



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA

DIPARTIMENTO PER LA INNOVAZIONE NEI SISTEMI BIOLOGICI, AGROALIMENTARI E FORESTALI

(DIBAF)

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN ECOLOGIA FORESTALE - XXVII CICLO

AGR/05

***ANALISI DI LUNGO TERMINE SUI FATTORI DI CONTROLLO DELLO SCAMBIO DI
CARBONIO IN UNA FAGGETA DELL'ITALIA CENTRO MERIDIONALE***

COORDINATORE:

PROF. PAOLO DE ANGELIS

FIRMA

CANDIDATO:

FRANCESCO MAZZENGA

FIRMA

TUTORE:

DR GIORGIO MATTEUCCI

FIRMA

AA 2016/2017

Università degli Studi della Tuscia
Dipartimento per la innovazione nei sistemi biologici, agroalimentari e forestali (DIBAF)
Via S. Camillo de Lellis, snc 01100 Viterbo
Corso di Dottorato di Ricerca in Ecologia Forestale
Coordinatore: Prof. Paolo De Angelis
Tesi di Dottorato di Ricerca in Ecologia Forestale (XXVII ciclo)
di: Francesco Mazzenga
AA 2016/2017

INDICE

1	introduzione.....	8
1.1	Cambiamenti climatici	8
1.2	Ciclo del carbonio.....	16
1.2.1	Bilancio del carbonio negli ecosistemi forestali.....	18
2	obiettivi	21
3	materiali e metodi.....	21
3.1	Il sito sperimentale di Collelongo.....	21
3.2	Inquadramento e descrizione strutturale	21
3.2.1	Faggio e faggete in Italia	21
3.2.2	La faggeta di Collelongo	23
3.2.3	Il sito di Selva Piana.....	24
3.3	Descrizione della stazione di monitoraggio.....	26
3.3.1	strumentazione impiegata.....	27
3.4	Misure Eddy Covariance	33
3.4.1	Teoria di base.....	33
3.4.2	Applicazioni nell'ecologia forestale.....	37
3.4.3	Calcolo dei flussi	39
3.4.4	Calcolo del VPD (deficit di pressione di vapore).....	40
3.5	dati ancillari.....	41
3.5.1	Produzione di Lettieria Epigea.....	41
3.5.2	Misure di accrescimento tramite Dendrometri.....	42
3.6	Telerilevamento e indici di vegetazione	42

3.7 I droni per il <i>proximity sensing</i> e realizzazione di un SAPR per il monitoraggio ambientale.....	45
3.7.1 dimensionamento	47
3.7.2 assemblaggio calibrazione e programmazione	51
3.7.3 descrizione del progetto e scelta della strumentazione	52
4 risultati.....	55
4.1 clima.....	55
4.2 Convenzioni utilizzate.....	55
4.3 Presentazione delle principali variabili.....	57
4.3.1 Concentrazione di Anidride Carbonica (CO ₂) in atmosfera nel sito di selva piana.....	58
4.3.2 Net Ecosystem Exchange (NEE).....	59
4.3.3 temperatura dell'aria (Ta).....	61
4.3.4 Radiazione Fotosinteticamente Attiva (PPFD)	63
4.3.5 Deficit di Pressione di Vapore (VPD)	64
4.4 Stagione vegetativa	65
4.4.1 Trend del periodo vegetativo in base all'indice EVI.....	66
4.4.2 Trend del periodo vegetativo in base ai flussi e al Carbon Uptake	68
4.5 relazioni funzionali tra parametri climatici e tra parametri climatici e NEE.....	71
4.5.1 relazione tra PPFD e Ta.....	72
4.5.2 Relazione tra NEE e PPFD	73
4.5.3 relazione tra NEE notturna (respirazione) e parametri climatica ..	77

4.5.4	relazione tra NEE diurna e Fattori Ambientali	86
4.6	Andamento di GPP, Reco e NEE	92
4.7	utilizzo di un SAPR come Sistema Infrastrutturale Mobile per il monitoraggio Diretto delle Risorse ambientali	94
4.7.1	Immagini e Filmati a colori ottenuti con la fotocamera digitale Gopro	95
4.7.2	indici NDVI, PRI, PAR.....	96
4.7.3	confronto tra indici, flussi di CO ₂ e variabili ambientali.....	101
5	Discussioni.....	105
6	conclusioni.....	113
7	bibliografia.....	116
8	appendice	124
8.1	normativa APR (aeromobili a pilotaggio remoto) schema riassuntivo regolamento ENAC (Ente nazionale Aviazione Civile) mezzi aerei a pilotaggio remoto.....	124
8.1.1	Schema riassuntivo del Regolamento ENAC seconda edizione.....	124

ABSTRACT

Lo scambio di CO₂ tra l'atmosfera e la foresta di faggio nel sito di Collelongo, in Italia, è stata misurata costantemente per tutti gli anni che riguardano questo lavoro (2000–2015). La misurazione simultanea di molti parametri che influenzano l'assorbimento di CO₂ rende possibile poter mettere in relazione lo scambio di CO₂ con gli andamenti di importanti variabili climatiche (es. temperatura), ambientali (es. concentrazione di CO₂ atmosferica) e stagionali (es. durata della stagione vegetativa). Lo scambio netto di CO₂ (NEE) è stato misurato con la tecnica della correlazione turbolenta (*eddy covariance*). La Respirazione dell'ecosistema (Reco) e la produzione primaria lorda (GPP) stimata a partire da Reco e NEE provengono da calcoli standardizzati dal database Europeo FLUXNET. Nel corso degli anni la faggeta ha agito come un importante *Sink* che in media sequestra 660 gC m⁻² yr⁻¹. Durante il periodo di osservazione 2000-2015 non è stato osservato un aumento significativo della NEE annuale, mentre è stato rilevato un aumento significativo di Reco (con un tasso di 21 gC m⁻² yr⁻¹) e un non significativo aumento di GPP. Il periodo fogliare (stagione vegetativa) è aumentato di 1.33 giorni all'anno. Dall'analisi su scala annuale fatta nel periodo di massima foliazione emerge che assorbimento e respirazione sono collegate nelle loro risposte. Alle latitudini di Collelongo estati calde e lo stress idrico agiscono sul metabolismo complessivo dell'ecosistema, andando a limitare sia la fotosintesi che la respirazione. In alcune estati, la scarsità di acqua è risultata essere il principale fattore di stress, comportando una diminuzione della fotosintesi in misura maggiore rispetto alla respirazione e quindi riducendo l'assorbimento netto di CO₂. Inoltre il lavoro svolto con il drone ha mostrato le grandi potenzialità di questo strumento nel campo dell'ecologia forestale, mostrando le importanti relazioni tra gli indici di vegetazione ottenuti dal *proximal sensing*.

In the Collelongo site (central Italy), the exchange of CO₂ between the atmosphere and the beech forest was measured continuously for all years between 2000 and 2015. The simultaneous measurement of many parameters that influence the CO₂ uptake makes possible to relate the CO₂ exchange with some important climatic (e.g. temperature), environmental (e.g. (atmospheric CO₂ concentration) and site (e.g. growing season length) variables. The net CO₂ exchange (NEE) was measured by the eddy covariance method. Ecosystem respiration (Reco) and Gross Primary Production (GPP) calculated from Reco and NEE were obtained through standardised procedures from the European FLUXNET database. Over the years the

beech forest acted as an important sink of carbon (average of $660 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$). During the observation period 2000-2015 NEE did not increased significantly, while it has been noticed a significant increase of Reco ($21 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) and a non-significant increase of GPP. The growing season length (leafed period) increased by 1.33 days a year. The analysis based on data collected in the period of maximum leaf area showed that photosynthesis and respiration are connected in their responses. At the latitudes of the Collelongo site, heat and water stress exert an effect on the overall ecosystem metabolism limiting both photosynthesis and respiration. At the site, heat coupled with water stress is the main stress factor, inducing a decrease in photosynthesis more than in respiration, and therefore in the overall CO_2 uptake. Furthermore, the preliminary work done with the drone demonstrated the great potential of this tool in forest ecology, showing important relationships between vegetation indices obtained from the proximal sensing.

1 INTRODUZIONE

1.1 CAMBIAMENTI CLIMATICI

I cambiamenti climatici costituiscono un'importante pressione sugli ecosistemi e rappresentano un fenomeno molto attuale: le temperature aumentano, i regimi delle precipitazioni si modificano, i ghiacciai e la neve si sciolgono e il livello medio globale del mare è in aumento. Si prevede che tali cambiamenti continueranno e che gli eventi climatici estremi all'origine di pericoli quali alluvioni e siccità diventeranno sempre più frequenti e intensi. È altamente probabile che la maggior parte del riscaldamento verificatosi a partire dalla metà del XX secolo sia dovuto all'osservato aumento delle concentrazioni di gas a effetto serra a causa delle emissioni provenienti dalle attività umane. La temperatura globale è aumentata di circa 0,8 °C negli ultimi 150 anni e si prevede un ulteriore incremento (IPCC, 2013).

Un aumento superiore ai 2 °C rispetto alle temperature preindustriali accresce il rischio di cambiamenti pericolosi per i sistemi umani e naturali globali. La Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) ha stabilito l'obiettivo di limitare l'aumento della temperatura media globale rispetto al periodo preindustriale al di sotto dei 2 °C (*Paris Agreement on Climate Change 2015*). Le emissioni globali di gas a effetto serra devono stabilizzarsi nel decennio attuale e ridursi del 50 %, rispetto ai livelli del 1990, entro il 2050. Prendendo in considerazione gli sforzi necessari da parte dei paesi in via di sviluppo, l'UE sostiene l'obiettivo di ridurre le sue emissioni di GHG (*Green House Gases*), entro il 2030 di almeno il 40% rispetto ai livelli del 1990 e adottare misure efficaci sul piano dei costi che siano funzionali al conseguimento dell'obiettivo a lungo termine di ridurre le emissioni dell'80-95% entro il 2050 (*Paris Agreement on Climate Change 2015*). L'effetto serra è un fenomeno naturale dovuto alla proprietà di alcuni gas troposferici di assorbire la radiazione infrarossa emessa dalla superficie della Terra e rinviarla verso la stessa, determinando in questo modo il riscaldamento dei bassi strati atmosferici. In assenza di tale effetto la terra sarebbe un pianeta ghiacciato. L'anidride carbonica contribuisce per il 75% all'effetto serra atmosferico, i clorofluorocarburi (CFC) e le tracce di altri gas di origine industriale (HCFC) per il 21%, il metano (CH₄) e il protossido di azoto (N₂O) per il 17% e il 7% rispettivamente. L'anidride carbonica e il più importante GHG prodotto dell'attività umana, la sua concentrazione è cresciuta da un valore pre-industriale di 280 ppm ad un valore di oltre 400 ppm nel 2016 (Fig. 1).

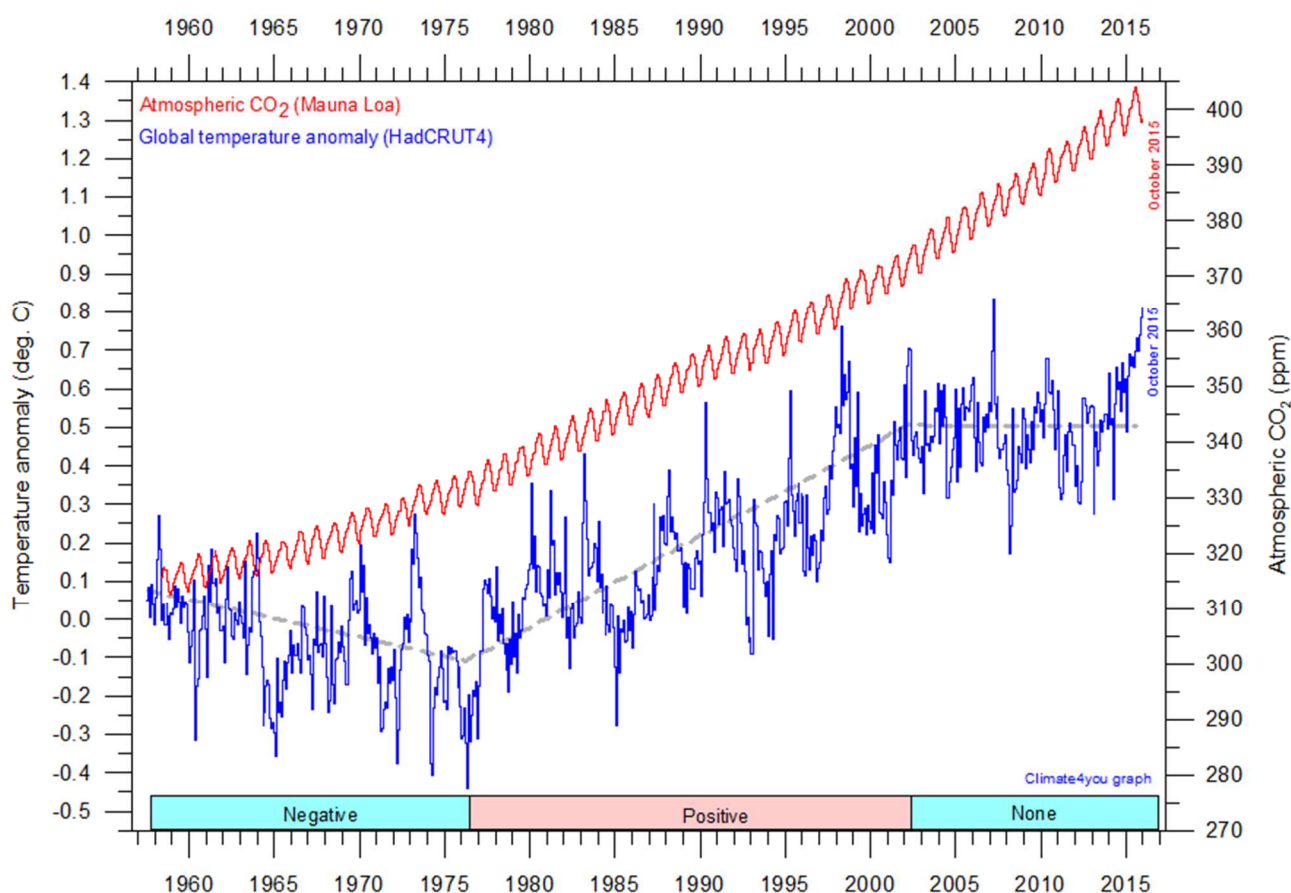


Figura 1: Andamento della concentrazione atmosferica di CO₂ e delle anomalie termiche Tratta dal HadCRUT 4 (Hadley Centre of the UK compiled by the Climatic Research Unit)

Nel XX secolo, la temperatura media globale, alla superficie terrestre, è aumentata di 0.85 [0.65-1.06] °C, con un allarmante incremento del tasso di crescita nelle ultime decadi (IPCC, 2013). L'aumento delle temperature non risulta essere uniforme dal punto di vista geografico, in quanto le terre emerse presentano un riscaldamento maggiore degli oceani, ed è stato registrato un aumento delle temperature medie più elevato nell'emisfero settentrionale e nelle zone boreali. Inoltre, si sono registrati valori estremi nelle regioni artiche e valori meno variabili nelle regioni temperate. Una delle conseguenze immediate già osservabili per l'aumento delle temperature medie, a scala planetaria, è la drastica riduzione dell'estensione delle coperture glaciali e nivali. I dati satellitari, raccolti dal 1978, mostrano una riduzione dell'estensione dei ghiacciai artici di 2.7 [2.1-3.8] % per decade, con un'ampia diminuzione durante i periodi estivi di 7.4 [5.0-8] % per decade. In media, lo scioglimento delle nevi e dei ghiacciai continentali è aumentato in entrambi gli emisferi. La superficie della copertura nevosa nell'emisfero nord è diminuita del 5% a partire dal 1980. A causa della dilatazione termica dell'acqua e della fusione dei ghiacciai e delle masse glaciali polari, il livello medio globale del mare è aumentato di 0.17 [± 0.05] m nel XX secolo. Anche per questo fenomeno si registrano trend in aumento: nel periodo dal 1961 al 1993 il livello medio globale del mare è cresciuto di 1.8 [1.3-2.3] mm/anno e dal 1993 al

2007 di 3.1[2.4-3.8] mm/anno. Dal 1900 al 2005, si è riscontrato inoltre un aumento delle precipitazioni nelle regioni orientali dell'America settentrionale e meridionale, e una diminuzione delle precipitazioni nel Sahel, nell'area Mediterranea, in Sud Africa, e nell'Asia meridionale, con l'aggravarsi dal 1970 dei problemi già esistenti di siccità.

I cambiamenti nella frequenza delle precipitazioni e nei tassi di evaporazione degli oceani portano ad una diminuzione delle temperature medie delle masse d'acqua alle medie e alte latitudini, e un aumento della salinità alle basse latitudini. Tra i numerosi altri fenomeni legati ai cambiamenti climatici sono inclusi anche l'aumento delle temperature degli oceani, con incremento di circa 0.3 °C nei primi 300 m e di 0.04°C nei primi 3000 m, l'aumento del contenuto medio di vapore acqueo in atmosfera, i cambiamenti nelle temperature estreme, variazioni nelle strutture dei venti, e alterazioni nella frequenza e intensità degli eventi estremi come siccità, precipitazioni eccezionali, ondate di calore, e cicloni tropicali. I dati riportati delle osservazioni dirette dei cambiamenti climatici recenti sono stati raccolti da fonti numeriche fornite dal Centro Distribuzione Dati (DDC) del Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>).

Nell'ottobre 2013, l'IPCC ha completato il Quinto Rapporto di Valutazione (AR5), in cui viene sottolineata l'inequivocabilità della variazione dei parametri climatici, e riconosciuto un nesso di causalità tra l'aumento delle emissioni dei "gas serra", e l'incremento della temperatura media globale. I cambiamenti della concentrazione in atmosfera di vapore acqueo, anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), ossidi di azoto (NO_x), clorofluorocarburi (CFC), ozono (O₃), e altri gas serra, della radiazione solare e dell'uso del suolo, hanno alterato senza alcun dubbio il bilancio energetico del sistema climatico, generando notevoli ripercussioni sul sistema terrestre e causando molti effetti dannosi sugli ecosistemi, società ed economia. I gas serra assorbono le radiazioni infrarosse emesse dalla Terra, e riflettono verso la superficie terrestre una gran parte di energia termica assorbita. L'aumento delle loro concentrazioni in atmosfera, principalmente a causa dell'uso di combustibili fossili, insieme all'agricoltura e alla deforestazione, determina il surriscaldamento del Pianeta, sia a livello locale che globale. Le concentrazioni di CO₂, CH₄, e N₂O superano adesso notevolmente le più alte concentrazioni registrate nelle carote di ghiaccio negli ultimi 800.000 anni.

I tassi medi di aumento delle concentrazioni atmosferiche durante il secolo scorso sono, con confidenza molto alta, senza precedenti negli ultimi 22.000 anni (IPCC 2103). Il biossido di carbonio è uno dei principali gas serra presenti in atmosfera, il cui incremento è imputabile principalmente alle attività antropiche degli ultimi due secoli. Fino la metà del XVIII secolo, le concentrazioni massime di CO₂ in atmosfera erano rimaste comprese tra i 275-285 µmol mol⁻¹, eccetto durante le ere glaciali, in cui diminuivano sino a 180-200 µmol mol⁻¹. Negli ultimi 250 anni, invece, la concentrazione di CO₂ è

aumentata fino a raggiungere valori di 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ registrati nel 2016. Gli aumenti globali di CO_2 sono dovuti principalmente all'uso di combustibili fossili (petrolio, carbone, e gas naturale), e in minor contributo alla deforestazione. L'aumento delle concentrazioni di CH_4 è iniziato nella seconda metà del XVIII secolo, in cui presentava valori di 670 [± 70] nmol mol^{-1} , e ha raggiunto un valore di 1803 nmol mol^{-1} nel 2011 (IPCC, 2013). La concentrazione atmosferica del metano in questa data ha superato di gran lunga il range naturale degli ultimi 650,000 anni (320-790 nmol mol^{-1}). Ci sono diverse fonti che determinano l'aumento della concentrazione di metano atmosferico tra cui si possono citare, per ordine di importanza, le paludi, le torbiere, l'uso di combustibili fossili, le discariche, gli allevamenti di bestiame, le risaie e la combustione di biomassa. Il metano ha un potenziale di riscaldamento globale maggiore dell'anidride carbonica, ma le sue emissioni sono inferiori di tre ordini di grandezza. Si stima, perciò, che il metano produca circa un terzo di quantità del riscaldamento globale proveniente dall'anidride carbonica (IPCC, 2001)

Le concentrazioni di ossido di azoto (N_2O) sono aumentate dal periodo pre-industriale, in cui si registravano valori di circa 70 ng g^{-1} , fino a 324 ng g^{-1} nel 2011 (IPCC, 2013). I tassi di crescita sono approssimativamente costanti negli ultimi 30 anni. Tali emissioni antropogeniche sono dovute principalmente all'agricoltura, e in minima parte, all'allevamento di bestiame e all'industria chimica. Anche se sono stati fatti molti progressi nelle ultime decadi sulla comprensione del ciclo biogeochimico dei gas serra, degli ossidanti e degli aerosol, rimangono ancora ampie lacune sulla conoscenza relativa ai possibili effetti, additivi e sinergici, del loro incremento in atmosfera su parametri macroscopici, quali la dinamica delle stagioni, la distribuzione delle piogge fino ad arrivare agli impatti sulla biodiversità e sul funzionamento degli ecosistemi, sulla salute umana e, ancora più in generale, sull'economia. Tramite modelli di simulazione, che tengono in conto diverse tipologie di sviluppo demografico, sociale, economico ed ambientale, l'IPCC ha ipotizzato alcuni scenari di emissioni di gas serra fino al 2100. A tali scenari corrispondono diverse curve di crescita della temperatura superficiale media globale, e di altri importanti parametri climatici, a ciascuno dei quali viene associato un certo margine di incertezza.

Il rapporto speciale sugli scenari di emissione cumulative (RCP, 2013) per il periodo 2012-2100, compatibili con le concentrazioni atmosferiche di CO_2 degli scenari RCP, ricavate da 15 Modelli del Sistema Terra, oscillano da 140 a 410 GtC per RCP2.6, da 595 a 1005 GtC per RCP4.5, da 840 a 1250 GtC per RCP6.0, e da 1415 a 1910 GtC per RCP8.5 (vedi Tabella 1).

Scenario	Emissioni cumulative di CO ₂ dal 2012 al 2100 ^a			
	GtC		GtCO ₂	
	Media	Intervallo	Media	Intervallo
RCP2.6	270	da 140 a 410	990	da 510 a 1505
RCP4.5	780	da 595 a 1005	2860	da 2180 a 3690
RCP6.0	1060	da 840 a 1250	3885	da 3080 a 4585
RCP8.5	1685	da 1415 a 1910	6180	da 5185 a 7005

Note:

^a 1 Gigatonnellata di carbonio = 1 GtC = 10¹⁵ grammi di carbonio. Ciò corrisponde a 3,667 GtCO₂.

Tabella 1: Emissioni cumulative di CO₂ per il periodo 2012-2100 compatibili con le concentrazioni atmosferiche degli scenari RCP simulate dai Modelli del Sistema Terra CMIP5 (IPCC 2013)

In questi scenari, si prospetta che i combustibili fossili mantengano una posizione dominante nel determinare l'energetica globale fino al 2030 e oltre. L'aumento previsto della concentrazione dei gas serra in atmosfera indurrà importanti cambiamenti nel sistema climatico globale durante il XXI secolo, probabilmente molto più accentuati di quelli che si sono osservati nel secolo scorso (IPCC, 2013). È probabile che l'aumento della temperatura superficiale globale per la fine del XXI secolo superi i 1.5 °C, rispetto al periodo 1850-1900, secondo tutti gli scenari RCP, eccetto RCP2.6. È probabile che superi 2° C per RCP6.0 e RCP8.5, e tanto probabile quanto no che superi 2 °C per RCP4.5. Il riscaldamento continuerà oltre il 2100 secondo tutti gli scenari RCP, eccetto RCP2.6. Il riscaldamento continuerà a mostrare una variabilità da interannuale a decennale e non sarà uniforme a livello regionale. La differenza in temperatura superficiale media globale per il periodo 2016-2035 rispetto al periodo 1986-2005 sarà probabilmente nell'intervallo da 0.3 °C a 0.7 °C (confidenza media). Questa valutazione si basa su linee multiple di evidenza e assume che non si verificheranno eruzioni vulcaniche importanti o cambiamenti secolari nell'irradianza solare totale. Per quanto riguarda la variabilità interna naturale, gli aumenti a breve termine delle temperature stagionali e annuali medie dovrebbero essere maggiori ai tropici e nelle zone sub-tropicali che alle medie latitudini (confidenza alta). Si stima che l'aumento delle temperature superficiali medie globali per il periodo 2081-2100, rispetto al periodo 1986-2005, sia compreso probabilmente negli intervalli ricavati dalle simulazioni forzate da concentrazioni del modello CMIP5, vale a dire, da 0.3 °C a 1.7 °C (RCP2.6), da 1.1 °C a 2.6 °C (RCP4.5), da 1.4 °C a 3.1 °C (RCP6.0), da 2.6 °C a 4.8 °C (RCP8.5). L'Artico si riscaldereà più rapidamente della media globale, e il riscaldamento medio sulla superficie terrestre sarà maggiore che sopra gli oceani (confidenza molto alta, vedi Figure 2 e 3, e Tabella 2).

Rispetto alla media del periodo 1850-1900, si stima che il cambiamento della temperatura superficiale globale entro la fine del XXI secolo sarà superiore a 1.5 °C per RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5 (confidenza alta). È probabile che il riscaldamento superi i 2 °C per RCP6.0 e RCP8.5 (confidenza alta), molto probabile

che non superi i 2 °C per RCP4.5 (confidenza alta), ma improbabile che superi i 2 °C per RCP2.6 (confidenza media). È improbabile che il riscaldamento superi i 4 °C per RCP2.6, RCP4.5, e RCP6.0 (confidenza alta), ed è tanto probabile quanto improbabile che superi i 4 °C per RCP8.5 (confidenza media). All'aumentare delle temperature medie globali, è virtualmente certo che saranno più frequenti estremi caldi di temperatura e meno frequenti estremi freddi di temperatura sulla maggior parte delle terre emerse su scale temporali giornaliere e stagionali. È molto probabile che le ondate di calore si verificheranno con una frequenza e una durata maggiore. Continueranno a verificarsi occasionali eventi estremi di freddo in inverno (IPCC 2013).

		2046–2065		2081–2100	
	Scenario	Media	Intervallo probabile ^c	Media	Intervallo probabile ^c
Variazione della temperatura superficiale media globale (°C) ^a	RCP2.6	1.0	da 0.4 a 1.6	1.0	da 0.3 a 1.7
	RCP4.5	1.4	da 0.9 a 2.0	1.8	da 1.1 a 2.6
	RCP6.0	1.3	da 0.8 a 1.8	2.2	da 1.4 a 3.1
	RCP8.5	2.0	da 1.4 a 2.6	3.7	da 2.6 a 4.8
	Scenario	Media	Intervallo probabile ^d	Media	Intervallo probabile ^d
Innalzamento del livello medio globale del mare (m) ^b	RCP2.6	0.24	da 0.17 a 0.32	0.40	da 0.26 a 0.55
	RCP4.5	0.26	da 0.19 a 0.33	0.47	da 0.32 a 0.63
	RCP6.0	0.25	da 0.18 a 0.32	0.48	da 0.33 a 0.63
	RCP8.5	0.30	da 0.22 a 0.38	0.63	da 0.45 a 0.82

Tabella 2: La variazione prevista della temperatura superficiale media globale dell'aria e l'innalzamento del livello medio globale del mare per la metà e la fine del XXI secolo rispetto al periodo di riferimento 1986-2005.

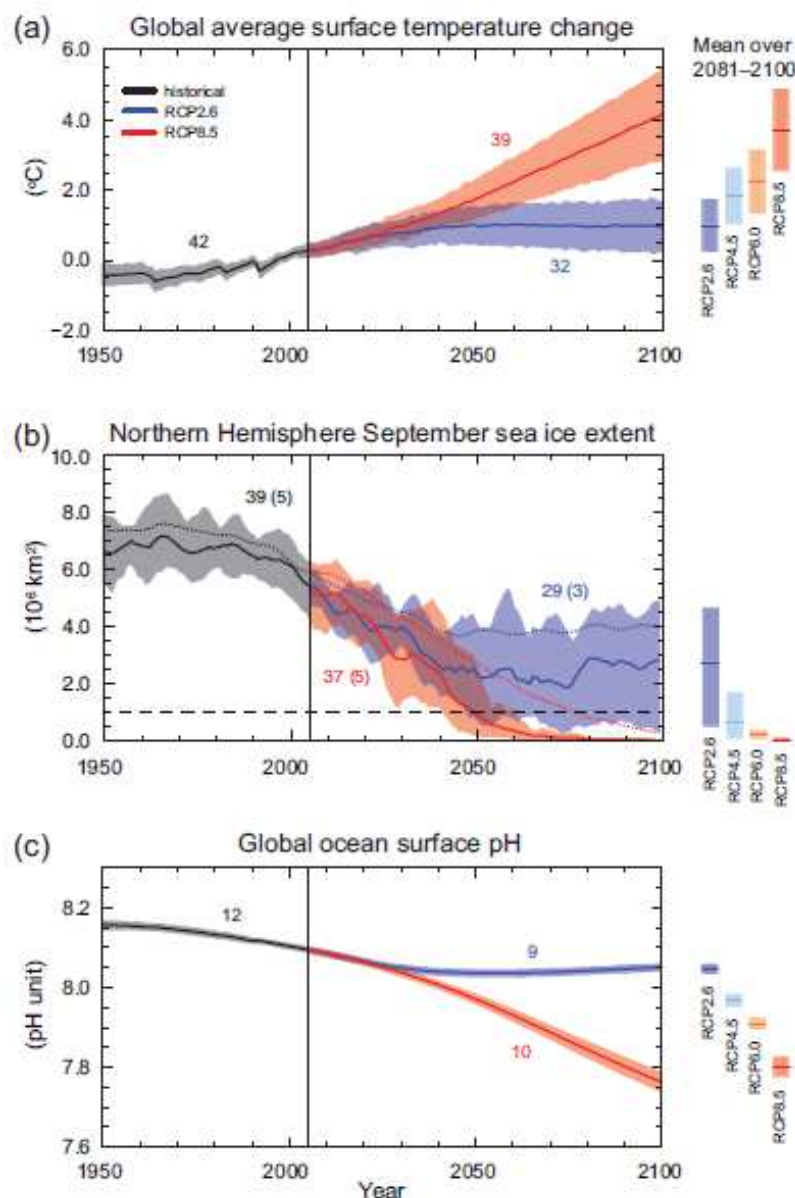


Figura 2: Serie temporali delle medie multi-modello CMIP5 per il periodo 1950-2100 simulate per (a) cambiamento della temperatura superficiale media annuale a livello globale, rispetto al periodo 1986-2005, (b) estensione del ghiaccio marino dell'emisfero settentrionale a settembre (media mobile per 5 anni), (c) pH medio globale dell'oceano superficiale. Le proiezioni delle serie temporali e una misura di incertezza (ombreggiatura) sono illustrate per gli scenari RCP2.6 (blu) e RCP8.5 (rosso). In nero (con ombreggiatura grigia) è rappresentata l'evoluzione storica modellata utilizzando le ricostruzioni storiche dei forzanti. Le medie e le incertezze medie associate, per il periodo 2081-2100, sono fornite per tutti gli scenari RCP come barre verticali colorate. Sono indicati i numeri dei modelli CMIP5 utilizzati per calcolare la media multi-modello. Per l'estensione del ghiaccio marino sono indicati (b), la media prevista e l'incertezza (intervallo minimo-massimo) del sottoinsieme di modelli che riproducono con maggior fedeltà lo stato medio climatologico e l'andamento del ghiaccio marino artico per il periodo 1979-2012 (il numero dei modelli è indicato tra parentesi). Per completezza, la media multi-modello CMIP5 è inoltre indicata con linee a puntini. La linea tratteggiata rappresenta le condizioni di quasi assenza di ghiaccio (vale a dire, quando l'estensione del ghiaccio marino è inferiore ai 10 milioni di Km^2 per almeno 5 anni consecutivi).

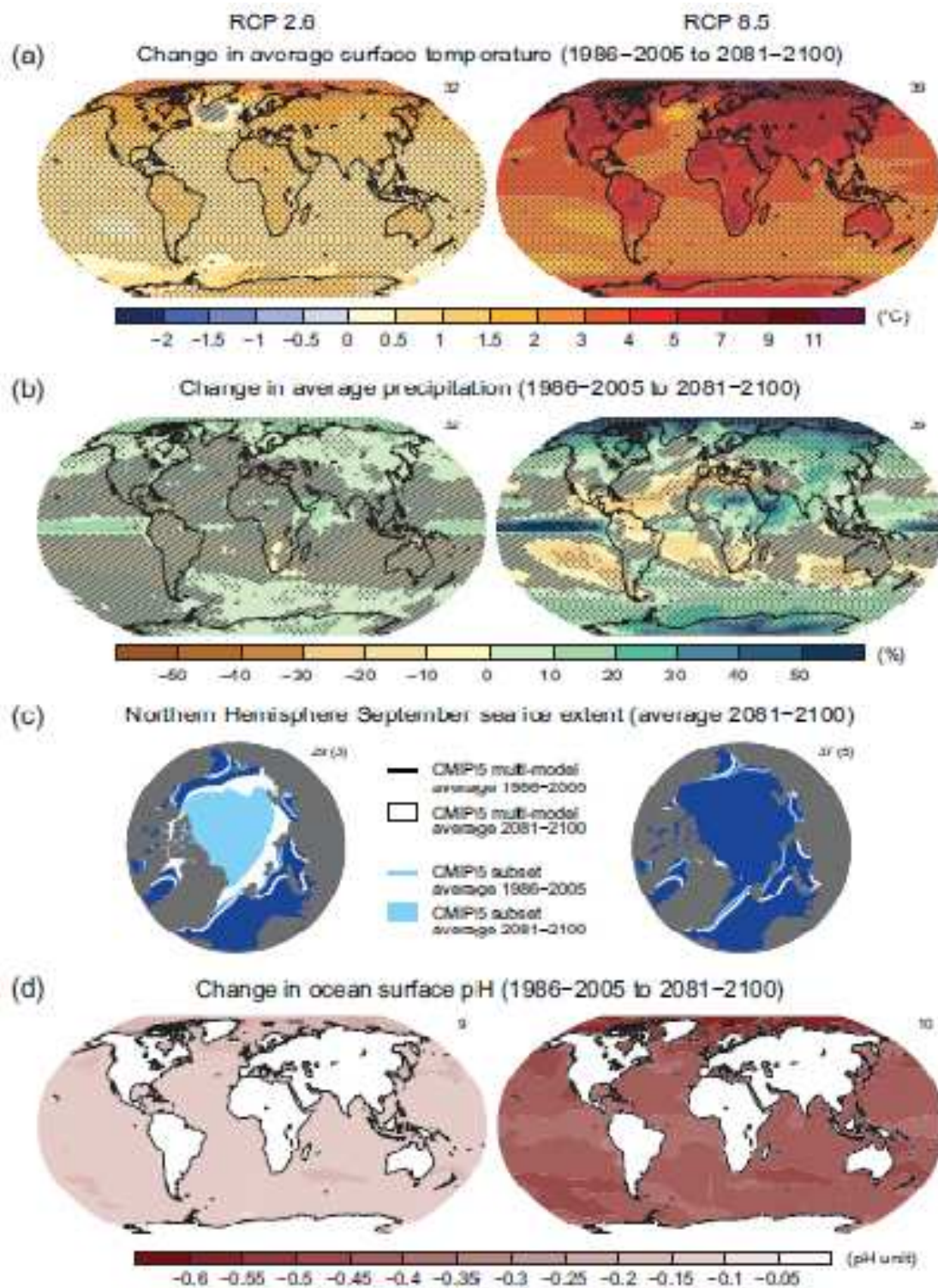


Figura 3: Mappe dei risultati delle medie multi-modello CMIP5 per gli scenari RCP2.6 e RCP8.5 per il periodo 2081 - 2100 di (a) variazione della temperatura superficiale media annuale, (b) variazione media percentuale delle precipitazioni medie annuali, (c) estensione del ghiaccio marino dell'emisfero settentrionale a settembre e (d) variazioni di pH dell'oceano superficiale. Nei pannelli (a), (b) e (d) sono mostrati i cambiamenti rispetto al periodo 1986-2005. Il numero di modelli CMIP5 utilizzati per calcolare la media multi-modello è indicato nell'angolo superiore destro di ciascun pannello. Per i pannelli (a) e (b), il tratteggio indica le regioni dove la media multi-modello è piccola in confronto alla variabilità interna naturale (cioè, meno di una deviazione standard della variabilità interna naturale in una media di 20 anni). Le aree punteggiate indicano le regioni in cui la media multi-modello è grande in confronto alla variabilità interna naturale (vale a dire, maggiore di due deviazioni standard rispetto alla variabilità interna naturale in una media di 20 anni) e dove almeno il 90% dei modelli concorda sul segno del cambiamento. Nel pannello (c), le linee rappresentano le medie modellate per il periodo 1986-2005; le aree piene rappresentano la fine del secolo. La media multi-modello CMIP5 è data in colore bianco, la media prevista dell'estensione del ghiaccio marino per un sottoinsieme di modelli (il numero di modelli è indicato tra parentesi), che riproducono più da vicino lo stato climatologico medio e il trend per il periodo 1979-2012 dell'estensione del ghiaccio marino artico, è data di colore blu chiaro.

1.2 CICLO DEL CARBONIO

A livello globale il ciclo del carbonio è regolato da un meccanismo di tipo sorgente-accumulo (*source-sink*) il carbonio viene quindi stoccato in differenti comparti (*pool, stock*), in particolare: l'atmosfera, la vegetazione o biomassa, il suolo, gli oceani, la litosfera. La ripartizione del carbonio fra i diversi comparti è regolata da flussi. Un flusso è definito come il quantitativo di un'entità che passa attraverso una superficie chiusa per unità di tempo, se il flusso è in uscita dalla superficie questa diventa una sorgente, se invece il flusso è in entrata questa diventa un sito di accumulo (Burba e Anderson, 2006). Il principale sito di accumulo del carbonio sulla Terra è costituito, dopo la litosfera, dagli oceani, dove si stima che vi siano 38000 GtC inorganico che equivale a circa 50 volte il carbonio presente in atmosfera (Falkowski *et al.*, 2000). Fra oceani ed atmosfera c'è uno scambio continuo in termini di CO₂ che è quantificabile in circa 90 GtC l'anno immesse in atmosfera e circa 92 GtC assorbite dagli oceani. Il risultato dei flussi fra oceani e atmosfera è un assorbimento netto annuo di CO₂ di circa 2 GtC da parte degli oceani (Baird e Cann, 2006). I processi e le dinamiche che stanno alla base dell'assorbimento di CO₂ negli oceani sono molteplici, sia di tipo chimico che biologico, e ciascun meccanismo dà un contributo diverso. La reazione chimica alla base dell'assorbimento di CO₂ avviene nelle acque superficiali oceaniche dove la CO₂ si dissolve formando acido carbonico, un acido debole, che reagisce a sua volta con gli anioni carbonato e acqua formando bicarbonato (Falkowski *et al.*, 2000). Il carbonio così assorbito tende, nel corso del tempo, a spostarsi dallo strato superficiale (300 m) verso profondità più elevate, dove è presente in concentrazioni maggiori.

Poiché la CO₂ è maggiormente solubile in acque fredde e ad elevata salinità, l'efficienza dell'assorbimento e quindi il sequestro di CO₂ ad elevate profondità è dovuto alla formazione di masse d'acqua dense e fredde ad elevate latitudini (Falkowski *et al.*, 2000). Il principale processo biologico che contribuisce all'assorbimento di CO₂ è la fotosintesi del fitoplancton: la fotosintesi, infatti, abbassa la pressione parziale di CO₂ negli strati più superficiali facilitando così l'assorbimento di CO₂ dall'atmosfera. Numerose specie di fitoplancton e zooplancton formano gusci a base di carbonato di calcio che, alla loro morte, vengono depositati sui fondali dando così un ulteriore contributo alla stabilizzazione del carbonio ad elevate profondità. Secondo alcune stime circa il 25% del carbonio fissato mediante fotosintesi negli strati superficiali si deposita in profondità, mantenendo così la concentrazione atmosferica di CO₂ di circa 150-200 ppm inferiore a quanto sarebbe in assenza di questo processo (Falkowski *et al.*, 2000). Per quanto riguarda l'atmosfera il quantitativo stimato di carbonio presente è dell'ordine di 720 750 GtC e la concentrazione di CO₂ attualmente è in media circa 400 ppm. La concentrazione atmosferica di CO₂ è strettamente legata alle interazioni con tutti gli altri comparti

del ciclo globale del carbonio, in particolare la vegetazione che, con la fotosintesi, ne determina l'andamento su scala annuale.

Presso Mauna Loa sull'isola di Hawaii ad un'altitudine di 3397 m s.l.m. esiste dal 1957 uno dei siti di riferimento mondiale per la misura della concentrazione atmosferica di CO₂. Osservando il grafico della concentrazione di CO₂ atmosferica misurata a Mauna Loa è possibile notare l'andamento sinusoidale della curva che è dovuto alla fotosintesi delle piante (Figura 4). In particolare nella stagione primaverile ed estiva le piante estraggono grosse quantità di CO₂ dall'atmosfera, abbassandone quindi la concentrazione, mediante fotosintesi che avviene secondo la reazione catalizzata dalla luce solare fra CO₂ e H₂O che ha come prodotti O₂ e carboidrati (C_nH_{2n}O_n). Il carbonio viene quindi fissato nella biomassa (cellulosa, lignina) (Baird e Cann, 2006). Una parte della fotosintesi lorda viene respirata dalla vegetazione per il suo mantenimento e la crescita (respirazione eterotrofa) mentre, la decomposizione biologica dei tessuti vegetali morti e della sostanza organica del suolo restituisce all'atmosfera un'altra parte della CO₂ assorbita (respirazione eterotrofa). La distribuzione spaziale sulla Terra dei siti di accumulo e delle sorgenti di carbonio non è uniforme inoltre, le sorgenti emettono più di quanto i siti di accumulo siano in grado di assorbire; in particolare si distinguono: l'emisfero australe, la regione dei tropici e l'emisfero boreale. L'emisfero australe con cui si intendono latitudini superiori al 30° parallelo Sud, considerata la scarsa presenza di terre emerse e la prevalenza di acque oceaniche, si comporta prevalentemente come sito di accumulo grazie all'assorbimento di CO₂ da parte dell'oceano. Nella regione tropicale compresa tra il 30° parallelo Nord ed il 30° Sud le emissioni superano di molto gli assorbimenti. L'emisfero boreale a latitudini superiori al 30° parallelo Nord si comporta come sito di accumulo, il *sink* terrestre residuo è sceso a $6,9 \pm 3,2$ Gt CO₂ / anno per il 2015, a causa delle condizioni de El Niño (Le Quèrè *et al.*, 2016) ma in generale è aumentato da $1,7 \pm 0,7$ GtC/anno nel 1960 a $3,0 \pm 0,8$ GtC/anno durante 2005-2014, con importanti variazioni interannuali fino a 2 GtC/anno (Le Quèrè *et al.*, 2015) Il *sink* oceanico di carbonio continua ad aumentare del $9,7 \pm 1,8$ Gt CO₂ / anno per 2006-2015 e $11,1 \pm 1,8$ Gt CO₂ / anno nel solo 2015 (Le Quèrè *et al.*, 2016). Le emissioni globali da combustibili fossili e industrie ammontano a 34.1 Gt CO₂/yr (91%) mentre quelle da cambiamento d'uso del suolo sono 3.5 Gt CO₂/yr (9%). Gli assorbimenti globali invece sono così suddivisi in atmosfera 16.4 Gt CO₂/yr (44%), negli ecosistemi terrestri 11.6 Gt CO₂/yr (31%) mentre negli oceani 9.7 Gt CO₂/yr (26%), ne deriva che le emissioni di carbonio derivanti dall'uso di combustibili fossili, industria e dal cambiamento d'uso del suolo sono bilanciati dai *sink* di assorbimento di carbonio cioè atmosfera ecosistemi terrestri e oceani. (Le Quèrè *et al.*, 2016),

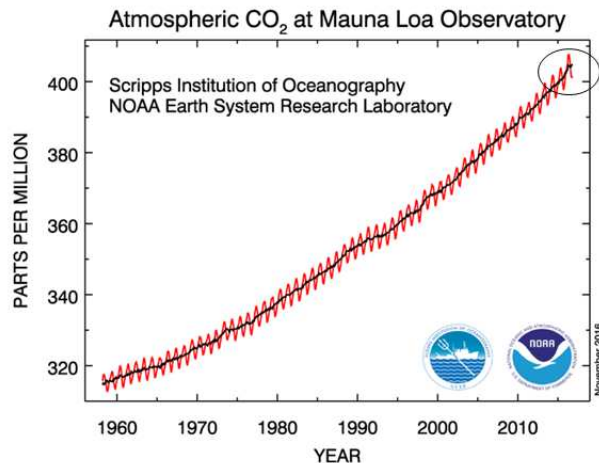
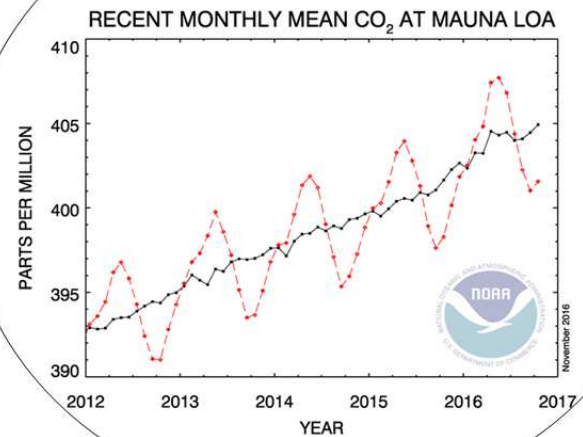
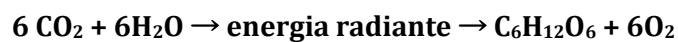


Figura 4: The carbon dioxide data (red curve) measured as the mole fraction in dry air, on Mauna Loa constitute the longest record of direct measurements of CO₂ in the atmosphere. They were started by C. David Keeling of the Scripps Institution of Oceanography in March of 1958 at a facility of the National Oceanic and Atmospheric Administration [Keeling, 1976]. NOAA started its own CO₂ measurements in May of 1974, and they have run in parallel with those made by Scripps since then [Thoning, 1989]. The (black curve) represents the seasonally corrected data.



