0.6961	0.0027	0.0042
			Franco Sabbiosa-20% o meno di argilla e 52% o più di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte la percentuale dell'argilla, è >30%; oppure contiene <7% di argilla,<50% di limo e 43-52% di sabbia totale.		15 cm	5-40; 5-20;	20	0.8378	0.0035	-0.0551
			Franco Sabbiosa-20% o meno di argilla e 52% o più di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte la percentuale dell'argilla, è >30%; oppure contiene <7% di argilla,<50% di limo e 43-52% di sabbia totale.	Dfb	30 cm	5-40; 5-20; 20-100;	40	0.82	0.0040	-0.0901
			Franco Sabbiosa-20% o meno di argilla e 52% o più di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte la percentuale dell'argilla, è >30%; oppure contiene <7% di argilla,<50% di limo e 43-52% di sabbia totale.		45 cm	20-100;	60	0.7758	0.0050	-0.1192
			Franco Sabbiosa-20% o meno di argilla e 52% o più di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte la percentuale dell'argilla, è >30%; oppure contiene <7% di argilla, <50% di limo e 43-52% di sabbia totale.		90 cm	20-100;	100	0.697	0.0044	0.0199
Francia	HILLAN	Hillan2	Sabbiosa-85% o più di sabbia totale, e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o meno.	Cfb	5 cm	2-5;	2	0.8359	0.0022	0.0307
			Sabbiosa-85% o più di sabbia totale, e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o meno.	Cfb	15 cm	5-40; 5-20;	5	0.774	0.0014	0.0380

Sabbiosa-85% o più di sabbia totale, e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o meno.	Cfb	30 cm	5-40; 5-20; 20-100;	10	0.6996	0.0010	0.0404
Sabbiosa-85% o più di sabbia totale, e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o meno.	Cfb	50 cm	20-100;	20	0.6905	0.0017	0.0163
Sabbiosa-85% o più di sabbia totale, e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o meno.	Cfb	70 cm	20-100;	40	0.5871	0.0031	-0.0662
Sabbiosa-85% o più di sabbia totale, e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o meno.	Cfb	80 cm	20-100;	40	0.649	0.0043	-0.1213

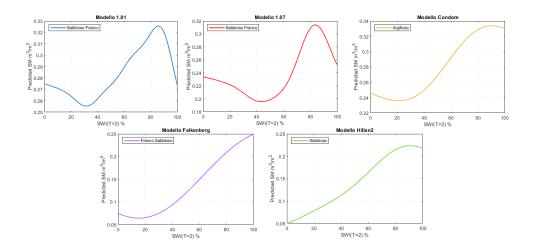


Figura 5.2: Rappresentazione grafica dei modelli SWI(T=2) - SM predetta

Dalla prima procedura utilizzata è emerso che molte stazioni non presentavano andamento pressoché lineare e che quindi il metodo usato, ovvero la regressione lineare, non è probabilmente quello appropriato per ricavarne una relazione significativa. A tal proposito, si è pensato di continuare l'analisi con l'utilizzo di modelli differenti da quello lineare per migliorarne la rappresentatività.

Pertanto, il secondo tentativo di analisi è stato trovare, sempre attraverso l'utilizzo dell'App Regression Learner di Matlab, quale tra i modelli proposti presentasse RMSE (root-mean-square error) minore, ovvero con errore più basso. In particolare, la procedura adottata è stata quella di suddividere le stazione studiate in due categorie, quelle con terreno simile a quello in cui è situata la Basilica di Vicoforte e quelle con composizione del suolo differente; da ciò, si è proceduto con l'analizzare separatamente i due casi suddetti. I risultati ottenuti per il caso studio sono riportati e commentati ampiamente nel Capitolo 6.

Nello specifico, dai 20 siti scelti, in conseguenza alle considerazioni appena fatte escludendo quelli simili al terreno di Vicoforte, sono stati evidenziati 5 modelli predittivi derivanti da 5 stazioni appartenenti a 4 differenti reti, i quali presentavano rispettivamente una diversa composizione del terreno, si vedano Figura 5.2 e Figura 5.3.

Graficamente, si può notare che la differenza in termini di composizione del terreno porta certamente ad avere andamenti che si discostano notevolmente l'uno dall'altro. I modelli presentati, sono stati valutati usando un valore univoco di T, quale T=2, e il contenuto volumetrico di umidità del terreno è

5.3 Risultati 45

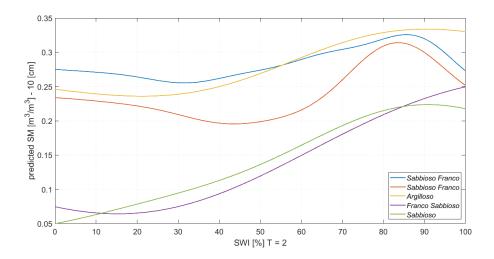


Figura 5.3: Sovrapposizione risultati derivanti dai 5 modelli SWI (T=2) - Umidità del terreno predetta

stato riferito, per tutti i modelli, ad uno strato con profondità massima pari a 10cm, per mantenere coerenza nell'analisi. Sotto le suddette condizioni, si è visto che:

- 1. Il terreno Sabbioso Franco contiene al limite superiore l'85-90% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o più; al limite inferiore non contiene meno del 70-85% di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte quella dell'argilla, è 30 o meno. Per tale terreno rappresentativo delle stazioni denominate 1.01 e 1.07, appartenenti alla rete HOBE (in Danimarca), l'andamento del modello risultante è pressoché simile, si veda Figura 5.2, in termini di tendenza, presentano, infatti, entrambi un andamento iniziale decrescente fino ad un picco minimo seguito da un tratto crescente quasi linearmente fino ad un picco massimo con un tratto finale nuovamente decrescente, sono quindi caratterizzati da un flesso. L'ordine di grandezza dei valori ottenuti del dato predetto sono per la stazione 1.01 valore minimo di 0.255 e un massimo di 0.325, in corrispondenza di SWI = 30% e 85% rispettivamente, la stazione 1.07 registra un minimo di 0.195 e un massimo di 0.315 con SWI = 45% e 85%.
- 2. È classificato *Argilloso* quel terreno che presenta 40% o più di argilla, meno del 45% di sabbia totale e meno del 40% di limo. Appartiene a questa categoria il suolo della stazione francese Condom, network SMO-SMANIA; presenta un andamento simile ma meno marcato del terreno

- sabbioso franco, con valore minimo 0.235, in corrispondenza di SWI = 20% circa, e valore massimo 0.330 con SWI = 90%.
- 3. Il suolo Franco Sabbioso è caratterizzato dal 20% o meno di argilla e 52% o più di sabbia totale e la percentuale di limo, più 2 volte la percentuale dell'argilla, è >30%; oppure contiene <7% di argilla, <50% di limo e 43-52% di sabbia totale. La stazione Falkenberg, appartenente alla rete MOL_RAO, ospita questo tipo di terreno; il modello grafico fino a valori di SWI pari al 20% mostra un tratto con concavità verso l'alto con variazioni di SM poco significative, per poi ottenere un andamento crescente tendente al lineare fino ai massimi valori di SWI (ovvero al 100%), registrando un massimo di umidità del suolo predetta pari a 0.25.
- 4. L'ultimo terreno analizzato nella presente sezione è quello Sabbioso, con 85% o più di sabbia totale, e la percentuale di limo, più 1,5 volte la percentuale di argilla, è 15 o meno. La stazione ad esso associata è Hillan2 del Network FR-Aqui; questa presenta terreno simile alle due stazione della rete HOBE, in quanto mostrano un'alta percentuale di sabbia, non si nota, però, una grande corrispondenza in termini grafici o di valori. Quanto appena detto, potrebbe essere dato dalla diversa classificazione climatica dei siti esaminati. Il modello in questione presenta valori simili alla stazione Falkenberg come si può facilmente vedere dal grafico dei modelli sovrapposti (Figura 5.3), ma andamento opposto, ovvero mostra un tratto iniziale crescente quasi lineare fino a valori di SWI pari all'80% seguito da un attenuamento di pendenza mostrando valori di contenuto volumetrico di umidità predetta in diminuzione fino al valore massimo di SWI.

Capitolo 6

Applicazione dei risultati sul caso studio

Il Santuario di Vicoforte è un monumento storico italiano, e in quanto tale nasce la necessità e il dovere di preservarlo in quanto identifica un periodo fondamentale della storia del Paese.

Da molti anni, per avere un monitoraggio continuo e per la salvaguardia della struttura, sono stati installati dei sensori statici e dinamici che garantiscono il controllo del comportamento nel tempo dell'opera. Si è visto che la risposta dinamica di una struttura dipende in modo più o meno significativo dalle variazioni di fattori ambientali (EOVs), così come dalle caratteristiche della struttura in sè. Questi fattori esterni hanno inevitabilmente un duplice effetto in quanto agiscono in modo diretto sulla struttura emergente, ed incidono conseguentemente sul suo terreno di fondazione, alterandone e modificandone le proprietà, probabilmente dando luogo ad una modifica delle condizioni di vincolo, che incidono sulla rigidezza dell'intero sistema vibrante. In taluni casi i due effetti agiscono in combinazione e le relazioni tra essi potrebbero essere non lineari. E noto che lo studio di interazione struttura-terreno è spesso ostacolato dalla limitata o completa assenza di un monitoraggio continuo del suolo. I dati satellitari, pertanto, costituiscono una fonte di informazioni sullo stato del suolo, essi possono riguardare le condizioni termiche, quelle di saturazione o altro. Il vantaggio è che questi sono disponibili su quasi tutta la superficie del pianeta in modo continuo e sono facilmente reperibili su numerose piattaforme online in modo gratuito. Per tale ragione, la scelta dell'utilizzo del telerilevamento risulta una valida alternativa nell'ambito del monitoraggio strutturale, per modellare la risposta dinamica in funzione dello stato del terreno di fondazione.

6.1 Grado di saturazione predetto

Le regioni studiate, come già menzionato, appartenenti al progetto dell'I-SMN, sono 20 e risultano distribuite nell'intero territorio europeo, in modo da avere uno scenario ampio e vario sul quale basare l'analisi eseguita.

Il presente lavoro ha come caso studio la Basilica Regina Montis Regalis, pertanto quello su cui, successivamente, si è puntata l'attenzione sono state le stazioni che potevano presentare caratteristiche simili a Vicoforte (CN), in termini climatici e di parametri del terreno.

Il Santuario di Vicoforte è situato su un suolo che presenta composizione variabile, uno strato di materiale limo argilloso con spessore che spazia da 1 a 5 m, un modesto strato di materiale di transizione con spessore che va da un paio di centimetri sul lato Est del Santuario fino ad 1 m sul lato Ovest ed infine lo strato più profondo è rappresentato da marna; le percentuali granulometriche risultano essere: 20-30% di argilla, 12% di sabbia e 70% di limo (valori medi fino a 5 m).

I siti con caratteristiche simili e che quindi possono essere coerentemente confrontati con tale composizione sono 14 su 20, vengono riportati di seguito:

- Petrelle;
- Cerbara;
- Torre olmo;
- Cabrieres d'Avignon;
- Gevenich;
- Hoal-8;
- Hoal-18;
- Hoal-24;
- Hoal-26;
- Hoal-27;
- La Grand Combe;
- Mazan Abbaye;
- Merzen Hausen;

• Urgons.

Le stazione appena citate hanno in comune le seguenti caratteristiche:

- Classe climatica Temperate & Transitional, ovvero Classe 4 (Figura 5.2);
- Tessitura del terreno Franco, Franco Argillosa o Franco Limosa.

All'interno dell'elenco proposto è stata inclusa la stazione Urgons, appartenente al suolo francese, nonostante questa abbia Classe Climatica differente dal sito di Vicoforte, in quanto è stata ritenuta al limite tra la Classe accettata per la trattazione e quella ad essa effettivamente associata, in aggiunta il suo terreno risulta molto simile a quello sotto esame.

Per proseguire l'analisi prevista si è notato, attraverso un'analisi critica dei risultati grafici ottenuti tramite lo studio dei 14 siti menzionati, che alcune stazioni presentavano un numero significativo di dati mancati, tale da poter compromettere la rappresentatività del modello da essi risultante; per tale ragione, sono state scartate le stazioni appartenenti alla rete HOAL, quali: Hoal-8, Hoal-18, Hoal-24, Hoal-26 e Hoal-27.

Una volta effettuata la selezione definitiva dei siti più adeguati alla trattazione, attraverso l'aiuto di Matlab si è eseguita la formazione dei modelli che più si adattavano all'andamento dei diagrammi a diffusioni ottenuti in precedenza. Si è riscontato un modello comune per le 9 stazioni analizzate, ottenuto dalla Support Vector Regression [14].

L'analisi SVM è un popolare strumento di Machine Learning per la classificazione e la regressione. Entrambi i problem learning si basano sulla stessa idea con la differenza che in un problema di classificazione, molto più comunemente usato in SHM, l'output è rappresentato da class labels (cioè ha un dominio discreto), mentre in un problema di regressione, come quello qui usato, l'output è una variabile continua.

Dato un set di dati costituito da N osservazioni P-dimensionali $x_i \in \mathbb{R}^P$ e dai loro output scalari $y_i \in \mathbb{R}$ l'obiettivo della regressione è quello di trovare la funzione y = f(x) che generalizza al meglio un nuovo set di dati, diverso da quello di partenza. Per fare ciò, SVM considera una funzione lineare, quale:

$$y = \langle w, x \rangle + b \tag{6.1}$$

dove w e x sono i parametri da regolare per ottenere il miglior adattamento. Il problema di regressione si basa sul principio strutturale di Risk Minimization (SRM), ossia non comporta solo la minimizzazione dell'errore sul set di dati introdotti ma anche la minimizzazione del limite superiore sull'errore di generalizzazione. Ciò consente di evitare un adattamento eccessivo (over-fitting) e

quindi una migliore generalizzazione del set di dati non noto. Il rischio strutturale dipende anche da una funzione di perdita. Nel caso di SVM si utilizza una ϵ -Insensitive Loss-Function, che deriva dal concetto di robust regression introdotto da Huber, a cui si aggiunge una zona insensibile, definita da ϵ , insensitive parameter. Questo implica che la funzione di perdita sarà posta pari ad ϵ se la discrepanza tra il valore atteso e quello effettivo è inferiore ad ϵ . Introducendo delle variabili di slack e moltiplicatori di Lagrange e tenendo conto delle suddette caratteristiche dell'algoritmo, il problema di ottimizzazione viene risolto massimizzando un funzionale convesso obiettivo. Questo dipende da una costante C, detta box-costraint, che è un valore positivo che controlla la penalità inflitta alle osservazioni che si trovano al di fuori del margine definito da ϵ . Questi due parametri vengono solitamente selezionati implementando una procedura di convalida incrociata.

La formulazione lineare può essere facilmente generalizzata al caso di regressione non lineare utilizzando i cosiddetti metodi *Kernel*. Grazie quindi al popolare trucco di Kernel, l'onere computazionale è ridotto.

L'intera analisi finora esplicata è stata eseguita in quanto, come già accennato in precedenza, del caso studio, il Santuario di Vicoforte, l'unico parametro disponibile era quello relativo al dato satellitare SWI (Soil Water Index), mentre vi era la completa assenza di misure in situ del suolo in questione; da ciò scaturisce la necessità di applicare tali modelli, derivanti da terreni dei quali si conosceva sia il dato ottenuto da telerilevamento che quello ottenuto in situ tramite misurazioni dirette. In particolare, tramite l'applicazione di tutti e 9 i modelli si è ricavato in modo indiretto il dataset dei valori predetti di umidità del terreno SM $[m^3/m^3]$ per la Basilica.

Nel dettaglio, operativamente, ogni modello è stato ottenuto relazionando i dati SWI di Vicoforte per valori bassi di T, nello specifico si è scelto T=2, e valori di Soil Moisture per il primo strato di misurazione, ovvero alla profondità massima di $10\ cm$; una volta ottenuti i modelli, questi sono stati estrapolati e per ognuno di essi, sono stati calcolati i dati di umidità del terreno predetti in funzione di una variabile nota, ovvero un vettore che va da $0\ a\ 100\ rappresentativo\ del dato\ SWI(T=2)\ generico.$

Questi dati, così ottenuti, sono stati riportati dapprima in grafici singoli evidenziando la stazione dalla quale il modello discende, e successivamente sono stati diagrammati in un unico grafico per analizzarne criticamente gli andamenti, si vedano Figure 6.1 e 6.2.

Come si può facilmente notare in Figura 6.2 l'unico modello che si discosta maggiormente dagli altri andamenti è quello ottenuto dallo studio della stazione La Grand Combe; osservando le serie temporali ad essa associate si è scelto di escludere dall'analisi la suddetta stazione in quanto ritenuta con basso tasso

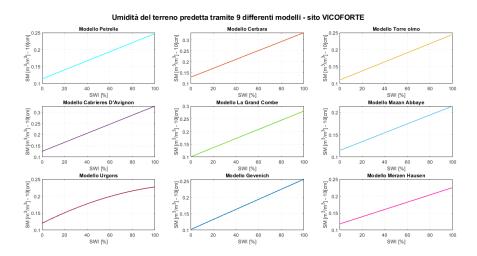


Figura 6.1: Rappresentazione grafica dei modelli SWI (T=2) - Umidità del terreno predetta, sito Vicoforte

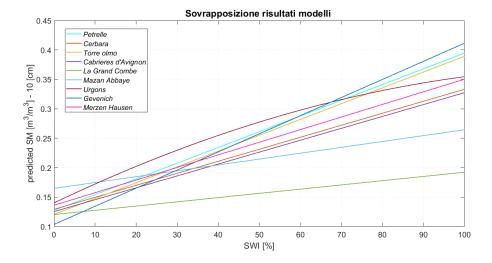


Figura 6.2: Sovrapposizione risultati derivanti dai 9 modelli SWI (T=2) - Umidità del terreno predetta, sito Vicoforte

di affidabilità.

Una volta ottenuti questi risultati grafici, si sono selezionati i dati di Soil Water Index ricavati da telerilevamento (un dato rilevato al giorno) relativi a Vicoforte per un arco di tempo di tre anni quali 2018, 2019 e 2020, di seguito sono riportati solo i valori minimo, medio e massimo per T=2 rispettivamente, ovvero:

- $SWI(T=2)_{min} = 22.6 \%;$
- $SWI(T=2)_{avg} = 63.8 \%;$
- $SWI(T=2)_{max} = 99.5 \%$.

Per ogni valore del dato satellitare di Vicoforte, si è potuto entrare direttamente all'interno del grafico in Figura 6.2 ricavando gli 8 valori di Soil Moisture predetto in corrispondenza quindi di ogni modello rappresentato. Di questi ultimi si è valutata la distribuzione, Figura 6.3, seppur con un numero di dati limitato, e di tali valori si è calcolata la mediana per ottenere così tutti i dati di umidità del terreno ognuno in funzione del corrispondente dato SWI, riportando come esempio i valori citati in precedenza si ha:

- predicted $SM_{min} = 0.1830$;
- predicted $SM_{avg} = 0.2824$;
- predicted $SM_{max} = 0.3517$.

Quindi, la relazione che intercorre tra i dati appena citati è del tipo:

$$SM_i = f(Me(SM_i(SWI_i))) \tag{6.2}$$

con i che va da 1 a 8, ovvero il numero totale dei modelli usati, j che indica il j-esimo dato nello specifico giorno di rilevamento, SWI_j è il dato satellitare registrato nel j-esimo giorno a Vicoforte dell'arco temporale dei tre anni di osservazione scelti, $Me(SM_i)$ è la mediana tra gli 8 valori ottenuti entrando nel grafico con SWI di Vicoforte; pertanto, SM_j è pari all'umidità del suolo predetta corrispondente al j-esimo dato satellitari registrato.

I dati di misure in situ predetti sono rappresentativi dell'umidità del suolo nel primo strato di terreno fino ad una profondità massima di 10 cm; arrivati a questo punto della trattazione, l'obiettivo è stato quello di determinare il grado di saturazione che, nel caso specifico, risulta il grado di saturazione superficiale. Pertanto, sfruttando la relazione di proporzionalità ([9], [15])che

lega il contenuto volumetrico d'acqua SM con il grado di saturazione S_r tramite la porosità n:

$$S_r = \frac{SM}{n} \tag{6.3}$$

$$SM = \frac{V_w}{V} \tag{6.4}$$

con n = 0.5 considerando un valore medio per terreno limoso [16], V_w volume di acqua e V volume totale; sfruttando tale relazione si sono ricavati i valori definitivi del grado di saturazione superficiale per tutti i dati di umidità del suolo predetta, si riportano i 3 dati minimo, medio e massimo:

- $S_{rc_{min}} = 0.3660;$
- $S_{rc_{avg}} = 0.5648;$
- $S_{rc_{max}} = 0.7034$.

6.2 Parametri elastici del terreno

Al fine di studiare numericamente come la risposta statica e dinamica di una struttura è influenzata dalla variazione delle condizioni del terreno, vengono, spesso, eseguite delle simulazioni.

