

Dott.ssa Silvia Tola
**INDAGINI SPERIMENTALI E MODELLAZIONE DEGLI EFFETTI IDROLOGICI DEI CAMBIAMENTI DI USO DEL
SUOLO IN AMBIENTE MEDITERRANEO**
Dottorato di ricerca in Monitoraggio e controllo degli ecosistemi forestali in ambiente mediterraneo

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SASSARI



FACOLTÀ DI AGRARIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO

Dottorato di ricerca in

**MONITORAGGIO E CONTROLLO DEGLI ECOSISTEMI FORESTALI IN AMBIENTE
MEDITERRANEO**

XXIV CICLO

**INDAGINI SPERIMENTALI E MODELLAZIONE DEGLI EFFETTI IDROLOGICI DEI
CAMBIAMENTI DI USO DEL SUOLO IN AMBIENTE MEDITERRANEO**

Dottorando: dott.ssa Silvia Tola
Docente guida: prof. Marcello Niedda
Referente di indirizzo: prof. Ignazio Floris
Direttore della Scuola di Dottorato: prof.ssa Alba Pusino

Anno Accademico 2011/2012

Dott.ssa Silvia Tola

**INDAGINI SPERIMENTALI E MODELLAZIONE DEGLI EFFETTI IDROLOGICI DEI CAMBIAMENTI DI USO DEL
SUOLO IN AMBIENTE MEDITERRANEO**

Dottorato di ricerca in Monitoraggio e controllo degli ecosistemi forestali in ambiente mediterraneo

INDICE

1. INTRODUZIONE	4
2. MATERIALI E METODI	7
2.1 IL SITO SPERIMENTALE	8
2.2 MONITORAGGIO AMBIENTALE	12
2.3 LE SONDE TDR PER LA MISURAZIONE DELL'UMIDITA' DEL SUOLO	15
2.4 CURVE DI RITENZIONE IDRICA E DI CONDUCEBILITA' IDRAULICA	19
3. RISULTATI	23
3.1 UMIDITA' DEL SUOLO.	24
3.2 EFFETTO DELLA TEMPERATURA SUL TDR	28
3.3 CALIBRAZIONE DELLE SONDE TDR	34
3.4 STIMA DELL'UMIDITA' DEL SUOLO	40
3.5 PRECIPITAZIONE SOTTOCHIOMA E TEMPERATURA DEL SUOLO	46
3.6 CARATTERIZZAZIONE IDRAULICA DEL SUOLO	49
3.7 DETERMINAZIONE DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE	52
3.8 STIMA DEL BILANCIO IDRICO	64
4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI	67
BIBLIOGRAFIA	71

Dott.ssa Silvia Tola
**INDAGINI SPERIMENTALI E MODELLAZIONE DEGLI EFFETTI IDROLOGICI DEI CAMBIAMENTI DI USO DEL
SUOLO IN AMBIENTE MEDITERRANEO**
Dottorato di ricerca in Monitoraggio e controllo degli ecosistemi forestali in ambiente mediterraneo

1.INTRODUZIONE

Lo studio dell'impatto del cambiamento dell'uso del suolo sul bilancio idrologico dei bacini idrografici e sulla disponibilità delle risorse idriche è un argomento di ricerca ampiamente dibattuto nel campo delle scienze idrologiche e ambientali. L'incremento progressivo dei processi di degrado del territorio, generati dai cambiamenti di uso del suolo, dalla riduzione della piovosità e dall'attività antropica, identificano importanti problematiche di cui si dovrà sempre più tenere conto in futuro nella valutazione della disponibilità delle risorse idriche. Numerosi studi (Costa et al., 2003; Schume et al., 2004; Bormann, 2008) hanno evidenziato che la vegetazione ha una notevole influenza sulle proprietà fisiche e chimiche del suolo. Alcune di queste proprietà, quali la struttura, la porosità, la distribuzione dei pori, la densità e il contenuto in sostanza organica, influenzano fortemente le proprietà idrologiche dei suoli e i processi di trasporto dell'acqua nel suolo. La rimozione della copertura forestale a favore della colture agrarie o dei pascoli causa generalmente una riduzione della densità del suolo e una alterazione della macroporosità. Martinez e Zinck (2004) hanno rilevato che i suoli con pascolo hanno una densità del 42% più elevata rispetto ai suoli con vegetazione forestale, e una ridotta capacità di infiltrazione, a causa della riduzione della macroporosità superficiale del suolo. Altri autori (Boizard et al., 2002; Celik, 2005) riportano significative alterazioni della sostanza organica, della stabilità degli aggregati e della conducibilità idrica satura dei suoli, in seguito alla conversione di suolo naturale in terreno coltivato.

Le modifiche dell'uso del suolo alterano gli equilibri esistenti tra i processi di evaporazione, di ricarica della falda e di ruscellamento superficiale, con conseguenze sulla disponibilità idrica nei corsi d'acqua e negli acquiferi (De Fries e Eshleman, 2004). A scala di bacino, i cambiamenti della vegetazione in seguito all'antropizzazione dei suoli possono causare una serie di effetti macroscopici, quali l'alterazione dei volumi idrici defluiti attraverso una sezione di sbocco, l'aumento dei picchi di piena, la riduzione dei tempi di recessione delle portate e la riduzione del deflusso di magra (Sahin e Hall, 1996; Costa et al., 2003). Sebbene è oramai accertato che la rimozione o la modifica della copertura forestale comporta degli squilibri tra le componenti del bilancio idrico del suolo, l'impatto sui processi di infiltrazione, evapotraspirazione, ricarica della falda e ruscellamento superficiale presenta ancora molti aspetti controversi. Questo dipende anche dal fatto che le interazioni tra l'uso del suolo e i processi idrologici sopra indicati mostrano una notevole variabilità spaziale e

temporale, funzione delle condizioni climatiche locali (Calder, 1997) e delle tipologie di vegetazione presenti (Schume et al., 2004). Vi è quindi l'esigenza di comprendere ulteriormente gli effetti idrologici legati alle modifiche dell'uso del suolo, facendo riferimento alle più diversificate condizioni vegetazionali, pedologiche e idroclimatiche.

In questo lavoro, l'effetto del cambio dell'uso del suolo sulla dinamica idrologica del suolo è stato studiato con riferimento ad un ecosistema tipicamente mediterraneo che si trova nel territorio della Nurra nord occidentale, dove è situato il lago di Baratz, unico lago naturale della Sardegna. Il lago è alimentato da un piccolo bacino idrografico di circa 12 km², mostrato nella Figura 1, e dalle sue ridotte dimensioni deriva l'estrema suscettibilità a qualunque fattore di disturbo e la fragilità degli ecosistemi che vi insistono. Nell'ambito del progetto il bacino idrografico del lago è stato accuratamente strumentato per rilevare nel dettaglio i processi idrologici coinvolti con lo scopo di comprendere le cause del decennale trend verso la desertificazione dell'area del Baratz, evidenziato dalla progressiva riduzione dei volumi idrici invasati nel lago.

Un versante, all'interno della bacino del lago di Baratz, con presenza contigua di macchia mediterranea e di pascolo è stato strumentato per il monitoraggio in continuo dell'umidità del suolo e dei livelli della falda ipodermica sotto le due coperture vegetali. Ulteriori misure sono state effettuate per la precipitazione sottochioma nella macchia (indicativa dell'intercettazione fogliare) e della temperatura sottosuperficiale del suolo. L'obiettivo è di fornire l'evidenza sperimentale degli effetti sulle caratteristiche idrauliche e sulla dinamica idrologica del suolo, derivanti dalla eliminazione della copertura naturale a favore di un utilizzo antropico del suolo. Infatti, poiché nel versante studiato il suolo sotto la macchia e sotto il pascolo si trova nelle medesime condizioni morfologiche, pedologiche e microclimatiche, le differenze osservabili nella dinamica idrologica del suolo potranno essere attribuite al differente uso del suolo.

Dott.ssa Silvia Tola

**INDAGINI SPERIMENTALI E MODELLAZIONE DEGLI EFFETTI IDROLOGICI DEI CAMBIAMENTI DI USO DEL
SUOLO IN AMBIENTE MEDITERRANEO**

Dottorato di ricerca in Monitoraggio e controllo degli ecosistemi forestali in ambiente mediterraneo

2. MATERIALI E METODI

2.1 IL SITO SPERIMENTALE

Il sito sperimentale oggetto di studio è situato all'interno del bacino idrografico del lago di Baratz, nella Sardegna nord-occidentale (Nurra) individuabile alle coordinate Gauss Boaga E 1435340 – N 4505540, su di un versante ai piedi del quale scorre il Rio Bastianeddu, (Figura 2).

Il versante si presenta particolarmente adeguato ai fini della presente ricerca, in quanto in esso è possibile ritrovare in continuità due aree con le stesse caratteristiche morfologiche, pedologiche e microclimatiche, ma differenziate nell'uso del suolo, l'uno ricoperto da un soprassuolo boschivo (macchia), l'altro da una copertura erbacea insediatasi successivamente al disboscamento (pascolo).