1.2.1 BILANCIO DEL CARBONIO NEGLI ECOSISTEMI FORESTALI

Il carbonio atmosferico, in forma gassosa (CO₂), viene fissato sotto forma di carbonio organico negli ecosistemi, attraverso il processo fotosintetico di vegetali superiori (Fig.5), alghe, licheni e batteri fotosintetici. In questo processo, la CO₂ atmosferica viene convertita in glucosio grazie all'energia radiante:



L'assorbimento lordo di carbonio dall'atmosfera da parte della vegetazione prende il nome di GPP (*Gross Primary Production*) ed è la quantità di carbonio fissata dagli autotrofi attraverso la fotosintesi. Parte del carbonio assimilato viene però utilizzato dalla pianta stessa per soddisfare le proprie esigenze metaboliche (di mantenimento e crescita), dando origine ad un flusso in uscita che prende il nome di respirazione autotrofa (*Ra autotrophic Respiration*).



La differenza tra produzione primaria lorda (GPP) e respirazione autotrofa (Ra) rappresenta l'assorbimento, nel breve periodo, di carbonio da parte delle piante, denominato produzione primaria netta (NPP *Net Primary Production*).

$$\mathbf{NPP = GPP - Ra}$$

Negli ecosistemi è presente anche il processo di respirazione eterotrofa (Rh *heterotrophic Respiration*) dei consumatori primari (erbivori) e secondari, ma, soprattutto, degli organismi decompositori a livello di lettiera e suolo, quindi un'ulteriore parte del carbonio viene riemesso in atmosfera sotto forma di CO₂. Sottraendo la respirazione eterotrofa (Rh) alla produzione primaria netta (NPP), si ha la produzione netta di ecosistema NEP (*Net Ecosystem Production*) che è equivalente allo scambio netto di ecosistema NEE (*Net Ecosystem Exchange*), che corrisponde alla quantità di carbonio che, in un intervallo medio di tempo, è immagazzinata o emesso da un ecosistema.

$$\mathbf{NEP = NPP - Rh = GPP - (Ra + Rh)}$$

La NEP è la misura del reale assorbimento di un ecosistema. La somma di Ra e Rh viene definita respirazione di ecosistema (Re). Nel lungo periodo vanno considerati i fattori di disturbo, sia naturali che determinati dall'uomo (come la gestione forestale con il taglio dei boschi). Questi fattori determinano la produzione netta di bioma, NBP che è uguale alla produzione di ecosistema al netto dei disturbi:

$$\mathbf{NBP = NEP - Disturbi.}$$

Un'analisi del totale del sequestro del carbonio dall'atmosfera (GPP) evidenzia come la NPP ne costituisca circa il 50%, la NEP l'8,3%, mentre la NBP l'1-2% (Schimel *et al.*, 2001). Tra gli ecosistemi terrestri, le foreste svolgono sicuramente il ruolo più incisivo nel ciclo del carbonio, perché controllano il 70% degli scambi di carbonio fra atmosfera e biosfera (Waring e Schlesinger, 1985). La stima della capacità di assorbimento di carbonio degli ecosistemi forestali (NEE) è stata resa possibile dalla diffusione della tecnica della correlazione turbolenta (*Eddy Covariance*) (Aubinet, 2000). Tecnica che ha permesso di aumentare le conoscenze sull'importanza delle foreste all'interno del ciclo del carbonio, sulla dinamica e sui fattori di controllo degli scambi tra biosfera terrestre ed atmosfera. Tuttavia la NEE è un parametro molto sintetico che rende conto solo in parte delle dinamiche che determinano l'assorbimento del carbonio. La NEP può essere anche calcolata dalla somma dell'incremento di biomassa dei tessuti vivi (ΔB) e di necromassa (ΔH):

$$\mathbf{NEP = \Delta B + \Delta H}$$

Teoricamente la ΔB non è uguale alla NPP, perché una parte di essa viene eliminata sia sotto forma di parti morte, attraverso la catena di detrito (D), sia di parti ingerite, attraverso la catena di pascolamento (C), sia dal fatto che può essere esportata dall'ecosistema (Es) (Matteucci *et al.*, 1999).

$$NPP = \Delta B + D + C + Es$$

Nelle foreste dell'emisfero boreale, in condizioni non eccezionali, il pascolamento avviene soprattutto ad opera degli insetti fitofagi, perché il pascolo da parte di erbivori nel bosco è molto limitato e la quantità di foglie che riescono a mangiare è quasi nulla, almeno in annate nelle quali la disponibilità di risorse nei pascoli è normale. La componente C dell'equazione sopra riportata quindi incide sulla riduzione della lettiera fogliare che va a cadere di anno in anno.

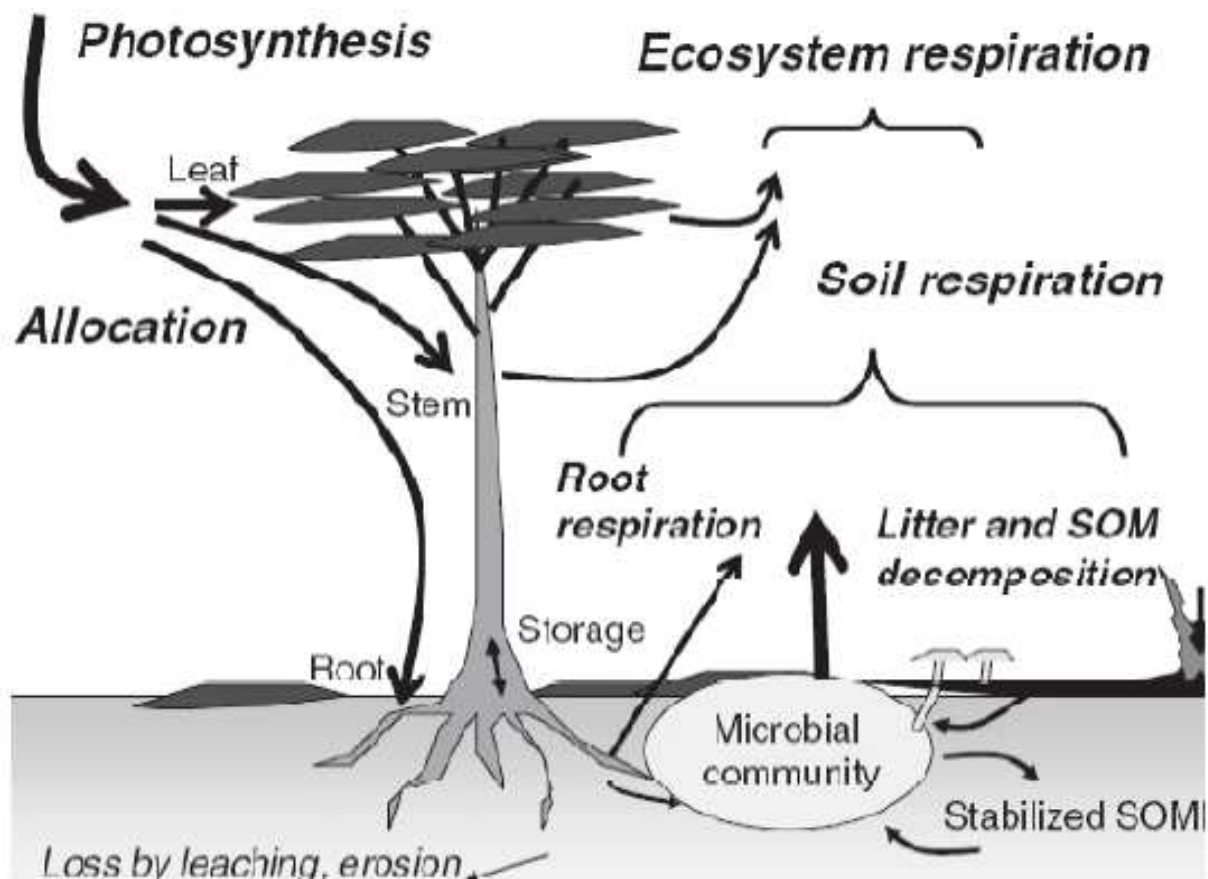


Figura 5: Trumbore S. (2006). Main processes in the carbon cycle in forest ecosystems

2 OBIETTIVI

Gli obiettivi del seguente lavoro sono stati:

- Stimare i flussi di carbonio dal 2000 al 2015 per valutare la risposta della faggeta ai maggiori fattori di controllo climatici ed ecologici e per valutare eventuali segni dei cambiamenti climatici
- Valutare quali variabili ambientali (dati meteorologici, dati di dettaglio sulla produttività e variabili di stato del bosco) controllano e determinano i flussi nel sito di studio
- Valutare tramite telerilevamento da APR (Aeromobili a Pilotaggio Remoto) *proximal sensing* quali indici di vegetazione (es. PRI, NDVI) correlino meglio con i flussi di Carbonio, ai fini di possibili utilizzi di questa tecnica per monitoraggi su aree più estese

3 MATERIALI E METODI

3.1 IL SITO SPERIMENTALE DI COLLELONGO

Lo studio è stato effettuato nella faggeta di Collelongo (L'Aquila), sito sperimentale dell'Istituto di Biologia Agroambientale e Forestale (IBAF) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). In questo capitolo viene descritto tale sito, gli aspetti strutturali, climatici, l'allestimento strumentale e il metodo di misura dei flussi di carbonio.

3.2 INQUADRAMENTO E DESCRIZIONE STRUTTURALE

3.2.1 FAGGIO E FAGGETE IN ITALIA

Il Faggio (*Fagus sylvatica* L.) è in Italia una specie indigena. Il suo areale si estende in gran parte nella media montagna alpina e nella media e alta montagna appenninica (Hofmann, 1991; Masci, 1995).

Dalla specie prende il nome la fascia fitoclimatica del *Fagetum*, che, nella regione delle Alpi, si estende da 800-900 metri sino a 1400-1500 metri sulle Alpi occidentali e non oltre i 1000-1200 metri sulle Alpi orientali. Sull'Appennino settentrionale il Faggio costituisce, come in quasi tutto il rimanente Appennino, il limite superiore della vegetazione forestale.

Sull'Appennino centrale la zona del Faggio parte da circa 1000 m sull'Appennino umbro e laziale e da 1200 m su quello abruzzese-sannitico, fino ad arrivare al limite della vegetazione arborea (1700-1800 m circa). Individui e piccoli gruppi isolati possono trovarsi anche al di sopra dei 1700-1800 m. Oltre che sull'Appennino, nell'Italia centrale il Faggio si trova anche sul Monte Amiata (Toscana) e, nel Lazio, sui Monti Cimini e sui monti della Tolfa. Sull'Appennino meridionale il limite inferiore del *Fagetum* sale a circa 1300 m, mentre quello superiore arriva a 2000 m sull'Etna, dove si trova il punto più meridionale di tutto l'areale geografico del Faggio (Hofmann, 1991). Inoltre, in tutta Italia, si ritrovano faggete a quote inaspettatamente basse (le cosiddette faggete depresse, Masci, 1995).

Il Faggio è specie atlantica e subordinatamente subatlantica (Hofmann, 1991), ricerca siti con condizioni di elevata umidità atmosferica, escursioni termiche non accentuate, piogge abbondanti e ben distribuite, basso rischio di gelate tardive e terreni freschi e ben drenati. In Italia la specie tende a vegetare in altitudine perché a quote meno elevate non trova, come invece in centro Europa, tali caratteristiche climatiche.

Le Faggete in Italia coprono una superficie di 1'035'103 ha (Gasparini P. 2011) Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio 2005 INFC., 2005). Tabella 3

Distretto territoriale	Faggete											
	Faggete mesofile		Faggete acidofile a <i>Luzula</i>		Faggete termofile a <i>Cephalanthera</i>		Faggete a agrifoglio, felci e campanula		Altre formazioni di faggio o Faggete non classificate per la sottocategoria		Totale Faggete	
	superficie (ha)	ES (%)	superficie (ha)	ES (%)	superficie (ha)	ES (%)	superficie (ha)	ES (%)	superficie (ha)	ES (%)	superficie (ha)	ES (%)
Piemonte	58 688	8.1	40 806	9.8	5 252	27.7	0	-	10 754	19.2	115 501	5.6
Valle d'Aosta	0	-	0	-	0	-	0	-	1 156	57.3	1 156	57.3
Lombardia	23 363	13.5	11 461	19.5	19 837	14.7	0	-	11 020	19.9	65 681	7.9
Alto Adige	1 890	44.5	1 134	57.6	378	99.8	0	-	378	99.8	3 781	31.4
Trentino	38 199	9.3	5 177	26.8	15 496	15.0	0	-	3 375	33.5	62 247	7.1
Veneto	39 183	9.4	374	100.0	21 663	12.9	0	-	5 978	24.9	67 198	7.0
Friuli V.G.	42 734	8.8	372	99.8	13 006	16.6	0	-	32 701	10.2	88 812	5.7
Liguria	28 577	10.9	7 694	21.5	0	-	0	-	733	70.2	37 004	9.4
Emilia Romagna	82 841	6.3	10 666	18.5	368	100.1	4 781	27.7	2 207	40.8	100 663	5.6
Toscana	29 628	10.9	14 453	15.7	1 084	57.7	15 175	15.3	11 921	17.3	72 260	6.9
Umbria	12 903	16.6	369	99.8	369	99.8	737	70.6	737	70.6	15 115	15.3
Marche	11 148	18.0	0	-	1 115	57.8	1 115	57.8	4 459	28.8	17 837	14.1
Lazio	21 600	12.8	2 211	40.8	19 160	13.7	21 002	13.1	7 738	21.7	71 710	6.8
Abruzzo	15 592	15.1	0	-	4 344	28.8	96 285	5.5	6 181	24.2	122 402	4.8
Molise	0	-	0	-	0	-	14 055	16.0	781	70.5	14 836	15.5
Campania	1 105	57.8	0	-	0	-	48 200	8.4	5 892	24.9	55 197	7.8
Puglia	0	-	0	-	0	-	4 273	29.9	388	99.8	4 661	28.6
Basilicata	2 610	37.7	1 864	44.6	0	-	15 660	15.1	6 313	24.1	26 448	11.5
Calabria	4 104	30.0	0	-	0	-	62 312	7.4	10 821	18.4	77 237	6.6
Sicilia	0	-	0	-	0	-	15 162	15.6	0	-	15 162	15.6
Sardegna	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
Italia	414 165	2.9	96 580	6.3	102 070	6.1	298 757	3.3	123 531	5.5	1 035 103	1.8

Tabella 3: Copertura regionale e nazionale delle diverse tipologie di faggete individuate dall'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio 2005 INFC., 2005

3.2.2 LA FAGGETA DI COLLELONGO

La foresta di faggio (*Fagus sylvatica* L.) di Collelongo (AQ) (Figura 6) appartiene ad una comunità forestale di poco più di 3000 ha, che è parte di un'area forestale più vasta, che si estende anche al territorio del Parco Nazionale d'Abruzzo. Le caratteristiche strutturali del popolamento sono rappresentative di quelle delle faggete dell'Appennino Centrale e riflettono sia la storia della gestione selvicolturale sia le peculiari condizioni ambientali della vegetazione mediterraneo-montana, così differente da quella delle foreste dell'Europa Centrale, dove il faggio raggiunge il suo ottimo climatico. I boschi in esame fanno parte del sistema vegetazionale della Serra Lunga, catena montuosa dell'Abruzzo occidentale che separa l'alta valle del Liri (o Val Roveto) ad ovest, dalla Valle Lunga ad est e che delimita ad ovest la piana del Fucino, mentre a sud si fonde con i massicci marsicani nel territorio del Parco Nazionale D'Abruzzo. La cima più elevata è il monte Cornacchia con 2000 metri d'altitudine (Masci, 1995). Si tratta di una formazione montuosa calcarea appartenente alla piattaforma carbonatica abruzzese, con terreni poggianti su substrato roccioso del cretaceo superiore, dal quale essi traggono origine.



Figura 6 foto aerea da drone della faggeta di Collelongo. Al centro è possibile vedere la torre di misura che sventa al di sopra della copertura (Foto di: Francesco Mazzenga)

3.2.3 IL SITO DI SELVA PIANA

Selva Piana (1560 m s.l.m., 41° 50'58 "N, 13° 35'17" E) è il sito dove le ricerche del presente dottorato sono state svolte. Il bosco di Selva Piana è un lotto di 45 ettari ubicato poco al di sotto del crinale della Serra Lunga sul versante rivolto verso la Valle Roveto. Esso è delimitato a nord dalla Valle dei Cerchi, ad ovest dai Tre Confini, a sud dal Pratone ad est da Pian Calvo. La quota inferiore è di 1527 m s.l.m. mentre la quota massima è di 1769 m s.l.m. La morfologia è abbastanza variegata, con compluvi principali, con andamento SE-NO e E-O, nei quali confluiscono altri compluvi minori. I compluvi principali sono separati da costoni più o meno acclivi con non rari affioramenti rocciosi, mentre sono abbastanza diffusi piccoli terrazzamenti naturali (Masci, 1995).

Gli studi strutturali, condotti su 7 aree di saggio a partire dai primi anni '90, hanno riportato una densità variabile fra le 800 e le 3000 piante per ettaro (inclusendo nei rilievi tutte le piante con diametro > 1 cm), l'altezza dominante varia da 20 a 25 m, indicando una discreta fertilità ed un buon stato di sviluppo dei popolamenti; la struttura è risultata piuttosto eterogenea pur se coetaneiforme (Masci, 1995). Pur se di struttura eterogenea, i popolamenti risultano chiusi, con copertura continua (90%). Nelle sporadiche interruzioni della copertura, si insedia facilmente la rinnovazione, mentre le radure vere e proprie risultano limitate.

Il popolamento di *Selva Piana* è situato tra 1520 e 1600 m, in un compluvio con esposizione Ovest con pendenza trascurabile. La temperatura media annua e precipitazioni misurate nel sito per il periodo 1996 - 2015 sono rispettivamente di 6.9 ° C e 1116 millimetri (Figura 6 a); Il suolo è stato classificato come *inceptisuolo*, ha caratteristiche calcaree di terra bruna. La componente argillosa e quella di scheletro risultano importanti, mentre il pH è intorno a 5. La profondità del suolo risulta molto variabile, potendo andare da 30÷40 cm fino a più di 100 cm. L'80% delle radici risulta localizzato nei primi 50 cm (Chiti et al., 2010). La densità è di 740 piante ad ettaro (cominciando da alberi di 1 cm di diametro a 1,30 m), l'area basimetrica è 42.2 m² ha⁻¹ con un diametro medio a petto d'uomo di 25.5 cm e un'altezza media di 20.7 m (dati derivanti dal sondaggio periodico del 2012). Al culmine della stagione vegetativa, il Leaf Area Index (LAI) nel 2014-2015 era 5.5-5.9 m² m⁻². (Scartazza *et al.*, 2016) Il sito sperimentale Collelongo-Selvapiana è attualmente parte dei seguenti progetti: LIFE + Smart4Action, eLTER-H2020, PRIN 2012 azoto, CNR IBAF Ecologia e Dinamica dei sistemi forestali. E anche parte di reti nazionali e internazionali come LTER Italia (facente parte di LTER-Europe e ILTER), FLUXNET, ICP Forests, ICP *Integrated Monitoring* ed il programma nazionale di monitoraggio degli ecosistemi forestali CONECOFOR.

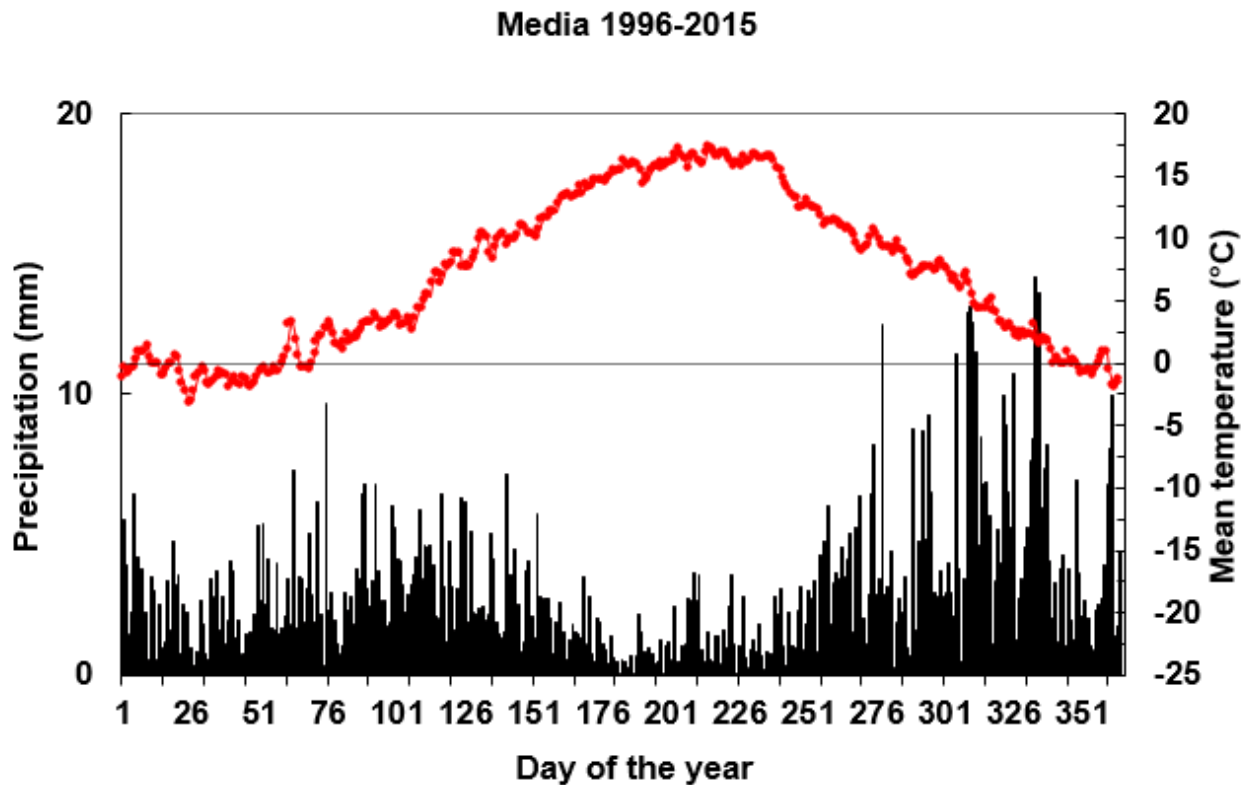


Figura 6 a: Valori giornalieri medi di Temperatura dell'aria (T_a °C) e Precipitazioni (P mm) per il periodo 1996-2015

Da un punto di vista strutturale, il popolamento è risultato essere costituito da due tipologie principali (Masci, 1995). La prima tipologia è rappresentata da una fustaia a due strati di cui il superiore è costituito da piante disposte uniformemente o a caso (random) sulla superficie e quello inferiore con piante disposte a gruppi (*clumped*) per lo più all'interno e ai bordi di buche, derivanti dal taglio di una pianta grossa, mentre la seconda tipologia è quella della fustaia monostratificata con piante disposte in modo casuale sul terreno (random). Tale struttura è quella che si può riscontrare nell'area in cui è situata la torre per il monitoraggio dei parametri climatici e dei flussi di copertura e si può apprezzare in figura 7.



Figura 7: Torre per il monitoraggio dei parametri climatici e dei flussi di carbonio

3.3 DESCRIZIONE DELLA STAZIONE DI MONITORAGGIO

Alla base delle ricerche svolte nella faggeta di Collelongo c'è il concetto di approccio integrato allo studio dell'ecosistema forestale. Nei venticinque anni di attività della stazione sono state effettuate analisi di tipo strutturale, ecologico, microclimatico ed ecofisiologico, sia a livello fogliare che di intera copertura.

Per far questo il sito è stato equipaggiato con una stazione di rilevamento dati meteorologici e micrometeorologici, installata nel bosco di Selva Piana appena descritto. L'area in cui è stata installata la strumentazione si trova all'interno di un compluvio in corrispondenza di un terrazzamento a quota 1560 m s.l.m.

3.3.1 STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Per il rilievo dei parametri climatici e microclimatici nella faggeta studiata è stata installata della sensoristica di precisione.

Al di sopra del suolo, i parametri meteorologici che vengono misurati sono (situazione al 2015):

La temperatura e l'umidità dell'aria vengono misurate, tramite dei sensori TTU 600 (Figura 8) basati sull'impiego di un sensore con elettrodi in platino sinterizzato e dielettrico igroscopico ad alta stabilità e di una termoresistenza (Pt100 a 1/3 DIN) come riportato nelle specifiche tecniche (Tabella 4). I punti di campionamento sono a 4 diversi livelli all'interno della copertura: al di sopra delle chiome (26 m), all'interno delle chiome (11 m), a 2 m e 0.5 m dal livello del suolo.



Elemento sensore umidità	:	condensatore a film sottile "Rotronic" C94
Campo di misura	:	0 - 100% di umidità relativa (U.R.)
Accuratezza	:	+ 1.5% di U.R.
Ripetibilità	:	+ 0.5% di U.R.
Stabilità a lungo termine	:	migliore di + 1% anno
Elemento trasduttore temperatura	:	termoresistenza Pt100 1/3 DIN
Campo di misura	:	da - 40°C a + 60°C
Accuratezza	:	+/- 0,3K
Alimentazione	:	da 3,5 a 50Vcc @ 4mA
Uscite	:	0 - 1 Vcc per entrambi i campi di misura
Cavo di collegamento	:	Standard 3m (altre lunghezze a richiesta)
Temperatura di impiego	:	-40/+85°C
Classe di protezione	:	IP 65
Dimensioni	:	diametro 15mm, lunghezza 100mm

Figura 8 Termoigrometro TTU 600

Tabella 4 specifiche tecniche TTU 600

La radiazione, per questa variabile è stato scelto il radiometro bidirezionale a due bande modello CNR1 della Kipp & Zonen (figura 9) che rileva (tabella 5) la radiazione ad onda corta (solare globale) incidente e riflessa (due sensori) e ad onda lunga (bande dell'infrarosso), sempre incidente e riflessa (due sensori). I quattro segnali vengono acquisiti separatamente tramite il data-logger e, successivamente, vengono calcolati radiazione netta ed albedo.



Figura 9: CNR1 della Kipp & Zonen

Sensors	Kipp & Zonen's CM3 ISO-class, thermopile pyranometer, CG3 pyrgometer, PT100 RTD
Pyranometer Spectral Response	305 to 2800 nm
Pyrgometer Spectral Response	5000 to 50,000 nm
Response Time	18 s
Sensitivity Range	7 to 15 $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$
Pyranometer Output Range	0 to 25 mV
Pyrgometer Output Range	± 5 mV
Expected Accuracy for Daily Totals	$\pm 10\%$
Directional Error	$< 25 \text{ W m}^{-2}$ (pyranometer)
Heating Resistor	24 ohm, 6 W (at 12 Vdc)
CE Compliance	CE compliant under the European Union's EMC directive

Tabella 5: specifiche tecniche CNR1

La radiazione fotosinteticamente attiva (PPFD):

- diretta e diffusa (sensore modello BF3, Delta-T, UK, Figura 10 e Tabella 6)
- diretta e riflessa con (sensori modello QSO-S PAR della Decagon Device con un campo visivo di 180 gradi Figura 11 e Tabella 7).



Figura 10: sensore modello BF3, Delta-T

	Output setting		
	PAR	Energy	Illuminance
Units	$\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	W.m^{-2}	klux
Overall accuracy: Total	$\pm 10 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ $\pm 12\%$	$\pm 5 \text{W.m}^{-2} \pm 12\%$	$\pm 0.600 \text{ klux}$ $\pm 12\%$
Overall accuracy: Diffuse	$\pm 10 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ $\pm 15\%$	$\pm 20 \text{W.m}^{-2}$ $\pm 15\%$	$\pm 0.600 \text{ klux}$ $\pm 15\%$
Resolution	$0.6 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	0.3W.m^{-2}	0.060 klux
Range	$0-2500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	$0-1250 \text{W.m}^{-2}$	$0-200 \text{ klux}$
Analogue output sensitivity	$1 \text{mV} = 1 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	$1 \text{mV} = 0.5 \text{W.m}^{-2}$	$1 \text{mV} = 0.100 \text{ klux}$
Analogue output range	$0-2500 \text{mV}$	$0-2500 \text{mV}$	$0-2000 \text{mV}$

Tabella 6: specifiche tecniche BF3

SPECTRAL RANGE	400 - 700 nm
ACCURACY	$\pm 5\%$
RESOLUTION	$2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
FIELD OF VIEW	Hemispherical, 180°
MEASUREMENT RANGE	Linear Range: $0-1000 \text{ mV}$ ($0-5000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) Full Sunlight: 400 mV ($2000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
CALIBRATIONS AND CONVERSIONS	Sensors are calibrated for outside use. $5.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ per mV
OPERATING TEMPERATURE	-40 to $+60^\circ\text{C}$
POWER	None, self powered
CABLE LENGTH	5 m
CABLE CONNECTOR TYPES	3.5 mm "stereo" plug
SENSOR DIMENSIONS	$2.4 \text{ cm} \times 2.75 \text{ cm}$ ($0.95 \text{ in} \times 1.1 \text{ in}$)
DATA LOGGER COMPATIBILITY (NOT EXCLUSIVE)	Decagon Em50 series, ProCheck
WARRANTY	One year, parts and labor



Figura 11: Sensore QSO-S PAR della Decagon Device

Tabella 7: specifiche tecniche QSO-S PAR

La pluviometria, le precipitazioni vengono misurate con un pluviometro a bascula modello ARG100 (*Environmental Measurements Limited*, Gran Bretagna). (Figura12 e Tabella 8) Il pluviometro viene periodicamente calibrato perché ogni basculata corrisponda a 0.2 mm di pioggia.

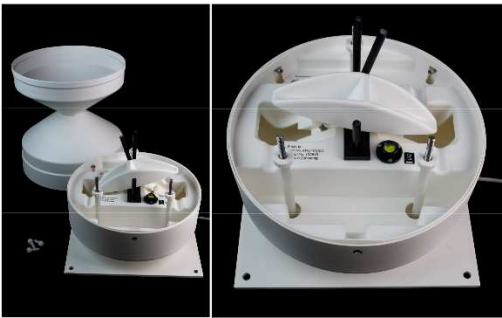


Figura 12: Sensore QSO-S PAR della Decagon Device

Funnel Diameter	: 254mm (10.0 inches)
Funnel Rim Height	: 340mm (13.4 inches)
Tip Sensitivity	: Standard setting 0.20mm of rain per tip; other setting 0.25mm, if required.
Output	: Contact closure.
Power requirements	: None.
Maximum allowable current through reed	: 300 mA; non inductive.
Weight	: 1000 gms.

Tabella 8: specifiche tecniche QSO-S PAR

Al suolo i parametri che vengono misurati sono:

Il flusso di calore nel suolo (G) che è parte della componente radiativa, viene misurata tramite due piastre modello HFT3 (*REBS Inc.*, Seattle, Washington, USA) della Campbell Scientific, Logan, UT, USA. (Figura13 e Tabella 9) interrate rispettivamente a -0.05 m e -0.20 m nel suolo.

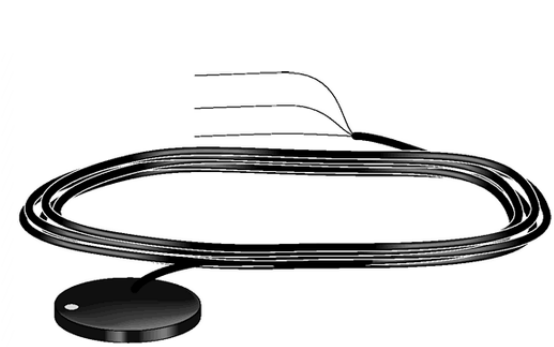


Figura 13: Sensore HFT3 Soil Heat Flux Plate

Specifications	
Measurement Range	±100W/m ²
Accuracy	Better than ±5% of reading
Operating Temperature	-40° to +55°C
Sensor Diameter	3.8 cm (1.5 in.)
Weight	45.4 g (0.1 lb)

Tabella 9: specifiche tecniche HFT3.

La temperatura, misurata a -0.05 m e -0.20 m con delle sonde robuste di alta precisione modello T107 *Temperature Probe* della Campbell Scientific, Logan, UT, USA. (Figura14 e Tabella 10) costituite da un termistore incapsulato in un alloggiamento di alluminio riempito con una resina epossidica questo permette alla sonda di essere sepolto o immerso in acqua fino a 15 m



Figura 14: Sensore 107 *Temperature Probe*

Specifications	
Sensor	BetaTherm 100K6A1IA Thermistor
Tolerance	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (over 0° to 50°C range)
Temperature Measurement Range	-35° to $+50^{\circ}\text{C}$
Survival Range	-50° to $+100^{\circ}\text{C}$
Steinhart-Hart Equation Error	$\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ over measurement range (CRBasic dataloggers only)
Polynomial Linearization Error	Typically $< \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ over measurement range (Edlog dataloggers only)
Time Constant in Air	30 to 60 s (in a wind speed of 5 m s^{-1})
Maximum Submersion Depth	15.24 m (50 ft)
Probe Diameter	0.762 cm (0.3 in.)
Probe Length	10.4 cm (4.1 in.)
Maximum Cable Length	$> 305\text{ m}$ (1000 ft) is typical and requires no programming changes. $> 762\text{ m}$ (2500 ft) requires programming changes. (Refer to section 8.4 of the 107 manual for assistance.)
Weight	136 g (5 oz) with (3.05-m) 10-ft cable

Tabella 10: specifiche tecniche 107 *Temperature Probe*

L'umidità del suolo misurata ad una profondità di -0.01 m (sotto la lettiera), -0.05 m, -0.20 m e -0.50 m con dei sensori modello CS616 della Campbell Scientific, Logan, UT, USA. (Figura 15 e Tabella 11) che rilevano il contenuto d'acqua per unità di volume, da 0% a saturazione, presente nel suolo. La sonda emette una frequenza di oscillazione in megahertz, che viene ridimensionato e facilmente letto da un data-logger Scientifico.

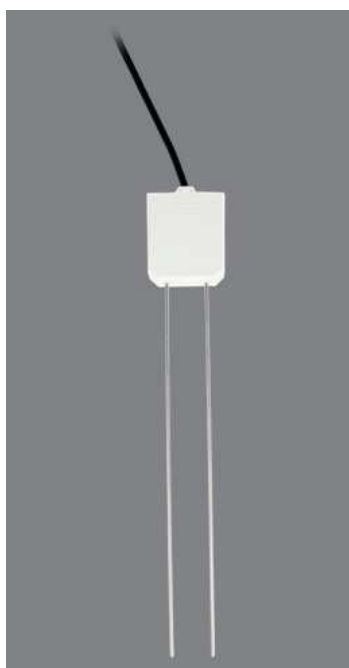


Figura 15: Sensore CS 616

Operational Temperature	0° to $+70^{\circ}\text{C}$
Probe-to-Probe Variability	$\pm 0.5\%$ VWC in dry soil, $\pm 1.5\%$ VWC in typical saturated soil
Accuracy	$\pm 2.5\%$ VWC (using standard calibration with bulk electrical conductivity of $\leq 0.5\text{ dS m}^{-1}$, bulk density of $\leq 1.55\text{ g cm}^{-3}$, and measurement range of 0% to 50% VWC)
Precision	Better than 0.1% VWC
Resolution	0.1% VWC
Output	$\pm 0.7\text{ V}$ square wave (with frequency dependent on water content)
Current Drain	65 mA @ 12 Vdc (when enabled); 45 μA (quiescent typical)
Power Supply Voltage	5 Vdc minimum; 18 Vdc maximum
Enable Voltage	4 Vdc minimum; 18 Vdc maximum
Electromagnetic	CE compliant (Meets EN61326 requirements for protection against electrostatic discharge.)
Rod Spacing	32 mm (1.3 in.)
Rod Diameter	3.2 mm (0.13 in.)
Rod Length	300 mm (11.8 in.)
Probe Head Dimensions	85 x 63 x 18 mm (3.3 x 2.5 x 0.7 in.)
Cable Weight	35 g per m (0.38 oz per ft)
Weight	280 g (9.9 oz) without cable

Tabella 11: specifiche tecniche CS 616

La radiazione fotosinteticamente attiva (PPFD) sotto *canopy* diretta (15 sensori) e riflessa (5 sensori) dal suolo con (sensori modello QSO-S PAR della Decagon Device con un campo visivo di 180 gradi Figura 11 e Tabella 7) questi sensori sono stati posizionati a sud della torre in modo che non venissero influenzati dall'ombra della torre stessa e dei box della strumentazione.

Nel sito, oltre alla sensoristica micrometeorologica sopra descritta, e installato un sistema per la misura dei flussi di copertura.

Per la misura veloce (20 Hz) di concentrazione della CO₂ ed H₂O, è stato utilizzato come IRGA (*Infra Red Gas Analyzer*) un Licor LI-7000 (LI-COR, Lincoln, NE, USA) (Figura 16 Tabella 12) essendo interessanti sia a studi di funzionalità che al bilancio di carbonio e di evapotraspirazione integrato temporalmente. L'IRGA utilizzato è del tipo a “cammino chiuso”. Infatti, pur necessitando di una pompa per il campionamento, tale modello non è soggetto a problemi di condensazione. Viene fatta una calibrazione periodica, ogni 15-20 giorni per correggere eventuali *shift* del sensore.



Figura 16: Analizzatore di gas CO₂-H₂O LICOR 7000

Tipo:	IRGA differenziale, non dispersivo
Ricettori:	a stato solido; uno per il CO ₂ ed uno per l'H ₂ O
Frequenza di chopping:	600 Hz.
Fonte:	singola, durata > 5 anni
Flusso massimo:	>50 litri/min.
Flusso max pompa interna:	1 l/min
Display:	40 caratteri × 8 linee LCD retroilluminato
Collegamenti:	4 DAC analogici, RS232, USB, USB 2.0 compliant.
Ingressi ausiliari:	2, -2.5 a +2.5V
Alimentazione:	100-240 VAC, 50-60 Hz, o 10.5-16 V, 4 amp max.
Temperatura Operativa:	0-50 °C
Dimensioni:	12.7 × 25 × 36.8 cm
Peso:	8.8 kg
Analizzatore di CO ₂ :	
Range:	0-3000 µmol/mol.
Accuratezza:	1% nominale
Analizzatore di H ₂ O:	
Range:	0-60 mmol/mol
Accuratezza:	1%.

Tabella 12: specifiche LICOR 7000

La velocità e la direzione del vento vengono misurate al di sopra delle chiome (33 m) mediante un anemometro sonico tridimensionale CSAT3 della Campbell Scientific, Logan, UT, USA (Figura 17) (questo modello risulta molto versatile, dato che i dati misurati possono essere acquisiti in modo analogico, digitale via RS232 e tramite protocollo SDM. Si presta quindi ad un'acquisizione sia tramite data-logger che tramite computer). L'anemometro sonico e l'ugello di ingresso del tubo di campionamento per l'aria da analizzare sono posizionati a 33 m su un traliccio addizionale, mentre l'analizzatore si trova in cima alla torre in una capannina meteorologica in legno. L'aria viene aspirata lungo un tubo in teflon (9 m x 4 mm) mediante una pompa (VDO M48x25/l, Antriebstechnik GmbH, Germany), installata a valle dell'analizzatore stesso. La calibrazione dell'analizzatore viene effettuata ogni 15 giorni, utilizzando miscele a concentrazione nota (RIVOIRA, Firenze, Italia). I dati dei flussi di copertura vengono raccolti in continuo tramite un datalogger ad una frequenza di 20 Hz e successivamente elaborati sullo stesso intervallo di tempo di quelli meteorologici (30 minuti). Il datalogger per la misura dei flussi (CR1000 della Campbell Scientific, Logan, UT, USA) è posizionato nelle vicinanze della capannina di legno che alloggia l'analizzatore, a 20 m dal suolo sulla torre, mentre i dati meteo vengono raccolti in un datalogger CR-5000 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA) posizionato nel box sotto la torre. I dati di tutti i sensori vengono raccolti ogni 10 secondi e mediati ogni mezz'ora, fornendo 48 valori giornalieri per ogni variabile. Ovviamente, il dato di precipitazione viene sommato e non mediato sull'intervallo di 30 minuti.

Sia la stazione meteorologica che la strumentazione per la misura dei flussi di copertura sono alimentati in bassa tensione (12 V). Il consumo complessivo della strumentazione installata arriva a 3.6 Ah, di cui la maggior parte dovuti al sistema di misura dei flussi di copertura.

L'energia necessaria viene fornita da 6 pannelli solari, installati in una radura distante 200 m dalla torre, che caricano 6 batterie da 12V/130A poste al di sotto di essi, collegate in parallelo. Dalla radura parte un cavo lungo 200 m che porta l'energia a 24V al sistema di controllo, posizionato nel box sotto la torre, che la stabilizza e la converte da 24 V a 12 V. Nel box sono collocate sei batterie addizionali, che vengono utilizzate quando le batterie posizionate al di sotto dei pannelli scendono sotto un determinato limite di carica (21 V). Due delle batterie addizionali sono caricate da due ulteriori pannelli solari installati in cima alla torre. Il passaggio da una serie di batterie all'altra (batterie radura – 2 batterie sotto pannelli – 4 batterie addizionali) viene effettuato automaticamente dal sistema di controllo, tramite relè a stato solido controllati da un datalogger CR10 (Campbell Scientific, UK). Le quattro batterie addizionali sono collegate ad un generatore diesel che, quando il loro livello di carica scende sotto il limite dei 22 V, parte automaticamente e va ad alimentare un caricabatterie ad alta potenza. Anche il comando per l'accensione del generatore viene impartito dal sistema di controllo centrale, il quale invia anche il comando di spegnimento quando le batterie arrivano al di sopra di 28 V. Il tempo di funzionamento del

generatore dipende dalla durata del giorno e dalle condizioni atmosferiche. Il generatore è localizzato in un box opportunamente coibentato, posizionato accanto a quello del sistema di controllo.



Figura 17: Anemometro sonico tridimensionale CSAT3 della Campbell Scientific

Per quanto riguarda le componenti del bilancio di energia vengono rilevati il flusso di radiazione netta al di sopra della copertura (Campbell Scientific, USA) e il flusso di calore nel suolo, che viene misurato alla profondità di 10 cm con una coppia di piastre a flusso di calore (REBS, Seattle, USA). Le restanti componenti del bilancio di energia (calore latente e calore sensibile) vengono calcolate dal sistema per la determinazione dei flussi di CO_2 e H_2O tramite la tecnica della *correlazione turbolenta* o tecnica dell'Eddy Covariance (EC) (Aubinet, Vesala, & Papale, 2012).

3.4 MISURE EDDY COVARIANCE

3.4.1 TEORIA DI BASE

La tecnica Eddy Covariance (EC) è ormai consolidata presso tutta la comunità scientifica internazionale come uno dei metodi più accurati e affidabili per misurare i flussi di quantità di moto (*momentum*, τ), materia (es. *trace gases*, CO_2 , CH_4 , N_2O ,...) ed energia (come calore sensibile e latente, H e LE) (Burba & Anderson, 2010). Il suo impiego per il calcolo dei flussi di CO_2 e quindi dello scambio netto di C (NEE, dall'inglese *net ecosystem exchange*) permette al metodo EC di essere diffuso nel calcolo del bilancio di C di diversi ecosistemi in tutto il mondo (v. per esempio (Curtis *et al.*, 2002); (Falge, *et al.*, 2002); (Merbold, Rogiers, & Eugster, 2012)). Da un punto di vista ecologico NEE è dato dalla quantità di CO_2

assorbita dai tessuti vegetali verdi tramite fotosintesi al netto di quella impiegata per il mantenimento dei tessuti, e di quella riemessa per via dell'attività dei microorganismi presenti nel suolo, cioè della respirazione autotrofa (Ra) ed eterotrofa (Rh), che insieme formano la respirazione ecosistemica (Reco o Re). Il metodo della correlazione turbolenta campiona i movimenti d'aria turbolenti ascendenti e discendenti che trasportano i gas, determinando la differenza netta di materia nell'interfaccia canopy-atmosfera (Baldocchi, 2003): considerando la CO₂, l'EC permette di calcolare direttamente la NEE. La popolarità della tecnica EC in questo settore è principalmente dovuta al fatto che essa consente di calcolare NEE su scala ecosistemica e in modo non invasivo, mentre dal punto di vista temporale copre un *range* di scale dalla semi-oraria alla pluriennale. Un altro vantaggio è la possibilità di calcolare l'area spaziale che contribuisce alla maggior parte del flusso calcolato tramite apposito modello (Kljun, Calanca, & Rotach, 2004); (Schmid, 2002), usando la cosiddetta funzione di *footprint* integrata su una certa area sorgente. Essa può variare da qualche centinaio di metri a diversi chilometri, a seconda dell'altezza di misura, della stabilità atmosferica, e della *roughness length* (cioè l'altezza a cui si annulla il profilo logaritmico del vento, (Foken, Micrometeorology, 2008)).