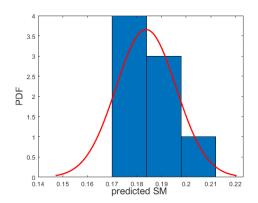
Nel presente studio, il Santuario è influenzato dalle oscillazioni dell'altezza della falda freatica, che a sua volta influenzano le proprietà elastiche dello strato del terreno di fondazione, e fanno variare il grado di saturazione degli strati al di sopra della falda. Questo, in generale, è principalmente dovuto al tasso di capillarità, e quindi dalla tipologia del terreno in esame, e dalle proprietà d'infiltrazione degli strati superficiali che rendono possibile il raggiungimento delle acqua piovane in profondità. In numerosi studi si è dimostrato che il grado di saturazione influenza i parametri elastici del terreno.

Per questo lavoro, l'obiettivo preposto è stato quello di determinare la variazioni del modulo elastico di Young E in funzione della variazione dei valori di grado di saturazione, tramite la seguente formula:

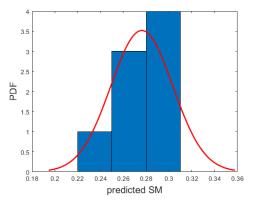
$$E(S_r) = 2 \cdot G(S_r) \cdot [1 + \nu(S_r)] \tag{6.5}$$

con G e ν pari al modulo di taglio e coefficiente di Poisson rispettivamente.

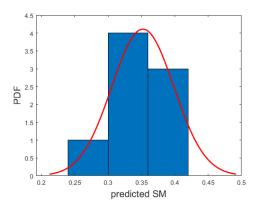
Per la determinazione del modulo elastico sono stati trovati i due parametri G e ν anch'essi in funzione del S_r attraverso l'utilizzo di specifiche leggi trovate in letteratura per terreni di tipo limoso [17], [18]. Le appena citate relazioni



(a) Distribuzione predicted SM minimo



(b) Distribuzione predicted SM medio



(c) Distribuzione predicted SM massimo

Figura 6.3: Istogramma e PDF dei dati predicted SM minimo, medio e massimo

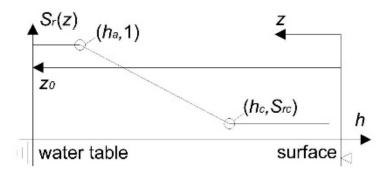


Figura 6.4: Schema del modello lineare assunto per il grado di saturazione S_r lungo la profondità z. [19]

sono state normalizzate ai valori calibrati da modello ottenuti in precedenza nel lavoro [3], per mantenere coerenza nelle analisi per il caso studio. Mentre, per il calcolo del grado di saturazione a partire da quello superficiale si è usato un modello lineare [19], si veda Figura 6.4.

Nel modello proposto, S_r si assume linearmente variabile tra la zona d'ingresso dell'aria h_a e la massima altezza di capillarità h_c , valutato a partire dalla profondità di falda. Per altezze minori di h_a il terreno si suppone in condizione di saturazione (ovvero $S_r = 1$) mentre per altezze maggiori di h_c il grado di saturazione tende ad essere uniforme, assumendolo costante e pari a quello superficiale S_{rc} . Analiticamente, il modello che descrive la variazione di S_r lungo la profondità z, risulta:

$$S_r(z, z_0) = \begin{cases} 1 & \text{per } h(z, z_0) \le h_a \\ 1 + \frac{1 - S_{rc}}{h_c - h_a} \cdot (h_a - h(z, z_0)) & \text{per } h_a < h(z, z_0) < h_c \\ S_{rc} & \text{per } h(z, z_0) \ge 0 \end{cases}$$
(6.6)

In particolare, sono stati considerati h_a e h_c rispettivamente pari a 0.15m e 1.415m [20]; nell'equazione (6.6) $h(z, z_0) = (z_0 - z)$ e z_0 rappresenta la profondità di falda freatica, mentre z è l'altezza dello strato esaminato.

Nella presente applicazione, l'arco temporale scelto è quello degli anni 2018, 2019 e 2020, per tale intervallo però risultano assenti le misurazioni contemporanee ottenute da piezometri; a tale proposito, sulla base di risultati di piezometri relativi ad anni non contemporanei all'intervallo temporale scelto per il lavoro, si è ipotizzata una variazione di profondità di falda che va da un minimo di -0.1m a un massimo di -3.5m, mentre lo strato per il quale è stata fatta la suddetta valutazione ha uno spessore che parte dalla quota 0m fino a

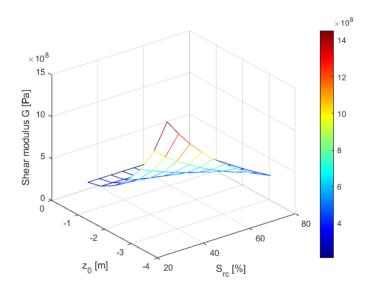


Figura 6.5: Legge del modulo di taglio in funzione del Grado di saturazione superficiale e l'altezza di falda

-5m, rappresentativo dello strato di limo argilloso al di sotto del Santuario, nel quale è posizionato il piano di posa delle fondazioni.

Pertanto, per ognuno dei valori del grado di saturazione superficiale è stata calcolata la quota $h(z, z_0)$ per ogni possibile variazione di altezza della falda con step di 0.01 m e si sono ottenuti i risultati finali di S_r integrando sull'intero spessore dello strato di limo. Avendo, quindi, i vari $S_r(z, z_0)$ si sono potute sfruttare le leggi del modulo di taglio G e del coefficiente di Poisson ν per terreni limosi e determinarne i valori corrispondenti; suddette leggi sono state opportunamente normalizzate ai valori di G e ν di Vicoforte calibrati precedentemente da modello [3].

Dai risultati così ottenuti, si è potuta vedere l'influenza di questo fattore ambientale sui parametri elastici del terreno, si vedano Figura 6.5, 6.6 e 6.7.

6.3 Applicazione su FEM del Santuario di Vicoforte

Lo scopo dell'analisi finora riportata e commentata è di sfruttare i risultati ricavati per ottenere le risposte in termini di frequenza tramite un continuo aggiornamento delle caratteriste elastiche del suolo di Vicoforte.

Difatti, come è stato detto, si è arrivati ad avere i diversi valori di grado di saturazione $S_r(z_0, z)$ dai quali si sono ricavati i parametri del terreno G e ν ,

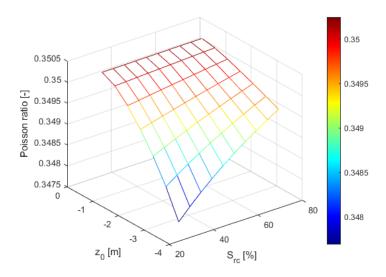


Figura 6.6: Legge del coefficiente di Poisson in funzione del Grado di saturazione superficiale e l'altezza di falda

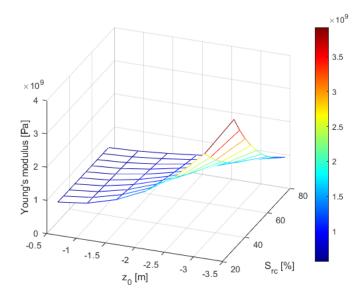


Figura 6.7: Legge del modulo di Young in funzione del Grado di saturazione superficiale e l'altezza di falda

rendendo possibile la valutazione del modulo di Young, $E(S_r)$. Pertanto, ciò che si è fatto operativamente è stato inserire nel modello FE definito in AN-SYS [3] le varie coppie $E(S_r)$ e $\nu(S_r)$, e per ognuna di esse si è lanciata l'analisi agli autovalori ottenendo come risposta le frequenze corrispondenti. Il grado di saturazione, come si può vedere nell'equazione (6.6), è funzione del grado di saturazione superficiale S_{rc} e dell'altezza di falda z_0 , quindi nella presente analisi i range di esistenza dei due parametri sono stati suddivisi in intervalli sufficientemente piccoli per migliorarne la rappresentatività, ottenendo per ogni loro possibile combinazione il valore di S_r .

In particolare, lanciata l'analisi del modello, si sono ottenute tutte le relative frequenze per tutti i modi di vibrare della struttura in esame, di queste, le due frequenze identificate per il Santuario erano la prima e la seconda, nelle Figure 6.8 e 6.8 sono riportate queste ultime in relazione ai valori del grado di saturazione superficiale e l'altezza di falda supposta; e sulla base di tali frequenze naturali è proseguita la valutazione proposta.

Grazie ai sensori posizionati direttamente nella Basilica di Vicoforte si è in possesso delle frequenze sperimentali, che in questo specifico caso riguardano tre anni di osservazione 2018, 2019 e 2020; tali frequenze sono influenzate inevitabilmente dall'effetto dovuto ai fattori ambientali, per tale ragione si è pensato di effettuare un confronto tra queste con quelle ottenute numericamente che tengono conto della variazione del grado di saturazione.

La struttura e l'esecuzione dell'analisi finale è riportata nel paragrafo a seguire.

6.3.1 Procedura adottata e risultati

Nei paragrafi precedenti, si è visto che si è arrivati alla valutazione dei valori di grado di saturazione superficiale relativi al terreno sottostante il Santuario di Vicoforte associati ai vari dati satellitari derivanti da telerilevamento nel tempo (2018-2019-2020). Tuttavia, sulla base dei valori massimi e minimi registrati di S_{rc} ovvero 0.7034 e 0.3660 rispettivamente e quelli relativi all'oscillazione della profondità di falda, valori compresi tra -0.1 e -3.5 m, supposti accettabili per la presente trattazione, ma da considerare una variabile ipotizzata, si è evidenziato un campo in cui le frequenze sotto tali condizioni dovrebbero ricadere. Tutto questo è stato ottenuto tramite l'analisi sul modello FE.

Per il primo modo di vibrare il contour plot presenta frequenze che vanno da 1.91Hz a 1.99Hz. In particolare, si nota una certa dipendenza della frequenza naturale al variare dei due parametri interessati, difatti, tanto più la falda si presenta in profondità tanto più alta è la frequenza risultante; la condizione con frequenze più elevate si ha nel caso di falda alla massima profondità ipotizzata

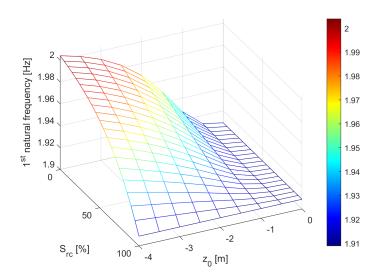


Figura 6.8: Rappresentazione grafica della prima frequenza naturale ottenuta dal FEM, funzione di S_{rc} e z_0

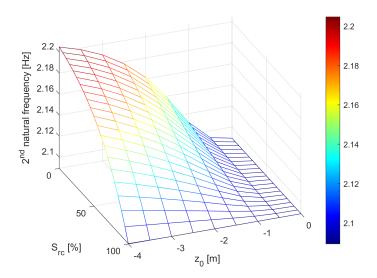


Figura 6.9: Rappresentazione grafica della seconda frequenza naturale ottenuta dal FEM, funzione di S_{rc} e z_0

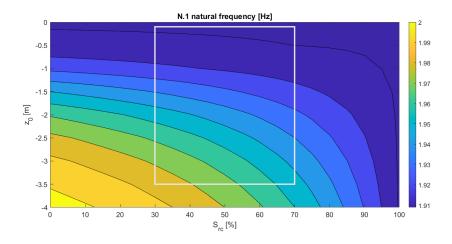


Figura 6.10: Contour plot per il primo modo del Santuario di Vicoforte

-3.5m e grado di saturazione basso (circa 30%). A parità di altezza di falda all'aumentare del grado di saturazione le frequenze tendono a diminuire. Nella condizione opposta, ovvero con altezza di falda più superficiale si nota che, a parità di falda, anche in questo caso la frequenza aumenta ma più lentamente al diminuire del grado di saturazione. La condizione minima è quella con altezza di falda poco profonda e alto grado di saturazione.

Per il secondo modo valgono analoghe considerazioni riportate per il modo 1, ma con valori di frequenze che variano da un massimo e un minimo pari a 2.18 e 2.09Hz rispettivamente. Quanto detto è riportato nelle Figure 6.10 e 6.11.

Si noti che, nella zona a destra dei grafici illustrati, zona a bassa sensibilità, si ha una situazione ben differente, in quanto anche con grandi variazioni di altezza di falda e variazioni di grado di saturazione superficiale non si desume alcuna variazione significativa di frequenza.

A questo punto, bisogna ricordare che le frequenze sperimentali ottenute da monitoraggio nei loro valori inevitabilmente è presente l'influenza degli effetti dovuti ai fattori ambientali (EOVs) che condizionano il comportamento dinamico delle strutture; pertanto, le frequenze naturali usate dovevano essere private dell'effetto della temperatura, all'aumentare della quale ne risulta un aumento in frequenza, per poter effettuare un confronto significativo riconducendo i valori numerici e sperimentali sotto le stesse condizioni.

Pertanto, si è prima valutata la tendenza della frequenza in funzione della Temperatura dell'aria, come già visto, all'aumentare di quest'ultima ne risulta anche un aumento in termini di frequenza, si veda Figura 6.12 nella quale è riportato l'andamento delle frequenze al variare dei valori di temperatura ed

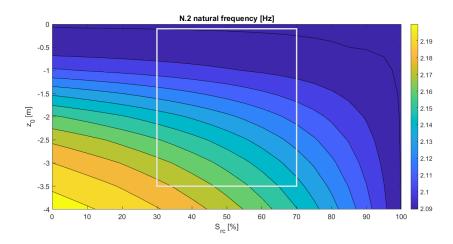


Figura 6.11: Contour plot per il secondo modo del Santuario di Vicoforte

è stata evidenziata la retta di tendenza. Per il presente lavoro, si sono considerate esclusivamente le frequenze relative a temperature maggiori di zero, escludendo così i valori negativi; questa semplificazione è stata possibile in quanto si è riscontrato che le frequenze di Vicoforte presentano per temperature positive un andamento lineare crescente, ovvero si riscontra un aumento di rigidezza, mentre per valori di temperatura negativi si vede altresì un aumento lineare di frequenza ma questa volta al diminuire della temperatura con cambio di pendenza, mostrando anche in questo caso un aumento di rigidezza dovuto alla presenza di ghiaccio e altri effetti condizionanti, si ha, quindi, un comportamento pressoché bilineare [14].

In Figura 6.13 si sono rappresentate invece le frequenze sperimentali del primo e secondo modo condizionate sia dall'effetto della temperatura che da quello del grado di saturazione, le quali per il primo modo hanno ampiezza massima 1.98Hz e minima 1.88Hz, per il secondo 2.15Hz e 2.02Hz.

A questo punto, si sono trattate le frequenze naturali sperimentali del primo e secondo modo per privarle dell'effetto della temperatura; il metodo adottato è stato quello di eliminare la tendenza frequenze-temperatura dalle frequenze sperimentali ed aggiungere l'effetto del grado di saturazione sfruttando la legge numerica media ottenuta tra frequenze numeriche e grado di saturazione medio calcolato in funzione dell'altezza di falda ipotizzata z_0 e profondità z, Figura 6.14. Da tale legge si può notare facilmente che per valori di $S_r(z_0, z)$ alti le frequenze sia del primo che del secondo modo risultano più basse, al contrario al diminuire del grado di saturazione si nota un aumento delle frequenze, in modo pressoché simile per entrambi i modi.

Da ciò, si sono portate le frequenze sperimentali nelle stesse condizioni delle

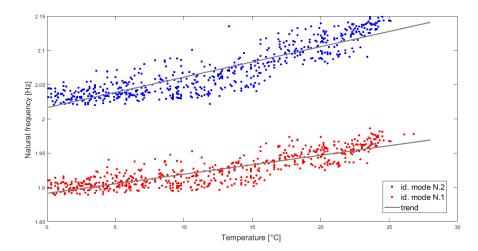


Figura 6.12: Relazione tra le frequenze naturali sperimentali e la temperatura dell'aria

frequenze numeriche (Figura 6.15); per il primo modo hanno ampiezza massima 1.98Hz e minima 1.92Hz, per il secondo 2.18Hz e 2.1Hz. Per un confronto visivo in aggiunta sono state messe su grafico le frequenze sperimentali sovrapposte con e senza l'effetto temperatura, Figura 6.16. Si nota che, le frequenze che non tengono conto della Temperatura presentano valori più alti; tenendo conto di tale effetto invece, le frequenze presentano degli abbassamenti con valori relativamente più bassi.

Dallo studio eseguito con l'utilizzo dei dati satellitari si sono ottenuti i valori di grado di saturazione superficiale S_{rc} predetti per la Basilica di Vicoforte, l'altezza di falda rimane una variabile ipotizzata ed il grado di saturazione medio è stato determinato in funzione di queste due variabili. Pertanto, la relazione tra i suddetti parametri è stata riportata nel grafico a tre assi in Figura 6.17.

Da tale legge si può facilmente notare che banalmente grado di saturazione superficiale e grado di saturazione definito in profondità hanno legame lineare. A parità quindi di profondità di falda se S_{rc} aumenta anche S_{rm} lo farà e viceversa. A parità di S_{rc} all'aumentare del grado di saturazione S_{rm} la profondità di falda diminuisce (ovvero falda più vicina alla superficie).

Dopo i passaggi finora discussi, ciò che si è ottenuto sono le frequenze sperimentali riportate nelle stesse ipotetiche condizioni delle frequenze numeriche ricavate dall'analisi lanciata nel FEM. Pertanto, poiché è nota la legge numerica che relaziona i valori di grado di saturazione medio e frequenze (si veda Figura 6.14), avendo ottenuto le frequenze sperimentali prive dell'effetto

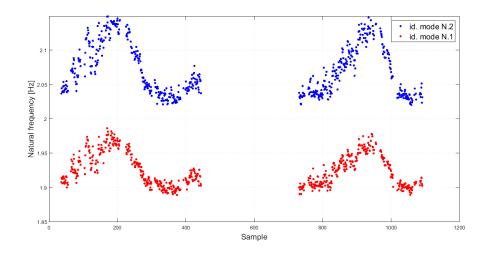


Figura 6.13: Rappresentazione delle frequenze sperimentali tenendo conto dell'effetto della temperatura dell'aria

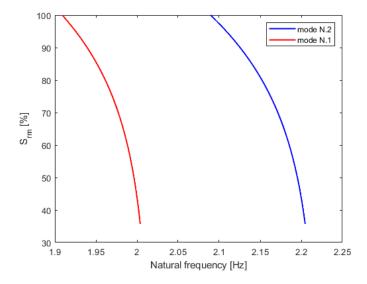


Figura 6.14: Legge grado di saturazione medio - frequenze numeriche da analisi su ${\rm FEM}$

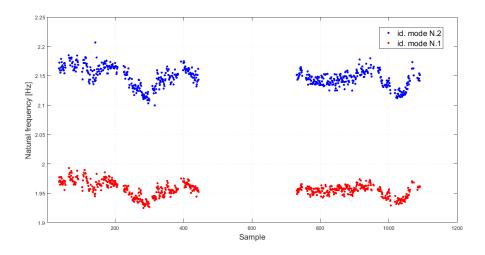


Figura 6.15: Rappresentazione delle frequenze sperimentali private dell'effetto della temperatura dell'aria

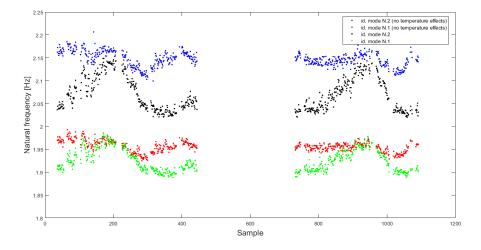


Figura 6.16: Sovrapposizione frequenze sperimentali nelle 3 configurazioni: con l'effetto della temperatura dell'aria e grado di saturazione e frequenze con il solo effetto del grado di saturazione

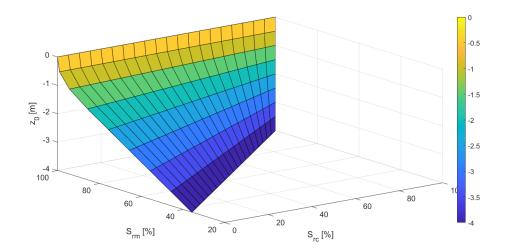


Figura 6.17: Legge dei parametri S_{rc} , z_0 e S_{rm}

termico ma comprendenti ancora l'effetto della saturazione si sono determinate, sfruttando la suddetta legge, i valori di grado di saturazione associati, quanto detto è riportato in Figura 6.18 e i risultati stimati sono presentati in Figura 6.19.

Per ottenere una legge analoga a quella che lega frequenze numeriche con grado di saturazione superficiale ed altezza di falda, basata però sui valori sperimentali, si è pensato di stimare la profondità di falda da associare a questi. Quindi, sperimentalmente ora si hanno: frequenze f_1 e f_2 dell'opera monumentale nel tempo, per gli anni 2018, 2019 e 2020 private dall'effetto della temperatura, i valori del grado di saturazione superficiale S_{rc} di Vicoforte nello stesso arco temporale associati agli SWI registrati in ogni giorno dei tre anni, e i valori del grado di saturazione medio S_{rm} ricavato sfruttando la legge che lega le frequenze ottenute dal FEM (in funzione dei vari S_r) con il grado di saturazione medio S_{rm} ottenuto dallo studio proposto. Ciò che manca da affiancare ai dati sperimentali è la profondità di falda, in modo da avere successivamente la legge che lega i parametri sperimentali di frequenze, grado di saturazione superficiale e profondità di falda.

