



POLITECNICO DI TORINO

Laurea magistrale in Ingegneria Civile

Tesi Magistrale

Studio della correlazione tra dati
satellitari del programma europeo
Copernicus e quelli registrati dai
sistemi di monitoraggio installati su
edifici monumentali

Relatore:

prof. Ing. Rosario CERAVOLO

Candidata:

Stefania COCCIMIGLIO

Correlatori:

Ing. Giorgia COLETTA

Ing. Gaetano MIRAGLIA

LUGLIO 2020

Non esiste vento favorevole per il
marinaio che non sa dove andare.
(Lucio Anneo Seneca)

*Ai miei genitori
e a mia sorella Mariacristina.*

Sommario

Una delle questioni più discusse nell'ambito del monitoraggio delle opere civili e monumentali è il rapporto tra il terreno di fondazione e la costruzione. Spesso, infatti, la mancanza di informazioni sull'interazione suolo-struttura può generare delle difficoltà nella definizione di una corretta diagnosi della salute strutturale. In questi casi, i dati ottenuti da telerilevamento satellitare potrebbero rappresentare un valido strumento per la conoscenza del terreno, soprattutto quando i dati provenienti da indagini standard quali quelle in situ, sono limitati o del tutto assenti.

In questo lavoro di tesi viene presentato un primo studio dei dati satellitari allo scopo di monitoraggio strutturale. Il caso studio è rappresentato dal Santuario di Vicoforte, opera tra le principali del barocco piemontese, anche per la sua imponente cupola ovale, che è la più grande al mondo, il quale è stato spesso oggetto di studi finalizzati alla sua salvaguardia. I sistemi di monitoraggio strutturale statico e dinamico dell'opera, entrambi permanenti, e 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.

I dati satellitari fanno parte del programma europeo Copernicus dell'ESA (*European Space Agency*) per il monitoraggio ambientale; in particolare, per il monitoraggio strutturale, si è ricorso ai dati di *Land Surface Temperature* (LST) per lo studio della temperatura superficiale del terreno e ai dati di *Soil Water Index* (SWI) per lo studio delle condizioni di umidità del suolo in profondità.

Esaminati e processati tramite appropriate tecniche dell'analisi dei segnali, i dati satellitari sono stati oggetto di uno studio statistico sistematico. L'incrocio di queste informazioni con quelle misurate direttamente in situ (frequenze naturali, temperatura ambientale e parametri del terreno), all'interno di diverse rappresentazioni statistiche e il calcolo di indici significativi, ha permesso di arrivare a delle considerazioni oggettive sul sistema studiato e sugli stessi dati satellitari, che potrebbero essere alla base di un miglioramento della percezione globale di un sistema monitorato.

Abstract

One of the most discussed issues in the monitoring of civil and monumental buildings is the relationship between the foundation soil and the construction. In fact, the lack of information on soil-structure interaction can often generate difficulties in the definition of a correct diagnosis of structural health. In these cases, the data obtained from satellite remote sensing could represent a valuable tool for soil knowledge, especially when data from standard surveys such as those in situ are limited or completely absent.

A first study of satellite data for the purpose of structural monitoring is presented in this work of thesis. The case study is the Sanctuary of Vicoforte. Among the main baroque buildings in Piedmont, also for its oval dome, which is the largest in the world, the Sanctuary of Vicoforte has often been the subject of studies aimed at its preservation. The static and dynamic structural monitoring systems of the building, both permanent, and geotechnical and geophysical investigations of the underlying soil have allowed an integral view of the system as a whole, to which has been added the satellite point of view.

Satellite data come from Copernicus European program of ESA (European Space Agency) for environmental monitoring. In particular, for structural monitoring, Land Surface Temperature (LST) data are used to study soil surface temperature and Soil Water Index (SWI) data to study soil the moisture condition at various depths.

The satellite data have been examined and processed using appropriate signal analysis techniques and have been subjected to a systematic statistical study. Combining this information with those measured directly in situ (natural frequencies, ambient temperature and soil parameters) within different statistical representations and the calculation of significant indices, it has been possible to clarify the aspects that link remotely monitored variables with environmental variables and dynamical parameters, specific to the structure, measured or extracted from in situ data, all in order to propose the use of satellite data defined on multiple bands to improve the effectiveness of on-site monitoring systems.

Indice

Elenco delle figure	VIII
Elenco delle tabelle	XI
1 Introduzione	1
1.1 Struttura della tesi	2
2 Il Santuario di Vicoforte	5
2.1 Evoluzione dei cedimenti	7
2.2 Caratterizzazione geotecnica e geofisica del terreno	9
2.2.1 Campagna di indagine 1976	11
2.2.2 Campagna di indagine 2004	13
2.2.3 Campagna di indagine 2008	16
2.3 Riepilogo risultati delle campagne di indagine	19
3 Dati satellitari	21
3.1 Land Surface Temperature (LST)	21
3.2 Soil Water Index (SWI)	28
4 Analisi ed elaborazione dei dati satellitari	39
4.1 Studio di correlazione LST e SWI	39
4.2 Scelta di SWI(T)	59
4.3 Involuppo dei dati di LST	62
4.4 Relazione LST-SWI	66
5 Studio di autocorrelazione di LST e SWI	69
6 Temperatura ambientale e frequenze	77
6.1 Studio di correlazione LST,temperatura ambientale e frequenze . . .	77
6.2 Studio di correlazione SWI,temperatura ambientale e frequenze . . .	82
7 Risultati e discussione	89

8 Conclusioni	91
Bibliografia	93

Elenco delle figure

2.1	Santuario di Vicoforte e cupola ovale	5
2.2	Diagrammi assonometrici degli strati di marna e limo-argilloso	6
2.3	Sistema di monitoraggio statico del Santuario di Vicoforte [9]	7
2.4	Sistema di monitoraggio dinamico del Santuario di Vicoforte [10]	7
2.5	Evoluzione dei cedimenti (Garro 1934-1963)	8
2.6	Layout delle prove geotecniche e geofisiche eseguite a Vicoforte nel 1976,2004 e 2008. [3]	10
2.7	Sezioni sulla fondazione del Santuario di Vicoforte [3]	11
2.8	Geometria della fondazione del Santuario [3]	12
2.9	Curve di G_0 e D ottenute dalle prove con colonna risonante e di taglio torsionale [3]	14
2.10	Risultati ottenuti da prova Cross-Hole [3]	15
2.11	Elaborazione tomografica dei dati della prova Cross-Hole CHT1(2004) [3]	16
2.12	Valori di V_s e V_p ottenuti dalle prove Cross-Hole (2008)[3]	17
2.13	Tomografia sismica 2D [3]	18
2.14	Sezioni ottenute dalla tomografia elettrica (ERT) 2D (2008)[3]	18
2.15	Profilo rapporto H/V in funzione della profondità (2008)[3]	19
3.1	Sentinel-3: Satellite e payloads [4]	22
3.2	Selezione luogo su EO Finder di CREODIAS	23
3.3	Variabili di ricerca e selezione dati su EO Finder di CREODIAS	24
3.4	Esempio di immagine fornita dai satelliti Sentinel-3	26
3.5	Griglia dei 9 punti estratti da ogni acquisizione satellitare	27
3.6	Serie storiche LST Sentinel-3A	28
3.7	Serie storiche LST Sentinel-3B	28
3.8	Schermata iniziale VITO Earth Observation CGLS	30
3.9	Ricerca dati SWI su VITO Earth Observation CGLS	31
3.10	Selezione dati SWI su VITO Earth Observation CGLS.	32
3.11	Confronto SSF,SWI e QFLAG (T=2,T=5)	34
3.12	Confronto SWI e QFLAG (T=10,T=15)	34
3.13	Confronto SWI e QFLAG (T=20,T=40)	35

3.14	Confronto SWI e QFLAG (T=60,T=100)	35
3.15	Serie storiche di SWI (T=2,T=5)	36
3.16	Serie storiche di SWI (T=10,T=15)	36
3.17	Serie storiche di SWI (T=20,T=40)	37
3.18	Serie storiche di SWI (T=60,T=100)	37
4.1	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (morning) e SWI (T=2,T=5) .	40
4.2	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (morning) e SWI (T=10,T=15)	40
4.3	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (morning) e SWI (T=20,T=40)	41
4.4	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (morning) e SWI (T=60,T=100)	41
4.5	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (night) e SWI (T=2,T=5) . . .	42
4.6	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (night) e SWI (T=10,T=15) .	42
4.7	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (night) e SWI (T=20,T=40) .	43
4.8	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (night) e SWI (T=60,T=100) .	43
4.9	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (morning) e SWI (T=2,T=5) .	44
4.10	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (morning) e SWI (T=10,T=15)	44
4.11	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (morning) e SWI (T=20,T=40)	45
4.12	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (morning) e SWI (T=60,T=100)	45
4.13	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (night) e SWI (T=2,T=5) . . .	46
4.14	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (night) e SWI (T=10,T=15) .	46
4.15	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (night) e SWI (T=20,T=40) .	47
4.16	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (night) e SWI (T=60,T=100) .	47
4.17	Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=2	48
4.18	Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=5	48
4.19	Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=10	49
4.20	Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=15	49
4.21	Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=20	50
4.22	Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=40	50
4.23	Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=60	51
4.24	Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=100	51
4.25	Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=2	52
4.26	Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=5	52
4.27	Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=10	53
4.28	Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=15	53
4.29	Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=20	54
4.30	Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=40	54
4.31	Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=60	55
4.32	Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=100	55
4.33	Istogramma e PDF osservazioni LST	56
4.34	Istogramma e PDF osservazioni SWI (T=2,T=5,T=10,T=15)	57
4.35	Istogramma e PDF osservazioni SWI (T=20,T=40,T=60,T=100) .	58
4.36	Layer di riferimento dei modelli [17]	59

4.37	Classi climatiche [17]	60
4.38	Classificazione climatica mondiale secondo il sistema Köppen-Geiger[20]	60
4.39	Valori di T consigliati in base al layer e alla classe climatica[17] . . .	60
4.40	Confronto dati LST Sentinel-3A originale e dati LST ottenuti dall'inviluppo	63
4.41	Confronto dati LST Sentinel-3B originale e dati LST ottenuti dall'inviluppo	63
4.42	Serie storiche LST Sentinel-3A in seguito all'operazione di inviluppo	64
4.43	Serie storiche LST Sentinel-3B in seguito all'operazione di inviluppo	64
4.44	Istogramma e PDF osservazioni LST in seguito all'operazione di inviluppo	65
4.45	Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (morning, envelope) e SWI (T=100)	67
4.46	Scatter plot LST Sentinel-3A (morning) e SWI (T=100).	67
5.1	Serie storiche LST Sentinel-3A (mattina) 2018-2019	69
5.2	Istogramma e PDF dati LST 2018 e 2019	70
5.3	Confronto PDF LST 2018,2019 e PDF totale con picchi	71
5.4	Serie storica SWI T=100 2018-2019	72
5.5	Istogramma e PDF dati SWI 2018 e 2019	73
5.6	Confronto PDF SWI 2018,2019 e PDF totale e picchi	74
5.7	Grafici sovrapposti LST e SWI 2018-2019	75
6.1	Grafici sovrapposti LST,temperatura ambientale media e frequenze	78
6.2	Grafici sovrapposti LST(inviluppo),temperatura ambientale media e frequenze	78
6.3	Scatter plot LST e temperatura media ambientale	79
6.4	Scatter plot LST e prima frequenza	79
6.5	Scatter plot LST e seconda frequenza	80
6.6	Plotmatrix LST, temperatura ambientale e frequenze	80
6.7	Plotmatrix LST (inviluppo), temperatura ambientale e frequenze . .	81
6.8	Grafici sovrapposti SWI,temperatura ambientale media e frequenze	82
6.9	Scatter plot SWI e temperatura ambientale (R=-0,0763)	83
6.10	Scatter plot SWI e frequenze	83
6.11	Plotmatrix SWI, temperatura ambientale e frequenze	84
6.12	Plotmatrix LST, SWI, temperatura ambientale e frequenze	85
6.13	Plotmatrix LST(inviluppo), SWI, temperatura ambientale e frequenze	86

Elenco delle tabelle

2.1	Risultati Indagine 1976 [3]	19
2.2	Risultati Indagine 2004 [3]	20
2.3	Risultati Indagine 2008 [3]	20
2.4	Risultati modello numerico [11]	20
5.1	Picchi distribuzioni LST	72
5.2	Picchi distribuzioni SWI	74
6.1	Matrice di correlazione LST,temperatura media ambientale e frequenze	81
6.2	Matrice di correlazione LST (inviluppo),temperatura media ambientale e frequenze	82
6.3	Matrice di correlazione SWI,temperatura media ambientale e frequenze	84
6.4	Matrice di correlazione LST, SWI,temperatura media ambientale e frequenze	85
6.5	Matrice di correlazione LST (inviluppo), SWI, temperatura media ambientale e frequenze	86

Capitolo 1

Introduzione

Nell'ambito del monitoraggio di edifici civili e monumentali risulta di fondamentale importanza la conoscenza delle caratteristiche del terreno per lo studio dell'interazione terreno-struttura. Spesso però la mancanza di informazioni riguardanti il terreno può rendere difficile la trattazione del problema; una soluzione potrebbe essere l'uso di dati ottenuti da telerilevamento satellitare.

Il telerilevamento (*Remote sensing*) è una tecnica che permette di ottenere e raccogliere informazioni attraverso diverse tipologie di sensori (scanner, radar, telecamere, ecc) posti a distanza dalla superficie della Terra, che è l'oggetto che si vuole studiare [1]; questi sensori possono trovarsi su satelliti o su degli velivoli. Le informazioni ottenute da tali sensori possono essere di tipo multispettrale o iperspettrale in base alle lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico che lo strumento riesce ad acquisire; nel caso di dati multispettrali, come quelli usati in questo studio, si fa riferimento solo ad alcune lunghezze d'onda che in genere sono quelle delle bande visibili, infrarossi e termiche [2] che permettono di ottenere informazioni sulla conformazione della superficie terrestre.

La tecnica del telerilevamento satellitare potrebbe rappresentare un valido strumento per alcuni dei suoi vantaggi; tra questi la possibilità di ottenere informazioni anche quando non si hanno a disposizione dati provenienti da indagini di tipo standard oppure quando queste ultime non possono essere utilizzate per problematiche legate alla configurazione del luogo, per esempio difficoltà d'accesso o difficoltà di installazione degli strumenti. Inoltre, si potrebbe avere un ulteriore vantaggio anche dal punto di vista economico, infatti in genere i dati satellitari sono facilmente accessibili all'utente tramite delle piattaforme a differenza dei dati ottenibili nel caso di prove standard che potrebbero prevedere dei costi.

L'uso di dati satellitari per il monitoraggio strutturale in questo lavoro di tesi è applicato al caso studio del Santuario di Vicoforte (CN), complesso monumentale del XVII secolo tra le opere piemontesi più importanti, anche perché ospita la cupola ovale più grande al mondo.

Data la sua importanza storica e architettonica, negli anni sono stati molti gli studi mirati alla salvaguardia dell'opera. In questo ambito si inserisce il sistema di monitoraggio strutturale permanente del Santuario, sia statico che dinamico, e le indagini di tipo geotecnico e geofisico [3] per lo studio del terreno sottostante caratterizzato da formazioni eterogenee con proprietà differenti, causa di cedimenti differenziali delle fondazioni. A queste informazioni, che già permettono di avere una visione di insieme, adesso vengono aggiunti i dati satellitari, che hanno permesso di raccogliere ulteriori dati inerenti alle caratteristiche del terreno così da studiarne il comportamento e relazionarlo a quello della struttura.

In questa analisi, sono stati utilizzati dati satellitari appartenenti al programma europeo Copernicus dell'ESA (*European Spatial Agency*) per il monitoraggio ambientale [4]. Sono stati utilizzati i dati di *Land Surface Temperature* (LST) dei satelliti Sentinel-3, per lo studio della temperatura superficiale del suolo [5], e i dati di *Soil Water Index* (SWI) dei satelliti Sentinel-1 e Metop, per lo studio delle condizioni di umidità del suolo nei primi metri di profondità [6].

Una volta ottenuti i dati satellitari, questi vengono analizzati e processati con apposite tecniche dell'analisi dei segnali; dopodiché si effettua uno studio statistico. In primo luogo, viene fatto uno studio di correlazione tra i due parametri del terreno e in più uno studio di autocorrelazione che permette di osservare le variazioni negli anni delle singole variabili, ma anche come queste potrebbero influenzarsi nell'arco del tempo. Successivamente i dati satellitari vengono correlati alla temperatura ambientale, i cui dati provengono dalle registrazioni giornaliere dell'ARPA [7], e alle prime due frequenze modali del Santuario, identificate a partire da dati accelerometrici registrati dal sistema di monitoraggio dinamico. Tramite rappresentazioni e indici di tipo statistico, si ottengono informazioni sia sui dati satellitari che sulla loro relazione con le altre grandezze considerate.

1.1 Struttura della tesi

La tesi è costituita da otto capitoli ed è organizzata come segue.

Nel *Capitolo 1* si fa un'introduzione del lavoro di tesi con riferimento all'oggetto, le motivazioni e la metodologia.

Nel *Capitolo 2* è presentato il caso studio del Santuario di Vicoforte attraverso la storia della sua costruzione. Si fa riferimento anche alle problematiche del terreno sottostante, vengono trattate l'evoluzione dei cedimenti nel tempo e le tre campagne di indagini geotecniche e geofisiche.

Nel *Capitolo 3* è contenuta una trattazione nel dettaglio dei dati satellitari utilizzati;

si fa riferimento alle loro caratteristiche, al modo in cui stato è stato possibile raccogliarli ed è presentata una prima analisi di questi dati.

Nel *Capitolo 4* è contenuta l'analisi dei dati satellitari tramite studio di correlazione e la successiva elaborazione dei dati per migliorare tale correlazione.

Nel *Capitolo 5* è presentato lo studio di autocorrelazione dei dati satellitari su finestre annuali.

Nel *Capitolo 6* vengono introdotte la temperatura ambientale e le frequenze modali del Santuario e quindi è effettuato lo studio di correlazione tra queste grandezze e i dati satellitari.

Nel *Capitolo 7* vengono discussi i risultati ottenuti, le semplificazioni di cui si è tenuto conto e i limiti di questa prima applicazione dei dati satellitari nell'ambito del monitoraggio strutturale.

Nel *Capitolo 8* è l'ultimo capitolo e contiene le conclusioni dello studio.

Capitolo 2

Il Santuario di Vicoforte

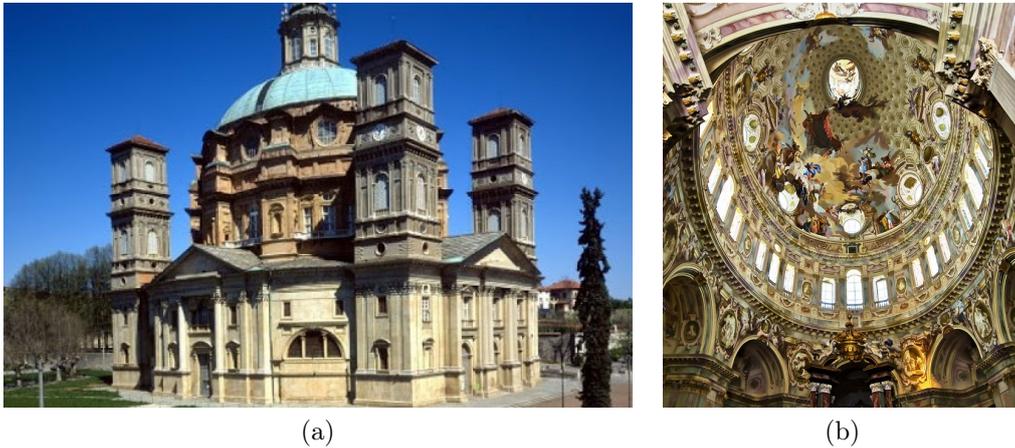


Figura 2.1: Santuario di Vicoforte e cupola ovale

La Basilica *Regina Montis Regalis* di Vicoforte (CN) è una delle principali opere del barocco piemontese, la cui importanza è anche legata alla sua imponente cupola. Con un asse maggiore di 37.23 m e un asse minore di 24.89 m, essa è la quinta cupola più grande al mondo per dimensioni dopo il Pantheon di Roma, San Pietro in Vaticano, Santa Maria del Fiore a Firenze e Gol Gumbaz in India e la più grande tra quelle di forma ovale, oltre a essere decorata con l'affresco a tema unico più esteso al mondo [8].

La costruzione del Santuario, in un primo momento voluta dal Duca Carlo Emanuele I di Savoia che aveva individuato nella Basilica un mausoleo per la casa regnante, iniziò nel 1596 sotto la guida dell'architetto Ascanio Vitozzi, il quale riprese il precedente progetto di Ercole Negri. Nel 1599 la costruzione era giunta al livello dei cornicioni al di sotto del tamburo, ma fu arrestata in quanto iniziarono a verificarsi i primi cedimenti sul lato Ovest. Nel 1615 Vitozzi morì e nel 1630 con la morte del

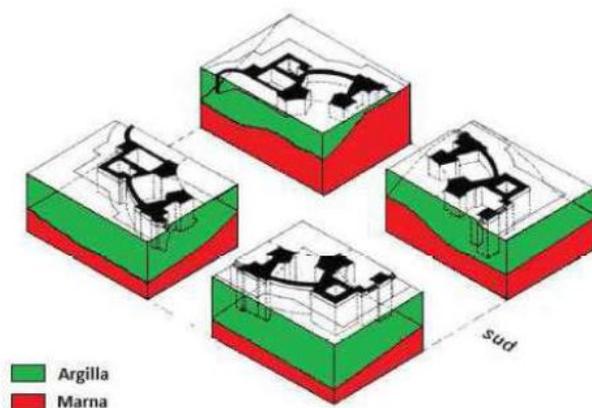


Figura 2.2: Diagrammi assonometrici degli strati di marna e limo-argilloso

Duca Carlo Emanuele I venne meno anche il sostegno economico e politico che era stato determinante per l'avvio dell'opera, quindi il cantiere del Santuario si fermò per quasi un secolo. In particolare la ricostruzione riprese nel 1692, anno in cui intervenne l'architetto Francesco Gallo il quale realizzò il tamburo completato nel 1711 e nel 1732 fu portata a termine la cupola. 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 nervature 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 le spinte orizzontali. Infine, nel 1735 fu costruito il lanternino che sovrasta l'edificio e dà luce all'interno. Negli anni successivi furono completati gli spazi interni e la facciata; i lavori durarono fino al 1917, quando fu indetto il concorso per la progettazione dei nuovi campanili.

Fin dall'inizio della costruzione si verificarono problemi strutturali legati a cedimenti differenziali delle fondazioni dovuti alla tipologia di terreno al di sotto dell'opera. Infatti, il terreno sottostante è caratterizzato da formazioni eterogenee distribuite in maniera non uniforme. Esso è costituito da uno strato superficiale variabile di limo-argilloso con caratteristiche meccaniche modeste che poggia su un più resistente strato di marna (Figura 2.2).

In epoca più recente, nel 1976 fu eseguita una campagna di indagine, in seguito alla quale negli anni '80 fu aggiunto un ulteriore sistema di cerchiaggio su 4 livelli, costituito da 56 tiranti post-tesi in acciaio collocati in cima al tamburo all'interno della muratura e ancorati in 14 punti lungo tutto il perimetro. Nel 2004 tale sistema venne aggiornato con l'aggiunta di vari strumenti di tecnologia più avanzata per il monitoraggio statico dell'opera, esso è costituito da 2 tipologie di sensori: strumenti per la misurazione di spostamenti, deformazioni e stati tensionali all'interno della struttura (celle di pressione idraulica, celle di carico ed estensimetri) e strumenti

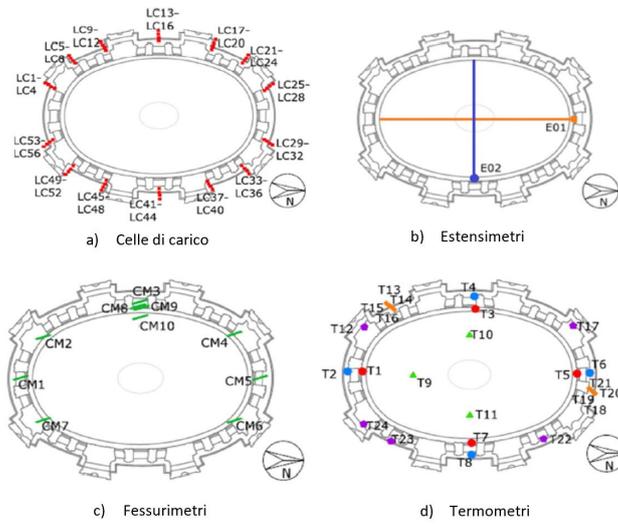


Figura 2.3: Sistema di monitoraggio statico del Santuario di Vicoforte [9]

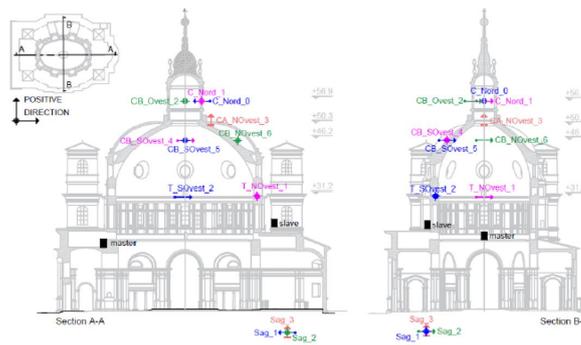


Figura 2.4: Sistema di monitoraggio dinamico del Santuario di Vicoforte [10]

per la misurazione delle condizioni al contorno e ambientali (sensori di temperatura, igrometri e piezometri).

Nel 2015 al sistema di monitoraggio statico fu aggiunto un sistema di monitoraggio dinamico composto da accelerometri monoassiali.

2.1 Evoluzione dei cedimenti

Fin dall'inizio della costruzione del Santuario, emersero le problematiche relative alla tipologia di terreno su cui doveva essere fondato il monumento. Tuttavia, inizialmente non fu data molta importanza a questo aspetto, in quanto in questa

prima fase lo strato argilloso era ancora asciutto e resistente, quindi non dava segni di cedimenti.

Il primo a occuparsi della stabilità dell'opera fu l'ing. Garro, il quale tramite il suo studio, iniziato nel 1934, riuscì a tracciare l'evoluzione dei cedimenti in relazione alle diverse epoche di costruzioni del Santuario. Nella sua analisi egli prese come punto di riferimento il pilastro fondato direttamente sulla marna che nel corso degli anni non aveva subito alcun cedimento, da questo riuscì a tracciare i cedimenti che hanno interessato gli altri pilastri. Cedimenti dell'entità di circa 250-300 mm si affermarono già nel 1599 quando ancora l'edificio era giunto all'altezza di 10 m; lo strato argilloso iniziò a plasticizzarsi a causa del confluire delle acque piovane nello scavo e a cedere all'aumentare del peso delle masse murarie; l'elevazione, quindi, fu interrotta e si proseguì con il rivestimento lapideo della parti già costruite. Venne, inoltre, realizzato un sistema di drenaggio per permettere all'acqua di defluire. In questa fase, furono registrati cedimenti dell'ordine di 250 mm sotto tutti e tre i pilastri del lato Ovest.

Durante la costruzione dell'opera, i cedimenti continuarono ad evolversi e quando fu eretta la cupola il cedimento massimo riscontrato fu di 550-600 mm. In particolare modo, Garro fece attenzione ai cedimenti tra pilastri adiacenti, in quanto essi possono essere causa di sforzi taglianti. Tra i pilastri del lato Nord-Ovest e quelli del lato Nord-Est è presente una differenza di cedimento pari a 204 mm; questi cedimenti di tipo differenziale sono stati anche causa di fessurazioni asimmetriche sull'opera. Un riepilogo dell'evoluzione dei cedimenti è riportato in Figura 2.5.

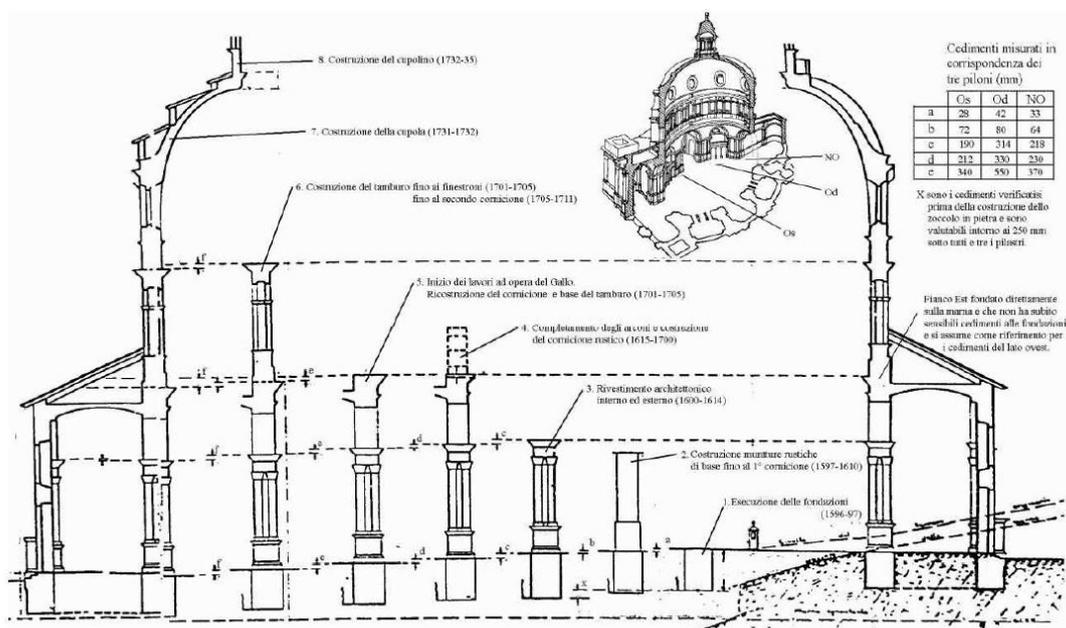


Figura 2.5: Evoluzione dei cedimenti (Garro 1934-1963)

2.2 Caratterizzazione geotecnica e geofisica del terreno

Per lo studio del terreno sottostante il Santuario sono state effettuate tre campagne di indagine, rispettivamente nel 1976, nel 2004 e nel 2008.

Le prove effettuate in queste campagne possono essere divise in due differenti categorie: prove di tipo geotecnico (1976-2004) e prove di tipo geofisico (2004-2008). La prima campagna di indagine ha permesso di definire la stratigrafia al di sotto della basilica e caratterizzare il terreno dal punto di vista geotecnico tramite perforazioni di sondaggio, prove penetrometriche di tipo SPT (*Standard Penetration Test*) e prove di laboratorio; inoltre, le prove eseguite hanno permesso di definire la geometria della fondazione della Basilica. La seconda campagna, invece, da un punto di vista geotecnico aveva come obiettivo da un lato la determinazione dei parametri del terreno prima dell'applicazione del carico, per questo motivo alcune perforazioni sono state eseguite al di fuori del perimetro della fondazione della Basilica; dall'altro lato la definizione dei coefficienti di reazione e di impedenza meccanica della fondazione (molle e smorzatori per il modello di interazione terreno-struttura). Per quanto riguarda l'aspetto geofisico, invece, è stato possibile caratterizzare il terreno tramite le prove Cross Hole. Infine, la terza campagna di indagine è stata eseguita per ottenere informazioni di tipo geofisico a completamento di quelle ottenute dalla precedente. In quest'ultima fase sono state eseguite prove geofisiche quali prove MASW (*Multi-station Analysis of Surface Waves*), REMI (*Refraction Microtremor*), Nakamura test, tomografia elettrica 3D e tomografia sismica 2D. Un riepilogo delle prove effettuate nelle tre campagne è riportata in Figura 2.6.

