



MONUMENTO  
NATURALE  
LA FRASCA

# Monumento Naturale La Frasca

*Pinete La Frasca e Sant'Agostino  
Monitoraggio Ambientale*

“Monitoraggio ambientale permanente presso Pineta La Frasca e Sant’Agostino di proprietà ARSIAL Monumento Naturale La Frasca”.

ARSIAL Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione dell'Agricoltura del Lazio

Supervisione editoriale e scientifica:

Luca Scarnati – ARSIAL Area Patrimonio

[www.arsial.it](http://www.arsial.it) - [l.scarnati@arsial.it](mailto:l.scarnati@arsial.it)

Testi a cura di:

Associazione Istituto Ecoambientale – Via Conte di Carmagnola n.32 - 00176 Roma

[istitutoecoambientale@gmail.com](mailto:istitutoecoambientale@gmail.com)- [www.istitutoecoambientale.it](http://www.istitutoecoambientale.it)

In copertina:

Foto di Luca Scarnati

Pubblicato nel mese di febbraio 2024



**REGIONE  
LAZIO**

**ARSIAL**  
Agenzia Regionale  
per lo Sviluppo e l'Innovazione  
dell'Agricoltura del Lazio

## INTRODUZIONE

L'idea del Monumento Naturale La Frasca nasce sotto la spinta delle associazioni ambientaliste locali nell'ormai lontano 2007. L'iter così avviato ai sensi della Legge regionale sulle aree protette, vede la sua conclusione definitiva nel settembre 2017. L'intento è di preservare un tratto di circa 5 km di costa in cui si concentrano contemporaneamente notevoli emergenze naturalistiche, paesaggistiche e storico – archeologiche. La pressione antropica sulle aree costiere è tipicamente molto forte, data la loro appetibilità in termini di edificabilità sia residenziale che turistica, nonché, per quanto riguarda questa area in particolare, anche per la realizzazione di infrastrutture industriali. La necessità di preservare questa isola di naturalità viene riconosciuta durante il suo iter istitutivo da tutti gli enti preposti, considerata anche come una valvola di sfogo per quei cittadini alla ricerca di un'area costiera libera da stabilimenti o altre ingombranti presenze, che faccia della sua naturalità il suo elemento attrattivo. Inoltre è sempre viva la sua vocazione originaria, dato che la pineta viene impiantata come fascia frangivento nel secolo scorso, per preservare le colture agricole dai venti ricchi di salsedine provenienti dal mare. Purtroppo da allora la pineta non è stata gestita come in altri impianti simili, trasformandola con gli opportuni interventi selvicolturali in una pineta da pinoli d'alto fusto, e neanche si è dato spazio alla rinnovazione naturale che avrebbe riportato al bosco mediterraneo originale. Negli ultimi anni si è però preso coscienza dell'importanza di queste formazioni forestali e in generale di questi ecosistemi costieri, sia per preservare la biodiversità presente che come infrastruttura verde, capace di contribuire concretamente alla conservazione delle coltivazioni dell'entroterra e in generale in grado di mitigare fenomeni meteorologici estremi, sempre più frequentemente registrati in questi ultimi anni lungo i litorali laziali. In termini di servizi ecosistemici ("i benefici multipli forniti dagli ecosistemi al genere umano") il valore (come noto anche monetizzabile) è quindi indubbiamente molto alto.

Attualmente ARSIAL ha adottato un Piano di gestione forestale che mira a favorire l'evoluzione naturale della pineta, alcuni interventi di diradamento sono stati effettuati e altri ne seguiranno. Sono state realizzati impianti sperimentali di essenze sempreverdi mediterranee prodotte presso il vivaio forestale dell'Azienda ARSIAL di Cerveteri. L'intento principale è assecondare la progressione della pineta verso il bosco planiziale mediterraneo, con il ripristino del naturale cuneo di macchia litoraneo che fermi i venti marini. Inoltre ARSIAL, con il contributo della Direzione Regionale Capitale Naturale, Parchi e Aree Protette, ha da effettuato il ripristino delle staccionate che impedivano l'ingresso nella pineta di veicoli a motore, installato strutture per finalità ricreative e di educazione ambientale, nonché provveduto a installare la segnaletica con la perimetrazione dell'area protetta e i divieti e le norme di comportamento previste dall'attuale normativa. Nonché promosso iniziative di studio e divulgazione sull'area, realizzando anche un accordo di collaborazione con l'Università degli Studi Roma Tre per la "Valorizzazione e fruizione sostenibile del Monumento naturale regionale La Frasca e delle pinete frangivento ARSIAL". A seguito dei molti riconoscimenti da parte di cittadini e associazioni locali, sono stati registrati anche alcuni

atti vandalici a scapito delle opere realizzate, ma nell'istituzione di una nuova area protetta è un "fenomeno" già riscontrato, andando ad intaccare e modificare comportamenti e modi di fare, ormai non più compatibili con le norme di conservazione, consolidati nel tempo. Ma la strada ormai è tracciata e anche qui l'esperienza insegna che è solo questione di tempo. Un grande contributo alla fruizione sostenibile dell'area sarà dato dagli interventi di riqualificazione della Pineta La Frasca, previsti come misura di compensazione dai Decreti di pronuncia di compatibilità ambientale delle opere strategiche per il porto di Civitavecchia, progetto approvato e finanziato e grazie al quale l'Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Centro Settentrionale realizzerà numerose opere per la corretta fruizione, dai parcheggi (fuori dall'area del Monumento naturale), alla musealizzazione delle aree archeologiche.

Questo studio, che si avvale anche dei dati raccolti dal SIARL (Servizio Integrato Agrometeorologico della Regione Lazio), è stato commissionato da ARSIAL, insieme ad altri precedenti, per acquisire informazioni utili e indispensabili per prendere le opportune decisioni a conservazione dell'area. L'intento è anche di verificare la possibilità di un monitoraggio continuo e a basso costo, effettuato con il ricorso alle recenti tecnologie e metodologie di indagine da remoto.

#### QR-CODE PER APPROFONDIRE

IDROGEOLOGIA



AMBIENTI E FLORA



GESTIONE FORESTALE



AVIFAUNA



UNIROMA TRE



LIPU



Pubblicazione divulgativa per conoscere il Monumento  
Naturale La Frasca



## SINTESI

L'analisi climatica ha reso possibile lo studio dei trend a lungo e a medio termine dei parametri di pioggia e temperatura per il periodo analizzato. Dal 2016 ad oggi l'area è sottoposta a significative crescite di temperatura sia minima che massima. Le precipitazioni invece seguono una lenta e progressiva diminuzione.

Il risultato di queste tendenze si traduce in una crescente condizione di aridità, soprattutto estiva, come indicato dallo SPEI index.

La vegetazione della pineta mostra una risposta fortemente legata alla condizione climatica. In particolare, la vegetazione risponde principalmente agli aumenti di temperatura e poi al calo delle precipitazioni.

In generale, all'aumentare delle condizioni di aridità, indicate valori di SPEI negativi, si verifica un calo nei valori di NDVI, EVI e NDMI.

Se dovessero confermarsi le tendenze climatiche individuate la vegetazione della pineta del "Monumento Naturale La Frasca" si troverebbe ad affrontare una condizione di stress tale da alterarne lo stato di salute.

Sulla base delle analisi climatico-vegetazionali effettuate è stata sviluppata una cartografia in grado di spazializzare le variazioni in positivo ed in negativo degli indici selezionati su base annuale e per la stagione arida estiva, e l'intensità di tale variazione espressa come variazione percentuale dei valori del 2022 rispetto a quelli del 2018 (eq):

$$\Delta \text{Indice}_{2022-2018} = \frac{\text{Indice}_{2022} - \text{Indice}_{2018}}{\text{Indice}_{2018}} * 100;$$

Dalla cartografia è possibile individuare aree che evidenziano un forte calo in tutti e tre gli indici satellitari. Tali aree possono essere etichettate come aree altamente suscettibili che potrebbero essere prese come aree studio per meglio comprendere gli effetti del clima sulla vegetazione.