Sfruttando quindi la relazione tra i risultati numerici si sono stimati i corrispondenti valori di profondità di falda z_0 media da associare alle variabili sperimentali, si veda l'esempio di estrapolazione del dato riportato in Figura 6.20.

Le altezze di falda ottenute da questa metodologia sono riportate in Figura 6.21.

Ora si ha tutto per vedere la relazione tra i parametri sperimentali da

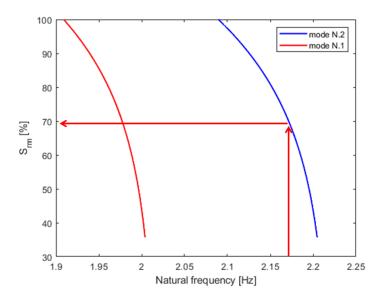


Figura 6.18: Metodo per la determinazione del grado di saturazione associato ai valori sperimentali di frequenza, sfruttando la legge dei valori numerici

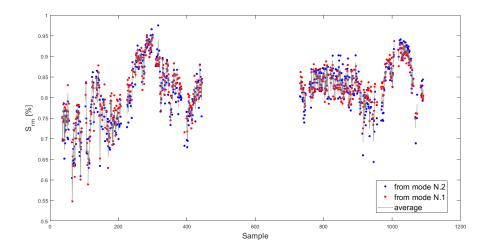


Figura 6.19: Grado di saturazione stimato associato ai valori sperimentali di frequenza, sfruttando la legge dei valori numerici

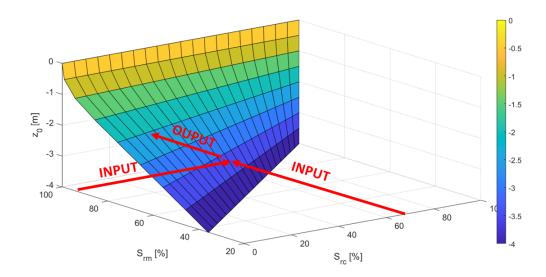


Figura 6.20: Esempio estrapolazione della stima del dato della profondità di falda

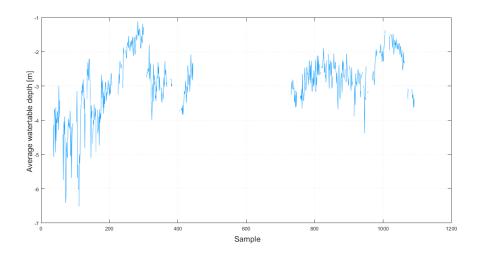


Figura 6.21: Stima dell'altezza di falda di Vicoforte

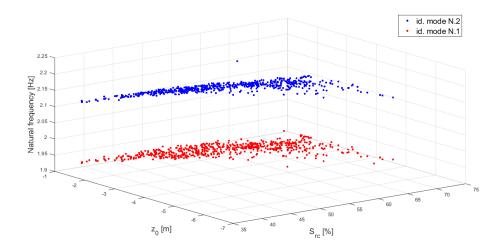


Figura 6.22: Legge sperimentale di S_{rc} , z_0 , frequenze senza l'effetto termico

successivamente confrontare con i risultati ottenuti dal modello FE, ossia la variazione delle frequenze al variare delle condizioni del terreno in termini di falda e saturazione.

La Figura 6.22 riporta lo spazio in cui ricadono le frequenze sperimentali se si tiene conto della variazione di falda stimata e del grado di saturazione superficiale del terreno di Vicoforte associato agli SWI dello stesso. Si nota che la frequenza aumenta all'aumentare della profondità di falda. La frequenza in modo poco marcato aumenta all'aumentare del grado di saturazione superficiale S_{rc} . Ma questo andamento è in accordo al fatto che i valori di profondità di falda sperimentali si sono ottenuti tramite il grado di saturazione medio S_r ottenuto a sua volta dalla legge frequenze- S_r dove questi due parametri sono quelli numerici.

A questo punto si ha tutto per effettuare un confronto diretto tra i due tipi di risultati, questo è stato fatto per entrambi i modi identificati scelti.

Nei grafici in Figura 6.23 e 6.24 sono state sovrapposte le due configurazioni evidenziando la relazione che intercorre tra le frequenze sperimentali e numeriche con le condizioni del suolo prese in esame. Una considerazione più evidente si può fare osservando le Figure 6.25 e 6.26; ovvero, dall'aggiunta dei dati ottenuti nei contour plot precedentemente definiti, si vede che le frequenze sperimentali ottenute in funzione del grado di saturazione superficiale calcolato per Vicoforte e l'altezza di falda stimata ricadono quasi interamente all'interno della "soglia" che si è supposta inizialmente, la discrepanza potrebbe essere giustificata da una probabile sottostima della profondità di falda, ossia il range in cui oscilla quest'ultima risulta diverso da quello previsto. Nei risultati

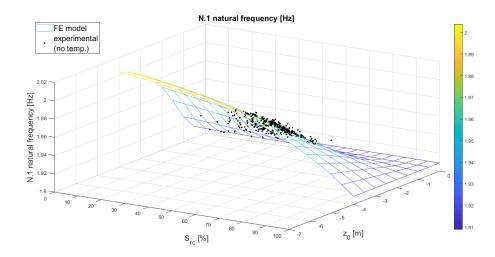


Figura 6.23: Sovrapposizione risultati numerici e sperimentali - primo modo

ottenuti si vede un range che spazia da un minimo di -1 m e un massimo di -7 m; in aggiunta, si è positivamente visto che, le frequenze cadono tutte lontano dalla zona di ginocchio ottenuta nella parte destra del grafico. Pertanto, si può affermare che sotto le ipotesi fatte e le condizioni supposte il grado di saturazione e l'altezza di falda sono due fattori ambientali che influenzano le frequenze della struttura.

Per tale ragione, l'installazione futura di piezometri al fine di valutare la profondità di falda può essere una soluzione adeguata per apportare un miglioramento nell'ambito dello Structural Health Monitoring SHM.

Infine, si è effettuato un confronto delle frequenze nella condizione finale quindi con effetto del grado di saturazione e quelle depurate anche di tale effetto. Si nota che, guardando le frequenze nelle due condizioni di assenza dell'effetto della temperatura (Figura 6.27 e Figura 6.28), considerare o meno il grado di saturazione sicuramente fa mutare i valori di frequenza ma in modo poco marcato, soprattutto se confrontate con il caso in cui viene considerato l'effetto della Temperatura (si veda l'andamento nella Figura 6.29). Si può pertanto dire che la Temperatura influenza considerevolmente le frequenze naturali, in maniera probabilmente maggiore rispetto all'effetto del grado di saturazione sulla base delle ipotesi fatte nella presente trattazione; ma riguardo ciò, nessuna conclusione può essere tratta in quanto basata su stime e non dati certi.

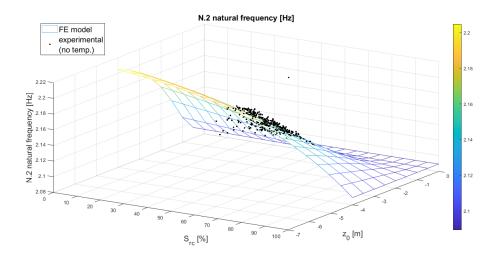


Figura 6.24: Sovrapposizione 3D risultati numerici e sperimentali - secondo modo

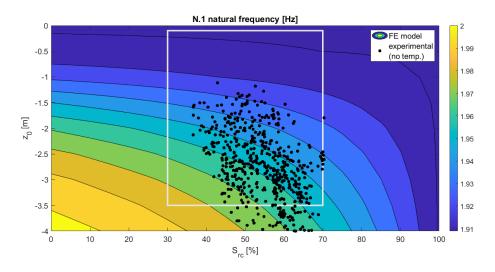


Figura 6.25: Sovrapposizione risultati numerici e sperimentali - primo modo

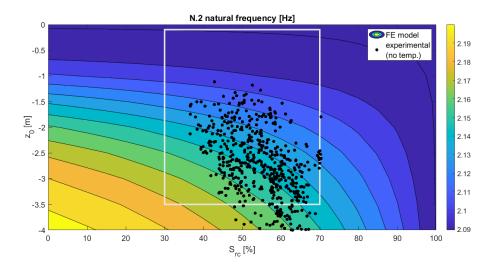


Figura 6.26: Sovrapposizione risultati numerici e sperimentali - secondo modo

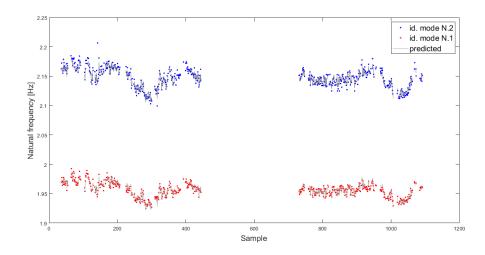


Figura 6.27: Frequenze sperimentali senza effetto termico

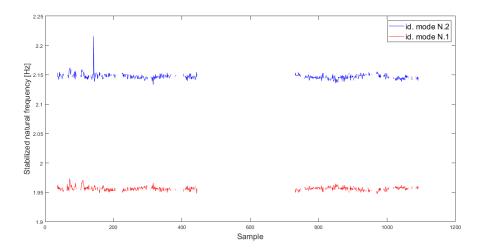


Figura 6.28: Frequenze sperimentali senza effetto termico e della saturazione

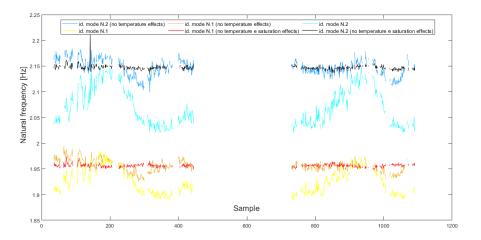


Figura 6.29: Sovrapposizione delle frequenze sperimentali con effetto termico, senza effetto termico, senza effetto termico e di saturazione

Capitolo 7

Discussione e conclusioni

I dati satellitari di Soil Water Index (SWI) sono stati utilizzati come punto di partenza, ovvero parametro noto, dal quale, relazionandolo alle misure in situ dell'umidità del terreno Soil Moisture (SM), si è potuto prevedere tramite modelli una caratteristica del terreno quale il grado di saturazione superficiale per il caso studio, poiché di quest'ultimo l'unico parametro disponibile era proprio quello satellitare. Successivamente, da un modello lineare si è ottenuto il grado di saturazione in profondità in funzione di quello superficiale e della variazione di profondità di falda. Per il Santuario di Vicoforte è stata supposta accettabile la variazione registrata da piezometri relativi però ad anni non contemporanei a quelli del caso studio, che va da -3.5 a -0.1m. Ottenuto il grado di saturazione $S_r(z_0, z)$ si sono ricavate le corrispondenti proprietà elastiche del terreno in funzione di quest'ultimo parametro, quali: modulo di Young E e coefficiente di Poisson ν . Inserendo questi parametri nel modello FE si sono ottenute le varie frequenze per ogni coppia di valori suddetti.

Parallelamente ciò che si aveva, per il caso studio esaminato, erano le frequenze sperimentali ottenute da monitoraggio per gli anni 2018-2019-2020; per effettuare nel modo più corretto un confronto diretto tra le frequenze ottenute dal FEM e queste ultime, tramite apposite tecniche, le frequenze sperimentali sono state depurate dell'effetto della Temperatura, che si è visto influenzare le frequenze in modo lineare (aumento di Temperatura implica aumento di frequenze [21]), e in aggiunta, sono stati stimati i corrispondenti parametri da associare ai valori sperimentali (altezza di falda e grado di saturazione) sfruttando le leggi costruite con i dati numerici.

In questo modo ci si è ricondotti ad avere tutti i parametri utili per un confronto significativo.

Dalla rappresentazione grafica delle frequenze nelle due diverse configurazioni (da FEM e sperimentali) si è visto che le frequenze sperimentali definite in funzione dei due parametri del terreno sono influenzate effettivamente da queste

ultime, tenendo sempre a mente che i risultati sono stati ottenuti sulla base di valori di altezza di falda supposti accettabili. Pertanto, il dato satellitare può essere utile per applicare questa metodologia con il fine di ottenere parametri elastici del terreno, che influenzano la dinamica globale della struttura, da usare nella simulazione dinamica di questa; tutto ciò supponendo nota l'altezza di falda. I risultati ricavati applicando tale metodologia possono essere validati soltanto se verranno confermate le ipotesi fatte. Pertanto, si è visto che sotto le condizioni imposte per il presente lavoro l'installazione in futuro di piezometri in situ risulta una adeguata soluzione per lo Structural Health Monitoring, ovvero per cercare di riconoscere gli effetti ambientali innocui che influenzano la reale lettura delle frequenze e cogliere il reale danneggiamento strutturale per la salvaguardia dell'opera.

Il dato satellitare è risultato uno strumento utile per ricavare un modello predittivo dal quale conoscendo il dato ottenuto da telerilevamento si è in grado di determinare un parametro del terreno, quale l'umidità del suolo, e conseguentemente il grado di saturazione ad essa associato.

Nel definire la relazione che intercorre tra il dato satellitare SWI e l'umidità del suolo SM rilevata in situ, si è visto però che, la corrispondenza migliore si è ottenuta per strati di misura di SM superficiali, ovvero nei primi 10 cm di terreno, associando principalmente tali misure agli SWI con T bassi per lo più pari a 2 o 5. Per tale ragione si è scelto infatti di trattare le misure per il primo strato di terreno e gli SWI con T=2, ricavandone, dopo le analisi effettuate, il grado di saturazione superficiale.

Preventivamente sono stati selezionati 20 siti differenti, a meno di quelli scartati risultati inaffidabili; questi presentavano terreno variabile, si è notato che indipendentemente dalla variabilità della composizione del suolo la migliore corrispondenza si è ottenuta sempre nelle condizioni appena citate (strato superficiale e T bassi); è comunque emerso che la relazione tra i due parametri indagati varia al variare del terreno sotto esame. A discapito di ciò che si aspettava quindi, il dato satellitare SWI, rappresentativo delle condizioni di umidità del suolo in profondità, non ha riscontrato grande corrispondenza per misure relative a strati profondi. Poiché questo lavoro è stato improntato in modo da studiare principalmente le stazioni simili al terreno di Vicoforte (le quali erano 14 su 20 con 5 scartate), e da ciò si sono trovati i modelli, vedendo che per tali terreni questi non si discostavano molto l'uno dall'altro, un futuro lavoro potrebbe essere quello di selezionare 20 o più siti tutti con terreno simile, quale sabbia, argilla, limo ecc, ed effettuare un confronto più approfondito e mirato tra il dato satellitare e quello misurato in situ focalizzando l'analisi su una determinata tipologia di terreno per vedere se il modello che ne discende si discosta in modo significativo da quello ottenuto per la tipologia di terreno studiata nella presente tesi.

Il dato satellitare preso in esame per il presente lavoro è un dato di terzo livello, determinato cioè attraverso l'utilizzo di un altro dato satellitare il Surface Soil Moisture (SSM) che a sua volta ha già subito un primo livello di elaborazione. Dato il grado di incertezza riscontrato con lo studio di questo dato satellitare, si potrebbe pensare, in futuro, di utilizzare dapprima il dato satellitare SSM e relazionarlo alle misure in situ proposte, in quanto questo potrebbe presentare maggiore correlazione essendo rappresentativo delle condizioni di umidità superficiale. Successivamente una volta vista la relazione tra i due dati si potrebbe trovare il corrispondente grado di saturazione superficiale tenendo conto della porosità, per passare poi, alla determinazione del grado di saturazione in profondità che tiene conto dell'altezza di falda e confrontare il dato così ottenuto con il secondo dato satellitare, ossia il Soil Water Index che è rappresentativo delle condizioni di umidità del suolo a varie profondità.

Bibliografia

- [1] Coccimiglio et al. Use of Copernicus satellite data to investigate the soilstructure interaction and its contribution to the dynamics of a monitored monumental building. In fase di pubblicazione.
- [2] Carlo Giovanni Lai et al. Definition of seismic input at the "Regina Montis Regalis" Basilica of Vicoforte, Northern Italy. Research Report n.3. Eucentre, Pavia, 2009.
- [3] Rosario Ceravolo et al. Thermoelastic finite element model updating with application to monumental buildings. In: Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, novembre 2019.
- [4] Mohamad Dabdoub. Damage Thresholds for Monitored Historical Structures. Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, 2021.
- [5] CGLOPS-1. "Vegetations and Energy", Soil Water Index, Collection 1Km, version 1.0. Issue I1.20. Algorithm theoretical basis document. Copernicus Global Land Operations, 2019.
- [6] CGLOPS-1. "Vegetations and Energy", Soil Water Index, Collection 1Km, version 1.0. Issue I1.20. Product user manual. Copernicus Global Land Operations, 2019.
- [7] CGLOPS-1. "Vegetations and Energy", Issue 12.00. Product quality assurance document. Copernicus Global Land Operations, 2019.
- [8] Stefania Coccimiglio. Studio della correlazione tra dati satellitari del programma europeo Copernicus e quelli registrati dai sistemi di monitoraggio installati su edifici monumentali. Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, 2020.
- [9] Dorigo et al. Global Automated Quality Control of In Situ Soil Moisture Data from the International Soil Moisture Network. Soil Science Society of America 5585 Guilford Rd., Madison, WI 53711 USA.

78 BIBLIOGRAFIA

[10] Dorigo et al. 2011b. The International Soil Moisture Network: A data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. Hydrol. Earth Syst. Sci. 15:1675-1698. doi:https://doi.org/10.5194/hess-15-1675-2011.

- [11] CGLOPS-1. "Vegetations and Energy", Soil Water Index, Collection 1Km, version 1.0. Issue I1.20. Validation Report. Copernicus Global Land Operations, 2019.
- [12] Peel, M.C., Finlayson, B.L., and McMahon, T.A. *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1633–1644, https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007, 2007.
- [13] Ugo Wolf, Stefano Carnicelli. MANUALE PER LA DESCRIZIONE DEL SUOLO. ARPAV-Servizio regiornale suoli. Versione 0. Settembre 2011.
- [14] Rosario Ceravolo et al. Statistical correlation between environmental time series and data from long-term monitoring of buildings. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020.
- [15] J.Facciorusso, C.Madiai, G.Vannucchi. dispense di Geotecnica, Università di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale. Settembre 2011.
- [16] Heath, Ralph C. Basic ground-water hydrology. USGS Water-Supply Paper 2220.
- [17] Yi Dong and Ning Lu. Dependencies of Shear Wave Velocity and Shear Modulus of Soil on Saturation. Articolo in Journal of Engineering Mechanics. Luglio 2016. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE) EM.1943-7889.0001147.
- [18] Sannith Kumar Thota et al. Poisson's Ratio Characteristic Curve of Unsaturated Soils. American Society of Civil Engineers-ASCE. Ottobre 2020. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002424.
- [19] Lenticchia et al. Analysis of the damage state of a monumentale building by considering the variations in soil conditions. COMPDYN 2021, 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Streamed from Athens, Greece, 27–30 June 2021.
- [20] Q. Liu, N. Yasufuku, J. Miao, and J. Ren. An approach for quick estimation of maximum height of capillary rise Soils Found., vol. 54, no. 6, pp. 1241–1245, 2014.

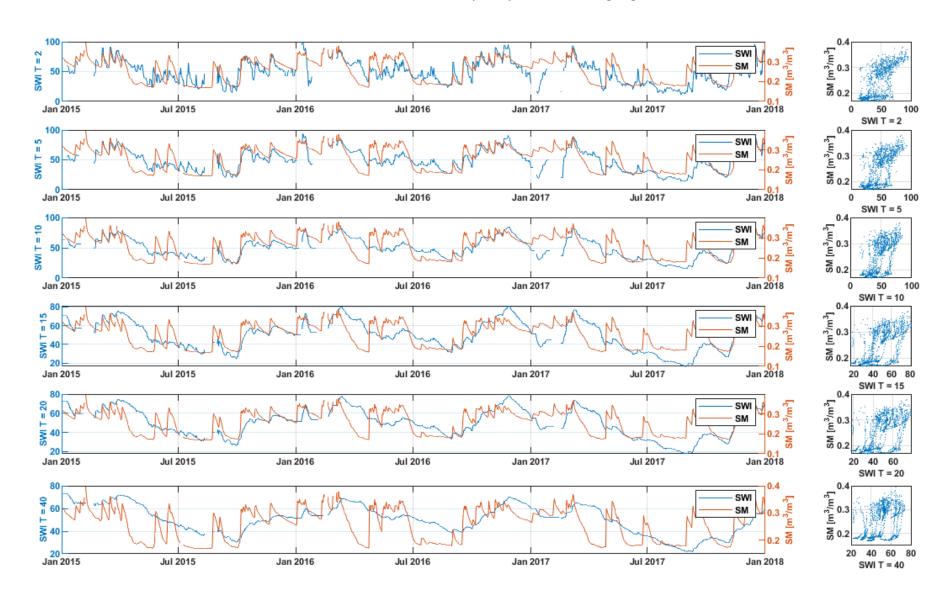
BIBLIOGRAFIA 79

[21] Rosario Ceravolo et al. *Monitoraggio del complesso monumentale Regina Montis Regalis*. Relazione annuale. Politecnico di Torino, 2018.