La presenza contigua dei due versanti (l'uno boscato e l'altro a pascolo) Figura 3 è dovuta al profondo cambiamento dell'uso del suolo avvenuto nel secolo scorso così come è avvenuto in gran parte della nostra isola, dove si è passati dall'uso prevalentemente boschivo al pascolo e alle aree coltivate, con conseguenze negative sui processi idrologici e di erosione. Ciò ha permesso di imputare le eventuali differenze nel comportamento idrologico dei due suoli, unicamente al differente uso del suolo.

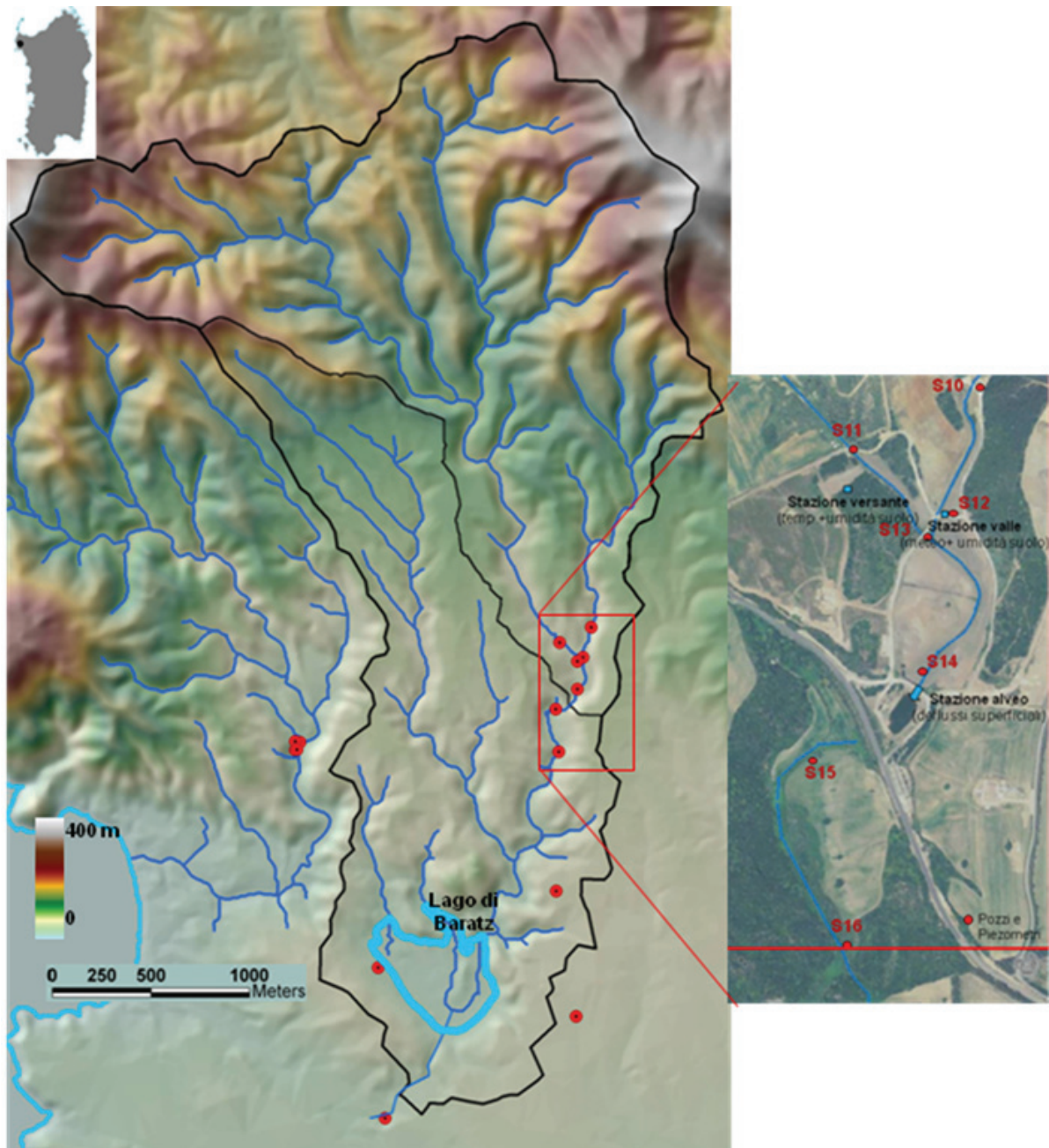


Figura 1. Bacino imbrifero del Lago di Baratz e del sottobacino della sezione dove è stata installata la stazione di monitoraggio ambientale presso l'immissario principale del lago e reticolo idrografico (in azzurro); disposizione planimetrica delle strumentazioni della stazione di monitoraggio e dei piezometri realizzati per il monitoraggio delle altezze di falda.



Figura 2. Immagine dell'area oggetto di studio.



Figura 3. Immagine del versante con la copertura a bosco e pascolo.

Il versante oggetto di studio si trova nella parte centrale del bacino, ha una quota media di circa 57 m s.l.m., presenta un dislivello massimo di circa 20 m, e ha una pendenza media del 30%. Il versante ha un assetto morfologico planare inclinato, è delimitato superiormente da una strada, inferiormente da un corso d'acqua, ed è caratterizzato, come già detto, dalla presenza di macchia mediterranea e da una fascia di vegetazione erbacea destinata a pascolo (figura 1). La parte di versante ricoperta da macchia mediterranea, costituita da un'associazione floristica di piante a portamento arboreo e arbustivo, rappresentate dal mirto (*Myrtus Communis* L.), corbezzolo (*Arbutus unedo* L.), erica arborea (*Erica arborea* L.), fillirea (*Phyllirea latifolia* L.) e lentisco (*Pistacia lentiscus* L.), è piuttosto omogenea, con una altezza massima di circa 4 metri ed è caratterizzata da una vegetazione stratificata su due piani. Nella parte più vicina al suolo si ritrovano specie prevalentemente a portamento arbustivo, mentre nella parte più alta ritroviamo specie a portamento arboreo. La presenza di questa consociazione permette di massimizzare al massimo l'intercettazione della radiazione luminosa. Il suolo sotto la macchia ha uno spessore variabile da 40 ad 80 cm, è di tessitura franco-sabbiosa, con un contenuto in sostanza organica circa del 22%, e poggia su un substrato di arenarie permiane alterate poco permeabili. Superficialmente è presente una lettiera di residui fogliari in decomposizione, che sovrasta uno strato di suolo organico spesso circa 10 cm, con una elevata presenza radicale e con attività biologica intensa. Inferiormente allo strato organico è presente un orizzonte minerale di colore più chiaro, compatto, caratterizzato da una minore massa radicale e da una minore attività biologica rispetto all'orizzonte organico superficiale.

La parte di versante destinata a pascolo presenta una cotica erbosa compatta che si è insediata successivamente all'eliminazione della macchia mediterranea e alle lavorazioni di aratura, avvenute circa un decennio fa. Tali lavorazioni se da un lato hanno incrementato la porosità e la porzione dei macropori, dall'altro hanno diminuito la dimensione degli aggregati e la stabilità del versante. Il suolo destinato a pascolo è di tessitura franco-sabbiosa, ha un contenuto in sostanza organica del 3%, ha una attività biologica scarsa, e presenta radici solo nei primi centimetri di suolo. In profondità, le abbondanti screziature grigie e rossastre indicano che questo suolo presenta notevoli difficoltà di drenaggio.

2.2 MONITORAGGIO AMBIENTALE

Per poter valutare i meccanismi idrologici di intercettazione fogliare, infiltrazione, evapotraspirazione, drenaggio sotterraneo e deflusso superficiale nei due versanti che, a parità di tutte le altre caratteristiche, si differenziano unicamente per l'uso del suolo, sono state utilizzate diverse metodologie.

Il risultato dei dati sperimentali rilevati è stato interpretato attraverso i più avanzati modelli matematici di simulazione.

L'intercettazione della precipitazione da parte delle superfici fogliari è stata stimata dalla differenza tra la precipitazione misurata nel versante con copertura erbacea e quella misurata sotto la copertura boschiva. Il consumo di acqua stagionale da parte delle due diverse coperture vegetali è stato stimato attraverso il bilancio idrico del suolo e attraverso il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale.

A partire dal gennaio 2009, come parte di un più vasto programma di studio delle componenti del bilancio idrico del lago del Baratz, il sito sperimentale è stato strumentato per il monitoraggio automatico delle variabili climatiche (pioggia, temperatura e umidità dell'aria), dell'umidità e della temperatura del suolo, e dei livelli della falda ipodermica. Lo schema sperimentale (figure 4, 4a, 4b) prevede due gruppi uguali di monitoraggio, uno per la macchia, ed uno per il pascolo. Ogni gruppo è costituito da tre sonde TDR (CS216 Water Content Reflectometers, Campbell Scientific, Inc.) calibrate per le condizioni di campo, di cui due sono inserite orizzontalmente alle profondità di 15 e 30 cm di suolo, ed una è posizionata verticalmente per la misura dell'umidità media del suolo tra 30 e 60 cm di profondità. Si è potuto in questo modo evidenziare quale fosse l'influenza della copertura vegetale e della differente natura del suolo sull'andamento del processo d'infiltrazione.