## PREMESSA

L'obiettivo di questo lavoro è quello di effettuare uno studio sulla condizione della Pineta dell'area Monumento Naturale "La Frasca" mediante l'utilizzo di indici satellitari specifici per il monitoraggio della vegetazione. Lo studio è stato suddiviso in tre fasi.

La prima fase si è focalizzata sullo studio del comparto climatico locale per individuare i trend di precipitazioni e temperature. I dati climatici utilizzati provengono dalle stazioni di CERVETERI-Campo di Mare e TARQUINIA-Portaccia, entrambe appartenenti alla rete di monitoraggio del Servizio Integrato Agrometeorologico gestito da ARSIAL. Le centraline sono state selezionate in base al principio di vicinanza al sito e sono state ritenute idonee a poter essere utilizzate per rappresentare la condizione climatica locale del sito in esame. Dai dati delle due centraline si è costruita una serie storica climatica che ha consentito di analizzare 18 anni di dati (2004 - 2022). Analizzando i dati ottenuti con tecniche di analisi statistiche (Trend-decomposition, Change Point analysis) si è osservato che dal 2004 ad oggi le temperature massime e minime stanno progressivamente aumentando, mentre le precipitazioni mostrano un lieve calo e un andamento estremamente variabile nel tempo. Andando più nel dettaglio, le temperature mostrano un ulteriore aumento significativo a partire dal 2016. Successivamente, le informazioni di temperatura e precipitazioni sono state utilizzate in maniera integrata per il calcolo dell'indice SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) con il quale è stato possibile valutare l'inizio, la durata e l'entità della condizione di aridità. Anche in questo caso si osserva un aumento della condizione arida, soprattutto estiva, a partire dal 2004 che si accentua in maniera significativa nel 2016.

Dopo l'analisi climatica si è passati alla seconda fase del lavoro che ha previsto l'elaborazione di indici satellitari specifici per lo studio della vegetazione. Gli indici selezionati sono l'NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), l'EVI (Enhanced Vegetation Index) e il NDMI (Normalised Difference Moisture Index). NDVI ed EVI sono indici che forniscono informazioni sulla condizione di densità e della condizione di vigoria della vegetazione. NDMI, invece, fornisce informazioni sul contenuto idrico della vegetazione.

Questi indici derivano dalla manipolazione di immagini satellitari prodotte dalla piattaforma satellitare SENTINEL-2 sviluppata per il progetto Copernicus da parte dell'Agenzia Spaziale Europea per il monitoraggio degli ecosistemi terrestri, attiva dal 2015. L'idoneità dei prodotti SENTINEL per l'analisi è dovuta alla possibilità di accedere liberamente ai dati e alla elevata risoluzione di dettagli al suolo di 10m/pixel (la più alta ottenibile gratuitamente attualmente). Le immagini di questa collezione sono disponibili con le relative correzioni atmosferiche, del terreno e della nuvolosità a partire dal 28/03/2017 ad oggi. Per questo motivo l'analisi degli indici è stata possibile considerando il periodo che va dal 2018 al 2022.

Per ogni indice sono state elaborate 5 immagini annuali (2018-2022) e 4 immagini stagionali per anno (inverno, primavera, estate, autunno). Le immagini sono ad una risoluzione spaziale di 10 m/pixel. Il processamento delle immagini è avvenuto su piattaforma di analisi geospaziali cloud -based Google Earth Engine.

La terza fase del lavoro ha compreso l'analisi integrata di clima ed indici satellitari per osservare qualche relazione di tipo statistica tra temperature, precipitazioni e vegetazione. Quello che si osserva è che la vegetazione della Pineta mostra una risposta fortemente legata alla condizione climatica. In particolare, la vegetazione risponde principalmente agli aumenti di temperatura e poi al calo delle precipitazioni.

In generale, all'aumentare delle condizioni di aridità, indicate da valori di SPEI negativi, si verifica un calo nei valori di NDVI, EVI e NDMI, in particolare durante la stagione arida estiva.

Se dovessero confermarsi le tendenze climatiche individuate la vegetazione della pineta del "Monumento Naturale La Frasca" si troverebbe ad affrontare una condizione di stress tale da alterarne lo stato di salute. Il monitoraggio satellitare è uno strumento efficace nella comprensione ed eventuale previsione dello stato di condizione della Pineta in quanto aiuta ad identificare l'estensione e la gravità del fenomeno. Le immagini satellitari possono essere utilizzate per monitorare lo stato di avanzamento degli interventi, consentendo di valutare il successo di tali sforzi e apportare le modifiche necessarie.

L'utilizzo di dati satellitari inoltre ha consentito, infatti, la spazializzazione delle informazioni ottenute fornite nel lavoro sotto forma di immagini e di materiale informatico di tipo GIS (Geographic Informatic Systems).

## ANALISI CLIMATICA

Per l'inquadramento climatico dell'area, finalizzato ad individuare la tendenza prevalente su base annua e su base stagionale, è stata costruita una serie climatica storica che va dal 01/01/2004 al 31/12/2022. I dati utilizzati per la costruzione della serie provengono dalle vicine stazioni di CERVETERI-Campo di Mare (RM01CME) e TARQUINIA-Portaccia (VT01SIE). Entrambe le stazioni appartengono alla rete di monitoraggio del Servizio Integrato Agrometeorologico gestito da ARSIAL.

Le precipitazioni  $P$  (mm), le temperature medie  $T_{med}$  (°C), minime  $T_{min}$  (°C) e massime  $T_{max}$  (°C), l'evapotraspirazione potenziale  $E_{t0}$  (mm) e la radiazione totale  $RAD$  (W/m<sup>2</sup>) sono i parametri utilizzati per le analisi climatiche.

Le precipitazioni e le temperature sono state oggetto di tecniche statistiche di Analisi di Serie Storiche per individuare i trend climatici locali. Mediante tecnica di "trend-decomposition" è stato possibile individuare le seguenti componenti:

- **Linear trend component**: permette di calcolare la pendenza che indica la linearità della tendenza (aumento o decremento) di una variabile lungo tutta una serie storica;
- **Long term-Trend component**: la tendenza di un aumento o una diminuzione dei valori di una variabile che si verifica in certo periodo di alcuni anni di una serie storica;
- **Seasonal component**: indica le variazioni che si riscontrano con analoga intensità negli stessi periodi di anno in anno, ma con intensità diversa nel corso di uno stesso anno.

Per verificare quando nella serie si verifichi o meno un cambiamento statisticamente significativo di tendenza, è stata effettuata una "Change Point Analysis" su base dell'algoritmo BEAST (Bayesian Estimator of Abrupt change, Seasonality and Trend) (Zhao et al., 2019).

Per determinare l'inizio, la durata e l'entità delle condizioni di siccità rispetto alle condizioni normali è stato calcolato lo Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010), un indice di siccità multiscalare basato su dati climatici di temperatura, precipitazione, radiazione ed evapotraspirazione.

## INDICI SATELLITARI

### Sentinel 2 data and processing

Le immagini Sentinel 2 (COPERNICUS/S2\_SR\_HARMONIZED) (tab.1) sono state processate sulla piattaforma di analisi geospaziali cloud-based Google Earth Engine. Sentinel-2 è una missione di imaging multispettrale ad alta risoluzione e ad ampio spettro che supporta gli studi di Copernicus Land Monitoring, compreso il monitoraggio della vegetazione, del suolo e della copertura idrica.

**Tab. 1:** Caratteristiche tecniche del Sentinel 2

Name	Pixel Size	Wavelength	Description
B1	60 meters	443.9nm (S2A) / 442.3nm (S2B)	Aerosols
B2	10 meters	496.6nm (S2A) / 492.1nm (S2B)	Blue
B3	10 meters	560nm (S2A) / 559nm (S2B)	Green
B4	10 meters	664.5nm (S2A) / 665nm (S2B)	Red
B5	20 meters	703.9nm (S2A) / 703.8nm (S2B)	Red Edge 1
B6	20 meters	740.2nm (S2A) / 739.1nm (S2B)	Red Edge 2
B7	20 meters	782.5nm (S2A) / 779.7nm (S2B)	Red Edge 3
B8	10 meters	835.1nm (S2A) / 833nm (S2B)	NIR
B8A	20 meters	864.8nm (S2A) / 864nm (S2B)	Red Edge 4
B9	60 meters	945nm (S2A) / 943.2nm (S2B)	Water vapor
B11	20 meters	1613.7nm (S2A) / 1610.4nm (S2B)	SWIR 1
B12	20 meters	2202.4nm (S2A) / 2185.7nm (S2B)	SWIR 2

Dall'elaborazioni delle immagini Sentinel sono stati calcolati i seguenti indici:

- **Normalised Difference Vegetation Index (NDVI)**: misura il verde (greenness) e la densità della vegetazione catturata in un'immagine satellitare. Varia tra 1 (elevata greenness e densità) e -1 (assenza di vegetazione).