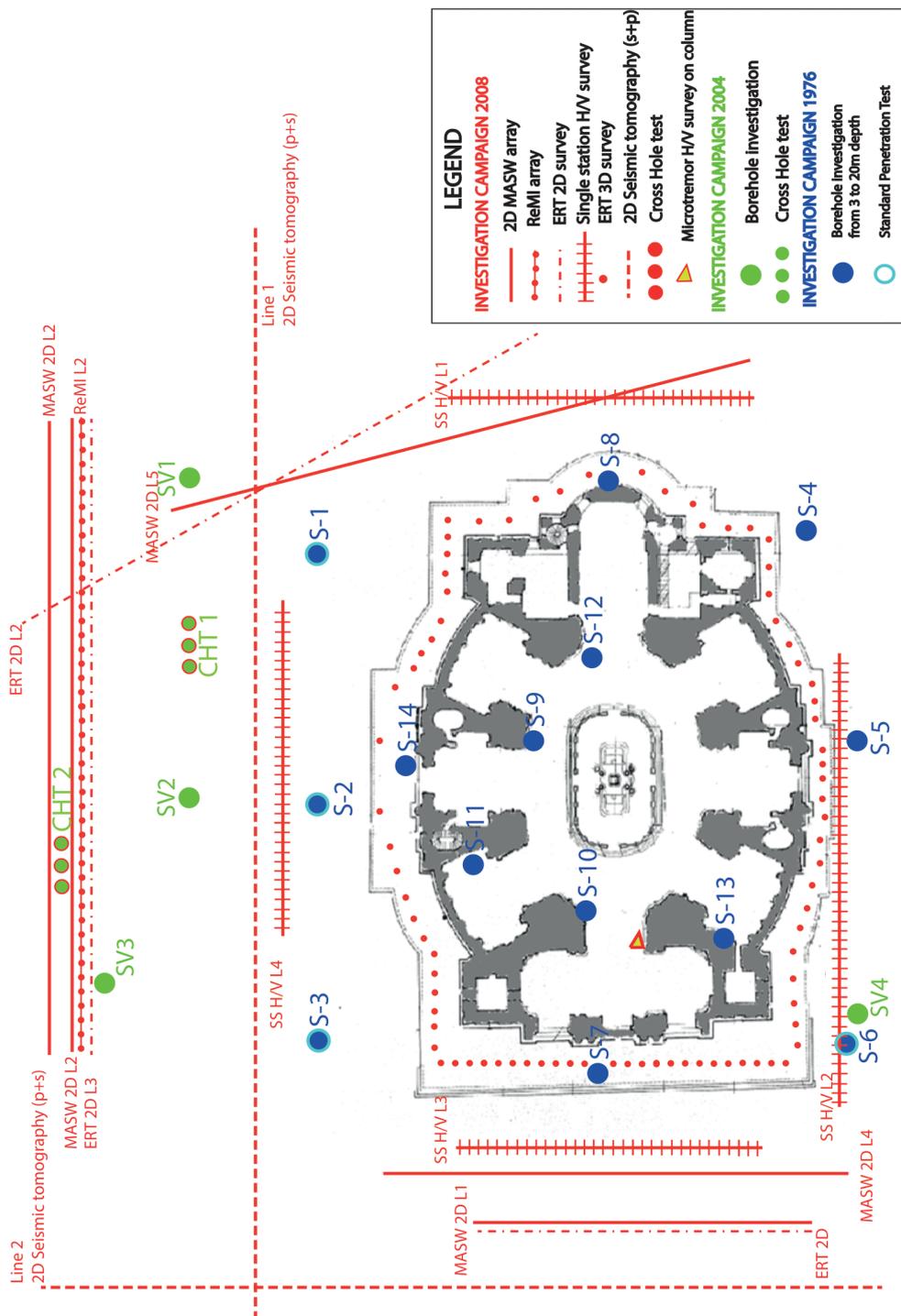


Figura 2.6: Layout delle prove geotecniche e geofisiche eseguite a Vicoforte nel 1976,2004 e 2008. [3]

2.2.1 Campagna di indagine 1976

In questa prima indagine, sono state effettuate 14 perforazioni con una profondità massima di 20 metri per lo studio della stratigrafia di terreno sottostante il Santuario. A queste ne sono state aggiunte altre 29 per la definizione della geometria della fondazione al di sotto del piano campagna.

Il terreno è caratterizzato da due principali formazioni, il cui spessore è variabile da punto a punto: limo-argilloso e marna; oltre a questi, si riscontra la presenza di materiale eterogeneo di transizione. Lo strato di marna, inclinato in direzione Sud-Ovest, è sormontato dallo strato di limo-argilloso che ha uno spessore variabile (1-5 m) sul lato Ovest, mentre sul lato Est del monumento scompare (Figura 2.7). Dal punto di vista delle fondazioni, questo porta a una disomogeneità dal punto di vista del piano di posa; infatti, 3 pilastri, quelli del lato sud-est, sono fondati sulla marna mentre gli altri 5 sono fondati direttamente sul limo-argilloso. Quest'ultimo sotto l'effetto del carico e, se sottoposto ad infiltrazione di acqua, si plasticizza e si compatta, fenomeni che sono causa dei cedimenti differenziali che nel tempo hanno interessato la struttura. Tramite sondaggi è stato possibile ottenere la geometria della fondazione riportata in Figura 2.8.

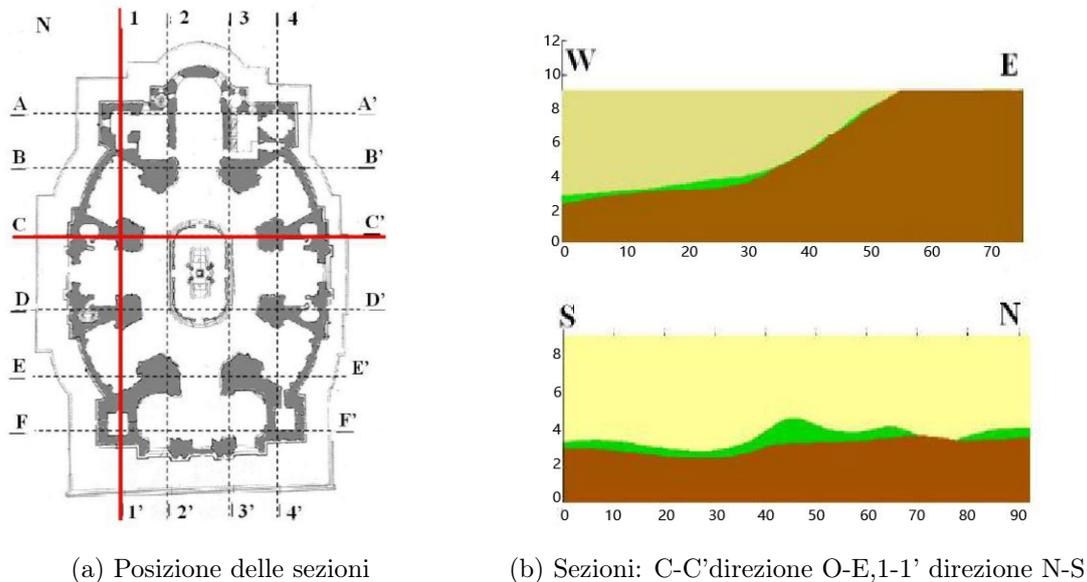
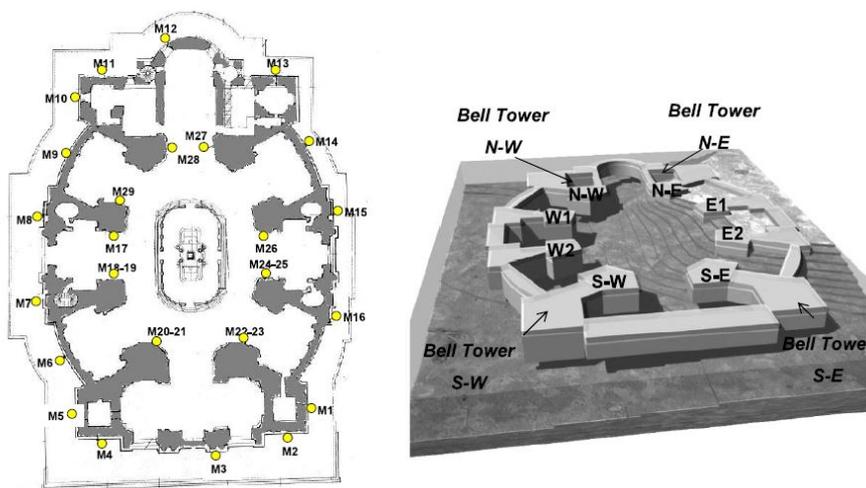


Figura 2.7: Sezioni sulla fondazione del Santuario di Vicoforte [3]



(a) Posizione fori di sondaggio e vista assonometrica

	B [m]	L [m]	D [m]
S-W Bell Tower	8	10.6	4
Pilar W2	6.2	14.6	5
Pilar W1	6.2	14.6	3.5
N-W Bell Tower	8	10.8	3.5
Pilar N-W	16.6	19	3.5
Pilar S-W	6	7.4	4
Pilar N-E	4.8	7.4	2
Pilar S-E	6.6	7.4	2.5
N-E Bell Tower	7.8	10.8	2
Pilar E1	6.2	14.6	2
Pilar E2	6.2	14.4	2
S-E Bell Tower	8.4	10.6	3

(b) Dimensioni

Figura 2.8: Geometria della fondazione del Santuario [3]

Sono state poi effettuate prove SPT, i cui risultati sono stati utilizzati per la stima della resistenza al taglio non drenata (c_u) dello strato limoso argilloso i cui valori sono compresi in un range tra 0.3 e 0.6 kg/cm^2 ; e sondaggi piezometrici per la definizione del livello di falda, che si attesta ad una profondità compresa tra 1.8 e 3.5 m dal piano campagna con piccole variazioni stagionali.

Infine, sono stati prelevati dei campioni sia dallo strato di limo-argilloso che dallo strato di marna per effettuare test di laboratorio. Da queste prove sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- **Granulometria.** In genere è predominante la frazione di limo con un valore

medio del 70%; le altre due frazioni presenti sono la sabbia e l'argilla, la prima è inferiore al 10% fino a 5m, aumentando fino al 20-30% in prossimità della marna, la seconda, invece, diminuisce con la profondità da un 20-30% fino a 5m fino a 15-20% successivamente.

- **Contenuto d'acqua e limiti di Atterberg.** Lo studio è stato effettuato sia sui provini di limo-argilloso che su quelli di marna; non si è riscontrata nessuna variazione correlata alla profondità, piuttosto le principali differenze sono emerse per i provini prelevati dalle perforazioni sul lato ovest del Santuario, cioè quelli sul limo, i quali sono più umidi, più plastici e meno consistenti. In generale, si è valutato un valore medio di contenuto d'acqua pari a 28,5% e dai valori di plasticità medi intorno al 50%, quindi si ha un materiale con una plasticità medio-alta.
- **Resistenza al taglio.** Dalla prove effettuate sono stati ottenuti una resistenza al taglio non drenata (c_u) e un angolo di attrito (φ) pari rispettivamente a 0.28 kg/cm^2 e 26.5° per l'argilla, si considerano solo i parametri a lungo termine dal momento che è presente il carico si può considerare la consolidazione primaria terminata; per la marna è stato valutato un valore medio di resistenza pari a 24.5 kg/cm^2 , su di essa sono stati effettuati solo test di compressione.
- **Compressibilità e permeabilità.** Tramite diverse prove edometriche, effettuate con l'applicazione di pressioni simili a quelle dovute al carico reale presente in sito, è stato valutato il modulo edometrico (M) i cui valori sono compresi tra $36-96 \text{ kg/cm}^2$ (in condizioni normalconsolidate) e $104-132 \text{ kg/cm}^2$ (in condizioni sovraconsolidate) e il coefficiente di permeabilità (K) il cui valore medio è $3.4 \cdot 10^{-4} \text{ cm/sec}$.

2.2.2 Campagna di indagine 2004

Durante la seconda campagna di indagine, sono state realizzate 4 perforazioni di cui tre fino a 20 metri e una fino a 10.

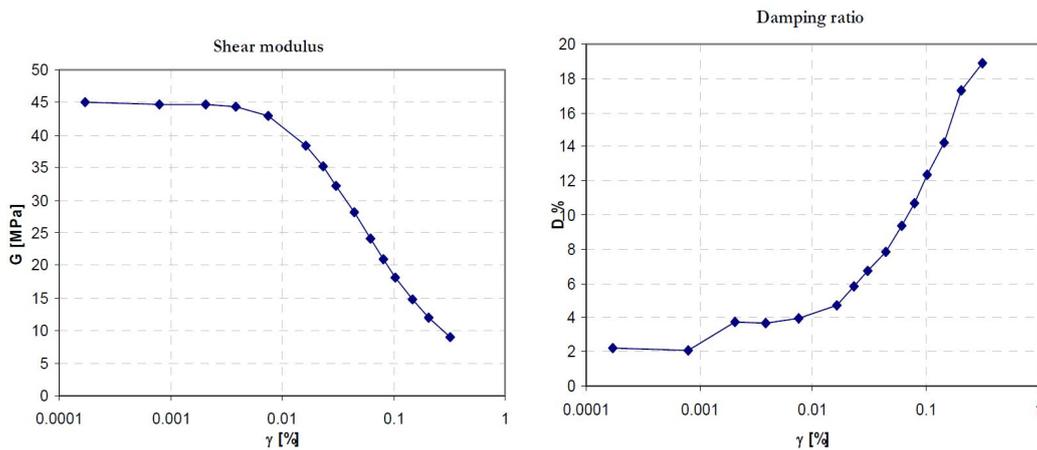
Dal punto di vista stratigrafico, viene confermato quanto già ottenuto nella precedente campagna, quindi la presenza di tre unità: uno strato materiale eterogeneo portato in sito artificialmente (1-3 m), uno strato di limo-argilloso (1.4-4.5 m) e infine uno strato di marna. Per quanto riguarda la falda, essa si trova a un livello compreso tra 2.6 m e 3.4 m.

Sono state eseguite prove di laboratorio anche in questa seconda campagna di indagine; esse hanno confermato le frazioni granulometriche della precedente indagine, per quanto riguarda gli altri parametri sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- **Contenuto d'acqua e limiti di Atterberg.** Per il limo-argilloso sono stati valutati i seguenti valori medi di contenuto d'acqua (w_N), limite plastico

(PL) e limite liquido (LL): $w_N = 28\%$, $PL = 25\%$ e $LL = 42\%$, dal momento che il contenuto d'acqua è compreso tra i valori di limite plastico e limite liquido si può ritenere che il limo-argilloso ha una consistenza *semi-solida*; per quanto riguarda la marna sono stati valutati i seguenti valori medi: $w_N = 21\%$, $PL = 29\%$ e $LL = 44\%$, in questo il valore di contenuto d'acqua è al di sotto del limite plastico, quindi la marna può essere considerata un *solido*.

- **Peso specifico.** È stato ottenuto un valore medio di 19 kN/m^3 per il limo-argilloso e di 20.2 kN/m^3 per la marna.
- **Parametri di resistenza.** Per il limo-argilloso tramite prove triassiali, prove edometriche e prove di taglio sono stati ricavati rispettivamente i seguenti parametri: *resistenza al taglio non drenata*, sono state eseguite tre prove ottenendo i seguenti valori 30.36, 44.48 e 24.51 kPa; *modulo edometrico* il cui valore è circa pari a 7 MPa; *angolo di attrito* e *coesione*, di questi sono stati valutati sia i valori di picco che quelli residui $\varphi' = 26.57$, $c' = 24$ kPa, $\varphi'_r = 20.2$ e $c'_r = 43.53$ kPa; questi ultimi valori ottenuti si avvicinano molto a quelli valutati durante la campagna di indagine del 1976.
- **Modulo di resistenza al taglio e coefficiente di smorzamento.** Tramite prove di laboratorio quali la colonna risonante e la prova di taglio torsionale, sono stati ottenuti i valori del *modulo di taglio* (G_0) e il *coefficiente di smorzamento* (D) per piccole deformazioni ($\epsilon \leq 10^{-3}\%$); si sono ottenuti i seguenti valori: $G_0 = 45 - 60$ MPa e $D = 2\%$.



(a) Curva di decadimento del modulo di taglio G_0 (b) Curva di variazione dello smorzamento D

Figura 2.9: Curve di G_0 e D ottenute dalle prove con colonna risonante e di taglio torsionale [3]

Per quanto riguarda il modulo di taglio ulteriori informazioni vengono date dalla prova Cross-Hole (Figura 2.10) che ha permesso di valutare la velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) e di compressione (V_p); dal valore di V_s e assumendo densità pari a 1900 kg/m^3 per il limo-argilloso e di 2100 kg/m^3 per la marna, è stato possibile ricavare il valore di G_0 al variare della profondità. I risultati di queste prove corrispondono a quelli ottenuti tramite gli studi stratigrafici, per cui sia le velocità che il modulo di taglio crescono con la profondità, questo in virtù del fatto che con la profondità il materiale al di sotto della Basilica diventa più rigido e consistente. Tali risultati sono anche confermati dalla tomografia sismica (Figura 2.11), in cui l'andamento della distribuzione della velocità delle onde di compressione presenta un incremento di tale parametro all'aumentare della profondità.

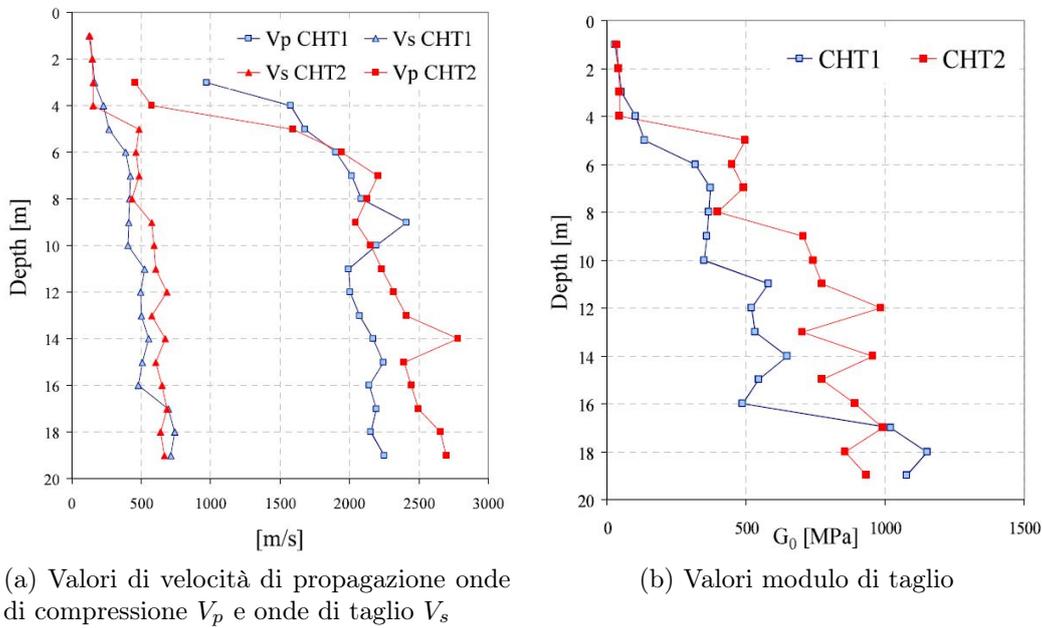


Figura 2.10: Risultati ottenuti da prova Cross-Hole [3]

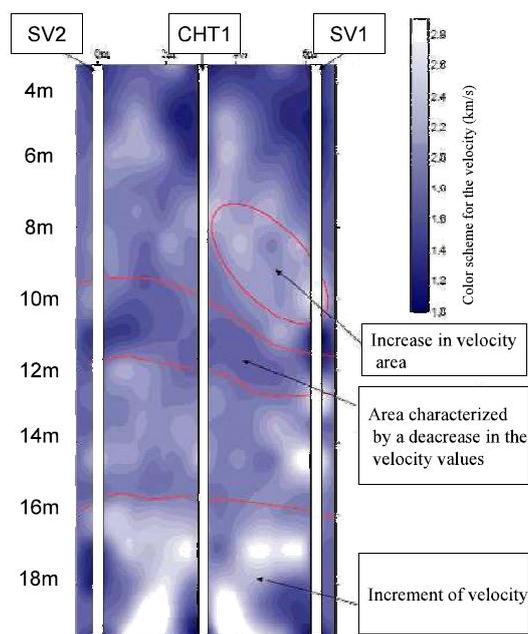


Figura 2.11: Elaborazione tomografica dei dati della prova Cross-Hole CHT1(2004) [3]

2.2.3 Campagna di indagine 2008

In quest'ultima campagna di indagine l'obiettivo è stato quello di definire le variazioni stratigrafiche da un punto di vista sismico ed elettrico, in particolare sono stati stimati i valori delle velocità di propagazione delle onde e i valori di resistività. In primo luogo, sono state effettuate diverse prove di tipo MASW in direzione Est-Ovest e Nord-Sud (Figura 2.6), da cui sono stati ricavati i valori della velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s). Gli strumenti utilizzati hanno permesso di analizzare con buona precisione e risoluzione fino a 15 m, dai risultati ottenuti si può dire che nello strato corrispondente al limo-argilloso i valori di V_s sono compresi tra 115 e 120 m/s e nelle parti più compatte si arriva a valori compresi tra 280 e 360 m/s; mentre nello strato di marna V_s raggiunge un valore massimo di 400 m/s alla profondità di circa 4-7 m, infine per profondità superiori a 15 m la velocità assume valori medi di circa 650-670 m/s. Valori simili sono stati trovati anche tramite prove ReMi. Anche in questo caso sono state eseguite delle prove Cross-Hole; usando gli stessi fori dell'indagine del 2004, sono stati ricavati i profili della velocità di propagazione sia delle onde di taglio V_s che di quelle di compressione V_p . V_s e V_p assumono un valore massimo rispettivamente di 500 m/s e 1800 m/s per profondità inferiori a 6 m, fino ad arrivare a un massimo rispettivamente di 800 m/s e 2500 intorno ai 20 m.

L'andamento rappresentato in Figura 2.12 è stato anche confermato dai risultati

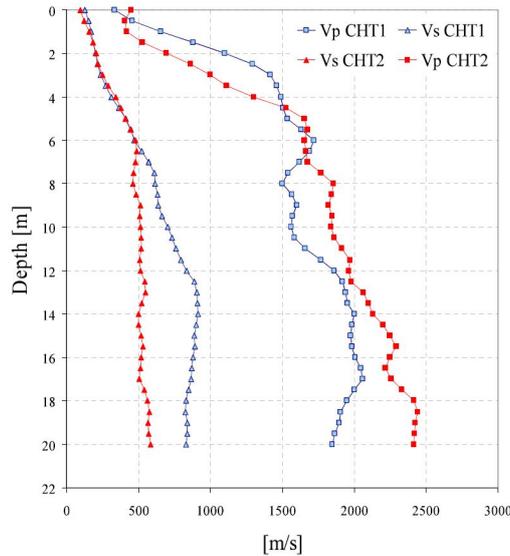
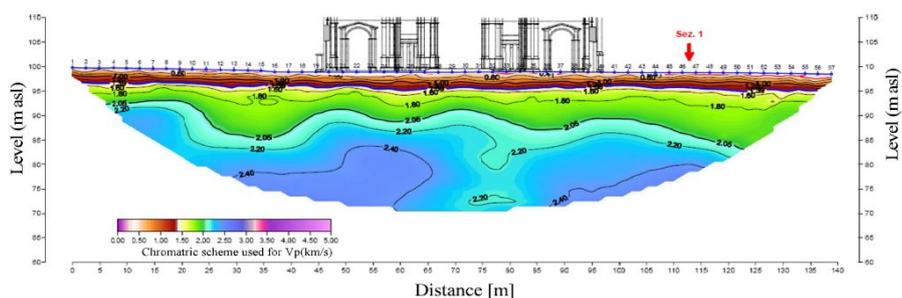


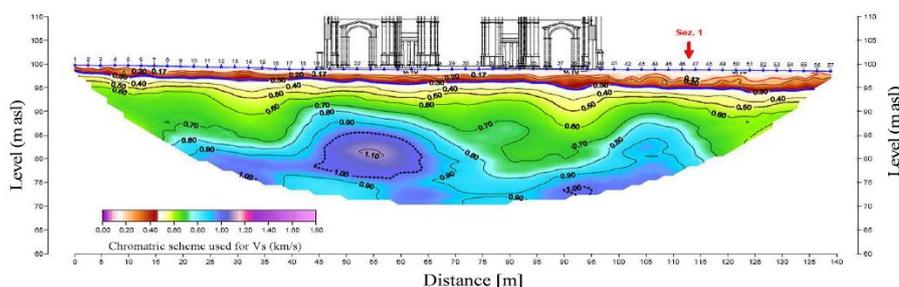
Figura 2.12: Valori di V_s e V_p ottenuti dalle prove Cross-Hole (2008)[3]

della tomografia sismica (Figura 2.13), da cui notiamo come i valori sia di V_p e V_s crescono con la profondità; i valori di V_p vanno da un minimo di 0.6 km/s in corrispondenza dello strato superficiale, fino ad arrivare a valori di 2.40 km/s in profondità, mentre valori di V_s sono compresi tra 0.17 km/s e 1.10 km/s nelle zone più rigide, valori che sono all'incirca in accordo con i valori trovati nelle altre prove. Tramite prove di tipo geoelettrico è stato possibile ricavare l'andamento della resistività. Dall'analisi delle sezioni ottenute si riscontra una corrispondenza tra i valori di resistività e le variazioni stratigrafiche ottenute con le precedenti analisi. In generale, i valori di resistività aumentano in presenza di densità maggiori oppure diminuiscono se è presente dell'acqua, quindi l'andamento di resistività restituito dalle prove ERT è in accordo con la transizione tra limo-argilloso e marna definita dalle indagini geotecniche precedenti. Per provare ciò, vengono sovrapposte le sezioni ERT e il modello 3D del terreno e si nota la corrispondenza tra l'inclinazione dello strato di marna e la variazione spaziale dei valori di resistività.

Infine, sono state eseguite prove di tipo HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) per valutare il rapporto H/V tra la componente orizzontale e quella verticale. Questo tipo di prova è stata utile per definire la frequenza naturale del terreno e la presenza di eventuali picchi di risonanza per lo studio della risposta sismica locale; ha, inoltre, permesso di confermare i risultati ottenuti dalle precedenti indagini geotecniche, dalla Figura 2.14 si nota un cambiamento delle proprietà del terreno in direzione Est-Ovest e si riscontra un aumento di rigidità.

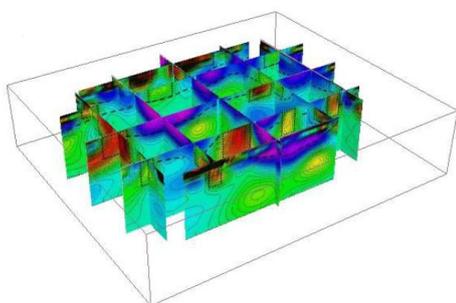


(a) Velocità di propagazione onde di compressione V_p

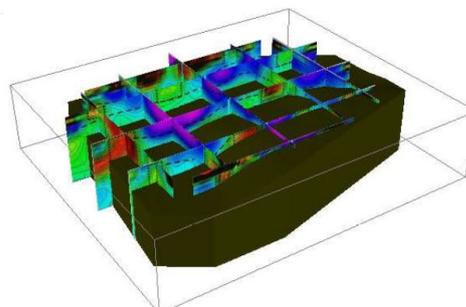


(b) Velocità di propagazione onde di compressione V_s

Figura 2.13: Tomografia sismica 2D [3]



(a) Sezioni ERT 2D



(b) Confronto tra modello del terreno e sezioni ERT 2D

Figura 2.14: Sezioni ottenute dalla tomografia elettrica (ERT) 2D (2008)[3]

Per quanto riguarda i parametri meccanici quali modulo elastico (E) e coefficiente di Poisson (ν) si fa riferimento ai valori ottenuti dai modelli numerici, si riportano quelli ottenuti dall'ultima calibrazione: $E = 0.55MPa$ e $\nu = 0.35$ per il limo-argilloso e $E = 4.15MPa$ e $\nu = 0.35$ per la marna [11].

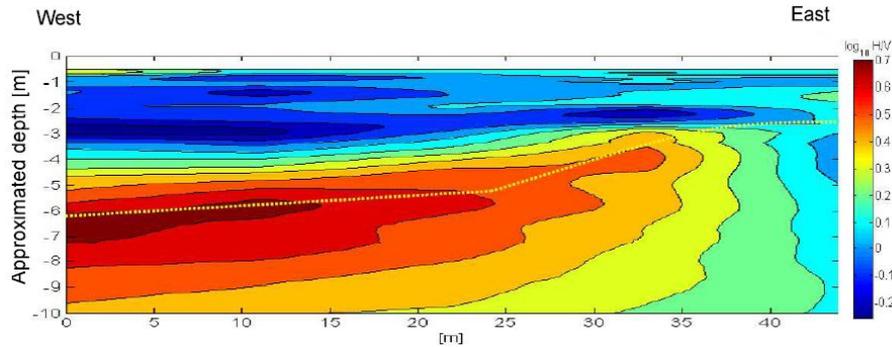


Figura 2.15: Profilo rapporto H/V in funzione della profondità (2008)[3]

2.3 Riepilogo risultati delle campagne di indagine

Di seguito si riporta un riepilogo dei parametri che caratterizzano il terreno al di sotto del Santuario. Tali parametri sono il risultato delle 3 campagne di indagine e del modello numerico. Per quanto riguarda le campagne del 2004 e del 2008, dei profili delle grandezze quali V_s , V_p e G_0 ottenuti dalle prove Cross-Hole vengono riportati i risultati in corrispondenza delle profondità in prossimità delle fondazioni del Santuario (3,6 m) e in corrispondenza della transizione limo argilloso - marna. Ai parametri qui elencati per la caratterizzazione del terreno, in questo studio vengono aggiunti i dati satellitari che hanno permesso di caratterizzare ulteriormente il comportamento del terreno e relazionarlo a quello della struttura del Santuario.