In prossimità delle sonde TDR, la temperatura del suolo è stata monitorata con un termistore localizzato alla profondità di 15 cm. La precipitazione, assieme alle altre variabili climatiche, è misurata in una stazione situata a poca distanza dal versante oggetto di studio. All'interno della copertura a macchia è stato posizionato a terra un pluviometro per la misura della precipitazione sottochioma, al fine di stimare le perdite idriche per intercettazione fogliare. Tutte le misure automatiche sono state effettuate ogni 5 minuti, e sono state memorizzate allo stesso intervallo temporale con un datalogger CR1000.

Completano lo schema sperimentale otto piezometri, cinque nel pascolo e tre nella macchia, posizionati lungo le linee di massima pendenza, al fine di monitorare i livelli della falda ipodermica nel versante. La misura dei livelli è stata effettuata manualmente, a intervalli di tempo variabili tra uno e dieci giorni, in funzione dell'andamento pluviometrico.

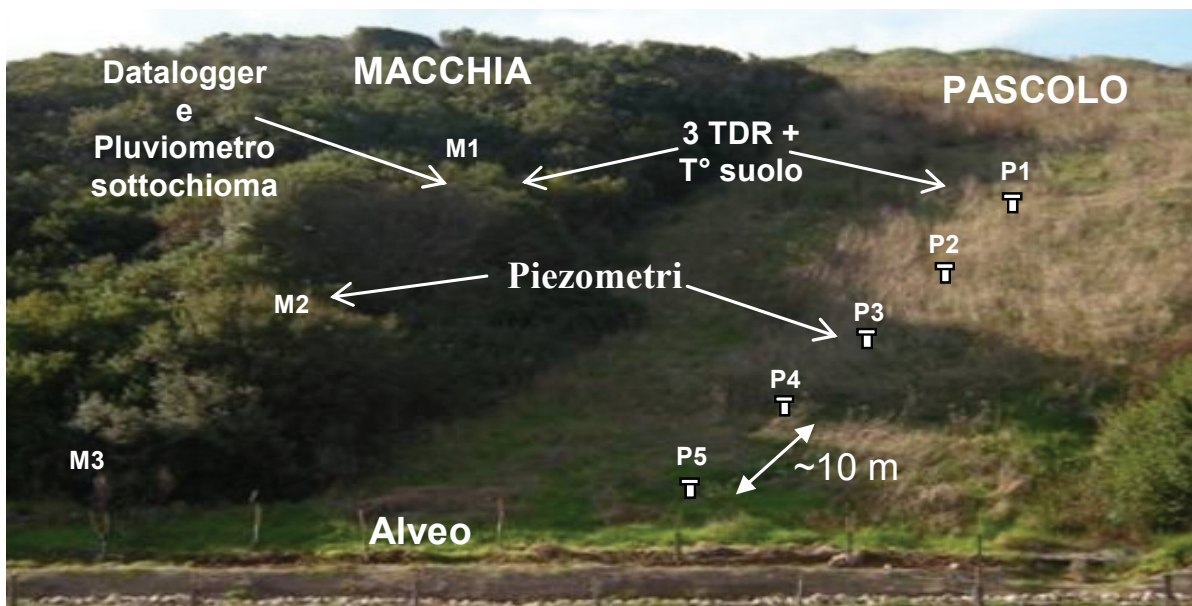


Figura 4. Schema di installazione delle sonde di umidità e di temperatura nel suolo, del pluviometro sottochioma e dei piezometri, per il monitoraggio idrologico nella macchia e nel pascolo.



Figura 4a. Strumento TDR nel versante sotto la macchia.



Figura 4b: Installazione sonde TDR nel versante a pascolo alle diverse profondità.

2.3 LE SONDE TDR PER LA MISURA DELL'UMIDITÀ DEL SUOLO

La misura dei contenuti d'acqua nel suolo assume notevole importanza in molti studi che riguardano l'agricoltura, l'idrologia, la meteorologia, l'ingegneria idraulica e la meccanica dei suoli. L'umidità del suolo determina la sua temperatura e la partizione della radiazione netta in calore sensibile e latente, condiziona i processi di evapotraspirazione e il moto dei soluti e degli inquinanti a seguito delle piogge e degli interventi irrigui. Inoltre, numerose proprietà meccaniche del suolo (consistenza, plasticità, penetrabilità, ecc.) od idrauliche (ritenzione, conducibilità, ecc.) dipendono dal contenuto d'acqua. Il contenuto d'acqua viene generalmente definito come rapporto tra la massa dell'acqua presente nel suolo e la massa del suolo secco o attraverso il volume d'acqua presente nell'unità di volume del suolo.

Allo stato attuale non esiste un unico sistema standardizzato in grado di determinare con assegnata precisione il contenuto idrico dei terreni, ma tutta una serie di metodi in grado di fornire risultati più o meno approssimati. Ciò è dovuto principalmente alla eterogeneità dei suoli, che con le loro proprietà chimico-fisiche e microbiologiche costituiscono dei sistemi spesso ben più complessi di quanto si possa comunemente immaginare.

I metodi per la determinazione dell'umidità del suolo vengono classificati in diretti ed indiretti.

I metodi diretti si basano sul prelevamento in campo di un certo numero di campioni e sul rilievo del loro peso umido nelle condizioni in cui si trovano al momento del prelievo, e del loro peso secco dopo essiccazione in stufa. Questi sono in genere metodi distruttivi che non consentono la ripetizione della misura sullo stesso campione, né il successivo prelievo di altri campioni nello stesso punto. Per ottenere dati rappresentativi è necessario eseguire la misurazione su un numero elevato di campioni e ciò, oltre ad essere dispendioso in termini di tempo, porta a modificare l'ambiente in cui si opera. Il più comune metodo diretto di determinazione dell'umidità di un suolo è il metodo termogravimetrico, largamente impiegato perché oltre a essere facilmente applicabile e richiedere strumentazioni di comune impiego nei laboratori, raggiunge un buon grado di precisione. Tuttavia, esso non presenta quei requisiti di versatilità e rapidità che possono renderlo applicabile in indagini finalizzate

al monitoraggio dei contenuti idrici in diversi siti e con sufficiente grado di dettaglio temporale (Santini, 1997).

I metodi indiretti si basano sulla misurazione di qualche proprietà del suolo che varia in funzione del suo contenuto idrico, quale la costante dielettrica relativa, o sul modo in cui le radiazioni emesse da alcune sorgenti interagiscono con le molecole di acqua presenti nel suolo. A questi ultimi appartiene il metodo della riflettometria nel dominio temporale (TDR) Figura 5, attraverso il quale si correla il contenuto idrico del suolo al tempo di viaggio di un'onda elettromagnetica lungo guide d'onda infisse nel terreno. Il principio su cui si basa è quello di inviare nel suolo, attraverso degli elettrodi di opportuna lunghezza, un'onda elettromagnetica a bassa frequenza che si propaga nel terreno interposto tra gli elettrodi e viene riflessa verso la sorgente dopo aver percorso l'intera lunghezza della linea di trasmissione.

La tecnica della riflettometria nel dominio del tempo (TDR) è quella più largamente accettata come tecnica attendibile per la misura del contenuto idrico, trovando così applicazione in svariati campi della fisica del suolo.

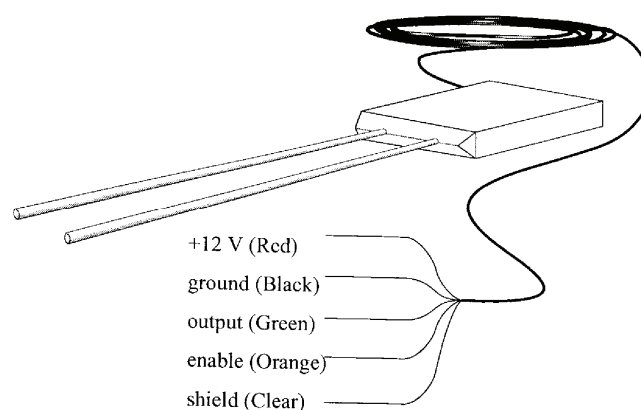


Figura 5: strumento TDR per misurare l'umidità.

La tecnica TDR ha numerosi vantaggi rispetto agli altri metodi di misura, in termini di flessibilità, sensibilità, capacità di automazione, rapidità di esecuzione e ampiezza del range di misura (Cataldo et al. 2006). Certamente un vantaggio specifico della tecnica TDR è la sua capacità di misurare in tempo reale il contenuto idrico e la salinità usando la stessa sonda con un minimo disturbo del suolo.

Attualmente sono presenti in commercio modelli semplificati di TDR che provvedono a fornire, come segnale di risposta, direttamente un valore numerico proporzionale al tempo di transito dell'impulso elettromagnetico nel suolo, eliminando così il problema dell'interpretazione da parte dell'operatore dei tracciati prodotti dall'oscilloscopio. I dati raccolti possono essere immagazzinati in un datalogger e trasferiti periodicamente su calcolatore per la loro successiva elaborazione ed interpretazione. Il modello qui scelto (CS615 Water Content Reflectometer della Campbell Scientific Inc.) rientra in quest'ultima categoria di strumenti TDR ed è caratterizzato da un costo relativamente contenuto, da una notevole facilità di impiego e da un ridotto consumo energetico. Secondo le applicazioni, le sonde TDR possono essere installate nel suolo verticalmente, parallelamente alla superficie del suolo oppure orientate rispetto ad essa con diversi angoli e forniscono il valore medio del contenuto d'acqua lungo tutta la loro lunghezza.