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

- **Enhanced Vegetation Index (EVI)**: come l'NDVI è una misura della greenness e della densità della vegetazione. Tuttavia, EVI è più accurato in aree dense poiché mostra una sensibilità maggiore alla presenza di strutture come le canopy forestali. Varia tra 1 e -1.

$$EVI = \frac{(2.5 * (NIR - Red))}{((NIR + 6.0 * Red - 7.5 * Blue) + 1.0)}$$

- **Normalised Difference Moisture Index (NDMI)**: viene utilizzato per determinare il contenuto idrico della vegetazione e monitorare la siccità. L'intervallo di valori dell'NDMI è compreso tra -1 e 1. I valori negativi dell'NDMI (valori prossimi a -1) corrispondono a terreno arido. Valori intorno allo zero (da -0.2 a 0.4) corrispondono generalmente a stress idrico. Valori alti e positivi rappresentano una chioma alta senza stress idrico (circa 0.4 a 1).

$$NDMI = \frac{(NIR - SWIR 1)}{(NIR + SWIR 1)}$$

Per ogni indice sono state elaborate 5 immagini annuali (2018-2022) e 4 immagini per anno stagionali (inverno, primavera, estate, autunno). Le immagini sono ad una risoluzione spaziale di 10 m/pixel.

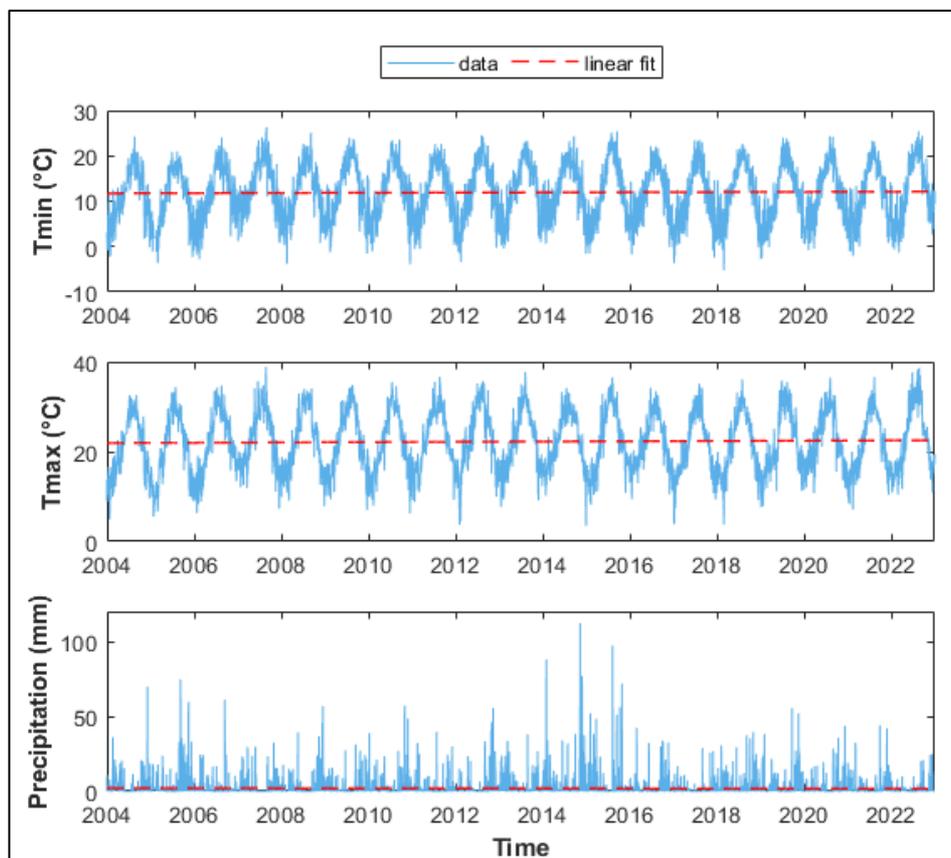
## RISULTATI

### Caratterizzazione climatica

Per gli anni di studio considerati (2004-2022) non si sono riscontrate differenze significative per i parametri di temperatura minima  $T_{min}$  (p-value = 0.99), massima  $T_{max}$  (p-value = 1.00) e precipitazioni  $P$  (p-value = 0.78).

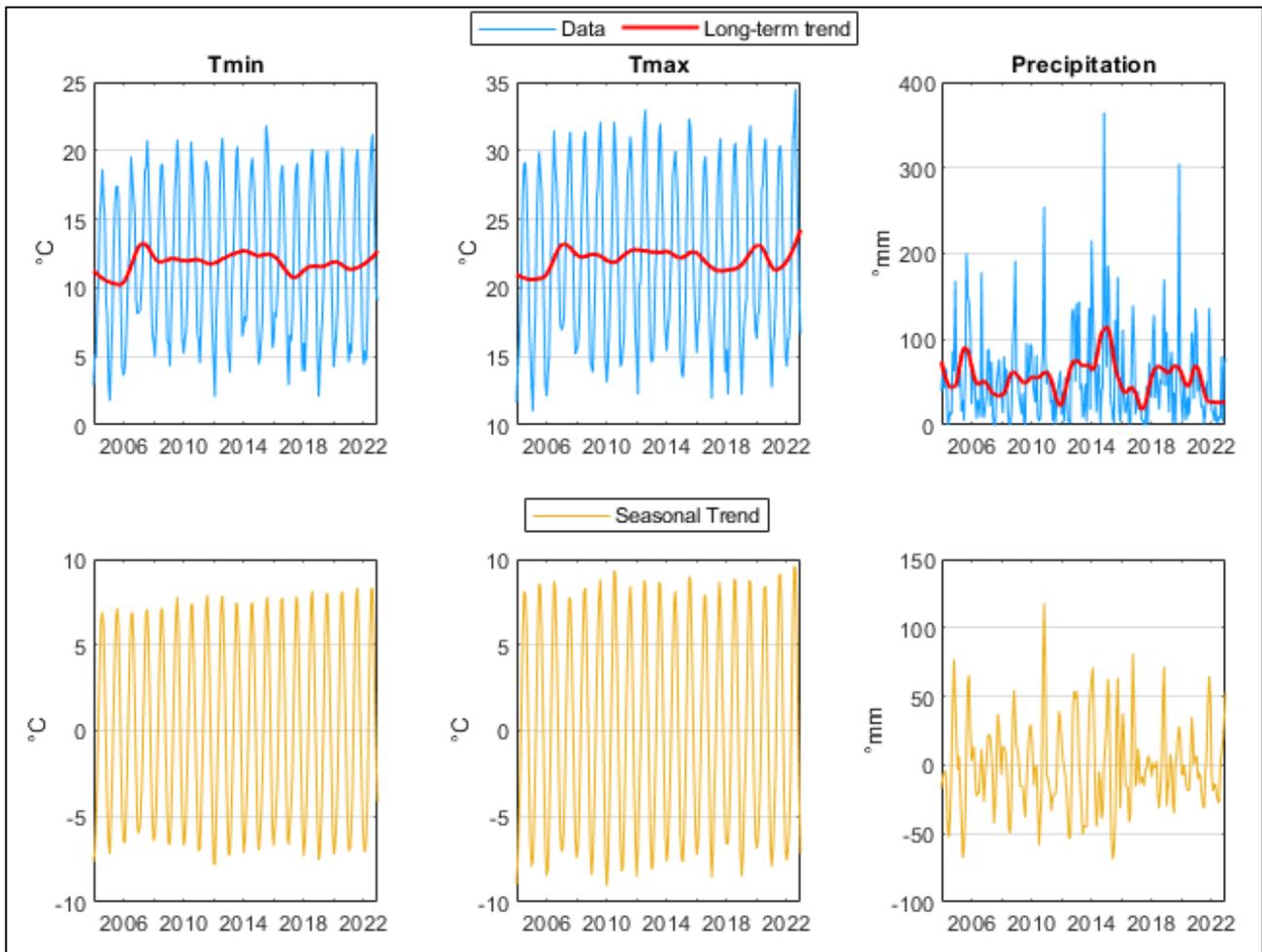
L'andamento giornaliero dei parametri di temperatura minima, massima e precipitazione sono riportati in fig. 1.  $T_{min}$  e  $T_{max}$  mostrano un andamento pressappoco costante nel tempo, evidenziato dalle reciproche linee di tendenza. Per entrambi i parametri, infatti, i relativi coefficienti angolari della retta ( $\beta$ ) assumono un valore estremamente vicino al valore zero (5.64E-05 per  $T_{min}$  e 9.10E-05 per  $T_{max}$ ), confermando così l'assenza di crescita significativa.