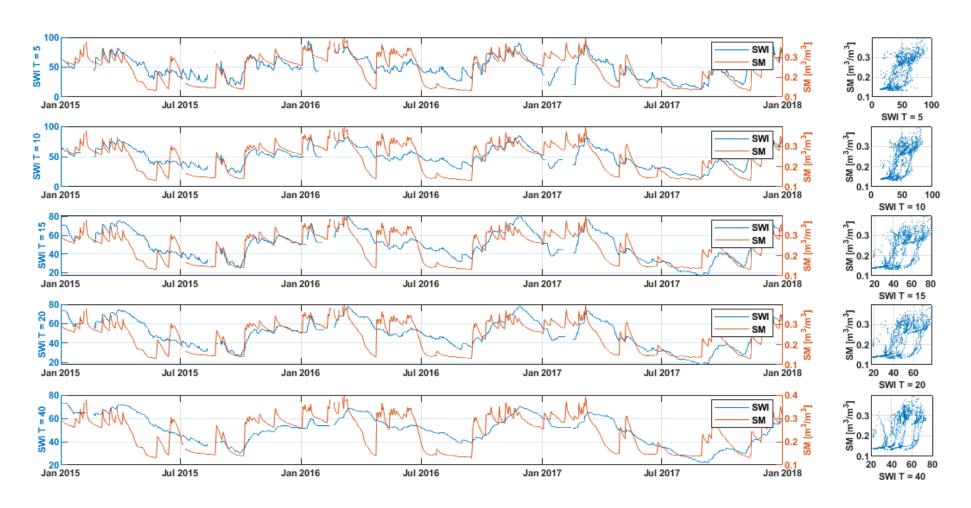
Appendice A

NETWORK: UMBRIA

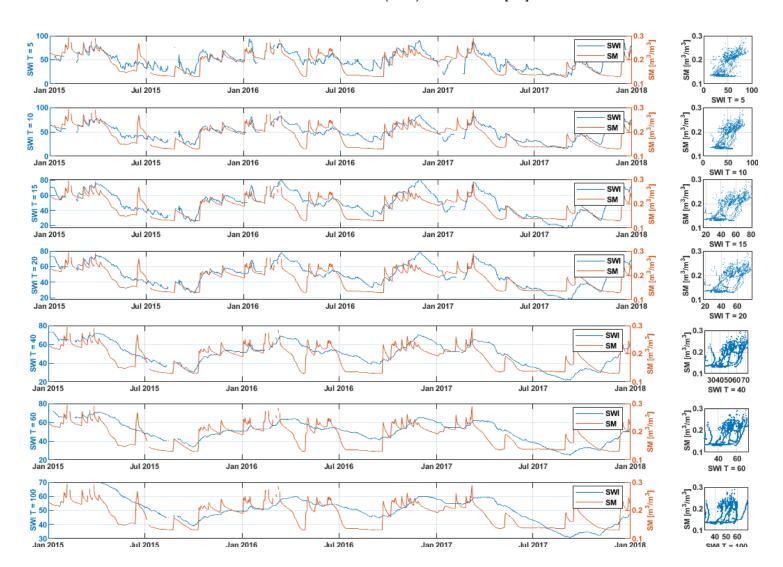
UMBRIA - Petrelle (Italia) - strato 5-15 [cm]



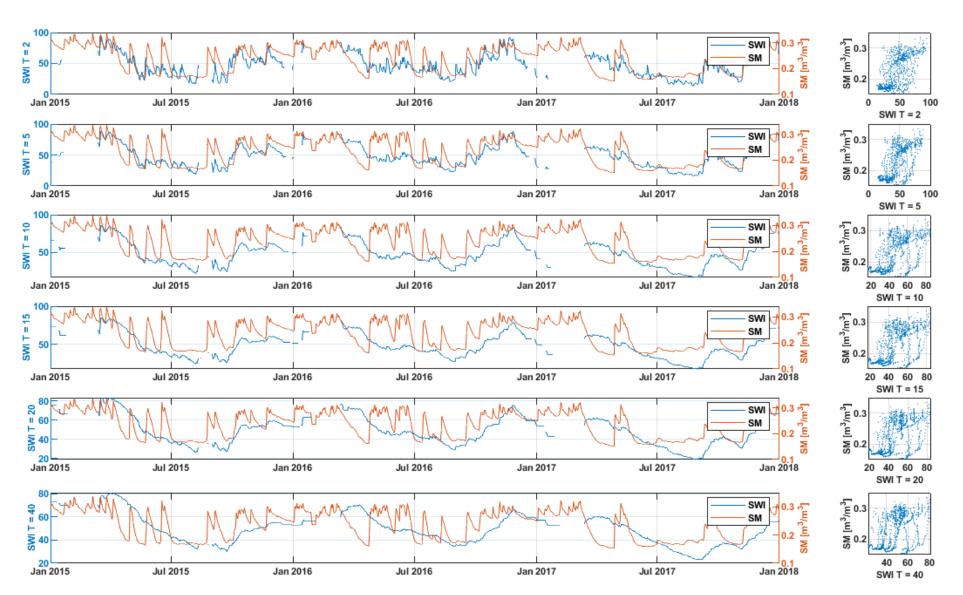
UMBRIA - Petrelle (Italia) - strato 15-25 [cm]



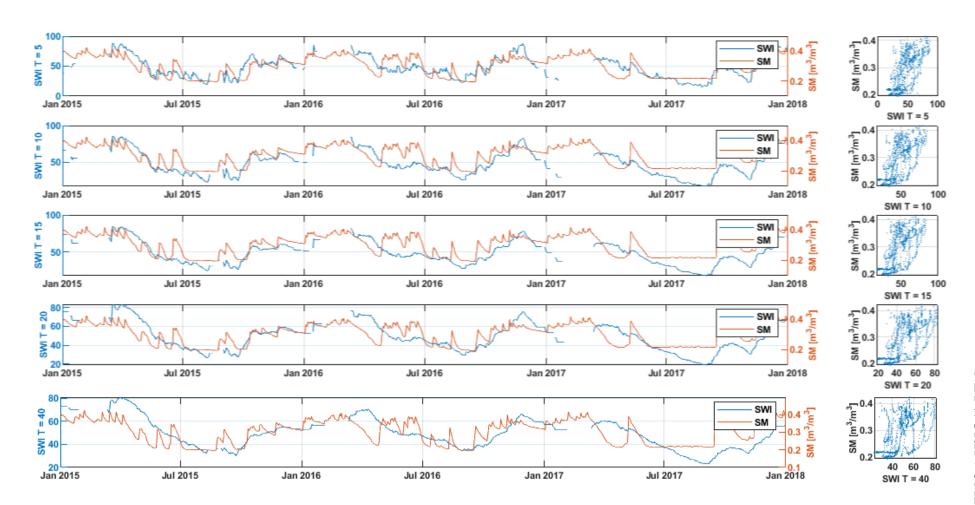
UMBRIA - Petrelle (Italia) - strato 35-45 [cm]



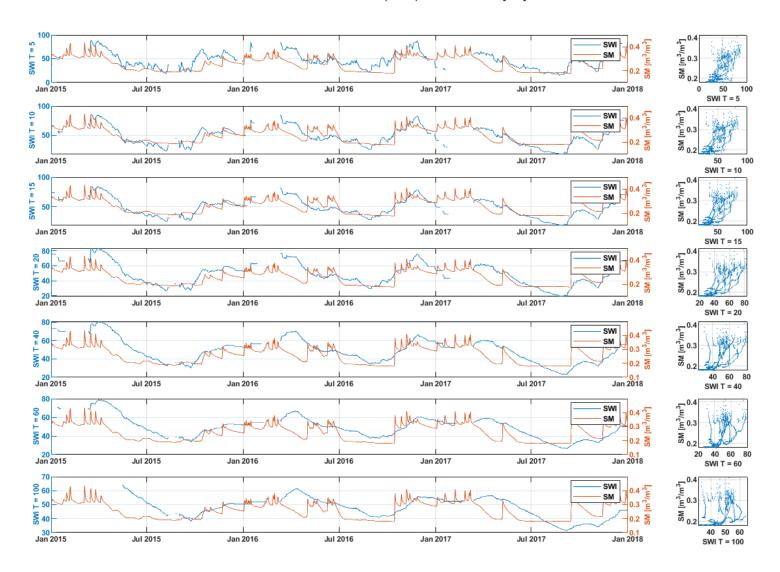
UMBRIA - Cerbara (Italia) - strato 5-15 [cm]



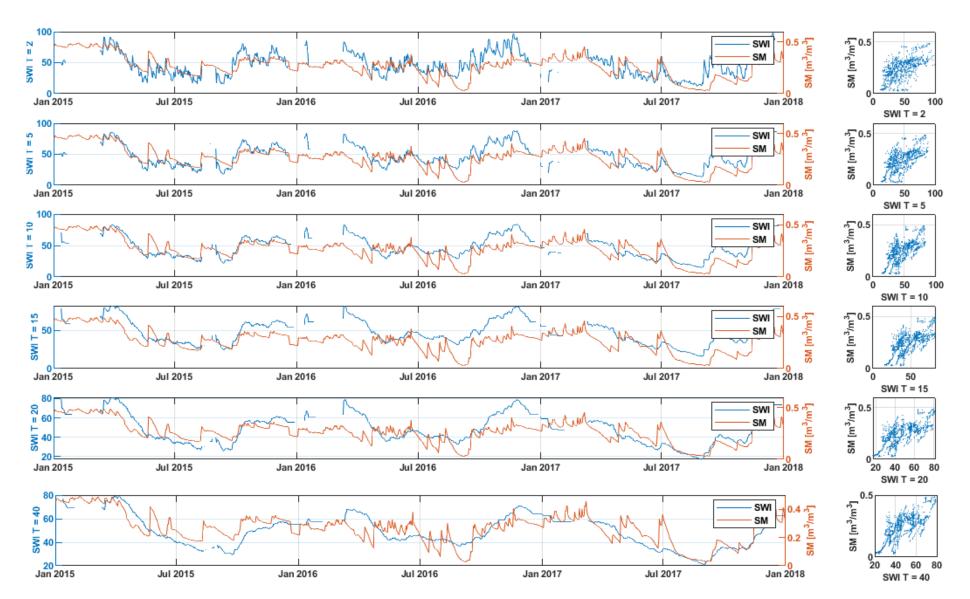
UMBRIA - Cerbara (Italia) - strato 15-25 [cm]



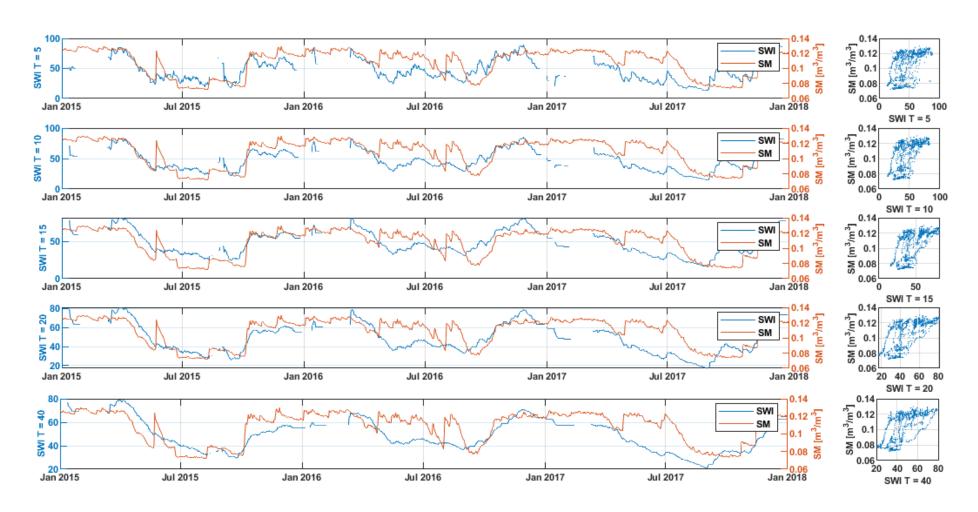
UMBRIA - Cerbara (Italia) - strato 35-45 [cm]



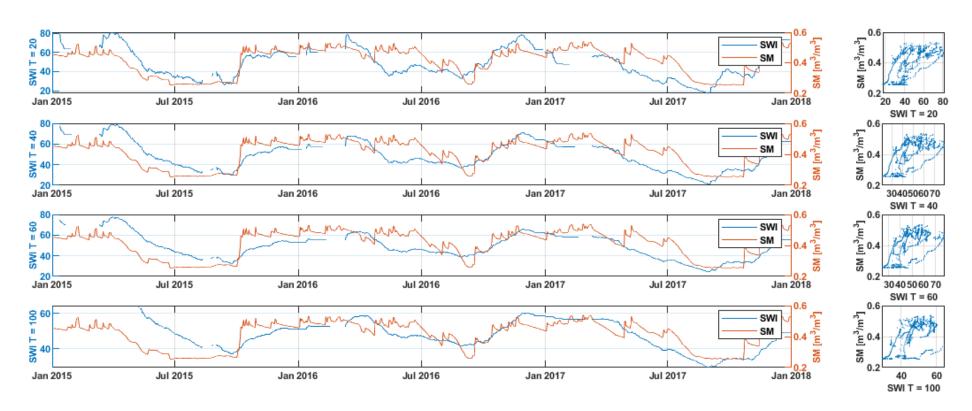
UMBRIA - Torreolmo (Italia) - strato 5-15 [cm]



UMBRIA - Torreolmo (Italia) - strato 15-25 [cm]



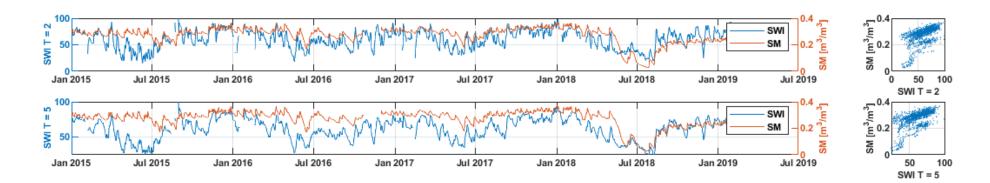
UMBRIA - Torreolmo (Italia) - strato 35-45 [cm]



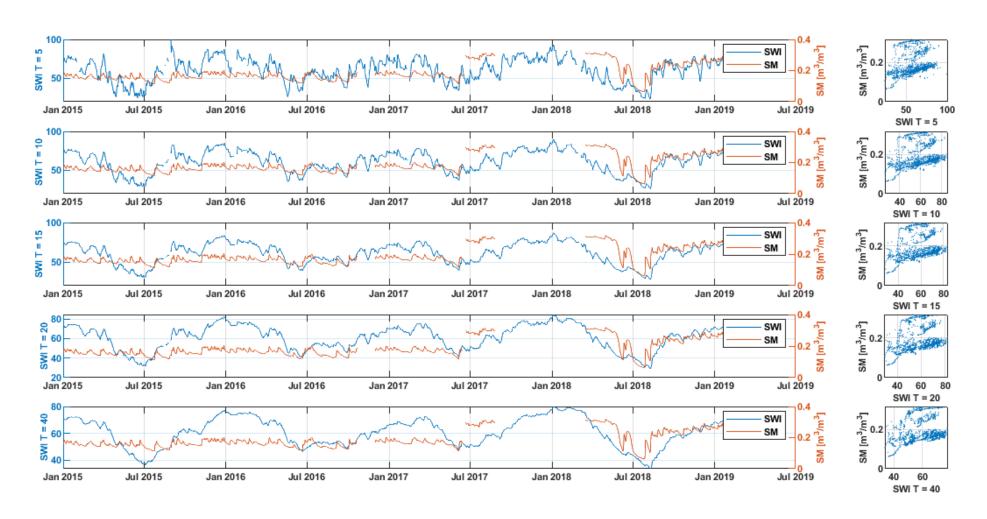
Appendice B

NETWORK: HOBE

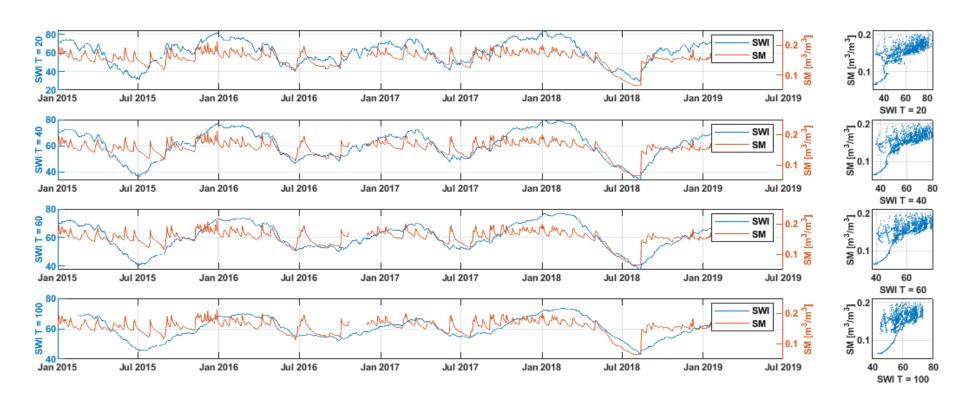
HOBE - 1.01 (Danimarca) - strato 0-5 [cm]



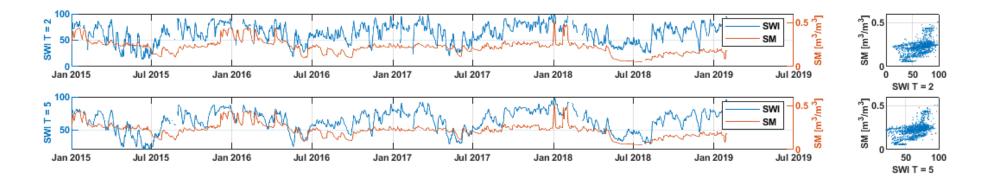
HOBE - 1.01 (Danimarca) - strato 20-25 [cm]



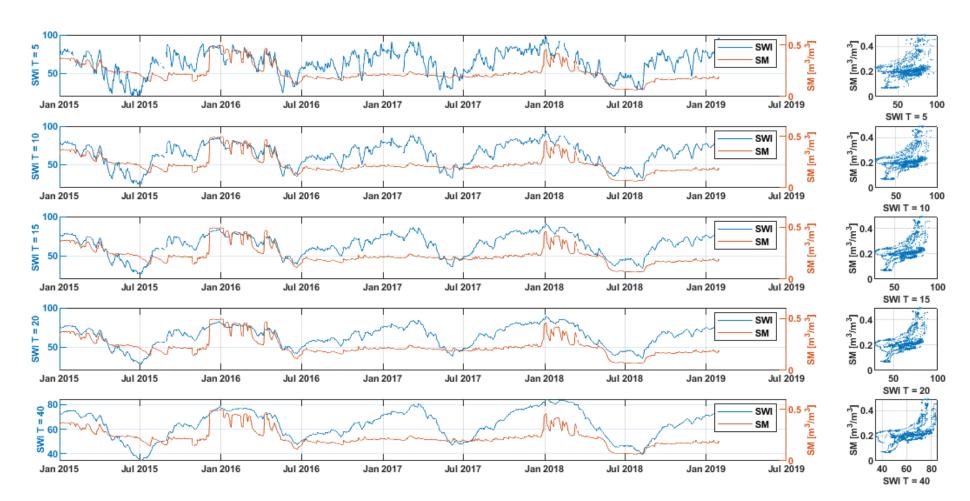
HOBE - 1.01 (Danimarca) - strato 50-55 [cm]



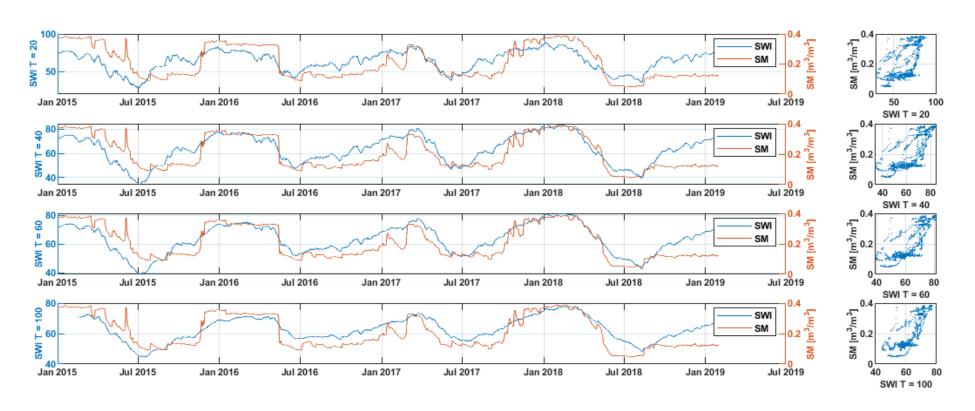
HOBE - 1.07 (Danimarca) - strato 0-5 [cm]



HOBE - 1.07 (Danimarca) - strato 20-25 [cm]