Tabella 2.1: Risultati Indagine 1976 [3]

	Limo argilloso	Marna
$c_u(kg/m^2)$	0,3-0,6	24,5
$\varphi (^{\circ})$	26,5	-
$w_n medio(\%)$	28,5	
$PL medio(\%)$	50	
$K(cm/sec)$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	

Tabella 2.2: Risultati Indagine 2004 [3]

	Limo argilloso	Marna
$w_n(\%)$	28	21
$PL(\%)$	25	29
$LL(\%)$	42	42
$\gamma(kN/m^3)$	19	20,2
$c_u(kPa)$	24-44,5	-
$\varphi'_p(\circ)$	26,6	-
$c'_p(kPa)$	24	-
$\varphi'_r(\circ)$	20,2	-
$c'_r(kPa)$	43,5	-
$M(MPa)$	7	-
$V_s(m/s)$	300 ($\simeq 4m$)	450 ($\simeq 6m$)
$V_p(m/s)$	800-1200 ($\simeq 4m$)	1900 ($\simeq 6m$)
$G_0(MPa)$	45-60 ($\simeq 4m$)	400 ($\simeq 6m$)
$D(\%)$	2	

Tabella 2.3: Risultati Indagine 2008 [3]

	prova	Limo argilloso	Marna
$V_{s,min}(m/s)$	MASW-ReMi	115-120	400 ($\simeq 4 - 7m$)
$V_{s,max}(m/s)$	MASW-ReMi	280-360	650-670 ($< 15m$)
$V_s(m/s)$	Cross-Hole	300($\simeq 4m$)	500 ($\simeq 6m$)
$V_p(m/s)$	Cross-Hole	1500($\simeq 4m$)	1800 ($\simeq 6m$)
$V_s(km/s)$	Tomogr. sism		0,17-1,10
$V_p(km/s)$	Tomogr. sism		0,6-2,40

Tabella 2.4: Risultati modello numerico [11]

	Limo argilloso	Marna
$E(MPa)$	0,55	4,15
$\nu(-)$	0,35	0,35

Capitolo 3

Dati satellitari

I dati trattati e illustrati di seguito fanno parte del programma ambientale europeo Copernicus dell'ESA (*European Space Agency*), esso fornisce una serie di informazioni accurate e tempestive, facilmente accessibili, per il monitoraggio ambientale. Le informazioni raccolte in questo programma provengono dai sette satelliti delle missioni satellitari Sentinel che al momento sono cinque. Sono presenti anche dati provenienti da altre missioni europee come quelle dell'EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*). Ogni satellite è dotato di particolari strumenti che permettono l'acquisizione di specifiche informazioni, il risultato dell'acquisizione sono delle immagini radar e ottiche ad alta risoluzione. In questa ricerca, sono stati presi in considerazione solo i dati provenienti dai satelliti Sentinel-3 e Sentinel-1, che rispettivamente forniscono i parametri di temperatura LST (*Land Surface Temperature*) e di umidità del suolo SWI (*Soil Water Index*), quest'ultimo deriva dall'unione delle acquisizioni dei Sentinel-1 in collaborazione con quelle dei sensori dei satelliti Metop-ASCAT dell'EUMETSAT.

3.1 Land Surface Temperature (LST)

Il parametro *Land Surface Temperature* (LST) controlla l'effettiva temperatura radiante della superficie terrestre [5]. Esso è ottenuto dalle acquisizioni dei satelliti A e B che fanno parte della missione Sentinel-3. L'obiettivo di tale missione è il monitoraggio climatico e ambientale tramite misure della superficie topografica marina, della temperatura del suolo e del mare e del colore della superficie del suolo e del mare. Queste misure sono effettuate da strumenti che si trovano su entrambi i satelliti e che vengono definiti *Payloads* (Figura 3.1), tra questi il radiometro SLSTR (*Sea and Land Surface Temperature Radiometer*) permette di misurare la temperatura con una risoluzione spaziale di 1 km. Il parametro LST è ottenuto tramite un algoritmo che tiene conto delle radiazioni termiche misurate dallo SLSTR



Figura 3.1: Sentinel-3: Satellite e payloads [4]

e può essere definito come la temperatura radiometrica effettiva della superficie terrestre nel campo visivo dello strumento [5].

Le registrazioni di LST sono disponibili su diverse piattaforme che permettono l'accesso gratuito ai dati dell'ESA, in questo caso è stato utilizzata la piattaforma CREODIAS [12]. Essa raccoglie online la maggior parte dei dati e dei servizi dei satelliti Sentinel e di altri satelliti europei. L'accesso ai dati di LST è stato possibile tramite l'applicazione EO Finder di CREODIAS, che è un motore di ricerca avanzato che permette la selezione dei prodotti basandosi su un insieme di variabili specifiche tra i quali tempo, luogo, raccolta e livello di elaborazione.

In Figura 3.2 e in Figura 3.3 sono illustrate le diverse operazioni da effettuare per la ricerca dei dati. Nella prima figura è riportata la selezione del luogo che può avvenire tramite l'inserimento delle coordinate o di un poligono, in figura è rappresentato il poligono della pianta del Santuario di Vicoforte.

3.1 – Land Surface Temperature (LST)

The screenshot displays the CREODIAS EO Finder interface. At the top left, there are logos for CREODIAS (powered by Copernicus and Copernicus Sentinel-1), the European Union flag, and the Copernicus logo. A navigation bar includes links for Help, Log Out, Orders, and a Cart icon (0 items). The main area is divided into three sections:

- SEARCH CRITERIA:** A search bar with the text "Search phrase, e.g. winter in Quebec". Below it, a "Product identifier or path" field is empty. A table lists search filters:

observed	published	position	cloud cover
2018-01-01	YYYY-MM-DD	latitude <> longitude <>	0-100 <> %

 Below the table, there are dropdown menus for "order products using:" (set to "processor") and "show:" (set to "all products"). A "collection:" dropdown is also present.
- Map:** A satellite-style map showing a residential area with a red polygon highlighting a specific location labeled "Santuario di Vicoforte". Street names like "Via Vecchia", "Via Borroni", and "Via Francesco Gallo" are visible. The map includes a scale bar and a copyright notice for "© CARTO © OpenStreetMap contributors".
- search results:** A table with columns: Title, Observation date, Publication date, Cloud %, and File size. The table is currently empty.

At the bottom right, there are several action buttons: "Polygon Selection", "Point Selection", "Upload Polygon", "Clear All", and a "Search" button. Below these buttons, it says "Showing 0 out of 0 total results". At the very bottom, there are three buttons: "copy all as paths", "copy all as urls", and "remove all from cart".

Figura 3.2: Selezione luogo su EO Finder di CREODIAS

Logged in: @gmail.com

[Help](#)
[Log Out](#)
[Orders](#)
[Cart \(0\)](#)

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 >

collection: Sentinel-3

processing level: LEVEL2

instrument: SLSTR

product type: LST

timeliness: Near Real Time

orbit direction: Orbit Direction

relative orbit number: 1

Billed: Free

<https://finder.creodias.eu/resto/api/collections/Sentinel3/>

search results

Title	Observation date	Publication date	Cloud %	File size
S3A_SL_2_LST_..._20200503T244633_20200504T000463_0180_058_0_...	2020-05-03 21:43:33.165	2020-05-04 00:21:51.901672	-	61MB
S3B_SL_2_LST_..._20200503T210700_20200503T232512_079_038_25_...	2020-05-03 21:03:59.679	2020-05-03 23:59:22.347949	-	65MB
S3A_SL_2_LST_..._20200503T102339_20200503T122031_079_058_00_...	2020-05-03 10:20:38.559	2020-05-03 12:44:16.168215	-	64MB
S3B_SL_2_LST_..._20200503T094405_20200503T14113_0180_038_25_...	2020-05-03 09:41:05.01	2020-05-03 12:09:49.650767	-	68MB
S3B_SL_2_LST_..._20200502T21310_20200502T234930_079_038_24_...	2020-05-02 21:30:10.458	2020-05-03 00:12:41.192223	-	62MB
S3A_SL_2_LST_..._20200502T202845_20200502T224900_079_057_3_...	2020-05-02 20:28:44.822	2020-05-02 23:18:49.698243	-	67MB
S3B_SL_2_LST_..._20200502T100106_20200502T121308_0179_038_236_...	2020-05-02 10:07:15.815	2020-05-02 12:49:22.72132	-	66MB
S3A_SL_2_LST_..._20200501T205786_20200501T231417_079_057_371_...	2020-05-01 20:54:55.667	2020-05-01 23:52:34.9186705	-	66MB
S3A_SL_2_LST_..._20200501T093201_20200501T13226_0180_057_364_...	2020-05-01 09:32:01.022	2020-05-01 11:53:42.324932	-	68MB
S3A_SL_2_LST_..._20200430T212107_20200430T234017_079_057_357_...	2020-04-30 21:21:06.506	2020-05-01 00:25:29.172058	-	64MB

showing 10 out of 1906 total result(s)

Figura 3.3: Variabili di ricerca e selezione dati su EO Finder di CREODIAS

Successivamente si inserisce l'intervallo di tempo di cui si ricercano i dati, in questo caso il periodo comprende l'arco temporale da Gennaio 2018 a Maggio 2020 in quanto i dati del sistema di monitoraggio dinamico del Santuario sono disponibili con continuità dal Gennaio 2018. In aggiunta vengono selezionate altre variabili, riportate qui di seguito e rappresentate in Figura 3.3:

- **Collection.** Permette di selezionare la missione satellitare e il satellite, in questo caso sono stati selezionati i satelliti Sentinel-3.
- **Processing level.** Indica il livello di elaborazione dei dati, i dati LST sono di livello 2; essi si basano sui dati di livello 1, ovvero dati di misurazioni e annotazioni, poi da questi, tramite un algoritmo, è calcolata la temperatura della superficie terrestre.
- **Instrument.** Permette di selezionare lo strumento che si occupa dell'acquisizione, in questo caso è lo SLSTR.
- **Product type.** Permette di selezionare le tipologie di dati che nel caso dei Sentinel-3 possono essere di tipo LST o WST, quest'ultimi si riferiscono alla temperatura della superficie marina.
- **Timeliness.** Nel caso dei dati LST, essi sono disponibili in NRT (*Near Real Time*) o NTC (*Not Critical Time*), i primi sono forniti all'utente nell'arco delle 3 ore successive all'acquisizione del satellite, mentre i secondi sono forniti entro 48 ore e si utilizzano quando il tempo non è un fattore critico nell'analisi. In questo caso sono stati utilizzati dati di tipo NRT per coerenza con i dati di accelerazione acquisiti dal sistema di monitoraggio dinamico del Santuario di Vicoforte che registra un segnale accelerometrico di circa 20 minuti ogni ora.

Una volta selezionate le variabili necessarie, si può procedere con la ricerca e la piattaforma fornisce tutti i dati disponibili di entrambi i satelliti Sentinel-3 nell'arco temporale selezionato. In particolare, per il periodo in esame sono disponibili i dati del satellite S3A (Sentinel-3A) dell'intero arco temporale, mentre nel caso del satellite S3B (Sentinel-3B) sono disponibili solo a partire da Marzo 2019, questo perché i due satelliti sono stati mandati in orbita in periodi diversi. Sono presenti due acquisizioni al giorno per ogni satellite, una per la mattina e una per la sera, ad eccezioni di alcuni giorni. Ogni registrazione corrisponde a una cartella che contiene diversi file in formato netCDF, un file xml e un'immagine, questi ultimi sono il risultato dell'acquisizione del satellite.

I file netCDF possono essere aperti tramite SNAP [13], un toolbox gratuito fornito dall'ESA; tuttavia, questo software è più adatto nel caso di elaborazione di immagini fornite da satellite. Per questa ragione, in questa analisi non è stato utilizzato SNAP, ma i dati sono stati elaborati in MATLAB. Tra i file presenti nella cartella stati utilizzati i seguenti:

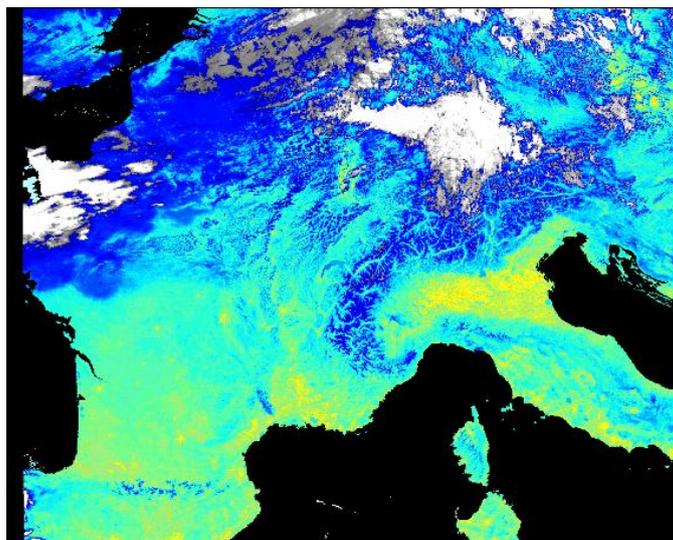


Figura 3.4: Esempio di immagine fornita dai satelliti Sentinel-3

- LST_ in.nc che contiene delle matrici con i dati di temperatura e di incertezza in Kelvin;
- time_ in.nc in cui sono presenti le informazioni relative alla data e all'orario di registrazione;
- geodetic_ tx.nc che contiene le matrici di latitudine e di longitudine.

Per l'elaborazione e l'estrazione dei dati è stato applicato il seguente procedimento, che è poi stato automatizzato per ogni cartella. In primo luogo, sono state inserite le coordinate esatte del Santuario di Vicoforte (44.3635° N, 7.8629° E). Dopo all'interno delle matrici di latitudine e longitudine sono stati ricercati gli indici dei valori di coordinate più simili a quelle del Santuario, dunque quelli con errore minore; l'errore calcolato è risultato in genere dell'ordine di 0.003° , ovvero dell'ordine di centinaia di metri che in base alla risoluzione spaziale dello strumento è stato ritenuto accettabile. Una volta ricavati gli indici del punto più vicino alle coordinate del Santuario, sono stati ricavati i corrispettivi dati di temperatura e di incertezza dalle relative matrici. Noti gli indici del punto con errore minore, dalle matrici di latitudine, longitudine, temperatura e incertezza sono stati estratti gli 8 punti intorno per poter effettuare un'interpolazione. Per ogni acquisizione, quindi, sono stati estratti in totale 9 punti, essi sono rappresentati in Figura 3.5, in cui la casella centrale in cui è rappresentato il Santuario di Vicoforte indica il punto con errore minimo, le altre caselle invece indicano gli altri punti considerati. Ottenuti questi 9 punti e note le coordinate esatte, è stato possibile effettuare un'interpolazione lineare, secondo l'ipotesi di mezzo isotropo e omogeneo per il terreno, per poter

ricavare con esattezza i valori di temperatura e incertezza in corrispondenza del Santuario.

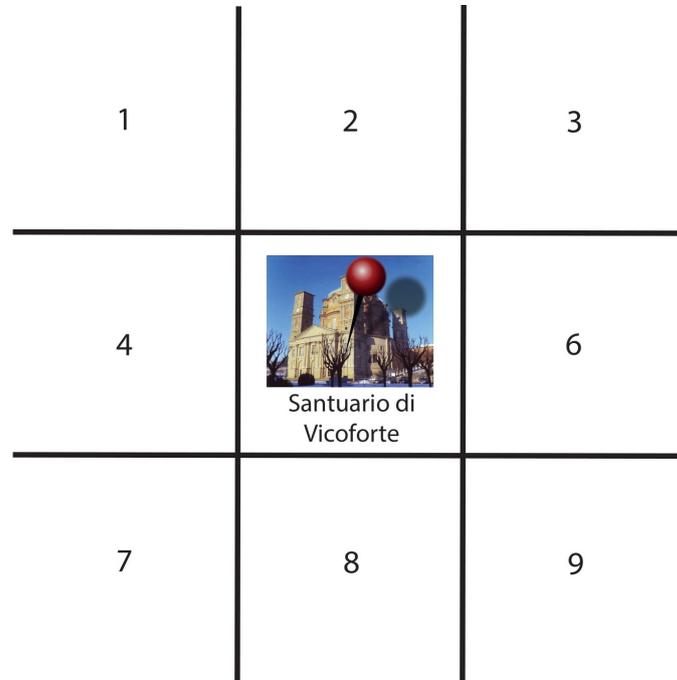


Figura 3.5: Griglia dei 9 punti estratti da ogni acquisizione satellitare

È stato così possibile ottenere le serie storiche dei dati acquisiti da entrambi i satelliti, da queste però sono stati eliminati i giorni in cui non erano presenti registrazioni. Esse sono riportate nella Figura 3.6 e nella Figura 3.7, in cui si nota che l'andamento di LST varia su base stagionale, tuttavia si riscontra la presenza di alcuni abbassamenti repentini con picchi negativi.

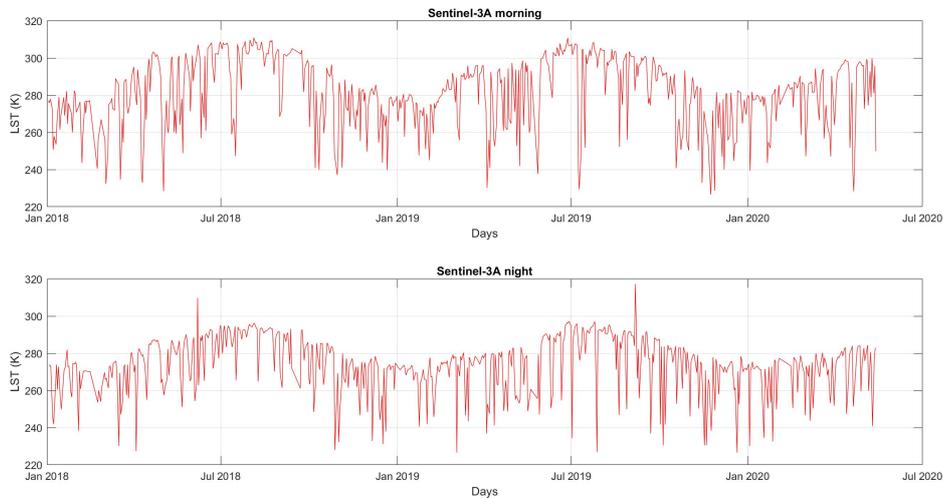


Figura 3.6: Serie storiche LST Sentinel-3A

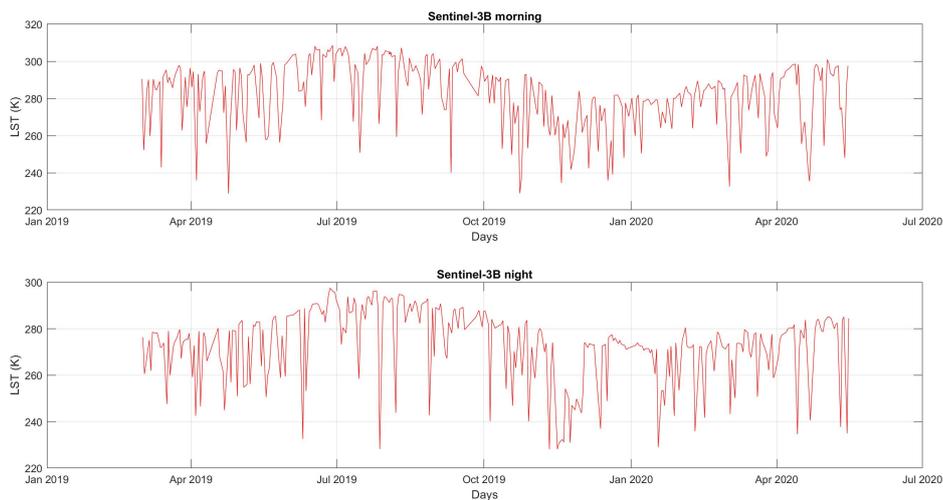


Figura 3.7: Serie storiche LST Sentinel-3B

3.2 Soil Water Index (SWI)

Il parametro *Soil Water Index* (SWI) quantifica le condizioni di umidità a varie profondità nei primi metri di suolo e può assumere un valore compreso tra 0% e 100%, esso è guidato dalle precipitazioni attraverso il processo di infiltrazione [6]. L'umidità del suolo come variabile è molto eterogenea e la sua variazione su piccola scala dipende dalle proprietà del suolo e da eventuali schemi di drenaggio.

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 1km 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*) 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.

I dati di SWI sono disponibili sulla piattaforma VITO Earth Observation del CGLS [14] (Figura 3.8), quest'ultimo produce in modo sistematico una serie di prodotti bio-geofisici sullo stato e sull'evoluzione della superficie terrestre su scala globale facilmente accessibili all'utente. Tali prodotti sono utilizzati per il monitoraggio della vegetazione, del ciclo dell'acqua, del bilancio energetico e della parte di superficie terrestre che risulta coperta dai ghiacci.

Per la ricerca e la selezione dei dati bisogna inserire il luogo di interesse, la raccolta e l'intervallo di tempo a cui si è interessati, anche nel caso del SWI l'intervallo va da Gennaio 2018 a Maggio 2020 (Figura 3.9). Una volta inseriti questi filtri, si avvia la ricerca e la piattaforma fornisce tutti i dati disponibili in quell'arco temporale per il luogo selezionato; è presente una registrazione al giorno con risoluzione temporale di 1 giorno (Figura 3.10).

The screenshot displays the Copernicus Global Land Service website. At the top, the Copernicus logo is accompanied by the tagline "Europe's eyes on Earth". Navigation links for "Login Help" and "Register FAQ Contact" are visible. A "Watch our video tutorials" link is also present. The main content area is divided into two primary sections: "Vegetation State" and "Energy Budget".

Vegetation State

- VEGETATION PROPERTIES**: A global map showing vegetation indices with a color scale from 0 to 100.
- VEGETATION INDICATORS**: A global map showing vegetation indicators with a color scale from 0 to 100.
- DRY MATTER PRODUCTIVITY**: A global map showing dry matter productivity with a color scale from 0 to 100.
- FIRE DISTURBANCE**: A global map showing fire disturbance with a color scale from 0 to 100.

Energy Budget

- SOIL WATER INDEX**: A global map showing soil water index with a color scale from 0 to 100.
- SURFACE SOIL MOISTURE**: A global map showing surface soil moisture with a color scale from 0 to 100.

Each map is accompanied by an information icon (i) and a "Collections" link. The footer includes the version number "Version 2.2.1-20180225", a "Hosted by VITO" logo, and links for "About us", "Terms of use", "Privacy policy", and "Feedback".

Figura 3.8: Schermata iniziale VITO Earth Observation CGLS

Copernicus Global Land Service
Providing bio-geophysical products of global land surface

Welcome **Stefania Coccimiglio**
User Delivery space
Data pool

Logout Help
Profile FAQ
Contact

Watch our video tutorials

Catalogue search Subscription

Soil Water Index - Daily SWI 1km Europe V1

Help Collection

- Daily SWI 1km Europe V1 (1 product)
- Daily SWI 12.5km Global V3 (4872 products)
- 10-daily SWI 12.5km Global V3 (480 products)
- SWI Static layers (16 products)
- SWI Time Series V3 (1 product)

Basic

Date Slot

Start date 07/01/2018
End date 31/05/2020

5.5169 ROI 8.7457
45.4590 ROI 43.5649

Advanced

Search Reset
Number of results per page 20

42.85028, 12.73729

About us Terms of use Privacy policy Feedback

Version 2.2.1-20180225

Hosted by VITO

Figura 3.9: Ricerca dati SWI su VITO Earth Observation CGLS

Copernicus Global Land Service
Providing bio-geophysical products of global land surface

Welcome **Stefania Coccimiglio**
User Delivery space
Data pool

Logout Profile
Help FAQ
Contact

Watch our video tutorials

Soil Water Index - Daily SWI 1km Europe V1

0 products selected on a total of 853 20 Per << < 1 of 43 >>

Select all 853 products

Download	Product ID	Start Date	End Date	Size	Thumb
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202005021200_CEURO_SCAT	01/05/2020	02/05/2020	83.6 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202005011200_CEURO_SCAT	30/04/2020	01/05/2020	81.1 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004301200_CEURO_SCAT	29/04/2020	30/04/2020	84.5 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004291200_CEURO_SCAT	28/04/2020	29/04/2020	83.7 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004281200_CEURO_SCAT	27/04/2020	28/04/2020	82.7 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004271200_CEURO_SCAT	26/04/2020	27/04/2020	83.7 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004261200_CEURO_SCAT	25/04/2020	26/04/2020	83.5 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004251200_CEURO_SCAT	24/04/2020	25/04/2020	80.6 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004241200_CEURO_SCAT	23/04/2020	24/04/2020	82.7 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004231200_CEURO_SCAT	22/04/2020	23/04/2020	79.7 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004221200_CEURO_SCAT	21/04/2020	22/04/2020	77.7 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004211200_CEURO_SCAT	20/04/2020	21/04/2020	80.5 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004201200_CEURO_SCAT	19/04/2020	20/04/2020	79.2 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004191200_CEURO_SCAT	18/04/2020	19/04/2020	79.6 MB	
<input type="checkbox"/>	SWI1km_202004181200_CEURO_SCAT	17/04/2020	18/04/2020	79.1 MB	

Back to search Prepare custom order... Order now...

Hosted by VITO

Version 2.2.1-20180225

About us Terms of use Privacy policy Feedback

Figura 3.10: Selezione dati SWI su VITO Earth Observation CGLS.

I file sono forniti in formato netCDF, come nel caso di LST, e all'interno di ogni file sono contenute le seguenti informazioni:

- Latitudine e longitudine;
- Data di inizio e di fine registrazione;
- SSF (*State Surface Flag*);
- 8 diversi valori di SWI in funzione di T (Lunghezza caratteristica del tempo);
- 8 diversi valori di QFLAG (*Quality Flag*) uno per ogni valori di SWI(T).

Lo SSF è indicativo dello stato in cui si trova la superficie al momento dell'acquisizione, esso 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 sulla superficie;
- **SSF = 255**, stato della superficie non classificabile.

I valori di SWI sono dati per diversi valori di T, che è il parametro per modellare l'infiltrazione negli strati più profondi del suolo. L'algoritmo che permette il calcolo di SWI si basa su un modello di infiltrazione che descrive la relazione di SSM, che rappresenta il contenuto d'acqua relativo del suolo in superficie (entro i primi centimetri) [15], e il profilo di umidità in funzione del tempo; tale modello è costituito da due strati, il primo superficiale e il secondo che si estende in profondità e il parametro T è legato alla profondità e alle proprietà della tipologia di suolo. Tuttavia, uno dei limiti dell'algoritmo per ricavare SWI1km è che non viene tenuto conto della stratigrafia del suolo e quindi delle sue proprietà, di conseguenza risulta difficile relazionare T con la profondità [16]. Proprio per questo motivo, sono stati fatti molti studi volti a validare i valori di SCATSAR SWI con i valori di umidità del suolo misurati in situ così da poter capire meglio la relazione T-profondità [17],[18],[19].

Infine, l'ultimo parametro che viene fornito è il QFLAG che è legato al numero disponibile di dati SSM per il calcolo di SWI; esso descrive il livello di fiducia, ovvero se per il valore di T in questione 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, se esso è maggiore della soglia allora il valore di SWI si può considerare significativo. Il procedimento seguito per l'estrazione dei dati dai file netCDF è il medesimo di quello di LST che ha permesso

di ottenere il valore di SWI in corrispondenza delle coordinate esatte del Santuario di Vicoforte; anche in questo caso per il terreno si fa l'assunzione di mezzo isotropo e omogeneo e si applica un'interpolazione di tipo lineare.

Le Figure 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14 presentano un confronto tra le variabili SSF, SWI e QFLAG. Si notano dei valori di $SWI > 100\%$, fisicamente impossibili, in corrispondenza di $SSF=2$ e QFLAG inferiore alla soglia minima indicata per quel valore di T, quindi questi valori a causa del valore di QFLAG non possono essere ritenuti affidabili. Molto probabilmente questi valori sono dovuti alla presenza di superficie congelata ($SSF=2$) che crea problemi nello strumento per l'acquisizione del dato; in generale, tali valori via via scompaiono all'aumentare di T.

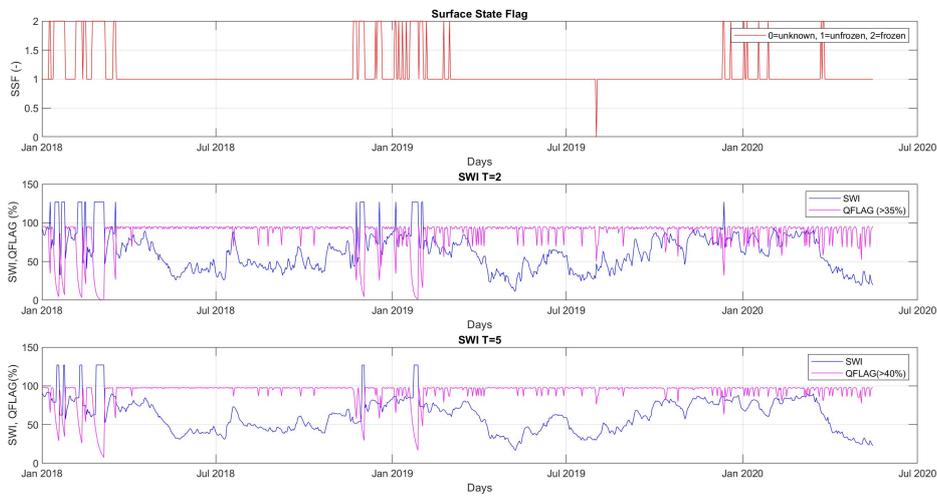


Figura 3.11: Confronto SSF,SWI e QFLAG (T=2,T=5)

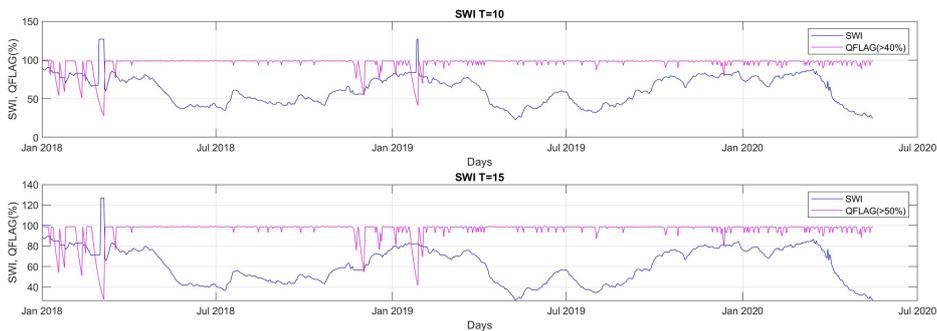


Figura 3.12: Confronto SWI e QFLAG (T=10,T=15)

3.2 – Soil Water Index (SWI)

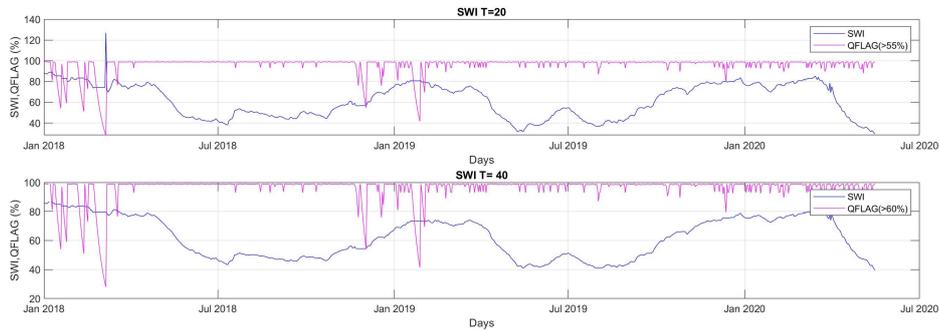


Figura 3.13: Confronto SWI e QFLAG (T=20,T=40)

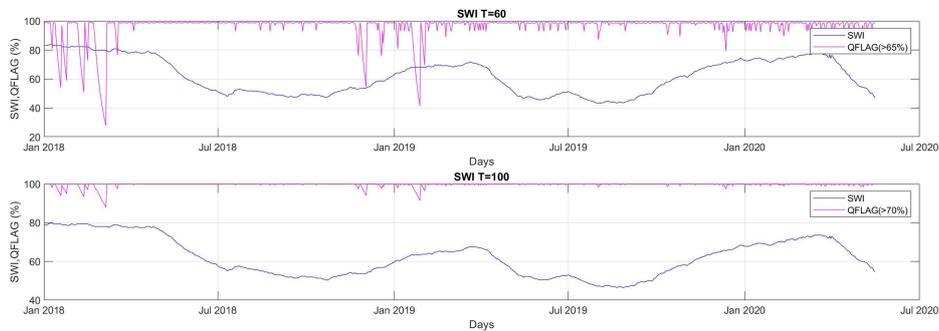


Figura 3.14: Confronto SWI e QFLAG (T=60,T=100)

Di seguito vengono riportate le serie storiche di SWI; anche in questo caso si riscontra una variazione su base stagionale, inoltre all'aumentare di T vengono meno i picchi e l'andamento di SWI diventa più uniforme e regolare. Dalle serie storiche sono stati eliminati quei valori di SWI > 100% trattati prima.