Anche le precipitazioni  $P$  non presentano un trend lineare significativo. Il coefficiente angolare della retta in questo caso presenta un valore negativo ma, essendo anch'esso vicino al valore zero ( $\beta = -4.58E-05$ ), conferma l'assenza di una diminuzione significativa.



**Fig. 1:** Andamento giornaliero di Temperatura minima  $T_{min}$  (°C), massima  $T_{max}$  (°C) e precipitazioni  $P$  (mm). In rosso tratteggiato l'andamento del trend lineare.

La variabilità di  $T_{min}$ ,  $T_{max}$  e  $P$  all'interno della serie storica è rappresentata dalla componente del trend a lungo termine (Long-term trend) e dalla componente stagionale (Seasonal trend) raffigurate in figura 2.



**Fig. 2:** Andamento del trend a lungo termine e del trend stagionale ricavati su base giornaliera.

Temperatura minima e massima non mostrano una eccessiva variabilità se non nei valori di coda della serie; le precipitazioni invece mostrano una ampia variabilità.

La Change Point analysis della componente a lungo termine e della componente stagionale ha permesso di verificare quando queste variazioni siano significative e consentano di identificare periodi di tendenza stabili nei valori di temperature e precipitazioni. I change point ( $Cp$ ) sono calcolati sulla probabilità che il momento in cui la variazione identificata nel trend sia significativa o meno.

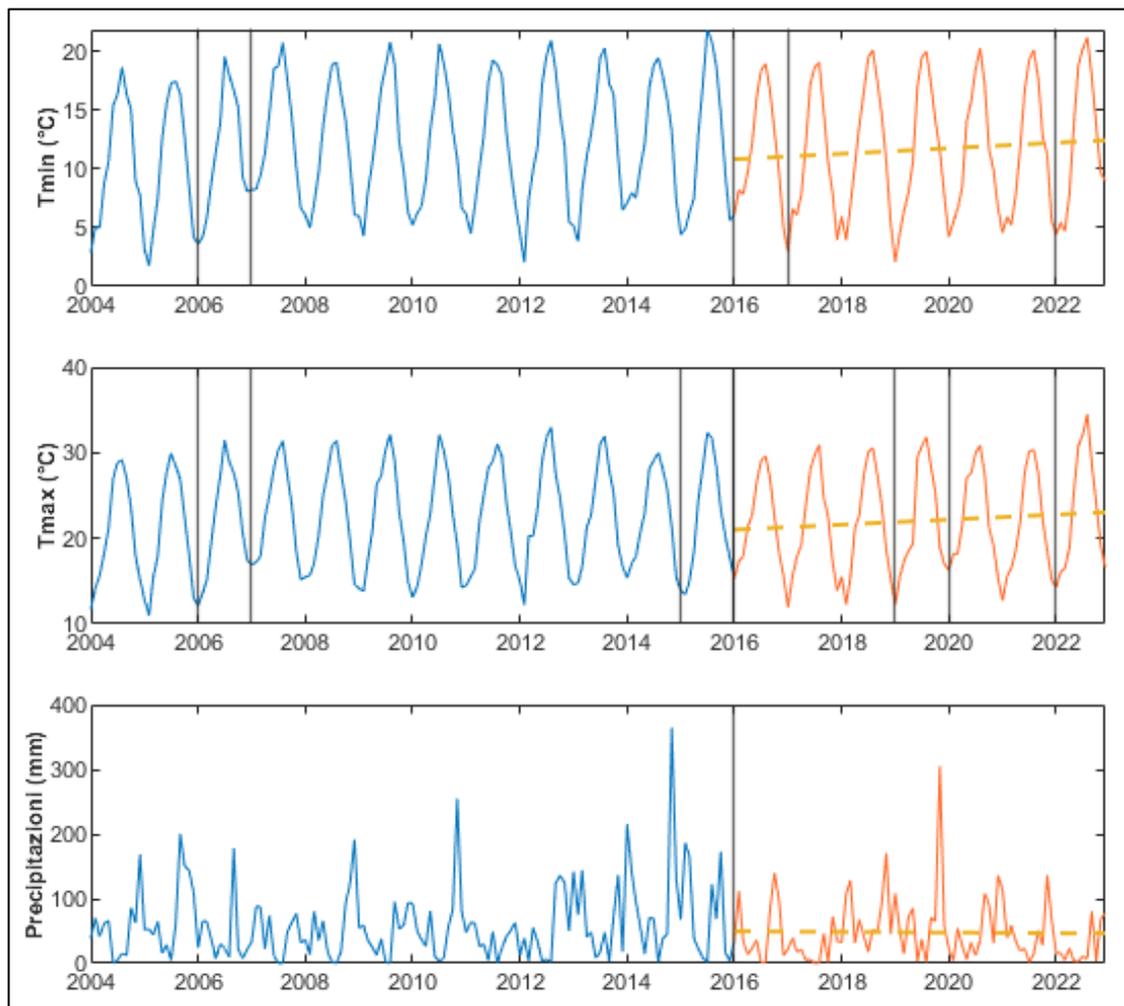
Nella tabella seguente (tab.2) vengono riportati i chage point identificati con i relativi valori di probabilità. Sono considerati accettabili i  $Cp$  la cui probabilità di essere significativi è superiore a 0.70.

**Tab. 2:** Output della Change point analysis.

Parametro	Change Point (Anno)	Probabilità
<i>Tmin</i>	2006	0.964
	2016	0.806
	2007	0.568

	2022	0.481
	2017	0.351
<i>T<sub>max</sub></i>	2019	0.968
	2020	0.961
	2022	0.858
	2016	0.844
	2006	0.839
	2007	0.362
	2015	0.186
<i>Precipitation</i>	2016	0.067