Le sonde orientate secondo la verticale ed infisse dalla superficie del suolo sono le più semplici da installare e possono essere lasciate nel suolo in modo da monitorare nel tempo le variazioni di contenuto d'acqua, oppure possono essere estratte dopo la lettura quando bisogna eseguire misure saltuarie in diversi punti. L'impianto di sonde di diversa lunghezza o l'inserzione progressiva nel suolo della stessa sonda consente, attraverso diverse misure, di ricostruire anche l'intero profilo di umidità del suolo con passi pari alla differenza delle lunghezze delle sonde o agli incrementi di inserzione effettuati.

Per la disposizione orizzontale delle sonde, è necessario invece lo scavo di una buca di dimensioni tali da consentirne l'inserzione sulle pareti a diverse profondità. Lo scavo deve essere eseguito in modo da creare il minimo disturbo al suolo e successivamente deve essere riempito, cercando di ripristinare, per quanto possibile, lo stato preesistente in modo da contenere le alterazioni del profilo del suolo in prossimità dei punti di misura. Per avere

misure più accurate, le sonde da utilizzare in questa circostanza devono essere sufficientemente lunghe, in modo da consentire di esplorare zone lontane dalle pareti della buca, dove certamente risultano minori le alterazioni del suolo, ed in modo da fornire valori del contenuto d'acqua che si riferiscono ad ampie zone orizzontali, riducendo così gli effetti della variabilità spaziale. Posizionando le sonde a diverse profondità, è possibile poi rilevare in modo accurato profili di contenuto d'acqua nel suolo, esplorando senza difficoltà anche le zone prossime alla superficie del suolo.

Le sonde TDR, come è noto, non restituiscono direttamente il dato di umidità, bensì il "periodo" del segnale emesso dalle stesse sonde. Si necessita quindi di apposite equazioni di calibrazione che mettano in relazione il segnale della sonda e l'umidità del suolo, equazioni di taratura fornite dalla ditta produttrice per differenti livelli di conducibilità elettrica del suolo. Un altro fattore che influenza la velocità di transito del segnale TDR è la temperatura: le temperature elevate incrementano la velocità di transito del segnale, fornendo un periodo inferiore. Questo comportamento è osservabile nel grafico dei valori di umidità osservati sotto forma di oscillazioni giornaliere, facendo registrare i minimi del periodo durante le ore centrali della giornata e i massimi durante le ore notturne.

L'impiego del sistema TDR risulta particolarmente vantaggioso quando si deve provvedere a rilievi negli strati superficiali del suolo, dove possono riscontrarsi ampie e relativamente rapide variazioni nel tempo del contenuto d'acqua. In questi casi, si ottengono misure di valori medi e contenuti d'acqua nel profilo, accurati, agevoli ed in tempi brevi. Per rilievi a maggiore profondità, l'installazione delle sonde risulta più laboriosa ed implica lo scavo di una buca per raggiungere i punti di misura.

2.4 CURVE DI RITENZIONE IDRICA E DI CONDUCIBILITÀ IDRAULICA

Per evidenziare l'influenza della vegetazione sulle caratteristiche idrauliche del suolo, sono state stimate le curve di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica dei suoli sotto le due coperture vegetali. Le relazioni sperimentali che descrivono il legame non lineare tra contenuto idrico, θ , e potenziale capillare (effetto della capillarità e dell'adsorbimento), Ψ , sono note in letteratura con il nome di curve di ritenzione e sono valide a rigore per terreni non rigonfiabili.

Il legame Ψ - θ , per valori bassi del contenuto d'acqua, dipende principalmente dal rapporto tra la superficie e la massa del terreno in esame (superficie massica) e quindi dalla composizione della materia porosa, mentre per alti valori del contenuto d'acqua è influenzato principalmente dalla struttura del terreno e dalla sua distribuzione dei pori. In particolare per un dato valore di contenuto d'acqua il potenziale capillare è più alto (in valore assoluto) quanto maggiore è la superficie massica, cioè quanto più percentuale di materiale fine (argilloso) è presente nel terreno, ed è generalmente più basso (in valore assoluto) per quei terreni a granulometria grossa quali ad esempio quelli ad elevata matrice sabbiosa (Cavazza, 1981).

La relazione empirica che lega l'umidità del terreno al potenziale idrico è rappresentabile graficamente tracciando la curva di ritenzione idrica. Ogni terreno ha una propria curva che può essere costruita su scala logaritmica, usando come ordinata il potenziale idrico, oppure su scala lineare, usando il pF (indice numerico lineare correlato al potenziale idrico del terreno).

La curva si determina per via empirica misurando il potenziale idrico a differenti valori di umidità. Per questa operazione si può ricorrere a differenti metodi. In genere l'umidità si determina per essiccazione di un campione di terreno in stufa e il potenziale idrico con un tensiometro. Questo metodo è tuttavia laborioso e lungo, mentre per questo scopo si presta meglio l'uso dell'apparecchio di Richards.

L'andamento della curva offre una visione d'insieme delle proprietà idrologiche di un terreno. In generale i suoli con elevata capacità di invaso, in grado di accogliere consistenti

quantitativi d'acqua (es. i terreni con alta dotazione in colloidali come quelli argillosi o ricchi di sostanza organica), hanno curve di ritenzione idrica espanse in larghezza (Figura 6 a), mentre i suoli a tessitura grossolana e poveri di colloidali (es. terreni sabbiosi o pietrosi) hanno curve strette (Figura 6 b). La larghezza della curva è correlata con la porosità totale del terreno.

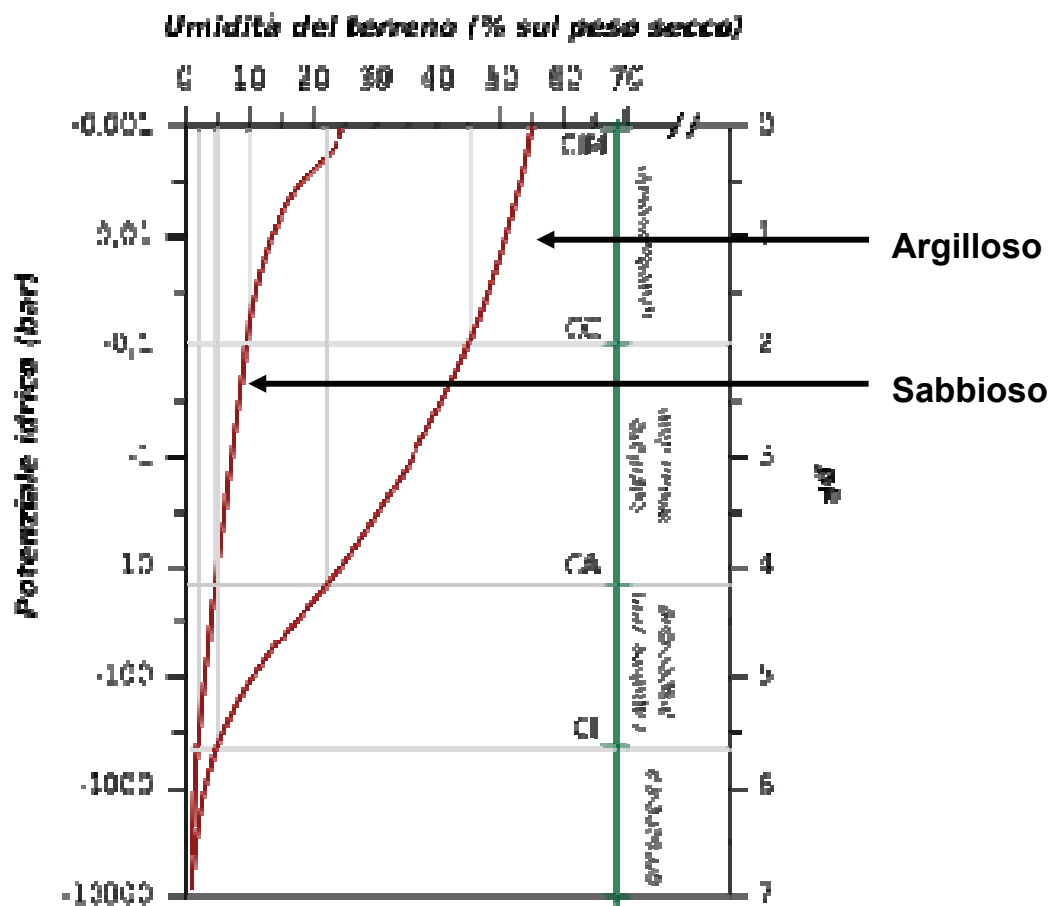


Figura 6: curva di ritenzione idrica per due differenti tipi di suolo: argilloso e sabbioso

Il legame tra il potenziale e l'umidità dipende principalmente dal rapporto tra la superficie e la massa del suolo in esame (superficie massica) e quindi dalla composizione della materia porosa, ma anche dalla sua condizione strutturale e dimensione e distribuzione dei pori. In particolare, per un dato contenuto di acqua il potenziale matriciale è più alto (in valore assoluto) quanto maggiore è la superficie massica, cioè più elevata è la percentuale di materiale fine (argilloso) presente nel terreno, ed è generalmente più basso (in valore assoluto) per quei suoli a granulometria grossolana, quali ad esempio quelli con elevata matrice sabbiosa.