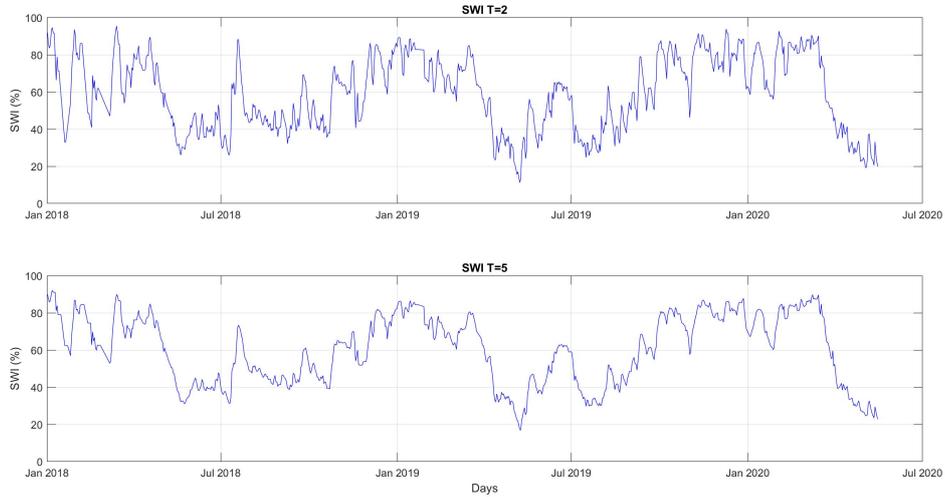


Figura 3.15: Serie storiche di SWI (T=2,T=5)

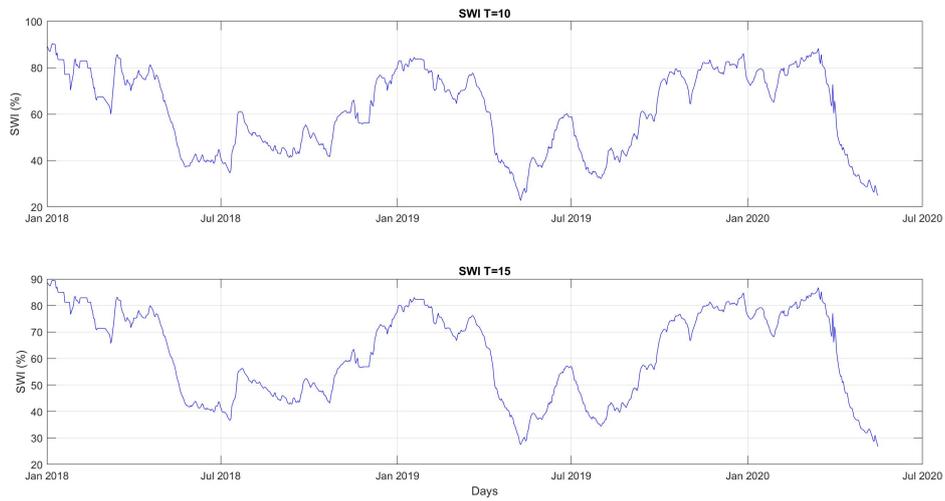


Figura 3.16: Serie storiche di SWI (T=10,T=15)

3.2 – Soil Water Index (SWI)

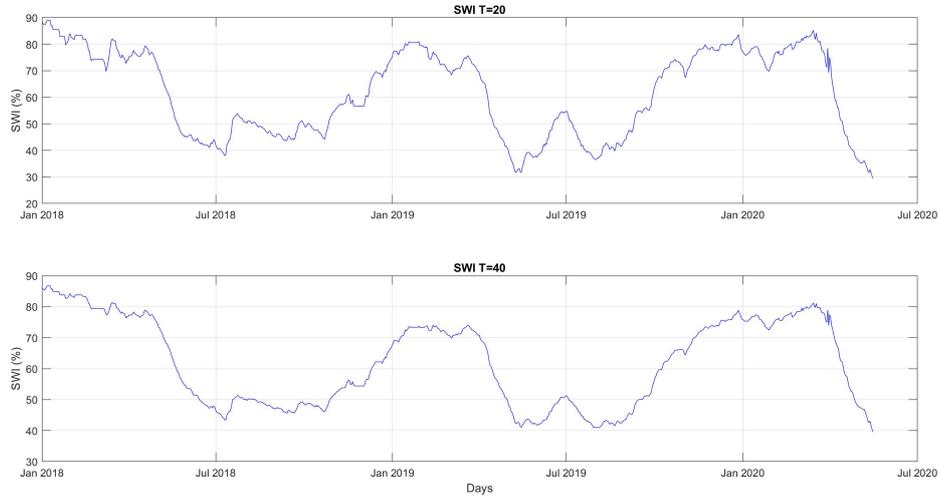


Figura 3.17: Serie storiche di SWI (T=20,T=40)

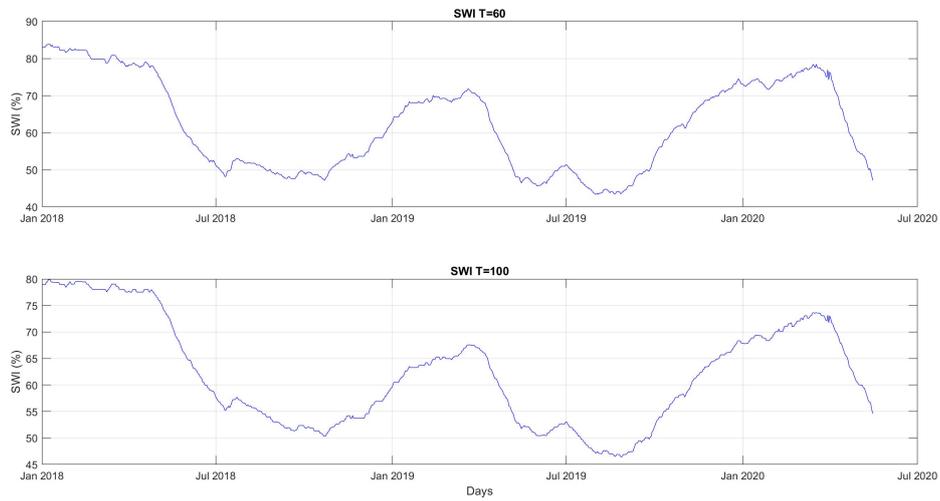


Figura 3.18: Serie storiche di SWI (T=60,T=100)

Capitolo 4

Analisi ed elaborazione dei dati satellitari

Una volta ottenute le serie storiche delle due variabili in esame, è stato effettuato uno studio di correlazione. In un primo momento l'analisi di correlazione è stata effettuata sui dati *originali* di LST e SWI; successivamente i dati sono stati processati, tramite un'operazione di inviluppo, per eliminare il rumore presente, ovvero i picchi repentini in quanto essi possono essere causa di disturbo nello studio di correlazione tra LST e SWI. Per proseguire nell'analisi, in questa seconda parte dello studio di correlazione, viene effettuata la scelta di quale SWI(T) utilizzare. Dal momento che la scelta ricade su SWI T=100, il cui andamento non è caratterizzato dalla presenza di picchi repentini, il calcolo dell'inviluppo ha riguardato solo i dati di LST che invece sono caratterizzati da molti picchi repentini negativi.

4.1 Studio di correlazione LST e SWI

Lo studio di correlazione tra LST e SWI in primo luogo è stato effettuato tramite grafici sovrapposti, in cui i dati sono stati elaborati levando le medie e scalando al massimo assoluto, e scatter plot. Da essi si nota una correlazione su base stagionale ad eccezione dei picchi in basso nella LST. Questa a livello degli scatter plot si traduce in una correlazione negativa tra i due parametri.

Infine, dai dati di LST e SWI sono stati plottati degli istogrammi su cui è stata sovrapposta una PDF (*Probability Density Function*) fittata con kernel gaussiano (Figure 4.33-4.35). Negli istogrammi sono state utilizzate 10 classi in quanto il numero di osservazioni è compreso tra 501 e 1000.

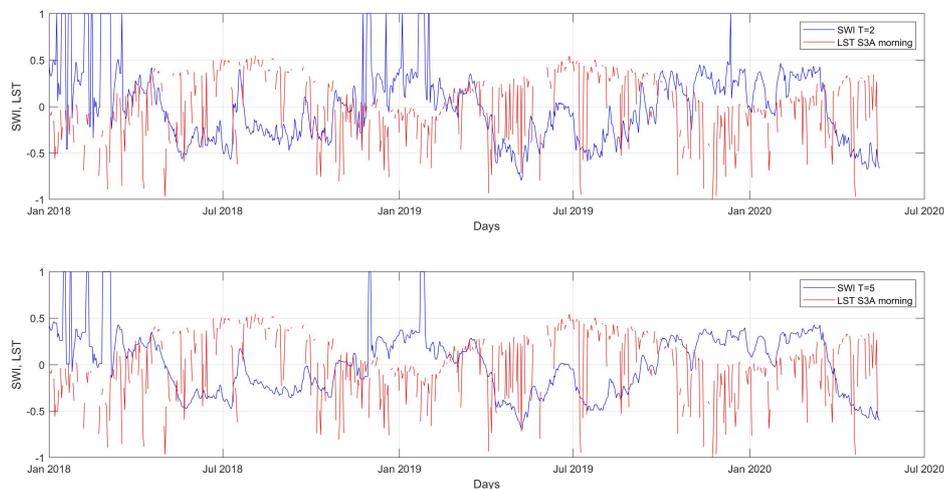


Figura 4.1: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (morning) e SWI (T=2,T=5)

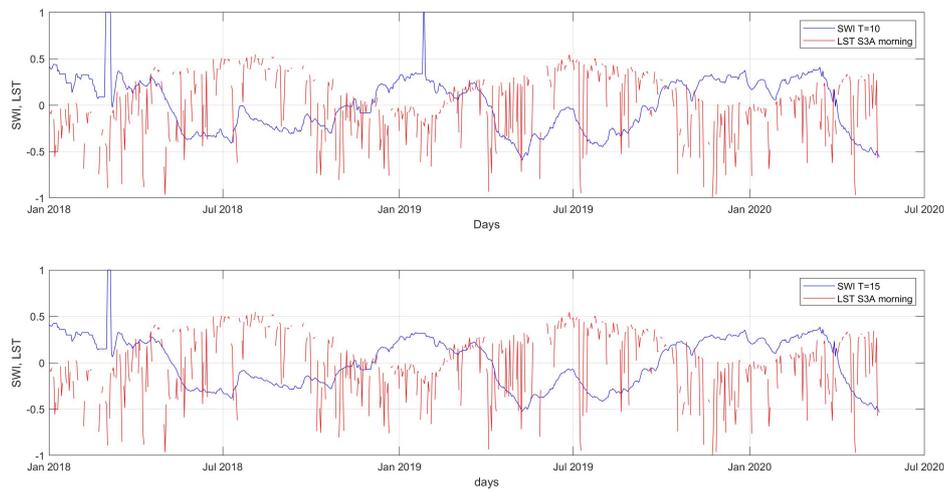


Figura 4.2: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (morning) e SWI (T=10,T=15)

4.1 – Studio di correlazione LST e SWI

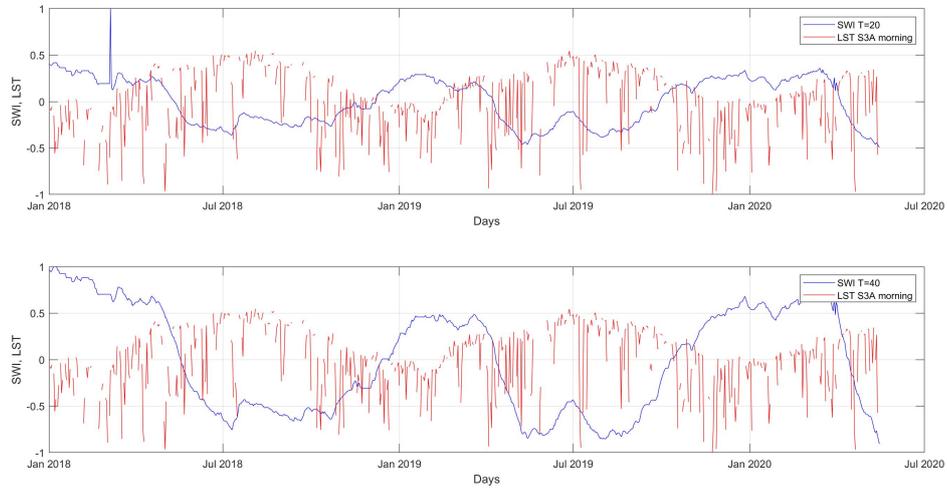


Figura 4.3: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (morning) e SWI (T=20,T=40)

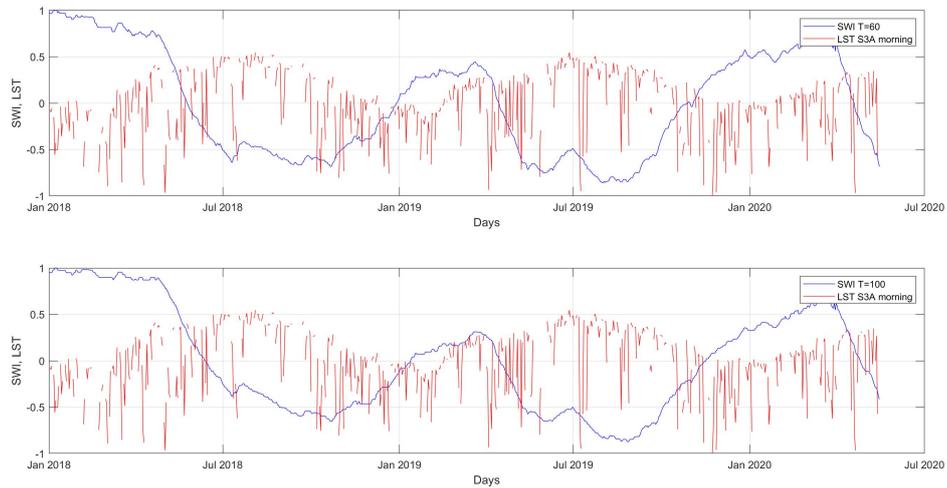


Figura 4.4: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (morning) e SWI (T=60,T=100)

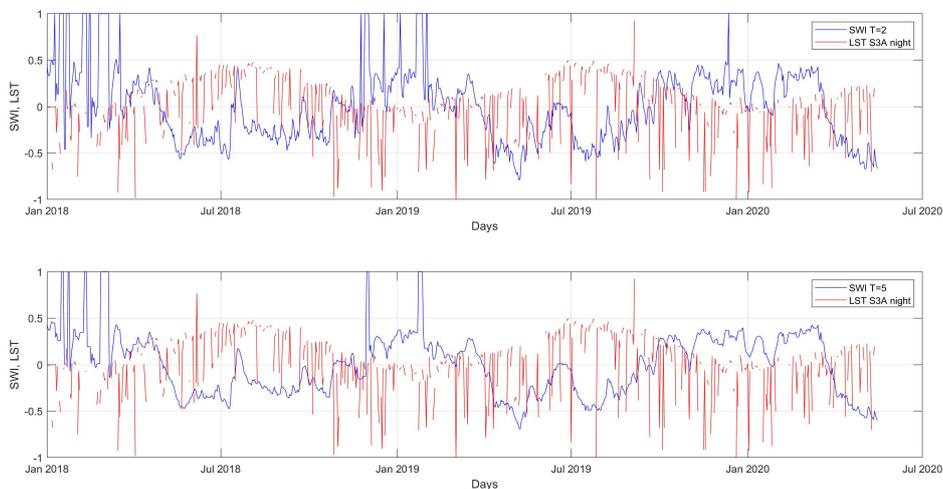


Figura 4.5: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (night) e SWI (T=2,T=5)

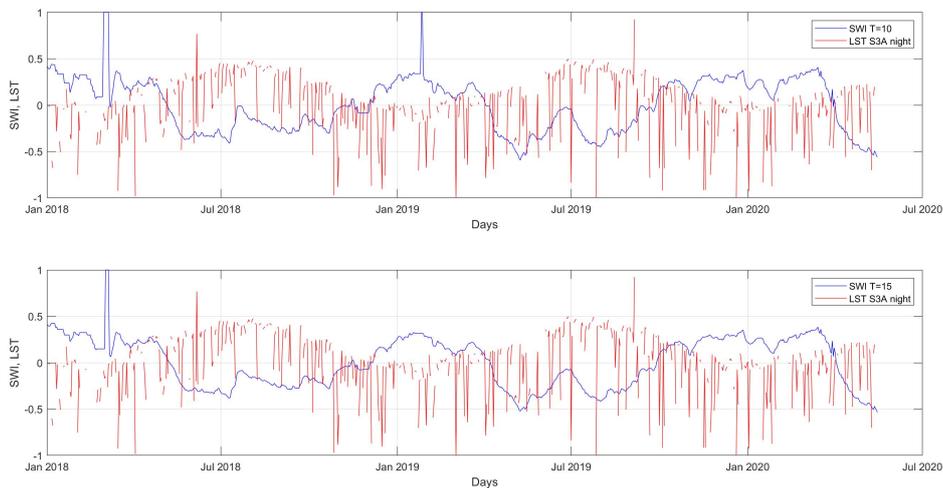


Figura 4.6: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (night) e SWI (T=10,T=15)

4.1 – Studio di correlazione LST e SWI

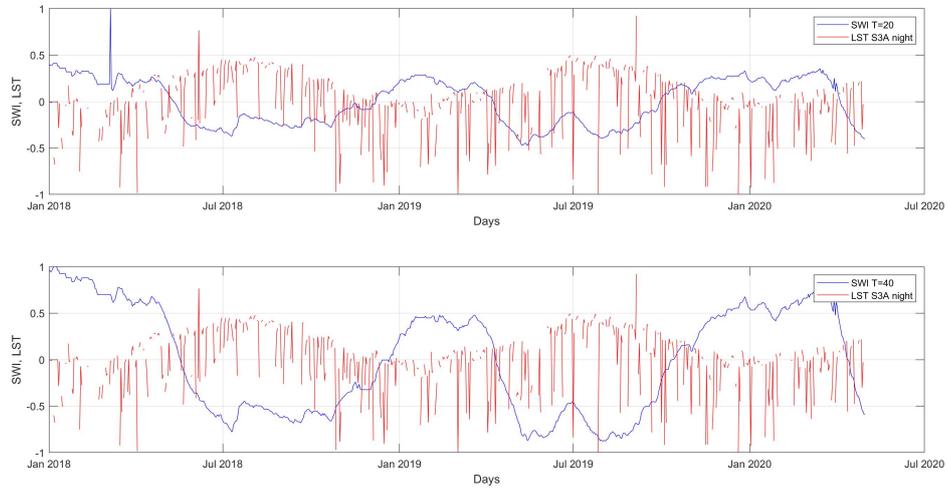


Figura 4.7: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (night) e SWI (T=20,T=40)

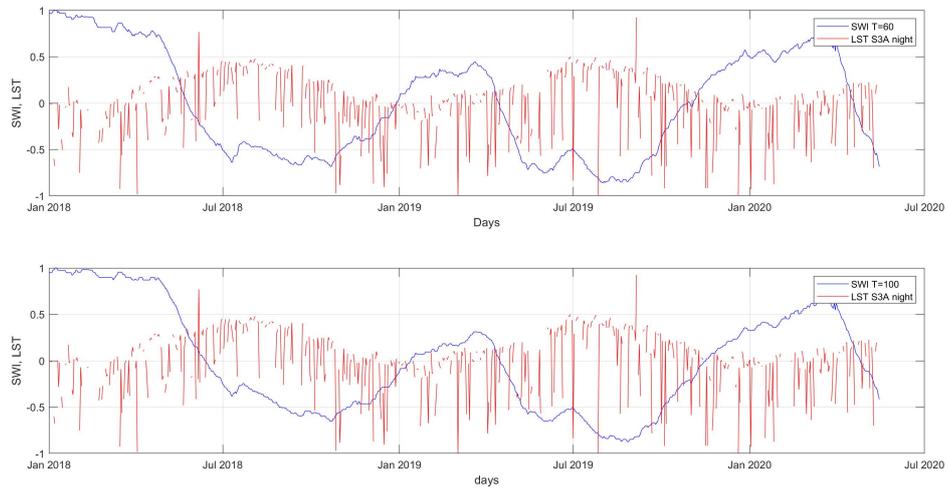


Figura 4.8: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (night) e SWI (T=60,T=100)

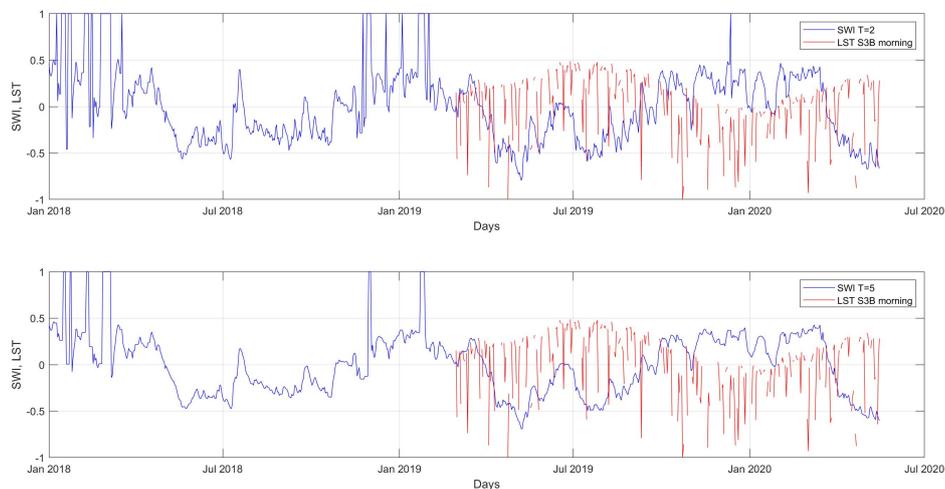


Figura 4.9: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (morning) e SWI (T=2,T=5)

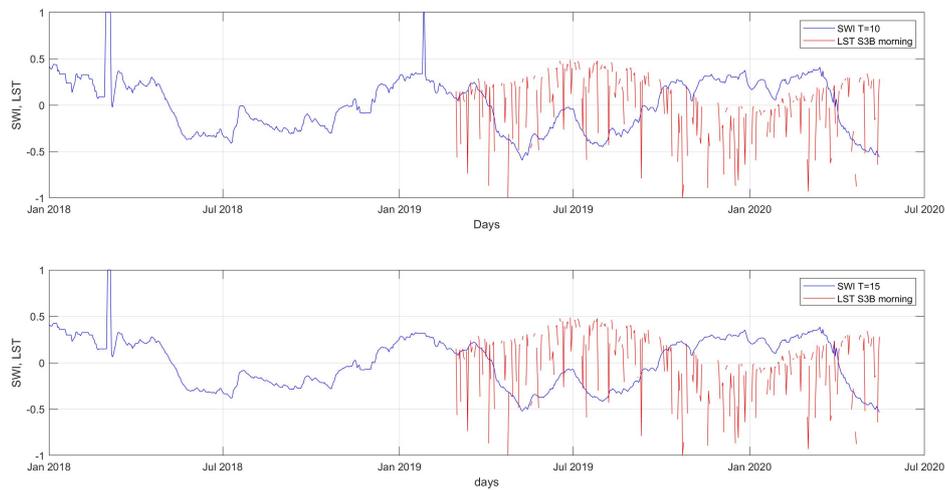


Figura 4.10: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (morning) e SWI (T=10,T=15)

4.1 – Studio di correlazione LST e SWI

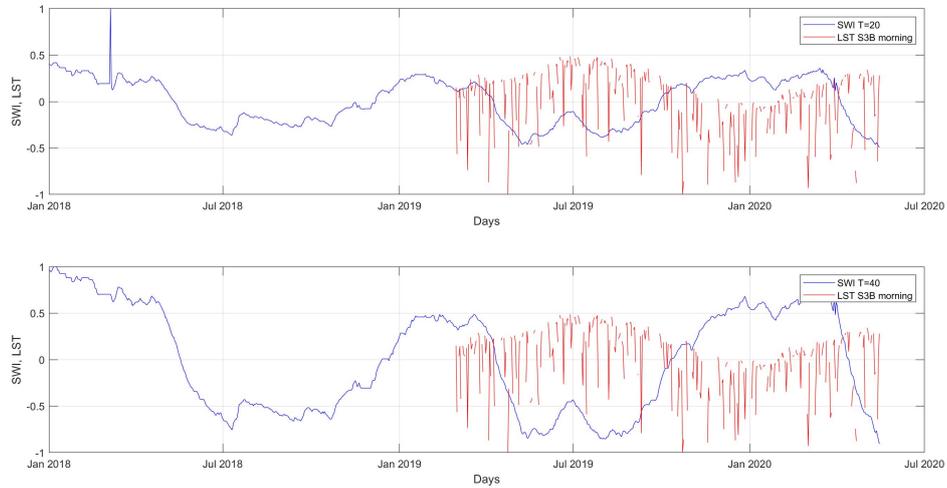


Figura 4.11: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (morning) e SWI (T=20,T=40)

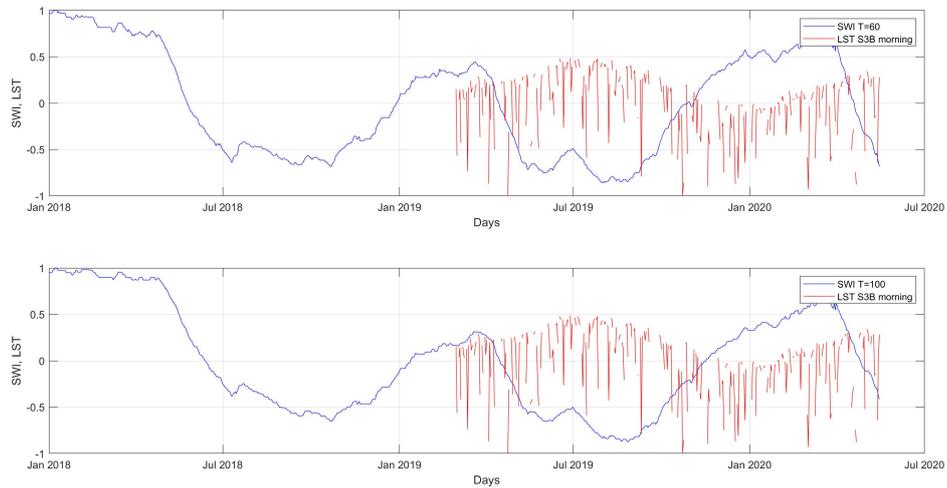


Figura 4.12: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (morning) e SWI (T=60,T=100)

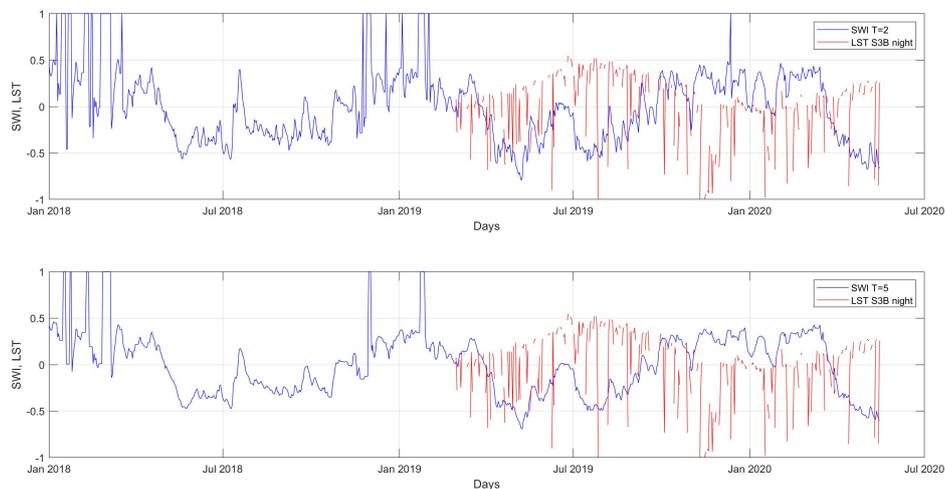


Figura 4.13: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (night) e SWI (T=2,T=5)

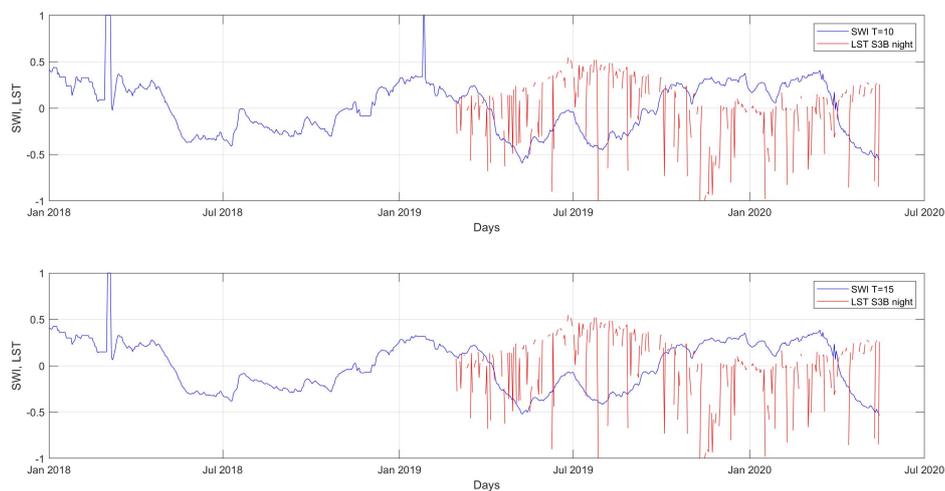


Figura 4.14: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (night) e SWI (T=10,T=15)

4.1 – Studio di correlazione LST e SWI

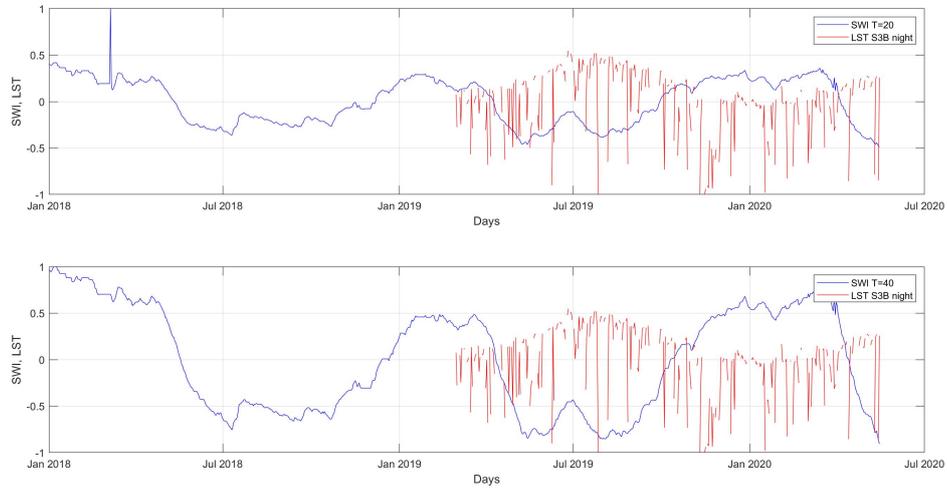


Figura 4.15: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (night) e SWI (T=20,T=40)