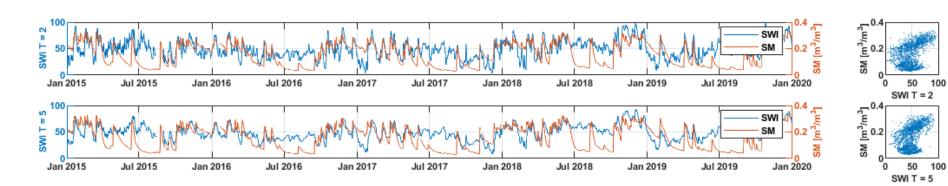
HOBE - 1.07 (Danimarca) - strato 50-55 [cm]



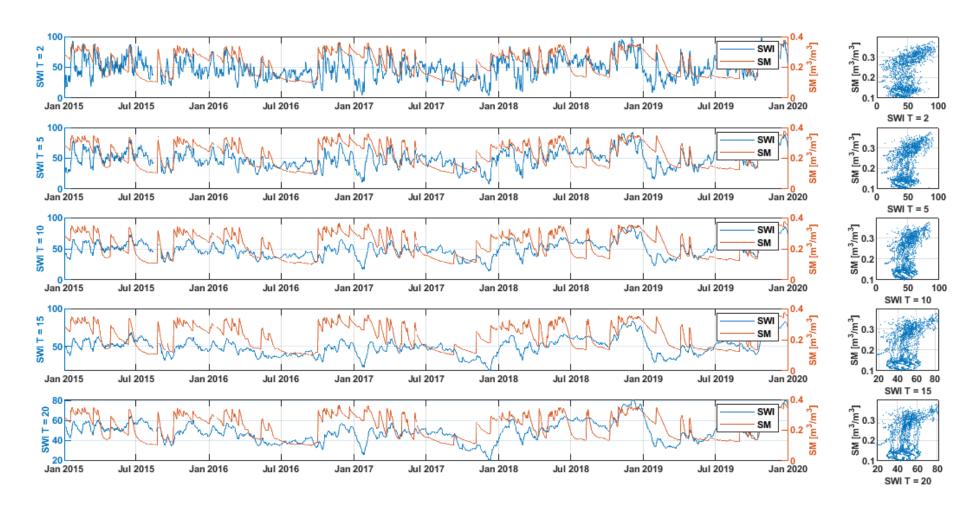
Appendice C

NETWORK: SMOSMANIA

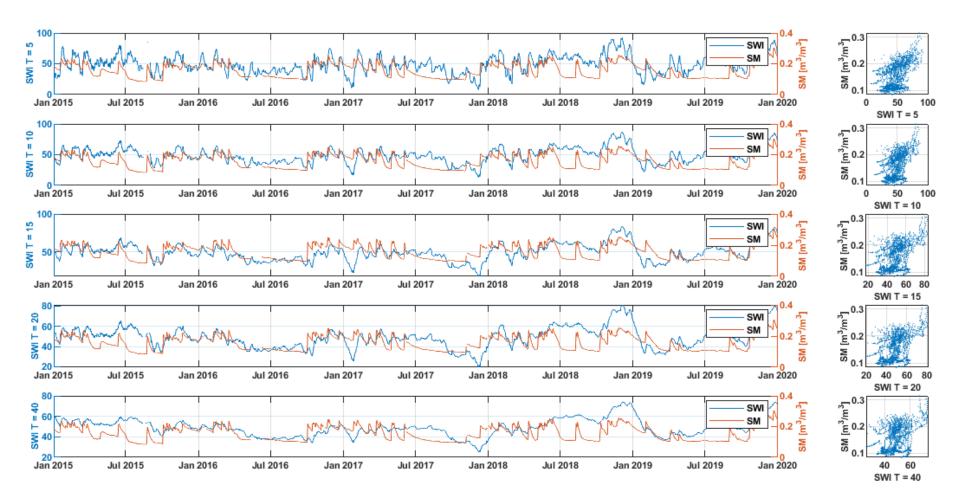
SMOSMANIA - Cabriere d'Avignon (Francia) - strato 5 [cm]



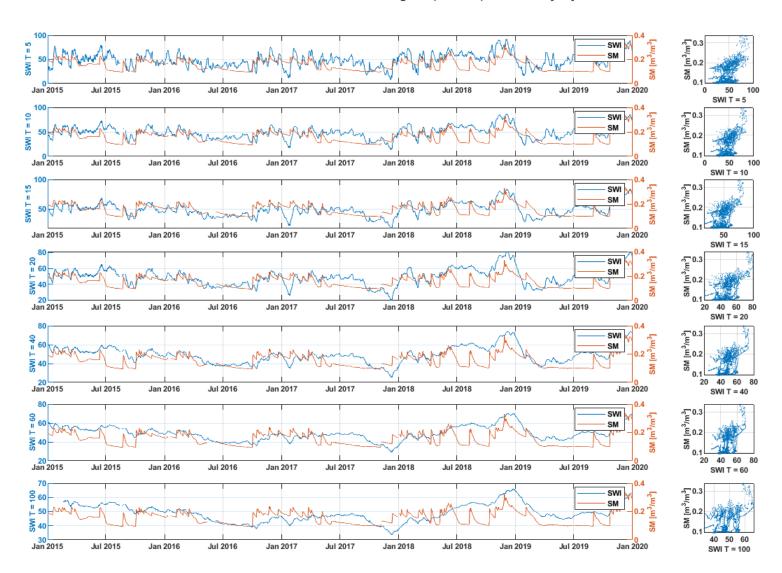
SMOSMANIA - Cabriere d'Avignon (Francia) - strato 10 [cm]



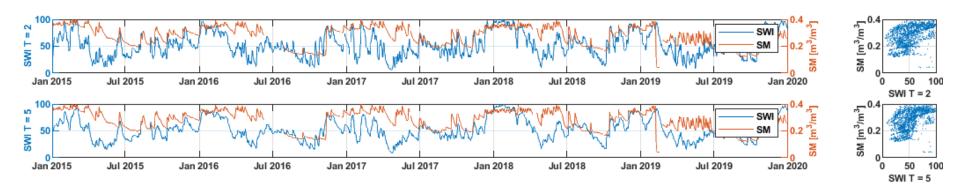
SMOSMANIA - Cabriere d'Avignon (Francia) - strato 20 [cm]



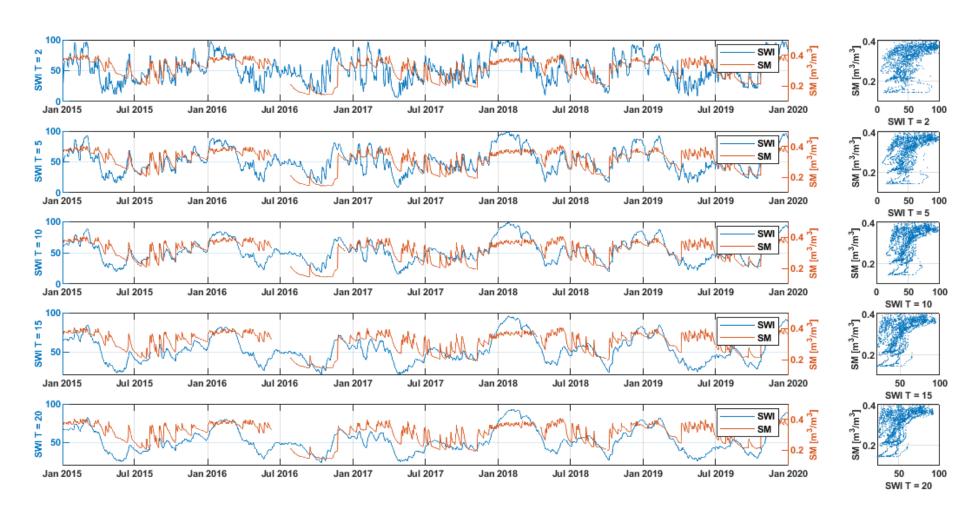
SMOSMANIA - Cabriere d'Avignon (Francia) - strato 30 [cm]



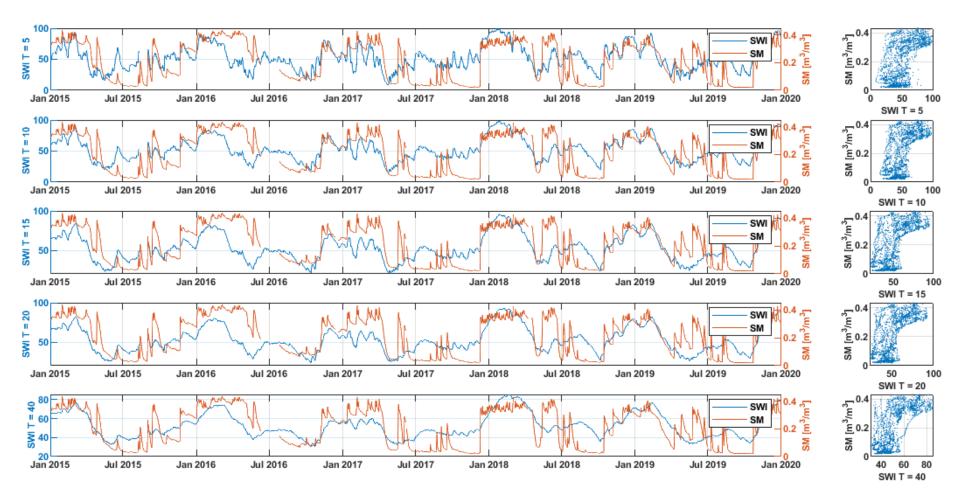
SMOSMANIA - Condom (Francia) - strato 5 [cm]



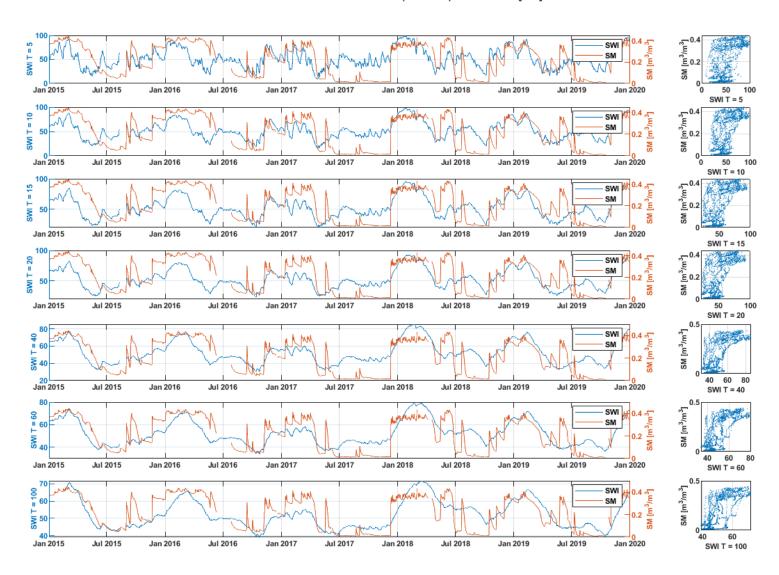
SMOSMANIA - Condom (Francia) - strato 10 [cm]



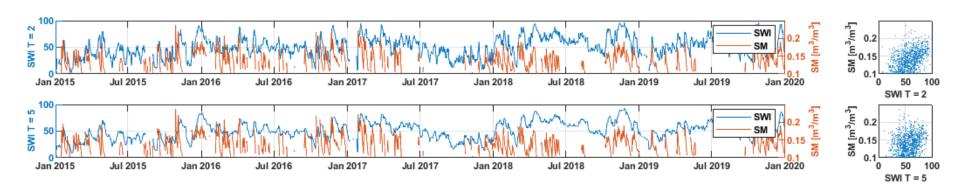
SMOSMANIA - Condom (Francia) - strato 20 [cm]



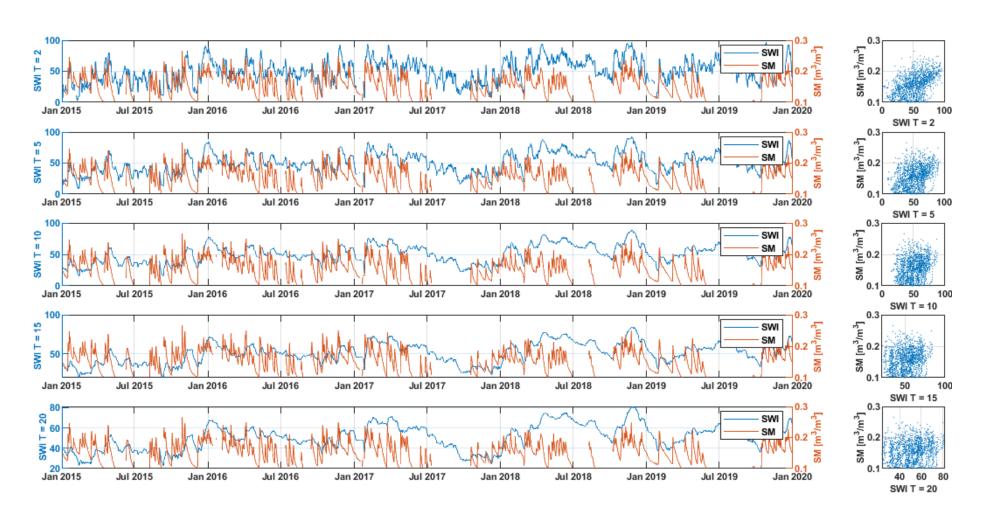
SMOSMANIA - Condom (Francia) - strato 30 [cm]



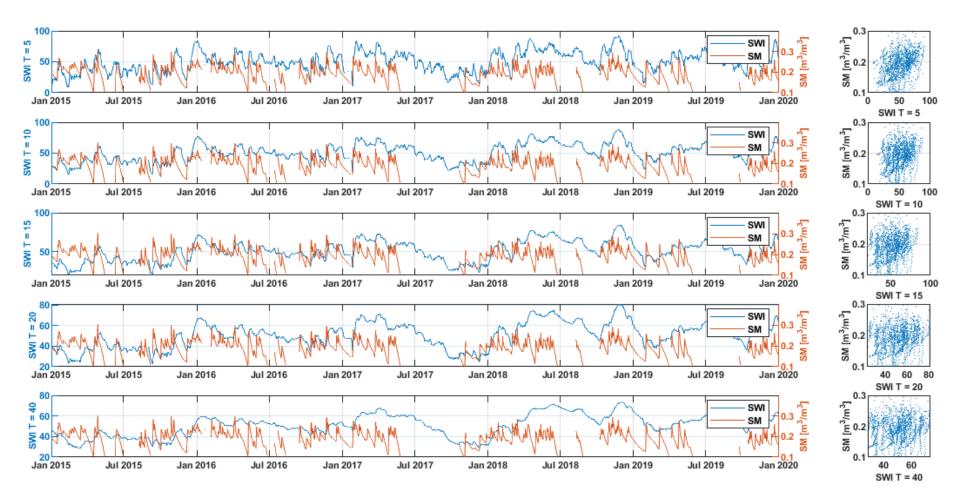
SMOSMANIA - La Grand Combe (Francia) - strato 5 [cm]



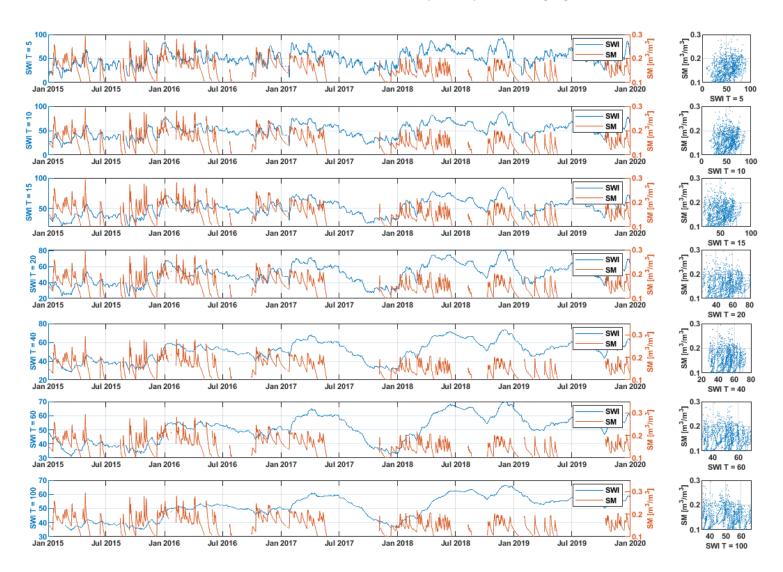
SMOSMANIA - La Grand Combe (Francia) - strato 10 [cm]



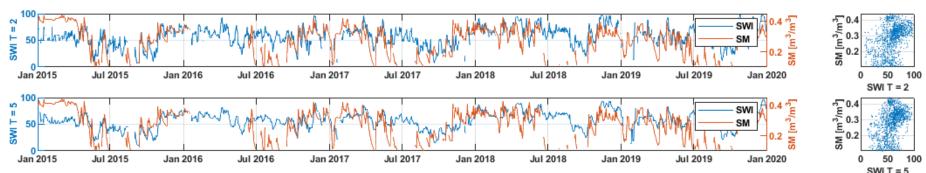
SMOSMANIA - La Grand Combe (Francia) - strato 20 [cm]

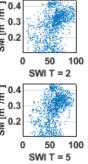


SMOSMANIA - La Grand Combe (Francia) - strato 30 [cm]

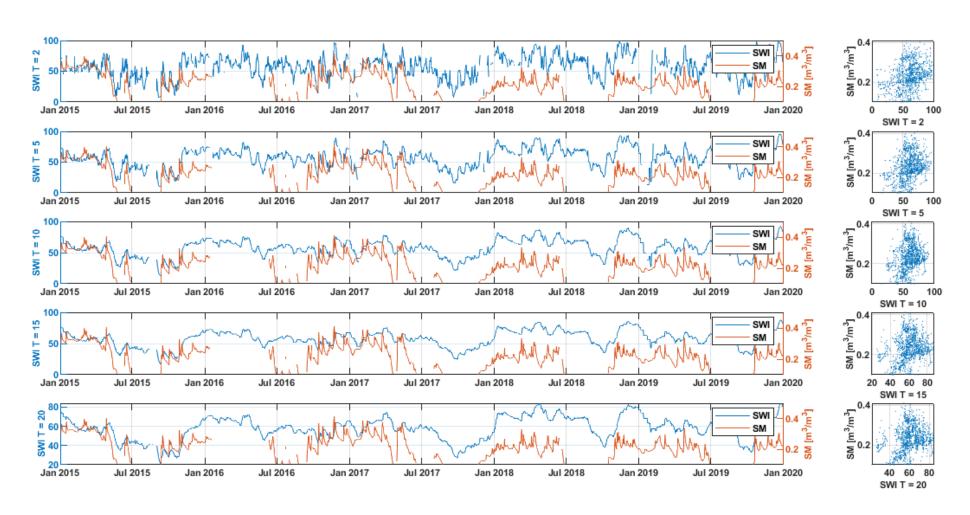


SMOSMANIA - Mazan Abbaye (Francia) - strato 5 [cm]

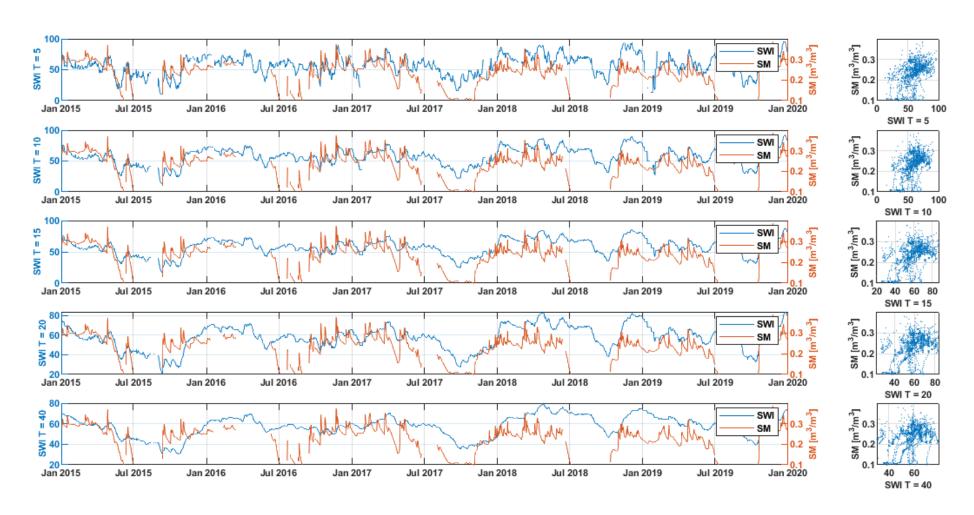




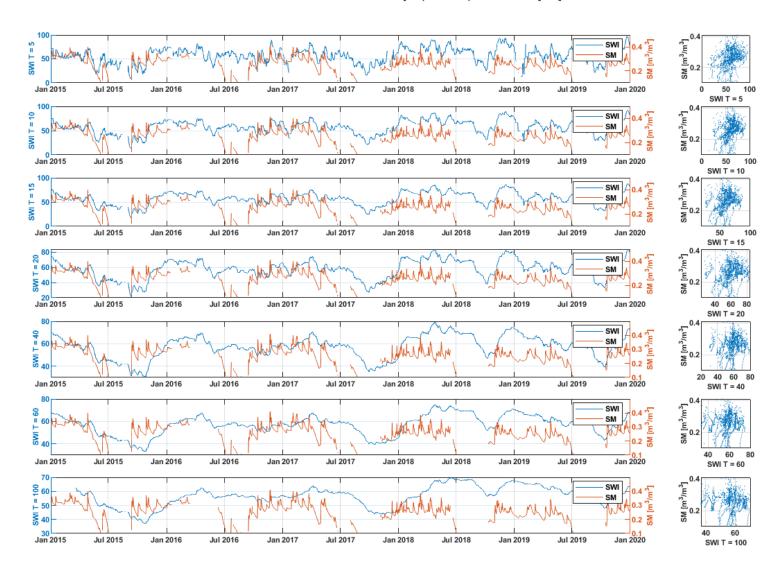
SMOSMANIA - Mazan Abbaye (Francia) - strato 10 [cm]