Le curve di ritenzione sono determinate sia attraverso misure di laboratorio sia di campo.

La metodologia di campo prevede la misura simultanea dell'umidità e della tensione nello stesso profilo di suolo o roccia monitorato. Invece, in laboratorio, una tecnica ampiamente utilizzata per la stima della curva di ritenzione idrica è il metodo di Wind (1968), conosciuto anche come metodo dell'evaporazione.

Contemporaneamente, per mezzo di due o più tensiometri, è misurato il potenziale idrico matriciale (h) a più profondità nella carota di suolo. Alla fine del processo evaporativo il campione viene essiccato in stufa per la determinazione del contenuto idrico finale. I valori di peso medio del campione, monitorati durante l'esperimento, sono quindi convertiti in contenuti di umidità aggiungendo le successive perdite di acqua al contenuto idrico rilevato alla fine dell'esperimento. Queste informazioni sono utilizzate per la stima simultanea della curva di ritenzione idrica e della curva di conducibilità idraulica per lo stesso campione.

La principale limitazione del metodo è che esso fornisce dati solo nell'intervallo di potenziale misurato dai tensiometri e che possono essere ottenute esclusivamente le caratteristiche di essiccamento. Altre possibili cause che possono indurre ad errori nella stima della funzione di ritenzione idrica sono:

- incertezza nella posizione dei tensiometri nel campione;
- effetti della temperatura;
- errori di calibrazione dei traduttori di pressione;

- errori di lettura della tensione nel caso di tensiometri con manometro;
- stratificazione nel profilo del campione.

Gli effetti di questi fattori condizionano in maniera minore il calcolo della ritenzione idrica, ma possono essere determinanti nella stima della conducibilità idraulica.

3. RISULTATI

3.1 UMIDITÀ DEL SUOLO

Il monitoraggio, dell'area oggetto di studio, ha avuto la durata di circa due anni da Gennaio 2009 a Settembre 2010. In tale periodo l'installazione delle sonde TDR e della stazione meteo, situata sia nell'area boscata che in quella a pascolo, ci hanno permesso di poter osservare ed analizzare i dati relativi alle variabili climatiche (umidità dell'aria, precipitazioni, temperatura e umidità del suolo).

Tali risultati si sono resi utili per poter valutare e comparare le due diverse porzioni di suolo che si differenziano solamente per l'uso del suolo.

Le sonde TDR posizionate nel sito di monitoraggio, sia nell'area ricoperta dalla macchia mediterranea sia in quella a pascolo, hanno fornito i valori del tempo di viaggio del segnale per l'anno 2009 - 2010.

In Figura 7 e 8 sono riportati i valori di risposta delle sonde_posizionate alle diverse profondità (15, 30 e 30-60 cm) durante l'intero periodo di monitoraggio.

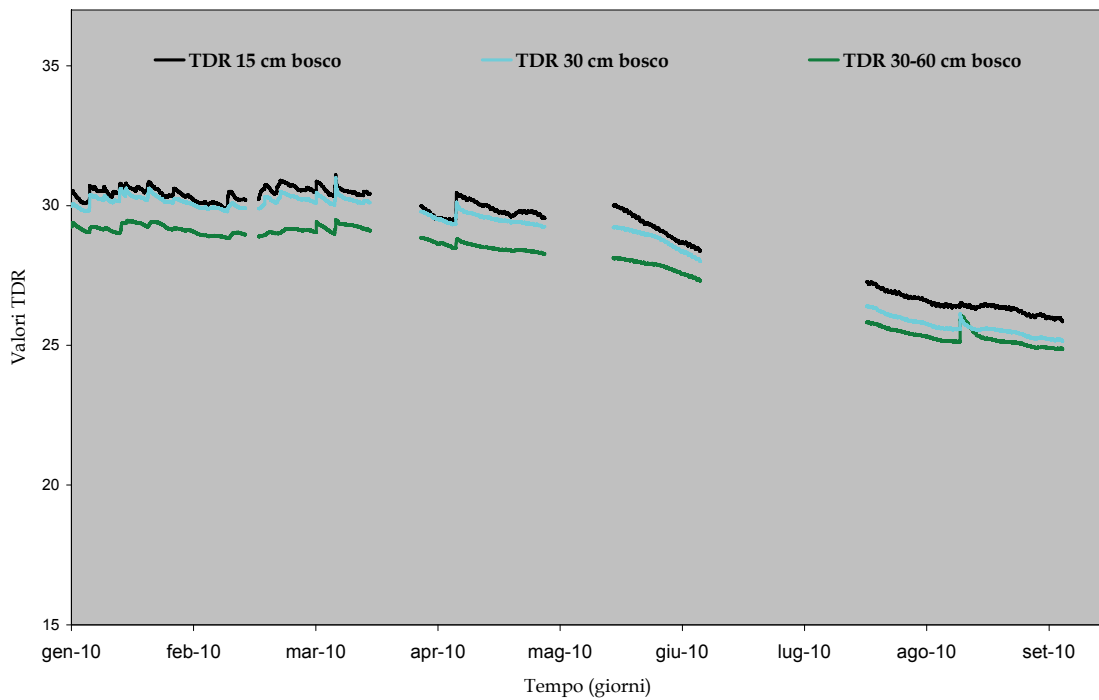
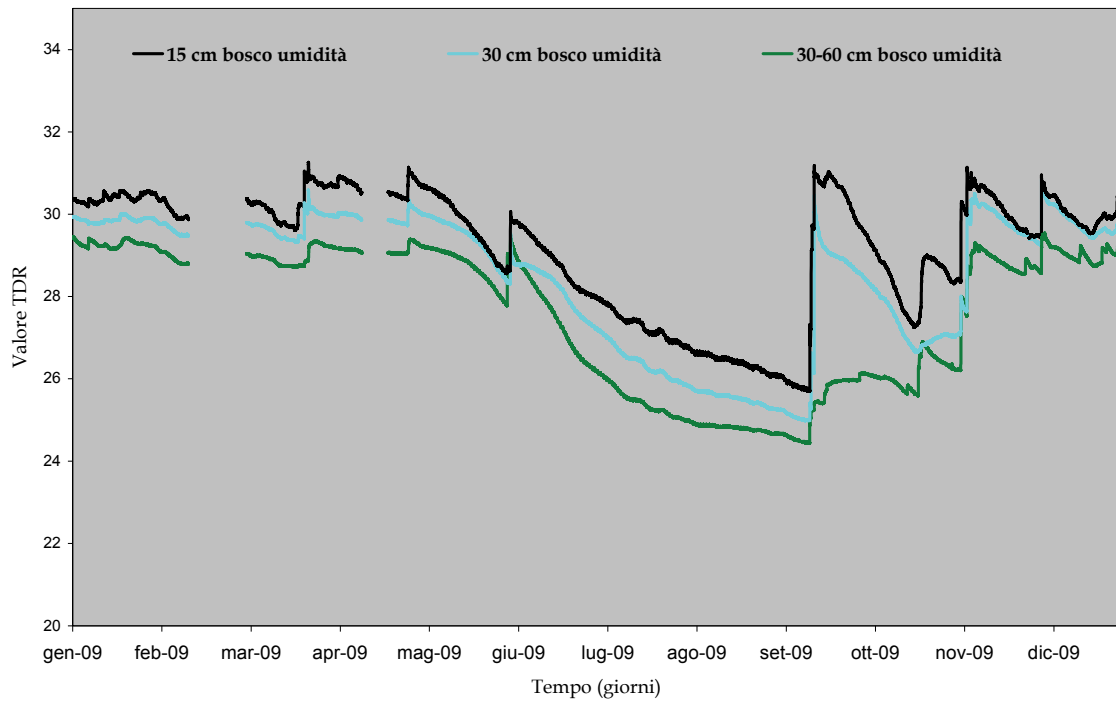


Figura 7: Valori di risposta delle sonde TDR relative al versante ricoperto da macchia, per gli anni 2009 e 2010.