La base teorica del metodo è la seconda legge di Newton, da cui deriva l'equazione di conservazione della quantità di moto, che nel campo della fluidodinamica ha prodotto le equazioni differenziali di Navier-Stokes (McDonough, 2007). Esse descrivono la fisica di tutti i fluidi, inclusi quelli turbolenti, esprimendo il bilancio delle forze e delle accelerazioni presenti in un'unità di massa nelle tre direzioni dello spazio. Tramite le decomposizioni di Reynolds (Reynolds, 1895) e semplificando alcuni termini, è possibile formulare le equazioni per fluidi turbolenti anche sulla base di assunzioni relative alle caratteristiche di misura, ottenendo che:

$$\text{Equazione 1} \quad \frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial z} = 0$$

Dove w è la componente verticale della velocità del vento, u quella orizzontale, z rappresenta l'asse verticale del sistema di riferimento cartesiano. La barra superiore indica la media temporale, mentre gli apici rappresentano gli scarti rispetto alla media (es. $w' = w - \bar{w}$). L'Equazione 1 suggerisce come il termine $\overline{w'u'}$, rappresentante il flusso verticale della quantità di moto attraverso un ideale piano orizzontale sopra gli elementi costituenti la *roughness*, sia costante con l'altezza. Le assunzioni di cui sopra sono:

1. Che il fluido sia incomprimibile (altrimenti la decomposizione di Reynolds non è applicabile);

2. Stazionarietà (il valore medio, in questo caso di velocità, non varia nel tempo);
 3. Omogeneità orizzontale (gradienti orizzontali nulli);
 4. Diffusività molecolare trascurabile (valido per un *surface boundary layer* omogeneo);
 5. Componenti del vento medio su un unico asse orizzontale del sistema Cartesiano scelto (viene ruotato per annullare la componente verticale e una delle due orizzontali). (Aubinet, Vesala, & Papale, 2012).
- Alcune di queste condizioni sono verificabili; per altre invece ci si può avvicinare alla condizione ideale, ma nella realtà sono molto rare (es. la stazionarietà è condizionata dalla stabilità atmosferica, che è una caratteristica esterna non modificabile). E' quindi importante conoscere le caratteristiche in cui si misura, scegliere opportuni intervalli temporali su cui mediare, e per ogni intervallo avere la possibilità di valutare la qualità del dato e decidere se scartarlo o applicare opportune correzioni. In generale, molte delle assunzioni alla base del metodo si verificano più facilmente durante il giorno che di notte (Papale, *et al.*, 2006).

Con gli opportuni adattamenti, la formulazione vista per la quantità di moto può essere impiegata per vari scalari e per l'entalpia dell'aria, "trasformando" così l'equazione di conservazione della quantità di moto in quella della conservazione della massa e dell'entalpia, rispettivamente. Nel primo caso, considerando il cosiddetto *mixing ratio*, cioè la concentrazione molare di un gas sulla concentrazione di aria secca ($\chi = \frac{\rho_s}{\rho_d}$ con ρ_s la densità dello scalare e ρ_d la densità dell'aria secca), applicando Reynolds e facendo le stesse assunzioni e semplificazioni, si ottiene un'equazione analoga alla Equazione 1:

$$\text{Equazione 2} \quad \frac{\partial \overline{\rho_d w' \chi'}}{\partial z} = S$$

Dove S rappresenta la sorgente (*source* o *sink*) del flusso, le altre notazioni seguono le definizioni date per l'Equazione 1. Per l'entalpia si ha invece:

$$\text{Equazione 3} \quad \frac{\partial \overline{w' \theta'}}{\partial z} = \frac{1}{\bar{\rho} c_p} \left[\frac{\partial R}{\partial z} \right]$$

Con θ = temperatura virtuale, ovvero, preso un campione di aria ad una certa umidità, quella temperatura che avrebbe una particella di aria secca con la stessa pressione e densità del campione. ρ è

la densità dell'aria e c_p il calore specifico dell'aria, pari a $1004.834 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$; $\frac{\partial R}{\partial z}$ rappresenta invece la divergenza radiativa di flusso verticale (Aubinet, Vesala, & Papale, 2012).

Integrando queste equazioni in un volume di controllo (che, nell'assunzione di omogeneità orizzontale, corrisponde ad integrare in verticale tra il suolo e l'altezza di misura, h_m) si ottiene:

$$\text{Equazione 4} \quad \overline{\rho_a w' \chi'} \Big|_{h_m} = F_s$$

Con F_s = flusso mediato sul volume di controllo. In condizioni di turbolenza ben sviluppata, sito pianeggiante e copertura omogenea, quindi, si ottiene con buona approssimazione l'uguaglianza tra il flusso di uno scalare e la covarianza tra la sua concentrazione e la velocità verticale del vento. Se la covarianza è positiva il flusso è diretto verso l'atmosfera, se negativa il flusso è verso la superficie della terra (Baldocchi, 2003)

Nel caso in cui lo scalare s sia la CO_2 , posso definire, $X_c = \frac{\rho_c}{\rho_a}$ con ρ_c densità della CO_2 , e ricavare dall'Equazione 4:

$$\text{Equazione 5} \quad \overline{\rho_a w' \chi_c'} \Big|_{h_m} = F_c$$

Con F_c flusso di C. Se invece considero il vapore acqueo (H_2O), posso ottenere:

$$\text{Equazione 6} \quad \overline{\rho_a w' q'} \Big|_{h_m} = F_q$$

F_q = flusso di vapore acqueo; q = umidità specifica. Da questa si ricava l'equazione per il calore latente (LE), cioè il flusso di vapore acqueo in unità energetiche, rappresentante l'evapotraspirazione dell'ecosistema, tramite semplice moltiplicazione per il calore specifico dell'acqua (λ):

$$\text{Equazione 7} \quad \lambda \overline{\rho_a w' q'} \Big|_{h_m} = LE$$

Analogamente dall'entalpia si ha:

$$\text{Equazione 8} \quad \bar{\rho} c_p \overline{w' \theta'}|_{h_m} = H$$

Dove H rappresenta il calore sensibile.

Tuttavia nella realtà, quando la stabilità atmosferica si trova in condizioni di transizione, cioè all'alba (stabilità → instabilità) e al crepuscolo (instabilità → stabilità), o in condizioni di stabilità atmosferica quali quelle che si verificano spesso nelle ore notturne, per lo scalare la derivata nel tempo non è più trascurabile, in quanto rappresenta lo *storage* di quello scalare nel volume di controllo, ed assume un ruolo importante nel calcolo dello scambio netto. Più propriamente l'Equazione 4 diventa:

$$\text{Equazione 9} \quad \int_0^{h_m} \bar{\rho}_a \frac{\partial \chi}{\partial t} dz + \bar{\rho}_a \overline{w' \chi'}|_{h_m} = F_s$$

Ovvero il flusso di uno scalare, cioè lo scambio netto dello scalare a livello ecosistemico (NEE), è dato dalla somma della covarianza tra la velocità verticale del vento e lo scalare in questione all'altezza di misura h_m con il cambio dello *storage* dello scalare tra il suolo e h_m (Baldocchi, 2003).

Nelle misure in coperture vegetali, la componente di *storage* viene sempre calcolata, anche durante le ore diurne quando spesso è comunque trascurabile.

3.4.2 APPLICAZIONI NELL'ECOLOGIA FORESTALE

La tecnica *Eddy-Covariance*, misura i flussi turbolenti degli scalari, come la CO_2 , e ne permette oltre alla stima del ciclo biogeochimico, e, in siti attrezzati per misure integrate e dove vengono misurate anche le variabili ancillari (climatiche, strutturali, ecologiche) anche lo studio delle determinanti ambientali, ecologiche ed eco-fisiologiche. Lo scambio netto di CO_2 , misurato dagli strumenti *Eddy-Covariance* sulla torre *Eddy* sopra *canopy*, in condizioni turbolente di rimescolamento e con processi di accumulo, non turbolenti, nulli o trascurabili nel volume di controllo sottostante fino al suolo, rappresenta quindi una misura della CO_2 netta assorbita (o rilasciata) dall'ecosistema forestale, nelle sue componenti organiche (legno, foglie, sottobosco) e di decomposizione (lettieria, sostanza organica nel suolo). Oltre al trasporto

turbolento, possono essere attivi altri meccanismi di trasporto ed accumulo della CO₂ che, qualora non trascurabili, andrebbero giustamente considerati (Chapin F.S. *et al.*, 2006). Con queste assunzioni, il trasporto turbolento verticale di CO₂, assume valore di stima di due processi ecofisiologici fondamentali (Figura 18):

- di giorno, rappresenta lo scambio netto di ecosistema (*Net Ecosystem Exchange, NEE*), risultante della differenza tra la respirazione dell'ecosistema (*R*) e la fotosintesi (*GPP: Gross Primary Production*) (negli ecosistemi decidui, in autunno e in inverno, anche di giorno può essere presente solamente il processo respirativo)
- di notte, NEE rappresenta la sola *respirazione dell'ecosistema (R)*, di cui la componente eterotrofa ed autotrofa del suolo, ne è solitamente la parte prevalente;

$$NEE = Re - GPP, \text{ di giorno e con attività fotosintetica}$$

$$NEE = Re, \text{ di notte}$$

(per convenzione micrometeorologica il flusso netto NEE è negativo, indicando entrata nell'ecosistema, cioè CO₂ sottratta all'atmosfera).

I processi respirativi generano CO₂, quindi ne causano rilascio in atmosfera: per convenzione *Re* assume valori positivi indicando rilascio verso l'alto (in atmosfera), corrispondenti a $NEE > 0$. Dalle misure di Eddy Covariance è possibile ricavare la *GPP* che, per convenzione ecologica, spesso ha segno positivo. In caso di inclusione dei tre processi (*Re*, *NEE*, *GPP*) nella medesima analisi o rappresentazione grafica, si decide quale convenzione di segno utilizzare (*GPP* e *NEE* negative e *Re* positiva nel caso di interesse sui flussi e scambi con l'atmosfera; *GPP* e *NEE* positive e *Re* negativa qualora l'interesse sia più sui processi ecologici). Nel caso di studio dei flussi, ne risulta che la $NEE < 0$, indica un assorbimento netto della CO₂: questi valori negativi della *NEE* sono attesi durante la stagione vegetativa e di giorno, quando è attivo il processo di fotosintesi e riesce a prevalere, in valore assoluto, sulla respirazione autotrofa ed eterotrofa.

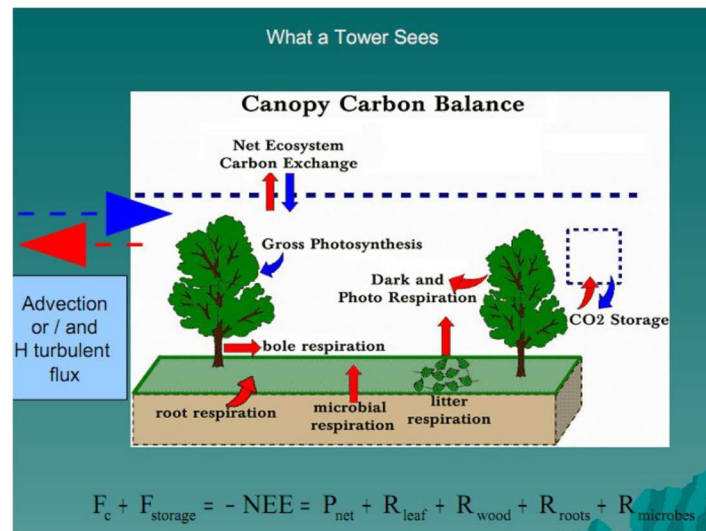


Figura 18: Bilancio del Carbonio in Foresta

3.4.3 CALCOLO DEI FLUSSI

In precedenza è stata descritta la teoria per ottenere il calcolo dei flussi, e in particolare NEE. Come si è visto, però, il processo di misura necessita assunzioni non sempre verificate. Inoltre per alta che sia la frequenza di acquisizione e piccolo che sia il cammino di campionamento dell'anemometro, si possono avere comunque delle perdite di segnale ad alta frequenza per gli *eddies* più piccoli e veloci. Anche il calcolo della media può portare a perdite di segnale, così come molte caratteristiche della stazione, tipo la separazione degli strumenti che misurano le variabili da correlare. Le variabili in *output* dall'analizzatore, inoltre, non sempre sono in *mixing ratio* come richiesto dalla teoria, ed è quindi necessario porvi rimedio. Esiste quindi una serie di operazioni da applicare al dato grezzo (raw) per ottenere i flussi opportunamente corretti (processamento), che dipendono sia dall'operatore, sia dalle condizioni di misura, sia dal tipo di strumenti. Le Tabelle 13 e 14 riportano il *workflow* con i vari passaggi a cui i dati misurati sono stati sottoposti. I passaggi sono quelli codificati dal sistema di calcolo e correzione accettato dalla comunità FluxNet e implementati nel software open EddyPro.

		Raw data	
1		De-spiking	
	plausibility range = $\pm 3.5 \sigma$	moving window = 1/6 averaging interval	(Vickers & Mahrt, 1996)
2		Calcolo delle fluttuazioni	
	linear detrending		(Gash & Culf, 1996)
3		compensazione time lags	
	massimizzazione della covarianza		(Fan, Wofsy, Bakwin, Jacob, & Fitzjarrald, 1990)

		Calcolo covarianze e flussi non corretti	
4		attenuazione basse frequenze	
	High-pass filtering correction		(Moncrieff, Clement, Finnigan, & Meyers, 2005)
5		attenuazione alte frequenze	
	Low-pass filtering correction		(Ibrom, Dellwik, Flyvbjerg, Jensen, & Pilegaard, 2007)
6		compensazione <i>time lags</i>	
	WPL term	effetti delle fluttuazioni di densità dell'aria	(Leuning, 2006)

Tabella 13 e 14 processamento dati da alta frequenza a flussi semiorari corretti

Gli ultimi 2 *step* 5 e 6 sono stati applicati in maniera iterativa ai diversi flussi, visto che la WPL cioè la correzione per gli effetti della densità dell'aria, si basa sui flussi di calore sensibile e latente, che quindi devono essere corretti a loro volta: il flusso di CO₂, di H₂O, di calore latente e di quantità di moto sono stati corretti per le perdite spettrali; poi al flusso di calore latente così corretto è stata applicata la correzione "WPL", inserendo nella formula il calore sensibile non ancora corretto. Quindi Il flusso di calore sensibile è stato corretto per le perdite spettrali, e la WPL è stata applicata di nuovo al flusso di calore latente, includendo il flusso di calore sensibile corretto. Con i flussi di calore sensibile e latente così completamente corretti, il termine WPL è stato applicato anche al flusso di CO₂, ottenendo così i flussi definitivi.

In aggiunta a queste correzioni, sono state calcolate le distanze di *footprint* secondo il modello di (Kljun *et al.*, 2004). I flussi di *storage* di CO₂, H e LE sono stati infine calcolati secondo il primo termine dell'Equazione 9, e analoga formulazione per i flussi di calore, con un approccio che prevede l'approssimazione della derivata del tempo in un singolo punto (l'altezza di misura) e supponendo un profilo lineare fino a terra (Papale, *et al.*, 2006).

3.4.4 CALCOLO DEL VPD (DEFICIT DI PRESSIONE DI VAPORE)

Il VPD è stato calcolato a partire dalla relazione riportata nell'equazione 10:

$$VPD = e_s - e \quad \text{[equazione 10]}$$

in cui e_s è la pressione di vapore a saturazione, dipendente dalla temperatura secondo la relazione (equazione 11):

$$e_s = 0.611 \cdot \exp^{\frac{17.27(T-273)}{T-36}} \quad \text{[equazione 11]}$$

in cui la temperatura (T) è espressa in gradi Kelvin,

e rappresenta la pressione di vapore misurata istantaneamente, calcolata secondo la relazione dell'equazione 12:

$$e = \frac{P \cdot q}{0.622} \quad \text{[equazione 12]}$$

in cui P è la pressione atmosferica espressa in kPa e q la concentrazione di vapore acqueo, espressa in mol mol⁻¹.

La temperatura utilizzata è quella rilevata dal sensore posizionato al di sopra della copertura, la concentrazione di vapore acqueo è misurata attraverso l'analizzatore degli scambi di carbonio, la cui cella rileva anche il contenuto di H₂O dell'aria, e P è la pressione del sito, fissata in 0.85 kPa.

3.5 DATI ANCILLARI

Nel sito di monitoraggio di Collelongo vengono eseguiti dei rilievi periodici biometrici/dendrometrici, che consentono di valutare la variazione di biomassa nel tempo, grazie alle stime fatte utilizzando le relazioni allometriche costruite per il sito di Collelongo che permettono di stimare la biomassa dei diversi comparti della pianta (Masci,2002).

3.5.1 PRODUZIONE DI LETTIERA EPIGEA

Per la stima della produttività della lettiera fogliare si è ricorsi alle trappole poste all'interno dell'area della Torre. Quando si usano le trappole si deve supporre che il materiale catturato sia rappresentativo del bosco. Per il campionamento sono state utilizzate 15 trappole coniche di superficie pari a 0.5 m² installate con l'apertura a circa un metro dal suolo, distribuite inizialmente in modo casuale sul terreno, e successivamente mantenute nella stessa posizione nel tempo. Le trappole sono state costruite in modo tale che il materiale entrato non riesca a fuoriuscire ma, allo stesso tempo, da garantire il passaggio dell'acqua. Durante la stagione vegetativa si è raccolto varie volte il contenuto delle trappole, la prima raccolta è stata fatta all'inizio della stagione vegetativa ai primi di giugno, un'altra durante l'estate e poi raccolte più frequenti durante l'autunno. Una volta raccolto, il contenuto delle trappole è stato seccato in stufa a 70°C per 36-48 ore, e diviso nelle sue componenti che sono state pesate separatamente.

3.5.2 MISURE DI ACCRESCIMENTO TRAMITE DENDROMETRI

Per l'analisi degli incrementi diametrici del fusto sono state utilizzate delle bande dendrometriche modello D1 della UMS (Figura 19) che permettono di misurare i cambiamenti nella circonferenza dell'albero nel tempo. Il D1 si avvolge intorno al tronco di un albero e si chiude con un meccanismo a molla che permette al nastro di espandersi in base a come l'albero cresce. La scala di misurazione è in unità di π quindi non c'è bisogno di convertire la circonferenza in diametro. Queste bande dendrometriche sono in grado di misurare alberi con diametro da 10 a 66 centimetri e anche oltre.



Figura 19: banda dendrometrica D1 UMS

3.6 TELERILEVAMENTO E INDICI DI VEGETAZIONE

La tecnologia moderna del monitoraggio ambientale ha messo a punto molteplici strumenti per la classificazione del territorio quali il *remote sensing*, le tecnologie di monitoraggio dei parametri meteorologici, i sistemi per la trasmissione, archiviazione ed analisi statistica dei dati, i Sistemi Informativi Geografici e la modellistica. Questi strumenti sono in grado di raccogliere molte informazioni, anche apparentemente difficili da coniugare, e possono essere utilizzati in modo integrato per offrire un quadro più esauriente possibile.

I sistemi di osservazione remota, sia da satellite che da piattaforma aerea che da supporti terrestri, sono destinati a diventare la principale fonte di informazioni per il controllo e la gestione del territorio, permettendo l'aggiornamento continuo dei piani informativi e fornendo un continuo contatto con i cambiamenti del mondo reale (Rijks, 1995). Grazie alle migliorie tecniche ed al contenimento dei costi, questi sistemi sono ormai il routinario complemento di molte analisi e procedure di valutazione che vengono svolte con metodologie tradizionali. Le potenziali applicazioni del telerilevamento ambientale

devono comunque essere valutate sulla base delle caratteristiche dei sensori e dei satelliti, e sulla loro capacità a rappresentare il mondo reale e soddisfare le esigenze operative e le priorità degli utenti finali. In particolare l'applicabilità del telerilevamento (*remote sensing*) al monitoraggio dei processi ecologici ed ecofisiologici dipende da tre importanti elementi: le caratteristiche elettromagnetiche, la risoluzione spaziale e la risoluzione temporale (Moran *et al.* 1997). Ogni satellite e relativo sensore grazie alle sue peculiarità ha utilizzazioni in campi di applicazione specifici. I satelliti per l'osservazione della Terra rappresentano un importante strumento d'indagine per l'Ecologia. Permettono infatti di studiare la struttura e l'evoluzione degli ecosistemi terrestri e in modo particolare della vegetazione. La variazione della risposta spettrale della vegetazione può servire, oltre che ad individuare tipologie e caratteristiche fisionomiche diverse, anche a riconoscere indirettamente aspetti geologici e pedologici del territorio. Gli indici di vegetazione rappresentano una combinazione lineare delle bande originali e hanno lo scopo di enfatizzare le componenti caratteristiche della risposta spettrale della vegetazione. La maggior parte dei prodotti da telerilevamento derivano direttamente da indici spettrali che utilizzano le bande del visibile e dell'infrarosso e sono definiti generalmente come VI (*Vegetation Index*)

Tra i diversi indici presenti in letteratura, abbiamo utilizzato l'indice EVI (*Enhanced Vegetation Index*), dati bisettimanali MODIS, per vedere l'andamento della stagione vegetativa e capire le date di *start / end growing season*. Mentre per il *proximal sensing* con il drone sono stati scelti, l'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse *et al.*, 1974) e il PRI (*Photochemical Reflectance Index*) (Gamon *et al.*, 1992).

L'NDVI si basa sul rapporto tra la banda del rosso (correlata con l'assorbimento della luce da parte della clorofilla) e la banda dell'infrarosso vicino (con un alto valore di riflettanza, legata alla densità della vegetazione verde). Ed è definito secondo la seguente relazione:

NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) = $(R_{NIR} - R_{rosso}) / (R_{NIR} + R_{rosso})$ dove:

R NIR = Riflettanza nell'infrarosso vicino

R rosso = Riflettanza nel rosso (visibile)

Il PRI (*Photochemical Reflectance Index*) è un indice a banda stretta associato alla diminuzione dell'efficienza fotosintetica in quanto sensibile allo stato di de-epossidazione del ciclo delle xantofille (Gamon *et al.*, 1992). Quest'ultimo è un processo di dissipazione termica che viene attivato dalla vegetazione in condizioni di eccesso di radiazione solare, e consiste nella de-epossidazione della violaxantina. In una prima fase del manifestarsi dei sintomi di stress, bassi valori di PRI indicano una percentuale di de-epossidazione maggiore delle xantofille, e quindi un aumento della dissipazione energetica. Il PRI è definito secondo la seguente relazione:

PRI (*Photochemical Reflectance Index*) = $(R_{531} - R_{ref}) / (R_{531} + R_{ref})$ dove:

R_{531} indica la riflettanza nella banda di 531 nanometri

R_{ref} indica la riflettanza nella banda di riferimento, che in precedenti studi è stato osservato essere la banda a 570 nm (Gamon *et al.*, 1992).

Il PRI in alcuni casi è in grado di tracciare le variazioni spaziali della copertura fogliare e i cambiamenti strutturali delle foreste (Barton, North, 2001). Numerosi studi dimostrano una buona correlazione tra il PRI e l'efficienza d'uso della luce (LUE) (Serrano, Peñuelas, 2005), sia a livello fogliare che di copertura. In particolare, il PRI appare sensibile agli eventuali stress idrici causati da condizioni di siccità.

Per ovviare ad alcuni limiti operativi del telerilevamento da satellite ed aereo, si sta rapidamente diffondendo, negli ultimi anni, il *proximity sensing* o telerilevamento vicino, ovvero quella tecnica che utilizza strumenti analoghi a quelli montati sulle piattaforme satellitari e aeree ma su altri mezzi come per esempio droni o APR (Aeromobili a Pilotaggio Remoto) così definiti dall'ENAC l'Ente Nazionale Aviazione Civile.

3.7 I DRONI PER IL *PROXIMITY SENSING* E REALIZZAZIONE DI UN SAPR PER IL MONITORAGGIO AMBIENTALE

Lo sviluppo tecnologico ha portato alla progressiva riduzione di costi, ingombri, consumi e peso dei componenti elettronici utilizzati nel telerilevamento. La messa a punto di sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (SAPR), più noti come “droni”, apre nuovi scenari nel monitoraggio e nel controllo ambientale. Quello che si è cercato di fare è stato progettare e costruire un laboratorio mobile di tipo leggero attrezzato con strumentazione dedicata all’osservazione della Terra (OT) a supporto della gestione del territorio e dell’analisi ed il monitoraggio ambientale. Le piattaforme aeree sono diventate negli ultimi anni uno strumento insostituibile per lo studio dei processi ambientali e per la gestione del territorio. Le osservazioni da piattaforma aerea si collocano fra le misure a terra e quelle da satellite, rispetto alle prime hanno migliore mobilità e copertura geografica e rispetto alle seconde una migliore risoluzione spaziale e una maggiore flessibilità in termini di scelta del tempo e del luogo dell’osservazione. Nel caso del monitoraggio dell’atmosfera sono infine l’unico metodo per ottenere misure in situ in funzione della quota. In sintesi i droni possono quindi essere applicati utilmente in campo forestale per una serie di servizi quali: la stima della consistenza del patrimonio forestale, il bilancio del carbonio, la gestione e la pianificazione forestale e il monitoraggio ambientale. A questo proposito, il sistema di raccolta di informazioni sull’ambiente mediante droni risulta particolarmente innovativo in quanto:

- consente di azzerare il rischio umano connesso al volo; sia attivo, del personale a bordo del velivolo, sia passivo per persone e cose sottostanti la traiettoria del volo;
- ha ingombri ridotti ed è di facile trasporto;
- il tempo di operatività permette di ripetere le operazioni, anche più volte e ad intervalli di tempo stabiliti;
- vola anche a bassa quota e consente di ispezionare con alta precisione anche territori impervi, ad elevata pendenza di solito non raggiungibili;
- si può evitare tutta la complessità legata alla logistica dei voli e degli scali legata all’uso di aerei;
- si possono evitare gli ingenti investimenti legati al volo aereo e alla strumentazione da utilizzare per i rilievi;
- consente di operare anche in condizioni di nuvolosità;

- ha la capacità di ripetere meccanicamente una rotta con elevata precisione, possibilità non ottenibile con altri mezzi.

Il fatto di poter ripetere ispezioni ogni volta che si presentino o meno cambiamenti nella realtà, con identiche modalità e percorso, permette un confronto anche su media-lunga scala temporale, e consente di monitorare l'evoluzione di un territorio a costi ridotti.

Quest'ultimo vantaggio, in particolare, è l'elemento che più degli altri rende vincente il drone, introducendo un'innovazione vera, ovvero l'oggettività metrica della rilevazione e la sua comparabilità con le precedenti. In campo forestale l'utilizzo dei droni è solo ai primi passi e i risultati che ci si attende di ottenere vertono verso l'applicabilità di questi alla stima del bilancio del carbonio, anche nell'ottica dello studio degli effetti dei cambiamenti climatici.

Per questo lavoro di dottorato è stato costruito un drone multi-rotore dotato di sei motori, posti alle estremità dei bracci che vanno a formare una stella. I motori adiacenti ruotano nella direzione opposta. Si tratta di un sistema robotico senza pilota a decollo e atterraggio verticale. Utilizza un sistema di controllo che si basa sulla lettura dei dati provenienti dalla IMU (*Inertial Measurement Unit*) grazie al quale è possibile un volo stabilizzato.

Il sistema di controllo si basa su quattro canali: *throttle*, *pitch*, *roll* e *yaw* (Figura 20).

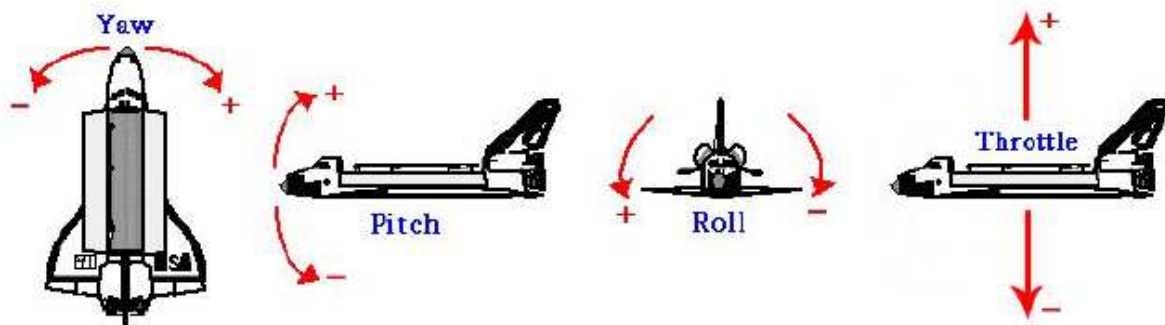


Figura 20: roll, pitch, yaw e throttle

Il *throttle* aumenta o diminuisce le velocità di tutti e sei i motori, causando la salita o la discesa del drone

Il *pitch* permette al drone di andare in avanti o indietro aumentando o diminuendo la velocità dei motori posteriori rispetto a quelli anteriori.

Il *roll*, funziona allo stesso modo del *pitch* solo che il movimento del drone è a destra e sinistra cambiando la velocità dei motori laterali.

Lo yaw invece determina la direzione di volo modificando la velocità di rotazione dei motori opposti. A destra o a sinistra

Lo scopo principale per cui si è scelto di costruire un drone, è stato quello di testare uno strumento altamente tecnologico che potesse inserirsi in un contesto intermedio tra i rilievi a terra e quelli da satellite. La realizzazione del SAPR (CNR 1F-001G IBAF) è il risultato di diverse fasi temporali e concettuali incentrate sul contenimento dei costi e la realizzazione di uno strumento versatile. Le fasi di realizzazione dopo un'attenta analisi di mercato sono state quelle di dimensionamento e assemblaggio

3.7.1 DIMENSIONAMENTO

E' stata la fase in cui si sono scelti qualità e quantità di tutti i componenti. Per quanto riguarda il tipo di frame cioè il corpo centrale del drone si è scelto un F550 della DJI (Figura 21) composto da una piastra superiore ed una inferiore quest'ultima dotata di circuito prestampato per le connessioni elettriche, la leggerezza, i numerosi spazi forati e la resistenza del materiale sono stati gli elementi principali nella scelta di questo componente.

I 6 bracci (Figura 22) scelti sono sembrati il miglior compromesso tra leggerezza e materiale, la loro facilità di assemblaggio al frame e la resistenza in funzione del *payload* sono stati gli elementi che hanno guidato verso il loro acquisto in aggiunta ai bracci si sono dovute prendere delle estensioni (Figura 23) che permettessero di allontanarsi di altri 10 cm dal centro di gravità (CG) dell'APR, questo si è reso necessario per consentire alle *propeller* utilizzate di ruotare liberamente intorno all'asse dei *power propulsion*.



Figura 21: Frame F550 dji



Figura 22: Black Arms



Figura 23: Extension Plate

Il power set propulsion utilizzato è un dji E 600 (Figura 24) questo kit è composto da un'elica o *propeller* da 31 x 11 cm con carico consigliato di 600 g e carico massimo 1600 g. Nel kit è presente il motore da

600Kv e 90g di peso, alimentabile con batterie LiPo a 6S (6 celle) unitamente all' ESC da 20A questo consente un più alto rendimento elettrico e maggiore durata.



Figura 24: power set propulsion E600dji

Il Sistema di stabilizzazione e controllo utilizzato è una centralina Naza MV2 della dji (Figura 25) Il *firmware*, l'algoritmo di stabilizzazione ed assetto e la struttura hardware ottimizzata forniscono un'ottima performance di volo. Il suo design innovativo *All-in-one* è stato uno degli elementi che hanno portato verso la scelta di questo prodotto perché semplifica molto l'installazione e consente di risparmiare spazio e peso, questa centralina contiene ammortizzatori interni, un giroscopio a 3 assi, un accelerometro a 3 assi e un barometro può quindi misurare l'altitudine di volo, l'assetto e pertanto può essere utilizzato per il controllo del pilota automatico. La Naza PMU V2 è dotata di una porta estensibile CAN BUS, che può supportare iOSD, Zenmuse H3-2D *gimbal (pitch control)* con il quale è possibile stabilizzare la videocamera, presenta una compensazione automatica dell'andamento tramite il GPS e una calibrazione del sensore bussola.

Questa centralina è in grado di offrire diversi tipi di modalità di controllo che permettono di passare da una modalità all'altra per regolarsi nei differenti ambienti di volo e Il modulo GPS permette di migliorare notevolmente le prestazioni per la fotografia aerea grazie alla possibilità di poter volare in modo stazionario stabile, inoltre molto importante possiede la funzione RTH (*return to home*) con funzionalità di controllo ad orientamento intelligente, questo consente al drone, in qualunque posizione si trovi, di tornare esattamente al punto di decollo.

Il GPS (Figura 25 b) garantisce all'APR di rimanere in una posizione e altitudine bloccata anche in condizioni di forte vento. Un altro punto molto importante che ha orientato la nostra scelta è stato quello che questa centralina possiede un controllo di orientamento intelligente (IOC) quindi durante il pilotaggio, quando si sposta lo *stick* direzionale in avanti, il multi-rotore si dirigerà nella stessa direzione in cui è orientato il naso del velivolo. Ma grazie allo IOC, si potranno impostare due diverse modalità di orientamento.

- **modalità 1**, la direzione in avanti coincide con la direzione del naso.
- **modalità 2**, permetterà al multi-rotore di dirigersi nella direzione imposta sul radiocomando, anche

se il naso non coinciderà con quest'ultima, ma prendendo sempre come punto di riferimento il punto di partenza, pertanto non ha importanza conoscere la posizione del multi-rotore , inoltre di fondamentale importanza è la funzione *fail-safe*, , il che significa che quando la comunicazione tra il radiocomando e la ricevente posta sull'APR è scollegata, il drone si riposiziona in volo stazionario livellato e utilizzando la posizione GPS il multi-rotore tornerà automaticamente sul punto di partenza.

Al fine di evitare che il multi-rotore possa subire conseguenze dannose causate dalla bassa tensione della batteria, questa centralina consente tramite l'utilizzo di un led ad alta visibilità di avvertire il pilota sullo stato della batteria, qualora il monitor non dovesse funzionare. Durante la prima fase di protezione lampeggia continuamente un LED rosso di avvertimento, durante la seconda fase di protezione lampeggerà il LED rosso e successivamente il multi-rotore comincerà a scendere di quota fino ad atterrare. In modalità manuale, quando la protezione di bassa tensione viene attivata, solo l'allarme LED sarà attivo.

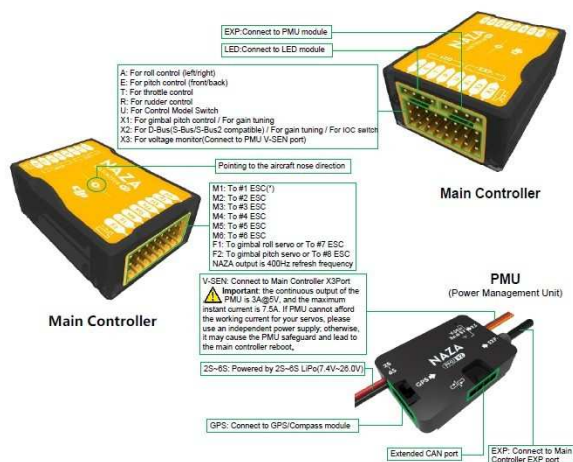


Figura 25: Sistema di stabilizzazione e controllo utilizzato è una centralina Naza MV2

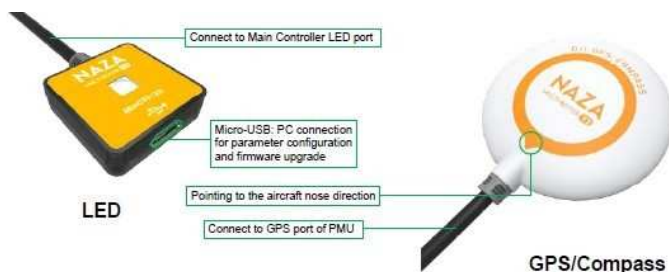


Figura 25 b: GPS collegato alla centralina Naza MV2

Le batterie per alimentare l'APR (4000mAh, 22.2v (6S) cioè 6 celle), sono state scelte in base al giusto rapporto peso potenza il tipo di batterie sono le così dette Li-Po cioè batterie ricaricabili a litio-ione-polimero che rispetto ad altri tipi di batterie ricaricabili (Pb, Li-ion, Ni-Cd, Ni-Mh, ecc..) presentano caratteristiche interessanti sul peso, sono molto leggere, sul contenitore cioè possono essere assemblate senza necessità di involucri rigidi, ed hanno dimensioni molto contenute a parità di mAh erogati (Figura 26)

Il *gimbal* per l'alloggiamento della camera è stato scelto in base al suo peso e al tipo di camera digitale da impiegare per le riprese nel visibile, il modello è Zenmuse H3-2D (Figura 27), leggero e semplice da installare grazie al sistema plug and play in grado di stabilizzare solo 2 assi durante il volo.



Figura 26: batteria Li-Po

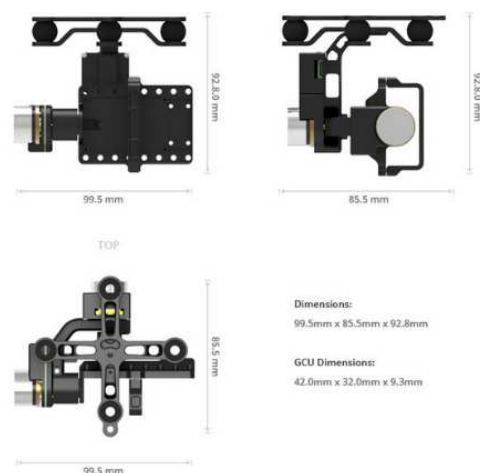


Figura 27: gimbal H3-2D

Il sistema di *waypoint* dji 2.4GHz Datalink a 16 *waypoints* (Figura 28) consente di predisporre un piano di volo su dei punti GPS stabiliti e di ripetere l'operazione ogni volta che si desidera monitorare la stessa cosa ma su scala temporale differente.

Il sistema di trasmissione audio video, modello AVL 58 5.8 GHz della dji (Figura 29) è dotato di due antenne, una che trasmette in modalità wireless (TX) e un ricevitore (RX) queste opportunamente collegate ai moduli operativi consentono di lavorare con il drone in modalità FPV (*first-person view*). Il funzionamento a 5,8 GHz ed ha una distanza operativa molto ampia che consente grossi margini di sicurezza.



Figura 28: waypoint dji 2.4GHz



Figura 29: AVL 58 5.8 GHz

3.7.2 ASSEMBLAGGIO CALIBRAZIONE E PROGRAMMAZIONE

La fase di assemblaggio ha permesso di unire tutti i componenti descritti nel paragrafo precedente, da questa fase dagli aspetti molto tecnici, dopo le necessarie operazioni di cablaggio e saldatura si è potuto realizzare l'APR denominato ai fini ENAC CNR 1F-001G IBAF

Le successive fasi di calibrazione dei parametri di volo e di programmazione della centralina hanno permesso di terminare il multi-rotore ottenendo un prodotto altamente tecnologico, potente, versatile, sicuro e dalle elevate prestazioni di volo (Figura 30)



Figura 30: APR CNR 1F-001G IBAF

3.7.3 DESCRIZIONE DEL PROGETTO E SCELTA DELLA STRUMENTAZIONE

Lo scopo è stato quello di realizzare un laboratorio mobile di tipo leggero attrezzato con strumentazione dedicata all'osservazione della Terra (OT) a supporto della gestione del territorio e dell'analisi ed il monitoraggio ambientale.

Le tecniche di telerilevamento hanno dimostrato da tempo le loro potenzialità per il monitoraggio dei sistemi forestali e della loro funzionalità sia su scala locale che regionale. Infatti, alcune proprietà dei singoli alberi sono particolarmente indicative delle caratteristiche e dello stato evolutivo del bosco (Barilotti *et al.*, 2005); studiarle permette di conoscere in modo particolareggiato lo stato di salute dei boschi e anche la quantità di anidride carbonica che la vegetazione è in grado di sottrarre all'atmosfera e trasformare in biomassa ed è quindi di particolare rilevanza determinare quale sia lo stato delle foreste ed il loro ruolo effettivo nella mitigazione dell'effetto serra e dei cambiamenti climatici. Negli ultimi anni, sono stati valutati molti metodi per lo studio dei popolamenti forestali mediante tecniche di telerilevamento (Morsdorf *et al.*, 2003). Gli APR possono essere equipaggiati, a seconda delle capacità di carico (*payload*), che sono spesso funzione delle loro dimensioni, con strumentazione e sensoristica di tipo diverso.

Per questo progetto è stato scelto di installare sul drone:

- Una camera digitale che consente di ottenere immagini e video che opportunamente foto-interpretate daranno informazioni sulla composizione vegetale, densità delle specie, sull'altezza delle coperture, e su classi di età. La fotocamera che è stata scelta in funzione della sua compattezza, leggerezza, economicità è del tipo HERO 3+*Black edition* della GoPro Stati Uniti, (Figura 31) che grazie alla sua possibilità di comunicare via wireless permette di essere comandata anche a distanze elevate. I filmati ottenuti hanno una risoluzione full HD 1920x1080 e una durata in minuti variabile. Il formato di memorizzazione è MP4, mentre la frequenza dei fotogrammi (*frame rate*) è di 60 fps (fotogrammi per secondo). La GoPro è munita di un obbiettivo grandangolare con lente sferica che consente un angolo di ripresa (FOV, *Field Of View*) più ampio rispetto alle normali ottiche in commercio. La distorsione è abbastanza accentuata, infatti essendo una distorsione radiale del tipo "barilotto" essa è minore al centro e maggiore verso i bordi. Se non si vuole intervenire direttamente sulla camera attraverso il menu impostazioni, modifica distorsione ma si preferisce avere comunque i filmati in *fish-eye*, GoPro mette a disposizione gratuitamente un *software* di *editing* fotografico chiamato GoPro Studio attraverso il quale è possibile, in pochi passaggi, ottenere la calibrazione di singole immagini, gruppi di immagini e interi filmati. Una volta lanciato GoPro Studio, dopo la prima fase di importazione e conversione, si dovrà importare il file da trattare, successivamente si seleziona la porzione di video da modificare e applicando un comando

viene eliminata la distorsione da tutti i frame che generano il filmato. Infine dal video rettificato si estraggono i singoli frame necessari per la restituzione fotogrammetrica. Importato il video, si apre nella finestra centrale il filmato con i classici comandi di riproduzione presenti in qualsiasi lettore multimediale e altre funzioni particolari come ad esempio Mark In e Mark Out che permettono di selezionare la parte di filmato che ci interessa trattare. Tutto questo può permettere di utilizzare le immagini per la creazione di modelli tridimensionali dell'area di interesse. Il grandangolo crea un'illusione ottica dovuta alla prospettiva allargata che distorce la dimensione relativa degli oggetti e fa sì che gli stessi sembrino più lontani fra loro. Quelli più vicini all'obiettivo sembrano insolitamente grandi mentre tutto quello che si trova in secondo piano appare molto più piccolo di quanto percepito dall'occhio umano. Inoltre, grazie a particolari tecniche di acquisizione di immagini multiple da diverse posizioni e utilizzo di opportuni software, le immagini digitali possono essere utilizzate anche per la ricostruzione tridimensionale della struttura forestale.

- Una camera multispettrale in grado di monitorare la radiazione che le piante riflettono nel visibile e nel vicino infrarosso, questo permette di acquisire in tempo reale dati sulla vegetazione riguardanti il loro stato di salute e poter essere in grado così di valutare e, in caso, reagire a problemi causati da infestazioni, parassiti, malattie, scarsa o eccessiva presenza di nutrienti (come le deposizioni azotate), situazioni di stress, tutti problemi che hanno un impatto sulla salute delle foreste. Le camere contengono un singolo sensore ad alta risoluzione di immagine diviso in un mosaico di filtri e ogni filtro consente di catturare la componente emessa nella banda di riferimento. Dalla combinazione di queste immagini si possono identificare una serie di indicatori grafici come NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) o SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*). Indici come questi danno indicazioni sulla biomassa, contenuto di clorofilla e la salute generale delle piante. Questa camera è disponibile in un gruppo di 4 sensori, ogni sensore possiede un filtro ottico a banda stretta a seconda della radiazione che si vuole osservare e monitorando le combinazioni di lunghezze d'onda filtrate, la camera consente di cercare un composto specifico o caratterizzare un tipo di vegetazione.

La camera multispettrale scelta per questo progetto è un'ADC (*Agricultural Digital Camera*) micro della Tetracam, Stati Uniti, (Figura 32) per immagini multispettrali da 90 grammi, una memoria fino a 8 GB, consumo di energia decisamente basso e un menu utente di semplice configurazione e controllo, l'ADC Micro consente di catturare immagini di alta risoluzione, GPS-correlate, visibili e prossime all'infrarosso (*Near InfraRed*) in grado sostanzialmente di essere editate, indicizzate e analizzate con il Software per Immagini Multispettrali, PixelWrench2.

- Due sensori SRS (*Spectral Reflectance Sensor*) per il calcolo del PRI (*Photochemical reflectance index*) della Decagon device, (Figura 33) questi radiometri multi banda, robusti ed economici sono stati scelti

per la loro precisione e perché ci consentono di ottenere dati di indice PRI utili a valutare la salute e la produttività dell'area che si osserva.

- Due sensori di PAR (*Photosynthetic Active Radiation*) *Photon Flux Sensor*, modello Apogee QSO-S della Decagon device, (Figura 34) questi due sensori sono stati posizionati in modo da poter captare sia la luce incidente che quella riflessa



Figura31: GoPro Hero 3 + Black edition



Figura 32: Tetracam ADC micro



Figura33: sensori SRS per PRI Decagon device



Figura 34: sensori di PAR Decagon device

4 RISULTATI

4.1 CLIMA

I valori medi delle serie storiche di temperatura dell'aria giornaliera, temperatura del suolo, radiazione globale media, ed altre variabili sono indicati nella tabella 15. L'andamento stagionale si ripete più o meno ogni anno, ma con alcune variabilità interannuale. La temperatura media annua non ha mostrato un trend, la minima assoluta è stata -22.8°C nel 1996 mentre la massima assoluta è stata 31.97°C nel 2003, in generale febbraio è risultato essere il mese più freddo, mentre agosto quello più caldo.

Temp. media annua $^{\circ}\text{C}$	Media Temp. Min. $^{\circ}\text{C}$	Media Temp. Max $^{\circ}\text{C}$	Precipitazioni mm	Radiazione globale media $\text{kJ/m}^2\cdot\text{day}$	Temperatura media del suolo a $-5\text{ cm }^{\circ}\text{C}$	Temperatura media del suolo a $-20\text{ cm }^{\circ}\text{C}$	Profondità del suolo cm	Densità di piante ad ettaro al 2012
6.9	3.3	10.8	1116	13785.28	5.4	5.9	40 - 100	740

Tabella 15: variabili medie dal 1996 al 2015

4.2 CONVENZIONI UTILIZZATE

Prima di procedere all'analisi dei risultati ottenuti, si riportano alcune convenzioni utilizzate nella descrizione dei risultati stessi.