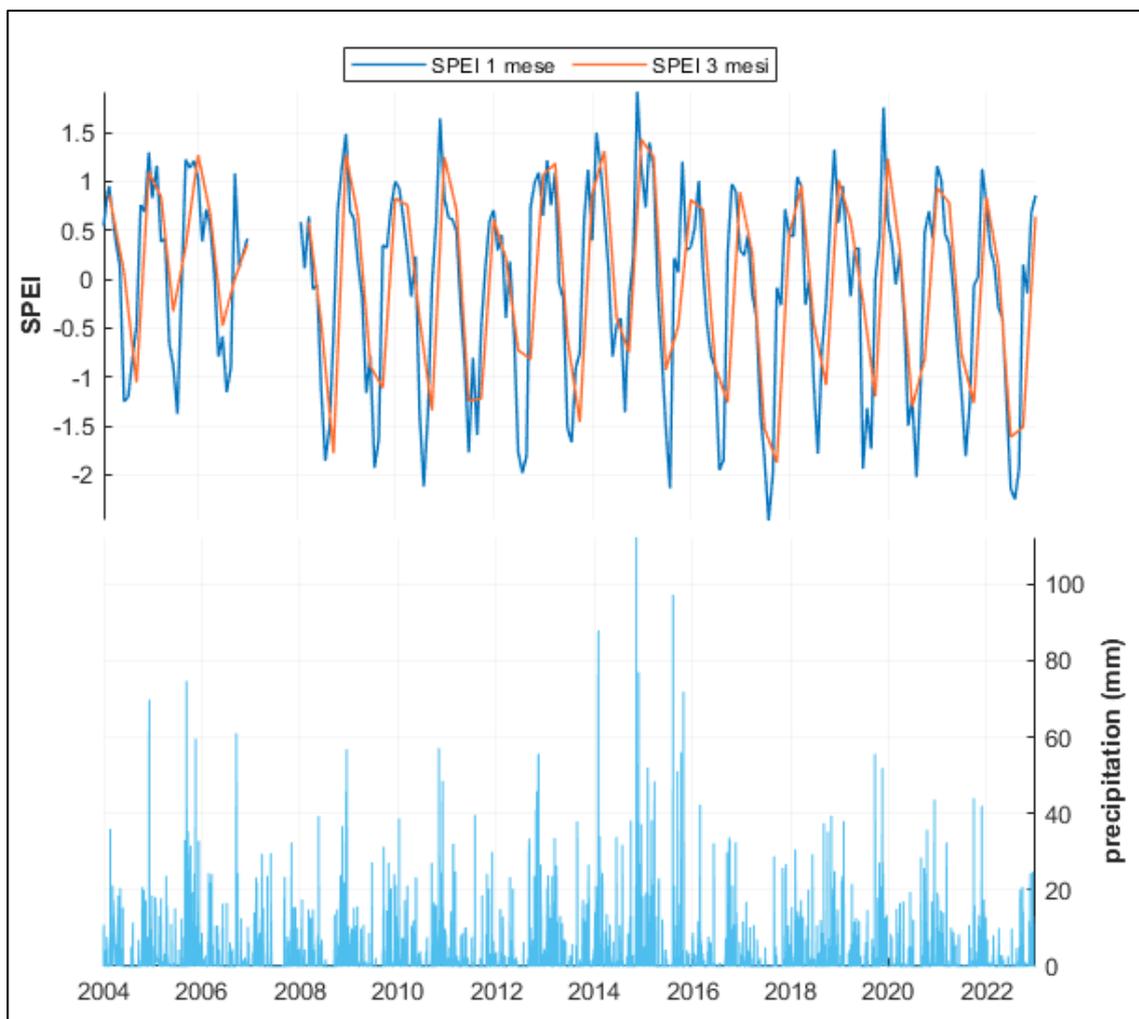
Quello che si evidenzia è che dal 2016 in poi si ha un trend crescente significativo di *T<sub>min</sub>* ( $\beta=0.02$ ) e *T<sub>max</sub>* ( $\beta=0.03$ ). Per le precipitazioni risulta un solo *C<sub>p</sub>* non significativo (tab.2), a conferma che le precipitazioni sono rimaste costanti nel tempo (fig.3).



**Fig. 3:** In blu l'andamento temporale (mensile) di *T<sub>min</sub>*, *T<sub>max</sub>* e *P*; in nero i *C<sub>p</sub>* individuati; in tratteggiato il nuovo trend individuato a partire dal 2016 (serie evidenziata in rosso).

## Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

L'elaborazione dello SPEI index ha consentito di valutare l'inizio, la durata e l'entità delle condizioni di siccità. La condizione di aridità è stata valutata per l'intera serie climatica sulla base di 1 mese e di 3 mesi mettendoli in relazione con l'andamento delle precipitazioni (fig.4). Il grafico sottostante indica un progressivo aumento delle condizioni di aridità legate all'aumento delle temperature e alla riduzione in intensità delle precipitazioni ( $\beta_{2004-2022} = -0.07$ ). Tale condizione si accentua se considerato il trend individuato dal 2016 al 2022 ( $\beta_{2016-2022} = -0.23$ ).



**Fig. 4:** Andamento temporale dello SPEI su scala temporale mensile (SPEI 1) e trimestrale (SPEI 3) in relazione all'andamento delle precipitazioni. Il vuoto tra il 2006 ed il 2008 è dovuto all'assenza di dati registrati di radiazione (RAD) da parte delle centraline climatiche. I valori tra 0 e -0,99 indicano lieve aridità; quelli tra -1 e -1,49, moderata aridità; i valori di SPEI maggiori -1.5 indicano severa aridità.

## Analisi vegetazionale satellitare

Per il calcolo e l'analisi degli indici vegetazionali sono state utilizzate immagini della collezione COPERNICUS/S2\_SR\_HARMONIZED. Le immagini di questa collezione sono disponibili con le relative correzioni atmosferiche, del terreno e della nuvolosità. Tali immagini sono disponibili a partire dal 28/03/2017 ad oggi. Per questo motivo l'analisi degli indici è stata possibile considerando il periodo che va dal 2018 al 2022.

I valori annuali medi di NDVI, EVI e NDMI calcolati per la pineta sono riportati in tabella (tab.3).

**Tab. 3** Valori medi NDVI, EVI, NDMI calcolati per l'area Pineta dal 2018 al 2022.

<b>Anno</b>	<b>NDVI</b>	<b>SD</b>	<b>EVI</b>	<b>SD</b>	<b>NDMI</b>	<b>SD</b>
<b>2018</b>	0.658	±0.056	0.392	±0.094	0.285	±0.048
<b>2019</b>	0.737	±0.065	0.449	±0.105	0.382	±0.059
<b>2020</b>	0.710	±0.063	0.437	±0.102	0.362	±0.056
<b>2021</b>	0.715	±0.060	0.422	±0.101	0.354	±0.053
<b>2022</b>	0.681	±0.058	0.405	±0.097	0.300	±0.048

La correlazione di Pearson ( $R$ ) tra l'andamento degli indici e i parametri climatici evidenzia come NDVI, EVI e NDMI siano correlati positivamente, con modesta intensità, con le precipitazioni ( $R_{\text{NDVI}}=0.529$ ;  $R_{\text{EVI}}=0.563$ ;  $R_{\text{NDMI}}=0.553$ ) e fortemente correlate negativamente con le temperature ( $R_{\text{NDVI}}= - 0.892$ ;  $R_{\text{EVI}}= - 0.787$ ;  $R_{\text{NDMI}}= - 0.862$ ).

L'influenza delle precipitazioni e della temperatura sugli indici risulta maggiormente evidente sulla base della stagionalità (figg.5 e 6).