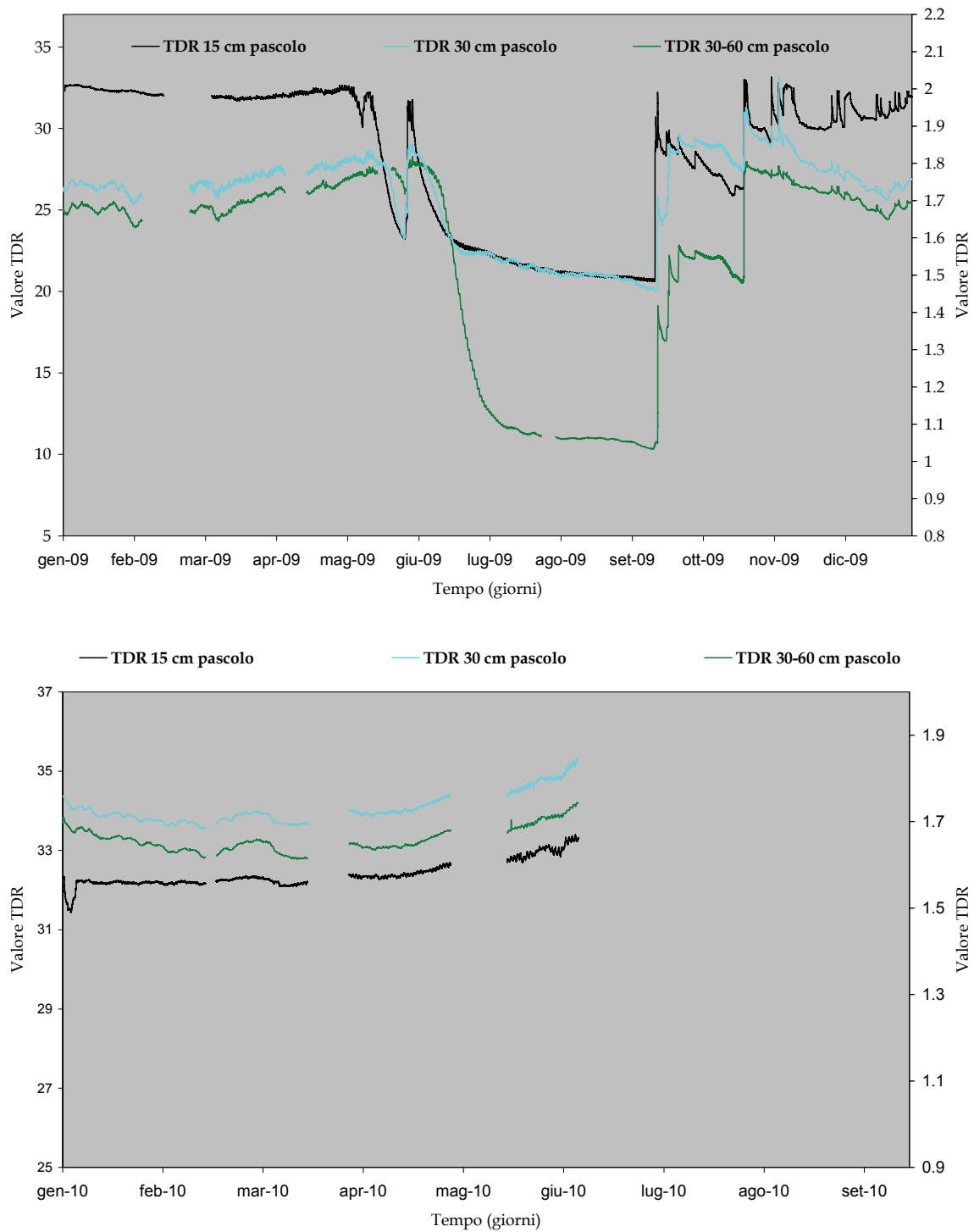


Figura 8: Valori di risposta delle sonde TDR relative al versante a pascolo, per gli anni 2009 e 2010.

La sonda TDR, che esplora i primi 15 cm di suolo, riporta valori più alti di tempo di viaggio del segnale, ciò è dovuto al fatto che ci troviamo nella parte più superficiale, dove il terreno si satura molto più velocemente che in profondità, dando quindi dei tempi di risposta della sonda più lunghi.

Ciò si verifica sia per la sonda posizionata nella macchia, sia per quella posizionata nel pascolo. Nel periodo estivo, invece, i valori del TDR si abbassano, tale comportamento si registra a tutte e tre le profondità, sia per il pascolo che per la macchia. La diminuzione dei tempi di risposta del TDR è dovuta ad un aumento delle temperature ed all'assenza di piogge.

Nella metodologia TDR l'output strumentale, rappresentato dal tempo di transito del segnale lungo gli elettrodi delle sonde, è influenzato dalle variazioni di temperatura del mezzo poroso in cui si stanno effettuando le misure. Ciò rende indispensabile la necessità di correggere tali valori.

3.2 EFFETTO DELLA TEMPERATURA SUL TDR

La strumentazione di campo, affinché possa fornire misure attendibili delle variabili idrologiche misurate, deve essere sottoposta ad un processo sia di calibrazione che di correzione dell'output dagli effetti delle condizioni ambientali.

Nella metodologia TDR l'output strumentale, rappresentato dal tempo di transito del segnale lungo gli elettrodi delle sonde, è influenzato dalle variazioni di temperatura del mezzo poroso in cui si stanno effettuando le misure. E' possibile notare tale differenza in Figura 9, dove sono messi a confronto i valori dei diversi andamenti delle sonde (distinte in base alla profondità e all'uso del suolo) e la temperatura sia del pascolo che della macchia.

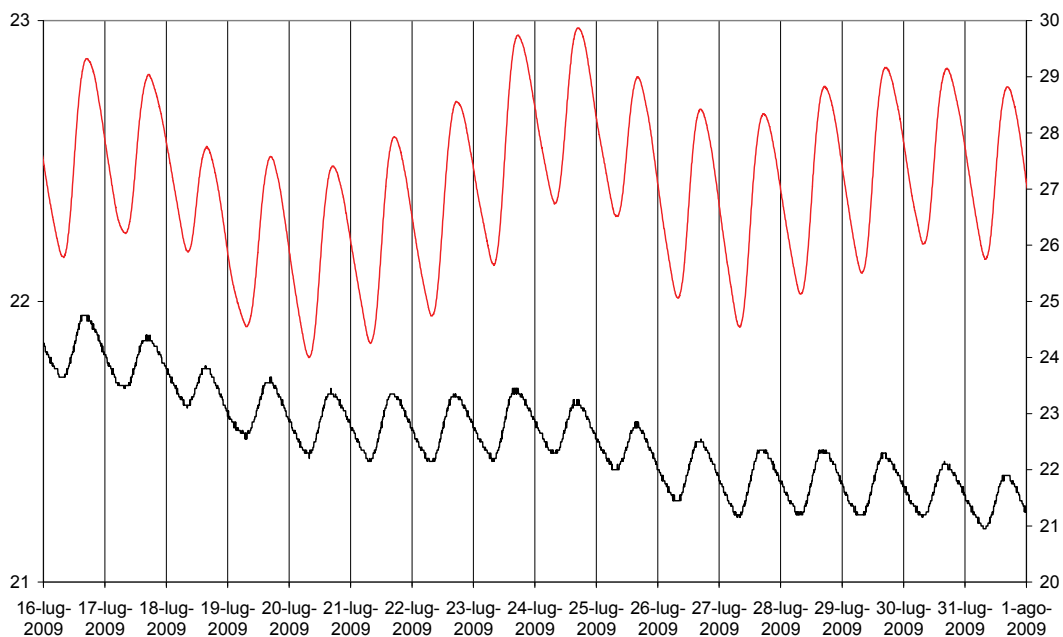


Figura 9: Confronto tra l'andamento della temperatura (linea rossa) e relative sonde TDR(linea nera).

Si osservano le oscillazioni giornaliere, dovute alle variazioni di temperatura, e alla risposta delle sonde che tendono a seguire lo stesso andamento, registrando tempi di risposta più lunghi nel momento in cui aumentano le temperature, periodo di tempo che corrisponde alle ore più calde del giorno.

È stato quindi necessario applicare un filtro temporale per eliminare l'oscillazione giornaliera della temperatura, attraverso la seguente formula:

$$\text{TDR corretto} = \text{TDR campo} - c \cdot (T - 20)$$

dove TDRcampo rappresenta il valore delle sonde TDR misurato in campo, T la temperatura in (°C) rilevata nel suolo e c è un coefficiente correttivo stimato empiricamente.

Per la stima del coefficiente c sono state utilizzate delle correlazioni differenti a seconda delle sonde (Figura 10). Per le tre sonde posizionate nella macchia e quella del pascolo alla profondità di 15 cm, il valore di c è risultato pari a 0,06, ciò vuol dire che per ogni incremento di temperatura di 1°C il valore del TDR deve essere corretto di 0,06. Mentre per le rimanenti sonde a 30 e 30-60 cm il valore di c è stato stimato pari a 0,004. La differente valutazione si è resa necessaria per la diversa scala di lettura delle due sonde più profonde del pascolo rispetto alle altre quattro.

Il valore di correlazione di 0,06 e 0,004 sono stati utilizzati per poter correggere i tempi di risposta delle sonde. I risultati ottenuti sono mostrati in Figura 11, e sono relativi sia al pascolo che alla macchia per tutto il periodo di studio.