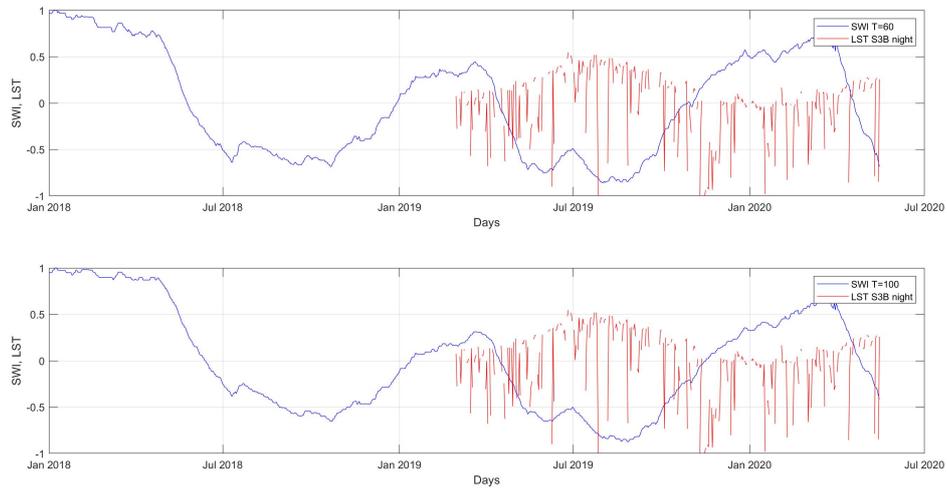


Figura 4.16: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3B (night) e SWI (T=60,T=100)

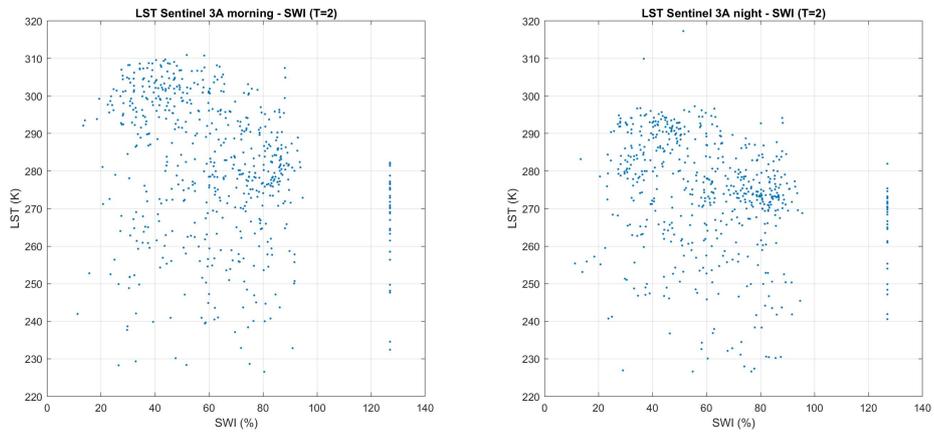


Figura 4.17: Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=2

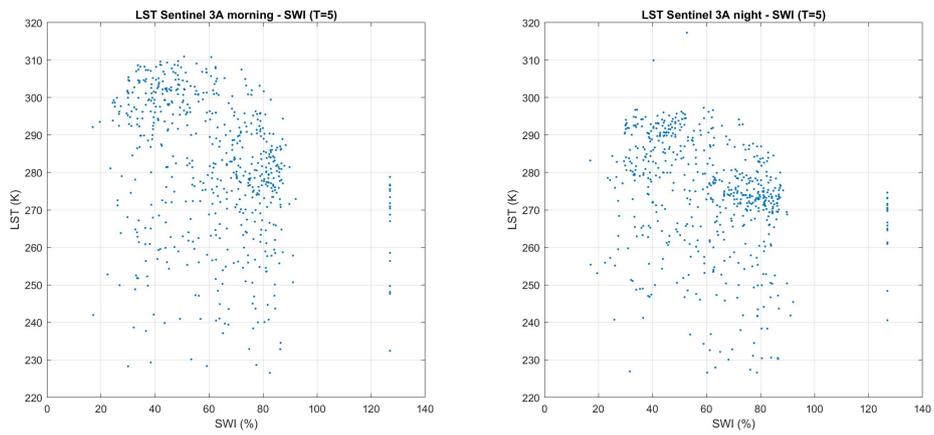


Figura 4.18: Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=5

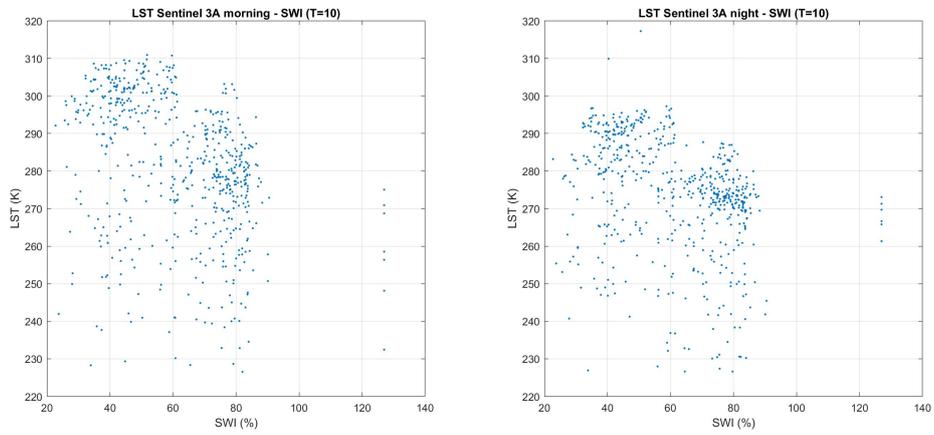


Figura 4.19: Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=10

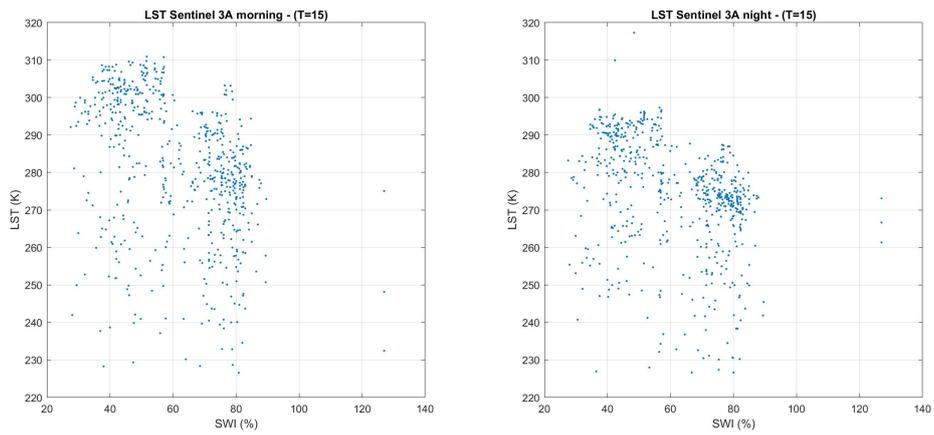


Figura 4.20: Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=15

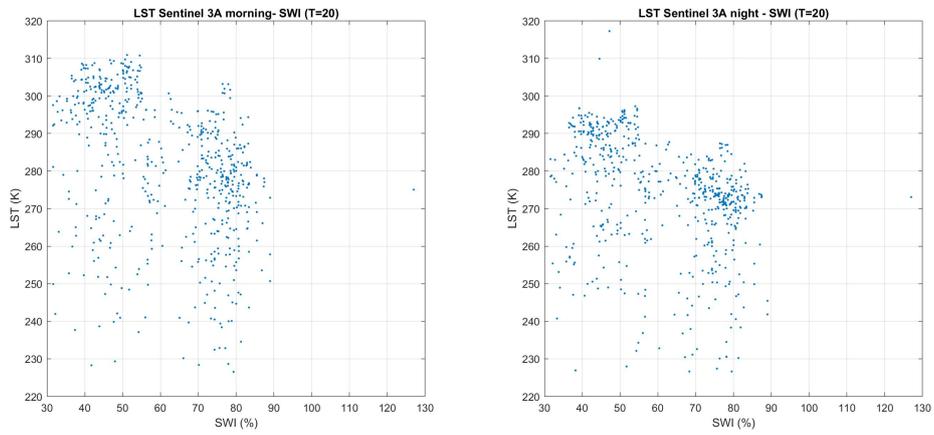


Figura 4.21: Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=20

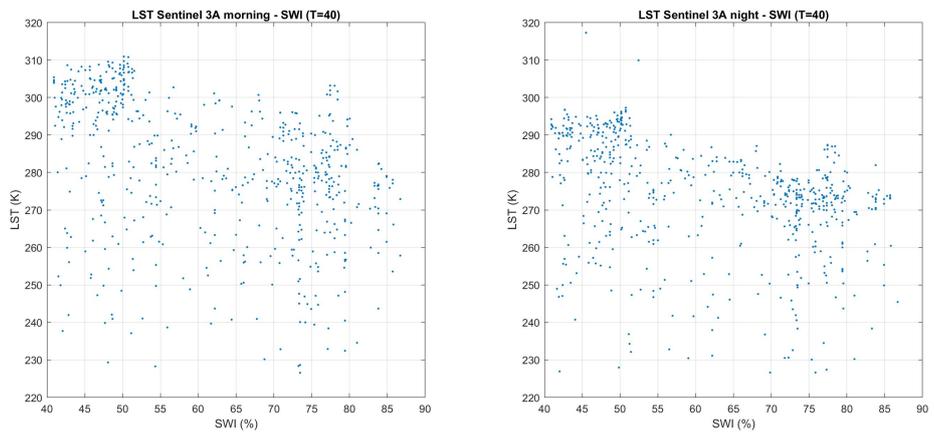


Figura 4.22: Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=40

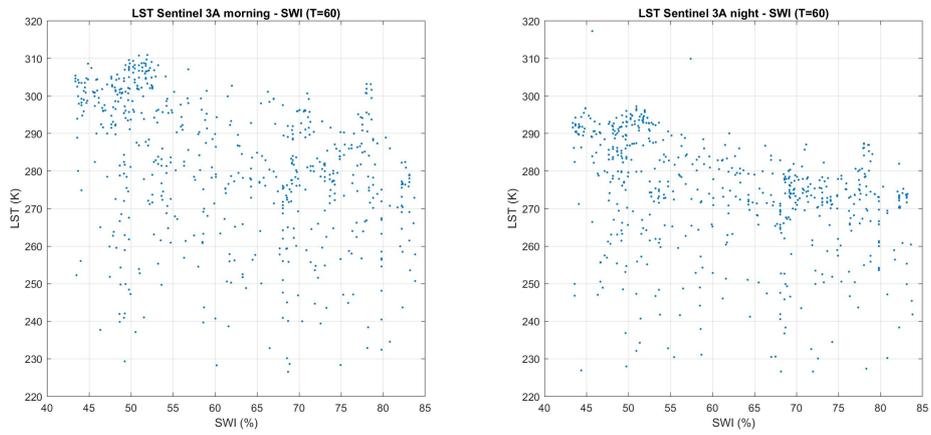


Figura 4.23: Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=60

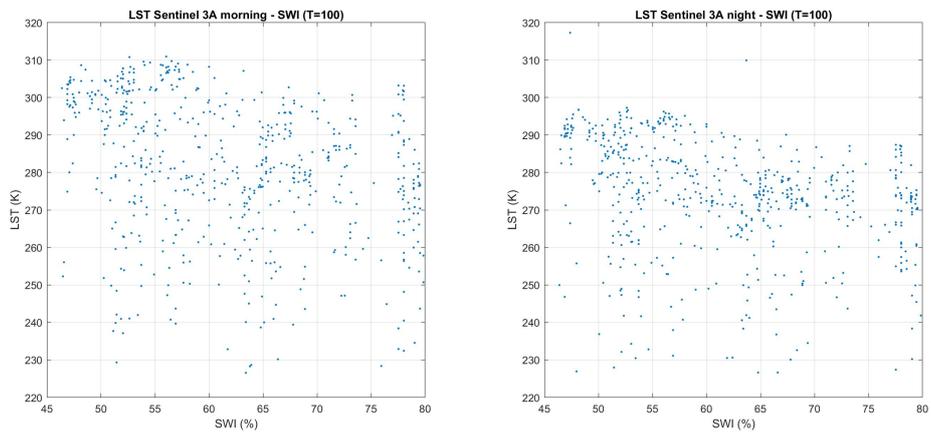


Figura 4.24: Scatter plot LST Sentinel-3A e SWI T=100

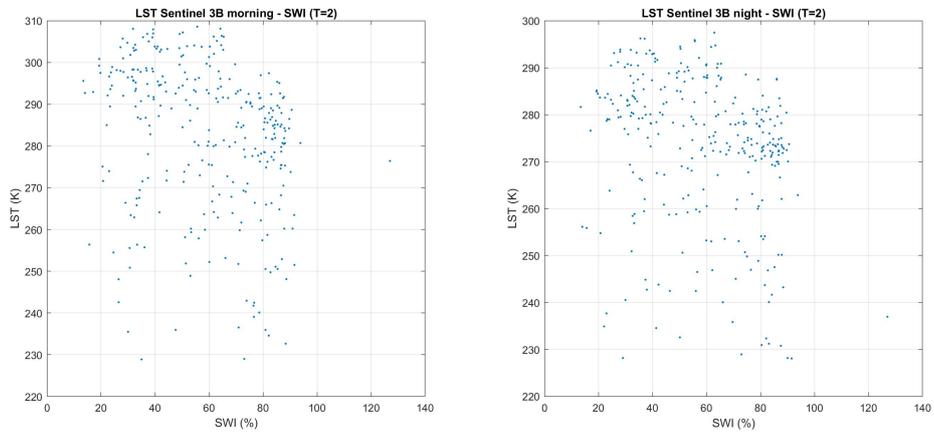


Figura 4.25: Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=2

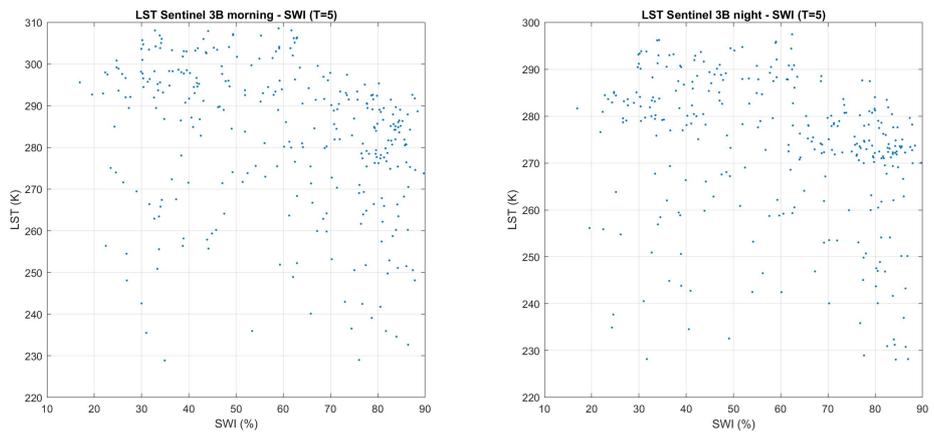


Figura 4.26: Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=5

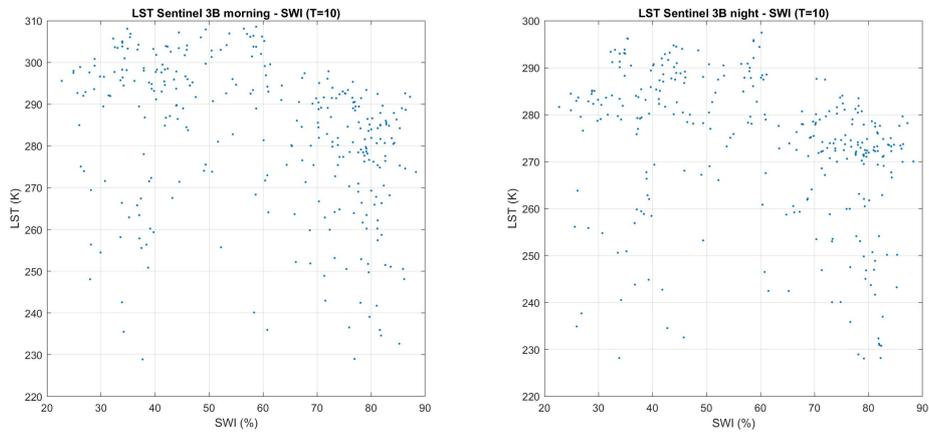


Figura 4.27: Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=10

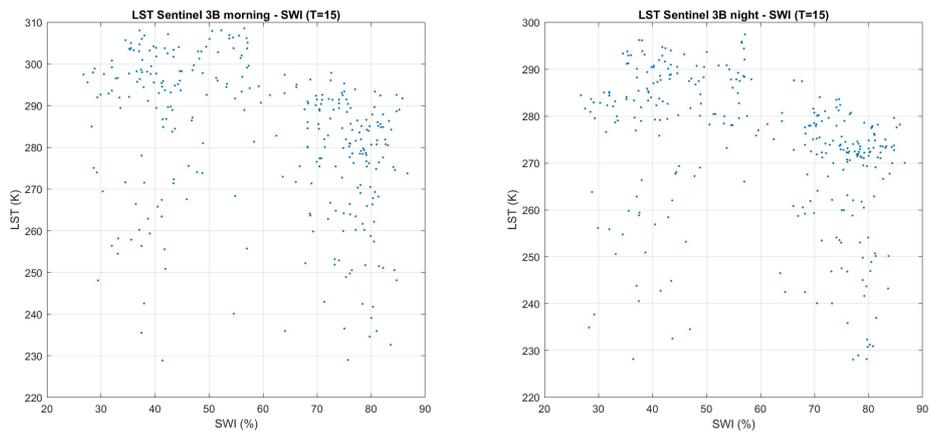


Figura 4.28: Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=15

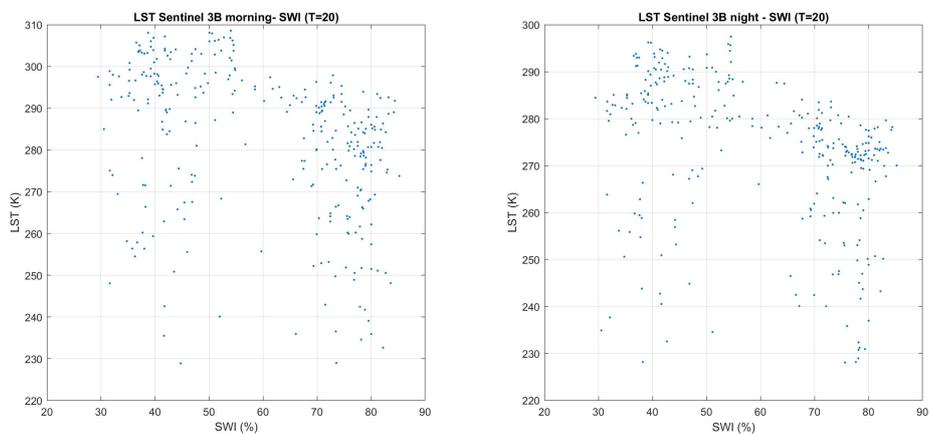


Figura 4.29: Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=20

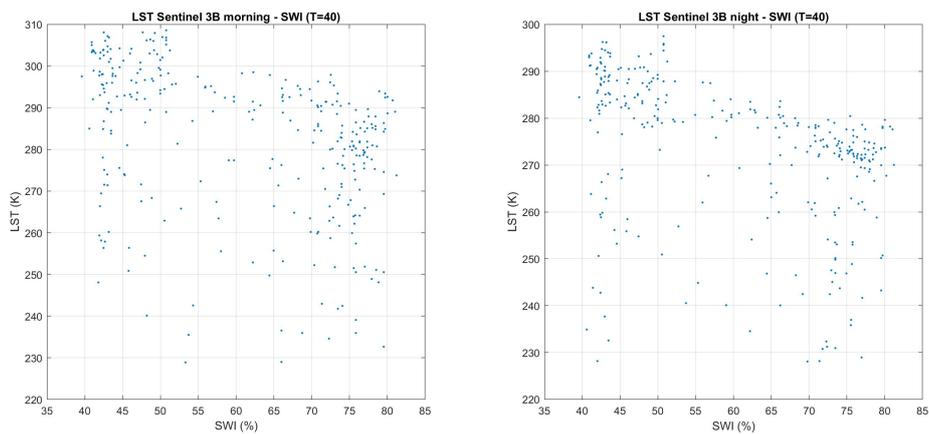


Figura 4.30: Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=40

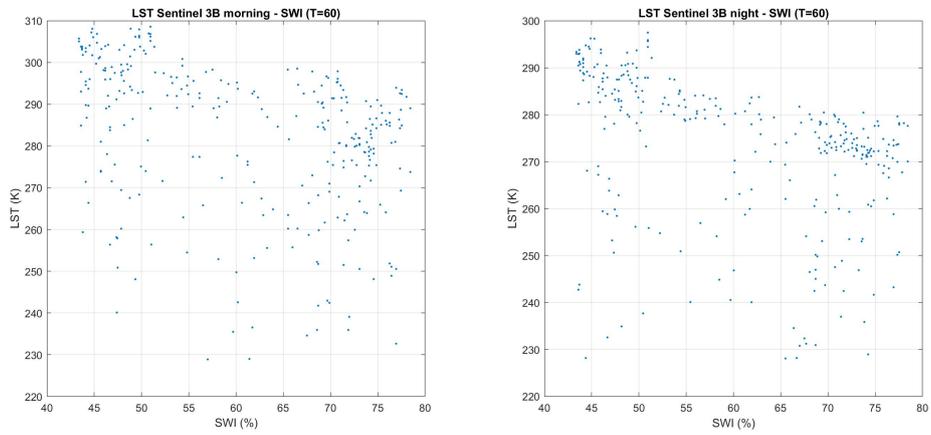


Figura 4.31: Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=60

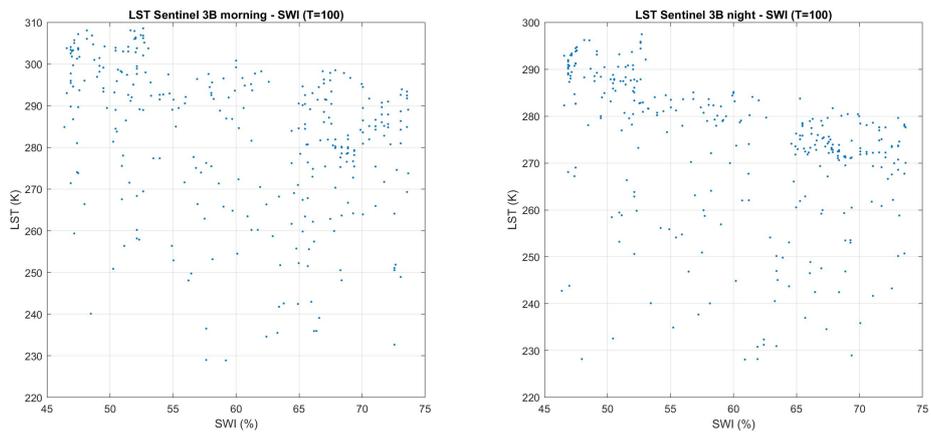
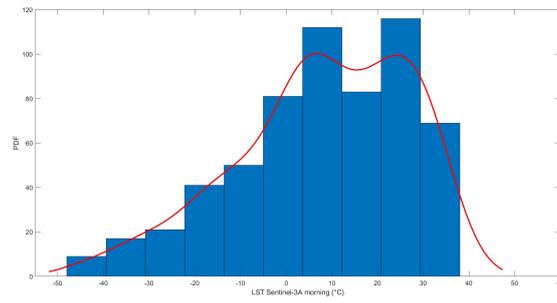
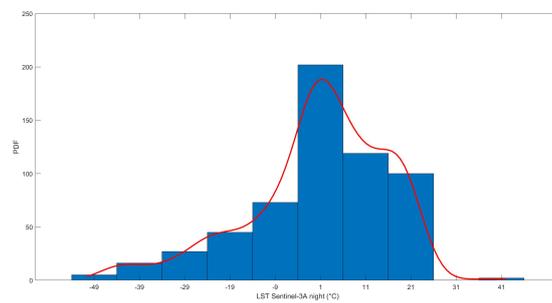


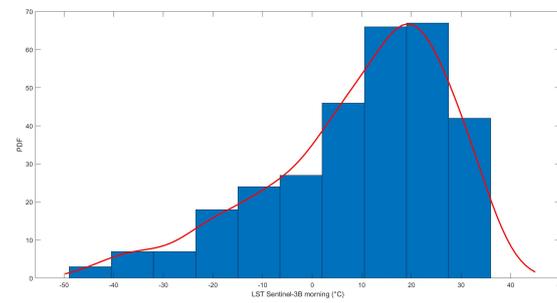
Figura 4.32: Scatter plot LST Sentinel-3B e SWI T=100



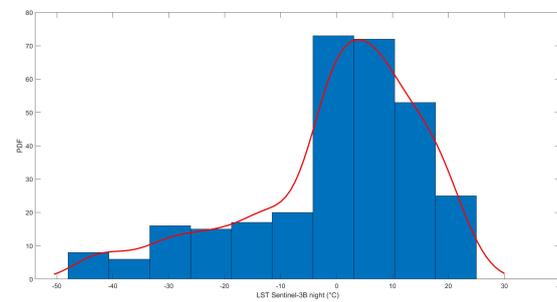
(a) LST Sentinel-3A morning



(b) LST Sentinel-3A night

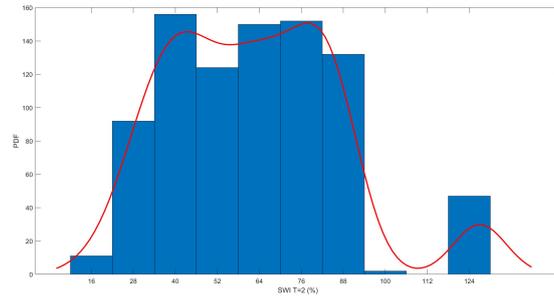


(c) LST Sentinel-3B morning

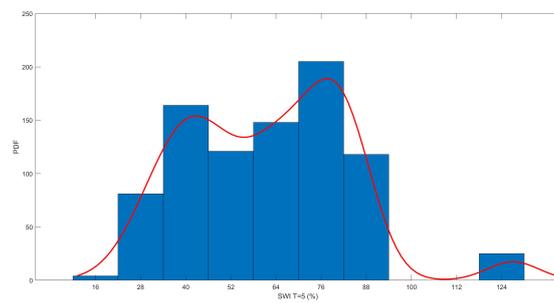


(d) LST Sentinel-3B night

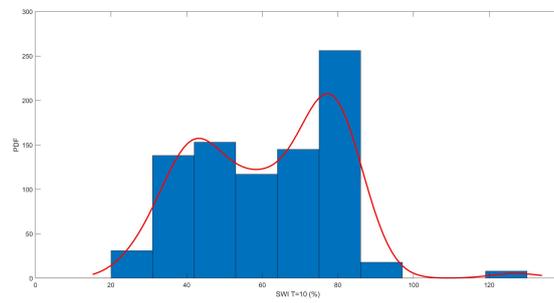
Figura 4.33: Istogramma e PDF osservazioni LST



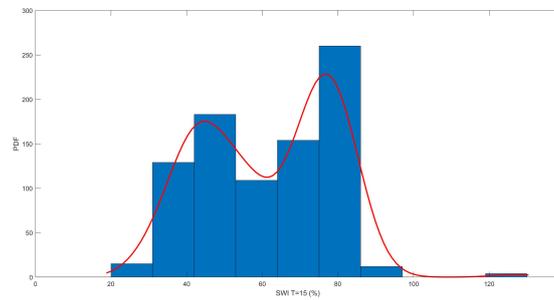
(a) SWI T=2



(b) SWI T=5

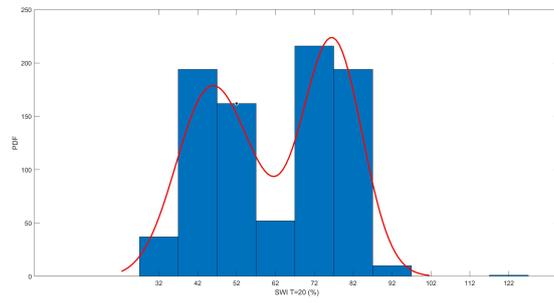


(c) SWI T=10

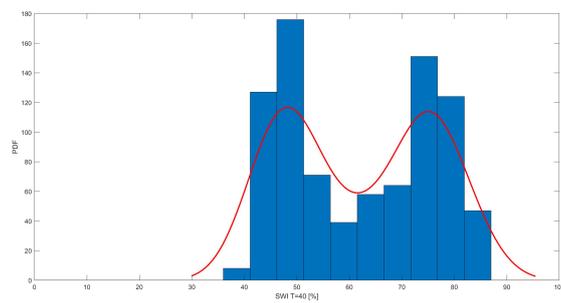


(d) SWI T=15

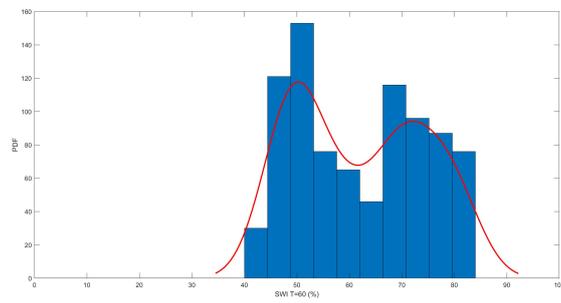
Figura 4.34: Istogramma e PDF osservazioni SWI (T=2,T=5,T=10,T=15)



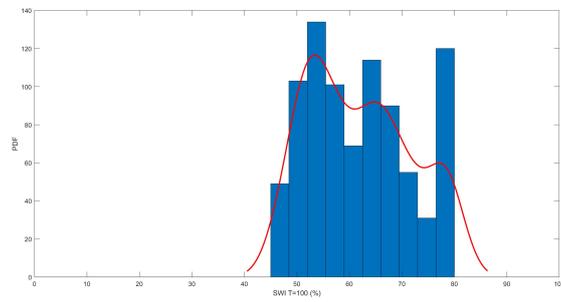
(a) SWI T=20



(b) SWI T=40



(c) SWI T=60



(d) SWI T=100

Figura 4.35: Istogramma e PDF osservazioni SWI (T=20,T=40,T=60,T=100)

Nel caso di LST le distribuzioni dei dati del satellite A (Figure 4.33 a-b) hanno andamento bimodale sia per quanto riguarda le registrazioni della mattina che quelle della sera, con una bi-modalità più accentuata nel primo caso; invece, le distribuzioni dei dati del satellite B presentano entrambe un solo picco che si attesta tra 16 e 27 °C nei dati della mattina (Figura 4.33c) e tra -3 e 7 °C in quelli della sera (Figura 4.33d).