La tecnica della correlazione turbolenta è una tecnica così detta micrometeorologica, legata cioè a quello che avviene in atmosfera ed agli scambi tra essa e gli altri comparti. Per questo motivo, quando si riportano le misure dei flussi di anidride carbonica tra ecosistemi vegetali e atmosfera, si adotta la convenzione che i flussi originati dall'atmosfera e diretti verso l'ecosistema hanno segno negativo, mentre quelli che hanno direzione inversa (ecosistema $\rightarrow$ atmosfera) hanno segno positivo. Quindi, nel caso della foresta studiata, i flussi negativi indicheranno assorbimento di carbonio (fotosintesi), mentre la respirazione notturna e invernale avrà segno positivo. Viene qui premesso che, ai fini di una migliore rappresentazione grafica e di una migliore comprensione, specie per alcune relazioni funzionali tra parametri ambientali e biologici ed i flussi, tale convenzione potrà essere invertita. In ogni caso, quando questo si verificherà, sarà opportunamente segnalato.

I dati verranno presentati come flussi "istantanei", espressi in $\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, qualora si discutano andamenti giornalieri, alcuni andamenti periodici, flussi massimi, relazioni con alcuni parametri

ambientali, mentre saranno espressi in gC m⁻² quando si presenteranno flussi totali giornalieri per alcuni periodi e bilanci annuali. Qualora nei grafici venga riportata l'ora sarà sempre quella solare italiana, mentre i grafici periodici saranno sempre riferiti alla data effettiva di misura o al giorno giuliano, in cui i giorni sono contati a partire dal 1 gennaio (giorno 1) al 31 dicembre (giorno 365 o 366).

Per i dati presentati si utilizzeranno le seguenti abbreviazioni:

F_c per i valori direttamente rilevati dal sistema di misura, corretti con le funzioni di trasferimento spettrali in accordo con (Moore, C. J. 1986) e calcolati tramite l'equazione 13;

$$F_c = \overline{w'\rho'_c} + Corr \quad [Equazione 13]$$

NEE (*Net Ecosystem Exchange*) per lo scambio netto di ecosistema, data dalla somma di F_c e F_{stor} (equazioni 11 e 12) ed espressa in [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$];

$$F_c = \overline{w'\rho'_c} + \int_0^{Z_r} \frac{\partial c(z)}{\partial t} \cdot dz \quad [Equazione 14]$$

$$F_{storage} = \frac{\Delta c(h) \cdot Z_r}{\Delta t} \quad [Equazione 15]$$

di notte e al di fuori del periodo vegetativo, lo scambio netto (NEE) risulta positivo, ed è una misura della respirazione dell'ecosistema (R_E).

Per quanto riguarda la terminologia statistica utilizzata possiamo riassumere che:

- per modello andremo ad indicare un'equazione che lega 2 o più variabili, come per esempio il modello ($y = a + bx_1 + cx_2$) questa equazione possiede 3 variabili (y, x_1, x_2) e 3 parametri (a, b, c). Le variabili a destra dell'uguaglianza, sono dette predittori perché aiutano a predire la variabile di interesse.
- Quando verrà indicato il fit di un modello significherà che vorremmo trovare i migliori valori dei parametri (a, b, c) e ad ogni parametro sarà associato un *p-value*. $p < 0.05$ ci dice che il dato parametro è significativamente diverso da zero (se, ad esempio, fosse $c = 0$, non ci sarebbe dipendenza dalla variabile x_2 che quindi dovrebbe essere esclusa dal modello).
- La bontà del fit viene quantificata da 3 indici:

1. R^2 varia tra 0 e 1, alti valori indicano un buon fit, è usato soprattutto per modelli lineari. Spesso aumentando il numero di predittori, R^2 aumenta anche se i predittori aggiunti non sono significativi, quindi si corre il rischio di pensare che un fit sia buono anche se non lo è.
2. R^2_{adj} è simile al precedente ma all'aumentare del numero di predittori, R^2_{adj} aumenta solo se i nuovi predittori contribuiscono davvero al fit.
3. AIC (*Akaike Information Criterion*) è usato soprattutto per confrontare modelli non lineari (ad es., le curve di luce). Il modello con il più basso AIC è quello con il miglior fit.

Le misure per questo lavoro di tesi sono state effettuate continuativamente da aprile del 2012 ad oggi, gli altri dati che vanno dal gennaio del 2000 a marzo 2012 sono il risultato di precedenti lavori, attualmente le misure sono ancora in corso e si prevede di portarle avanti per il prossimo futuro. In questa tesi vengono presentati i risultati ottenuti nel periodo che va dal 01 gennaio 2000 al 31 dicembre 2015 I dati sono stati elaborati con R Studio, il software libero e *open source* che consente tramite uno specifico linguaggio di programmazione di ottenere calcoli statistici e grafici.

4.3 PRESENTAZIONE DELLE PRINCIPALI VARIABILI

Di seguito verranno presentate le principali variabili meteorologiche e micro-meteorologiche prese in esame per caratterizzare l'ecosistema in esame e cercare di comprendere le relazioni funzionali che ne determinano le risposte funzionali. I dati utilizzati per fare la maggior parte delle analisi sono solamente dati misurati non *gap filled*, questo, pur determinando la presenza di numerosi *gap* sia al livello grafico che di analisi, consentirà però di fare valutazioni solamente su ciò che è stato realmente misurato dalla strumentazione scientifica installata nel sito. Le lacune nei dati sono dovute principalmente a problemi di tipo strumentale, elettrico e strutturale che in questi 15 anni si sono verificati in questo sito, localizzato in alta quota e non dotato di corrente elettrica di rete.

4.3.1 CONCENTRAZIONE DI ANIDRIDE CARBONICA (CO_2) IN ATMOSFERA NEL SITO DI SELVA PIANA

L'analisi dei 15 anni di dati di concentrazione di CO_2 in atmosfera ha permesso di constatare in modo inequivocabile quanto già descritto precedentemente nel paragrafo 1 ossia un aumento di questo importante gas serra di circa 30 ppm, che si può evidenziare anche per la stazione di monitoraggio (Figura 35)

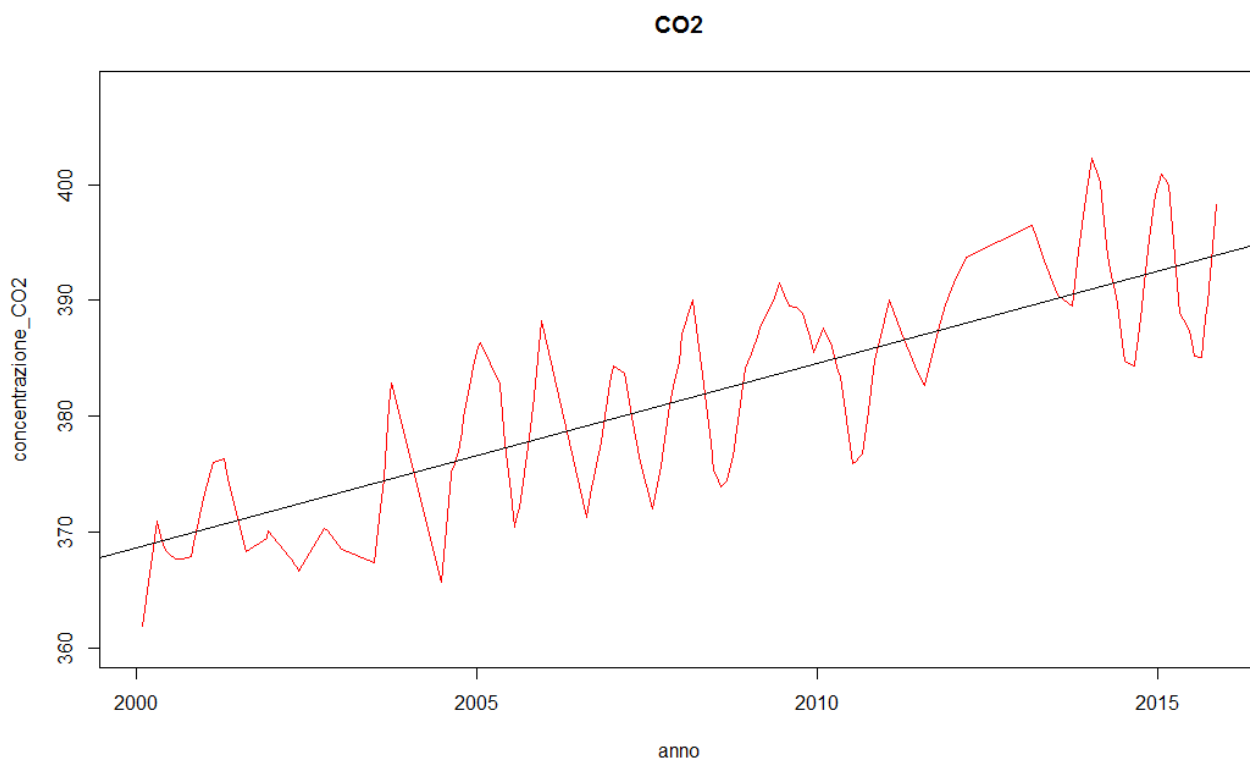


Figura 35: Concentrazione di CO_2 in atmosfera(ppm) nella stazione di Selva Piana Collelongo (AQ)

Per arrivare al plot riportato in figura35 sono stati presi dai valori semi-orari misurati, solo il dato delle ore 12:00 del giorno successivo alla calibrazione dell'analizzatore, per essere sicuri di avere un valore di Anidride Carbonica più possibile rappresentativo della realtà atmosferica, in condizioni il più possibile turbolente. Come ci si aspettava, la dinamica inverno (con valori più alti) – estate (con valori più bassi) presente nelle analisi globali soprattutto nell'emisfero boreale, viene rilevata anche nella stazione di misura.

4.3.2 NET ECOSYSTEM EXCHANGE (NEE)

La prima componente è la NEE descritta dettagliatamente nel paragrafo 1.2.1 e calcolata come descritto precedentemente, in figura 36 sono stati riportati i valori medi giornalieri di flusso di CO₂ espressi in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ suddivisi per anno.

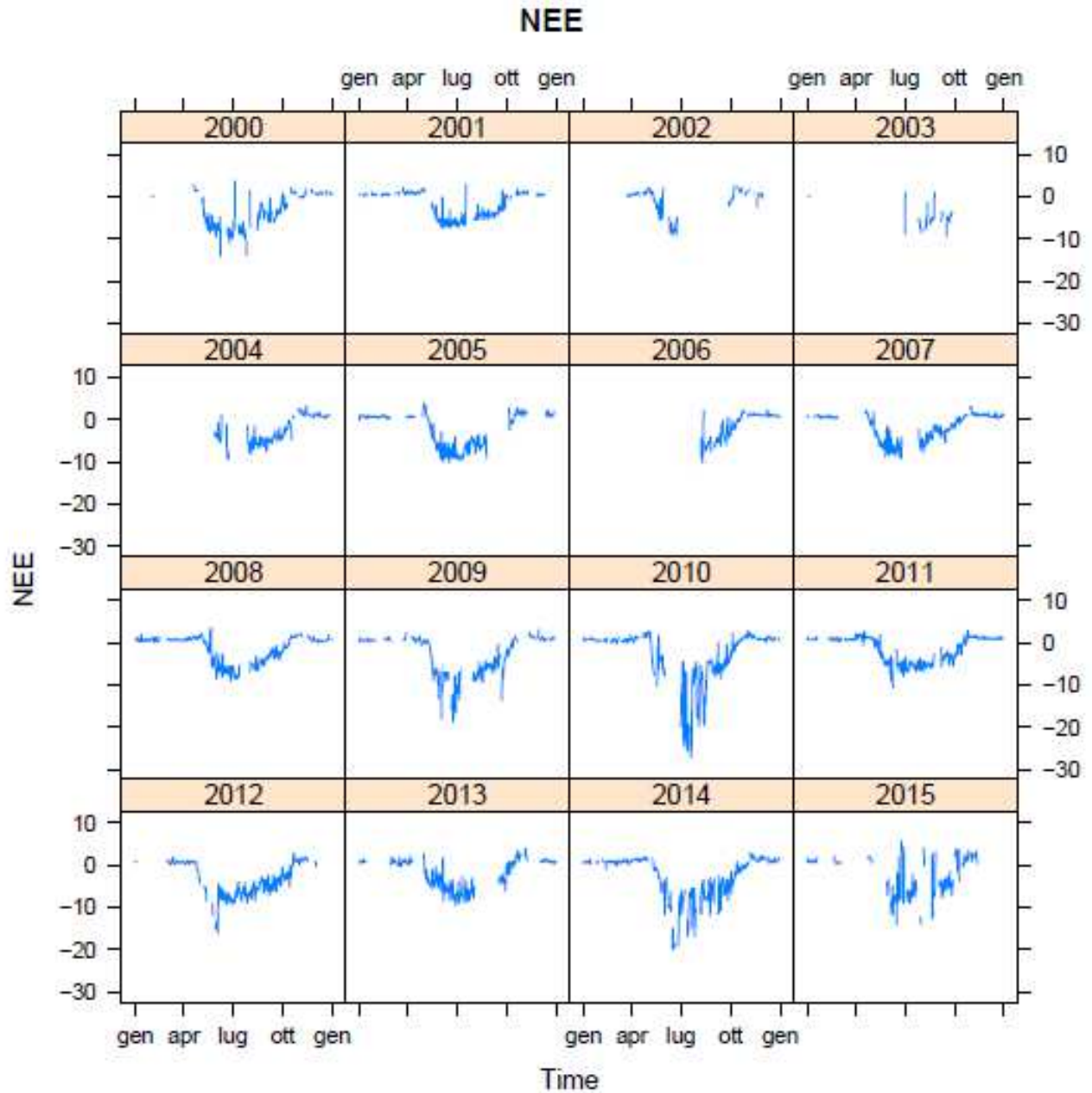


Figura 36: Valori medi giornalieri di NEE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) si tratta solo di valori misurati, no *gap filled*.

Per quanto riguarda questa importante variabile si è cercato di capire, a partire dalla disponibilità di dati, se ci fosse un trend che potesse far capire come lo scambio netto di carbonio di questo ecosistema si sia evoluto. Per far questo, è stata ottenuta la componente stagionale, mediando i flussi giornalieri di tutti gli anni, che è stata poi rimossa dai dati originali ed è stato effettuato uno *smoothing* dei residui per evidenziare il trend (Cleveland *et al*, 1990). I risultati sono riportati in figura 37. Come si può vedere dal riquadro 3, l'analisi non ha evidenziato un trend, mentre risulta presente una dinamica interannuale. In una analisi di medio termine per una faggeta danese in condizioni climatiche oceaniche, è stato invece evidenziato un trend in aumento di NEE (Pilegaard *et al.*, 2011).

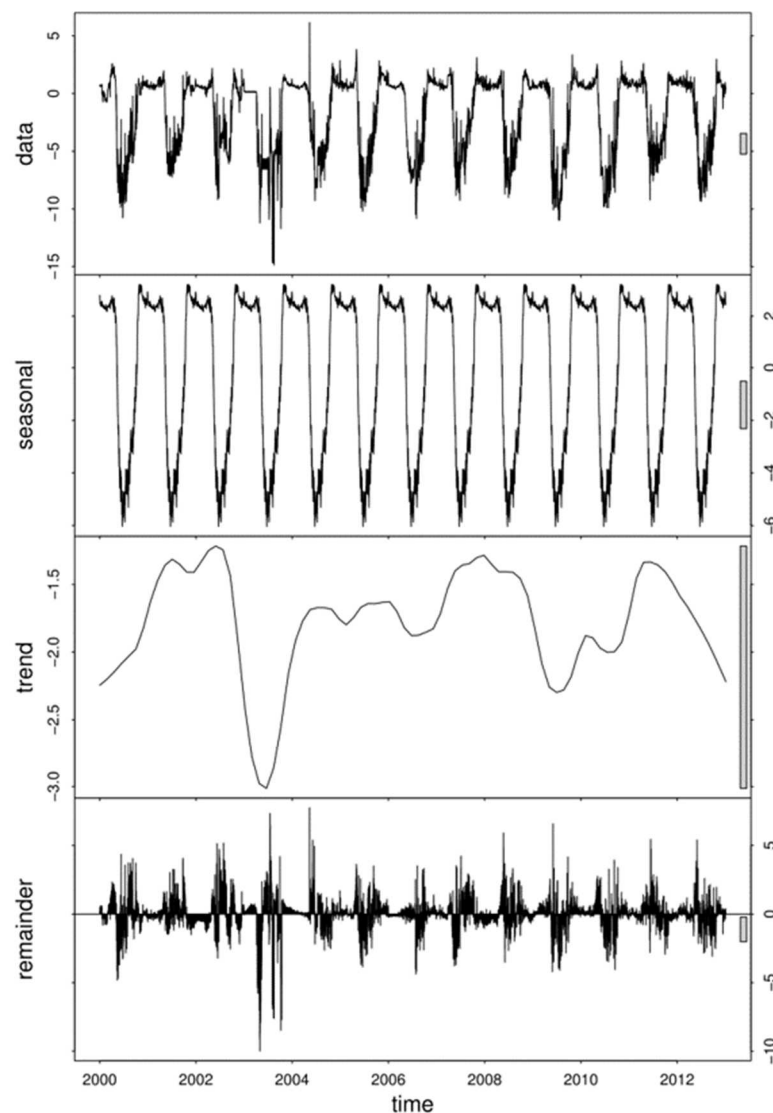


Figura 37: Decomposizione stagionale dei flussi di carbonio ($\text{gCm}^{-2} \text{d}^{-1}$). Dai dati originali *gap filled* è stata estratta la componente stagionale, poi attraverso uno *smoothing* è stato trovato il trend e in fine i residui.

4.3.3 TEMPERATURA DELL'ARIA (T_a)

Questa grandezza fisica che caratterizza l'atmosfera misurata in gradi Celsius ($^{\circ}\text{C}$) è caratterizzata da un andamento su scala giornaliera, mensile, annuale e interannuale per un dato luogo. In figura 38 sono presentati i valori medi giornalieri disponibili per i 16 anni oggetto delle analisi qui presentate.

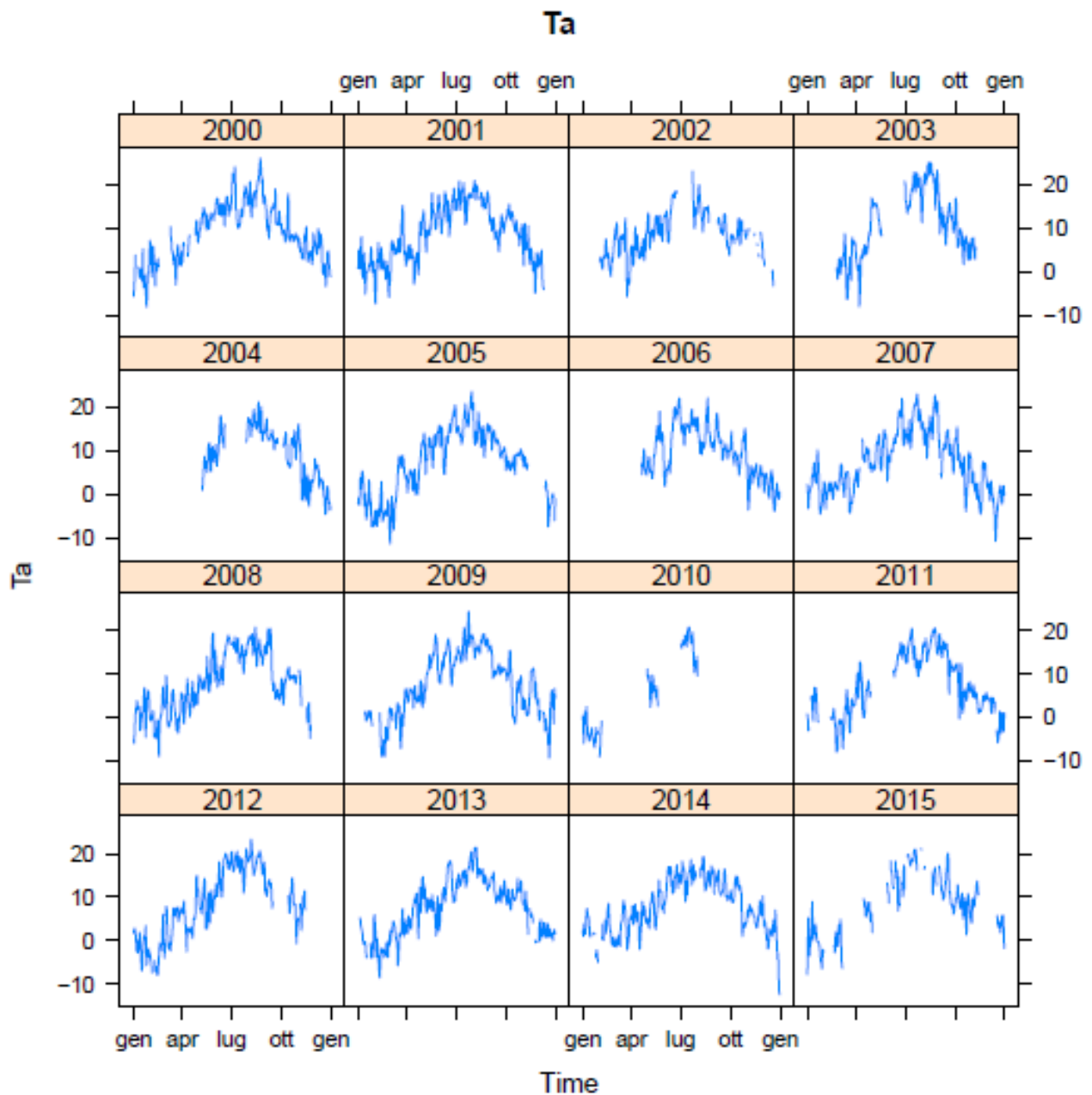


Figura 38: Valori medi giornalieri di Temperatura dell'aria T_a ($^{\circ}\text{C}$) misurati al sito di Collelongo a 25 m di altezza

Anche per questa grandezza è stato scomposto il dato nelle sue tre componenti per cercare di evidenziare il trend come riportato in figura 39 in cui si può notare come la temperatura media annuale mostri un trend negativo fino al 2010, per poi aumentare nuovamente dal 2010 ad oggi, lo stesso trend si evidenzia nelle medie mensili invernali ma al livello locale non si evidenzia un trend unico di aumento.

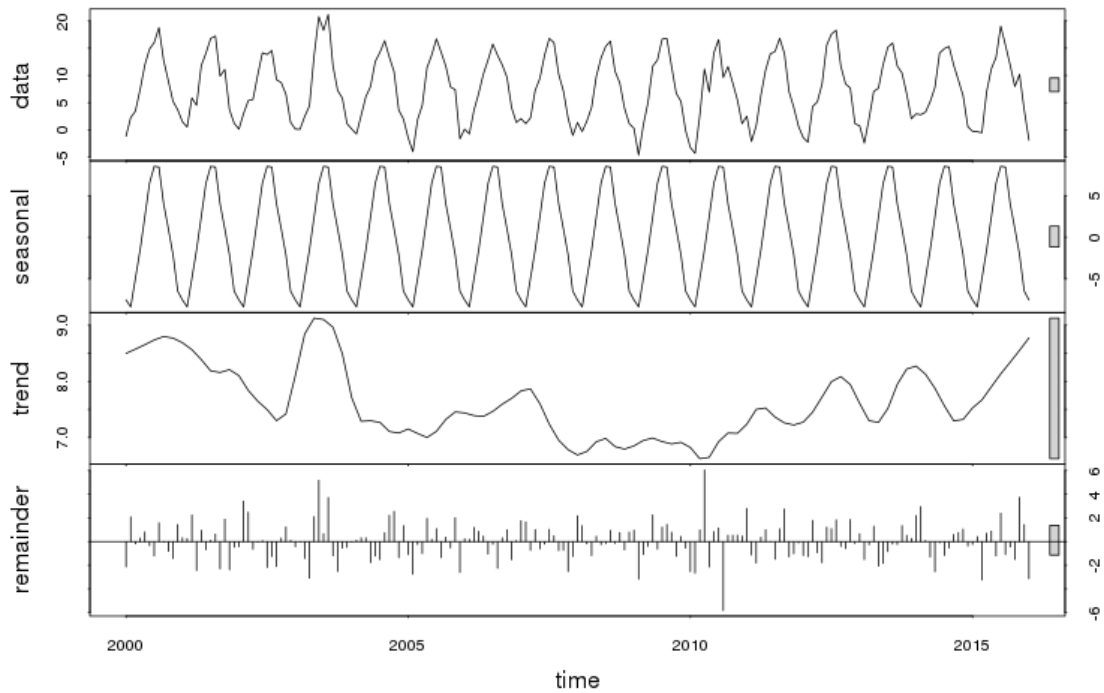


Figura 39: Trend della Temperatura dell'aria (T_a ° C)

4.3.4 RADIAZIONE FOTOSINTETICAMENTE ATTIVA (PPFD)

La radiazione fotosinteticamente attiva (PPFD, *Photosynthetic Photon Flux Density*, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), anche definita come PAR (*Photosynthetically active radiation*) rappresenta la radiazione con composizione spettrale nel range tra i 400 e 700 nm di lunghezza d'onda disponibile per la vegetazione che è pari a circa il 50% della radiazione solare globale. La disponibilità di luce, oltre a determinare particolari adattamenti morfologici, è in stretta correlazione con l'assimilazione fogliare di CO_2 . La figura 40 mostra l'andamento di questa grandezza negli anni.

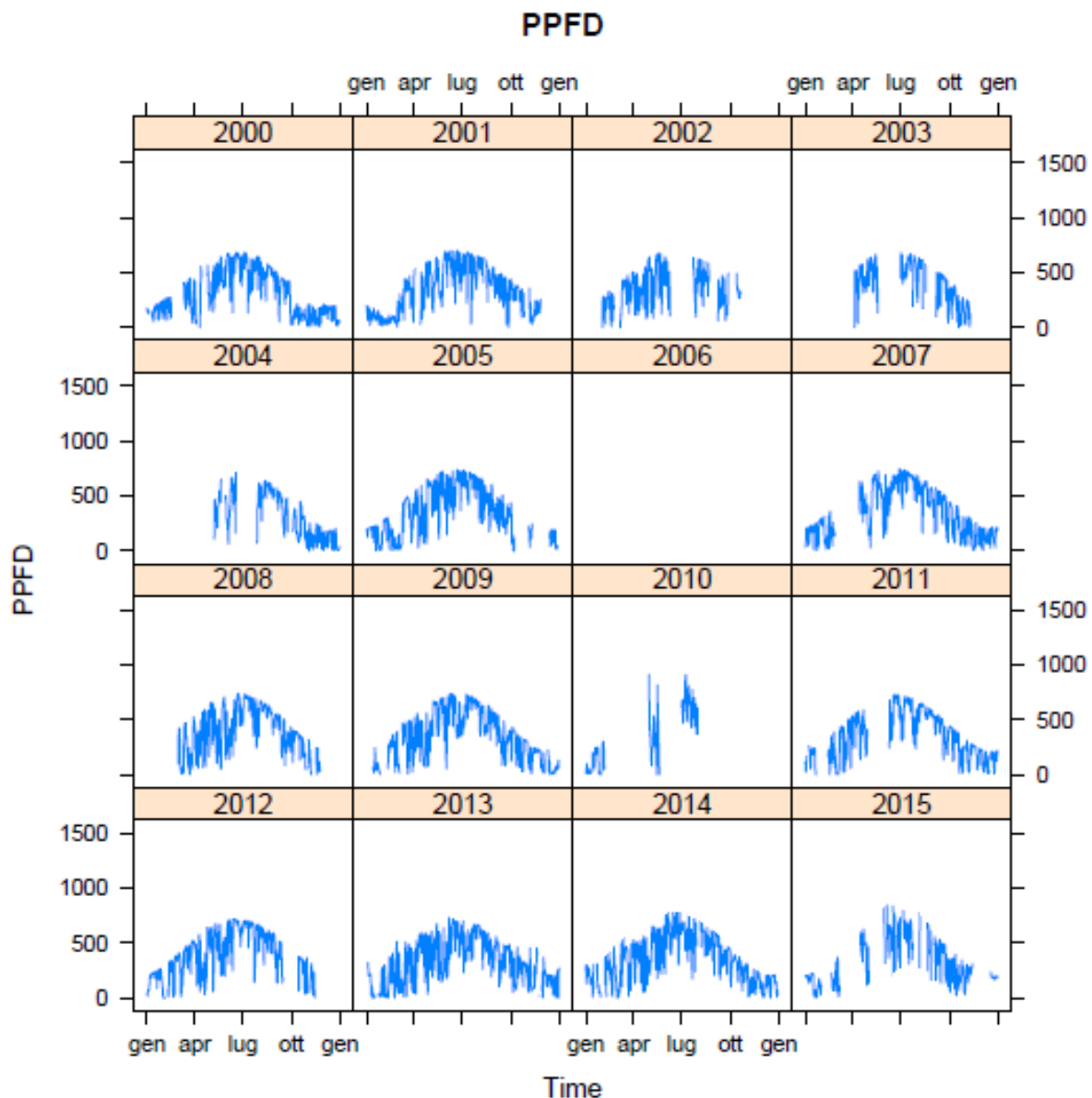


Figura 40: Valori medi giornalieri di PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) misurati al di sopra della torre del sito di Collelongo

4.3.5 DEFICIT DI PRESSIONE DI VAPORE (VPD)

Il vapore acqueo contribuisce alla pressione atmosferica con una pressione parziale che raggiunge, per ciascuna temperatura, un valore massimo detta pressione o tensione di saturazione (e_a). Conoscendo l'umidità relativa dell'aria (RH %), con una semplice proporzione si può risalire alla pressione di vapore effettiva (e_d) ($e_d : RH = e_a : 100$), ($e_a - e_d$) prende il nome di deficit di pressione di vapore (VPD) ed è espresso in (kPa). Incrementi di questo deficit determinano incrementi di evapotraspirazione. Il deficit di pressione di vapore (VPD) indica quindi di quanto si discosta il contenuto idrico dell'atmosfera dal valore di saturazione in un determinato momento. Maggiore sarà il VPD maggiore sarà la richiesta evaporativa cui sono sottoposte le foglie, le quali, in condizioni normali, sono sature di acqua. L'aumentare del VPD può determinare effetti sullo scambio di carbonio *stimolando* le foglie a chiudere gli stomi per limitare la traspirazione (Figura 41).

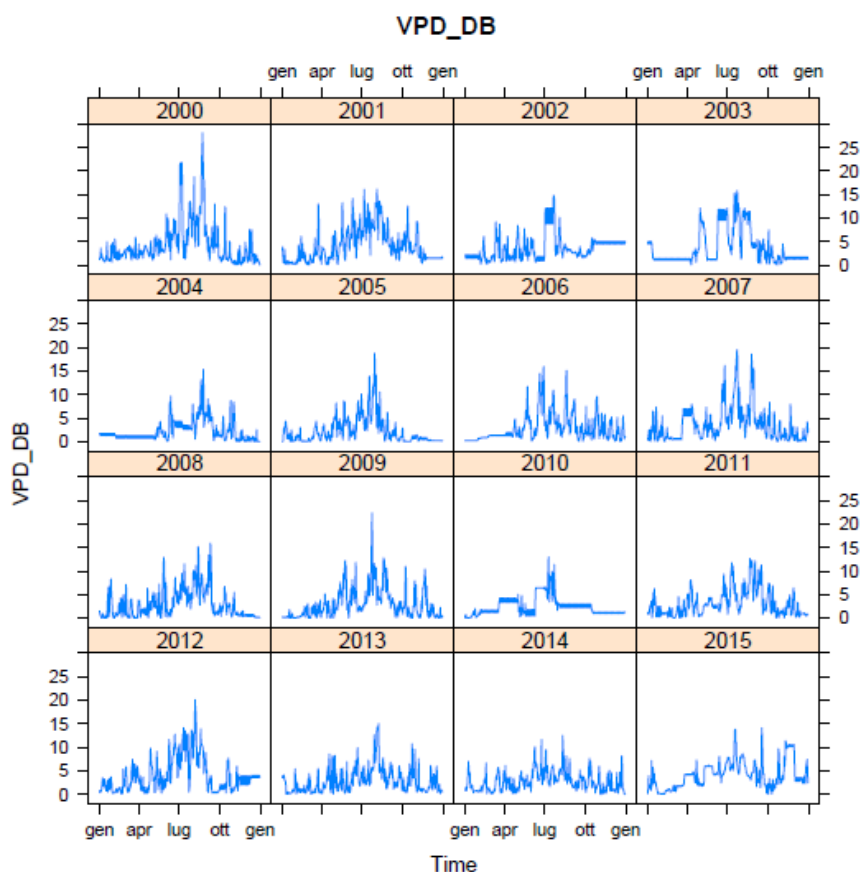


Figura 41: Valori medi giornalieri di VPD (kPa)

Per il calcolo del VPD si veda il paragrafo 3.4.4

4.4 STAGIONE VEGETATIVA

Per una definizione più oggettiva della stagione vegetativa abbiamo fatto riferimento all'indice di vegetazione EVI (*Enhanced Vegetation Index*) derivato su dati satellitari (bisettimanali MODIS) e basato sulle bande multispettrali sensibili al contenuto di clorofilla e cellulosa di cui abbiamo i valori dal 2000 al 2014 mentre per il 2015 i valori sono stati stimati come media degli anni precedenti. Questo indice ha un andamento di tipo onda quadra e il periodo vegetativo massimo (PVM) viene identificato come quello in cui il valore di EVI è massimo (chiome completamente aperte). Per identificare in maniera automatica il periodo vegetativo massimo si vanno a cercare i punti di massima curvatura dell'EVI, i cui andamenti annuali complessivi e un andamento di un singolo anno sono riportati nelle Figure 42 e 43.

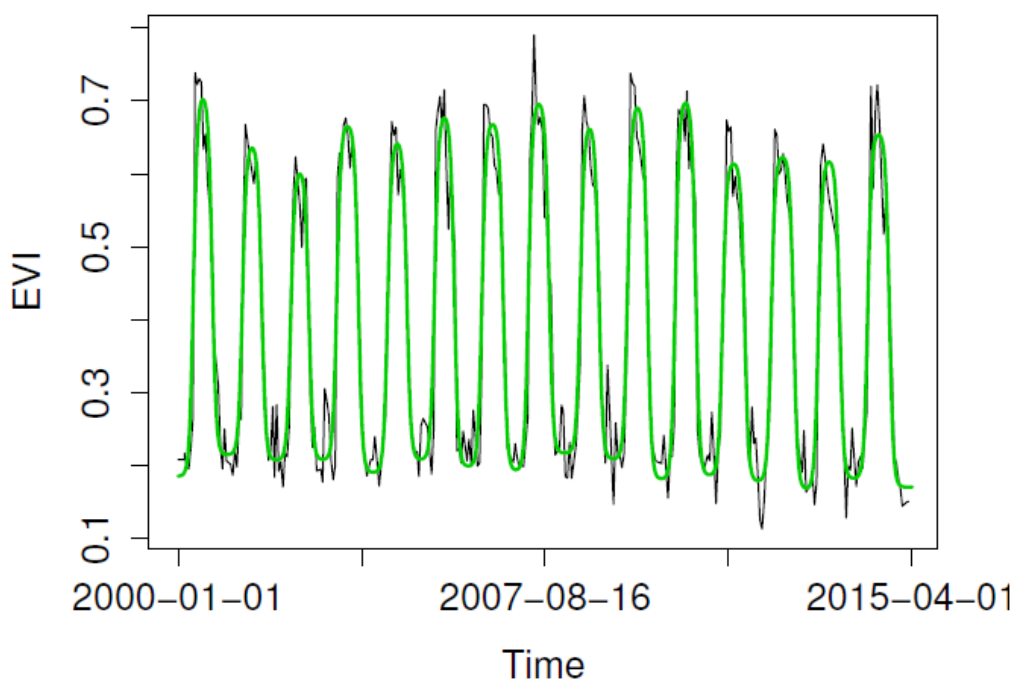


Figura 42: Misure di EVI per Collelongo dal 2000 al 2014. La linea verde è un fit che permette di trovare i punti caratteristici. In particolare in questo lavoro viene usata per trovare inizio e fine del periodo di massima vegetazione.

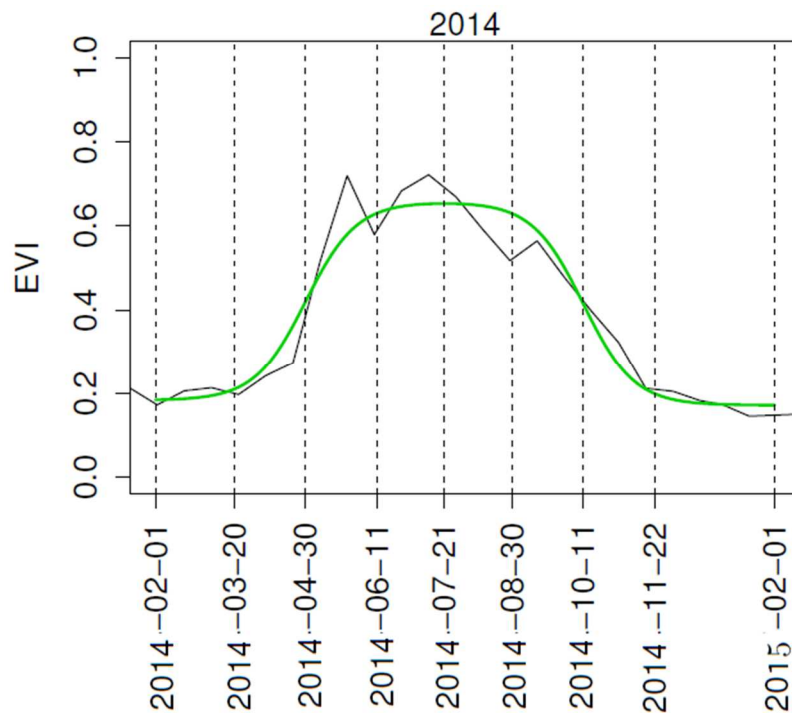


Figura 43: Dettaglio dell'EVI per il 2014. Il periodo di massima vegetazione inizia l'11 giugno e finisce il 30 agosto. I punti vengono trovati in base alla massima curvatura della linea verde. Per il 2015 non abbiamo misure di EVI quindi queste date vengono stimate come media degli anni precedenti.

4.4.1 TREND DEL PERIODO VEGETATIVO IN BASE ALL'INDICE EVI

In questo sotto paragrafo cercheremo di mostrare come si sia modificata la lunghezza del periodo vegetativo per gli anni che vanno dal 2000 al 2014. Dobbiamo quindi valutare un modo per definire l'inizio e la fine della stagione vegetativa, nel paragrafo abbiamo descritto un metodo per identificare inizio e fine del plateau. La durata del plateau può comunque essere relativamente breve e qui per misurare il periodo vegetativo consideriamo il periodo tra i due punti di flesso cioè le due massime pendenze della curva che approssima l'andamento dell'EVI, sia in salita e in discesa come mostrato per l'anno 2014 nella Figura 43a.

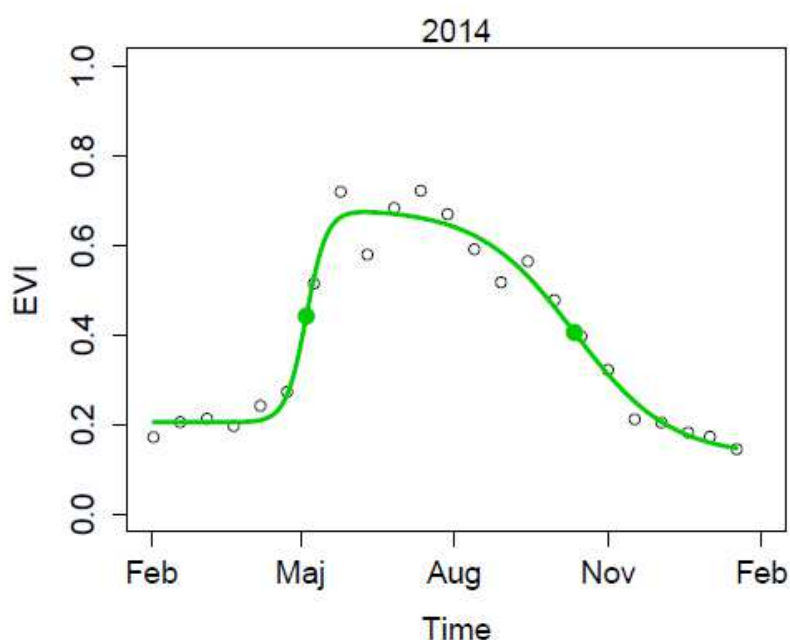


Figura 43a: andamento dell'EVI per l'anno 2014. Dall'andamento della curva si possono notare le massime pendenze della curva in salita (inizio stagione vegetativa, intorno a maggio) e in discesa (fine stagione vegetativa, tra ottobre e novembre)

Analizzando più in dettaglio l'inizio e la fine della stagione vegetativa abbiamo proceduto nel seguente modo:

1. Per ogni anno abbiamo fatto il fit dei dati di EVI con la curva dell'equazione 16

$$y(t) = a_i + \frac{A_i}{1 + e^{-\frac{t-u_i}{d_i}}} + \frac{B_i}{1 + e^{-\frac{t-v_i}{h_i}}} \quad [\text{equazione 16}]$$

dove **t** è il tempo, **y** è il valore di EVI, il pedice **i** indica l'anno ($i = 2000; \dots; 2014$), il parametro **a_i** indica il valore iniziale della curva ($a_i \approx 0.2$ per tutti i valori di i), i parametri **A_i** e **B_i** indicano l'estensione della salita e della discesa della curva, i parametri **u_i** e **v_i** indicano i punti di flesso della salita e della discesa cioè i due punti verdi nella Figura 43, infine i parametri **d_i** e **h_i** sono proporzionali alla durata della salita e della discesa.

2. per ogni anno iesimo abbiamo definito la lunghezza della stagione come

$$\text{Season length} = v_i - u_i$$

Abbiamo poi cercato di visualizzare graficamente l'andamento della variazione della stagione vegetativa per tutti gli anni di osservazione di questo lavoro escludendo il 2015 anno in cui come detto precedentemente non possediamo ancora i valori di EVI, questo andamento e la relativa regressione lineare sono riportati in figura 43b

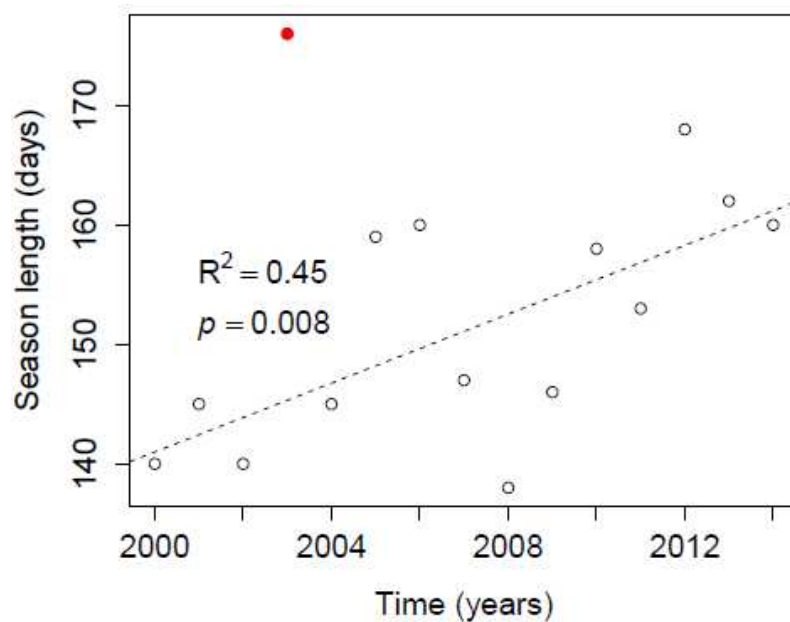


Figura 43b: Trend temporale della durata della stagione vegetativa.

La figura 43b mostra l'andamento della durata della stagione. Si nota subito un 2003 assolutamente fuori contesto che viene escluso dalla regressione lineare in quanto si può sicuramente definire un *outlier*. La regressione è significativa anche se accompagnata da una discreta variabilità. Dunque la durata della stagione è significativamente in aumento tra il 2000 e il 2014 con un $R^2 = 0.45$ e un $p = 0.008$. L'aumento è di circa 20 giorni tra il 2000 ed il 2014, con un tasso medio di 1.33 giorni anno⁻¹.

4.4.2 TREND DEL PERIODO VEGETATIVO IN BASE AI FLUSSI E AL CARBON UPTAKE

In questa sezione vogliamo vedere se c'è un trend per la variazione del periodo vegetativo nel tempo attraverso l'analisi dei flussi, iniziamo quindi con il calcolare quanto carbonio è stato scambiato ogni anno e lo chiameremo (*Carbon Uptake*), per fare questo abbiamo sommato tutte le misure dei flussi nel tempo per ogni anno, (NEE è un flusso ed è infatti espresso in quantità di sostanza fratto superficie e tempo cioè $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Il *Carbon Uptake* per l'anno i lo calcoliamo come riportato nell'equazione 17:

$$\text{Carbon uptake} = \int_{a_i}^{b_i} -NEE(t) dt \quad [\text{equazione 17}]$$

(dove a_i e b_i sono inizio e fine dell'anno i).

Nell'Equazione 17 usiamo i valori *gapfilled* provenienti dal database di Fluxnet, c'è da dire che comunque il *gapfilling* non sempre riesce a riempire tutti i buchi. Per ottenere il nostro risultato di calcolo del *Carbon Uptake*, abbiamo quindi proceduto nel seguente modo: per prima cosa abbiamo fatto un fit sui valori misurati di NEE usando un'equazione identica all'equazione 16. Per la precisione il fit lo abbiamo fatto sulle medie giornaliere dei valori semiorari con il vincolo di accettare un valore solo se quel giorno venivano raccolte almeno 30 misure su 48, il risultato dei fit ha soddisfatto le nostre aspettative un esempio per il 2011 è mostrato in Figura 43c.