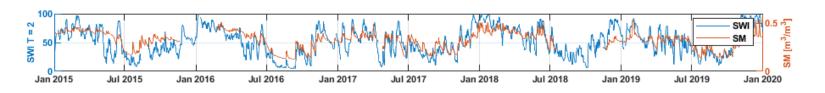
SMOSMANIA - Mazan Abbaye (Francia) - strato 20 [cm]

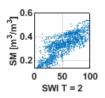


SMOSMANIA - Mazan Abbaye (Francia) - strato 30 [cm]

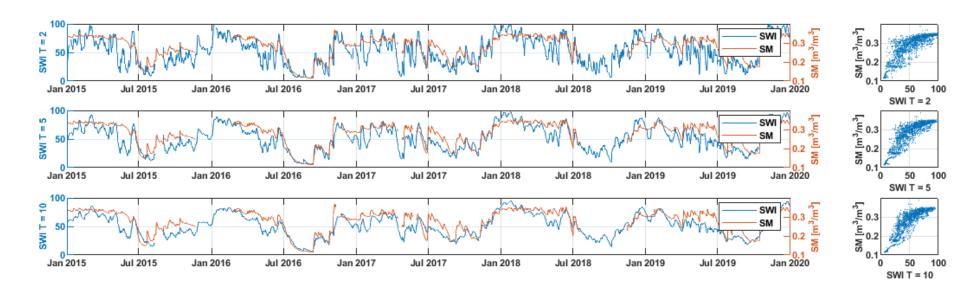


SMOSMANIA - Urgons (Francia) - strato 5 [cm]

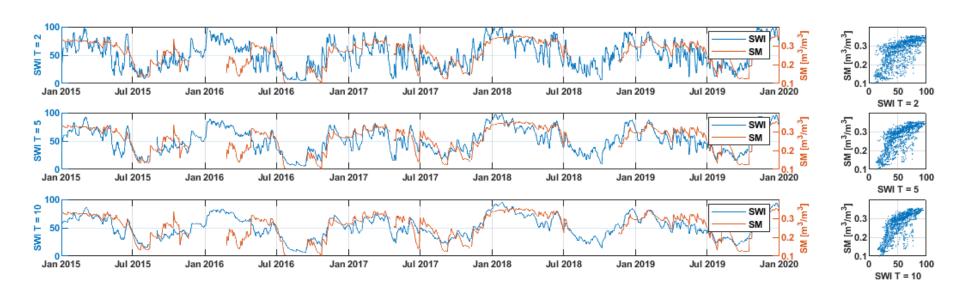




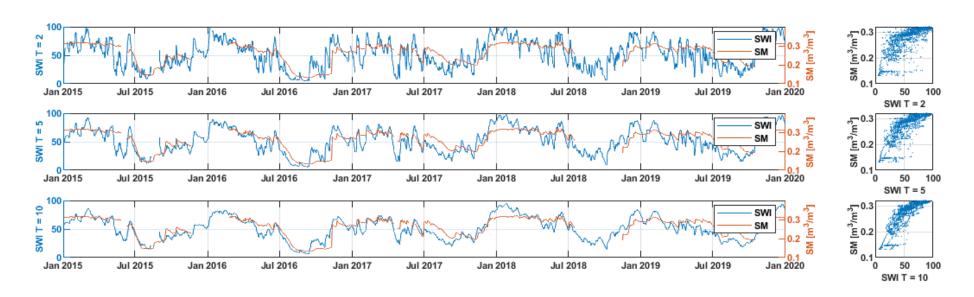
SMOSMANIA - Urgons (Francia) - strato 10 [cm]



SMOSMANIA - Urgons (Francia) - strato 20 [cm]



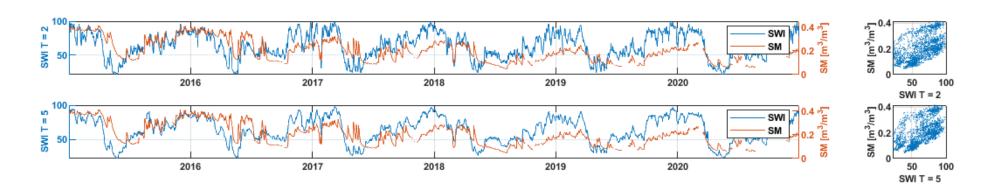
SMOSMANIA - Urgons (Francia) - strato 30 [cm]



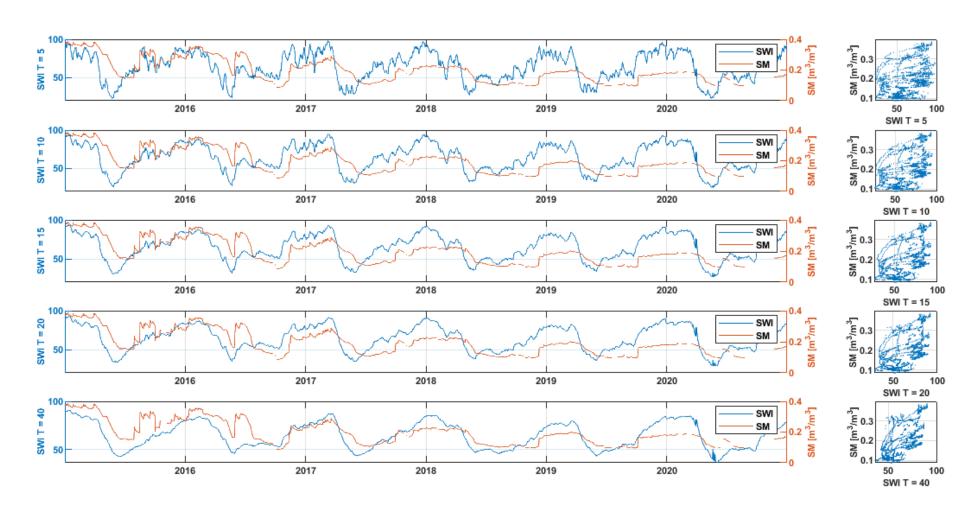
Appendice D

NETWORK: TERENO

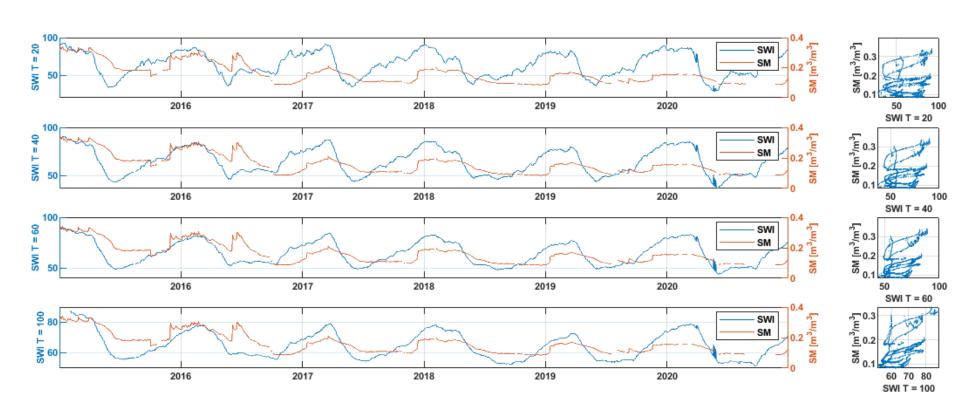
TERENO - Gevenich (Germania) - strato 5 [cm]



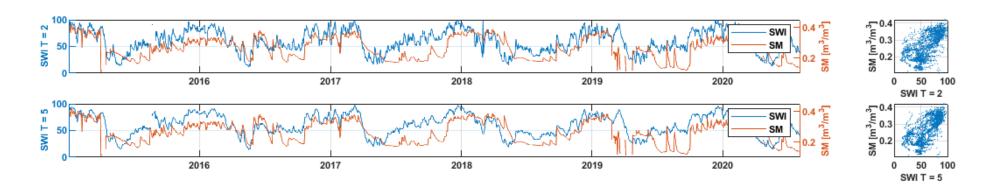
TERENO - Gevenich (Germania) - strato 20 [cm]



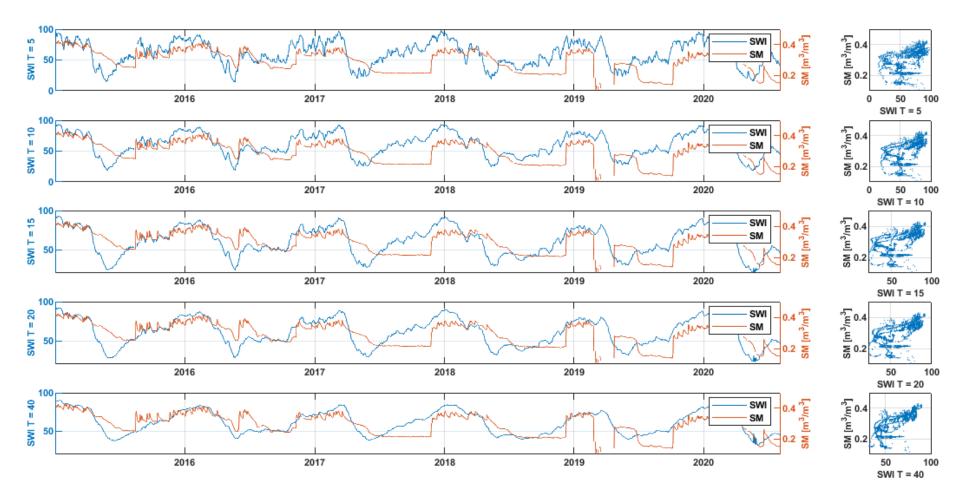
TERENO - Gevenich (Germania) - strato 50 [cm]



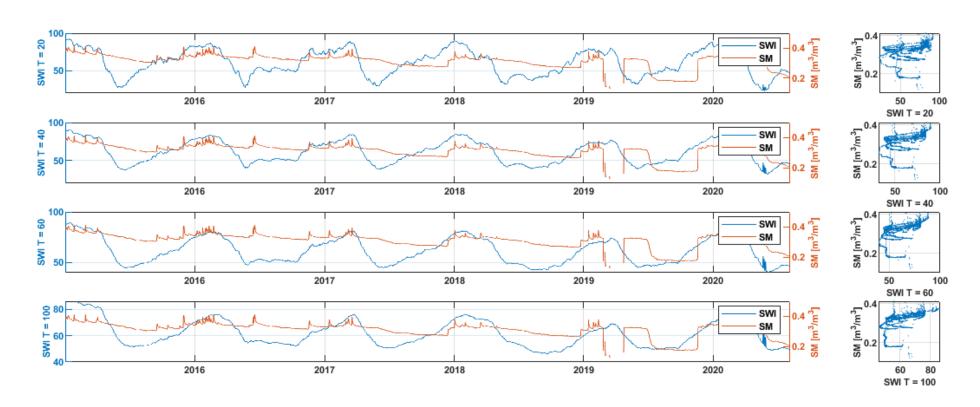
TERENO - Merzen Hausen (Germania) - strato 5 [cm]



TERENO - Merzen Hausen (Germania) - strato 20 [cm]



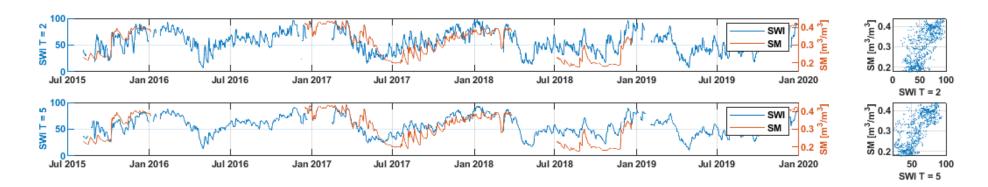
TERENO - Merzen Hausen (Germania) - strato 50 [cm]



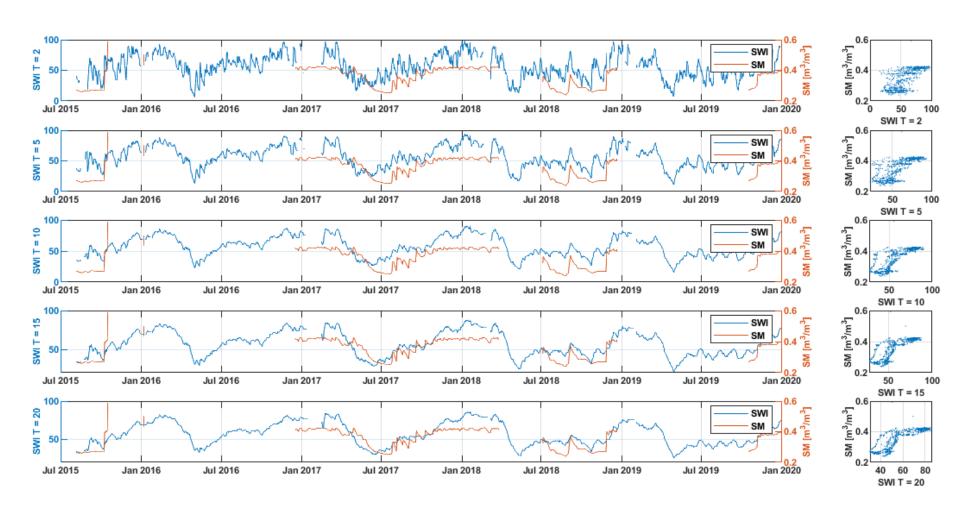
Appendice E

NETWORK: HOAL

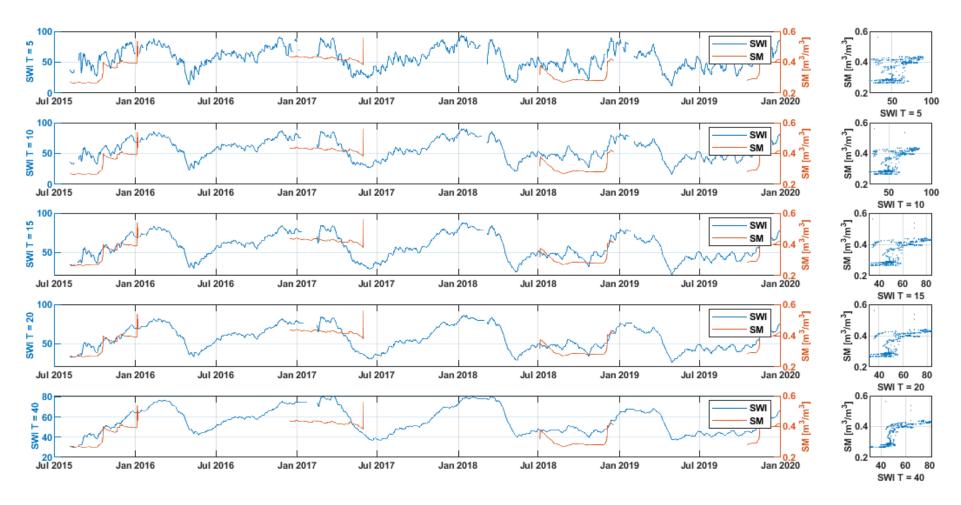
HOAL - Hoal-8 (Austria) - strato 5 [cm]



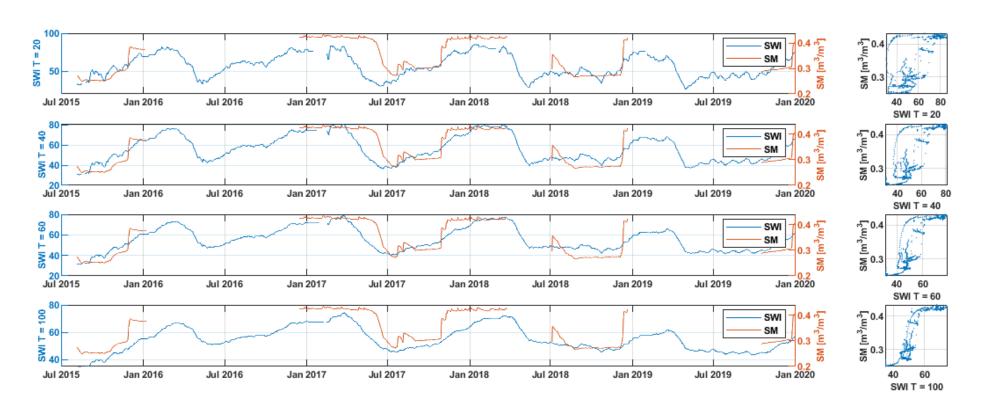
HOAL - Hoal-8 (Austria) - strato 10 [cm]



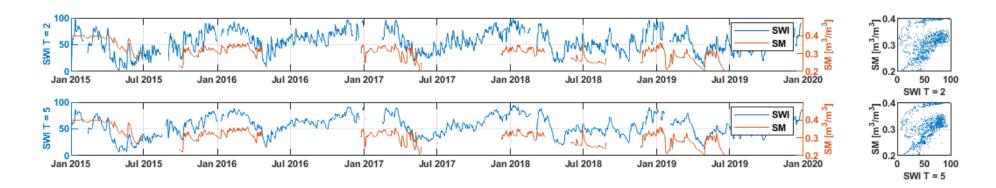
HOAL - Hoal-8 (Austria) - strato 20 [cm]



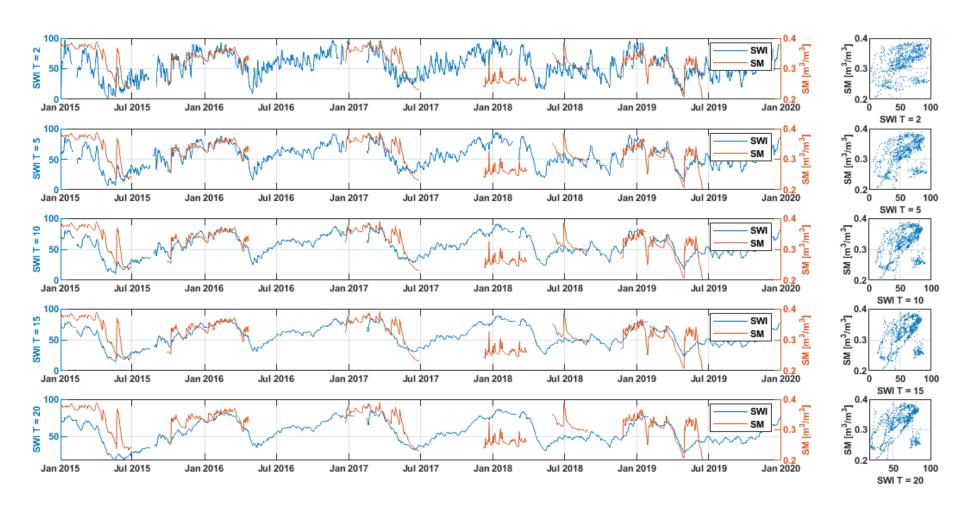
HOAL - Hoal-8 (Austria) - strato 50 [cm]



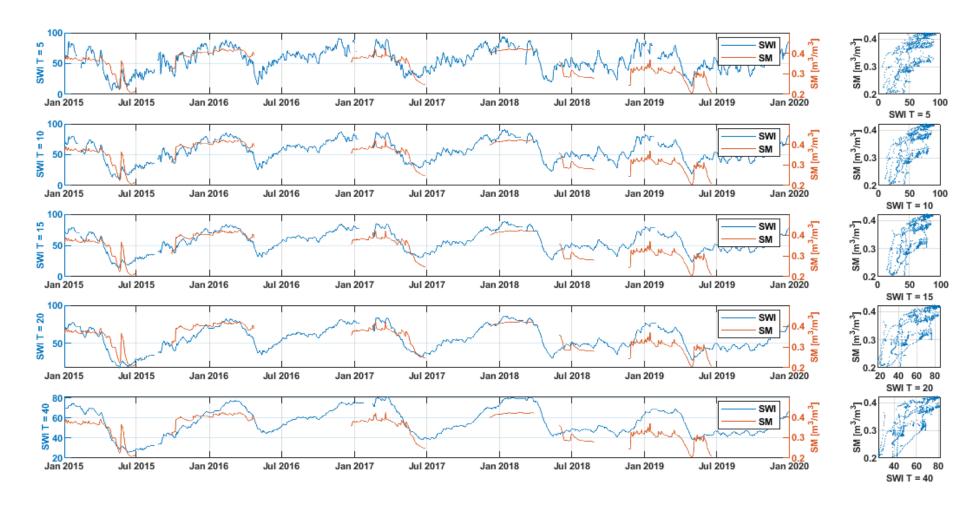
HOAL - Hoal-18 (Austria) - strato 5 [cm]