In Figura 4.34 sono rappresentati gli istogrammi dei dati di SWI per $T=2, 5, 10$ e 15 , per questi valori di T le distribuzioni sono multimodali e l'andamento non risulta continuo; nel caso di $SWI(T=2)$ e $SWI(T=5)$ sono presenti 3 picchi, mentre per $SWI(T=10)$ e $SWI(T=15)$ le distribuzioni sono bimodali e viene meno il picco all'estremità destra della distribuzione che rappresenta i valori di $SWI > 100\%$ riscontrati maggiormente nelle serie di dati con valori di T più bassi. In Figura 4.35 sono rappresentati gli istogrammi di SWI per i valori più alti di T ($20, 40, 60, 100$), nel caso di $SWI(T=20)$ sono ancora presenti dei valori superiori a 100% quindi l'andamento non è ancora continuo e la distribuzione è bimodale; tali valori vengono per $T \geq 40$, a partire da quest'ultimo valore di T le distribuzioni hanno andamento continuo e sono caratterizzate da minore dispersione; per $SWI(T=40)$ e $SWI(T=60)$ la distribuzione è bimodale, mentre per $SWI(T=100)$ è multimodale.

4.2 Scelta di SWI(T)

Per la scelta del $SWI(T)$ più adatto per questa analisi, si è fatto riferimento alle raccomandazioni riportate nel QAR (*Quality Assessment Report*[17]) di SWI a cui si può fare riferimento nei casi in cui non si hanno a disposizione informazioni locali specifiche per la scelta di quale $SWI(T)$ usare. Le raccomandazioni da seguire si basano sulle tabelle che vengono riportate nelle seguenti figure (Figura 4.36, 4.37 e 4.39).

	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

Figura 4.36: Layer di riferimento dei modelli [17]

	Main Climate	Köppen-Geiger Classification
Class 1	Tropical	Af, Am, As, Aw
Class 2	Hot	BWk, BWk, 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

Figura 4.37: Classi climatiche [17]

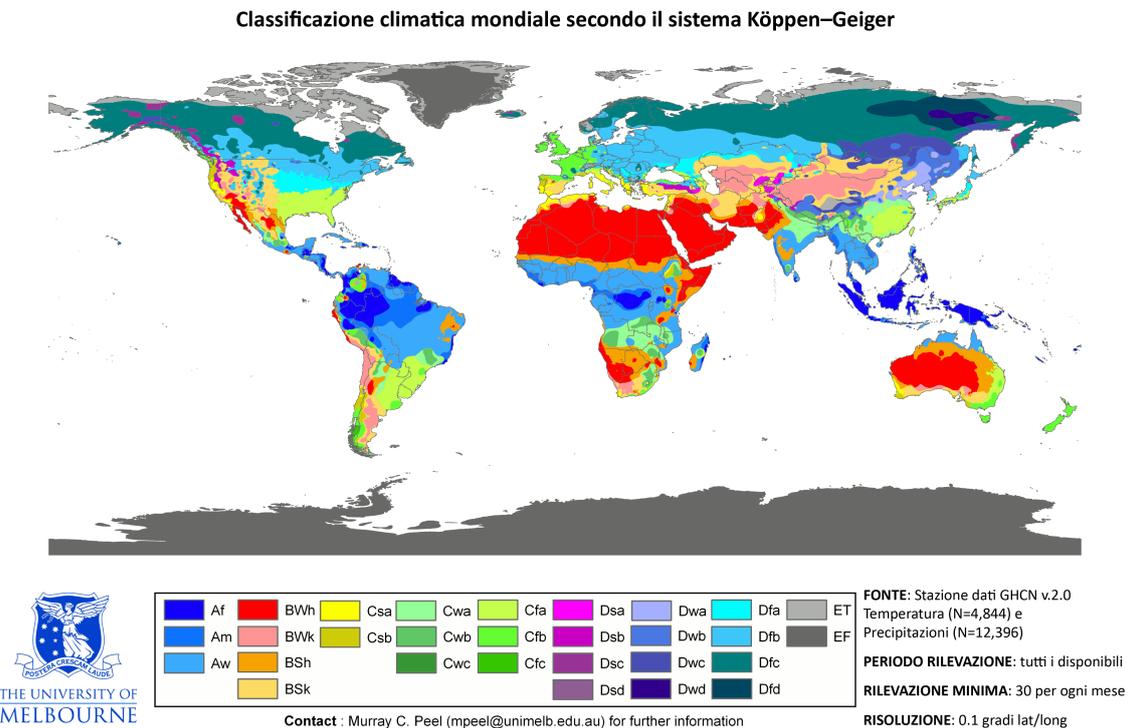


Figura 4.38: Classificazione climatica mondiale secondo il sistema Köp-
pen–Geiger[20]

	GLDAS				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	-	-

Figura 4.39: Valori di T consigliati in base al layer e alla classe climatica[17]

Nella prima tabella sono contenute le suddivisioni in layer dei due diversi dataset usati per validare i valori di SWI; i due dataset provengono dai due modelli (LSM -*Land Surface Model*) GDLAS e ERA-Land, il primo è stato realizzato da studiosi della NASA, mentre il secondo è europeo; essi costituiscono una sorta di database a livello globale e contengono diverse informazioni per il monitoraggio ambientale tra cui anche quelle inerenti all'umidità del suolo. Dalla tabella in Figura 4.36 si sceglie il layer in base alla profondità di interesse; dopodiché, bisogna anche individuare la classe climatica a cui appartiene la zona in esame. Nella tabella presentata in Figura 4.37 sono elencate le classi e le sottoclassi climatiche della classificazione mondiale di Köppen–Geiger [20](Figura 4.38). Infine, viene usata un'ultima tabella all'interno di cui si trovano i valori di T consigliati per ogni singolo layer e classe; i valori di T sono ottenuti dalla validazione di SWI, durante cui è stato calcolato il coefficiente di correlazione tra SWI e il valore di *Soil Moisture* modellato in GLDAS e ERA-Land per ogni livello di profondità. Alla fine di questo studio, a ogni layer è stato attribuito il valore di T con il coefficiente di correlazione maggiore [17].

Dal momento che le fondazioni del Santuario si attestano a una profondità di 3.6 m dal piano campagna, è stato scelto il quarto layer (Figura 4.36) che è quello più vicino a tale profondità; invece, per quanto riguarda la classe climatica la zona del Santuario di Vicoforte si trova nella sottoclasse *Cfa* (Figura 4.38) che corrisponde alla classe 4 della tabella in Figura 4.37.

Nella terza tabella (Figura 4.39) per il layer 4 e per la classe 4 sono consigliati i seguenti valori di T:

- $T = 40 - 100$ (GLDAS);
- $T = 60 - 100$ (ERA-Land);

I valori di $T=60$ e $T=100$ sono comuni a entrambi i modelli, però nel caso di SWI($T=60$) i valori di QFLAG inferiori alla soglia sono più frequenti, di conseguenza alcuni dati non sarebbero utilizzabili perché poco significativi, per tali motivi la scelta è ricaduta su SWI($T=100$). Si noti che in Figura 4.39 sono indicati valori di T pari a 1 che però non si riscontrano nel caso della tipologia di SWI (SWI1km) usata in questa analisi; infatti, i valori di $T=1$ sono riferiti a un'altra tipologia di SWI (SWIv3), per questo motivo nel caso di SWI1km i valori di $T=1$ devono essere sostituiti con $T=2$.

4.3 Inviluppo dei dati di LST

Come si nota dalle serie storiche dei dati di LST riportate in Figura 3.6 e 3.7, l'andamento è caratterizzato da molti abbassamenti repentini che non rappresentano reali variazioni dei dati di temperatura in quanto troppo veloci, inoltre i valori assunti da tali picchi risultano poco significativi, infatti i picchi negativi si attestano intorno ai $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ circa. Per tali motivi si è deciso di tenere in conto l'andamento di LST caratterizzato dalle variazioni rappresentate dai picchi superiori. Per ottenere ciò è stato calcolato l'inviluppo del segnale originale dei dati di LST ed è stato utilizzato l'inviluppo superiore. È stato possibile ottenere l'inviluppo in MATLAB tramite una funzione che restituisce l'inviluppo di picco del segnale utilizzando una *spline* sui massimi locali separati da un certo numero N di punti [21]; più alto è N più il segnale diventa uniforme. In questo caso è stato scelto $N=10$; inoltre, prima del calcolo dell'inviluppo sono stati eliminati alcuni picchi negativi con valori superiori a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, poco significativi ma in grado di influenzare molto il risultato dell'inviluppo.

In Figura 4.40 e 4.41 si riporta il confronto tra il segnale originale di LST e il successivo inviluppo.

In seguito all'operazione di inviluppo le serie storiche dei dati di LST dei satelliti Sentinel-3 A e B sono quelle rappresentate in Figura 4.42 e 4.43.

Una volta effettuato l'inviluppo, sono stati nuovamente ottenuti gli istogrammi con sovrapposte le PDF per osservare la variazione delle distribuzioni dei dati di LST, i grafici appena citati sono riportati in Figura 4.44.

4.3 – Involuppo dei dati di LST

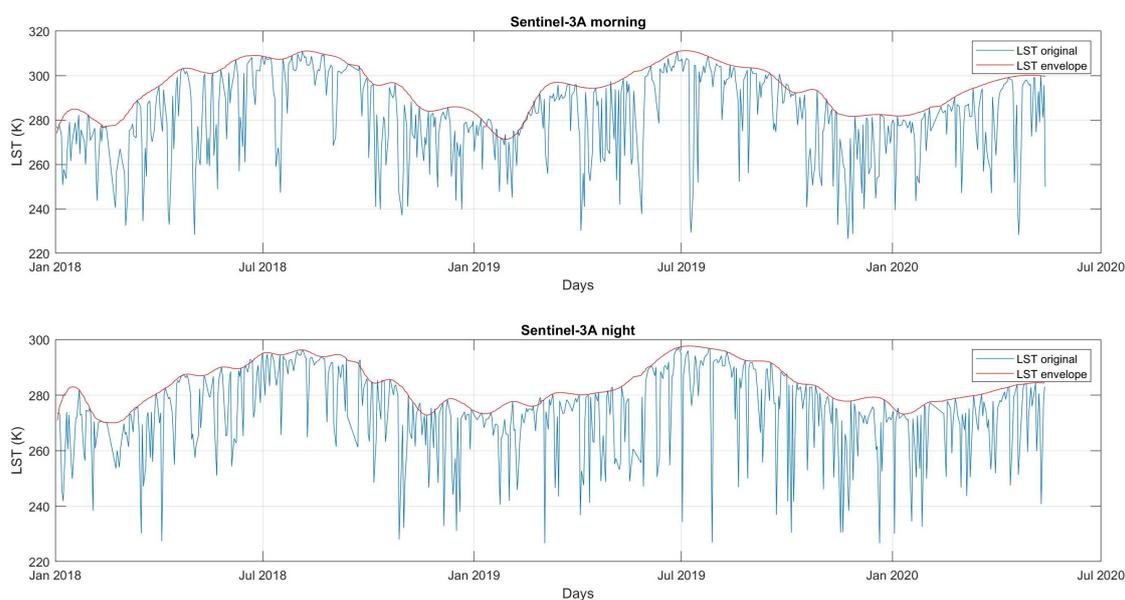


Figura 4.40: Confronto dati LST Sentinel-3A originale e dati LST ottenuti dall'involuppo

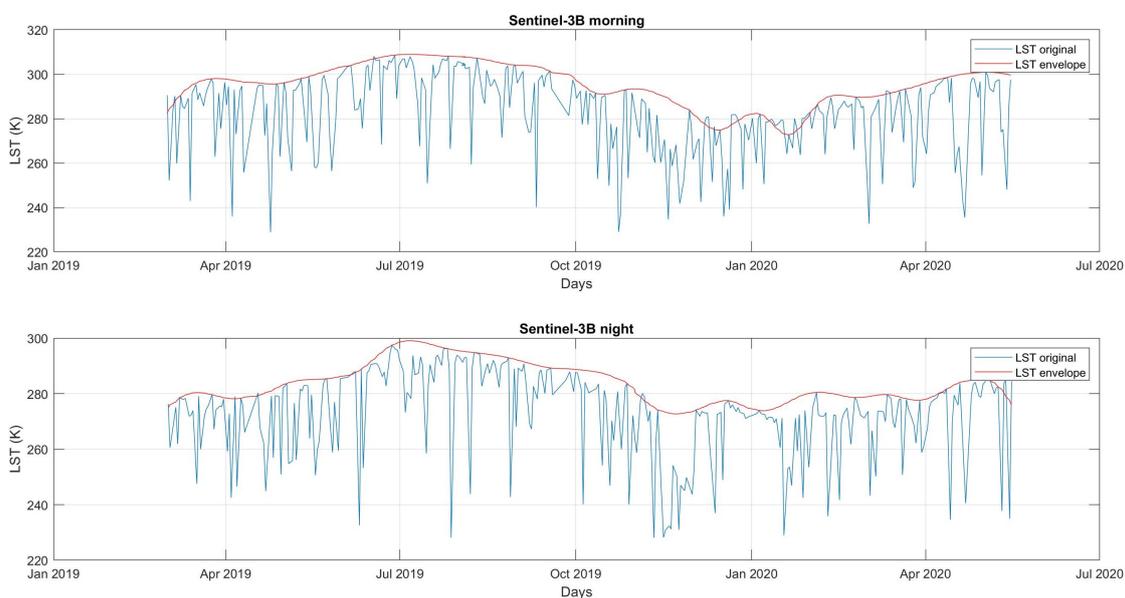


Figura 4.41: Confronto dati LST Sentinel-3B originale e dati LST ottenuti dall'involuppo

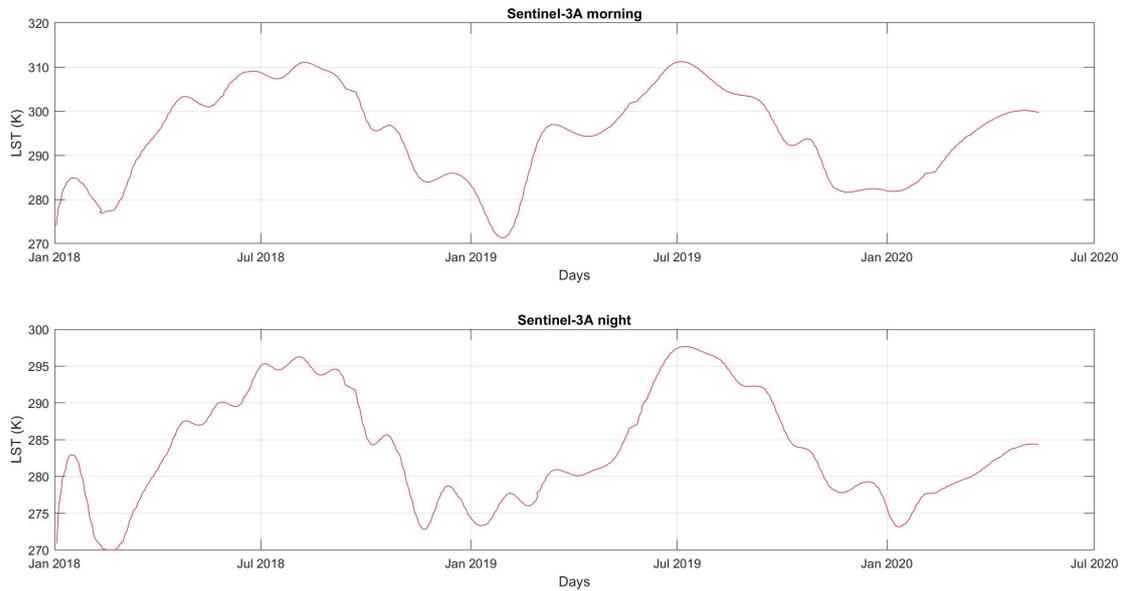


Figura 4.42: Serie storiche LST Sentinel-3A in seguito all'operazione di inviluppo

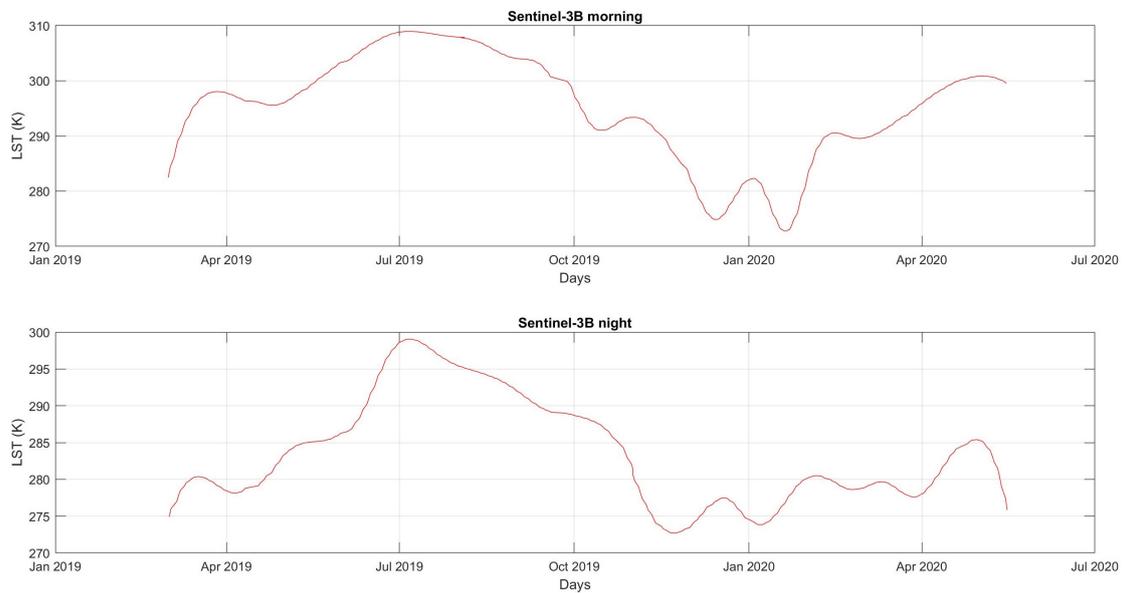
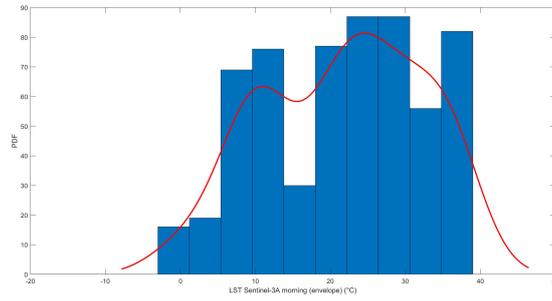
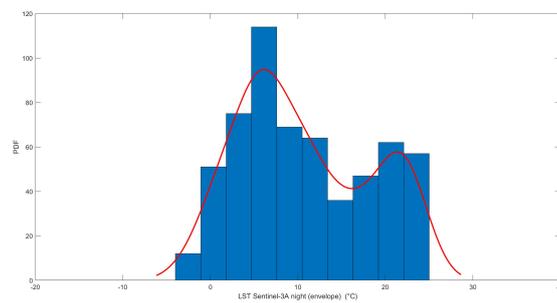


Figura 4.43: Serie storiche LST Sentinel-3B in seguito all'operazione di inviluppo

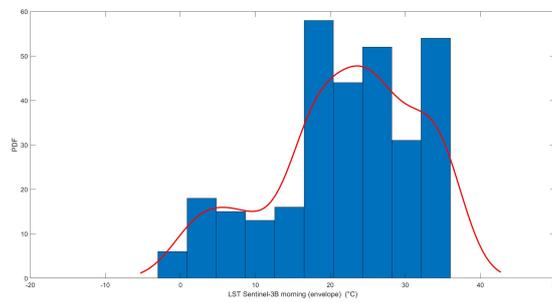
4.3 – Involuppo dei dati di LST



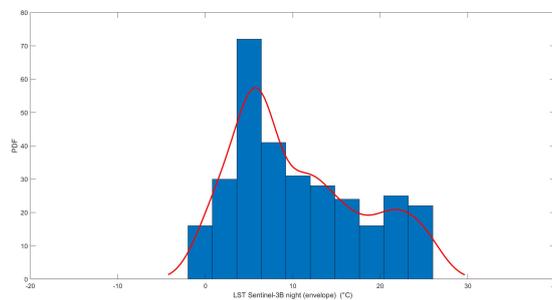
(a) LST Sentinel-3A morning



(b) LST Sentinel-3A night



(c) [LST Sentinel-3B morning



(d) LST Sentinel-3B night

Figura 4.44: Istogramma e PDF osservazioni LST in seguito all'operazione di involuppo

Da un confronto con gli istogrammi riportati in Figura 4.33 (prima dell'operazione di inviluppo) e Figura 4.44 (dopo l'operazione di inviluppo) si notano alcune variazioni che vengono riportate qui di seguito:

- LST Sentinel-3A morning (4.44 a): la dispersione si riduce e i dati si concentrano in corrispondenza di valori maggiori di temperatura, questo perché sono stati eliminati i picchi negativi quindi i valori appartenenti alle classi all'estremità sinistra della distribuzione. Rimane la bimodalità, ma la distribuzione appare più uniforme ad eccezione della variazione in corrispondenza di circa 15 °C.
- LST Sentinel-3A night (4.44 b): come nel caso dei dati della mattina, la dispersione si riduce e i dati si concentrano in corrispondenza di valori maggiori di temperatura sempre in seguito all'operazione di inviluppo; inoltre, in questo caso la distribuzione diventa continua. Rispetto ai dati della mattina vi è meno dispersione perché i valori massimi che LST assume sono più bassi. La distribuzione diventa bi-modale con picchi in corrispondenza di circa 8°C e 20°C.
- LST Sentinel-3B morning (4.44 c): anche in questo caso la dispersione risulta essere minore dopo l'inviluppo; i dati si concentrano intorno ai 20-25 °C, si riscontra anche la presenza di un altro leggero picco intorno ai 5°C ma è meno rilevante. Rispetto ai dati del satellite A sia della mattina le classi all'estremità destra assumono valori leggermente inferiori.
- LST Sentinel-3B night (4.44 d): la dispersione è minore dopo l'inviluppo e i dati si concentrano intorno a 8°C; rispetto ai dati della mattina le osservazioni sono distribuite in maniera più uniforme e graduale.

4.4 Relazione LST-SWI

Da qui in avanti viene effettuata un'ulteriore selezione dei dati precedentemente analizzati, infatti le analisi sono svolte considerando per la variabile LST i dati delle registrazioni della mattina del satellite A, in quanto sono più numerose rispetto a quelle del satellite B e anche per coerenza con il successivo studio di correlazione con le frequenze del Santuario di cui si hanno le identificazioni solo della mattina. Di conseguenza, lo studio di correlazione di seguito riportato è effettuato solo per i dati di LST del satellite A e i dati di SWI T=100.

In primo luogo si riportano i grafici sovrapposti di LST e SWI (Figura 4.45), in cui anche in questo caso i dati sono stati elaborati levando le medie e scalando al massimo assoluto, successivamente si riporta lo scatter plot (Figura 4.46). In questa fase è stato possibile calcolare anche il coefficiente di correlazione R dal momento

che sono stati eliminati i picchi negativi di LST che prima avrebbero alterato il valore di tale coefficiente. Il coefficiente di correlazione è definito come segue:

$$R(x, y) = \frac{cov(x, y)}{\sqrt{\sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2}} \quad (4.1)$$

dove:

- $cov(x, y)$ è la covarianza delle due variabili;
- σ_x è la varianza di x;
- σ_y è la varianza di y.

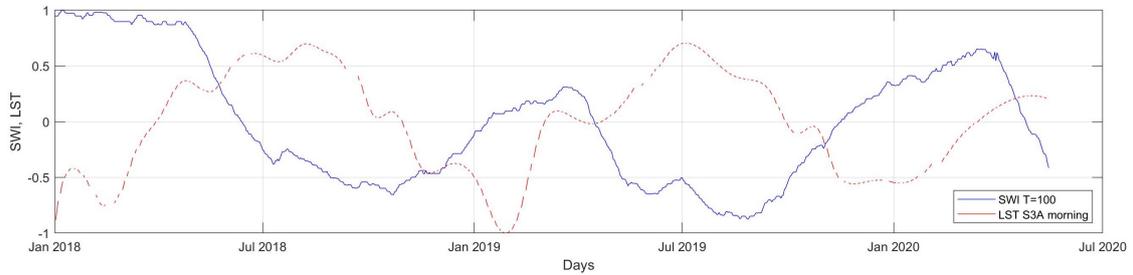


Figura 4.45: Grafici sovrapposti LST Sentinel-3A (morning, envelope) e SWI (T=100)

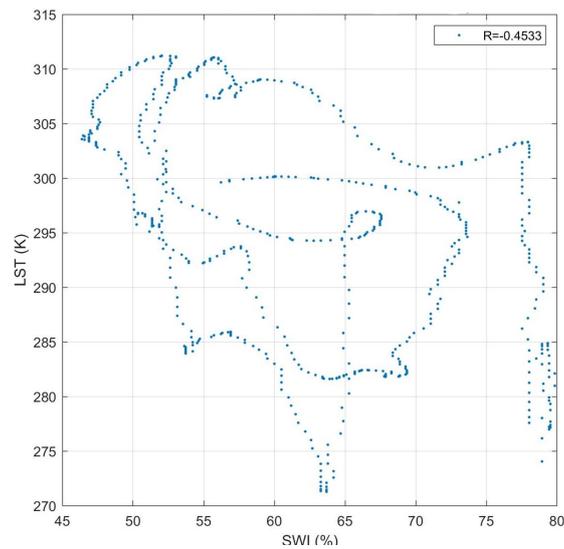


Figura 4.46: Scatter plot LST Sentinel-3A (morning) e SWI (T=100).

In seguito all'operazione di inviluppo, dal confronto degli andamenti delle due variabili si nota meglio la loro variazione in direzione opposta dal momento che sono venuti meno i valori minimi che disturbano l'andamento di LST, per quanto riguarda la dispersione nello scatter plot varia molto rispetto a quelle dei segnali originali (Figura 4.24), proprio perché vengono meno dalla distribuzione i dati relativi ai picchi negativi di LST. Per quanto riguarda il coefficiente di correlazione esso è negativo, a conferma di ciò che era stato detto nel precedente capitolo riguardo la variazione delle due variabili in direzione opposta e che si riscontra anche nel caso della Figura 4.45. Il valore che esso assume è di circa 40%, quindi la correlazione raggiunta, nonostante la rimozione dei minimi negativi da LST, non è esaustiva e la relazione tra le due variabili non può essere definita lineare, questo si nota anche dalla dispersione nello scatter plot che non rispecchia una legge di tipo lineare.

Capitolo 5

Studio di autocorrelazione di LST e SWI

Per approfondire ulteriormente l'analisi dei parametri ottenuti dai dati satellitari è stata effettuata uno studio di autocorrelazione per finestre annuali, esso è riportato di seguito. Sono stati considerati i dati di LST e SWI del 2018 e del 2019, tralasciando quelli del 2020 in quanto incompleti. Tale analisi ha permesso di osservare quanto le variabili sono simili a se stesse a distanza di un anno. Infine, poi è stato effettuato un confronto tra i dati di LST e SWI del 2018 e del 2019 che ha permesso di evidenziare come i due parametri si influenzano nell'arco del tempo. I dati utilizzati nel caso di LST sono quelli ottenuti dopo l'operazione di inviluppo.

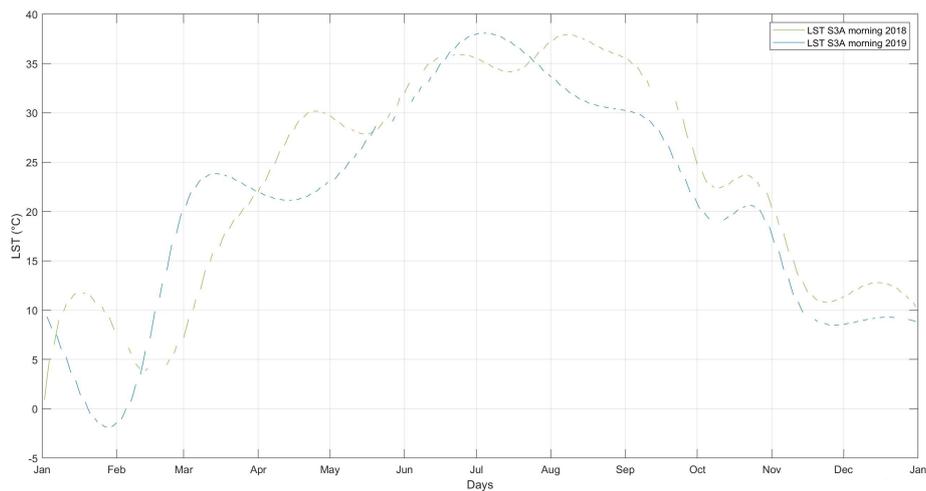
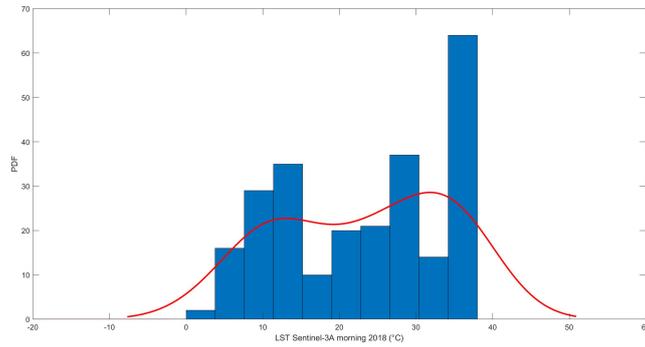
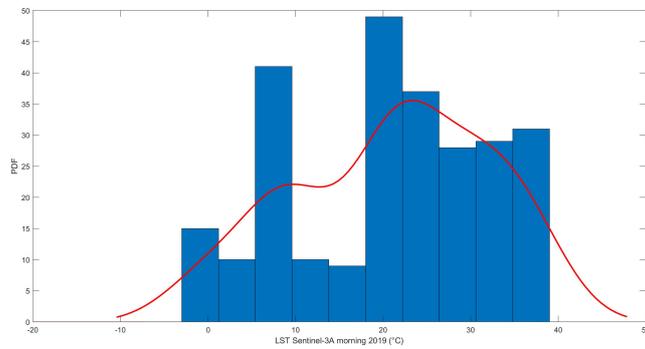


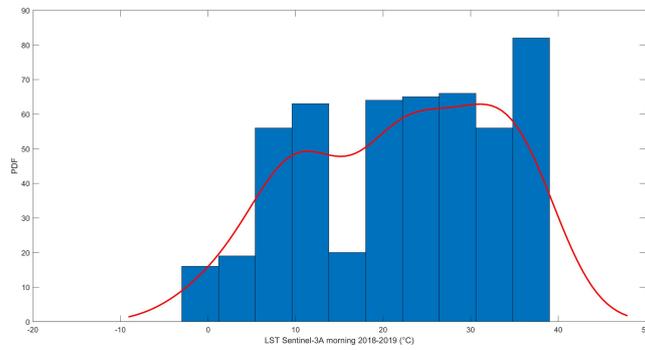
Figura 5.1: Serie storiche LST Sentinel-3A (mattina) 2018-2019



(a) Distribuzione LST S3A (mattina) 2018



(b) Distribuzione LST S3A (mattina) 2019



(c) Distribuzione totale LST S3A (mattina) 2018 e 2019

Figura 5.2: Istogramma e PDF dati LST 2018 e 2019

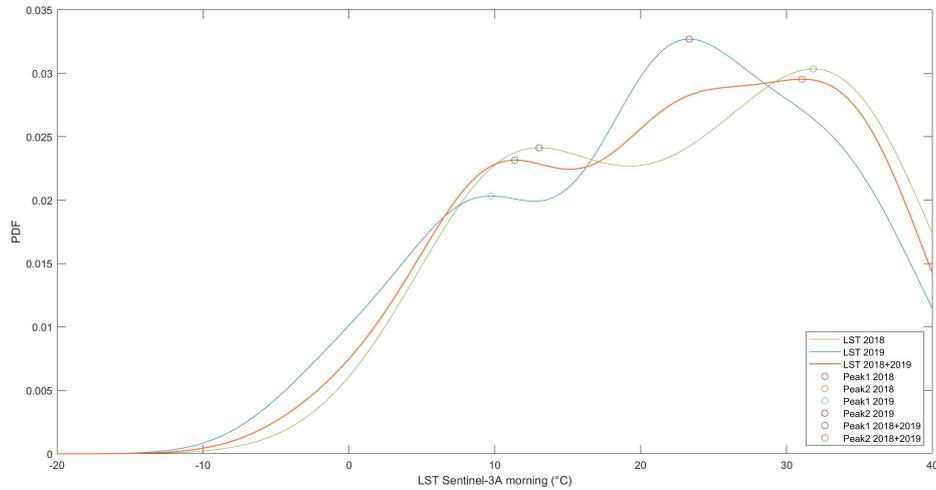


Figura 5.3: Confronto PDF LST 2018,2019 e PDF totale con picchi

Nel caso di LST, in Figura 5.1 sono riportate le serie storiche del 2018 e del 2019 e si nota come gli andamenti sono molto simili nei due anni a eccezione di Febbraio in cui c'è molta differenza e i valori del 2019 risultano maggiori. Inoltre, mentre nella prima parte dell'anno, fino a Luglio-Agosto circa, i valori di LST del 2018 e del 2019 oscillano, successivamente i valori del 2018 rimangono superiori a quelli del 2019 fino alla fine dell'anno. Infine, l'intervallo di variazione è leggermente diverso tra i due anni, è maggiore nel caso del 2018.