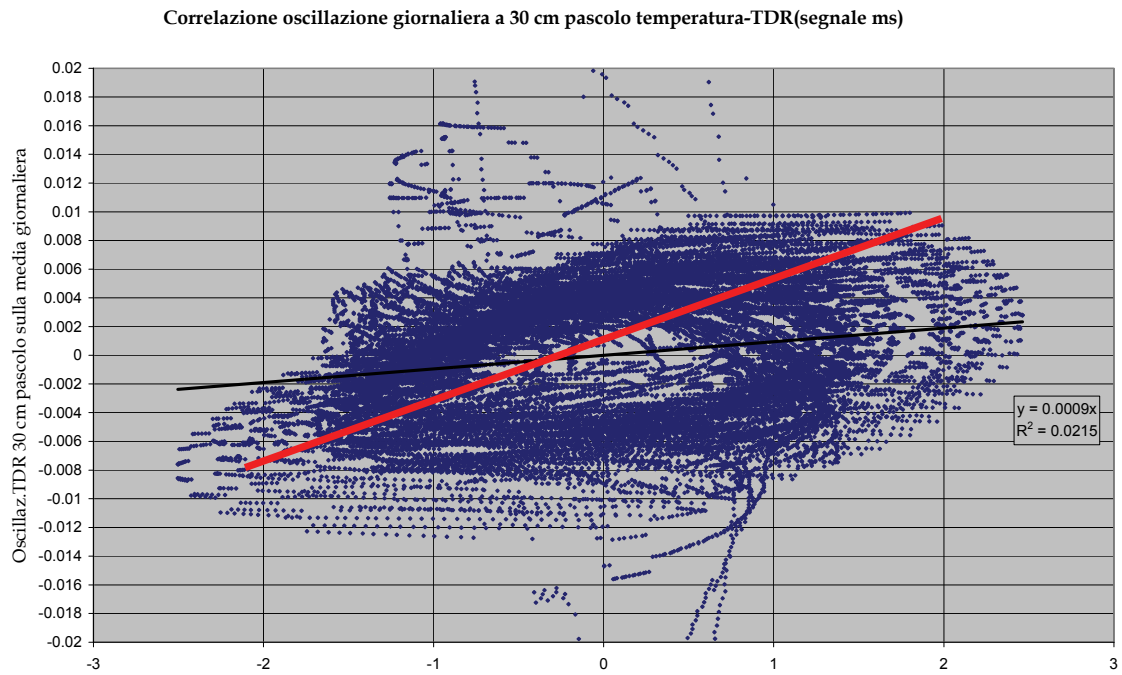
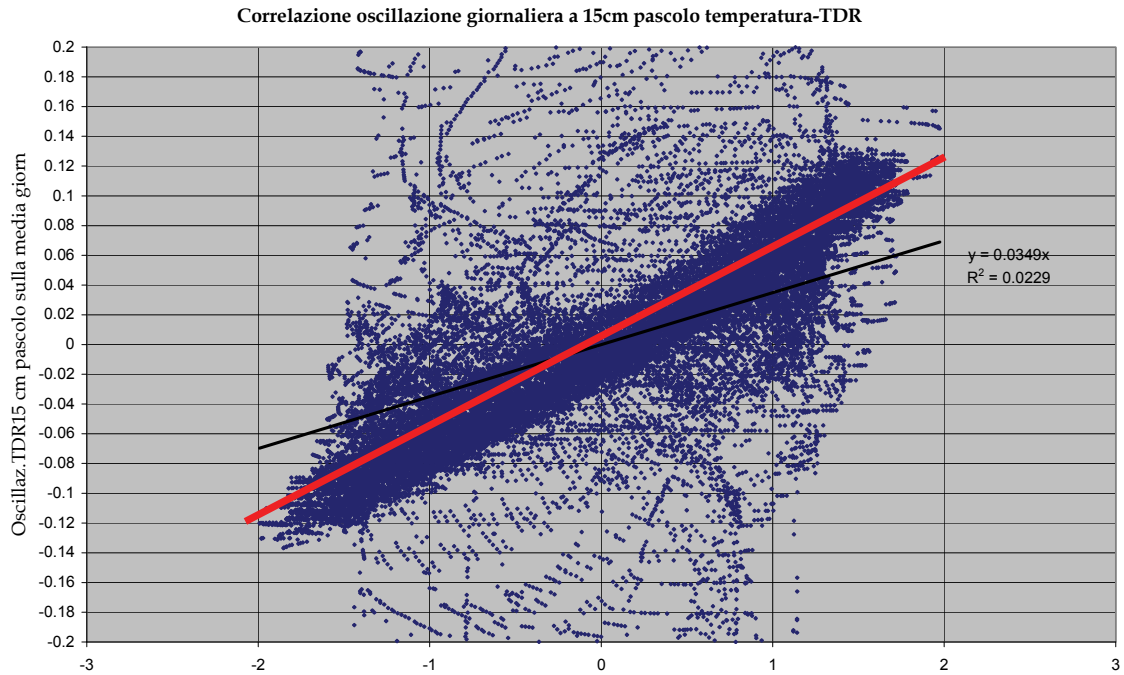


Figura 10: Correlazione tra la variazione giornaliera della temperatura e i valori delle sonde TDR.

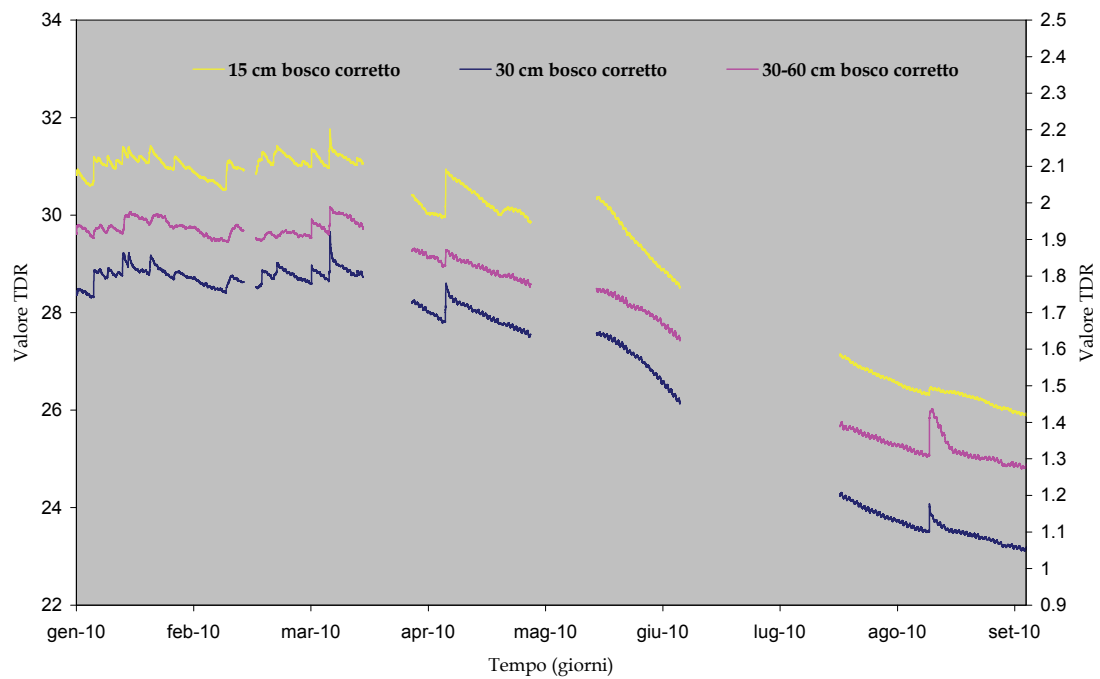
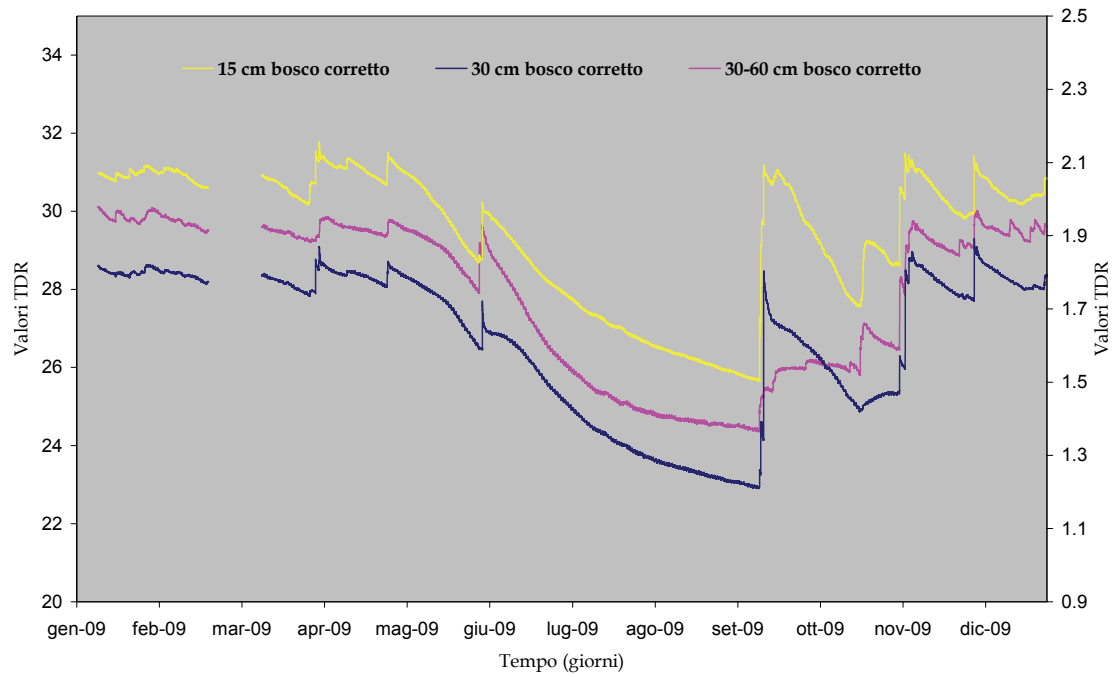


Figura 11: Dati dei TDR corretti dalle variazioni giornaliere della temperatura per l'anno 2009-2010 relativi al bosco.