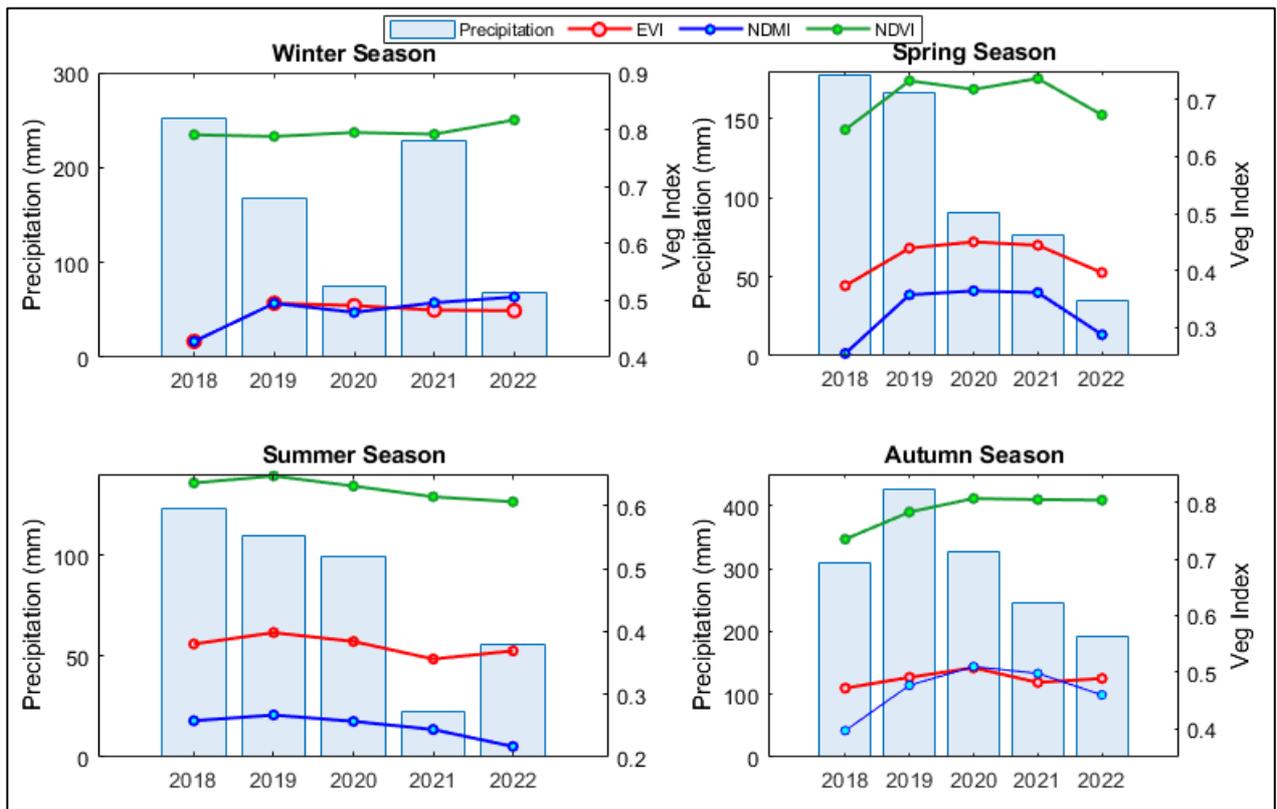


Fig. 5: Correlazione stagionale tra NDVI, EVI, NDMI e Precipitazioni.

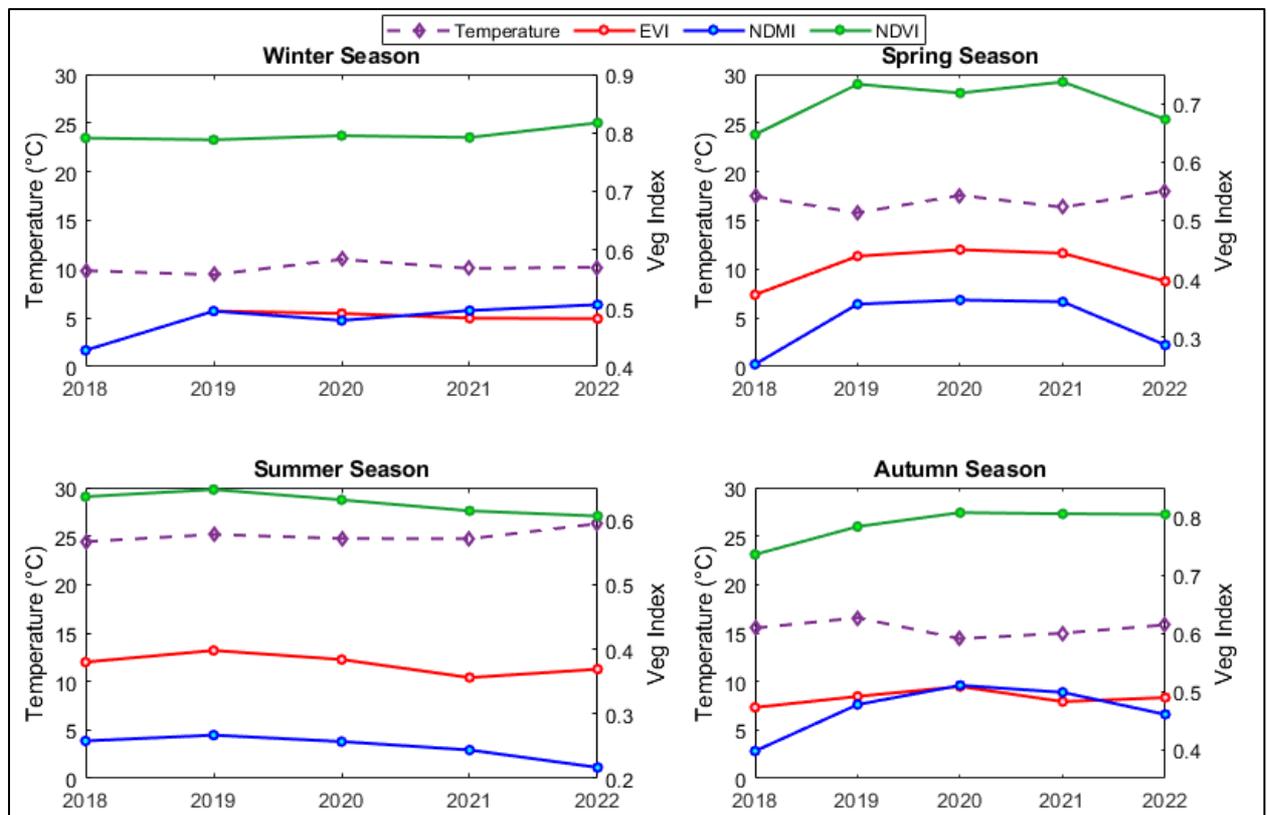
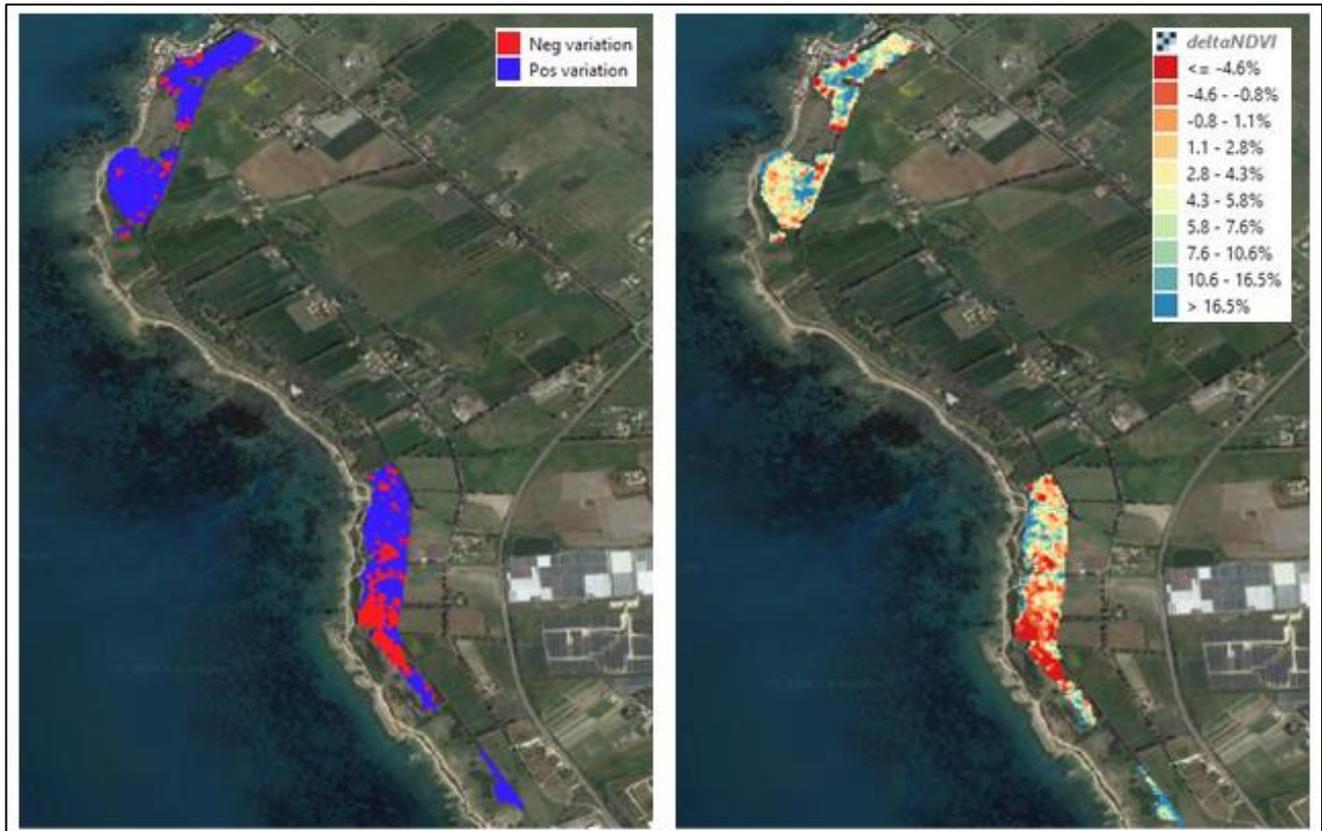


Fig. 6: Correlazione stagionale tra NDVI, EVI, NDMI con la temperatura.