In Figura 5.2 sono riportati gli istogrammi e le PDF dei dati dei singoli anni e poi nell'ultimo grafico vengono riportati sia i dati del 2018 che quelli del 2019. Le due distribuzioni negli anni mantengono una dispersione simile anche se gli andamenti sono molto diversi, nel 2018 i valori sembrano distribuiti più uniformemente; in entrambi i casi si ha bi-modalità ma i picchi si spostano verso valori minori dal 2018 al 2019, in particolare il picco maggiore si sposta di circa 8°C, mentre l'altro picco mantiene valore simili nei due anni.

Infine, in Figura 5.3 è riportato un confronto tra la distribuzione del 2018, quella del 2019 e la distribuzione totale dei due anni. La distribuzione totale conserva la bi-modalità delle singole distribuzioni e l'andamento è intermedio tra le due, però si riscontra una maggiore influenza della distribuzione del 2018, infatti il picco maggiore della distribuzione totale è più vicino a quello del 2018, mentre l'altro picco è pressoché intermedio tra le due distribuzioni ma comunque più simile alla distribuzione del 2018. Un riepilogo dei picchi delle distribuzioni di LST è riportato in tabella 5.1.

Tabella 5.1: Picchi distribuzioni LST

Picco (°C)	1	2
2018	13,04	31,83
2019	9,73	23,32
2018-2019	11,37	31,05

Lo stesso procedimento è stato seguito anche per lo studio di autocorrelazione di SWI. Dalle serie storiche (Figura 5.4) si nota che i valori di SWI nel 2018 variano all'interno di un intervallo maggiore, inoltre fino al mese di Ottobre i valori del 2018 risultano superiori dopodiché si riscontra un'inversione; mentre il 2018 è caratterizzato da variazione più veloci, il 2019 risulta più uniforme e graduale.

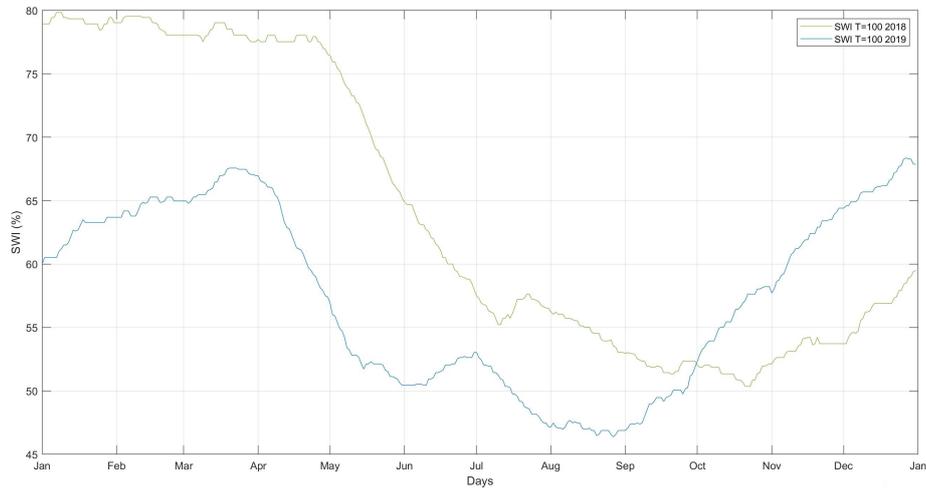
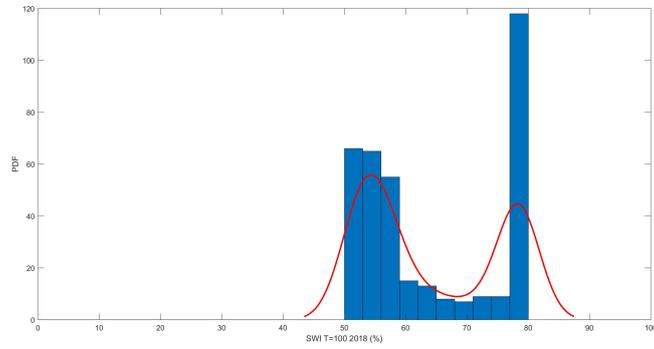
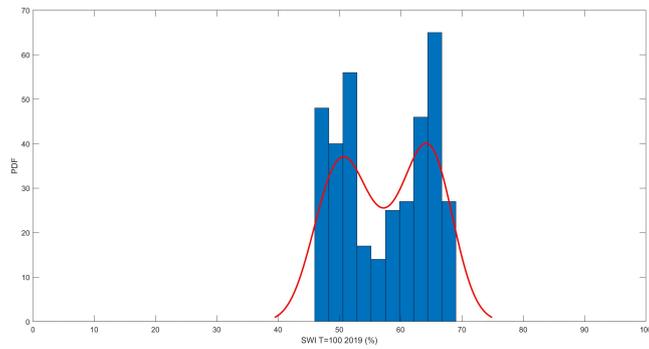


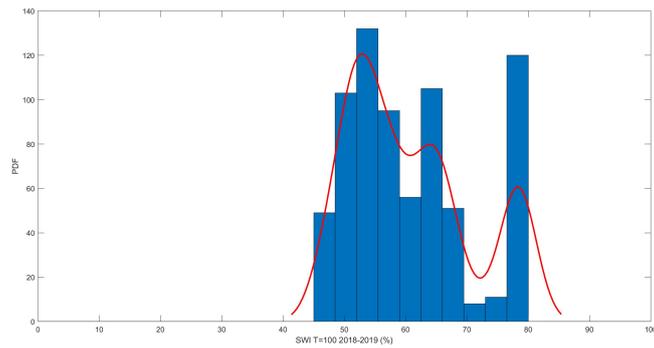
Figura 5.4: Serie storica SWI T=100 2018-2019



(a) Distribuzione SWI T=100 2018



(b) Distribuzione SWI T=100 2019



(c) Distribuzione totale SWI T=100 2018 e 2019

Figura 5.5: Istogramma e PDF dati SWI 2018 e 2019

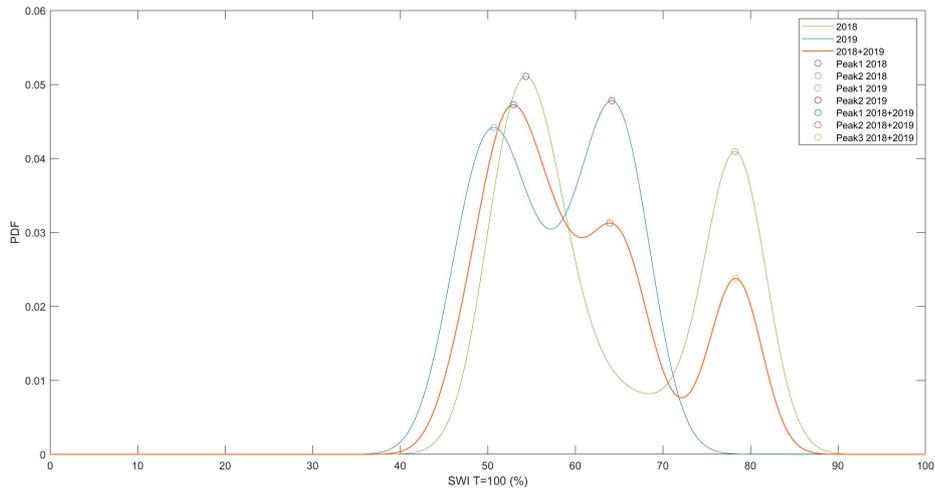


Figura 5.6: Confronto PDF SWI 2018,2019 e PDF totale e picchi

Tabella 5.2: Picchi distribuzioni SWI

Picco (%)	1	2	3
2018	54,35	78,23	
2019	50,71	64,16	
2018-2019	52,91	63,04	78,31

In Figura 5.5 sono riportati gli istogrammi e le PDF, nella distribuzione del 2018 i picchi si hanno in corrispondenza di valori maggiori di SWI, il picco maggiore è quello di sinistra in corrispondenza di un valore di 54% circa; la distribuzione è meno uniforme e la dispersione maggiore rispetto a quella del 2019, come già riscontrato nelle serie storiche. In quella del 2019 il picco maggiore è quello di destra, quindi in corrispondenza di valori maggiori, infatti si ha intorno al 64%, la distribuzione risulta più uniforme ed è caratterizzata da una dispersione inferiore. Inoltre, nei dati del 2019 è come se si verificassero due condizioni di equilibrio tra cui si vengono ad affermare i valori intermedi. Per quanto riguarda i picchi delle distribuzioni in questo caso si verifica una traslazione verso sinistra dal 2018 al 2019, quindi verso valori minori. La distribuzione totale di entrambi gli anni risulta multimodale, il picco maggiore deriva dalle due distribuzioni singole infatti è intermedio tra i loro picchi, mentre quello centrale deriva dalla distribuzione del 2019 e quello più a destra da quella del 2018. Per quanto riguarda la dispersione essa è intermedia tra quelle delle distribuzioni singole; le variazioni risultano più gradualmente nella prima parte (influenza della distribuzione del 2018), mentre diventano meno gradualmente alla fine (influenza della distribuzione del 2019). Un riepilogo dei picchi delle distribuzioni di SWI è riportato in tabella 5.2.

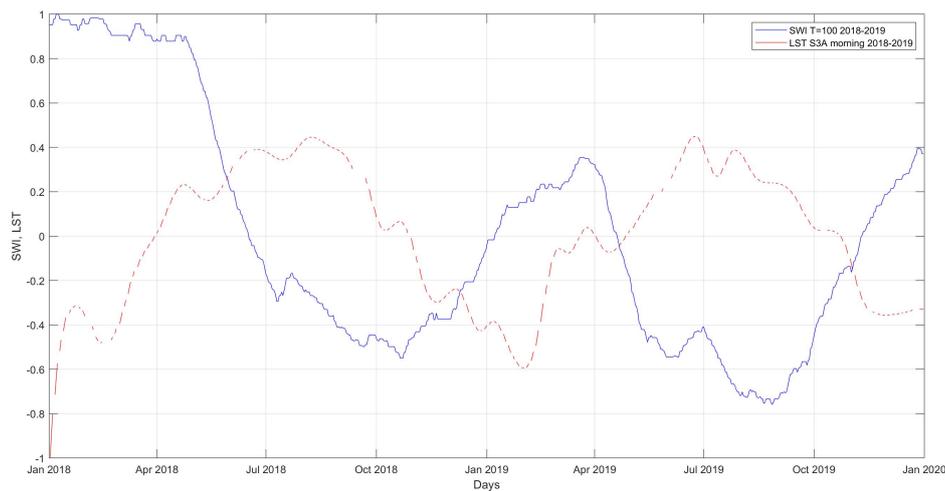


Figura 5.7: Grafici sovrapposti LST e SWI 2018-2019

Dal confronto delle serie storiche riportate in Figura 5.1 e Figura 5.4 si osserva una certa corrispondenza nelle variazioni di LST e SWI nei due anni, l'andamento di SWI sembrerebbe sfasato rispetto a LST ma in accordo con esso.

Nel caso di SWI la differenza nel periodo iniziale dell'anno è molto più accentuata rispetto a LST, questo potrebbe essere dovuto al fatto che negli ultimi mesi del 2017 i valori di LST siano stati minori di quelli degli ultimi mesi del 2018 e di conseguenza questo si tradurrebbe in valori maggiori di SWI dei primi mesi del 2018 oppure ad altri fattori che influenzano SWI, ma che in questo studio vengono trascurati. Inoltre, l'inversione di tendenza nei dati di SWI a partire da Ottobre potrebbe essere dovuta all'andamento di LST in cui a partire da Agosto circa i valori del 2018 sono superiori a quelli del 2019.

In generale, dal confronto dei due grafici si potrebbe dire che vi è corrispondenza nei picchi delle due variabili, quando in SWI si riscontra un minimo in LST si ha un massimo e viceversa, seppure con un certo sfasamento. Inoltre, le variazioni di SWI si verificano con un certo ritardo rispetto a quelle di LST come se fossero causate da queste, per esempio una variazione di LST potrebbe causare evaporazione e quindi una variazione delle condizioni di umidità nel suolo.

A conferma di quanto appena detto, si riportano le serie temporali sovrapposte di LST e SWI del 2018 e 2019 (Figura 5.7); questo ha permesso un confronto più immediato degli andamenti delle due variabili. Dai grafici sovrapposti si evince come a un aumento di LST nei periodi più caldi dell'anno corrisponda una diminuzione di SWI e viceversa a una riduzione di LST nei periodi più freddi corrisponda un aumento di SWI.

Capitolo 6

Temperatura ambientale e frequenze

A questo punto dell'analisi vengono introdotti i dati di temperatura ambientale e i dati di frequenza del Santuario, così da studiare la loro relazione con LST e SWI e mettere in luce eventuali legami tra i fattori ambientali, il terreno e la struttura del Santuario.

Si è studiata la correlazione con la temperatura media ambientale, dopodiché è stato effettuato uno studio di correlazione con le prime due frequenze del Santuario per cercare di capire quanto e come il terreno (LST, SWI) possa influire sulla struttura (f_1, f_2). Dapprima è stata studiata ogni coppia singolarmente (LST- T_{amb} , SWI- T_{amb} , LST- f_1 , SWI- f_1 , LST- f_2 , SWI- f_2) e poi successivamente le grandezze sono state studiate nel loro insieme.

Per quanto riguarda i dati di temperatura ambientale, questi derivano dalle registrazioni giornaliere dell'ARPA [7] e rappresentano la temperatura media ambientale giornaliera; invece i dati di frequenza sono costituiti dalle prime due frequenze modali del Santuario identificate alle ore 12 ogni giorno del 2018. Dal momento che le identificazioni delle frequenze sono disponibili per soli i giorni del 2018 e per la mattina, in questa fase si procede con i dati di LST della mattina del satellite A e con i dati di SWI T=100 dell'anno 2018. Anche nel caso dei dati di temperatura media ambientale sono stati considerati quelli del 2018.

6.1 Studio di correlazione LST, temperatura ambientale e frequenze

Per questa analisi, in un primo momento sono stati utilizzati i dati di LST provenienti dal segnale originale ed è stato effettuato lo studio di correlazione con questi dati, solo successivamente sono stati utilizzati i dati ottenuti in seguito all'operazione di involuppo. In Figura 6.1 vengono riportati i dati sovrapposti di LST con la temperatura media ambientale e di LST con le frequenze, successivamente è stata

studiata la dispersione di questi dati tramite scatter plot e sono stati calcolati i coefficienti di correlazione secondo la formula già riportata in precedenza (Eq.4.1).

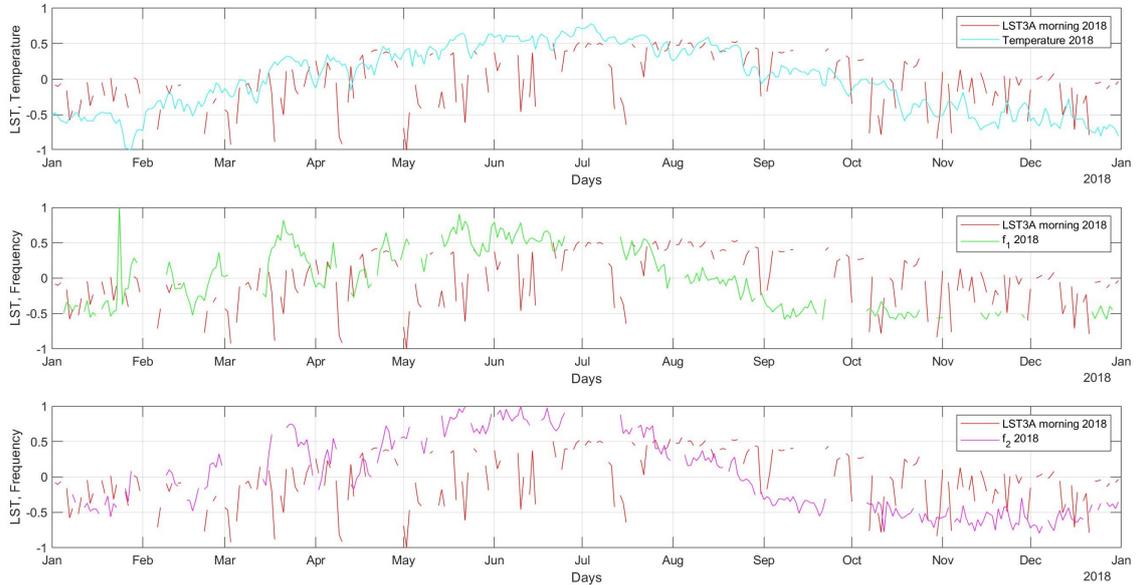


Figura 6.1: Grafici sovrapposti LST, temperatura ambientale media e frequenze

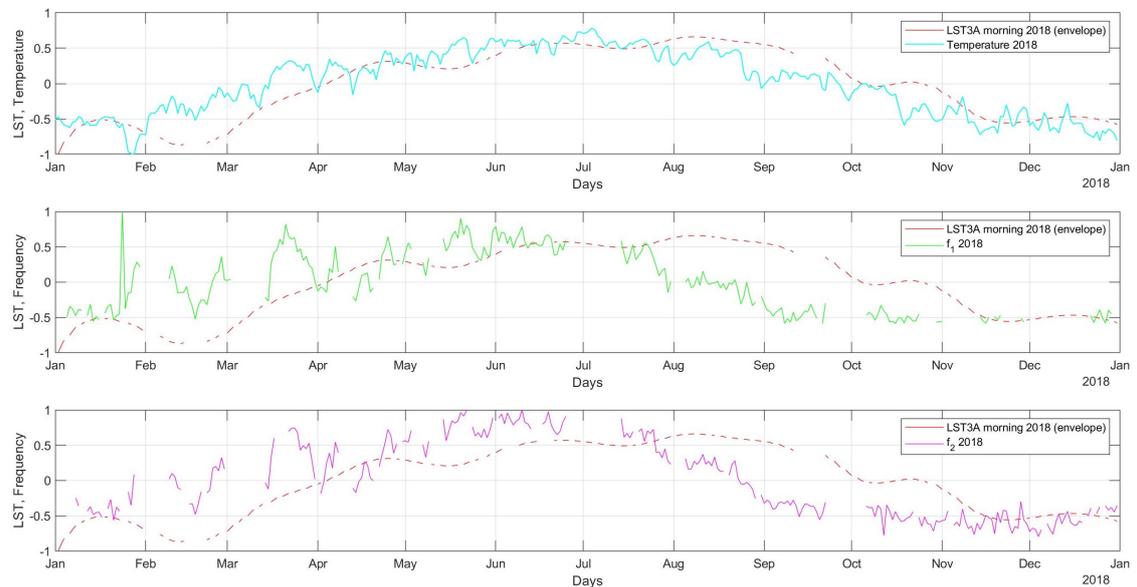


Figura 6.2: Grafici sovrapposti LST(inviluppo), temperatura ambientale media e frequenze

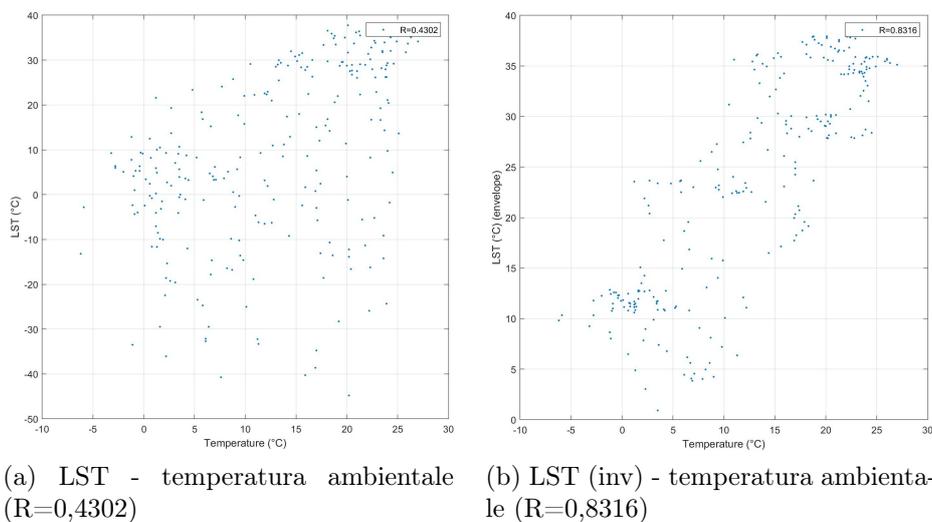


Figura 6.3: Scatter plot LST e temperatura media ambientale

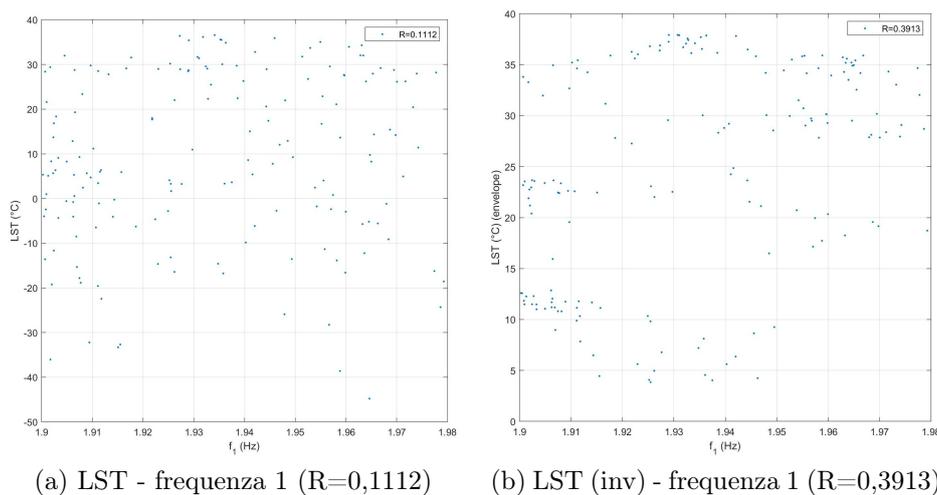


Figura 6.4: Scatter plot LST e prima frequenza

Dagli scatter plot si nota che alcuni punti si discostano e sono proprio quelli che rappresentano i picchi nel segnale di LST, quindi per questi motivi si è ricorso ai dati ricavati con l'involuppo. L'uso di quest'ultima tipologia di dati ha permesso di migliorare l'andamento dei grafici sovrapposti in Figura 6.2, la dispersione negli scatter plot (Figura 6.3-6.5) e di ottenere valori di R più alti, che nel caso della correlazione LST e temperatura ambientale raggiunge valori soddisfacenti.

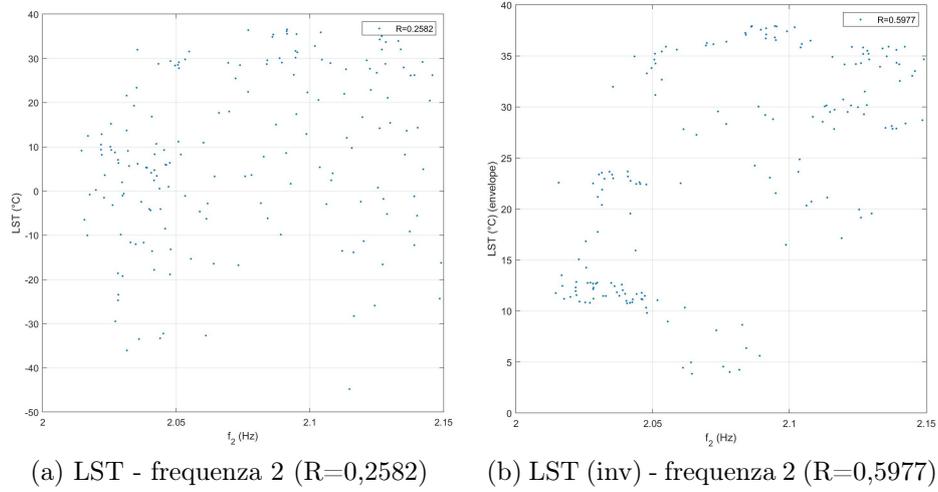


Figura 6.5: Scatter plot LST e seconda frequenza

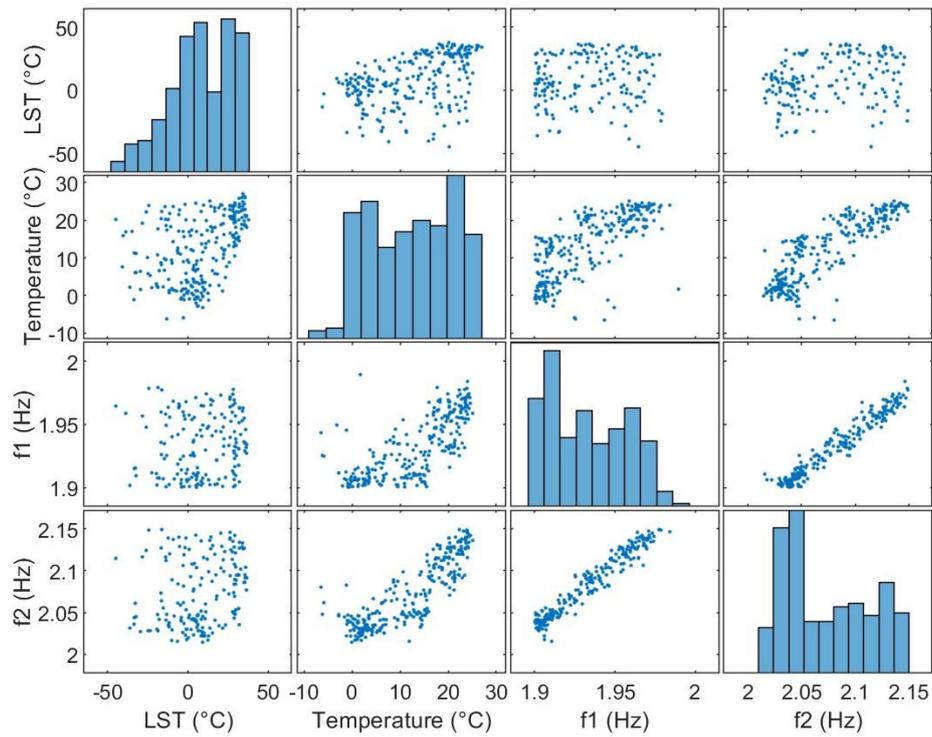


Figura 6.6: Plotmatrix LST, temperatura ambientale e frequenze

In Figura 6.6 e 6.7 si riporta un riepilogo dei grafici di dispersione e degli istogrammi di LST, temperatura media ambientale e frequenze; in questa fase sono state anche calcolate le matrici di correlazioni riportate nelle tabelle 6.1 e 6.2.

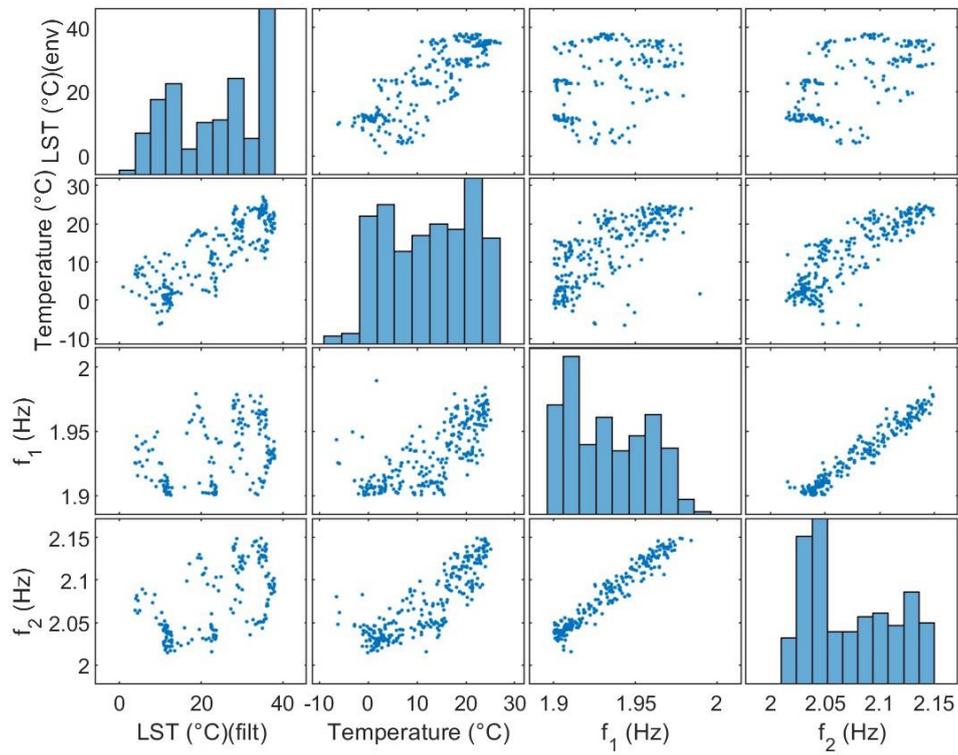


Figura 6.7: Plotmatrix LST (involuppo), temperatura ambientale e frequenze

Tabella 6.1: Matrice di correlazione LST, temperatura media ambientale e frequenze

1	0,3671	0,1142	0,1799
0,3671	1	0,7713	0,8360
0,1142	0,7713	1	0,9667
0,1799	0,8360	0,9667	1

Tabella 6.2: Matrice di correlazione LST (inviluppo), temperatura media ambientale e frequenze

1	0,7891	0,3920	0,4919
0,7891	1	0,7713	0,8360
0,3920	0,7713	1	0,9667
0,4919	0,8360	0,9667	1

6.2 Studio di correlazione SWI, temperatura ambientale e frequenze

Nel caso di SWI è la stato seguito lo stesso procedimento e sono stati realizzati gli stessi grafici e che vengono riportati di seguito; in questo caso si ha solo una tipologia di grafici dal momento che l'operazione di inviluppo non è stata applicata.