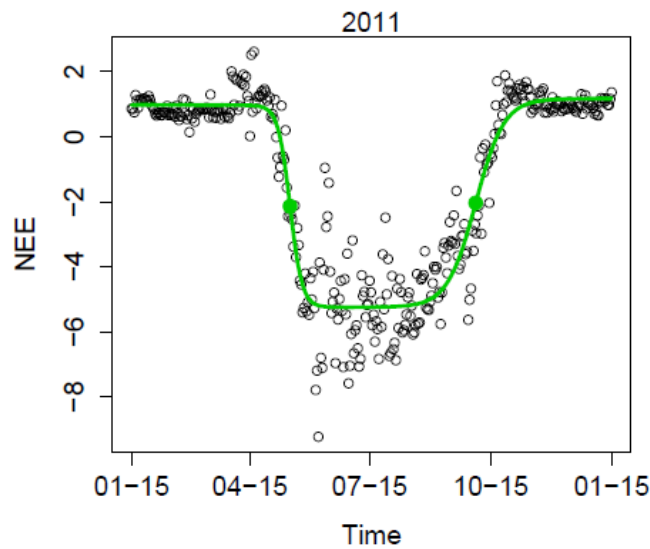


Figura 43c: NEE è espressa in $\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Il fit ci ha restituito una funzione $\text{NEE}(t)$ che ha coperto tutto l'anno ed ha escluso per carenza di dati gli anni 2003, 2004, 2006, 2015. A questo punto come seconda cosa abbiamo trasformato le unità di misura di NEE ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) in $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ moltiplicando per il fattore $(60 \cdot 60 \cdot 24 / 1000000) \cdot 12$. Poi abbiamo calcolato l'integrale dell'equazione 17 dove ai e bi sono espressi in giorni dell'anno (d), ed abbiamo ottenuto così, per ogni anno, i valori di *Carbon Uptake* in gC m^{-2} . Il risultato finale è mostrato in figura 43d.

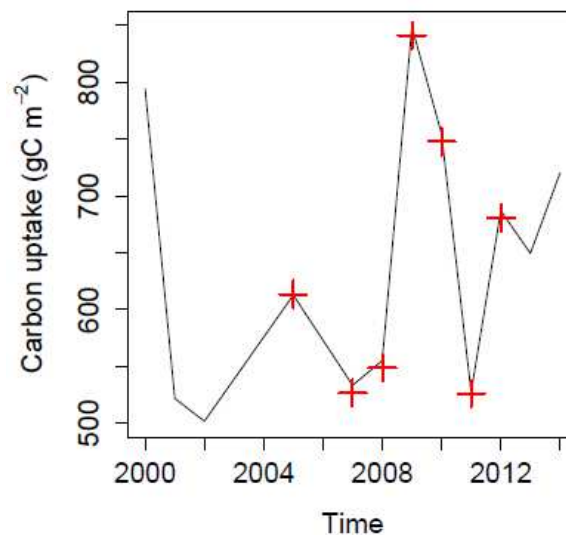


Figura 43d: In evidenza la linea che rappresenta il *Carbon Uptake* calcolato come integrale della curva che fitta i dati. I punti rossi sono i valori del *Carbon Uptake* ottenuti come somma diretta dei flussi considerando solo gli anni in cui ci sono tutte le misure giornaliere.

Contrariamente a quanto visto per la durata della stagione dall'indice EVI non c'è un trend ma è presente piuttosto una ampia variabilità interannuale. Facendo comunque un confronto tra *Carbon Uptake* e *Season length* abbiamo visto che la regressione lineare tra le 2 grandezze è statisticamente significativa ($p = 0.009$, $R^2 = 0.6$) solo se eliminiamo gli anni 2000 e 2009 che hanno un alto *uptake* pur avendo una stagione relativamente corta come mostrato in figura 43e. Non possiamo quindi dire che vediamo una relazione significativa tra *uptake* e durata, almeno su tutto il periodo 2000-2014 considerato, quello che possiamo dire è che, in generale o specificatamente su alcuni anni, ci sono probabilmente anche altri meccanismi all'opera che modificano questa relazione. Ad esempio gli anni 2000 e 2009 potrebbero avere avuto una stagione corta ma particolarmente favorevole nella sua parte centrale. Ulteriori approfondimenti saranno fatti in questa direzione. Per il momento possiamo dire che la durata sta aumentando abbastanza chiaramente negli anni ma non esiste un altrettanto chiaro legame tra durata e *uptake* annuale, aggiungiamo che la durata della stagione può essere valutata sia dal punto di vista dell'EVI e dei valori annuali di NEE che per il periodo tra inizio e fine della stagione vegetativa vera e propria (SLEVI = tempo intercorso tra i 2 punti verdi in figura 43° e SLNEE = tempo intercorso tra i 2 punti verdi in figura 43c). Il comportamento di SLNEE è comunque abbastanza rumoroso. Infatti SLNEE non mostra un trend temporale, non è in relazione con SLEVI e nemmeno con il *Carbon Uptake*, abbiamo osservato che è sempre $SLNEE < SLEVI$ e che evidentemente l'*uptake* è più collegato alla profondità della curva, quindi ai valori di massimo assorbimento, che alla sua ampiezza.

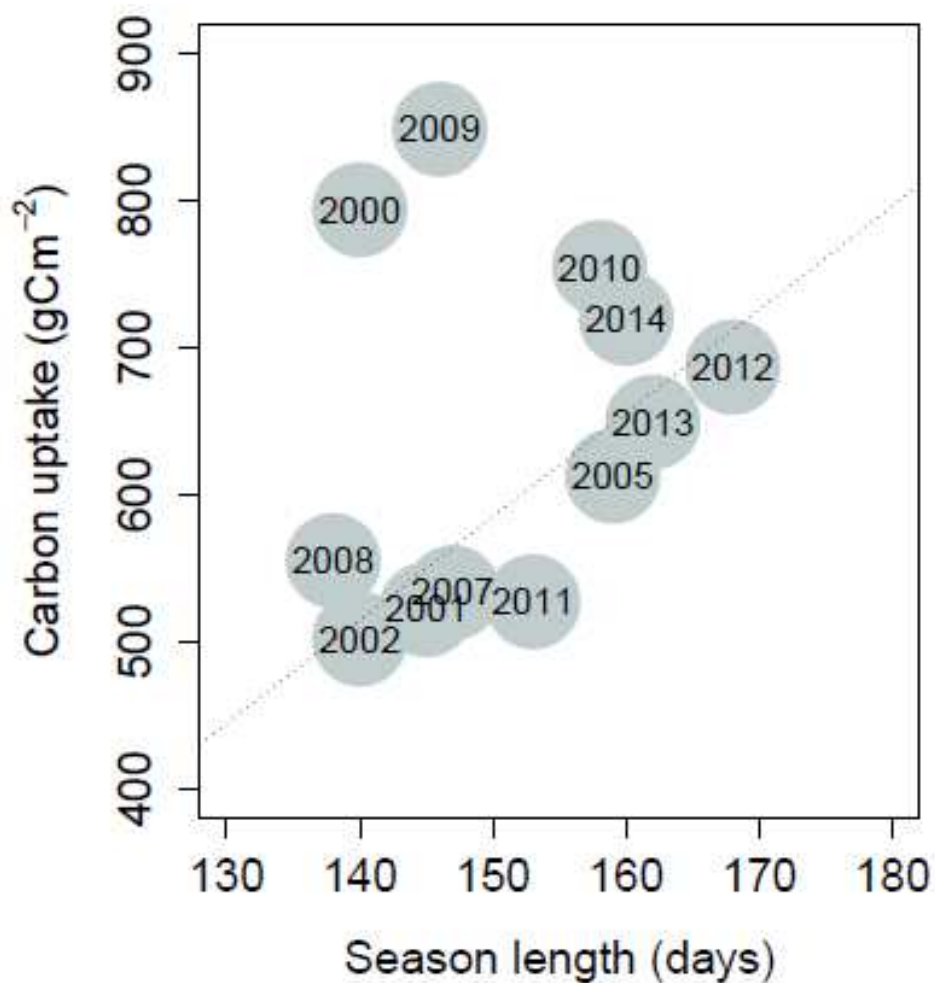


Figura 43e: La retta di regressione è calcolata escludendo i punti relativi agli anni 2000 e 2009.

4.5 RELAZIONI FUNZIONALI TRA PARAMETRI CLIMATICI E TRA PARAMETRI CLIMATICI E NEE

Come altri studi fatti in passato in questo ed in altri siti forestali si è voluto vedere quali fossero i fattori determinanti dei flussi misurati. Luce, temperatura e deficit di pressione di vapore sono state le variabili prese in considerazione per approfondire quale parte di flusso può essere spiegato dalle differenti variabili, rispetto a studi passati riguardanti il sito di Collelongo in questo lavoro sono stati analizzati 15 anni di dati, quindi un periodo di tempo lungo.

4.5.1 RELAZIONE TRA PPFD E T_a

Mettendo in relazione i valori di PPFD e quelli della temperatura dell'aria T_a si può vedere come ci sia un vero e proprio legame tra queste due variabili vediamo che, almeno nel periodo vegetativo se $T_a > 20$, allora $PPFD > 1000$. (Figura 49)

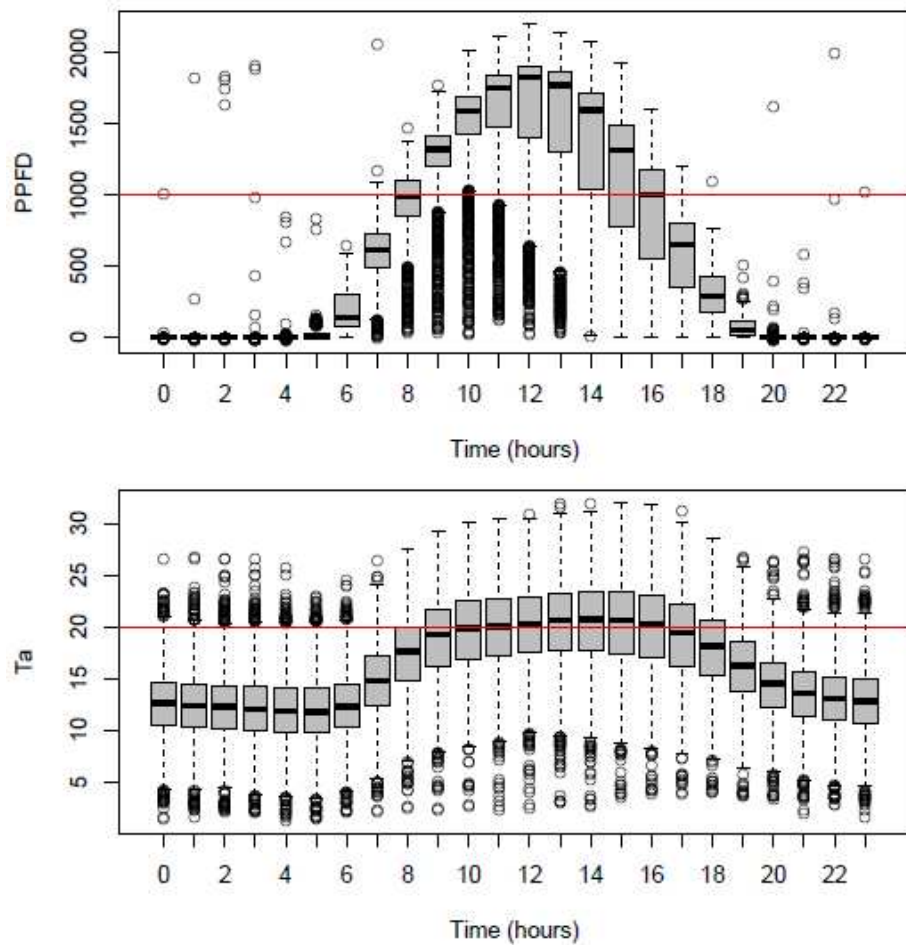


Figura 49: valori di PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e T_a ($^{\circ}\text{C}$) ogni ora per i vari anni e solo nel periodo vegetativo.

4.5.2 RELAZIONE TRA NEE E PPFD

Le curve di luce le valutiamo solo per i dati misurati (*no gap filling*), solo nel periodo vegetativo massimo come definito nel paragrafo 4.2 e solo per il giorno come mostrato in figura 45 dalla quale si può vedere che $PPFD < 1$ indica notte (almeno nel periodo vegetativo). Le curve di luce sono rappresentate, per ogni anno, in figura 46 (da questo punto in poi consideriamo sempre NEE cambiato di segno, questo perché le curve di luce sono spesso rappresentate come curve ascendenti).

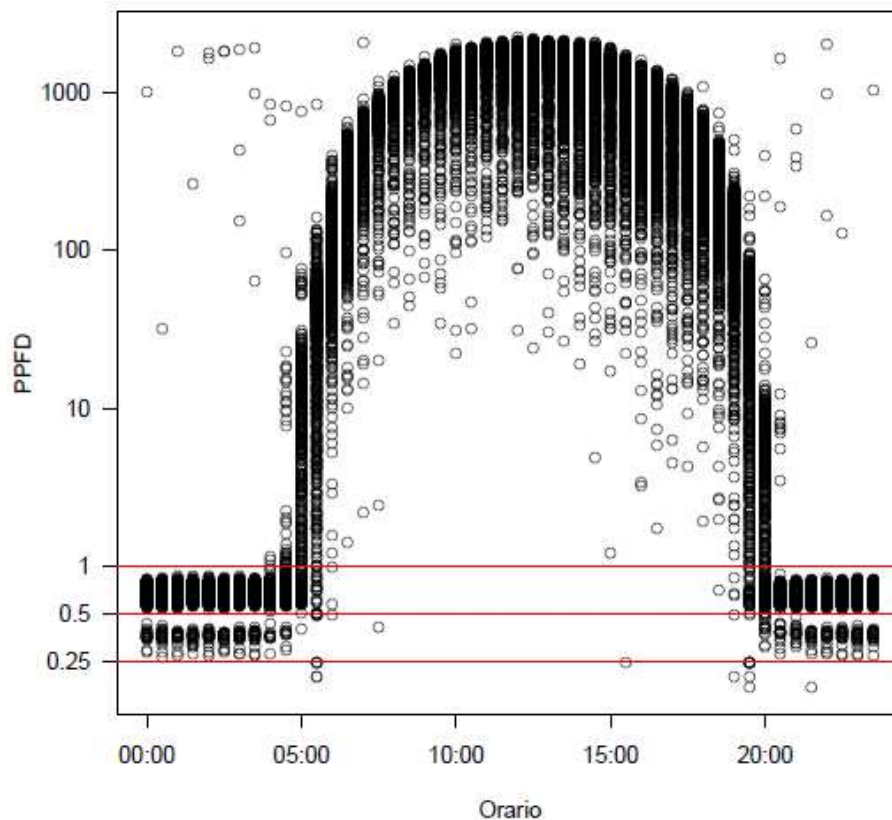


Figura 45: valori di PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) semi-orari dei vari anni solo del periodo vegetativo l'asse delle ordinate è in scala logaritmica.

L'equazione 18 è quella che meglio rappresenta la curva di luce:

$$NEE = \frac{F_{inf} \cdot PPFD}{K_m + PPFD} + F_r \quad [\text{equazione 18}]$$

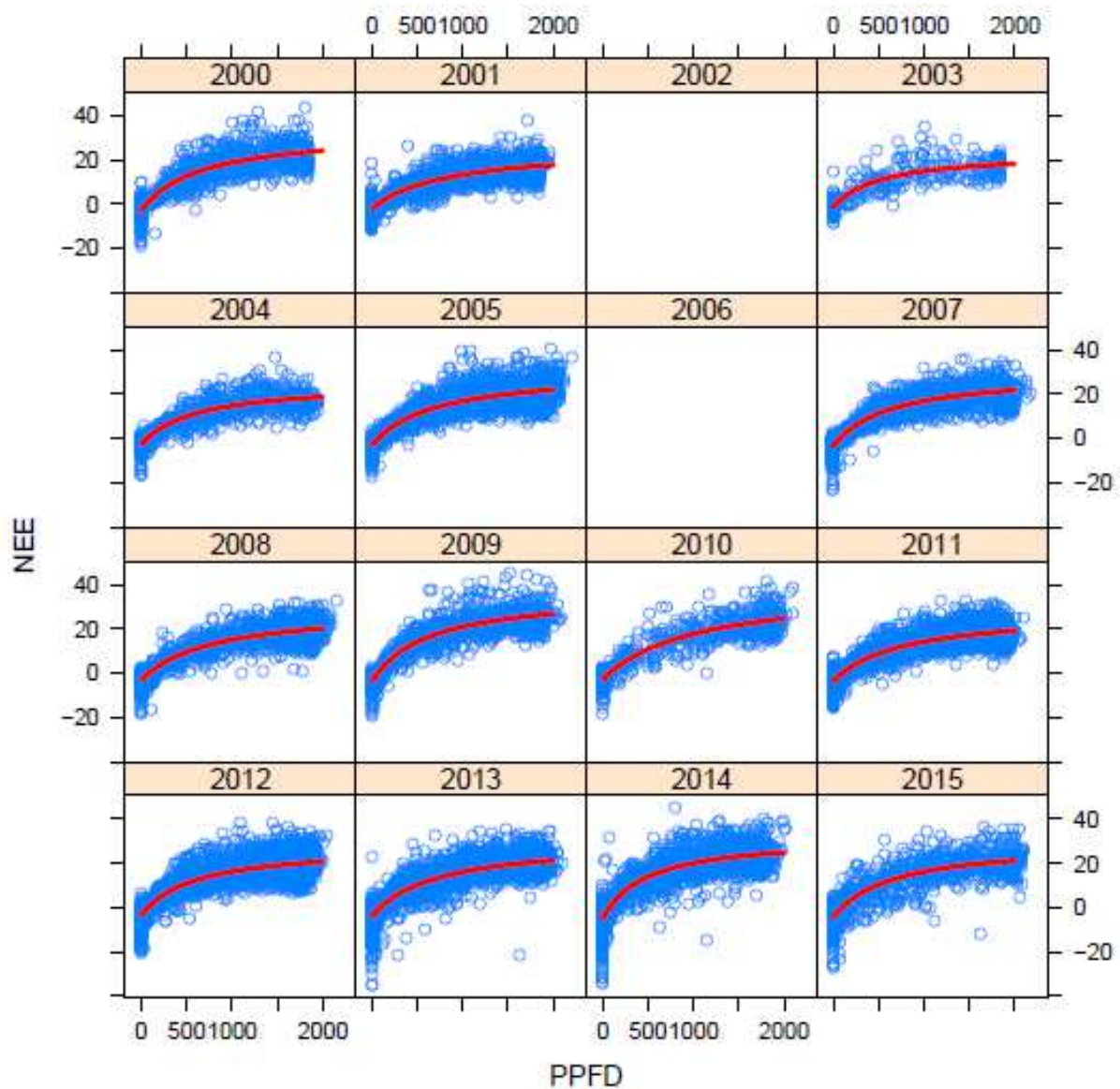


Figura 46: Curve di luce per i vari anni, gli anni 2002 e 2006 non sono riportati per insufficienza di dati. Le relazioni tra PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e NEE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sono calcolate solo nel periodo di massima vegetazione (corrispondente al plateau dell'indice EVI). Ai valori di NEE è stato cambiato segno per motivi di rappresentazione grafica (NEE > 0 indica assorbimento).

L'interpretazione dei parametri dell'eq. 18 è la seguente:

- $F_{\text{inf}} = \text{NEE} (\text{PPFD} = \infty) = F_{\text{inf}} - F_r \approx F_{\text{inf}}$ (flusso massimo) cioè $F_{\text{inf}} \approx \text{NEE}$ per i casi di alta luce. Le unità di F_{inf} sono le stesse di NEE.
- $F_r = \text{NEE} (\text{PPFD} = 0)$ cioè NEE per i casi di zero luce (respirazione). Le unità di F_r sono le stesse di NEE.
- K_m indica la pendenza iniziale ($\text{PPFD} = 0$) della curva. Inoltre K_m indica il valore di PPFD per cui $\text{NEE} \approx F_{\text{inf}}/2$. Le sue unità sono le stesse di PPFD.

I parametri dell'equazione 18, in generale, hanno approssimativamente i valori di: $F_{inf} \approx 30$, $Fr \approx -3$, $Km \approx 650$

e sono tutti altamente significativi.

Analizzando l'andamento dei parametri delle curve di luce nel tempo (Figura 47):

per F_{inf} sembrerebbe esserci una tendenza ad un aumento;

per Km non c'è nessuna variazione;

per Fr c'è una decrescita molto significativa ($p = 0.0002$, $R^2 = 0.69$, $R^2_{adj} = 0.66$) il che significa che la respirazione aumenta negli anni (forse a causa della crescita della foresta quindi più biomassa = più respirazione).

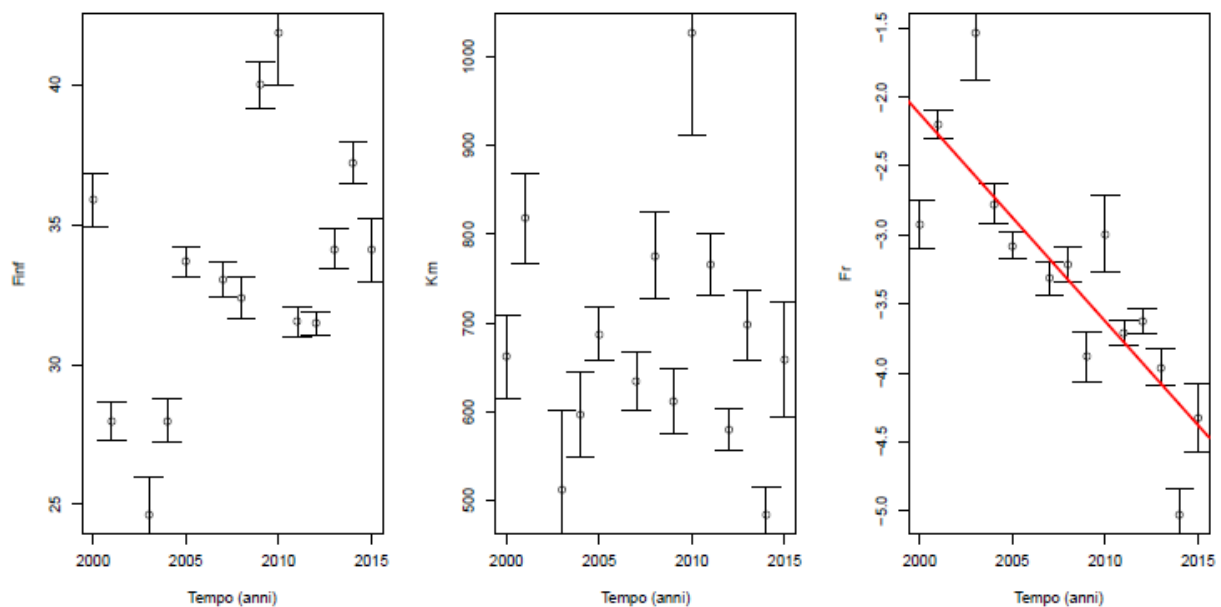


Figura 47: Andamento negli anni dei parametri delle curve di luce (F_{inf} , Km , Fr)

Inoltre esiste un legame significativo tra F_{inf} e Fr (Figura 48) con $p = 0.03$; $R^2 = 0.36$. Cioè un sistema ecofisiologicamente attivo, che di giorno assorbe tanto, di notte respira tanto.

Cerchiamo di spiegare meglio gli andamenti di F_{inf} e Fr , oltre che nel tempo, anche in termini di altri predittori (temperatura, lettiera – che è un *proxy* del LAI -, precipitazioni, VPD). Analizzando più attentamente questi predittori (Figura 49) notiamo che la lettiera mostra un certo aumento nel tempo in accordo con la crescita del bosco (ma questo aumento non è significativo). Per quanto riguarda il parametro Fr , tra tutti i predittori, abbiamo trovato il seguente modello molto significativo (equazione

19) ove T_a è la temperatura dell'aria media nel periodo di massima vegetazione senza distinguere tra notte e giorno:

$$F_r = \alpha + \beta_1 \text{anni} + \beta_2 T_a \quad [\text{equazione 19}]$$

Nel modello descritto dall'equazione 19, anni, è il predittore più importante ($\beta_1 = -0,13$, $p < 0,001$), poi c'è T_a ($\beta_2 = 0,27$, $p = 0,006$). Il fatto di aggiungere la temperatura all'equazione 19 ci fa passare da $R^2_{\text{adj}} = 0.66$ (vedi sopra) a $R^2_{\text{adj}} = 0.82$, quindi si ha un notevole miglioramento.

Notiamo però che $\beta_2 > 0$, quindi al crescere della temperatura F_r cresce e quindi, la respirazione in termini assoluti diminuisce. Questo risultato è in contrasto con la nota relazione positiva tra respirazione e temperatura. Tuttavia, altri risultati descritti nelle sezioni seguenti forniranno un'interpretazione di questo risultato.

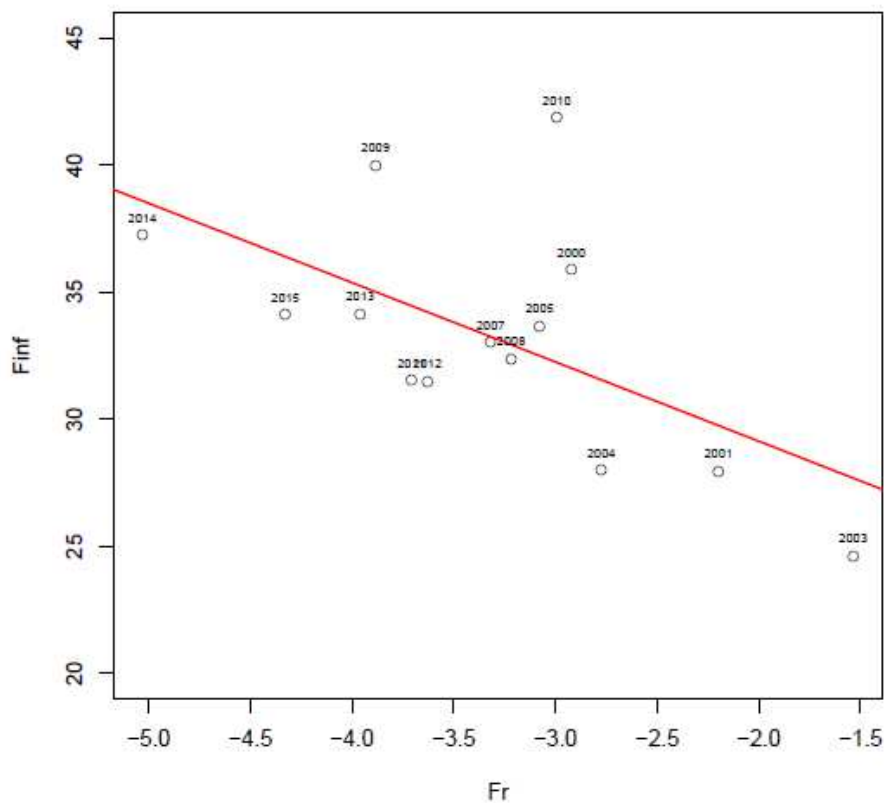


Figura 48: Relazione tra F_{inf} e F_r .

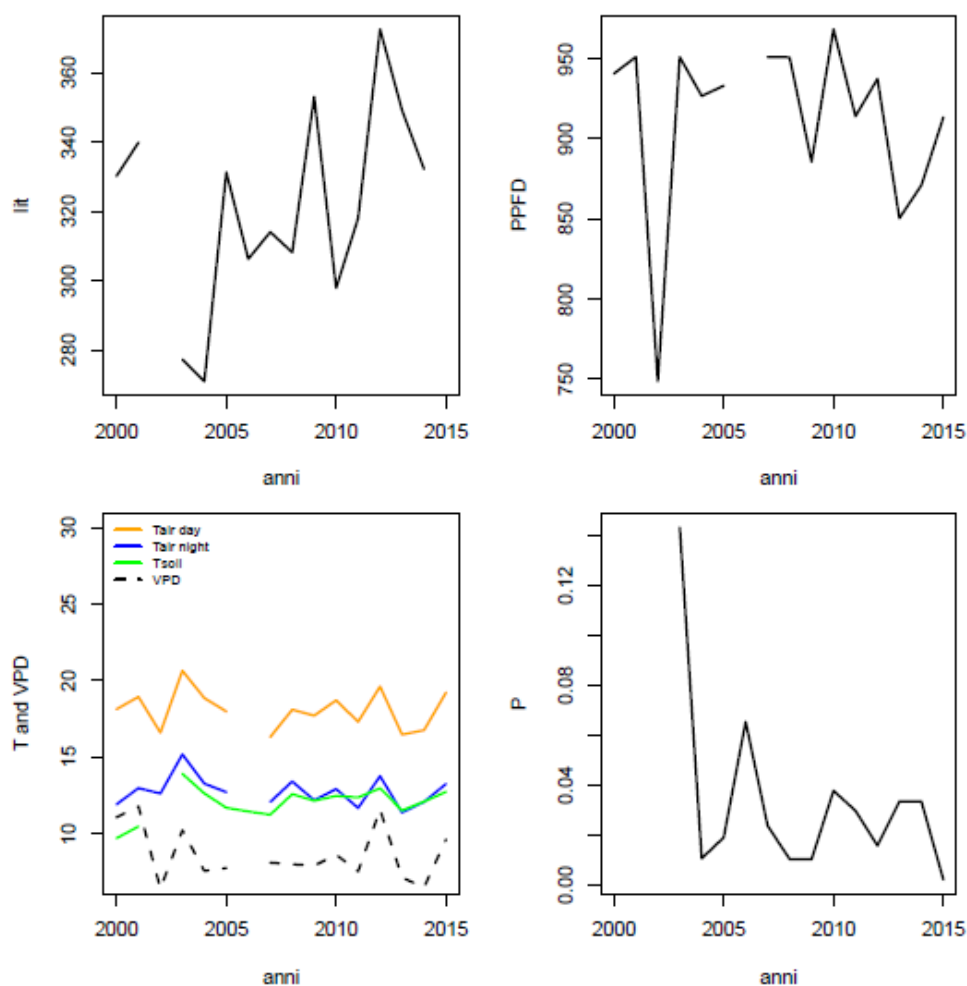


Figura 49: Predittori nel tempo valutati solo nel periodo vegetativo massimo dove lit è la lettira in (g), PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), T ($^{\circ}\text{C}$), VPD (KPa) e P le precipitazioni in (mm)

4.5.3 RELAZIONE TRA NEE NOTTURNA (RESPIRAZIONE) E PARAMETRI CLIMATICA

In questa sezione analizziamo la relazione tra respirazione temperatura e VPD, la respirazione è rappresentata dai soli flussi notturni misurati. Dalla Figura 50 (ripresa da Matteucci 1998) si vede che la respirazione aumenta con la temperatura del suolo (T_s). Guardando più attentamente, si può notare che la curva integra un periodo pluristagionale nel quale la risposta alla temperatura integra anche altre componenti. Nella curva divisa per stagioni si può notare che la dipendenza da T_s nei “sottoperiodi” è chiaramente molto meno evidente rispetto alla curva complessiva.

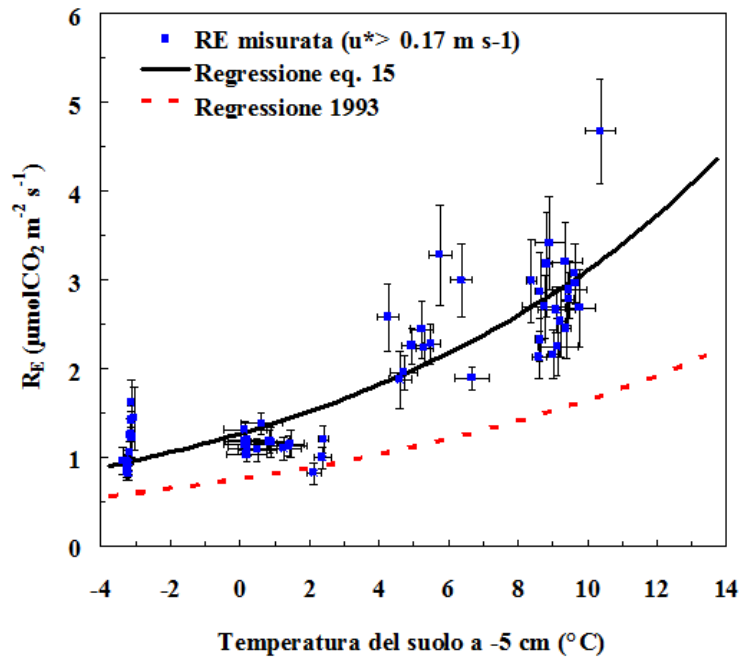


Figura 50: Relazione tra temperatura del suolo a -5 cm e respirazione dell'ecosistema. (Matteucci., 1998)

La funzione utilizzata per mettere in relazione respirazione e temperatura è stata quella classica del Q10 (Larcher, 1983) equazione 20

$$R_E = R_B \cdot Q_{10}^{\frac{T-T_B}{10}} \quad [\text{Equazione 20}]$$

nella quale la respirazione R_E alla temperatura T dipende dalla respirazione R_B misurata alla temperatura T_B secondo un fattore Q_{10} . Per il sito di Collelongo, in cui la temperatura media dell'aria è di circa 7 °C, la regressione è stata effettuata con $T_B=5$.

Nella figura 50 ciascun punto rappresenta la media di 40 misure (80 per i dati invernali) effettuate in diverse stagioni del 1996-97 nella stazione di Collelongo. La linea continua nera rappresenta la regressione calcolata con l'equazione 21,

$$R_E = 1.991 \cdot 2.451^{\left(\frac{T-5}{10}\right)} \quad [\text{Equazione 21}]$$

dove R_B è 1.991 ed è espressa in $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, mentre Q_{10} 2.451 è un parametro adimensionale, mentre quella tratteggiata rossa rappresenta la regressione calcolata sui dati del 1993 in base alla temperatura dell'aria. Sono anche riportati gli errori standard. (Matteucci., 1998).

In Figura 51 sono presentati tutti i dati istantanei di flusso notturno ($\text{PPFD} < 1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) misurati nel periodo 2000-2015 in condizioni di buona turbolenza ($u^* > 0.17 \text{ m s}^{-1}$), u^* rappresenta la velocità di frizione l'applicazione di questa tipologia di filtraggio implica la determinazione della cosiddetta soglia di u^* ($u^* \text{ threshold}$) al di sotto della quale si considera che la bassa turbolenza influenzi le misure di flusso del sistema *Eddy Covariance*. In genere i flussi di CO_2 sono trascurabili quando la u^* tende a zero (Massman & Lee, 2002). In questo modo il filtro di u^* tende a aumentare la stima annuale della respirazione dell'ecosistema e, di conseguenza, a diminuire la stima dell'assorbimento della CO_2 da parte dell'ecosistema (Goulden et al., 1996; Aubinet et al., 2000; Barr et al., 2002; Saleska et al., 2003). Si notano abbastanza chiaramente i due andamenti, invernale (per $T_s < 6 \text{ }^\circ\text{C}$) e del Periodo Vegetativo Massimo (PVM), mentre la forte pendenza nella zona centrale della curva è abbastanza collegata con i periodi di cambio di stagione. La cosa si vede più chiaramente facendo un grafico solo con i dati relativi all'inverno e al PVM (Figura 52). La dipendenza da T_s è significativa sia in inverno che nel PVM, ma si tratta di due curve diverse.

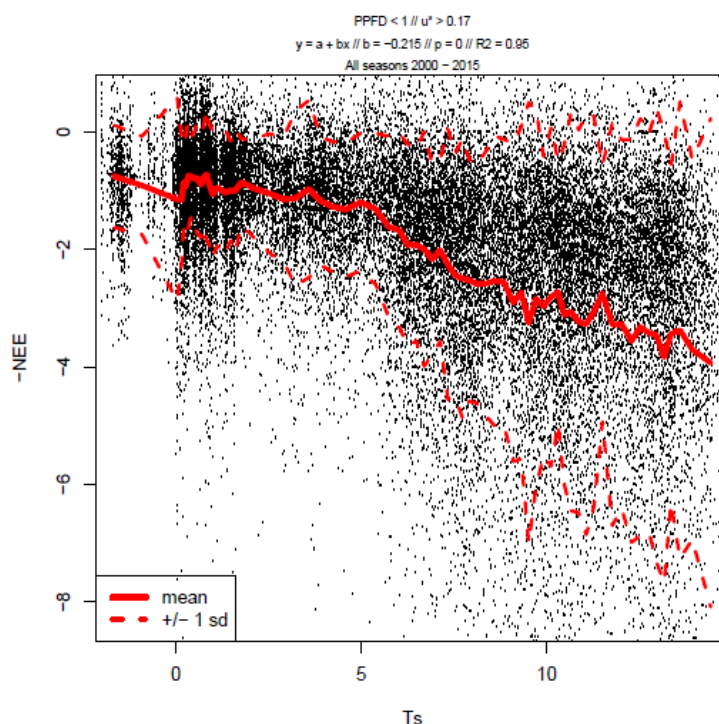


Figura 51: NEE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$) versus T_s ($^\circ\text{C}$) per tutto il periodo (*All leaves*)2000-2015. I puntini neri sono i dati semiorari, la linea rossa unisce punti medi per classi quantili della variabile indipendente (ogni classe contiene circa 500 dati). La regressione lineare in testa alla figura è calcolata sulla linea rossa.

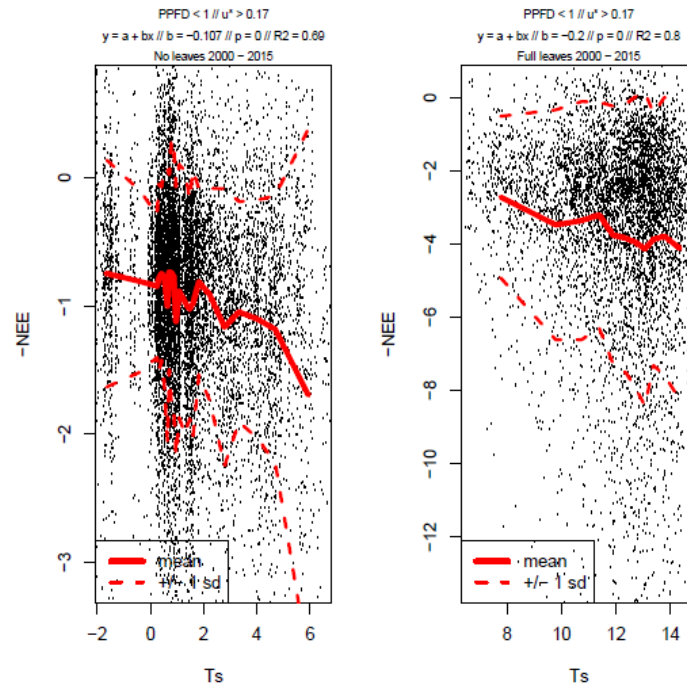


Figura 52: NEE ($\text{umol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) versus T_s ($^{\circ}\text{C}$) per il periodo *No leaves* e *full leaves* 2000-2015 i puntini neri sono i dati semiorari, la linea rossa unisce punti medi per classi quantili della variabile indipendente (ogni classe contiene circa 500 dati). La regressione lineare in testa alla figura è calcolata sulla linea rossa.

Inoltre si capisce che la maggiore respirazione del PVM è legata soprattutto al diverso stato delle piante piuttosto che alla maggiore temperatura del suolo. La temperatura del suolo risulta quindi un fattore significativo nel regolare la respirazione al sito di Collelongo.

Se invece della temperatura del suolo (T_s) consideriamo la temperatura dell'aria (T_a) le cose tendono a cambiare (Figure 53 e 54). Per l'andamento complessivo si può notare che esiste una relazione significativa con la temperatura dell'aria ($R^2 = 0.84$), sebbene nella relazione siano presenti periodi in cui lo stato delle piante è notevolmente diverso. Si può notare che, al di sopra dei $12-13^{\circ}\text{C}$ la relazione tenda a livellarsi, indicando una costanza o anche una diminuzione dei valori di respirazione all'aumentare della temperatura. Rispetto al caso precedente, l'analisi fatta per due periodi separati riporta risultati molto meno significativi nel caso dell'inverno ($R^2 = 0.37$) e un'assenza di relazione nel caso del PVM ($R^2 = 0.09$), ovvero la curva presenta una bi-modalità, con un aumento di respirazione tra 5 e 12°C e una stabilità e diminuzione tra 13 e 20°C . Si può ipotizzare che un aumento di T_a al di sopra di certi valori avvenga in periodi dell'anno in cui la disponibilità idrica del suolo è ridotta e, in qualche modo, limitante da ridurre la respirazione come frequentemente riportato in diversi studi e, per la respirazione del suolo, che costituisce la gran parte della respirazione dell'ecosistema, anche per il sito di Collelongo (Matteucci *et al.*, 2000; Guidolotti *et al.*, 2013). Inoltre, potrebbe essere possibile che, in quelle condizioni, la temperatura e lo stress idrico agiscano nel senso di ridurre la fotosintesi durante il

giorno, inibendo anche la parte di respirazione in qualche modo legata alla “metabolizzazione” della fotosintesi.

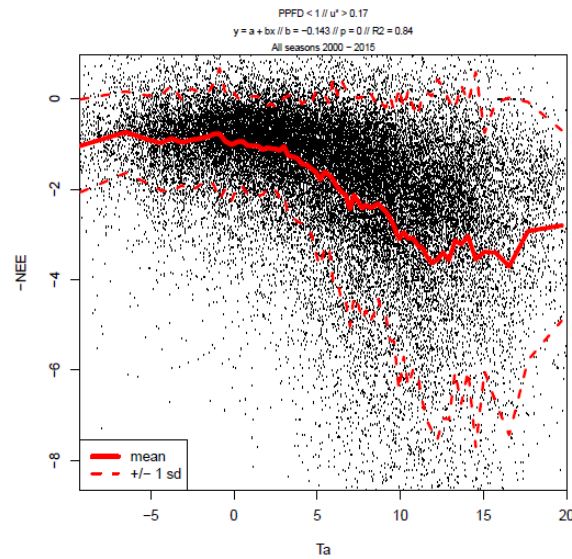


Figura 53: NEE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) versus T_a ($^{\circ}\text{C}$) per il tutto il periodo (*All leaves*) 2000-2015. I puntini neri sono i dati semiorari, la linea rossa unisce punti medi per classi quantili della variabile indipendente (ogni classe contiene circa 500 dati). La regressione lineare in testa alla figura è calcolata sulla linea rossa.

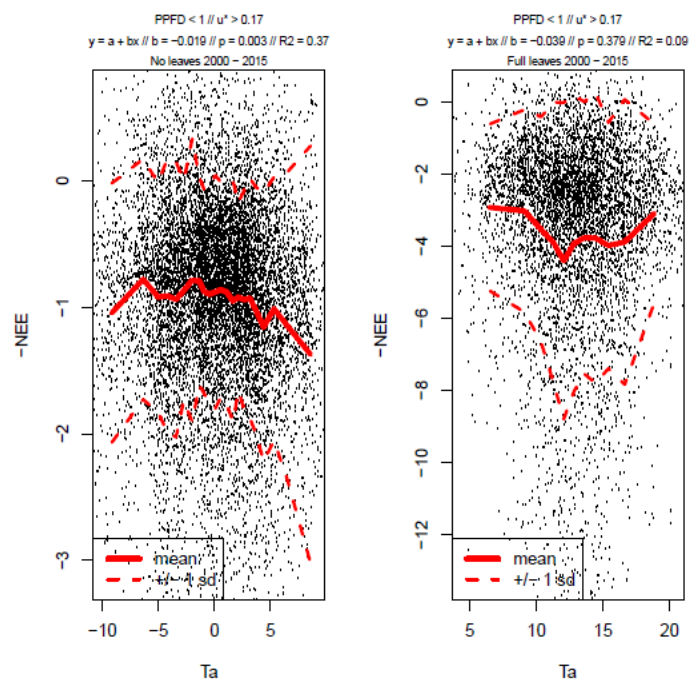


Figura 54: NEE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) versus T_s ($^{\circ}\text{C}$) per il periodo *No leaves e full leaves* 2000-2015 i puntini neri sono i dati semiorari, la linea rossa unisce punti medi per classi quantili della variabile indipendente (ogni classe contiene circa 500 dati). La regressione lineare in testa alla figura è calcolata sulla linea rossa.

Questa idea sembra confermata dai risultati riportati nelle Figure 55 e 56, in cui si riporta l'andamento della NEE notturna (respirazione) rispetto al VPD. Nonostante sia difficile separare gli effetti del VPD sullo scambio di carbonio di copertura, dato che alti VPD si accompagnano in genere ad alte temperature, che possono causare diminuzioni di NEE stimolando la respirazione (Hollinger *et al.*, 1994), abbiamo cercato comunque di verificarne l'impatto sul NEE della faggeta di Collelongo, tenendo anche in considerazione il livello di contenuto idrico del suolo che può modulare la risposta dell'ecosistema. Tralasciando il periodo invernale, in cui non ci si aspetta un'influenza del VPD sulla respirazione, nel PVM la respirazione risulta inibita dagli alti valori di VPD (ad alta VPD corrisponde un'alta T_a). Ciò avvalorava l'idea che lo stress idrico (alta VPD) inibisca la fotosintesi e quindi anche la respirazione ad essa collegata.