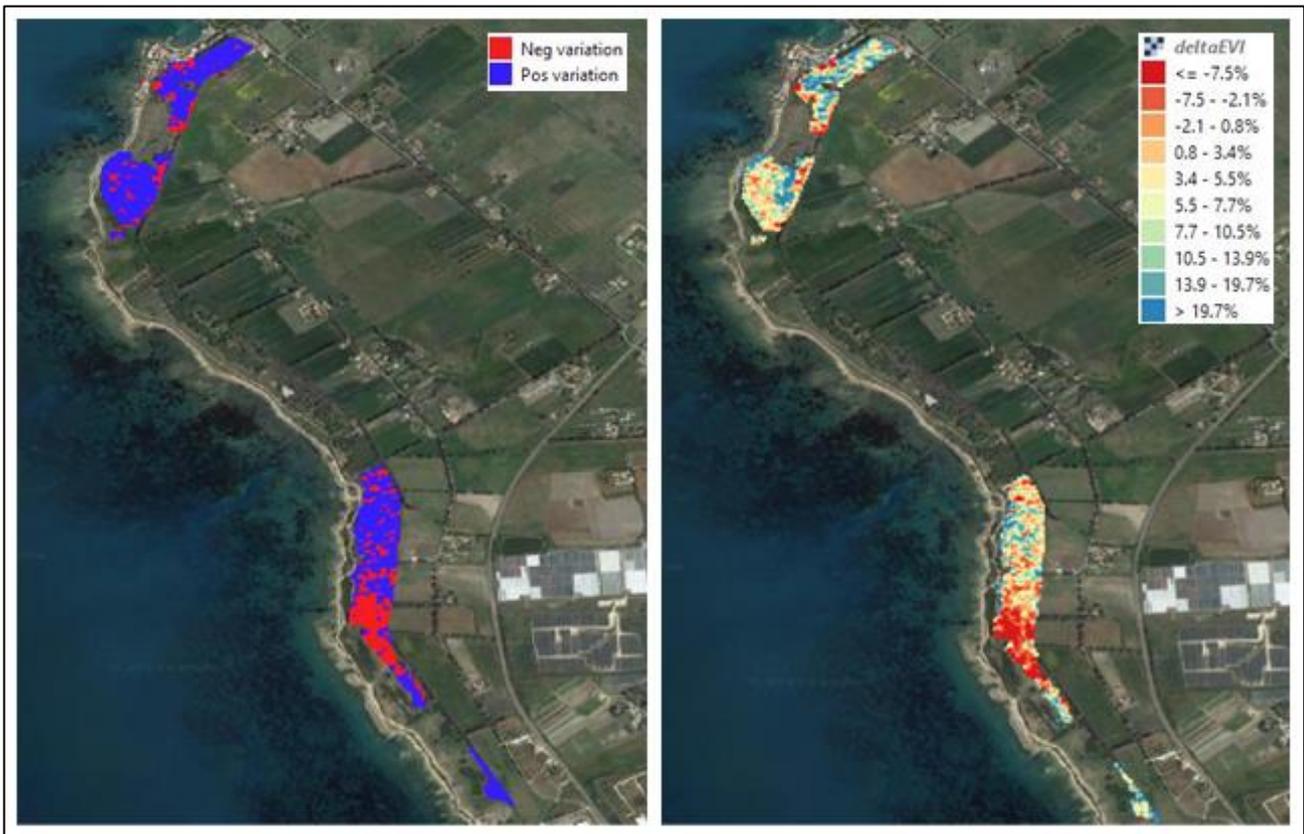
Confrontando l'andamento stagionale degli indici con l'andamento dello SPEI index stagionale (3 mesi) si osserva una correlazione  $R$  fortemente positiva per NDVI ( $R=0.835$ ), EVI ( $R=0.802$ ) e NDMI ( $R=0.851$ ). Questo indica che lo stato di salute fogliare della pineta, espressa tramite NDVI ed EVI, sia il contenuto di acqua in esse, indicata dal NDMI, tenderanno a ridursi se le condizioni climatiche locali dovessero seguire le tendenze individuate.

## APPENDICE CARTOGRAFICA

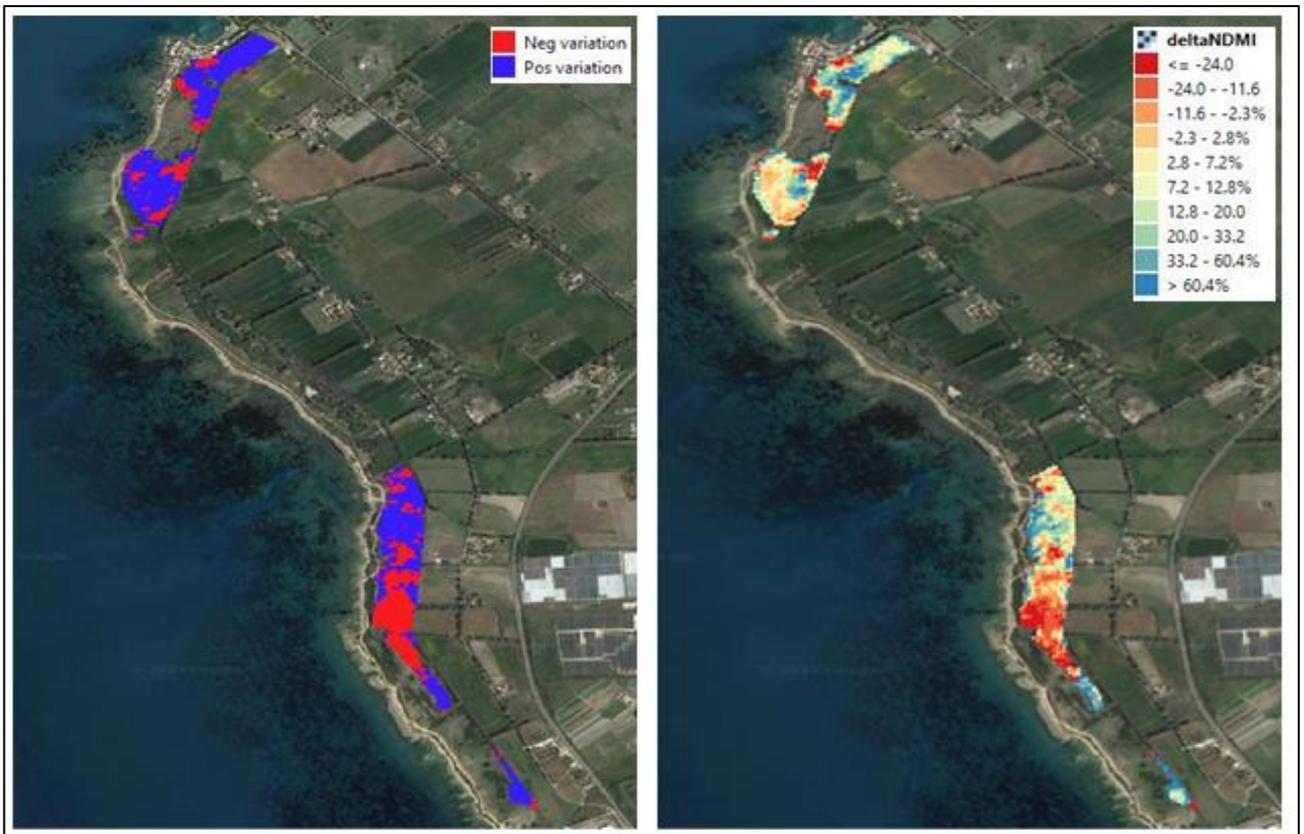
### Variazione annuale



**Figura 1:** Spazializzazione della variabilità positiva e negativa (sinistra) e della intensità percentuale di variazione (destra) di NDVI per l'area caratterizzata a pineta.