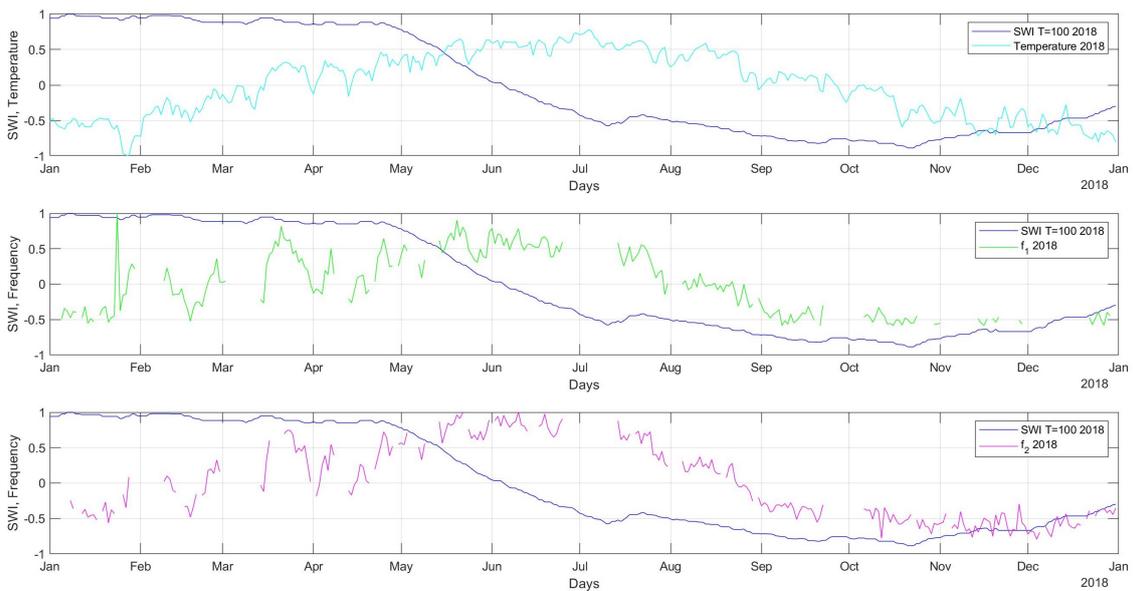


Figura 6.8: Grafici sovrapposti SWI, temperatura ambientale media e frequenze

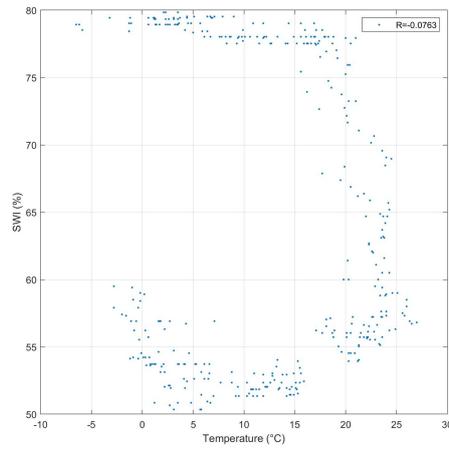
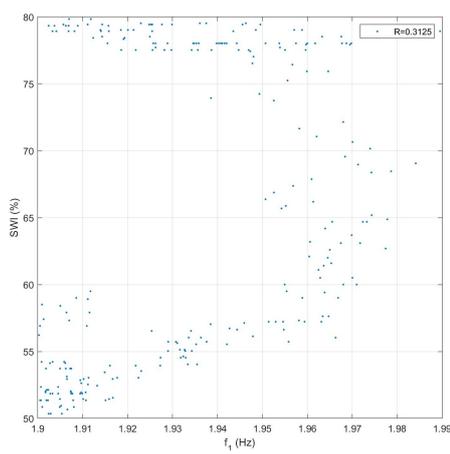
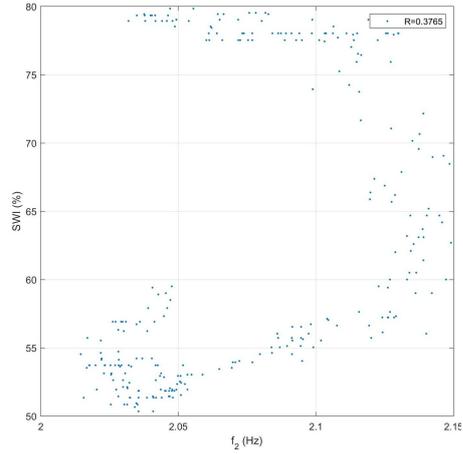


Figura 6.9: Scatter plot SWI e temperatura ambientale ($R=-0,0763$)



(a) SWI - frequenza 1 ($R=0,3125$)



(b) SWI - frequenza 2 ($R=0,3765$)

Figura 6.10: Scatter plot SWI e frequenze

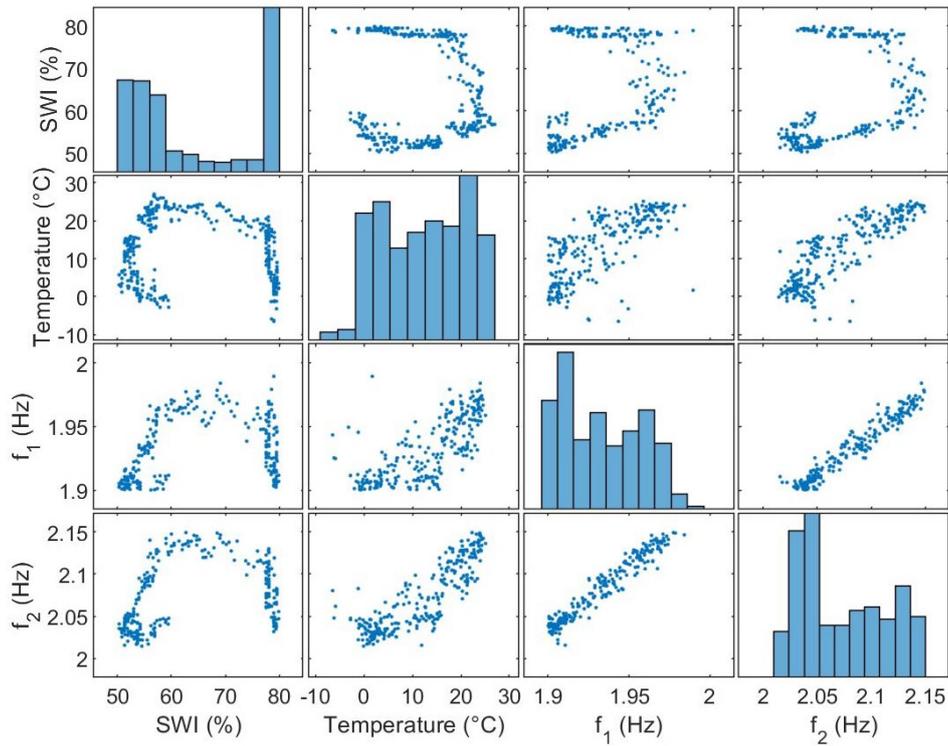


Figura 6.11: Plotmatrix SWI, temperatura ambientale e frequenze

In tabella 6.3 è riportata la matrice di correlazione per SWI, temperatura ambientale e frequenze. A conclusione di questa parte di analisi viene riportato lo studio di correlazione delle variabili nel loro insieme. Si vedano le figure 6.12 e 6.13 e le tabelle 6.4 e 6.5 in cui si riportano le matrici di correlazione.

Tabella 6.3: Matrice di correlazione SWI, temperatura media ambientale e frequenze

1	-0,0861	0,3395	0,2644
-0,0861	1	0,7482	0,8162
0,3395	0,7482	1	0,9700
0,2644	0,8162	0,9700	1

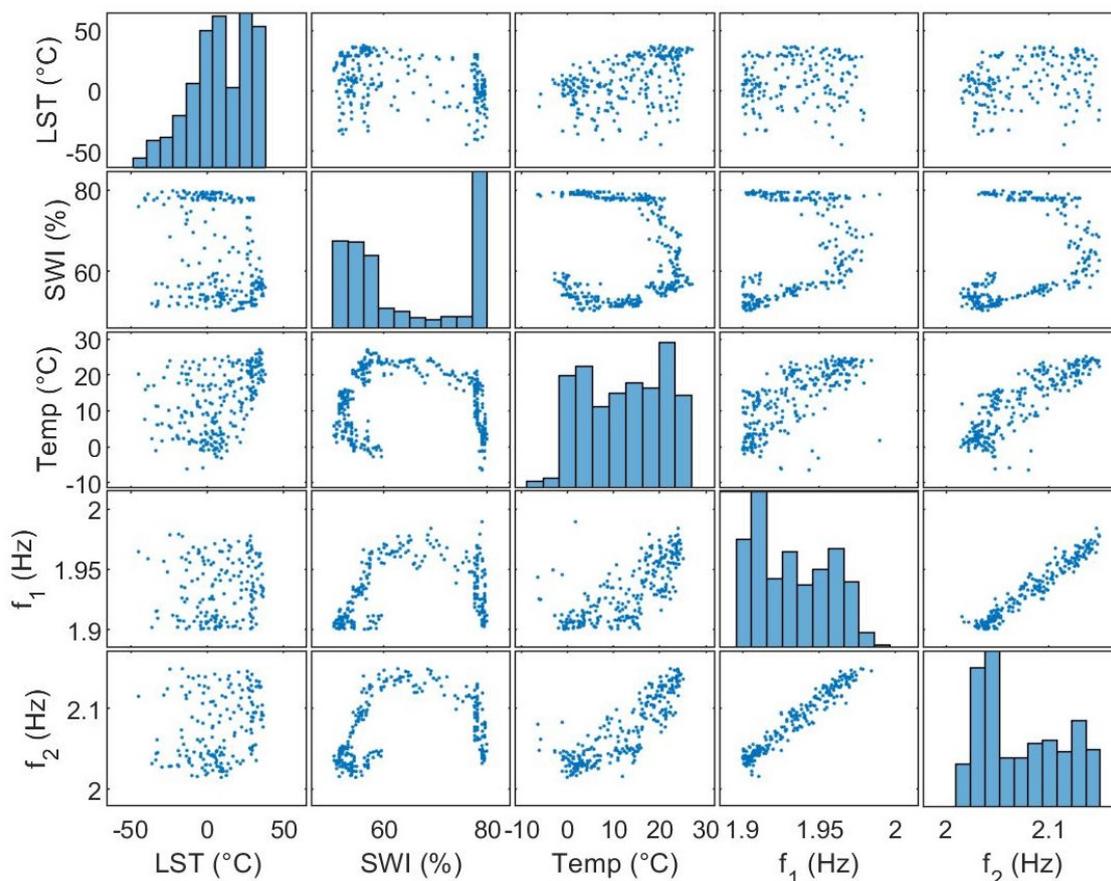


Figura 6.12: Plotmatrix LST, SWI, temperatura ambientale e frequenze

Tabella 6.4: Matrice di correlazione LST, SWI, temperatura media ambientale e frequenze

1	-0,2441	0,3671	0,1142	0,1799
-0,2441	1	-0,0102	0,3893	0,3041
0,3671	-0,0102	1	0,7713	0,8360
0,1142	0,3893	0,7713	1	0,9667
0,1799	0,3041	0,8360	0,9667	1

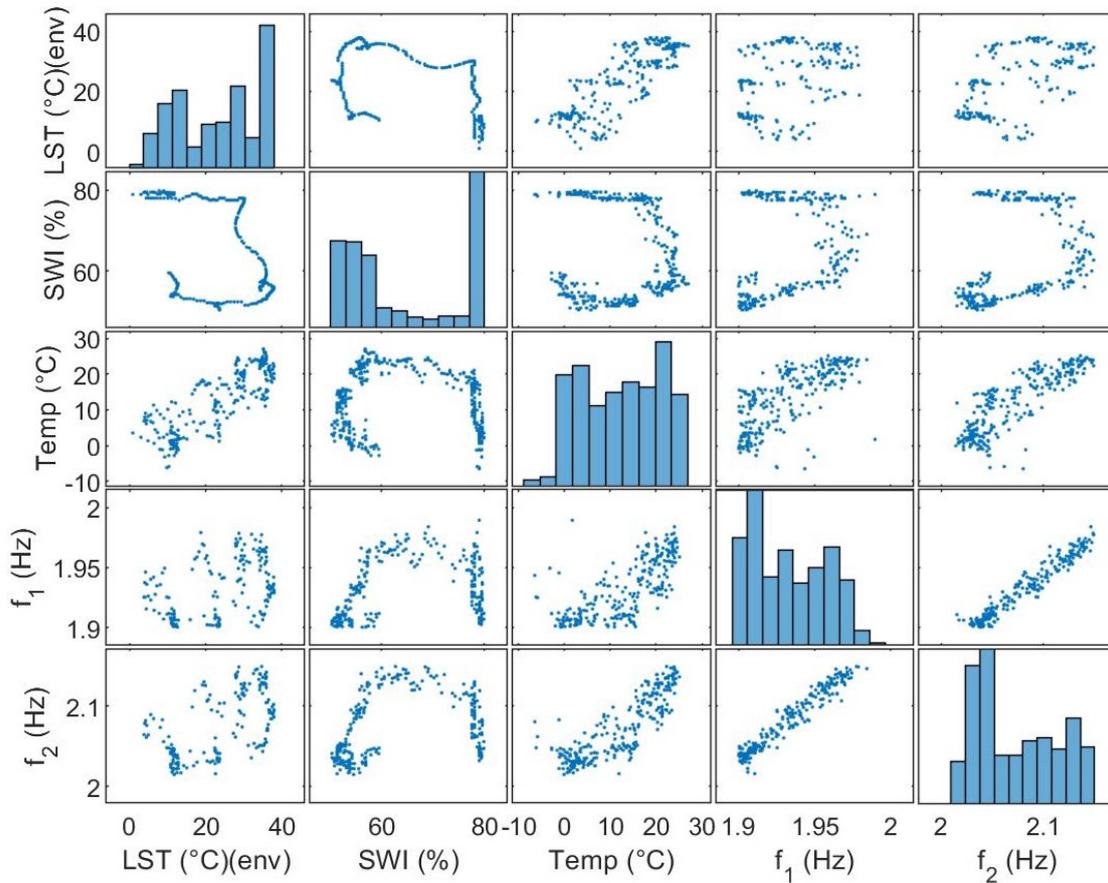


Figura 6.13: Plotmatrix LST(inviluppo), SWI, temperatura ambientale e frequenze

Tabella 6.5: Matrice di correlazione LST (inviluppo), SWI, temperatura media ambientale e frequenze

1	-0,4160	0,8034	0,4079	0,5008
-0,4160	1	-0,0102	0,3893	0,3041
0,8034	-0,0102	1	0,7713	0,8360
0,4079	0,3893	0,7713	1	0,9667
0,5008	0,3041	0,8360	0,9667	1

Dall'analisi dei grafici presentati in Figura 6.13 si riscontra una buona correlazione lineare nel caso di LST e della temperatura ambientale, infatti il coefficiente di correlazione R dopo l'inviluppo raggiunge un valore di circa 80%, negli altri casi non si riscontra lo stesso risultato. Risulta interessante la relazione di SWI con LST, temperatura ambientale e frequenze in cui si nota che la dispersione assume andamento simile, in tutti questi casi la relazione non è tipo lineare; allo stesso

modo non si riscontra un legame di tipo lineare nel caso di LST e le frequenze, in questo caso la dispersione assume un andamento circolare, ma non risulta ben definita.

Da un'analisi di insieme dei grafici riportati nel precedente capitolo (Figura 5.1, 5.4 e 5.7) e in quest'ultimo, si potrebbe affermare che SWI, essendo sfasato e in ritardo rispetto a LST, è come se racchiudesse già in sé entrambi i comportamenti, ovvero come se LST fosse una causa delle variazioni di SWI; questo poi si leghebbe alle frequenze del Santuario seppur non direttamente. Inoltre, analizzando i grafici sovrapposti in Figura 6.2 e 6.8 si nota che LST è in fase con la temperatura ambientale, infatti variano nella stessa direzione, ma non con le frequenze; SWI risulta in controfase con la temperatura ambientale, questo era prevedibile visto la correlazione lineare che intercorre tra LST e temperatura ambientale; nel caso di SWI e frequenze nei grafici si nota che inizialmente gli andamenti presentano uno sfasamento, successivamente nella parte finale variano nella stessa direzione, quindi sembrerebbe che dopo un primo sfasamento le grandezze si ritrovano in fase alla fine. Per tali considerazioni si potrebbe ritenere che il parametro del terreno che influisce maggiormente sul comportamento della struttura, tra i due analizzati, sia SWI.

Capitolo 7

Risultati e discussione

Dai risultati di questa ricerca si potrebbe dire che esiste una relazione tra i parametri ottenuti dai dati satellitari e che esiste un legame tra questi, la temperatura ambientale e le frequenze. Tuttavia la relazione ottenuta nel caso di LST-SWI non risulta esaustiva, infatti sono stati ottenuti valori di R bassi e la relazione non può essere definita di tipo lineare. L'unico caso, tra le grandezze prese in considerazione, in cui si riscontra una buona correlazione di tipo lineare è il legame tra LST e temperatura ambientale, mentre nel caso di LST e frequenze, SWI e temperatura ambientale e SWI e frequenze il legame risulta di tipo non-diretto e non-lineare. Si potrebbe, quindi, affermare che esiste un legame tra il comportamento del terreno e quello della struttura, anche se le variazioni del primo non si traducono in maniera diretta in una variazione del comportamento strutturale.

I risultati di questa prima applicazione dei dati satellitare in questo ambito, tuttavia, sono caratterizzati da incertezze che riguardano, da un lato, i dati satellitari utilizzati e, dall'altro, alcuni fattori e alcune grandezze che potrebbero influire sulle relazioni in esame, ma che in questa fase vengono trascurate.

Per quanto riguarda le incertezze sui dati satellitari, per entrambe le tipologie di dati la risoluzione spaziale degli strumenti di 1 km e il fatto che i dati analizzati siano ottenuti da interpolazione lineare potrebbe influire sulla loro precisione. Per quanto riguarda i dati di LST, in questa fase, dal momento che è stato considerato il loro inviluppo, sono stati trascurati i minimi che caratterizzano il segnale originale e di cui al momento non si è studiata la causa; inoltre, di questi dati sono state considerate solo le registrazioni della mattina del satellite Sentinel-3A, come già detto, per coerenza con le identificazioni delle frequenze del Santuario che si hanno solo per la mattina, quindi sono state trascurate le correlazioni nel caso delle registrazioni della sera e nel caso del satellite B perché le osservazioni sono inferiori in numero.

Nel caso dei dati di SWI le incertezze si legano alla scelta del valore del parametro T più adatto; dal momento che non si hanno dati in situ risulta difficile riuscire a relazionare con esattezza questo dato alla profondità di interesse, anche perché

l'algoritmo per il calcolo di SWI(T) non prende in considerazione la tipologia di terreno, quindi i meccanismi che si legano ad essa e che potrebbe influenzare il parametro di SWI, come per esempio il processo di infiltrazione che dipende dalle caratteristiche del terreno. Nello specifico nel caso del Santuario di Vicoforte, in questo modo non viene tenuto in conto dell'eterogeneità del terreno sottostante. Per quanto riguarda la correlazione dei dati satellitari con la temperatura ambientale e i dati di frequenze del sistema di monitoraggio, questa potrebbe variare se venissero presi in considerazione altri fenomeni che influiscono sul comportamento del terreno ad esempio la variazione di rigidità dovuta a una variazione di SWI oppure si potrebbe ulteriormente approfondire il significato di SWI, che rappresenta le condizioni di umidità, e relazionarlo al contenuto d'acqua che potrebbe contribuire ulteriormente nei risultati di correlazione. Inoltre, potrebbero essere considerati ulteriori fattori ambientali quali pioggia, neve, ecc. . .

Capitolo 8

Conclusioni

Aspetto fondamentale di questo lavoro di tesi è stato l'uso dei dati satellitari da telerilevamento per il monitoraggio strutturale di edifici monumentali. Grazie ai dati satellitari è stato possibile analizzare il comportamento del terreno e il suo legame con quello della struttura. Essi sono stati applicati al caso del Santuario di Vicoforte, di cui si hanno a disposizione i dati registrati dal sistema di monitoraggio permanente e i dati di indagini in situ.

Nonostante i limiti di questa prima applicazione dei dati satellitari, il loro utilizzo potrebbe portare alcuni vantaggi nell'ambito del monitoraggio strutturale. In primo luogo, per la reperibilità di questa tipologia di dati: essi, infatti, possono essere raccolti in modo più semplice e più veloce rispetto a quelli ottenuti da indagini standard. Le prove di tipo standard prevedono l'uso di strumenti in determinate condizioni, che a volte non sono facilmente realizzabili, e prevedono dei tempi e spesso dei costi, che nel caso dei dati satellitari vengono meno; infatti, essi sono in genere disponibili nell'arco di 1-2 giorni dall'acquisizione senza alcun costo e sono disponibili per l'intero territorio nazionale ed europeo.

Un ulteriore vantaggio nell'uso dei dati satellitari sarebbe quello di poterli ottenere senza utilizzare tecniche invasive e senza la necessità di personale specializzato. Questo permetterebbe di non intervenire direttamente sull'edificio, aspetto importante nel caso di edifici monumentali, in cui si cerca di ridurre al minimo ogni intervento e in questo modo non verrebbe interrotta l'attività quotidiana dell'edificio.

Inoltre, la mancanza di un contatto diretto con gli strumenti influirebbe positivamente sulla manutenzione, in termini di tempi e costi, dal momento che questa non spetta all'utente. Tuttavia, non avere un controllo diretto potrebbe essere svantaggioso in quanto in caso di rottura o anomalia (per esempio fattori ambientali che potrebbero disturbare l'acquisizione) si avrebbero dati poco affidabili o mancanti senza la possibilità di poter intervenire.

Partendo dai risultati dell'analisi statistica fatta in questa prima fase di ricerca, il prossimo passo potrebbe essere la realizzazione di modelli fisici o semi-fisici caratterizzati da input e output in grado di legare le componenti analizzate in questo studio: terreno e struttura del Santuario, in primo luogo, e poi l'effetto ambientale. Si potrebbero anche realizzare dei modelli *data-driven* creati tramite algoritmi di *Machine Learning*, che negli ultimi anni stanno acquistando sempre più importanza nel campo del monitoraggio strutturale.

Tramite questi modelli sarebbe possibile analizzare e spiegare come le variazioni che avvengono nella componente terreno possano essere influenzate dall'effetto ambientale e come poi queste si traducano in una variazione del comportamento della struttura. Inoltre, si potrebbero aggiungere alcune grandezze e alcuni fattori, come quelli citati nel capitolo precedente, che potrebbero contribuire nel migliorare le correlazioni a cui si è giunti in questa fase.

Bibliografia

- [1] ESA. *Remote Sensing Principles*. 2014. URL: http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_EN/SEMF9R3Z20F_0.html.
- [2] Microgeo. *Sensore multispettrale*. 2018. URL: <https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/droni-sapr/201568-applicazioni/multispettrale.aspx>.
- [3] 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.
- [4] ESA. *European Spatial Agency*. 2013. URL: <https://www.esa.int/>.
- [5] ESA. *Sentinel Online, Land Surface Temperature*. 2013. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-slstr/overview/geophysical-measurements/land-surface-temperature>.
- [6] CGLS. *Copernicus Global Land Service. Providing bio-geophysical products of global land surface - Soil Water Index*. 2013. URL: <https://land.copernicus.eu/global/products/ssm>.
- [7] ARPA-Piemonte. *ARPA*. 2000. URL: <http://www.arpa.piemonte.it/>.
- [8] Caterina Mele. «Santuario della Natività di Maria Regina Montis Regalis - Vicoforte (Mondovì)». Documentazione architettonica - Dispense del corso, Politecnico di Torino.
- [9] Rosario Ceravolo et al. «Monitoring of masonry historical constructions: 10 years of static monitoring of the world’s largest oval dome». In: *Structural Control and Health Monitoring* (dic. 2016). DOI: 10.1002/stc.1988.
- [10] Rosario Ceravolo et al. *Monitoraggio del complesso monumentale Regina Montis Regalis*. Relazione annuale. Politecnico di Torino, 2018.
- [11] Rosario Ceravolo et al. «Thermoelastic finite element model updating with application to monumental buildings». In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* (nov. 2019). DOI: 10.1111/mice.12516.
- [12] Cloud Ferro. *CREODIAS*. 2019. URL: <https://finder.creodias.eu/>.

-
- [13] ESA. *step - science toolbox exploitation platform*. 1998. URL: <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>.
- [14] CGLS. *Copernicus Global Land Service. Providing bio-geophysical products of global land surface*. 2014. URL: <https://land.copernicus.vgt.vito.be/PDF/portal/Application.html#Home>.
- [15] CGLS. *Copernicus Global Land Service. Providing bio-geophysical products of global land surface - Surface Soil Moisture*. 2013. URL: <https://land.copernicus.eu/global/products/ssm>.
- [16] CGLS. *Soil Water Index Collection 1km, version 1.0. Issue I1.10*. Product User Manual. Copernicus Global Land Service, 2019.
- [17] CGLS. *Validation Report, Soil Water Index Collection 1km, version 1.10*. Quality Assessment Report. Copernicus Global Land Service, 2019.
- [18] Christoph Paulik et al. «A global validation of the ASCAT Soil Water Index (SWI) with in situ data from the International Soil Moisture Network.» In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 30 (apr. 2012), pp. 10189–.
- [19] TU Wien CGLS. *Soil Water Index(SWI)-Version 3.0, Surface State Flag(SSF)-Version 2.0, SWI10-Version 3.0, SWI-TS-Versione 3.0. Issue I2.60*. Product User Manual. Copernicus Global Land Service, 2018.
- [20] T. McMahon M. Peel B. Finlayson. *Updated World Map of the Koppen-Geiger Climate Classification. Hydrology and Earth System Sciences Discussions. 4. 10.5194/hess-11-1633-2007. Licenza: CC BY 3.0*. 2007. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Classificazione_dei_climi_di_K%C3%B6ppen.
- [21] MathWorks. *Signal envelope*. 2013. URL: <https://it.mathworks.com/help/signal/ref/envelope.html>.
- [22] Matteo Antoniotti. «Model Updating e interazione suolo-struttura: il caso della Basilica “Regina Montis Regalis” di Vicoforte». Tesi di laurea mag. Politecnico di Torino, 2014.
- [23] Giorgia Grasso. «Calibrazione di modelli termo-meccanici per strutture monumentali con dati di monitoraggio statico». Tesi di laurea mag. Politecnico di Torino, 2015.
- [24] Carlo Casalegno et al. «Soil-structure modeling and updating of the "Regina Montis Regalis" basilica at Vicoforte, Italy». In: ott. 2014.
- [25] ESA. *Sentinel Online*. 2013. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3>.
- [26] University of Leicester / NILU. *Sentinel-3, Optical products and algorithm definition*. Report. University of Leicester, 2012.

BIBLIOGRAFIA

- [27] ESA. *Sentinel-3, Data access and products*. Report. ESA, 2015.
- [28] CGLS. *Copernicus Global Land Service*. 2000. URL: <https://land.copernicus.eu/global/>.

Ringraziamenti

La fine di questo lavoro di tesi segna non solo la fine del mio percorso di studi, ma anche il raggiungimento di un traguardo che mi ero prefissata molto tempo fa, quando avevo 13 anni e volevo già diventare un ingegnere (forse nemmeno sapevo cosa volesse dire). Se oggi, finalmente, posso dire di esserci riuscita è anche grazie alle persone che mi sono state a fianco in questo percorso.

In primo luogo, voglio ringraziare il mio relatore, il Professor Rosario Ceravolo, per avermi dato la possibilità, prima con il tirocinio e poi con questo lavoro di tesi, di poter lavorare su delle tematiche così interessanti. Grazie per la professionalità, ma soprattutto per la disponibilità e per la passione.

Grazie a Gaetano e Giorgia per il vostro prezioso aiuto durante questi mesi, per la passione che mettete in tutto ciò che fate e che riuscite a trasmettere. Grazie per la fiducia che mi avete dato.

Il ringraziamento più grande va a chi più di tutti mi ha permesso di tagliare questo traguardo incoraggiando e appoggiando ogni mia scelta, la mia famiglia.

Grazie alla mia mamma per avermi spronato in ogni momento, per avermi fatto capire che alcune volte le mie preoccupazioni erano inutili e per avermi fatto notare quanto spesso io sia critica in quello che faccio, anche esagerando. Grazie per la pazienza dimostrata accettando ogni mio momento di crisi e scusa se a volte le mie risposte non sono state così gentili.

Grazie al mio papà per avermi ricordato in ogni momento che posso farcela e che sono in grado di superare ogni ostacolo, nonostante le difficoltà. Grazie anche per quelle volte in cui prima di un esame mi chiamavi solo per ricordarmi di stare tranquilla e di non aver paura di niente perché sarebbe andato tutto bene.

Grazie a *mia torella*, l'esempio da seguire, il punto di riferimento nei momenti di maggiore difficoltà, la calma nei momenti pieni d'ansia e preoccupazione, la persona migliore con cui condividere ogni piccola vittoria di questi anni e non solo. Grazie per i consigli, sempre diretti, che hanno accompagnato qualsiasi mia scelta in questi anni e per la tua costante presenza.

Grazie a miei cari nonni per essere stati sempre presenti, nonostante la distanza, e per aver seguito ogni mio passo in questo percorso. Oggi il mio pensiero va a mia

nonna Maria, prometto che da adesso, appena potrò, farò quello che mi chiedevi sempre quando mi chiamavi e mi sentivi stanca: riposarmi.

Grazie a chi in questi anni è riuscito a farmi sentire meno possibile la distanza da casa, riempiendo e rallegrando le mie giornate: la mia famiglia torinese, il fantastico primo piano del Collegio Einaudi. In particolare grazie a Giusi e Elisa, per essermi state vicine e per avermi soccorso in ogni momento di difficoltà, grazie soprattutto per i momenti felici e spensierati che conserverò sempre nel mio cuore. Grazie a Domenico per la dolcezza e per i consigli sempre obiettivi. Grazie a Gabriele e a *Enrichino* per avermi sollevato su il morale quando ce n'era bisogno.

Grazie a Enrico, per essermi stato accanto in ogni momento. Grazie per la forza che mi hai trasmesso con ogni tuo consiglio e per la pazienza che hai sempre avuto da quando ci siamo conosciuti. Grazie per le mille risate e per tutte le volte che mi fai capire che non devo prendermi troppo sul serio.

Grazie a Marco e Claudia per avermi regalato i migliori venerdì passati al Politecnico e per essere stati presenti ogni giorno in questo ultimo anno; il dispiacere più grande è di non avervi conosciuto bene prima, ma sono sicura che ci rifaremo.

Grazie alle mie *Paturnie* (Emilia, Alida, Silvia, Chiara, Flavia, Alessandra, Giuglia, Giusy e Valentina) per avermi coccolata dal primo giorno che ho messo piede a Torino e per essere state una costante in questi 5 anni e mezzo. Nonostante la distanza che ci separa adesso, siete sempre un punto di riferimento e vi ringrazio per questo.

E per ultimi, ma non ultimi, grazie a miei amici di infanzia: Sara, Valeria, Gianmarco, Gianluca, Stefano e Paolo, per aver fatto sì che tutto sia rimasto uguale a ogni mio ritorno, nonostante la distanza e il tempo da passare insieme che ormai si è ridotto.

Infine, grazie a tutte quelle persone, vicine e lontane, che in qualche modo hanno contribuito al raggiungimento di questo traguardo tanto atteso.

Per aspera ad astra.

Stefania.