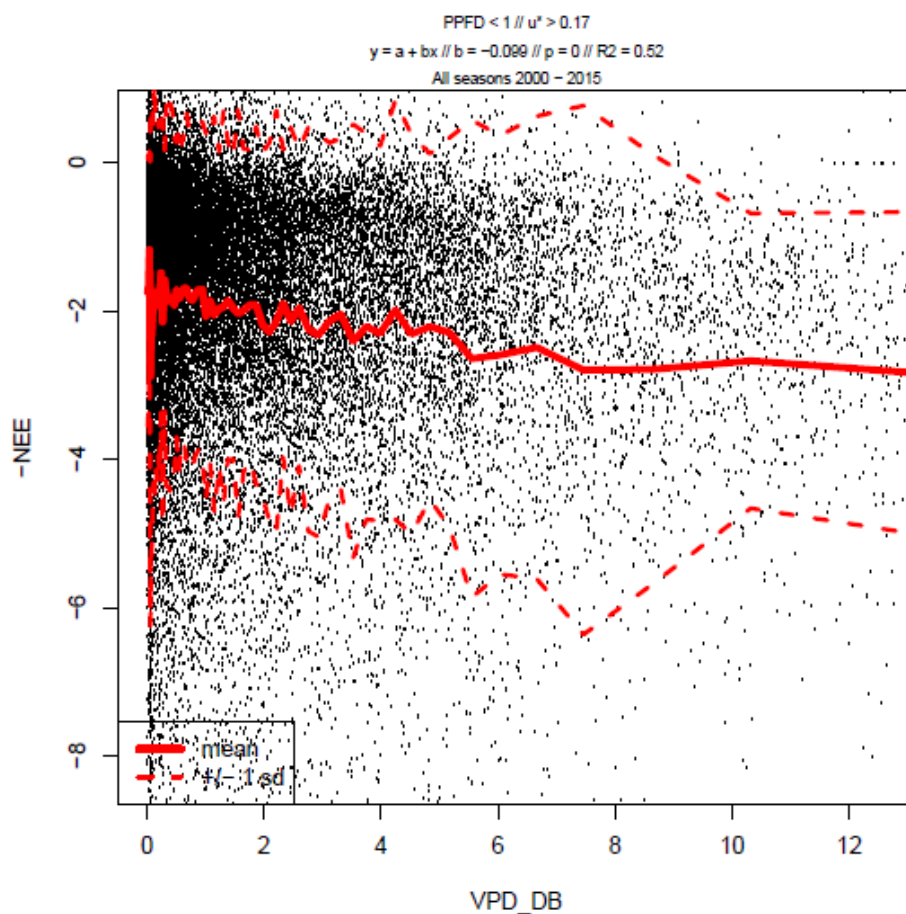


Figura 55: NEE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) versus VPD (KPa) per il periodo All season 2000-2015. I puntini neri sono i dati semiorari, la linea rossa unisce punti medi per classi quantili della variabile indipendente (ogni classe contiene circa 500 dati). La regressione lineare in testa alla figura è calcolata sulla linea rossa.

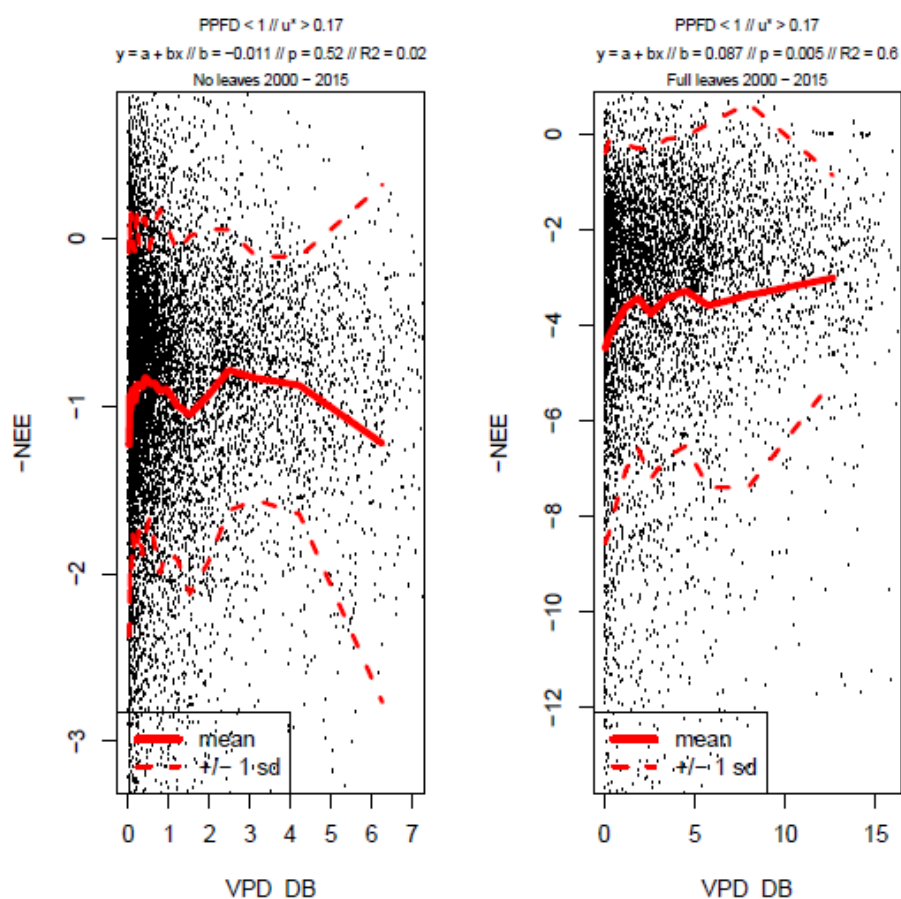


Figura 56: NEE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) versus VPD (KPa) per il periodo *No leaves* e *full leaves* 2000-2015 i puntini neri sono i dati semiorari, la linea rossa unisce punti medi per classi quantili della variabile indipendente (ogni classe contiene circa 500 dati). La regressione lineare in testa alla figura è calcolata sulla linea rossa.

4.5.3.1 Respirazione modellizzata

In questa sotto-sezione facciamo un breve confronto con i dati di respirazione derivanti dai dataset RecoDT e RecoNT elaborati dal database FluxNet sui dati misurati a Collelongo. I suffissi DT e NT indicano due diversi modelli di stima della respirazione: il primo stima la respirazione a partire da dati diurni (tramite l'estrapolazione delle curve di luce verso $\text{PPFD} \approx 0$), mentre il secondo usa dati notturni. Li vediamo entrambi ma per brevità consideriamo le relazioni di Reco in confronto con T_a . La figura 57 è analoga alla figura 54 ed effettivamente gli andamenti sono simili (a parte il segno cambiato di NEE). In particolare ad alte temperature (circa $T_a > 20$) la respirazione tende a livellarsi o diminuire. Quindi, c'è un certo accordo tra le misure ed il modello NT. Se usiamo il modello NT per valutare la respirazione diurna otteniamo la figura 58 in cui si vede che anche di giorno la respirazione viene inibita dalle alte temperature.

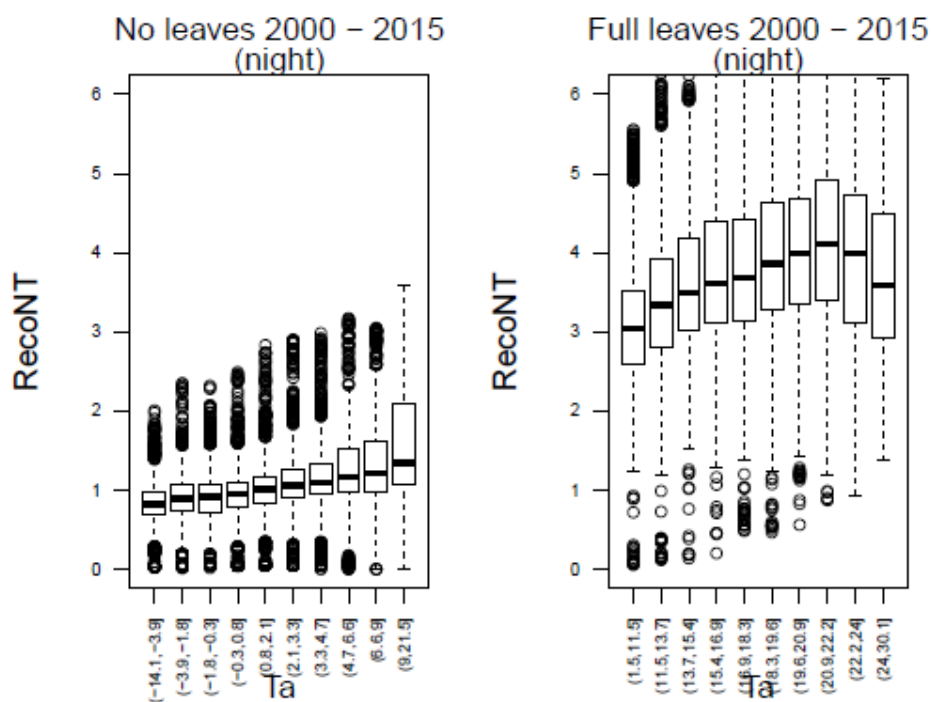


Figura 57: Modello NT per la respirazione notturna (gCm⁻² d⁻¹) e Ta (°C) *No leaves* = inverno; *Full leaves* = PVM

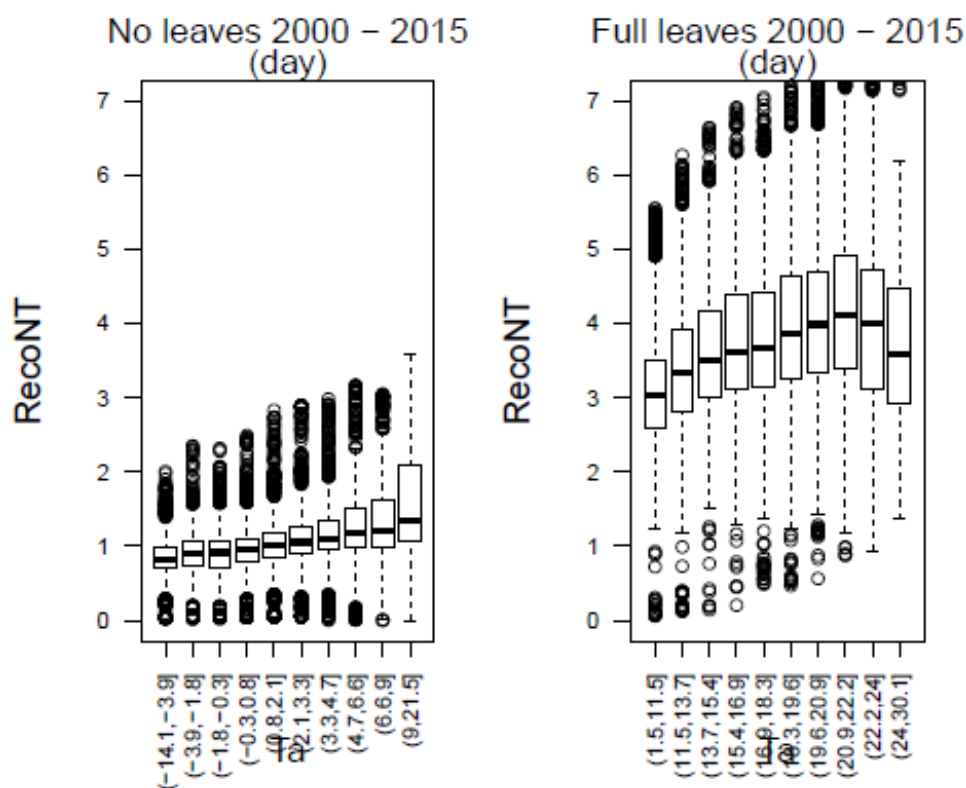


Figura 58: Modello NT per la respirazione diurna (gCm⁻² d⁻¹) e Ta (°C) *No leaves* = inverno; *Full leaves* = PVM

Se decidiamo di usare il modello DT e calcoliamo la respirazione notturna sembrerebbe perdersi o ridursi l'accordo tra il modello e i dati misurati analizzati nelle figure 51-54 (Figura 59). Per completezza comunque riportiamo la respirazione diurna in funzione di T_a secondo il modello DT in figura 60.

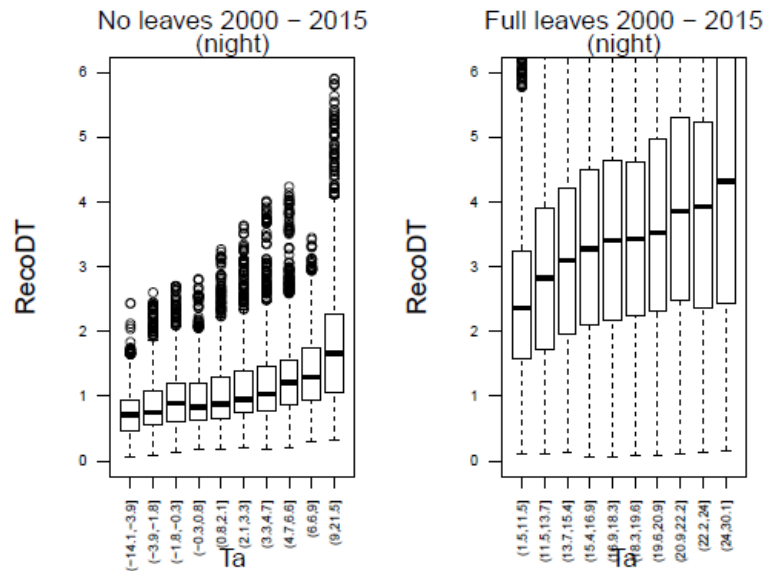


Figura 59: Modello DT per la respirazione notturna ($\text{gCm}^{-2} \text{d}^{-1}$) e T_a ($^{\circ}\text{C}$) *No leaves* = inverno; *Full leaves* = PVM

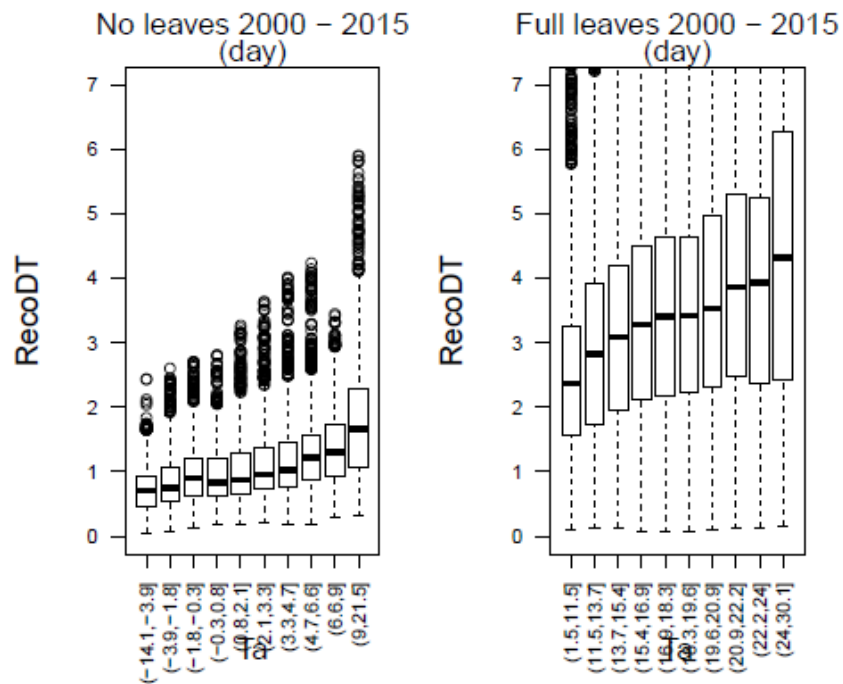


Figura 60: Modello DT per la respirazione diurna ($\text{gCm}^{-2} \text{d}^{-1}$) e T_a ($^{\circ}\text{C}$) *No leaves* = inverno; *Full leaves* = PVM

4.5.4 RELAZIONE TRA NEE DIURNA E FATTORI AMBIENTALI

Le normali curve di luce evidenziano la stretta dipendenza tra NEE e PPFD che si trova nel periodo vegetativo. Tuttavia ci aspettiamo che anche altre variabili abbiano un effetto su NEE. In questo paragrafo cercheremo di capire se c'è un effetto generale, mettendo insieme i dati di tutti gli anni (sempre però solo relativi al pieno periodo vegetativo definito dal plateau dell'indice EVI). In precedenza abbiamo analizzato i flussi notturni, qui analizziamo quelli diurni, cioè quelli per cui si ha $PPFD > 1$ limitandoci al periodo di massima vegetazione.

Per cercare di comprendere meglio le relazioni che intercorrono tra queste importanti variabili inizieremo con il visualizzare al livello grafico una curva di luce unica per tutti gli anni dal 2000 al 2015.

La curva di luce per tutti gli anni è mostrata in Figura 61 e i valori dei parametri F_{inf} , F_r , K_m , sono quelli riferiti al modello 1 in tabella 15 a. Ora per valutare quali possano essere le variabili ambientali che, oltre alla radiazione, influenzano la relazione tra NEE e luce, prendiamo i residui di questa curva e li mettiamo in relazione con le variabili temperatura del suolo (T_s), temperatura dell'aria (T_a) e *vapour pressure deficit* (VPD), il risultato può essere visualizzato al livello grafico nelle Figure 62, 63 e 64.

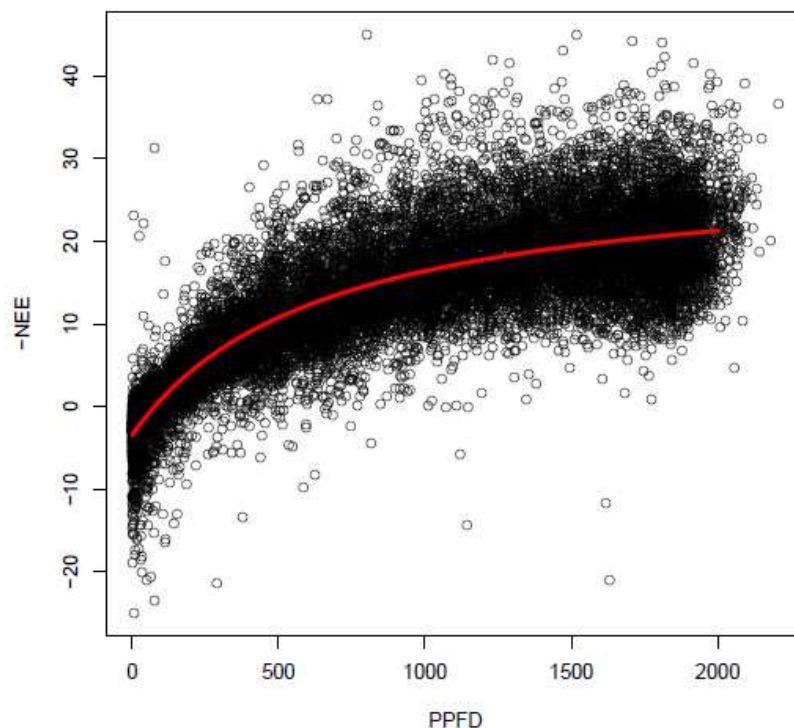


Figura 61: Curva di luce unica tra PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e NEE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) per tutti gli anni insieme dal 2000 al 2015 per il periodo vegetativo e per valori diurni.

Le figure 62, 63, 64 mostrano che per tutte e tre le variabili, un aumento oltre una certa soglia determina un effetto negativo sui flussi (riduzione di NEE in valore assoluto, che indica una riduzione dell'assimilazione). Sembrerebbe quindi esserci quasi una soglia limite ($T_s > 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_a > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $VPD > 10\text{ KPa}$). Questo effetto è appena visibile per T_s , è un po' più marcato per T_a ed è abbastanza netto per VPD .

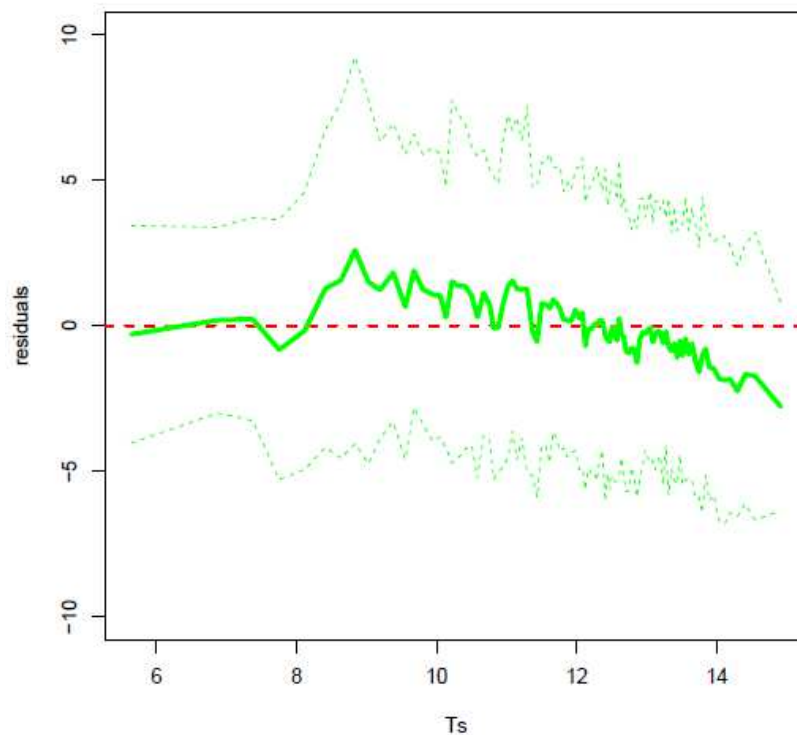


Figura 62: I residui della curva in Figura 61 sono confrontati con T_s ($^{\circ}\text{C}$). Per varie classi di temperatura viene graficata la media dei residui $\pm 1\text{sd}$ ($\text{sd} = \text{standard deviation}$)

Per spiegare NEE in termini di luce e temperatura, confrontiamo due modelli. Nel Modello 1 NEE dipende solo dalla luce. Il Modello 1 sarà quindi dato dall'equazione della curva di luce standard (equazione 18), In questo caso F_{inf} è un semplice parametro (l'asintoto della curva di luce).

Nel Modello 2 (equazione 22) poniamo F_{inf} come una funzione della variabile X , dove X è di volta in volta T_s , T_a o VPD

$$NEE = \frac{F_{inf}(X) \cdot PPFD}{K_m + PPFD} + F_r \quad [\text{Equazione 22}]$$

Nel Modello 2 si sono aggiunti i parametri aggiuntivi a , b . (equazione 23)

$$F_{inf}(X) = a + bX \quad [\text{Equazione 23}]$$

I risultati dei fit quando X è di volta in volta Ts, Ta o VPD sono:

- X = Ts: AICmod1 = 104386; AICmod2 = 104013
- X = Ta: AICmod1 = 104386, AICmod2 = 103643
- X = VPD: AICmod1 = 104386, AICmod2 = 102696

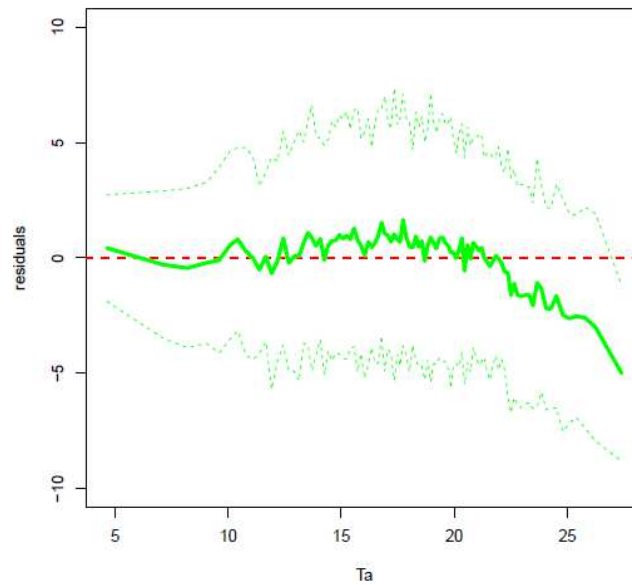


Figura 63: I residui della curva in Figura 61 sono confrontati con Ta (°C). Per varie classi di temperatura viene graficata la media dei residui $\pm 1sd$ (sd = *standard deviation*)

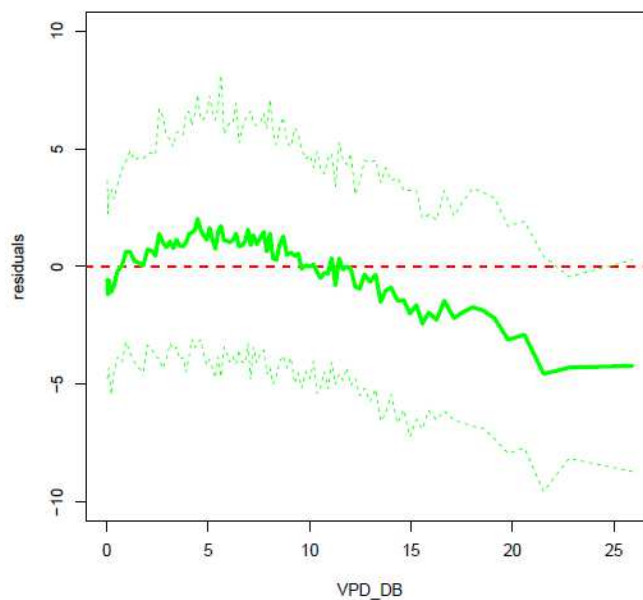


Figura 64: I residui della curva in Figura 61 sono confrontati con VPD (KPa). Per varie classi di VPD viene graficata la media dei residui $\pm 1sd$ (sd = *standard deviation*)

In tutti i casi i parametri sono altamente significativi ed è sempre $b < 0$ per cui F_{inf} decresce al crescere di X . Inoltre, in tutti i casi il modello 2 è un lieve miglioramento del modello 1 (AIC decresce) ma nel caso $X = T_a$ e soprattutto $X = VPD$ il miglioramento è più marcato.

Questo porta a pensare che in presenza di un aumento della richiesta evaporativa dell'atmosfera, associata con tutta probabilità ad uno stress idrico, ci sia una diminuzione dei flussi soprattutto a causa di una diminuzione della fotosintesi anche se abbiamo visto che anche la respirazione (in valore assoluto) tende a diminuire in presenza di stress idrico. Ciò ritorna con quanto visto nella modellizzazione di Fr (Equazione 19). Il confronto tra i due modelli nel caso $X = VPD$ è illustrato in Figura 65.

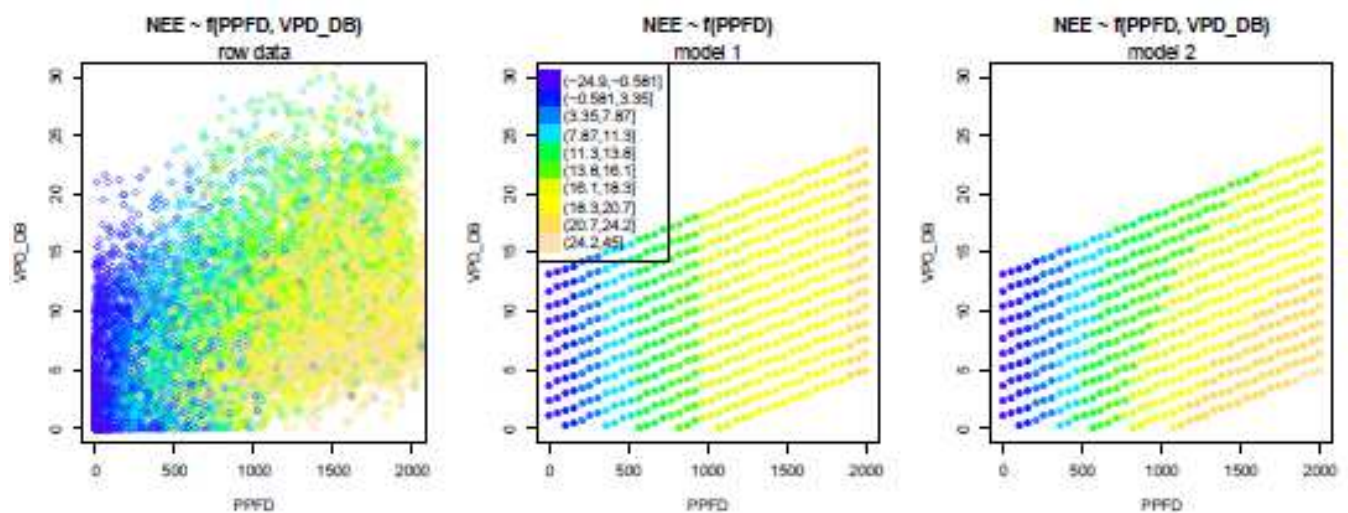


Figura 65: Partendo da sinistra: primo plot: Valori di -NEE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) al variare di PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e VPD (KPa) (dati misurati per tutti gli anni nel periodo vegetativo). Plot centrale: Valori di -NEE al variare di PPFD (Modello 1). Ultimo Plot a destra: Valori di -NEE al variare di PPFD e VPD (Modello 2). In tutti e tre i plot il valore di -NEE è dato dal colore secondo la legenda mostrata nel plot di centro va specificato che parliamo di -NEE quindi i valori nel blu sono emissioni mentre quelli più chiari sono assorbimenti.

La figura 65 mostra che il Modello 2 è migliore del modello 1 perché cattura la diminuzione di -NEE per alti valori di VPD, il modello 2 quindi si avvicina molto di più alla condizione che si può vedere nella figura 65 primo grafico a destra i *Raw data*, ed è in grado di fornire, fissato un valore di PPFD, le variazioni di -NEE all'aumentare di VPD. I valori dei parametri F_{inf} , Fr , K_m , a e b per i due modelli, sono quelli riportati in tabella 15 a.

	F_{inf}	a	b	K_m	F_r
mod1	32.8			623.0	-3.79
mod2 ($X = T_s$)		42.2	-0.76	645.9	-3.73
mod2 ($X = T_a$)		47.4	-0.58	814.2	-3.62
mod2 ($X = VPD$)		43.9	-0.62	888.2	-3.56

Tabella 15 a: Stime dei parametri della curva di luce complessiva (modello1) e delle curve riferite al modello 2 dove si possono vedere oltre ai valori dei parametri K_m e F_r anche a e b .

Per controllare con maggiore precisione l'effetto sulla fotosintesi andiamo a vedere cosa succede in termini di PPFD e VPD a GPP dall'inglese *Gross Primary Production*, rappresentante l'accumulo netto di CO_2 dovuto alla fotosintesi, in particolare abbiamo utilizzato la GPPNT *Gross Primary Production from Nighttime partitioning method*, (Reichstein *et al.*, 2005) ($gC\ m^{-2}y^{-1}$) proveniente dal database europeo Fluxnet i cui valori sono riportati in tabella16.

La figura 66 mostra chiaramente che GPP dipende da PPFD.

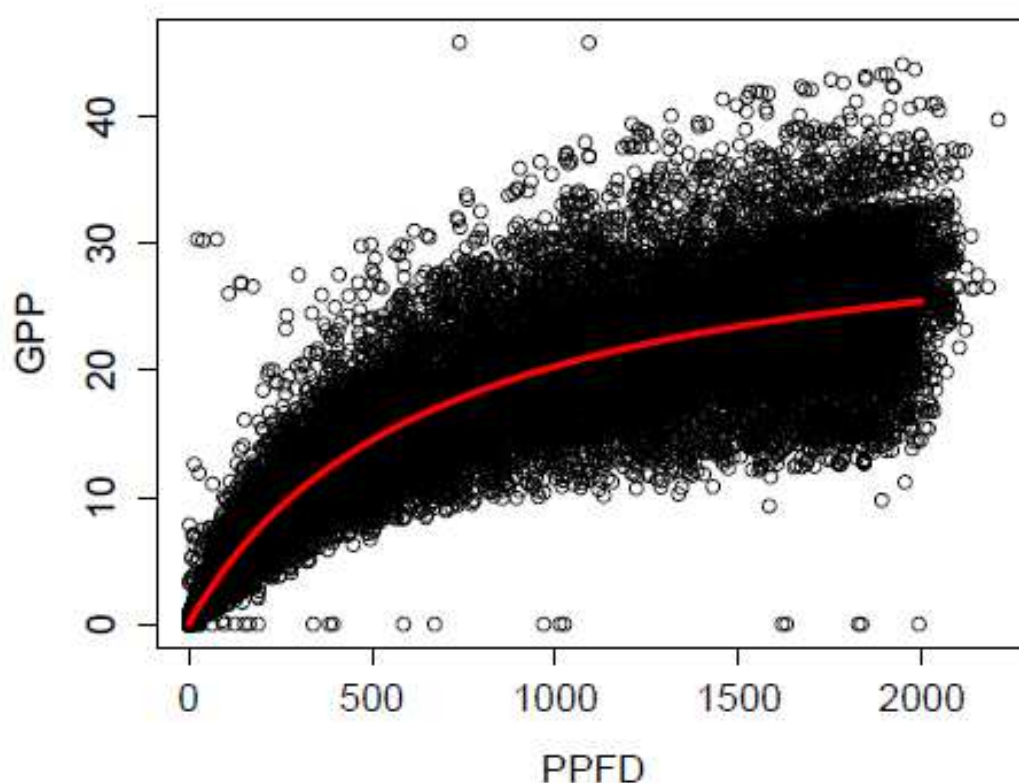


Figura 66: Curva di luce per la GPP ($gCm^{-2}\ d^{-1}$) e il PPFD ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) di tutti gli anni insieme (periodi vegetativi e valori diurni).

I residui di questa curva li presentiamo in funzione di VPD nella Figura 67. Quello che si vede è che anche per la GPP c'è un effetto negativo soprattutto per valori VPD > 10.

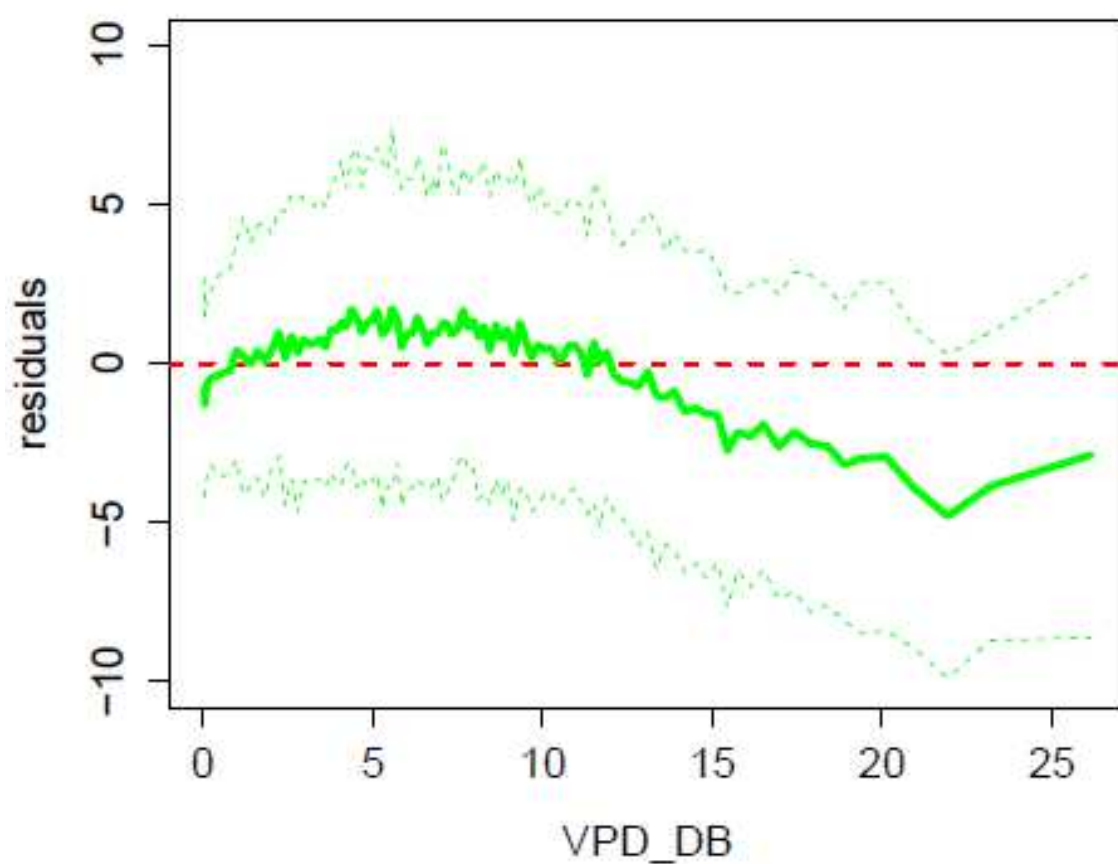


Figura 67: I residui della curva in Figura 66 sono confrontati con VPD (KPa). Per varie classi di VPD viene graficata la media dei residui $\pm 1sd$ ($sd = standard\ deviation$)

4.6 ANDAMENTO DI GPP, RECO E NEE

Qui di seguito viene riportata una tabella (Tab. 16) con i valori di GPP, Reco e NEE che derivano dal database Europeo Fluxnet dove i valori in rosso sono gli anni in cui la quantità del dato non arriva al 40% e più precisamente abbiamo 10%, 39% e 35% rispettivamente per gli anni 2003, 2004 e 2006.

anno	NT_GPP_ust50_c_gC m-2y-1	NT_RECO_ust50_c_gC m-2y-1	NEE_ust50_c_umol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
2000	1662	743	-920
2001	1131	628	-504
2002	947	605	-342
2003	2316	978	-1338
2004	2201	887	-1314
2005	1423	778	-646
2006	1681	945	-737
2007	1343	791	-552
2008	1226	736	-490
2009	1709	874	-835
2010	1556	799	-756
2011	1320	796	-524
2012	1588	841	-747
2013	1479	966	-513
2014	1751	994	-757
2015	1131	957	-608

Tabella 16: assorbimenti e respirazione *gap filled* provenienti dal database Europeo Fluxnet di tutti gli anni di studio dal 2000 al 2015 in rosso i valori in cui la quantità di dati non supera il 40%, ust50_c è la velocità di frizione riferita al modello d'efficienza (c) derivante del database Europeo Fluxnet.

Dall'analisi dei dati di tutti gli anni riportati in tabella 16 per le variabili GPP e NEE non si evidenzia un trend quindi per GPP sembrerebbe importante la variabilità interannuale. Da segnalare però che se si escludono, oltre agli anni con pochi dati, anche gli anni 2000 e 2015 che sono anni caratterizzati rispettivamente da un'alta e una bassa NEE le analisi ci restituiscono un incremento di GPP di 40 gC m⁻² y⁻¹ con un R² di 0.45 e un p = 0.01.

Per quanto riguarda la Reco escludendo il solo anno 2003 (anno in cui la quantità di dati arriva al 10%) abbiamo trovato che c'è un trend in aumento (figura 63a) di 17 g Cm⁻²y⁻¹ con un R di 0.51 e un p = 0.002. Ma se dalle analisi escludessimo tutti e tre gli anni con pochi dati, quindi 2003, 2004 e 2006 (figura 63b) avremmo un incremento di 21 g Cm⁻²y⁻¹ con un R² di 0.75 e un p = 0.0001. Se per coerenza, come fatto per la GPP, escludessimo anche gli anni 2000, 2015 l'incremento arriverebbe a 26 g Cm⁻²y⁻¹ con un R² di 0.81 e un p = 0.0001.

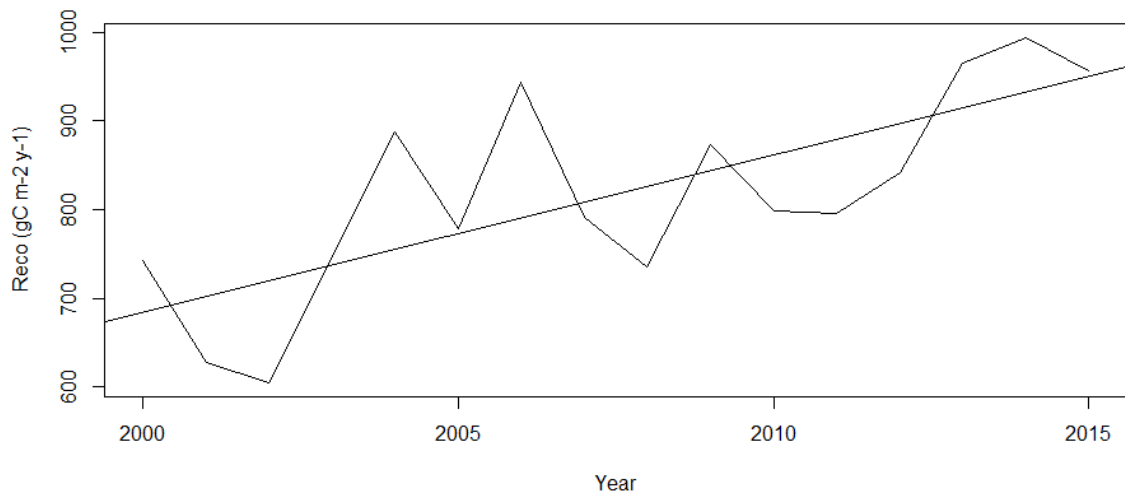


Figura 63 a: Trend della respirazione dell'ecosistema (NT_RECO_ust50_c_gC m-2y-1) proveniente dal database europeo Fluxnet escludendo il solo anno 2003.

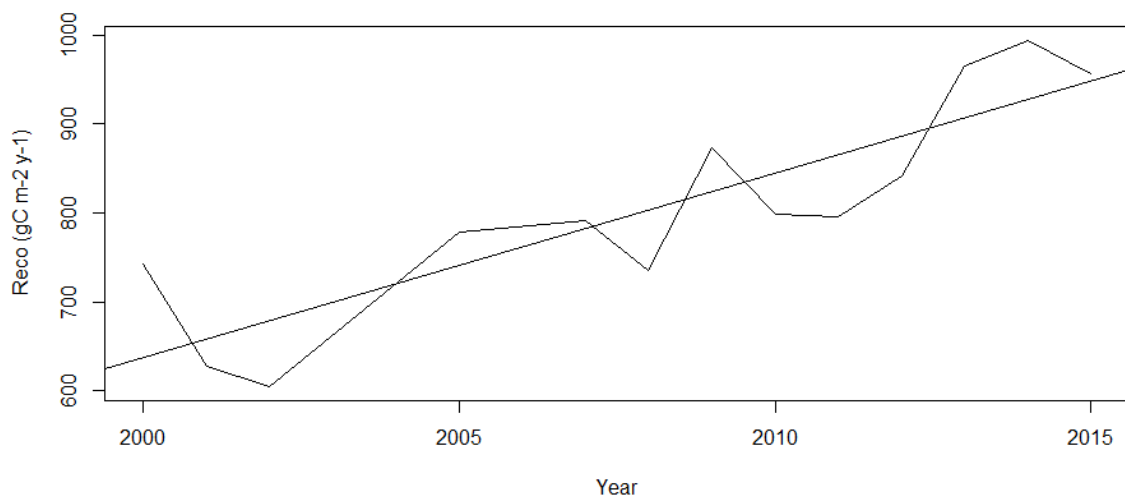


Figura 63 b: Trend della respirazione dell'ecosistema (NT_RECO_ust50_c_gC m-2y-1) proveniente dal database europeo Fluxnet escludendo gli anni 2003, 2004 e 2006 per quantità di dati inferiore al 40%.

Nel corso degli anni la faggeta di Collelongo ha agito comunque come un importantissimo *Sink* che in media ha sequestrato 660gCm-2 yr-1.

4.7 UTILIZZO DI UN SAPR COME SISTEMA INFRASTRUTTURALE MOBILE PER IL MONITORAGGIO DIRETTO DELLE RISORSE AMBIENTALI

Prima di procedere alla descrizione dei risultati ottenuti tramite l'utilizzo del SAPR (CNR 1F-001G IBAF) di seguito denominato sinteticamente drone, verranno presentati dei grafici che illustrano i dati principali dell'esperienza sperimentale, quali l'orario di volo, le zone interessate dai sorvoli e la suddivisione di quest'ultime in base alla zona sorvolata (Figura 68, 69). Il periodo di riferimento nel quale sono stati eseguiti i sorvoli con il drone nell'area dove è localizzata la torre di monitoraggio dei flussi di carbonio è stato l'anno 2015, dal mese di giugno a quello di dicembre e più precisamente (*day* 170 190 197 232 245 253 260 265 273 289 293 300 352).

Per quanto riguarda l'orario di volo si sono potute distinguere due fasce orarie nelle quali si è volato per scattare immagini multispettrali, nella banda del visibile e prelevare dati utili al calcolo di indici di vegetazione: una prima fascia oraria dalle 9:30 alle 11:45 ora solare e una, nella seconda metà della giornata dalle 11:45 alle 14:00. Oltre alle fasce orarie si può anche vedere la densità di dati prelevati per orario di volo durante tutto il periodo di osservazione (figura 70).



Figura 68: aree di campionamento da drone

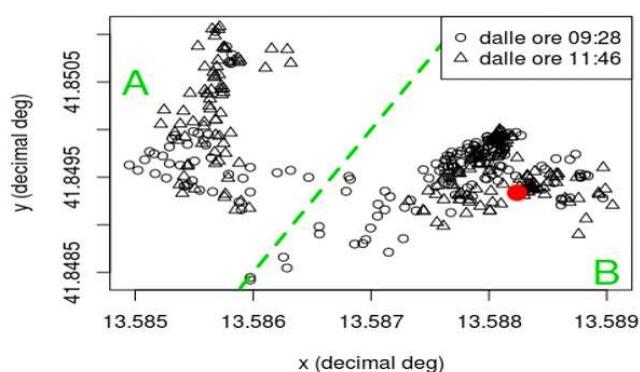


Figura 69: aree di volo A e B in base alle coordinate. In rosso è riportata la posizione della torre di monitoraggio

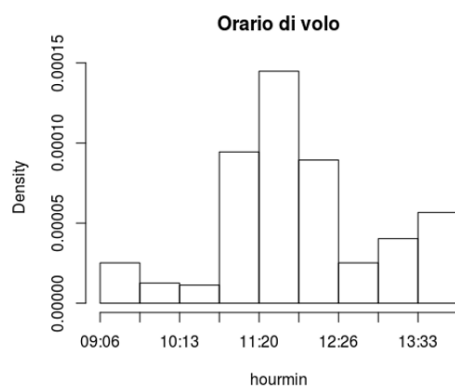


Figura 70: densità di dati prelevati in funzione dell'orario

4.7.1 IMMAGINI E FILMATI A COLORI OTTENUTI CON LA FOTOCAMERA DIGITALE GOPRO

Il drone è stato equipaggiato con una fotocamera digitale GoPro Hero 3+*Black edition* come descritto nel paragrafo 3.7.3 che ha ripreso tutte le fasi di volo dal momento del decollo a quello dell'atterraggio. L'utilizzo che ne è stato fatto di queste immagini per questo lavoro dopo la modifica, è stato quello di confronto per poter spiegare la realtà multispettrale. Un aspetto fondamentale è la distorsione molto accentuata che crea l'obiettivo grandangolare della GoPro dovuto alla lente sferica, comunemente chiamata *fish-eye*. Come si può notare dalla Fig. 71



Figura 71: Immagine scattata con una GoPro dove si può notare la distorsione radiale

La caratteristica principale di questi obiettivi è la breve lunghezza focale che di norma è inferiore a 50 mm, che appunto consente riprese con FOV maggiore di ottiche con focale più lunga. Queste offrono una maggior profondità di campo aumentando la zona dell'immagine in cui gli oggetti appaiono nitidi e focalizzati, infatti uno dei vantaggi dell'obiettivo grandangolare è anche quello di permettere una facile messa a fuoco della foto.