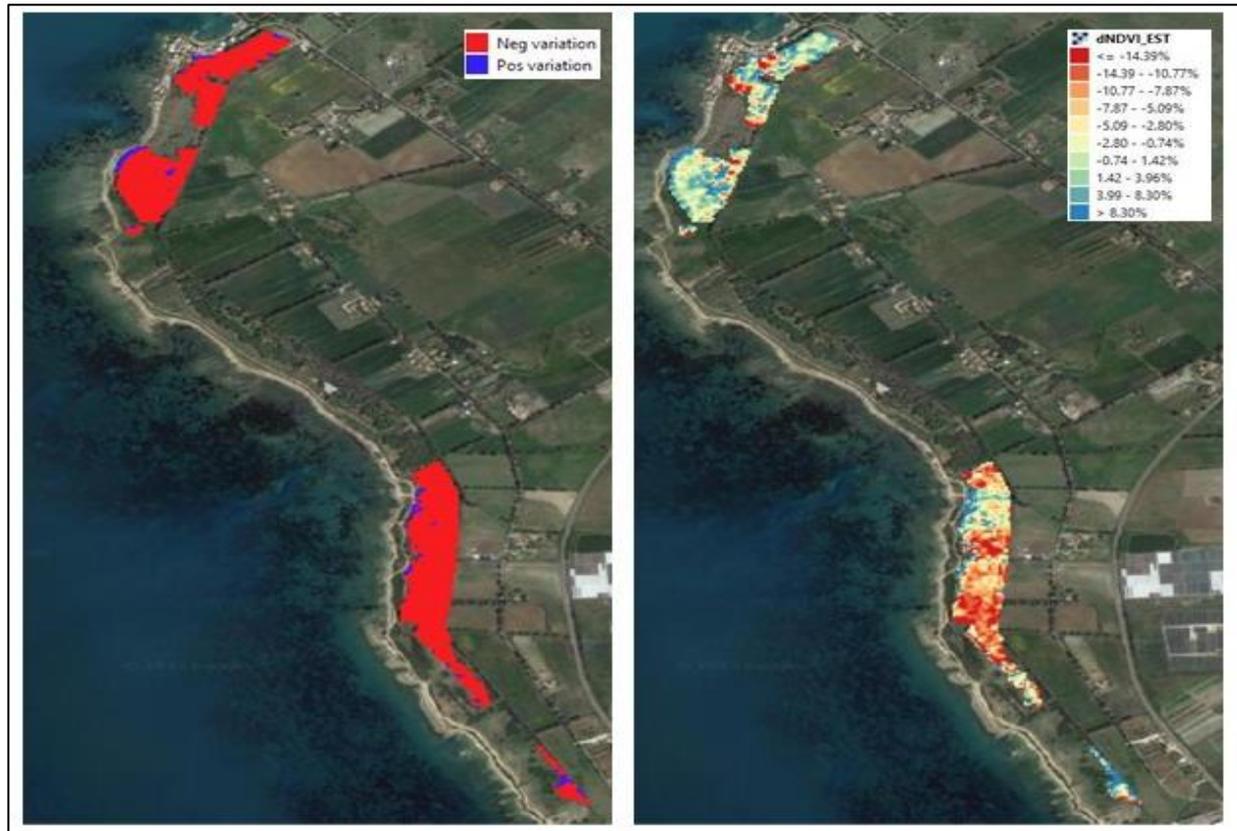


**Figura 2:** Spazializzazione della variabilità positiva e negativa (sinistra) e della intensità percentuale di variazione (destra) di EVI per l'area caratterizzata a pineta.



**Figura 3:** Spazializzazione della variabilità positiva e negativa (sinistra) e della intensità percentuale di variazione (destra) di NDMI per l'area caratterizzata a pineta.

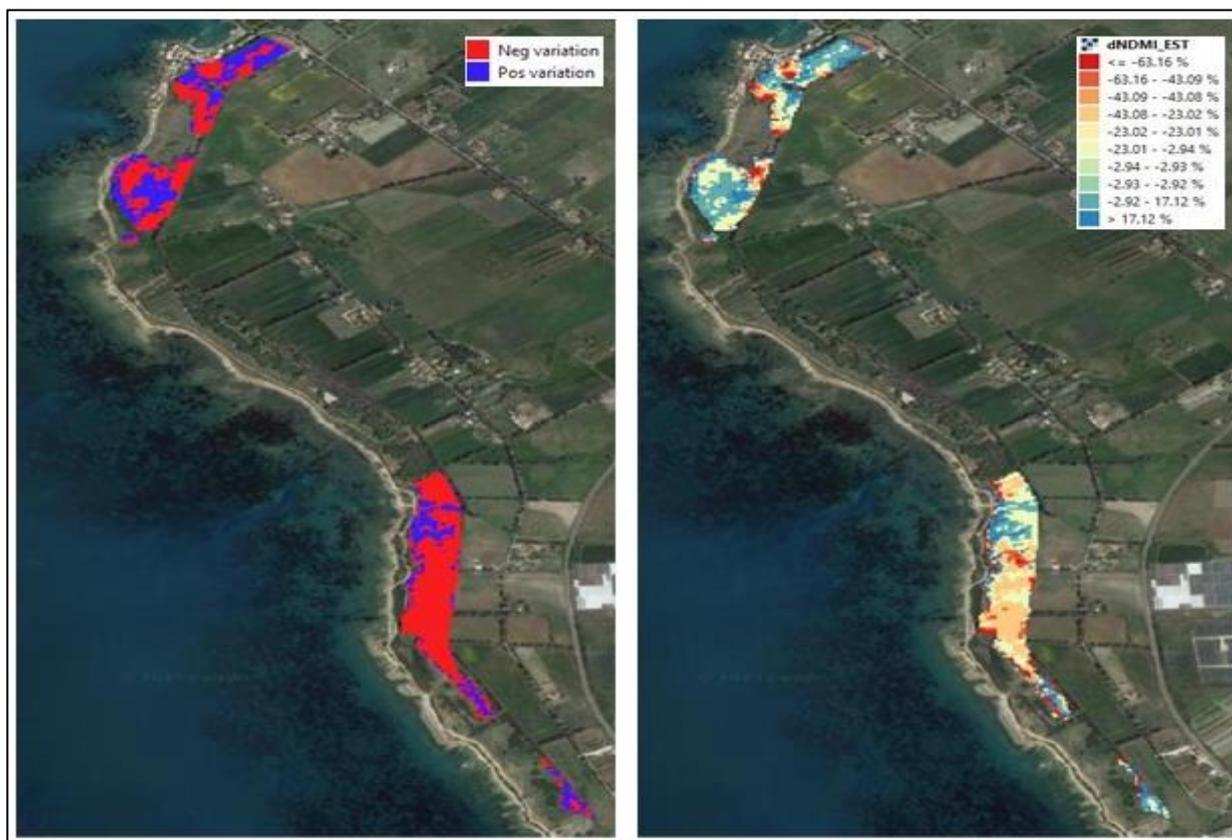
## Variazione estiva



**Figura 4:** Spazializzazione della variabilità positiva e negativa (sinistra) e della intensità percentuale di variazione (destra) di NDVI per l'area caratterizzata a pineta nella stagione estiva.



**Figura 5:** Spazializzazione della variabilità positiva e negativa (sinistra) e della intensità percentuale di variazione (destra) di EVI per l'area caratterizzata a pineta nella stagione estiva.



**Figura 6:** Spazializzazione della variabilità positiva e negativa (sinistra) e della intensità percentuale di variazione (destra) di NDMI per l'area caratterizzata a pineta nella stagione estiva.