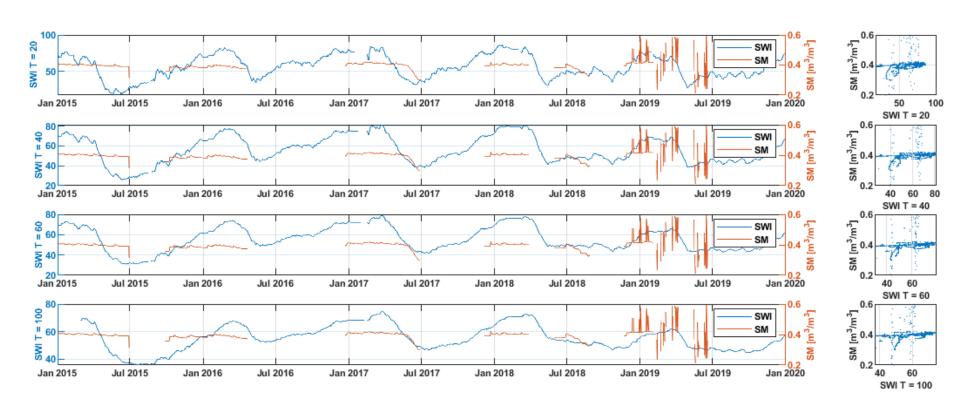
HOAL - Hoal-18 (Austria) - strato 10 [cm]



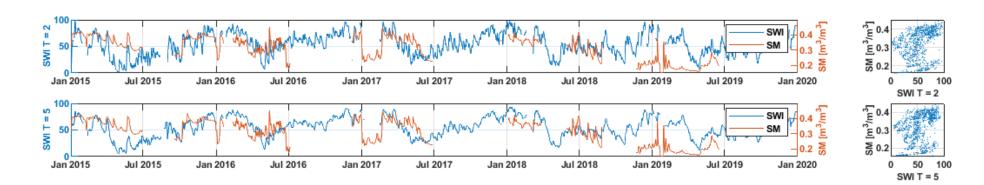
HOAL - Hoal-18 (Austria) - strato 20 [cm]



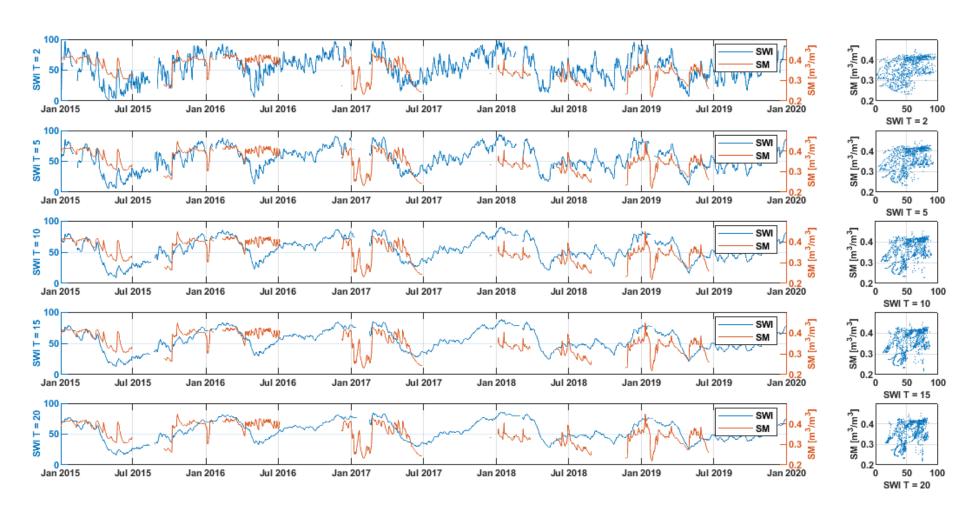
HOAL - Hoal-18 (Austria) - strato 50 [cm]



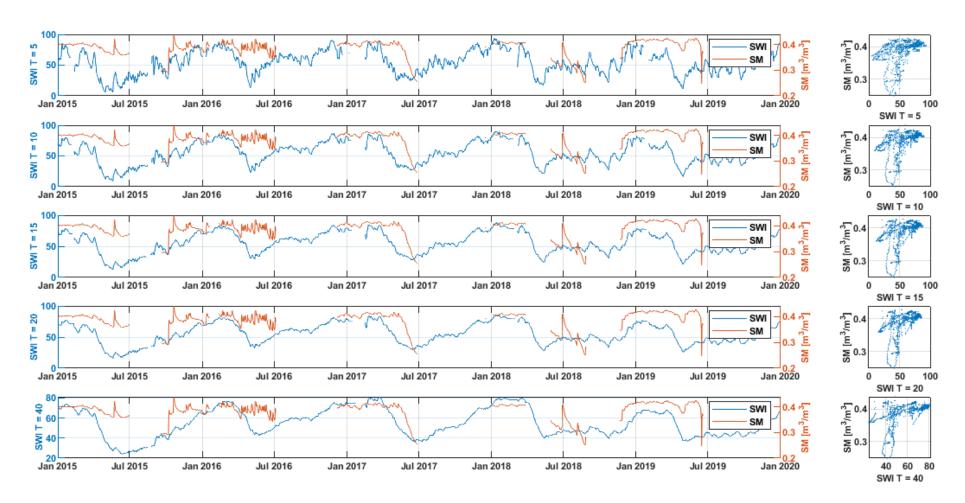
HOAL - Hoal-24 (Austria) - strato 5 [cm]



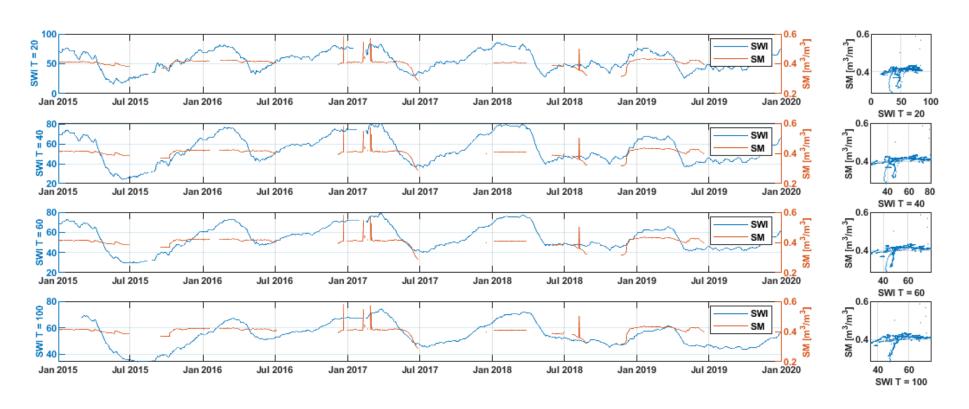
HOAL - Hoal-24 (Austria) - strato 10 [cm]



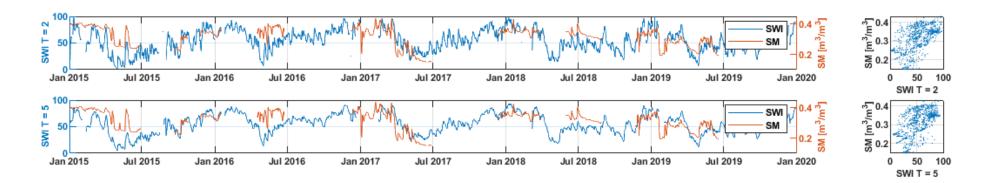
HOAL - Hoal-24 (Austria) - strato 20 [cm]



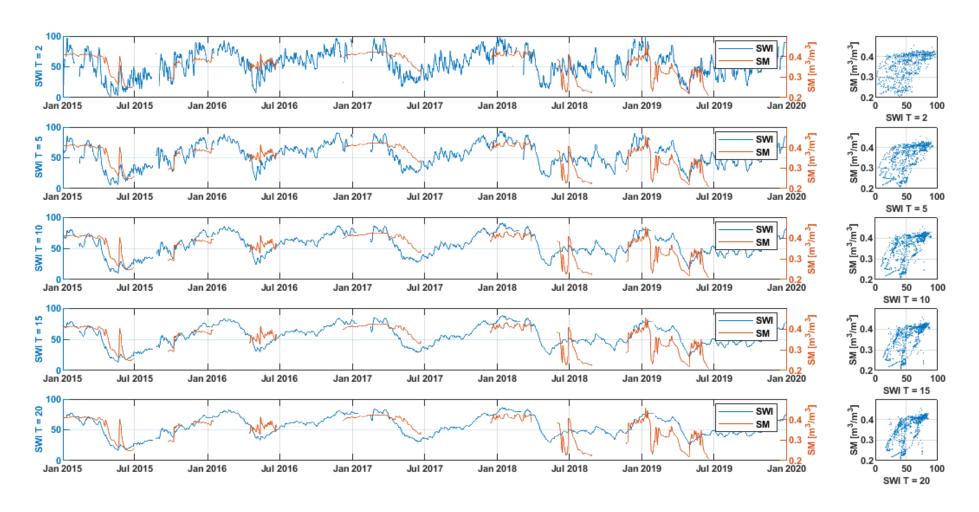
HOAL - Hoal-24 (Austria) - strato 50 [cm]



HOAL - Hoal-26 (Austria) - strato 5 [cm]



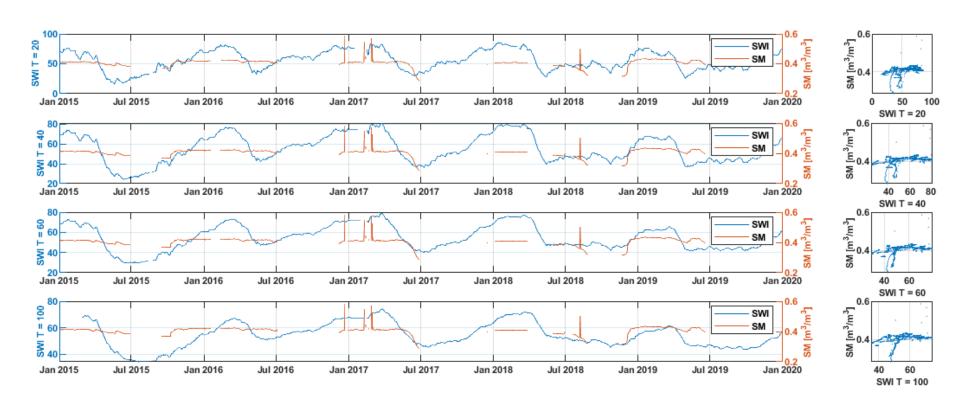
HOAL - Hoal-26 (Austria) - strato 10 [cm]



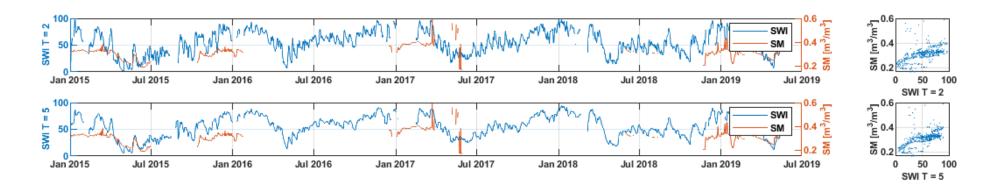
HOAL - Hoal-26 (Austria) - strato 20 [cm]



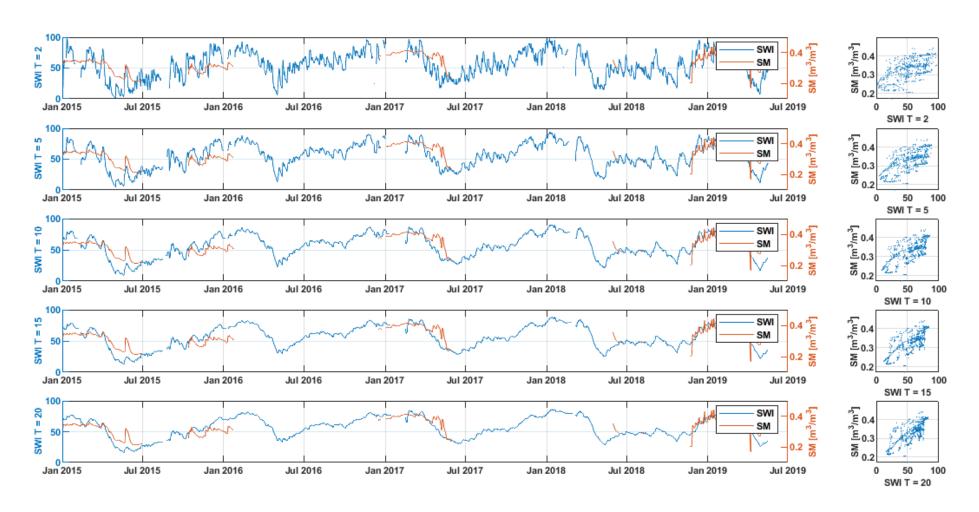
HOAL - Hoal-24 (Austria) - strato 50 [cm]



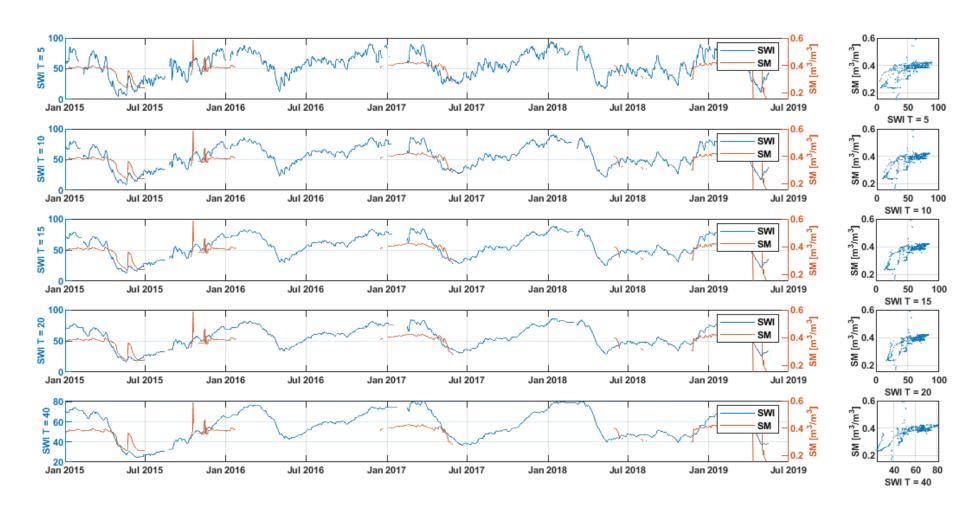
HOAL - Hoal-27 (Austria) - strato 5 [cm]



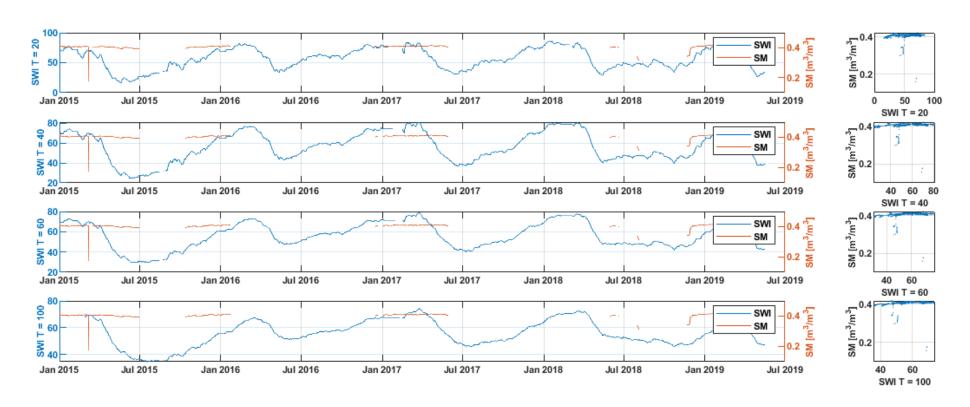
HOAL - Hoal-27 (Austria) - strato 10 [cm]



HOAL - Hoal-27 (Austria) - strato 20 [cm]



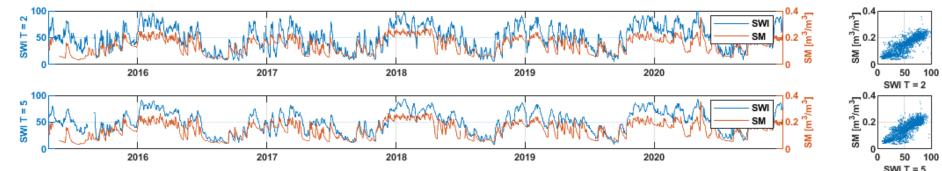
HOAL - Hoal-27 (Austria) - strato 50 [cm]

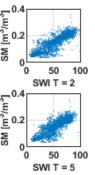


Appendice F

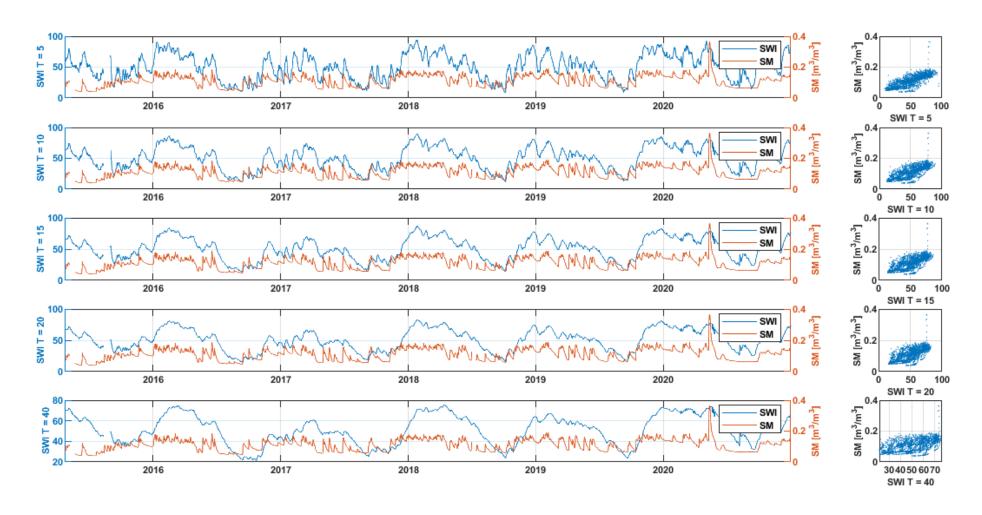
NETWORK : FR-Aqui

HILLAN - Hillan2 (Francia) - strato 5 [cm]

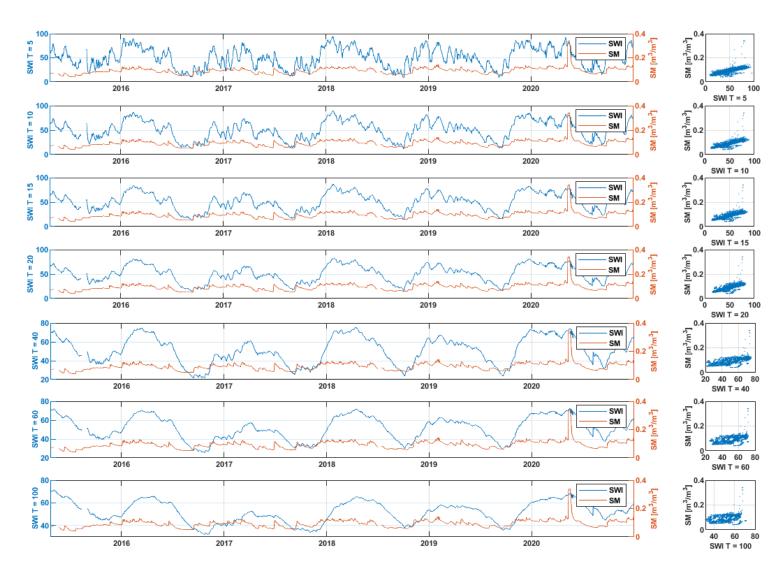




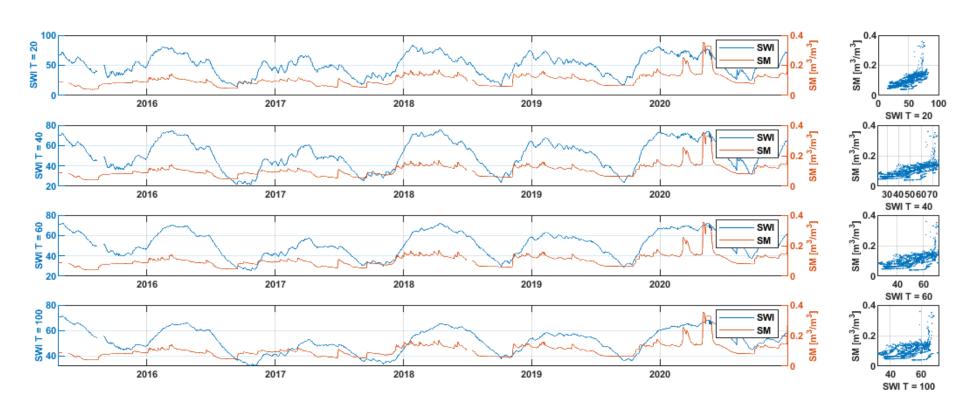
HILLAN - Hillan2 (Francia) - strato 15 [cm]