4.7.2 INDICI NDVI, PRI, PAR

L'elevata risoluzione spaziale e temporale che caratterizza il telerilevamento con drone consente di monitorare costantemente importanti parametri biofisici ed ecologici dei popolamenti forestali. Uno degli obiettivi di questo lavoro è stato quello di valutare la correlazione di questi parametri con misure e indici vegetazionali acquisiti da drone. Le immagini ottenute dalla fotocamera multispettrale trasportata dal drone sono state utilizzate per l'estrazione degli indici vegetazionali. In particolare, le immagini multispettrali sono state elaborate ai fini di ottenere valori di NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) relativi alla singola pianta e a porzioni di foresta, mentre i sensori hanno restituito i valori di radiazione fotosintenticamente attiva (PAR, PPFD) e il PRI (*Photochemical reflectance index*). Tutti questi dati sono stati raccolti da drone, sono stati correlati tra loro e con alcune variabili climatiche e micrometeorologiche (Ta, SWC, NEE) misurate in campo. I risultati saranno descritti nei successivi paragrafi.

Per calcolare i valori di NDVI partendo dalle immagini multispettrali è stato utilizzato il software di elaborazione dei dati della Tetracam PixelWrench2 che è un software di editing che include strumenti specifici per le immagini multispettrali dei sensori ADC e MCA della Tetracam. Importando le immagini multispettrali, è possibile gestire i diversi spettri NIR, Verde e Rosso, regolare le impostazioni del colore ed esportare le immagini in vari formati tra cui BMP, JPEG, TIF e PNG.

Per prima cosa dopo aver avviato PixelWrench2 e cliccato su *View* e *Launch GPS Distiller* si aprirà una nuova finestra. Cliccando su *Distill Logs* e selezionando le immagini presenti sulla card SD all'interno della camera multispettrale si potrà salvare il file GPS, fatto queste prime procedure si potrà accedere tramite l'icona *view* ad *IndexTools*, nella scheda *Matrix* (Figura 72) è presente la procedura per la calibrazione del sensore radiometrico (usando il file CPF della camera), procedendo senza questo passo il valore radiometrico sarà meno accurato e può alterare la generazione dell'indice NDVI.

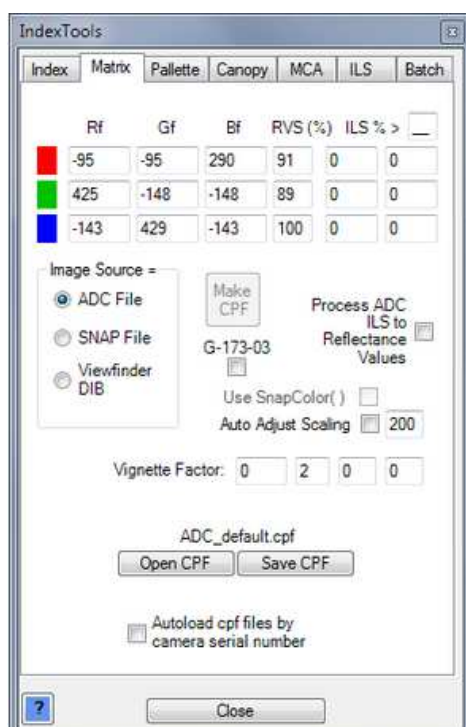


Figura 72: PixelWrench 2 – *IndexTools Matrix*

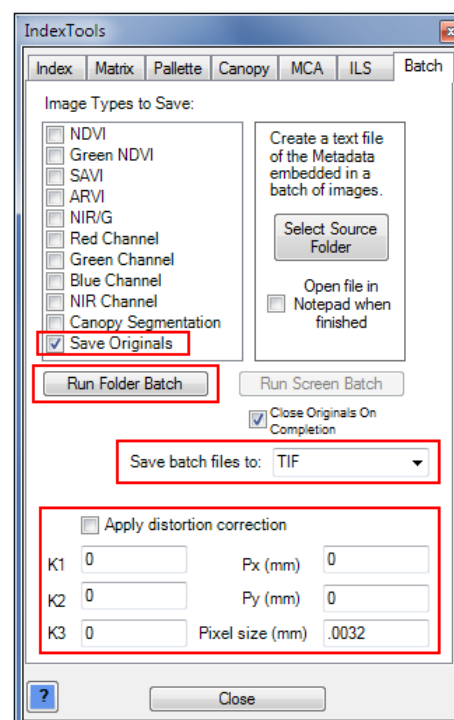


Figura 73: PixelWrench 2 – *IndexTools Batch*

Infine aprendo la scheda Batch selezionando salva originale e TIF come formato di output, deselegnando la distorsione si potrà selezionare la cartella di destinazione per gli indici come in figura 73.

I valori di NDVI raccolti ci mostrano l'andamento stagionale di questo importante indice ottenuto unendo i valori acquisiti da drone delle diverse campagne di misura, oltre alla deviazione standard sono visibili con linee tratteggiate grigie tutti i rilievi eseguiti durante il periodo e con linea rossa il giorno 253 preso come esempio per poter mettere in relazione i due indici NDVI e PRI sia tra loro che con la PAR e le variabili ambientali e micrometeorologiche. In Figura 74 si può vedere come questo indice descriva molto bene l'evoluzione di una stagione vegetativa di un bosco di caducifoglie, nel caso specifico del faggio. Si segnala che, per motivi tecnici e autorizzativi, non è stato possibile effettuare voli nei primi mesi dell'anno in particolare nel momento dell'emissione fogliare e quindi della ripresa vegetativa.

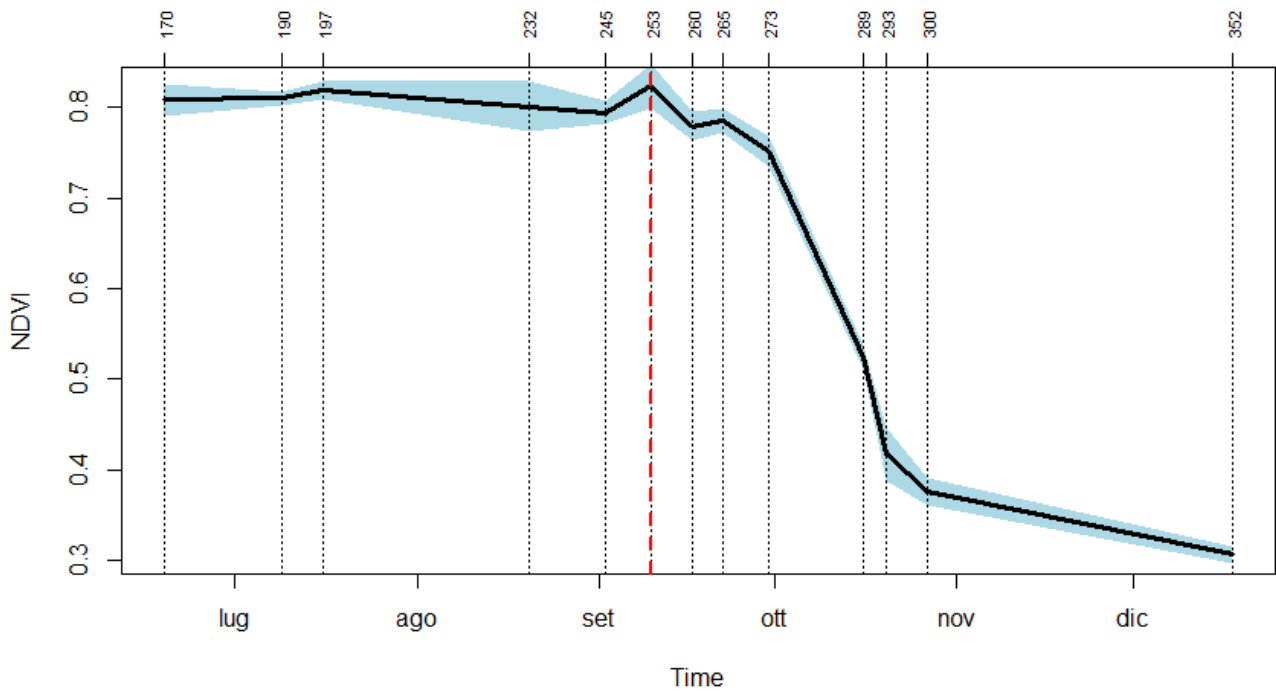


Figura 74: valori di NDVI nel tempo e relativa deviazione standard

Per quanto riguarda il PRI sono stati presi i valori derivanti dai sensori SRS (*Spectral Reflectance Sensor*) della *Decagon device* descritti nel paragrafo 3.7.3 e utilizzati come variabili dell'equazione 24.

Il PRI è associato alla diminuzione dell'efficienza fotosintetica in quanto sensibile allo stato di de-epossidazione del ciclo delle xantofille (Gamon *et al.*, 1992). Quest'ultimo è un processo di dissipazione termica che viene attivato dalla vegetazione in condizioni di eccesso di radiazione solare, e consiste nella de-epossidazione della violaxantina. In una prima fase del manifestarsi dei sintomi di stress, bassi valori di PRI indicano una percentuale di de-epossidazione maggiore delle xantofille, e quindi un aumento della dissipazione energetica.

Il PRI è stato calcolato come in (equazione 24) utilizzando la riflettanza (ρ) ad una lunghezza d'onda pari a 531 e 570 nm:

$$PRI = \frac{(\rho_{531} - \rho_{570})}{(\rho_{531} + \rho_{570})} \quad [\text{Equazione 24}]$$

in cui (ρ) indica la riflettanza per la lunghezza d'onda in nanometri (Gamon *et al.*, 1992; Penuelas *et al.*, 1995).

Il PRI in alcuni casi è in grado di tracciare le variazioni spaziali della copertura fogliare e i cambiamenti strutturali delle foreste (Barton, North, 2001) e numerosi studi dimostrano una buona correlazione tra il PRI e l'efficienza d'uso della luce (LUE) (Serrano, Peñuelas, 2005), sia a livello fogliare che di copertura.

Questo indice sensibile alle variazioni di luce, appare sensibile anche agli eventuali stress idrici causati da condizioni di siccità.

L'andamento del PRI, ottenuto unendo i valori acquisiti da drone delle diverse campagne di misura, è riportato in (Figura 75) dove oltre alla deviazione standard sono visibili con linee tratteggiate grigie tutti i rilievi eseguiti durante il periodo e con linea rossa il giorno 253 preso come esempio per poter mettere in relazione i due indici PRI e NDVI sia tra loro che con la PAR e le variabili ambientali e micrometeorologiche.

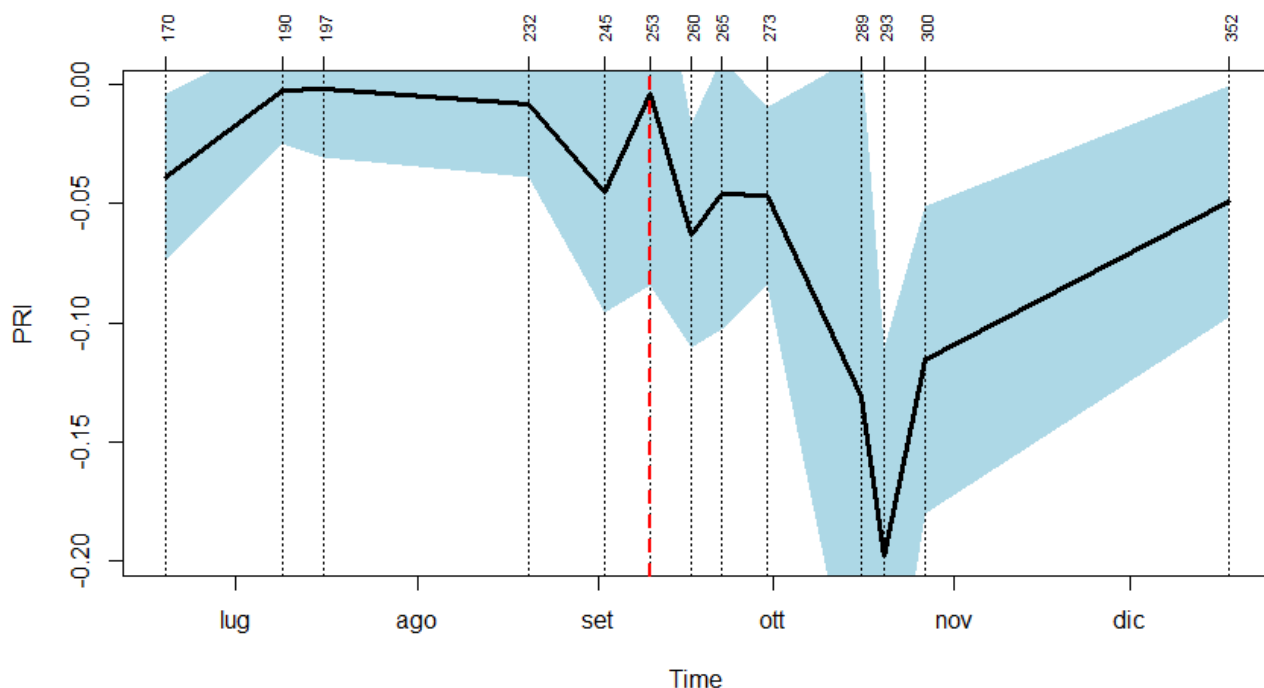


Figura 75: valori di PRI nel tempo e relativa deviazione standard

Per quanto riguarda la PAR (*photosynthetically active radiation*), possiamo dire che è una misura dell'energia effettivamente disponibile per la fotosintesi. Dal drone sono stati acquisiti sia valori di PAR incidente sopra la copertura che riflessa dalla vegetazione e l'andamento nel tempo di questo indice è riportato in (Figura 76 e 77), anche per questo indice oltre alla deviazione standard sono visibili con linee tratteggiate grigie tutti i rilievi eseguiti durante il periodo e con linea rossa il giorno 253.

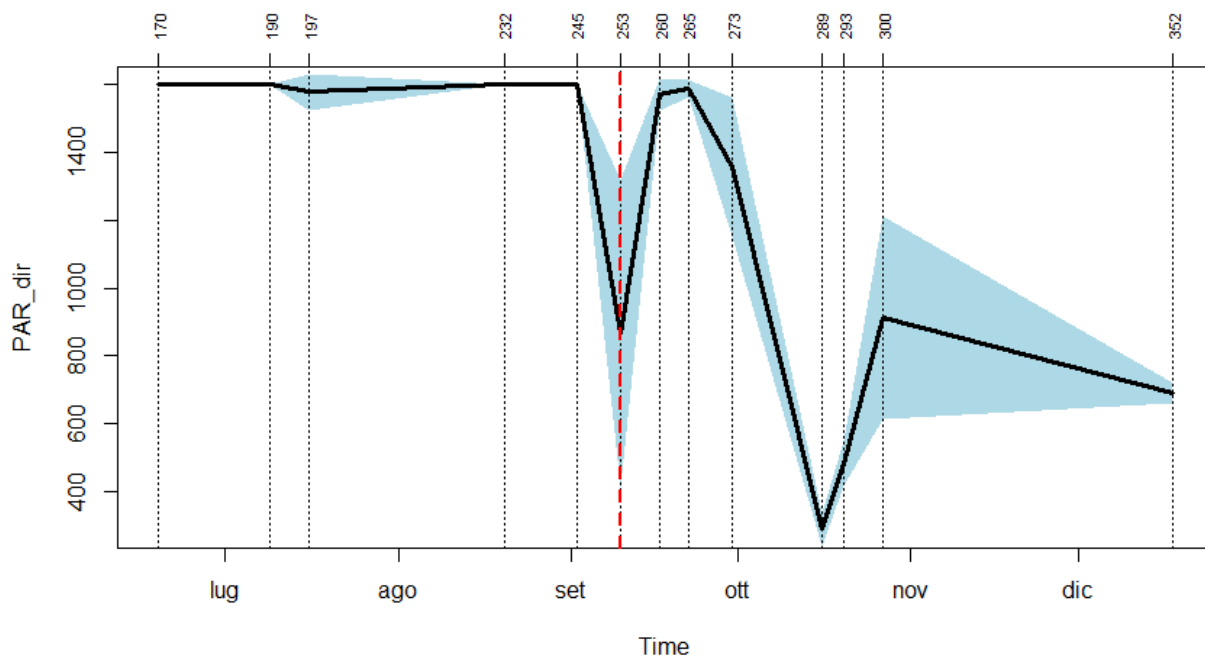


Figura 76: PAR diretta espressa in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in funzione del tempo

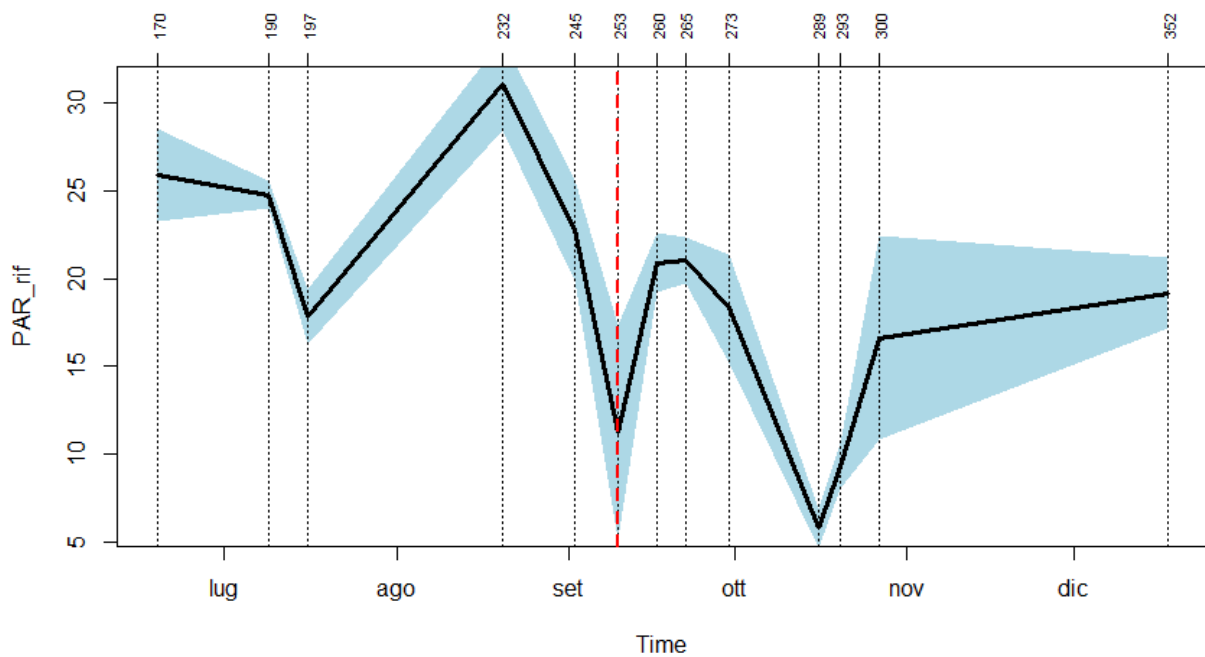


Figura 77: PAR riflessa espressa in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in funzione del tempo

4.7.3 CONFRONTO TRA INDICI, FLUSSI DI CO_2 E VARIABILI AMBIENTALI

Si riportano i grafici ottenuti per valutare i valori ottenuti nei giorni di rilievo con il drone (linea rossa e linee grigie tratteggiate) con le variabili NEE, T_a e SWC a - 5 cm (Figura 78) e uno zoom delle stesse variabili per il mese di settembre (Figura 79), più denso di rilievi con drone e al cui interno è compresa la fase iniziale della chiusura della stagione vegetativa. Ogni variabile è rappresentata per l'anno 2015 e anche per il solo periodo di copertura dati da drone.

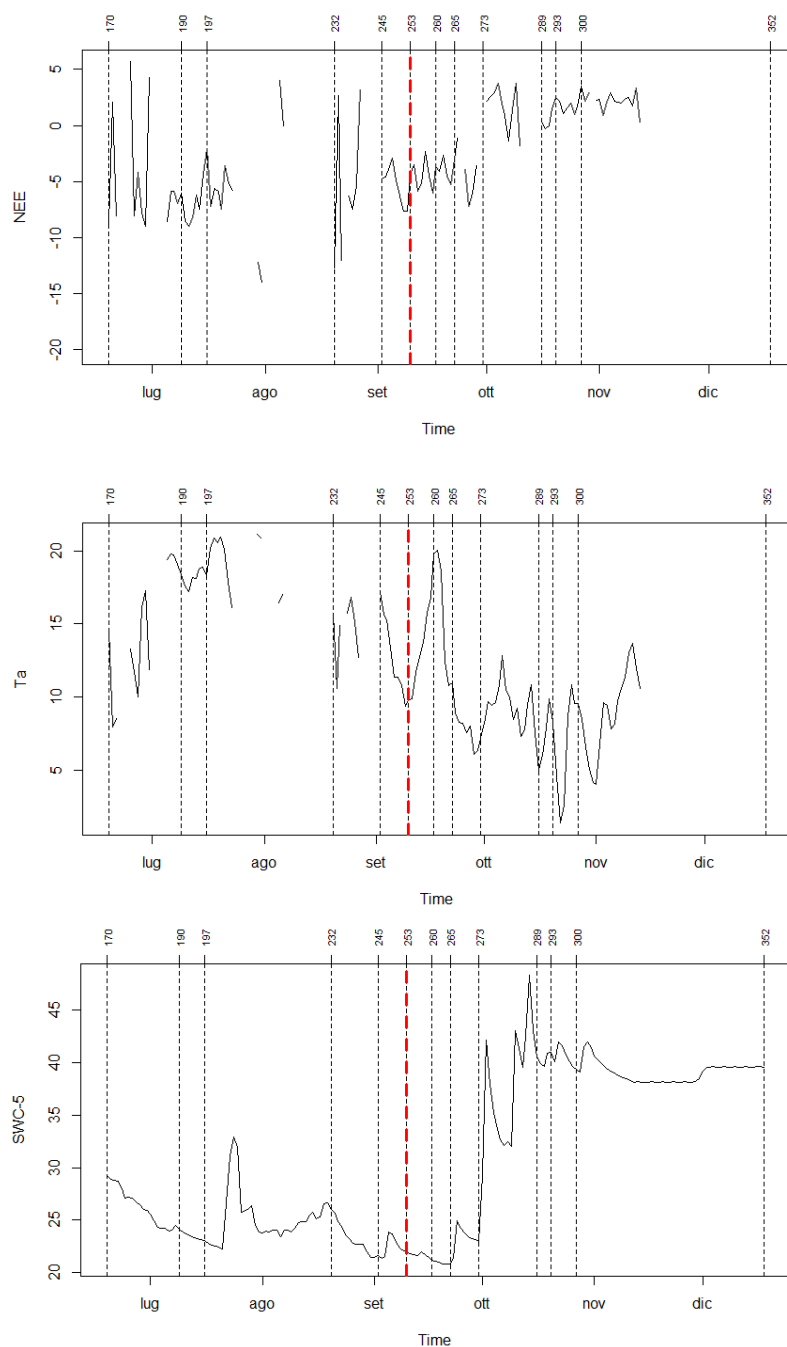


Figura 78: sovrapposizione rilievi con drone e valori medi giornalieri di NEE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), T_a ($^{\circ}\text{C}$), SWC (%)

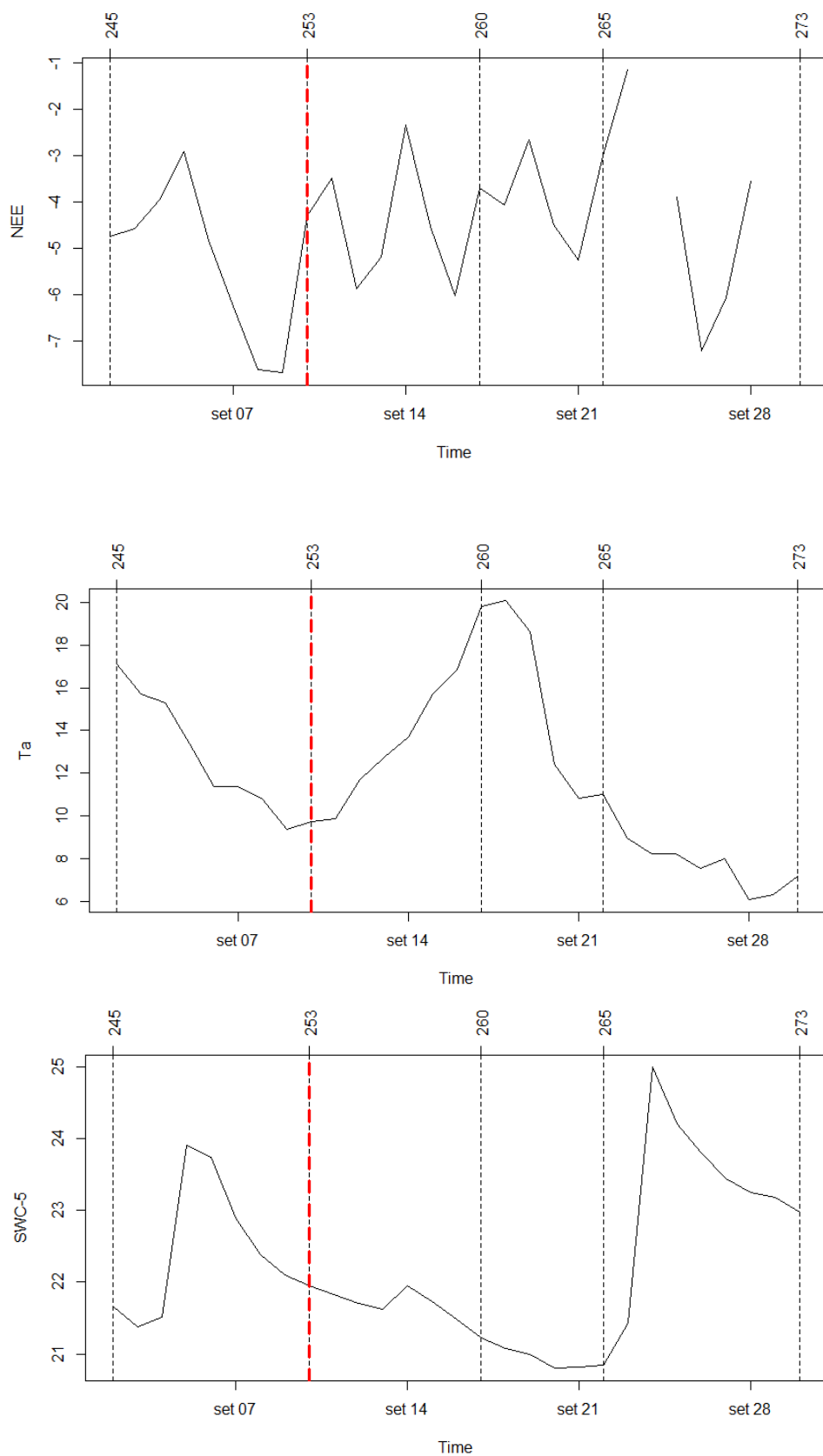


Figura 79: sovrapposizione rilievi con drone e valori medi giornalieri delle variabili NEE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Ta ($^{\circ}\text{C}$), SWC (%), per il solo mese di settembre 2015

Questa sovrapposizione mostra l'andamento delle variabili SWC, Ta e NEE (intesi come valori medi giornalieri) che sono state prese in considerazione per essere confrontate con gli indici ottici NDVI e PRI ottenuti dalla sensoristica montata sul drone. Dai grafici in figura 78 e 79 si può vedere la copertura del dato durante la stagione vegetativa delle tre variabili e i giorni di sorvolo della faggeta.

Come si può vedere dall'NDVI in figura 74, al giorno 270 cominciano ad esserci i primi segni di chiusura della stagione vegetativa. Nel giorno 250, poco prima della data evidenziata con linea tratteggiata rossa (giorno 253) c'è stata una giornata piovosa (Figure 78 e 79 SWC). Va segnalato che il giorno di volo 253 è stato caratterizzato da copertura nuvolosa come si può vedere dalla PAR dir in figura 76 e anche dalla PAR rif in figura 77. Inoltre, come evidenziato dalle figure 78 e 79 si può notare come tra il giorno 245 e il 253 la temperatura dell'aria (Ta) sia diminuita di circa 7 °C. Al contempo, nel periodo tra le stesse date (245 – 253) lo scambio di carbonio ha mostrato una discreta variabilità giornaliera, da mettere in relazione alla dinamica del periodo (prima metà di Settembre), come si può vedere nello zoom della figura 79.

Nel giorno 253 c'è un picco positivo per l'indice PRI, durante un periodo in cui l'indice NDVI si mantiene su valori ancora massimi (nel giorno 253 è presente anche un picco secondario. Nel giorno 253, le condizioni di nuvolosità e luce diffusa, seguiti anche un recente ricarica del contenuto idrico del suolo, come evidenziato dal parametro di SWC, hanno probabilmente determinato una diminuzione dei potenziali fattori di stress ed una riduzione dello stato di de-epossidazione delle xantofille che influenza direttamente il PRI. Inoltre, va segnalato che esiste una relazione significativa tra NEE_{mid} (cioè NEE medio tra le ore 10:00 e le ore 14:00) e il PRI ($R^2 = 0.68$, $p = 0,02$) che indica come valori di assorbimento maggiore siano correlati con valori di PRI meno negativi (figura 80).

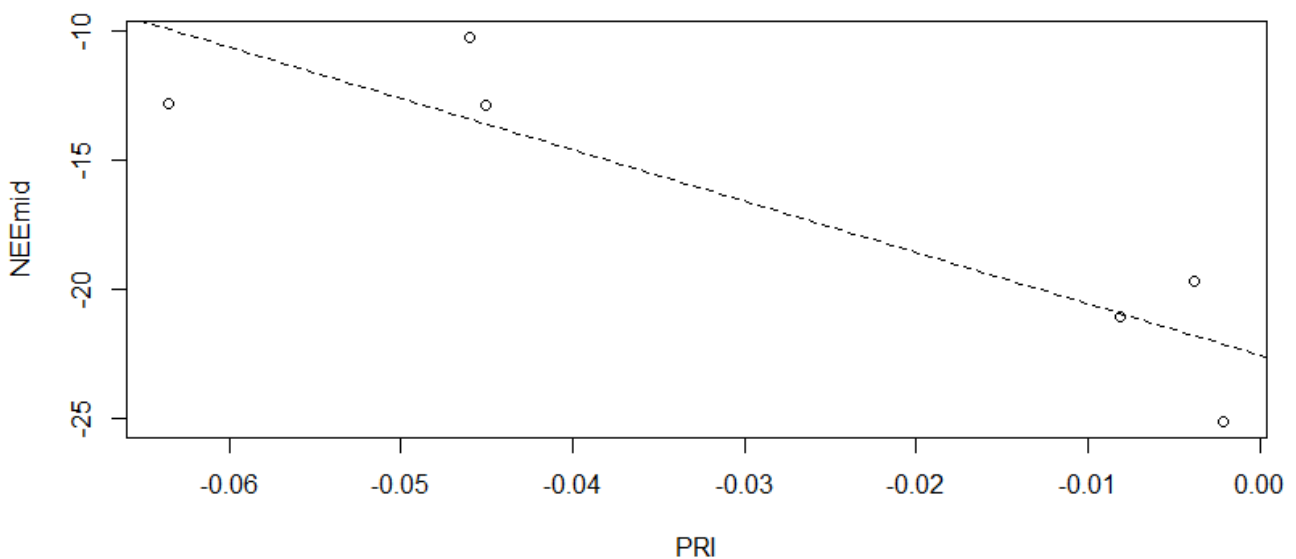


Figura 80: Relazione tra l'indice PRI e la NEE_{mid} ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), (NEE medio tra le ore 10:00 e le ore 14:00)

Per quanto riguarda l'indice NDVI, diversamente dal PRI, non è risultato correlato con NEE. In effetti, 'indice è meno dinamico del PRI, dando essenzialmente una stima della quantità di massa verde presente. E' invece risultata significativa la relazione tra PRI e NDVI come mostrato in figura 81 dove ($R^2 = 0.73$ e $p = 0.007$).

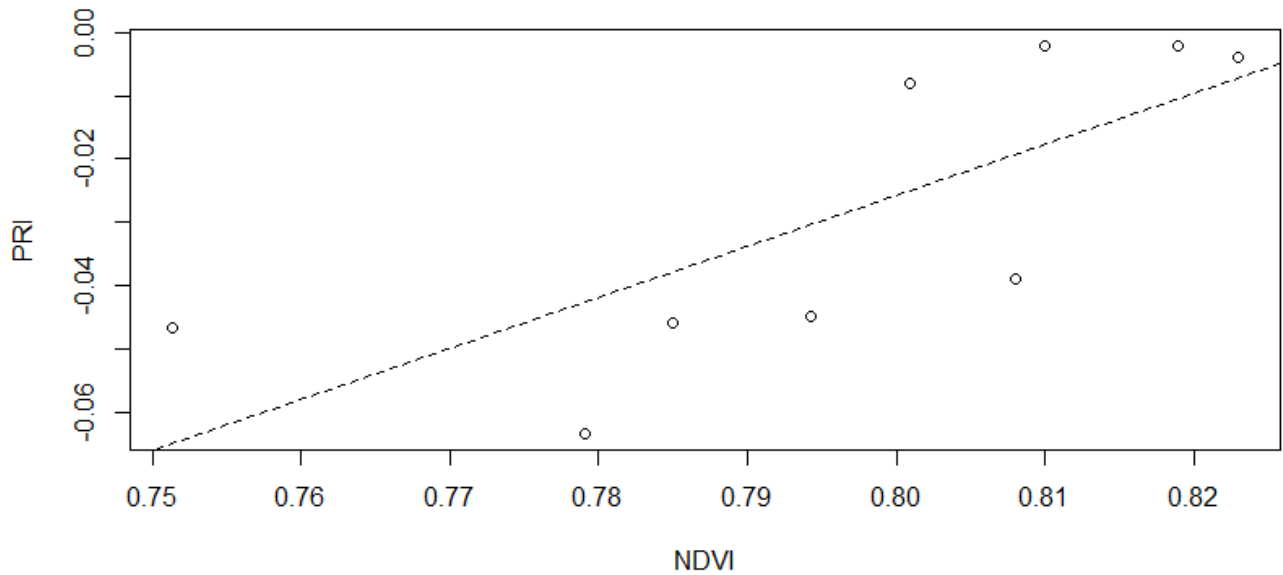


Figura 81: relazione tra NDVI e PRI

Dalla quale si può vedere che all'aumentare di un indice aumenta anche l'altro cosa che è ben visibile vedendo gli andamenti dei due indici in figura 74 e 75.

5 DISCUSSIONI

I modelli climatici prevedono un aumento della temperatura dell'aria di circa 1°C su scala globale e fino a 2°C per la parte meridionale e centrale dell'Europa entro i prossimi 40 anni. Prevedono anche un aumento delle precipitazioni durante la primavera e una maggiore frequenza di periodi di siccità in estate, che influenzano negativamente la crescita e la competitività del faggio che non necessariamente sarà in grado di beneficiare della maggiore concentrazione di CO₂ in atmosfera (Geßler, 2007). Quello che si è cercato di fare con questo lavoro è stato analizzare quali sono i meccanismi che determinano le dinamiche dei flussi di carbonio nella faggeta di Collelongo e se, e con quale impatto, siano già visibili effetti dei cambiamenti climatici in atto a scala globale. Infatti, le risposte degli ecosistemi forestali, in particolare rispetto al sequestro di carbonio, giocano un ruolo importante proprio nella regolazione dei futuri cambiamenti climatici (Hui *et al.*, 2016).

I risultati per quanto riguarda i flussi sono stati ottenuti facendo delle analisi su varie scale. Nella prima, che chiameremo sinteticamente annuale, sono stati valutati i trend temporali e le relazioni che intercorrono tra grandezze mediate annualmente per tutti gli anni di studio. Nella seconda sono state messe a confronto le variabili a differente scala, qui brevemente indicata come semioraria, in cui sono state approfondite le relazioni più dettagliatamente, sempre tenendo in considerazione il data set analizzato che, comprendendo 15 anni di dati, tra il 2000 ed il 2015, consente di valutare risposte lungo un ampio spettro di condizioni climatiche.

Le serie temporali lunghe di assimilazione di carbonio, delle variabili meteorologiche e le caratteristiche dello stato dell'ecosistema possono essere utilizzate per analizzare le interazioni tra clima e processi ecosistemici. La comprensione dei *driver* che controllano la capacità degli ecosistemi terrestri di assorbire carbonio è estremamente importante nel contesto della variabilità climatica e dei cambiamenti climatici (Papale *et al.*, 2015).

L'analisi su scala annuale nel periodo 2000-2015 si è concentrata sullo studio dei trend temporali di diverse grandezze e sull'indagine delle relazioni tra le grandezze misurate.

La concentrazione di anidride carbonica in atmosfera, rilevata dalla stazione di monitoraggio di Collelongo tra il 2000 al 2015 mostra un aumento di questo gas di circa 25-30 ppm, coerentemente con quanto evidenziato dal *Climatic Research Unit* nel dicembre 2016 con l'HadCRUT 4 (*Hadley Centre of the UK compiled by the Climatic Research Unit*). Quindi, come era lecito aspettarsi, l'aumento di concentrazione atmosferica rilevato in stazioni remote si può riscontrare anche con misure fatte a livello

locale. L'aumento di concentrazione globale di CO₂ degli ultimi decenni, è il responsabile primario del cambiamento climatico che è in grado di influenzare direttamente il funzionamento degli ecosistemi.

Gli ecosistemi terrestri svolgono un ruolo molto importante, contribuendo a mitigare l'aumento di CO₂ atmosferica grazie alle loro capacità di assorbimento del carbonio. Questa capacità delle piante di catturare CO₂ è strettamente connessa al clima e ai cambiamenti delle maggiori variabili coinvolte come la temperatura e le precipitazioni, le quali possono comportare sia dei feedback positivi che negativi sugli ecosistemi come risposta ai cambiamenti climatici (Pilegard *et al.*, 2011).

Per quanto riguarda la temperatura dell'aria (Ta) possiamo dire che è stato trovato un trend negativo dal 2000 al 2010 (figura 39, paragrafo 4.1.3), trend che poi si è interrotto ed è diventato positivo tra il 2010 e il 2015. Gli stessi trend si evidenziano nelle medie mensili invernali al livello locale. A Collelongo, quindi, nel periodo di studio non si è evidenziato un trend unico di aumento diversamente da quanto trovato da Pilegard *et al.*, (2011), Jørgensen *et al.*, (2007).

Per quanto riguarda la variazione della lunghezza del periodo vegetativo il *leafed period*, nella stazione di Collelongo, sta aumentando in modo considerevole di circa 1.33 d yr⁻¹ diversamente da quanto segnalato da Pilegard *et al.*, (2011) che nella faggeta di Sorø hanno riscontrato un aumento non significativo di LP 0.32 d yr⁻¹ per il periodo 1999-2009. I dati della faggeta danese sono simili a quelli riportati per l'Europa (Menzel, 2000) in cui si è riscontrato che il cambiamento dell'inizio della primavera nella faggeta era -0.16 d yr⁻¹ e il prolungamento dell'autunno 0.18 d yr⁻¹, con un conseguente allungamento complessivo di LP di 0.34 d yr⁻¹. I dati dello studio europeo, provenienti da un'analisi di molti più siti, indicano però che il trend di aumento di durata del periodo vegetativo è significativo, come da noi riscontrato a Collelongo.

La *Net Ecosystem Exchange* (NEE) nella faggeta di Collelongo per il periodo 2000-2015 non mostra un trend in aumento, diversamente da quanto evidenziato da Pilegard *et al.*, (2011) per la faggeta di Sorø dove tra il 1996 e il 2009 è stato registrato un aumento medio di NEE di 23 gC m⁻² yr⁻¹, nonostante che, in quel sito, l'aumento del periodo vegetativo non fosse significativo. Per la faggeta di Collelongo, escludendo dalla regressione gli anni 2000 e 2009 (vedi paragrafo 4.2.2 figura 43e) emerge una relazione statisticamente significativa tra NEE e la lunghezza del periodo vegetativo stimata tramite l'indice EVI ($p = 0.009$, $R^2 = 0.6$). I due anni 2000 e 2009 sono caratterizzati da un alto *uptake* di carbonio, dovuto probabilmente ad una stagione particolarmente favorevole nella sua parte centrale. L'allungamento delle stagioni di crescita è in grado di far aumentare la produttività primaria lorda su scala regionale (Baldocchi *et al.*, 2016; Keenan *et al.*, 2014) questo è un aspetto che sarà approfondito successivamente.

Da Pilegard *et al.*, (2011) a Sorø è stata riscontrata una maggiore capacità di assorbimento come conseguenza dell'aumento della temperatura dell'aria, della concentrazione di CO₂ atmosferica e di una maggiore disponibilità di azoto. A Collelongo, la temperatura non sembrerebbe giocare un ruolo fondamentale su base annuale (il trend non è costante) e, al netto della variabilità interannuale, l'aumento della concentrazione di CO₂ potrebbe avere un ruolo. Come si vedrà in seguito nel nostro ecosistema gioca un ruolo importante la disponibilità idrica nel periodo vegetativo visto che, pur essendo montano, ci troviamo in condizioni mediterranee. Da segnalare infatti che un aumento delle precipitazioni in estate sia nell'anno in corso che nell'anno precedente hanno un effetto positivo sulla vitalità fogliare (Thomsen, 2008).

La risposta alla luce dello scambio di carbonio a livello di copertura riscontrata a Collelongo è ben descritta dalla cinetica di Michaelis-Menten (equazione 18), già utilizzata in passato per questo ecosistema (Matteucci 1998) quindi molto ben rappresentata dalle così dette curve di luce.

I parametri delle curve di luce sono: F_{inf} , che rappresenta il flusso massimo di carbonio a saturazione (assorbimento in piena luce); F_r che è il parametro che stima la respirazione dell'ecosistema e K_m che è il parametro che dà la pendenza iniziale della curva di luce (Hollinger *et al.*, 1994; Goulden *et al.*, 1996; Valentini *et al.*, 1996). F_{inf} è strettamente connesso all'assorbimento annuale ed infatti ha un andamento molto simile all'assorbimento di carbonio da parte della foresta, per K_m non si distingue nessun trend, mentre F_r , la respirazione, aumenta in modo significativo nel tempo ($p = 0.0002$, $R^2 = 0.69$, $R^2_{adj} = 0.66$), in parte come conseguenza della crescita della foresta (maggiore biomassa, maggiore respirazione).

Dopo aver elencato i trend delle principali variabili ambientali siamo andati ad indagare le relazioni che intercorrono tra queste grandezze e i flussi e rimanendo ancora nel contesto definito precedentemente di scala annuale, abbiamo visto che confrontando la NEE con le variabili ambientali, temperatura del suolo (T_s), temperatura dell'aria (T_a) e *vapour pressure deficit* (VPD), non sono emerse relazioni statisticamente significative in accordo con quanto descritto da Papale *et al.*, (2015), per i boschi di caducifoglie.

Quindi, quello che abbiamo voluto approfondire vista l'assenza di relazione diretta tra le variabili, è stato mettere in relazione i parametri delle curve di luce F_{inf} e F_r , che in un certo senso rappresentano rispettivamente l'assorbimento e la respirazione, sia tra loro che con le variabili ambientali e vedere così se ci fossero delle relazioni significative.

Dalla relazione tra i parametri delle curve di luce F_{inf} e F_r è emersa una correlazione significativa, che indica che gli anni in cui c'è maggiore assorbimento di C sono anche quelli in cui l'ecosistema respira di più. In altri termini, esiste una frazione della respirazione totale che è legata a quanto il sistema assorbe

in condizioni di piena luce. I due parametri, quindi, essendo calcolati nel periodo di massima foliazione, danno un'indicazione del "metabolismo" del nostro ecosistema.

Come detto precedentemente il parametro Fr , che sta ad indicare la respirazione, ha mostrato un aumento significativo nel tempo, inoltre se a questa relazione viene aggiunto, nel modello di simulazione, l'effetto della Ta si ha un miglioramento notevole passando $R^2_{adj} = 0.66$ nel modello senza Ta ad un $R^2_{adj} = 0.82$ nel modello che comprende Ta . Un aspetto molto interessante che emerge dall'analisi dei dati di Collelongo è che Fr aumenta all'aumentare della Ta fino al raggiungimento di un valore soglia di Ta di 20°C , oltre il quale Fr mostra un andamento decrescente.

Una spiegazione plausibile di questo risultato viene fornita dalle analisi su scala semioraria, che ci aiuta ad approfondire le analisi su scala annuale che, a volte, possono "mascherare" alcuni effetti delle variabili ambientali sull'assorbimento di carbonio.

Analizzando la risposta della Respirazione dell'ecosistema modellizzata derivante dal database Fluxnet RecoNT, (*Ecosystem Respiration, from Nighttime partitioning method*, Reichstein *et al.*, 2005) si è visto come per questa variabile ci sia stato nel tempo un trend positivo di $21 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ con un R^2 di 0.75 e un $p = 0.0001$ in accordo con quanto trovato da Pilegard *et al.*, (2011). La Reco se messa in relazione con la Ta misurata a Collelongo tende ad aumentare come ci si aspetterebbe (Law *et al.*, 2002), ma solo fino ad una certa soglia di Ta (20°C) oltre la quale la RecoNT diminuisce, come detto precedentemente anche per Fr . Allo stesso modo la respirazione notturna misurata (dati semiorari di NEE) messa in relazione con Ta misurata restituisce lo stesso andamento. Questi analoghi risultati ci fanno ipotizzare che ci sia un'inibizione della respirazione alle temperature più alte, probabilmente legata a situazioni di stress idrico che spesso sono correlati all'aumento della Ta . Da precedenti lavori svolti in questo sito (Matteucci 1998) si è visto come ci fosse una forte relazione tra la respirazione e la temperatura del suolo (Ts) questo risultato è in accordo con la nota relazione positiva tra respirazione del suolo e dell'ecosistema e Ts (Matteucci *et al.*, 2000; Reichstein *et al.*, 2002; Joffre *et al.*, 2003). Anche dalla nostra analisi, su tutti gli anni, è emerso che la dipendenza della respirazione da Ts è significativa sia in inverno che nel Periodo Vegetativo Massimo (PVM) e questo aumento è più marcato nel PVM. Da segnalare che, per l'ecosistema di Collelongo, anche per la respirazione del suolo si è riscontrata una stabilità o una diminuzione all'aumentare della temperatura quando accompagnata da situazioni di stress idrico (Matteucci *et al.*, 2000; Guidolotti *et al.*, 2013).

La luce (PPFD) è una variabile ambientale che esercita un'importante azione sui flussi (Law *et al.*, 2002; Aires *et al.*, 2008) in cui viene evidenziata la relazione che lega NEE e GPP a PPFD. Il suo effetto a scala semioraria è chiaramente dimostrato dalle curve di luce descritte precedentemente, per studiare

l'effetto delle variabili quali temperatura dell'aria (T_a), temperatura del suolo (T_s) e *vapour pressure deficit* (VPD) sui flussi è stato "sottratto" l'effetto della luce.

Mettendo in relazione i residui derivanti dalla curva di luce cumulata di tutti gli anni con le variabili ambientali T_a , T_s e VPD, è emerso che le tre variabili misurate, oltre una certa soglia hanno un effetto negativo sui flussi. Infatti i flussi hanno un trend decrescente che diventa ancora più evidente oltre una certa soglia ($T_s > 12^\circ\text{C}$, $T_a > 20^\circ\text{C}$, $\text{VPD} > 10\text{kPa}$). Questo effetto graficamente è appena visibile per T_s , è un po' più marcato per T_a ed è abbastanza netto per VPD. In piena stagione vegetativa, quindi l'assorbimento netto è risultato inibito dalle alte temperature e soprattutto da alti valori di VPD. Questo suggerisce che l'assorbimento netto è inibito in situazioni di stress idrico.

A questo punto la domanda è: lo stress idrico inibisce l'assorbimento perché inibisce la fotosintesi, perché aumenta la respirazione o per un effetto combinato su fotosintesi e respirazione? Per rispondere a questa domanda si è indagato l'effetto delle variabili ambientali separatamente, usando un approccio simile a quanto fatto per la NEE e trovando risultati molto simili (la GPP usata è stata GPPNT *Gross Primary Production from Nighttime partitioning method*, Reichstein *et al.*, 2005) ottenuta dal database Fluxnet. Oltre al fatto che la GPP dipende chiaramente da PPFD, come la NEE, un altro risultato è stato che anche per la GPP c'è un effetto negativo soprattutto per valori di $\text{VPD} > 10\text{ kPa}$.

Integrando le due tipologie di analisi, da quella su scala semioraria emerge che alta VPD e alta T_a in situazione di stress idrico fanno diminuire sia la fotosintesi che la respirazione, ma la fotosintesi subisce una maggiore inibizione che determina anche una diminuzione dell'assorbimento netto. Dall'analisi su scala annuale fatta nel periodo di massima foliazione (curve di luce) emerge che assorbimento e respirazione sono collegate. Tutto questo suggerisce che lo stress idrico agisce sul metabolismo complessivo dell'ecosistema (fotosintesi e respirazione) e che la frazione di respirazione che viene inibita sia proprio quella relativa alla metabolizzazione e al trasferimento dei prodotti della fotosintesi. Quindi a Collelongo un'alta temperatura dell'aria, se accompagnata da alta VPD e stress idrico comporta una diminuzione della fotosintesi, della respirazione e, in definitiva, dell'assorbimento netto (Reichstein *et al.*, 2007; Yi *et al.*, 2010; Delpierre *et al.*, 2012; Guillemot *et al.*, 2015). A questo proposito, Yi *et al.*, (2010) riportano che l'81% della variazione spaziale di NEE può essere determinato da indici di stress idrico alle latitudini di Collelongo, mentre in altri ecosistemi, in particolare quelli boreali le stesse temperature che da noi inibiscono l'assorbimento, potrebbero invece essere favorevoli (Yi *et al.*, 2010). Da qui la necessità di considerare ogni ecosistema singolarmente e attentamente per poter spiegare al meglio la dinamica dei flussi. Quello che siamo portati a pensare è che gli incrementi di produttività che potrebbero esserci sotto un'elevata CO_2 atmosferica, possono essere parzialmente compensati dalla riduzione di produttività causata dallo stress idrico indotto dal riscaldamento globale (Rustad *et al.*,

2001; Lu *et al.*, 2013; Hui *et al.*, 2017)., E sono necessari studi sperimentali che incorporano più fattori climatici.

Abbiamo visto come le variabili ambientali influenzino la dinamica dei flussi nella faggeta di Collelongo, ora analizziamo come, a livello complessivo, la faggeta si comporti a livello di *sink*. Le foreste svolgono un ruolo importante nel sequestro del carbonio e per le foreste Europee è notevole la media a lungo termine di carbonio sequestrato (Luyssaert *et al.*, 2010). La faggeta di Collelongo ha agito come un importantissimo *sink* che in media ha sequestrato $660 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$.

Discussione dei risultati che riguardano l'Aeromobile a Pilotaggio Remoto (APR)

Nell'ottica dello studio degli ecosistemi forestali, anche nel quadro dei cambiamenti climatici in atto, si è voluto testare il Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto (SAPR) per il monitoraggio prossimale della vegetazione forestale. Il lavoro svolto in questa tesi con il drone è un lavoro preliminare che consentirà in futuro di approfondire sia le risposte in condizioni "normali" che in eventuali situazioni critiche per il faggio, estendendo anche i risultati dell'analisi prossimale ad una analisi su scala più ampia.

La realizzazione del drone stesso è stato il risultato di un'attenta analisi di mercato e di approfondimenti tecnici molto rilevanti. La scelta di orientarsi verso un prodotto autocostruito è stata dettata dalla necessità di avere la completa versatilità e quindi la possibilità di sostituire componenti meccanici e sensori radiometrici in base al tipo di sorvolo da effettuare anche in un'ottica di campagne di misura future. La scelta di realizzare un drone a sei rotori è dipesa dall'equilibrio tra *payload*, potenza, stabilità, sicurezza. Particolare attenzione è stata posta agli aspetti legati alla stabilità del drone, in quanto monta sensori delicati, che necessitano di una giusta stabilità di volo e che non possiedono al loro interno dispositivi per risolvere i problemi relativi alla distorsione ottica. Il drone costruito nell'ambito di questo dottorato permette di sollevare attualmente più di 2 Kg di peso per un tempo che va da 20 ai 25 minuti a seconda delle condizioni atmosferiche e del tipo di operazione richiesta. Sul mercato ad oggi sono già disponibili nuove motorizzazioni con eliche a più alta prestazione che consentono di sollevare pesi maggiori per singolo motore, grazie all'auto costruzione sarà possibile modificare l'APR in qualsiasi momento ed adattarlo alle rinnovate esigenze scientifiche.

La fotocamera digitale ha anche permesso di facilitare le operazioni di decollo e atterraggio non semplici in foresta, ci ha permesso di approfondire particolari delle chiome come dimensione, forma, sovrapposizione, branche essiccate e condizioni ambientali circostanti che altrimenti non sarebbe stato possibile vedere. Lo scopo di questo strumento sarà anche quello di ottenere un modello 3D da semplici fotografie perché il miglior modo che abbiamo oggi per una corretta documentazione di un qualsiasi oggetto è il rilievo tridimensionale, poiché consente di ricreare un modello virtuale sostanzialmente

identico all'originale, metricamente corretto e fotorealistico, in questo contesto ci potrà essere utile per studiare le dimensioni delle chiome nel tempo o per valutarne i cambiamenti durante la stagione vegetativa, nonché per avere informazioni sull'entità dei danni in tempo reale, causati da eventuali attacchi parassitari o da gelate tardive come quella del 2016.

L'utilizzo della camera multispettrale ADC micro della Tetracam ha permesso di ottenere, tramite l'elaborazione delle immagini con il software PixelWrench2, i valori di NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) nei punti di sorvolo del nostro ecosistema. L'elaborazione di questi valori ha restituito l'andamento di questo indice durante la stagione vegetativa, facendo emergere trend temporali legati alla stagionalità e anche a risposte di più breve termine. Inoltre come mostrato in figura 74 si può vedere che indicativamente, intorno ai giorni 270-275, risultava avviata la chiusura della stagione vegetativa perché l'indice NDVI scende da una media di 0.7 – 0.8 a valori di 0.3 – 0.4, che è coerente con quanto registrato anche dalla misura dei flussi di carbonio in cui si può vedere che inizia la chiusura della stagione vegetativa anche per la NEE passando da valori medi di -5 -10 gC m⁻² nei giorni appena precedenti il periodo indicato, a valori positivi compresi tra 0 e 5 gC m⁻² nei giorni successivi. Dati simili sono stati rilevati tramite l'indice EVI.

L'indice NDVI ricavato dai sorvoli con il drone, anche non ripetuti quotidianamente e in punti differenti, ma sempre all'interno del nostro ecosistema, ha restituito un andamento coerente e rappresentativo dei processi stagionali messi in atto dalla faggeta, attestando la buona capacità di rilievo multispettrale da drone, pur utilizzando un sensore *lowcost* ma di discreta qualità. La sperimentazione in questo ecosistema forestale, ha permesso di validare l'efficacia di questa camera multispettrale ad alta risoluzione, molto utilizzata negli ultimi anni per interventi di agricoltura di precisione, per la valutazione delle colture che potrebbe anche permettere di eliminare del tutto i rilievi a terra (Candiago *et al.*, 2015).

L'indice PRI (*Photochemical reflectance index*) (Gamon *et al.*, 1992; Gamon *et al.*, 1997), ottenuto dagli "*spectral reflectance sensors*" (SRS sensors della Decagon Devices) montati su drone, è stato calcolato in base alla formula dell'equazione 24. Ciò che è risultato particolarmente interessante è la capacità che ha l'indice PRI di rilevare la modifica della clorofilla (Wong e Gamon, 2015, a, b): questi pigmenti che cambiano (e quindi cambia il PRI) sono in grado di fornire un indice di attivazione fisiologico, un processo che è difficile da individuare ad occhio nudo o con il telerilevamento ottico convenzionale (Gamon *et al.*, 2015).

Il PRI fornisce una marcata sensibilità nell'indicare le alterazioni della pigmentazione associate all'attività fotosintetica, ma in modi diversi e con meccanismi diversi. Questi meccanismi contrastanti sono definiti da Gamon *et al.*, (2015) "*facultative*", quelli che si riferiscono al *diurnal xanthophyll activity*

e “*constitutive*” quelli riferiti al *longer-term pigment pool size shifts* (Gamon e Berry, 2012; Wong e Gamon, 2015a). Wong e Gamon (2015a) hanno riportato che il segnale PRI durante la stagione riferisce un cambio di pool dei pigmenti, mentre nel corso di una giornata PRI rileva l'attività diurna del ciclo delle xantofille. Questo è rilevante per studi di telerilevamento come il nostro, che utilizza PRI come indicatore dell'attività fotosintetica o dell'efficienza d'uso della luce, e indica che il significato di PRI cambia con il contesto temporale dello studio (Gamon *et al.*, 2015). Dall'analisi dei valori di PRI abbiamo potuto ricostruire l'andamento durante la stagione vegetativa per l'anno 2015 come mostrato in figura 75. I due andamenti a confronto, PRI e NDVI telerilevati con il drone hanno mostrato un comportamento complementare su scala stagionale (Soudani *et al.*, 2014), statisticamente significativo ($R^2 = 0.73$ e $p = 0.007$).

Dalle variabili rilevate a terra (NEE, Ta, SWC) si è potuto vedere come nei giorni che precedevano i giorni intorno al 250 (si è volato nel giorno 253), a seguito di un evento piovoso (innalzamento SWC), avvenuto in concomitanza con una diminuzione di circa 7°C della Ta tra i giorni 245 e 253, ci sia stato un aumento se pur di poco della NEE tra il giorno 245 e il 252, mentre dai dati di PAR telerilevati dal drone si è potuto vedere come il giorno 253, durante il periodo di volo fosse caratterizzato da una copertura nuvolosa (diminuzione di PAR diretta e PAR riflessa). Quanto descritto è in coerenza con un aumento di fotosintesi legato alla maggiore disponibilità idrica e diffusione della luce all'interno della copertura. Questo sembrerebbe essere stato rilevato anche dal PRI che ha innalzato nuovamente i suoi valori nel giorno 253. In generale, per i diversi giorni volati, dalla relazione tra la NEE_{mid} (cioè NEE medio tra le ore 10:00 e le ore 14:00) e il PRI abbiamo trovato una correlazione statisticamente significativa con un $R^2 = 0.68$ e un $p = 0.02$.

6 CONCLUSIONI

Le risposte ai cambiamenti climatici degli ecosistemi forestali, con particolare riguardo alla funzione che svolgono nel sequestrare il carbonio, giocano un ruolo importante proprio nella regolazione dei futuri cambiamenti del clima, si possono attivare meccanismi di retroazione positiva o negativa. Quindi in questo contesto, analizzare i meccanismi che determinano le dinamiche dei flussi di carbonio e come questi ultimi siano influenzati dai cambiamenti climatici è estremamente importante.

Anche nel sito studiato, si è evidenziato l'incremento di concentrazione di anidride carbonica in atmosfera in corso a livello globale. Tra il 2000 ed il 2015, l'incremento è stato di 25-30 ppm, che è un dato coerente con il tasso di incremento globale. Nel periodo di studio, la temperatura non ha mostrato un trend univoco in aumento, quanto piuttosto due trend, uno in diminuzione dal 2000 al 2010 e uno in aumento dal 2010 al 2015. Si evidenzia anche una discreta variabilità interannuale, come ci si attende in siti montani. Pur non evidenziandosi un aumento univoco di temperatura, la stagione vegetativa derivata dall'indice satellitare EVI è risultata in aumento significativo, con un tasso pari a 1.33 d yr^{-1} : la differenza tra la stagione 2000 e quella 2015 è di circa 20 giorni in più. Prendendo in considerazione l'intero periodo di studio e gli anni con maggiore copertura di dati, lo scambio netto di carbonio (NEE) non ha però mostrato un trend verso il maggiore assorbimento. Tuttavia, escludendo due anni particolarmente favorevoli, il 2000 e 2009, in cui l'alto *uptake* di carbonio è legato probabilmente a condizioni particolarmente favorevoli nella stagione vegetativa, sebbene più "corta" rispetto al trend di costante aumento della stessa, si identifica un incremento medio annuo di circa $30 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$. Diversamente da NEE, per la Respirazione di ecosistema (Reco) è stato trovato un trend in aumento, con un tasso annuale medio pari a $21 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$. Tale aumento è da mettere in relazione all'aumento della biomassa del sito e, anche alla stagione vegetativa più lunga che è sì funzionale alla fotosintesi, ma è anche il periodo in cui la Reco mostra comunque i tassi più alti, in risposta alla temperatura e al metabolismo di accrescimento. Dall'analisi delle dinamiche di risposta dei flussi istantanei nel periodo di massima "efficienza" del bosco (EVI e LAI al massimo, foglie mature), abbiamo riscontrato che gli anni in cui c'è maggiore assorbimento di C sono anche quelli in cui l'ecosistema respira di più, anche in relazione alla frazione della respirazione totale che è legata a quanto il sistema assorbe in condizioni di piena luce. In piena stagione vegetativa, l'assorbimento netto è risultato limitato dalle alte temperature, soprattutto in corrispondenza di alti valori di VPD: questo suggerisce che l'assorbimento netto della faggeta di Collelongo è inibito in situazioni di stress idrico. Questo conferma, su un'analisi che ha preso in considerazione un periodo rilevante, quanto si era visto in alcuni anni (Valentini *et al.*, 1996; Matteucci *et al.*, 2000; Guidolotti *et al.*, 2013) e quanto riportato per gli ecosistemi alle latitudini di Collelongo il cui assorbimento netto risulta influenzato maggiormente dalla disponibilità di acqua (Yi *et al.*, 2010). Nel pieno della stagione vegetativa, sembrano potersi identificare delle soglie per

temperatura dell'aria, del suolo e del VPD oltre le quali iniziano a manifestarsi fenomeni di limitazione dello scambio di carbonio ($T_s > 12^\circ\text{C}$, $T_a > 20^\circ\text{C}$, $\text{VPD} > 10\text{kPa}$).

Collelongo è comunque risultato essere un importante *sink* di carbonio che nel corso degli anni ha stoccato in media $660\text{ gC m}^{-2}\text{ yr}^{-1}$. La variabilità interannuale appare un fattore importante, ma, pur non avendo verificato un trend significativo per la fotosintesi, il prolungarsi della stagione vegetativa, se accoppiato con l'aumento di CO_2 atmosferica e una maggiore disponibilità di azoto per mobilitazione di quello nel suolo e aumento delle deposizioni azotate, potrebbero riflettersi con un aumento dell'assorbimento di carbonio da parte della foresta che andrà valutato nel lungo termine anche in relazione ad altri fattori limitanti. A questo proposito, visto l'importante ruolo della disponibilità idrica e delle alte temperature nel regolare lo scambio di carbonio, si segnala che i previsti cambiamenti climatici, che oltre all'aumento della temperatura, potrebbero vedere una riduzione delle precipitazioni estive, avranno sicuramente un impatto importante nei siti montani mediterranei. Il proseguimento delle ricerche, in corso a Collelongo da 25 anni, su diversi parametri ecologici, consentiranno di poter valutare l'effettivo esplicarsi dei cambiamenti climatici in questo tipo di foreste

In questo quadro, si potrà anche contare sull'uso di sistemi di rilevamento dinamici, come i droni. Quanto svolto a Collelongo con il drone è un contributo preliminare, ma significativo, che contribuirà in futuro all'approfondimento dei meccanismi a scala locale legati a situazioni critiche per il faggio e per altre tipologie forestali, come abbondanti piogge durante la primavera o eventi siccitosi in estate, situazioni che potranno influenzare negativamente la crescita e la competitività del faggio che non necessariamente sarà in grado di beneficiare della maggiore concentrazione di CO_2 in atmosfera (Geßler 2007). Quello che si intende fare è estendere le analisi prossimali ad una scala più ampia, grazie alle grandi potenzialità che gli indici ottici di vegetazione possiedono.

RINGRAZIAMENTI

Vorrei esprimere un ringraziamento particolare al Dr Giorgio Matteucci per avermi offerto questa grande possibilità e per avermi sostenuto durante tutto il percorso ed in particolare in un momento molto difficile della mia vita. Un altro ringraziamento particolare lo rivolgo al Dr Mario Cammarano che ha saputo sostenermi e guidarmi con leggerezza ed empatia, il suo sostegno, il suo rispetto, e le sue conoscenze di modellistica sono state fondamentali per la riuscita di questo lavoro. Desidero ringraziare il Dr Ettore D'Andrea compagno di missioni a Collelongo per il grande e qualificato supporto che in questi anni ha saputo offrire ad ogni attività, Inoltre ringrazio sentitamente tutto il gruppo ECODISF e in particolare Il Dr De Cinti, il Dr Bombi, la Dr.ssa Sicuriello. Un ringraziamento è rivolto anche al Dr Marco Bascietto del CREA per il grande sostegno in un particolare momento di analisi dei dati. Ringrazio sentitamente anche tutto il personale dell'Istituto di Biologia Agro-ambientale e Forestale (IBAF) del C.N.R sia di Montelibretti che di Porano per l'ospitalità, in particolare voglio ringraziare tutti coloro che hanno contribuito con le proprie energie a questo lavoro. Si rivolge immensa gratitudine a Floriano e Roberta e a Renato e Roberta rispettivamente di Villavallelonga e Collelongo per il supporto tecnico e logistico. Desidero ringraziare la Dr.ssa. Enrica Nestola per l'amicizia, il supporto e la sincera compagnia di questi anni.

7 BIBLIOGRAFIA

Aires, L. M. I., Pio, C. A., and Pereira, J. S.: Carbon dioxide ex-change above a Mediterranean C3/C4 grassland during two climatologically contrasting years, *Glob. Change Biol.*, 14, 539–555, **2008**.

Aubinet M., Grelle A., Ibrom A., Rannik U., Moncrieff J., Foken T., Kowalski A.S. Martin P.H., Berbigier P., Bernhofer Ch., Clement R., Elbers J., Granier A., Grunwald T., Morgenstern K., Pilegaard K., Rebmann C., Snijders W., Valentini R. and Vesala T.,**2000**. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Adv. Ecol. Res.* 30, pp. 113–175.

Aubinet M., Vesala T., & Papale D. **2012**. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis. London: Springer

Baird C. & Cann M. (2006) *Chimica ambientale* p.119-124.

Baldocchi D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 9(4), 479–492. doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x

Baldocchi D., Ryu Y., Keenan T., **2014.** Terrestrial Carbon Cycle Variability. *F1000Research* doi: 10.12688/f1000research.8962.1.

Barilotti A.,Turco S.,Napolitano R.,Bressan E., **2005.** La tecnologia LiDAR per lo studio della biomassa negli ecosistemi forestali. *Atti del XV Congresso della Società Italiana di Ecologia*, Torino.

Barr, A.G., Gri_s, T.J., Black, T.A., Lee, X., Staebler, R.M., Fuentes, J.D., Chen, Z., & Morgenstern, K. **2002.** Comparing the carbon budgets of boreal and temperate deciduous forest stands. *Can. j. forest res.*, 813{822.

Barton CVM, North PRJ. **2001,** “Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index, model and sensitivity analysis”, *Remote sensing of Environment*, 78: 264-273

Burba G. & Anderson D. 2006 A brief practical guide to eddy covariance flux measurements

Burba, G., & Anderson, D. 2010. A brief practical guide to eddy covariance flux measurements: principles and workflow examples for scientific and industrial applications. Lincoln: Li-Cor Biosciences.

Candiago S., Remondino F., De Giglio M., Dubbini M., and Gattelli M. 2015. Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sens.* **2015**, 7(4), 4026-4047; doi:10.3390/rs70404026

Chapin F.S. et al. **2006**. Reconciling Carbon-cycle Concepts, Terminology, and Methods. *Ecosystems* 9: 1041–1050

Chiti, T.; Papale, D.; Smith, P.; Dalmonech, D.; Matteucci, G.; Yeluripati, J.; Rodeghiero, M.; Valentini, R. **2010**. Predicting changes in soil organic carbon in mediterranean and alpine forests during the Kyoto Protocol commitment periods using the CENTURY model. *Soil Use Manag.* 26, 475–484.

Cleveland, R.B., Cleveland, W.S., McRae, J.E., Terpenning, I., **1990**. Stl: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *J. Off. Stat.* 6 (1), 3–33.

Curtis, P. S., Hanson, P. J., Bolstad, P., Barford, C., Randolph, J. C., Schmid, H. P., & Wilson, K. B. **2002**. Biometric and eddy-covariance based estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests, 113, 3–19.

Delpierre, N., Soudani, K., François, C., Le Maire, G., Bernhofer, C., Kutsch, W., et al. **2012**. Quantifying the influence of climate and biological drivers on the interannual variability of carbon exchanges in European forests through process-based modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 154–155, 99–112.

Falge, E., Tenhunen, J., Baldocchi, D., Aubinet, M., Bakwin, P., Berbigier, P., et al. **2002**. Phase and amplitude of ecosystem carbon release and uptake potentials as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 75–95.

Falkowski, P. Scholes, R.J. Boyle, E. Canadell, . Canfield, D. Elser, J. Gruber, N. Hibbard, K. Hogberg, P. Linder, S. Mackenzie, F.T. Moore, B. Pedersen, T. Rosenthal, Y. Seitzinger, S., Smetacek, V. Steffen, W. **2000**. The global carbon cycle: a test of our knowledge of Earth as a system. *Science* 290 291-296.

Foken, T. **2008**. Micrometeorology. Berlin: Springer.

Gamon J.A., Peñuelas J., Field C.B. **1992**, “A narrow wave band spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency”, *Remote Sensing of Environment*, 41: 35-44

Gamon, J. A., Serrano, L., and Surfus, J. S.: The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels, *Oecologia*, 112, 492–501, doi:10.1007/s004420050337, **1997**.

Gamon, J. A. and Berry, J. A.: Facultative and constitutive pigment effects on the Photochemical Reflectance Index (PRI) in sun and shade conifer needles, *Isr. J. Plant Sci.*, 60, 85–95, doi: 10.1560/ijps.60.1-2.85, **2012**.

Gasparini P., Tabacchi G. (a cura di) **2011** – L’Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio INFC 2005. Secondo inventario forestale nazionale italiano. Metodi e Risultati. Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali, Corpo Forestale dello Stato; Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Edagricole, Milano

Geßler A., Keitel C., Kreuzwieser J., Matyssek R., Seiler W., Rennenberg H - Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees* **2007** 21:1–11 DOI 10.1007/s00468-006-0107-x

Goulden M.L., Munger J., Fan W., Song-Miao, Daub B.C., Wosfy S.C., **1996**. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology* 2: 169-182.

Guidolotti, G., Rey, A., D’Andrea, E., Matteucci, G., De Angelis, P., **2013**. Effect of environmental variables and stand structure on ecosystem respiration components in a Mediterranean beech forest. *Tree Physiol.* 33, 960–972.

Guillemot J., Martin-St Paul N. K., Dufrene E., François C., Soudani K., Ourcival J. M., Delpierre N. **2015**. The dynamic of the annual carbon allocation to wood in European tree species is consistent with a combined source–sink limitation of growth: implications for modelling. *Biogeosciences* 12:2773–2790

Hofmann A., **1991**. Il Faggio e le faggete in Italia. Collana verde 81: 140 pp M.A.F., Roma.

Hollinger D.Y., Kelliher F.M., Byers J.N., Hunt J.E., McSeveny T.M., Weir P.L. **1994**. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology* **75**: 134-150

Hui D., Deng Q., Tian H., and Luo Y., **2017**. Climate Change and Carbon Sequestration in Forest Ecosystems. Springer International Publishing Switzerland, Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation, DOI 10.1007/978-3-319-14409-2_13 Contents

IPCC, **2001**. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001). In: McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS. Climate Change 2001, Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC, 2013. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Joffre, R., Ourcival, J.M., Rambal, S., Rocheteau, A., **2003.** The key-role of topsoil moisture on CO₂ efflux from a Mediterranean Quercus ilex forest. *Annals of Forest Science* 60, 519–526.

Jørgensen, A.M.K., Cappelen, J., **2007.** Klimaændringer de seneste 150A° r. *Aktuel.Nat.*

3, 10–14.

Keenan T.F., Darby B., Felts E., et al.: Tracking forest phenology and seasonal physiology using digital repeat photography: A critical assessment. *Ecol Appl.* **2014;** 24 (6): 1478–89.

Kljun, N., Calanca, P., & Rotach, M. **2004.** A simple parameterisation for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorology*, 112, 503–523.

Larcher W. 1983 Physiological Plant Ecology. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 400 pp

Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Friedlingstein, P., Peters, G. P., Andres, R. J., Boden, T. A., Houghton, R. A., House, J. I., Keeling, R. F., Tans, P., Arneeth, A., Bakker, D.C.E., Barbero, L., Bopp, L., Chang, J., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Fader, M., Feely, R. A., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Ilyina, T., Jain, A. K., Kato, E., Kitidis, V., Klein Goldewijk, K., Koven, C., Landschützer, P., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Lenton, A., Lima, I. D., Metzl, N., Millero, F., Munro, D. R., Murata, A., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S., Nojiri, Y., O'Brien, K., Olsen, A., Ono, T., Pérez, F. F., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Rödenbeck, C., Saito, S., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Steinhoff, T., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tilbrook, B., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., van Heuven, S., Vandemark, D., Viovy, N., Wiltshire, A., Zaehle, S., and Zeng, N.: Global Carbon Budget 2015, *Earth Syst. Sci. Data*, 7, 349–396, doi:10.5194/essd-7-349-**2015**.

Le Quéré, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Manning, A. C., Boden, T. A., Tans, P. P., Houghton, R.A., Keeling, R. F., Alin, S., Andrews, O. D., Anthoni, P., Barbero, L., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Currie, K., Delire, C., Doney, S. C., Friedlingstein, P., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Hoppema, M., Klein Goldewijk, K., Jain, A. K., Kato, E., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Melton, J. R., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S., O'Brien, K., Olsen, A., Omar, A. M., Ono, T.,

119

Pierrot, D., Poulter, B., Rödenbeck, C., Salisbury, J., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tian, H., Tilbrook, B., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J., and Zaehle, S. **2016** "Global Carbon Budget 2016", Earth System Science Data, 8, 605-649, <http://dx.doi.org/10.5194/essd-8-605-2016>

Law, B.E., et al. 2002, Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation, Agric. For. Meteorol., 113, 97–120.

Lu M., Zhou XH., Luo Y et al., 2013. Responses of ecosystem carbon cycle to experimental warming: a meta-analysis. Ecology 94:726–738

Luyssaert, S., Ciais, P., Piao, S.L., Schulze, E.D., Jung, M., Zaehle, S., Schelhaas, M.J., Reichstein, M., Churkina, G., Papale, D., Abril, G., Beer, C., Grace, J., Loustau, D., Matteucci, G., Magnani, F., Nabuurs, G.J., Verbeck, H., Sulkava, M., van der Werf, G.R., Janssens, I.A., 2010. The European carbon balance. 3. Forests. Global Change Biol. 16, 1429–1450

Masci A., 1995. Caratteristiche strutturali e selvicolturali in una faggeta Appenninica d'Abruzzo. Tesi di Laurea, Università degli Studi della Tuscia, Viterbo

Masci A., 2002. Biomassa, produttività primaria netta e mineralomassa in una faggeta dell'Appennino centrale. Tesi di Dottorato in Ecologia Forestale, 14° ciclo. Università degli Studi di Padova.

Massman, WJ., & Lee, X. 2002. Eddy covariance ux corrections and uncertainty in long term studies of carbon and energy exchanges. Agricultural and forest meteorology, 121{144.

Matteucci G., 1998. Bilancio del Carbonio in una Faggeta dell'Italia Centro-Meridionale: Determinanti Ecofisiologici, Integrazione a Livello di Copertura e Simulazione dell'Impatto dei Cambiamenti Ambientali. Tesi dottorato, Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova. Sede Consorzata: Università degli Studi della Tuscia, Viterbo

Matteucci G., De Angelis P., Dore S., Masci A., Valentini R., Scarascia - Mugnozza G., 1999. Il bilancio del carbonio delle faggete: dall'albero all'ecosistema. In: Scarascia Mugnozza G.(edit.) Ecologia strutturale e funzionale di faggete italiane. Edagricole, pp. 133-183.

Matteucci, G., Dore, S., Stivanello, S., Rebmann, C., Buchmann, N., 2000. Soil respiration in beech and spruce forests in Europe, annual budgets and implications for the ecosystem carbon balance, in: Schulze, E.D. (Ed.), Carbon and Nitrogen Cycling in European Forest Ecosystems. Springer, Berlin, pp. 217–236.

McDonough, J. 2007. Introductory Lectures on Turbulence. Lexington: University of Kentucky.

Menzel, A., 2000. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996.

Int. J. Biometeorol. 44, 76–81.

Merbold, L., Rogiers, N., & Eugster, W. 2012. Winter CO₂ fluxes in a sub-alpine grassland in relation to snow cover, radiation and temperature. Biogeochemistry, 111(1-3), 287-302.

Moore, C. J. 1986. Frequency-response corrections for eddy-correlation systems. Boundary-Layer Meteorology 37 (1-2), 17-35

Moran, M.S., Inoue, Y. and Barnes, E.M. 1997, Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management, Remote Sensing of Environment 61: 319-346;

Morsdorf, F., Meier, E., Koetz, B., Nüesch, D., Itten, K., Allgöwer, B. 2003. The potential of high resolution airborne laser scanning for deriving geometric properties of single trees. In EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Nice, France

Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., et al. 2006. Towards a more harmonized processing of eddy covariance CO₂ fluxes: algorithms and uncertainty estimation. Biogeosciences, 3, 571-583.

Papale, D., Migliavacca, M., Cremonese, E., Cescatti, A., Alberti, G., Balzarolo, M., Beletti Marchesini, L., Canfora, E., Casa, R., Duce, P., Facini, O., Galvagno, M., Genesio, L., Gianelle, D., Magliulo, V., Matteucci, G., Montagnani, L., Petrella, F., Pitacco, A., Seufert, G., Spano, D., Stefani, P., Vaccari, F., Valentini, R., 2015. Carbon, Water and Energy Fluxes of Terrestrial Ecosystems in Italy. Springer-Verlag Berlin Heidelberg R. Valentini and F. Miglietta (eds.), *The Greenhouse Gas Balance of Italy*, Environmental Science and Engineering, DOI 10.1007/978-3-642-32424-6_2

Paris Agreement on Climate Change (2015). Adopted text. UNFCCC/CP/2015/L.9rev.1. Paris, France, December 12, 2015.

Peñuelas, J., Filella, I., and Gamon, J. A. 1995: Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance, New Phytol., 131, 291–296, doi:10.1111/j.1469-8137.1995.tb03064.x.

Reichstein, M., Tenhunen, J.D., Rouspard, O., Ourcival, J.M., Rambal, S., Dore, S., Valentini, R., 2002. Ecosystem respiration in two Mediterranean evergreen Holm Oak forests: drought effects and decomposition dynamics. Functional Ecology 16, 27–39.

Reichstein M., Falge E., Baldocchi D., Papale D., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Gilmanov T., Granier A., Grunwald T., Havrankova K., Ilvesniemi H., Janous D., Knohl A., Laurila T., Lohila A., Loustau D., Matteucci G., Meyers T., Miglietta F., Ourcival J.-M., Pumpanen J., Rambal S., Rotenberg E., Sanz M., Tenhunen J., Seufert G., Vaccari F., Vesala T., Yakir D., and Valentini R.: On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm, *Global Change Biol.*, 11, 1424–1439, **2005**.

Reichstein, M., Papale, D., Valentini, R., Aubinet, M., Bernhofer, C., Knohl, A., Laurila, T., Lindroth, A., Moors, E., Pilegaard, K., Seufert, G., **2007**. Determinants of terrestrial ecosystem carbon balance inferred from European eddy covariance flux sites. *Geophysical Research Letters*, 34.

Reynolds, O. 1895. On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 123-164.

Rijks, D., 1995. The use of remote sensing techniques in Agrometeorological practices: some activities by members of the EU Support Group Agrometeorology (SUGRAM) in respect of Low Resolution Satellite Data and Quantitative Yield Assessment. Workshop COST 77, Edited by Zoltan Dunkel, Budapest, Hungary; pp. 141-173;

Rouse J.W., R.H. Haas, J.A. Shell, D.W. **1974**. Deering and J.C. Harlan, Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Final Report, Type III, NASA/GSFC, Greenbelt, MD.

Rustad LE, Campbell JL, Marion GM et al., 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126:543–562

Saleska, S.R., Miller, S.D., Matross, D.M., Goulden L., M., Wofsy, S.C., da Rocha, H.R., de Camargo, P.B., P., Crill, Daube, B.C., de Freitas, H.C., Huttyra, L., Keller, M., Kirchho_, V., Menton, M., Munger, J.W., Pyle, E.H., Rice, A.H., & Silva, H. **2003**. Carbon in amazon forests: unexpected seasonal uxes and disturbance induced losses. *Science*, 1554{1557.

Scartazza, A.; Di Baccio, D.; Bertolotto, P.; Gavrichkova, O.; Matteucci, G. **2016**. Investigating the European beech (*Fagus sylvatica* L.) leaf characteristics along the vertical canopy profile: leaf structure, photosynthetic capacity, light energy dissipation and photoprotection mechanisms. *Tree Physiol*, 31, 1–17.

Schimel D.S., House J.I., Hibbard K.A., Bousquet P., Ciais P., Peylin P., Braswell B.H., Apps M.J., Baker D., Bondeau A., Canadell J., Churkina G., Cramer W., Denning A.S., Field C.B., Friedlingstein P.,
122

Goodale C.L., Heimann M., Houghton R.A., Melillo J.M., Moore B., III, Murdiyarso D., Noble I.R., Pacala S.W., Prentice I.C., Raupach M.R., Rayner P.J., Scholes R.J., Steffen W.L., Wirth C. **2001**. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature* 414:169-172.

Schmid. 2002. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 159–183

Serrano L, Peñuelas J. 2005, “Assessing forest structure and function from spectral transmittance measurements: A case study in a Mediterranean holm oak forest”, *Tree Physiology*, 25: 67–74

Soudani, K., Hmimina, G., Dufrêne, E., Berveiller, D., Delpierre, N., Ourcival, J.-M., Rambal, S., and Joffre, R., **2014**. Relationships between photochemical reflectance index and light-use efficiency in deciduous and evergreen broadleaf forests, *Remote Sens. Environ.*, 144, 73–84.

Thomsen, I.M., 2008. Forest condition in Denmark. Monitoring results 2006. Tech. Rep. 40, Forest & Landscape, University of Copenhagen, Denmark.

Trumbore S., 2006. Carbon respired by terrestrial ecosystems – recent progress and challenges: *Global Change Biology* 12, 141–153.

Valentini R., De Angelis P., Matteucci G., Monaco R., Dore S., Scarascia Mugnozza G. E., **1996**. Seasonal net carbon dioxide exchange of a beech forest with the atmosphere. *Global Change Biology* 2, 199–207.

Waring R. H., Schlesinger W. H., **1985**. *Forest Ecosystem*. Academic Press, New York, 339 pp.

Wong, C. Y. S. and Gamon, J. A.: Three causes of variation in the Photochemical Reflectance Index (PRI) in evergreen conifers, *New Phytol.*, 206, 187–195, doi:10.1111/nph.13159, **2015a**.

Wong, C. Y. S. and Gamon, J. A: The Photochemical Reflectance Index (PRI) provides an optical indicator of spring photosynthetic activity in conifers, *New Phytol.*, 206, 196–208, doi:10.1111/nph.13251, **2015b**.

Yi C., Ricciuto D., Li, R., Wolbeck J., Xu X., Nilsson M., Fran, J., Massman W. J., **2010**. “Climate control of terrestrial carbon exchange across biomes and continents.” *Environmental Research Letters*, Vol. 5, No. 3, 034007.

8 APPENDICE

8.1 NORMATIVA APR (AEROMOBILI A PILOTAGGIO REMOTO) SCHEMA RIASSUNTIVO REGOLAMENTO ENAC (ENTE NAZIONALE AVIAZIONE CIVILE) MEZZI AEREI A PILOTAGGIO REMOTO

L'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC) il 16 dicembre del 2013 ha pubblicato il primo regolamento (Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto) che regolarizzava il volo di droni in Italia. E' stata la prima autorità europea ad emettere una norma in questo ambito. Il 16 luglio 2015 ha pubblicato il secondo regolamento che apporta delle modifiche a quello del dicembre 2013, Con la seconda edizione del regolamento ENAC "Mezzi aerei a pilotaggio remoto" inizia la fase di transizione verso una normativa più attenta alle esigenze del mercato, che permetterà una migliore gestione della parte burocratica, l'opportunità di operare negli spazi aerei con maggiore semplicità, mantenendo standard elevati di sicurezza.

8.1.1 SCHEMA RIASSUNTIVO DEL REGOLAMENTO ENAC SECONDA EDIZIONE

Alcune definizioni:

- Aeromodellista: (Art 5 comma 1 Regolamento ENAC "mezzi aerei a pilotaggio remoto") persona che è ai comandi di un aeromodello,
- Aeromodello: (Art 5 comma 1 Regolamento ENAC "mezzi aerei a pilotaggio remoto") dispositivo aereo a pilotaggio remoto, senza persone a bordo, impiegato esclusivamente per scopi ricreativi e sportivi, non dotato di equipaggiamenti che ne permettano un volo autonomo, e che vola sotto il controllo visivo diretto e costante dell'aeromodellista, senza l'ausilio di aiuti visivi
- Aeromobile a Pilotaggio Remoto: (APR) (Art 5 comma 1 Regolamento ENAC "mezzi aerei a pilotaggio remoto") mezzo aereo a pilotaggio remoto senza persone a bordo, non utilizzato per fini ricreativi e sportivi.
- Operazioni specializzate non critiche, (Art 9 comma 1 Regolamento ENAC "mezzi aerei a pilotaggio remoto") si intendono quelle operazioni condotte in VLOS che non prevedono il sorvolo, anche in caso di avarie e malfunzionamenti, di aree congestionate, assembramenti di persone, agglomerati urbani, infrastrutture sensibili.

- Operazioni specializzate critiche. (Art 10 comma 1 Regolamento ENAC "mezzi aerei a pilotaggio remoto") si intendono quelle operazioni che non rispettano, anche solo parzialmente, quanto al precedentemente descritto per le operazioni specializzate non critiche.

I SAPR di competenza ENAC sono classificati in base alla massa operativa al decollo del mezzo in:

SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) con M.T.O.M (*Maximum Take-Off Mass*) < 25Kg (Art 8 sezione 2 Regolamento ENAC "mezzi aerei a pilotaggio remoto")

SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) con $25 \text{ Kg} \leq \text{M.T.O.M}$ (*Maximum Take-Off Mass*) < 150 Kg. (Art 14 sezione 3 Regolamento ENAC "mezzi aerei a pilotaggio remoto")

SAPR con $\text{M.T.O.M} \leq 2\text{Kg}$ (Art 12 Regolamento ENAC "mezzi aerei a pilotaggio remoto")

Tutti potranno essere impiegati per operazioni di ricerca e sviluppo e per operazioni specializzate, critiche e non critiche, le quali si divideranno in operazioni VLOS (*Visual Line of Sight*), EVLOS (*Extended Visual Line Of Sight*) e BLOS (*Beyond Line of Sight*)

Per i SAPR con M.T.O.M < 25Kg: è necessaria la Targhetta identificativa sull'A.P.R. (Aeromobile a Pilotaggio Remoto) e sulla S.P.R. (Sistema a Pilotaggio Remoto) riportante i dati identificativi del sistema e dell'operatore. Deve essere installato un dispositivo elettronico di identificazione, le cui caratteristiche saranno stabilite da ENAC, per la registrazione e la trasmissione di dati quali identificazione A.P.R. e operatore e telemetria di volo compresa quota è necessario un manuale del velivolo a pilotaggio remoto. Devono essere installati Dispositivi per favorire la visibilità come le luci.

Il pilota, per la conduzione del mezzo in operazioni VLOS ed EVLOS, dovrà indossare un giubbotto ad alta visibilità che riporti la scritta Pilota di A.P.R. e dovrà essere in possesso di un attestato di pilota di A.P.R.

Per la conduzione del mezzo in operazioni BLOS dovrà essere in possesso della Licenza di Pilota di A.P.R.

Per i SAPR con M.T.O.M $\leq 2\text{Kg}$ non vi sarà distinzione tra operazioni critiche e non critiche, a patto che i velivoli a pilotaggio remoto siano progettati e costruiti con criteri di inoffensività

Per i SAPR con $25 \text{ Kg} \leq \text{M.T.O.M} < 150 \text{ Kg}$: È necessaria l'iscrizione al Registro degli A.P.R. di ENAC che fornirà le marche di immatricolazione, si deve ottenere un permesso di volo per lo svolgimento dell'attività sperimentale si dovrà ottenere un permesso di volo o un Certificato di Navigabilità Ristretto per lo svolgimento delle operazioni specializzate. L'operatore deve essere autorizzato all'esecuzione di operazioni specializzate critiche e non critiche, per la conduzione del mezzo in operazioni BLOS il pilota

dovrà essere in possesso della Licenza di Pilota di A.P.R. È necessario un programma di manutenzione dell'APR stabilito dal costruttore e integrato dall'operatore in base alle operazioni effettuate.

Per ottenere l'attestato di pilota di A.P.R. il richiedente deve recarsi presso un centro di addestramento A.P.R. e seguire un corso teorico di formazione e un addestramento pratico. Dovrà inoltre superare un esame pratico con un esaminatore presso un centro di addestramento A.P.R. Le licenze di pilota civile o il possesso di un attestato VDS danno luogo a crediti formativi.

Per ottenere la Licenza di pilota di A.P.R. il richiedente dovrà seguire un percorso formativo stabilito da ENAC, il possesso di una licenza CPL/IR dà luogo a crediti formativi

Regole di circolazione aerea per i SAPR

Le operazioni in VLOS devono essere condotte all'interno di un cilindro la cui base abbia un raggio di 500 m e la cui altezza massima sia di 150m rispetto al suolo. Non dovranno essere condotte all'interno di ATZ (*Aerodrome Traffic Zone*) o al di sotto delle traiettorie di decollo e atterraggio degli aeromobili. Non dovranno essere condotte all'interno di un raggio di 5 km dal punto di riferimento aeroportuale di un aeroporto privo di ATZ. Potranno essere condotte all'interno di CTR (*Controlled Traffic Region*) all'interno di un cilindro la cui base abbia un raggio di 500 m e la cui altezza massima sia di 150m rispetto al suolo, eccetto che sotto le traiettorie di decollo e atterraggio dei velivoli, oltre i limiti laterali dell'ATZ, dove l'altezza massima di volo è ridotta a 30 m dal suolo. Saranno stabilite procedure operative specifiche da ENAC per la gestione delle operazioni all'interno di un raggio di 5 km da un aeroporto privo di ATZ.

Per le operazioni EVLOS valgono le stesse limitazioni, devono essere autorizzate da ENAC, in più potranno essere svolte solo se l'A.P.R. viene mantenuto a vista utilizzando appositi osservatori o ulteriori piloti dotati di controllo a distanza.

Le operazioni in BLOS potranno essere condotte solo all'interno di spazi aerei segregati.