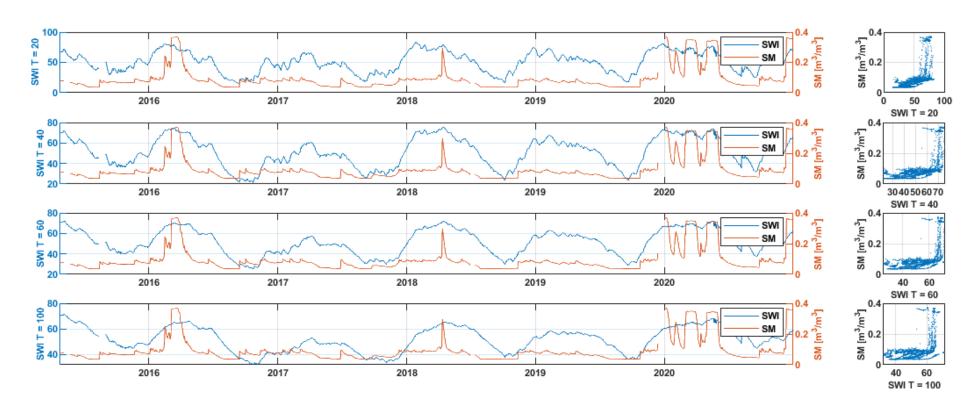
HILLAN - Hillan2 (Francia) - strato 30 [cm]



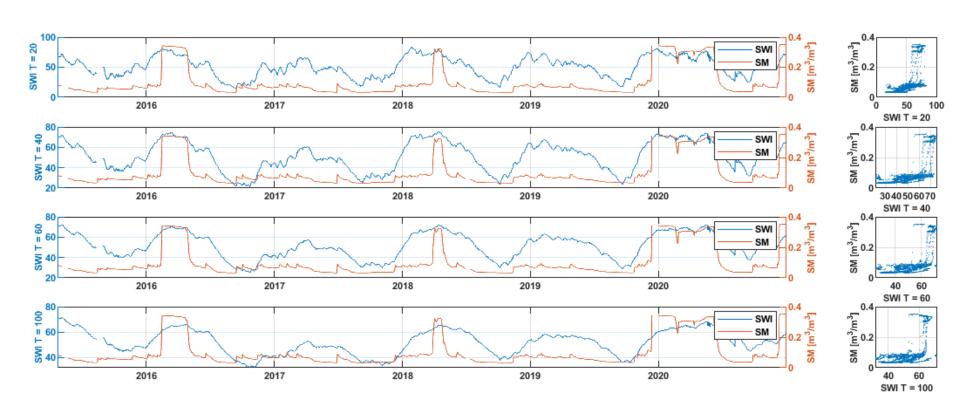
HILLAN - Hillan2 (Francia) - strato 50 [cm]



HILLAN - Hillan2 (Francia) - strato 70 [cm]



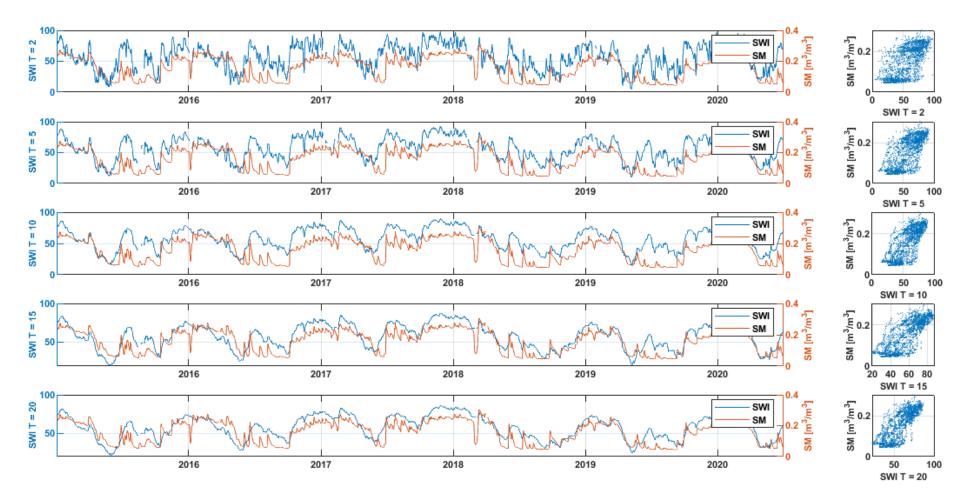
HILLAN - Hillan2 (Francia) - strato 80 [cm]



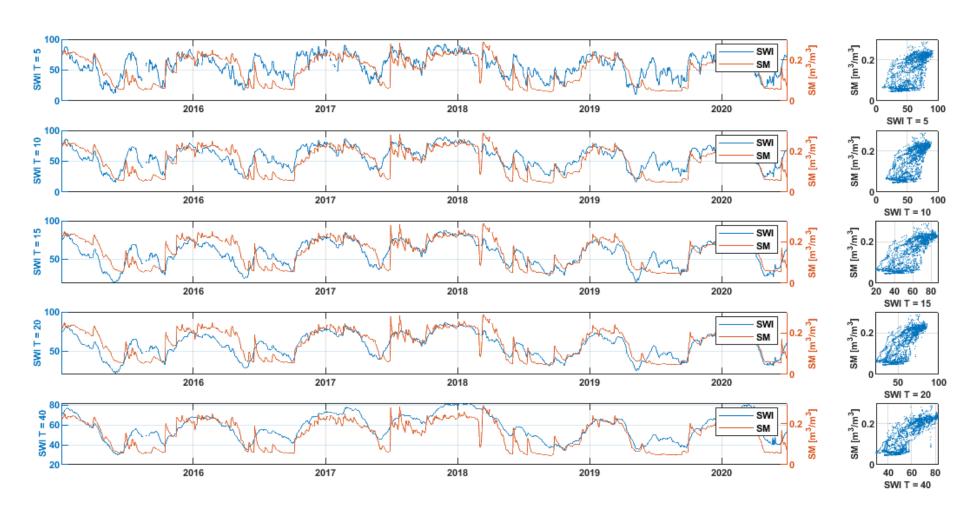
Appendice G

NETWORK: MOL-RAO

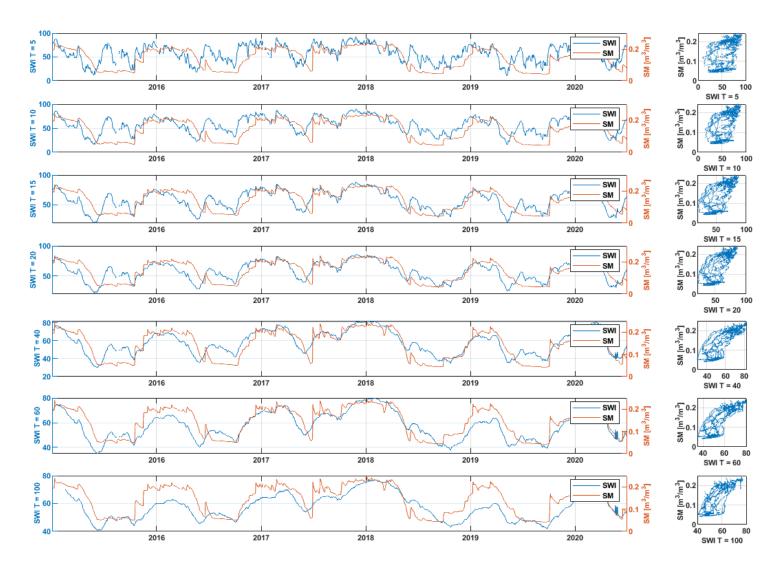
MOL-RAO - Falkenberg (Germania) - strato 8 [cm]



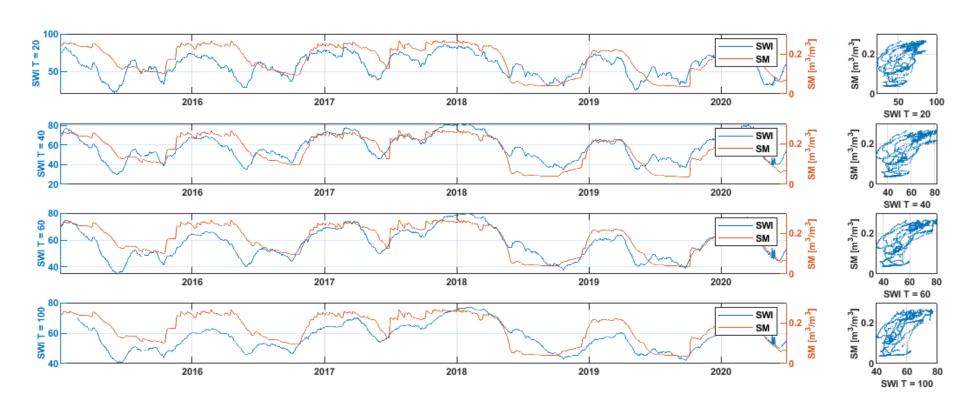
MOL-RAO - Falkenberg (Germania) - strato 15 [cm]



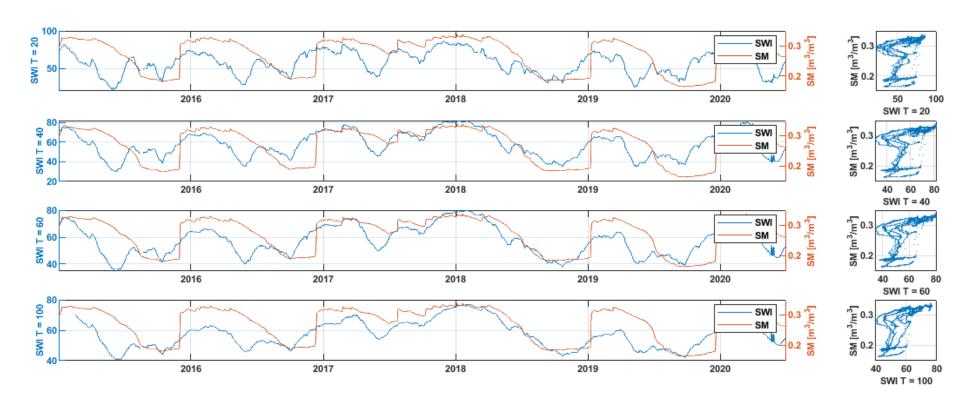
MOL-RAO - Falkenberg (Germania) - strato 30 [cm]



MOL-RAO - Falkenberg (Germania) - strato 45 [cm]



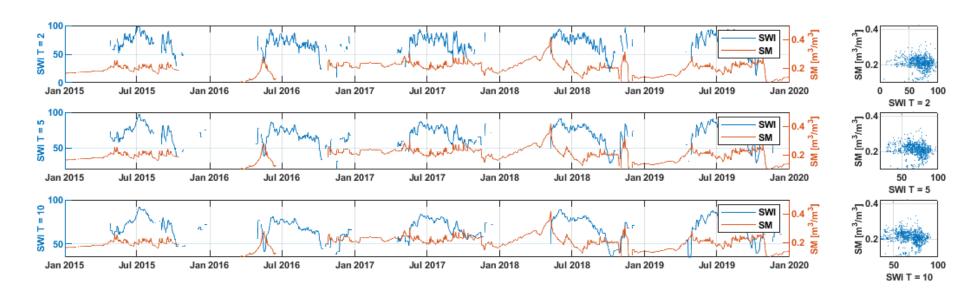
MOL-RAO - Falkenberg (Germania) - strato 90 [cm]



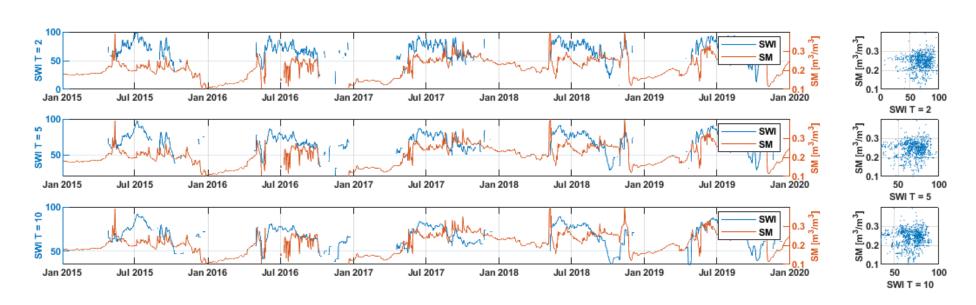
Appendice H

NETWORK: NVE

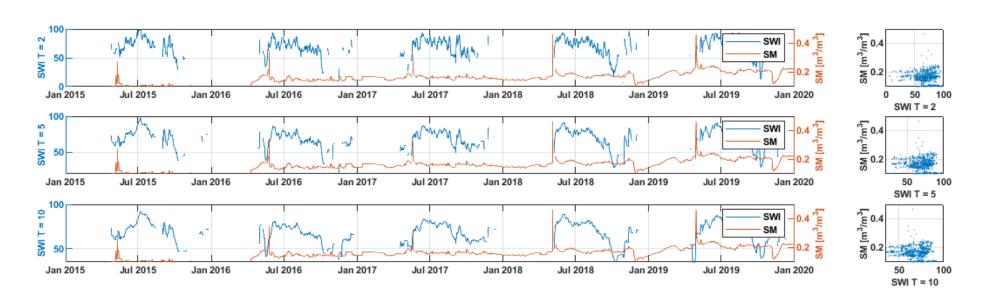
NVE - Kvarstadseter (Norvegia) - strato 10 [cm]



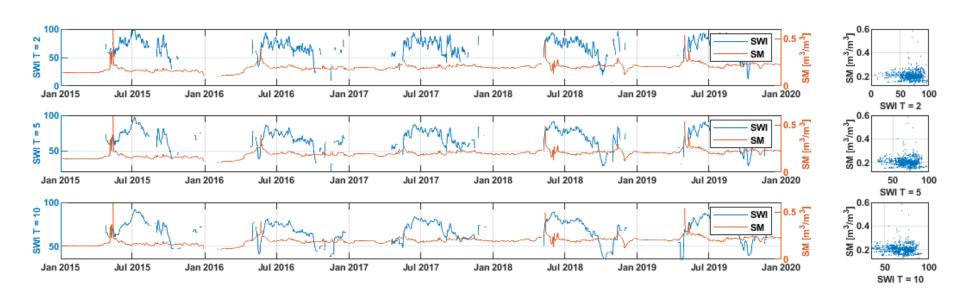
NVE - Kvarstadseter (Norvegia) - strato 20 [cm]



NVE - Kvarstadseter (Norvegia) - strato 30 [cm]



NVE - Kvarstadseter (Norvegia) - strato 40 [cm]



Ringraziamenti

Oggi, segno la fine di un capitolo della mia vita e l'inizio di un altro.

La mia carriera universitaria è stata per me una sfida in primis con me stessa, partire dal nulla senza troppe speranze ma con tanta voglia di imparare, di migliorarmi e di riuscire ad essere fiera di quello che ho fatto.

È stato un percorso in salita, con tanti momenti di sconforto e paure... ma la voglia di riscatto con in mente solo il senso del sacrificio mi ha sempre incoraggiata a portare a termini ogni mio obiettivo. Così, oggi, ho realizzato uno dei sogni che portavo nel cassetto sin da bambina e che rappresenterà la base del mio futuro. Inizierò da oggi a scrivere un altro capitolo della mia vita con una consapevolezza in più, ovvero quella che nulla è impossibile se si ha dedizione, senso del sacrificio e amore verso ciò che si fa.

Innanzitutto ringrazio il mio relatore, il professore *Rosario Ceravolo* che mi ha dato l'opportunità di lavorare con lui e per avermi fatto appassionare a dei temi per me nuovi ma così interessanti e stimolanti.

In secondo luogo, ringrazio i miei correlatori, Gaetano, Giorgia e Stefania, che sono risultati per me delle figure fondamentali in questo percorso. Ho ammirato la loro professionalità, la loro passione verso il lavoro che svolgono e la grande empatia verso i propri tesisti, pronti sempre a tendere la mano e a comprenderli. Grazie.

L'obiettivo raggiunto lo devo principalmente alla mia famiglia.

I *miei genitori* mi hanno dato la grande opportunità di poter studiare, ciò che per loro non è stato possibile; senza alcuna costrizione, mi hanno trasmesso sin da bambina il grande senso del dovere, ripetendomi che nella vita nulla viene regalato, ma tutto deve essere sudato solo con le proprie forze.

Io, tutto questo, l'ho fatto in particolare per loro, per poter far vivere una grande gioia, per dare loro felicità e soddisfazione nel vedere la propria figlia puntare un obiettivo e combattere per averlo, così come loro hanno fatto nella loro vita.

Mi hanno sempre incoraggiata ma senza mai cullarmi, quasi per preparami alla vita reale, che non guarda in faccia nessuno e io questo l'ho capito grazie a loro, ed è per questo che non smetterò mai di ringraziarli e tutto quello che farò da ora in poi sarà sempre con riconoscenza, con lo scopo di ripagare la vita che mi hanno dato.

Ringrazio mio fratello Antonio per quella che sono... perché con un fratello così io non me la sono mai sentita di abbassare l'asticella. Tu per me sei il modello da seguire, tutto quello che io vorrei essere in futuro. Una persona dritta, decisa, professionale, dedita al dovere ma allo stesso tempo buona verso gli altri. Anche se lontani io ti sento sempre vicino a me, perché sei una parte di me ora e sempre.

Un grazie speciale va ai miei stupendi *nonni*, che amo alla follia. Voglio ringraziarli innanzitutto per avermi dato un padre così, perché io non sarei questa se loro non fossero stati i genitori che sono stati. Li ringrazio per l'amore che mi hanno dato anche in questi anni lontana da loro, l'incoraggiamento della mia nonna ogni volta che mi vedeva giù. Per tutte le volte che mi hanno fatto capire che sono tanto tanto fieri della nipote che hanno, dicendomi sempre che prima o poi le cose negative smetteranno di prevalere e che qualcosa di tanto bello accadrà per ripagare tutti i sacrifici fatti. Grazie.

Un grazie immenso va alla mie amiche.

Stefania la mia certezza, la mia àncora di salvezza nei momenti più bui. Io e te siamo diverse ma tanto simili e proprio grazie a questo ogni tua parola per me è sempre stata un rifugio sicuro, ogni tuo incoraggiamento per me è stato fondamentale... ma soprattutto, ti ringrazio per avermi ricordato costantemente che sei orgogliosa di me anche quando ero io la prima a non esserlo.

Martina, io e te è come se fossimo nate per mano, e tu quella mano non l'hai mai lasciata andare. Ti ringrazio per esserci stata in ogni attimo della mia vita, in ogni mia gioia e in ogni mia tristezza. Sei sempre stata in prima fila ad incoraggiarmi e a spronarmi a credere in me stessa. Sei per me 25 anni di puro amore...

Chiara, la mia Chiuri, ti ringrazio per essere stata una figura costante e presente in ogni mia giornata, per esserti impegnata a comprendere ogni mio stato d'animo e per aver avuto sempre la giusta parola per sollevarmi su. Questo mi ha aiutata a non sentirmi mai realmente lontana da casa, perché la consapevolezza di non essere mai sola è qualcosa di impagabile.

Un ringraziamento super speciale va al mio *Emanuele*. La mia carriera universitaria non sarebbe mai stata così se tu non fossi stato accanto a me. Negli ultimi anni a Torino ho capito una cosa, io e te è come se fossimo stati scelti, destinati a condividere questo percorso insieme, perché siamo simili, cresciuti allo stesso modo, con gli stessi valori e con la stessa fame di riscatto.

Anche se le nostre strade per ora si sono separate io ci sarò sempre per te, grazie amico mio.

Ringrazio le mie super coinquiline, Luisa e Silvia che mi hanno vista gioire ma anche impazzire, e che hanno reso i miei giorni lontana dalla mia terra meno tristi. Sono fortunata ad avervi incontrate e ad aver condiviso queste emozioni con voi. Spero di essere stata per voi una spalla così come lo siete state voi per me. Grazie.

Ringrazio la mia famiglia torinese, Assuntina, Salvatore, Giulia, Alessandro, che mi hanno fatta sentire parte della loro famiglia, mi hanno accolta con grande affetto e amore per farmi sentire a casa, sempre. Grazie.

Un enorme grazie va a tutto il resto della *mia famiglia*, che anche se non è potuta essere accanto a me in questo giorno per me importante in realtà lo era, perché nel mio cuore erano tutti vicino a me per condividere questo traguardo, che loro sanno essere stato per me tanto desiderato.

Questo giorno lo voglio dedicare anche alla *mia terra*, che ho salutato lasciandole un pezzo di cuore, perché proprio grazie al posto in cui sono cresciuta sono quella di oggi. Una terra bellissima, che ti accoglie e non vorrebbe mai lasciarti andare, e questo peso io l'ho provato e sempre lo proverò perché io sento di appartenerle come il mare, piena di onde, tortuosa, imprevedibile, ma libera... spero un giorno di riaverti e se così non fosse tu apparterrai per sempre a me.

Infine, un pensiero speciale va a chi non c'è più ma sono convinta sarebbero stati orgogliosi di me.

Marta.