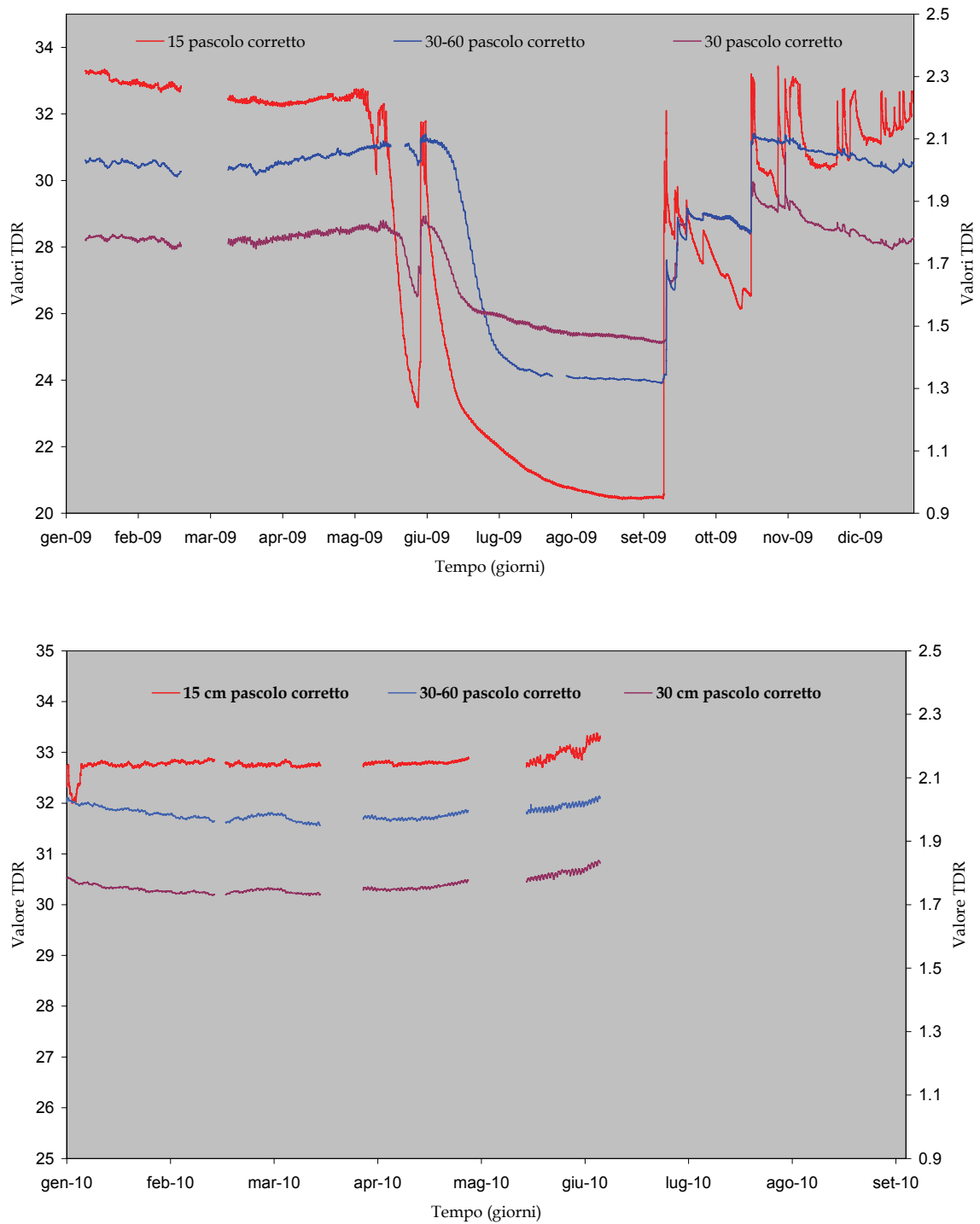


Figura 12: Dati dei TDR corretti dalle variazioni giornaliere della temperatura per l'anno 2009-2010 relativi al pascolo.

I TDR che risentono maggiormente della temperatura sono quelli che si trovano più in superficie. Questi, infatti, mostrano una maggior oscillazione giornaliera dovuta alla diversa temperatura del giorno e della notte.

È importante considerare che l'aumento del tempo di risposta delle sonde non è sempre dovuto all'incremento della temperatura, ma può essere dovuto alla presenza del verificarsi di un evento piovoso. Le piogge infatti rallentano il segnale del TDR, aumentando il tempo di percorrenza, per effetto della presenza di maggiore umidità. In tal caso il valore del TDR non deve essere corretto in quanto rappresenta un reale incremento che poi vera valutato in termini di aumento di umidità nel suolo.

In Figura 11 e 12 sono individuati gli andamenti, sia per l'anno 2009 sia per l'anno 2010, dei valori dei TDR corretti dall'effetto della temperatura.

Nel valutare l'umidità del suolo dovranno essere utilizzati questi valori di risposta della sonda, che poi andranno successivamente corretti con le quattro curve di calibrazione, che verranno valutate effettuando stime periodiche dell'umidità col metodo termico - gravimetrico.

3.3 CALIBRAZIONE DEL TDR

La calibrazione delle sonde TDR è consistita nella ricerca empirica della combinazione di parametri in grado di ottimizzare gli indici di valutazione dell'efficienza della simulazione, restituendo in tal modo una buona corrispondenza tra le curve dei valori calcolati dal modello e quelli effettivamente misurati in campo.

La calibrazione è stata eseguita per l'intero periodo delle misure ed ha riguardato sia le sonde sistemate internamente al bosco sia quelle interne al pascolo.

Per rilevare il contenuto idrico del suolo da correlare ai valori del segnale del TDR, sono stati prelevati, nel periodo compreso tra giugno e novembre 2009, dei campioni di terreno per i quali si è determinata l'umidità col metodo gravimetrico.

I punti di prelievo sono stati fatti il 3 e il 23 giugno 2009, il 3 luglio 2009 e il 17 novembre 2009. Per ognuno di essi sono stati prelevati due campioni alle profondità comprese tra 0 e 50 cm, così da avere un'indicazione della distribuzione verticale dell'umidità nello strato di suolo interessato dagli elettrodi della sonda. I risultati delle analisi gravimetriche sui campioni prelevati in campo, identificati in tabella, hanno fornito i valori di umidità misurati alle diverse profondità. Tali valori sono poi stati inseriti nei grafici per poter valutare l'umidità alle profondità di 15, 30 e 30-60 cm, profondità a cui si trovano i TDR sia del pascolo sia del bosco (figure 13, 14, 15 e 16).

Carota esterna		Umidità	Profondità
Peso saturo		0.20456621	5.5
Peso secco con cilindro	501.9	0.207	13.5
Peso secco senza cilindro	420.7	0.185770286	23.5
Volume	327.9102	0.203496169	35
Dry density gr/cm ³	1.4	0.204653781	6
		0.183646796	18.5
Carota interna		Umidità	Profondità
Peso saturo		0.313782889	7.5
Peso secco con cilindro	501.9	0.231122661	22.5
Peso secco senza cilindro	420.7	0.315069382	5
Volume	327.9102	0.272016569	20
Dry density gr/cm ³	1.282973	0.206314801	32.5
		0.313782889	7.5

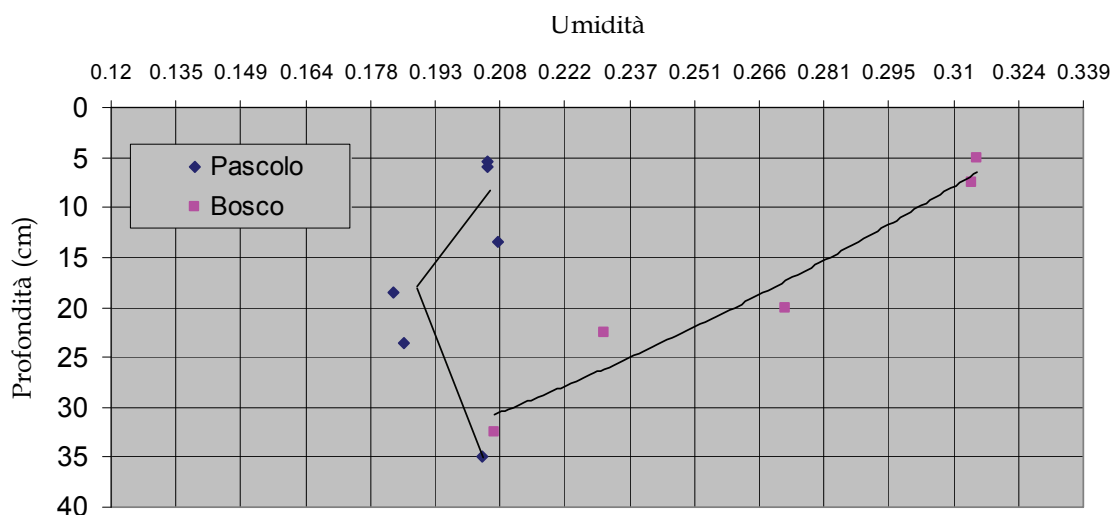


Figura 13: Distribuzione verticale dell'umidità del suolo risultante dalle analisi eseguite in laboratorio sul campione prelevato il 3 giugno 2009

Carota esterna		Umidità	Profondità
Peso saturo		0.156975545	7.5
Peso secco con cilindro	501.9	0.11756197	22.5
Peso secco senza cilindro	420.7	0.108470361	35
Volume	327.9102		
Dry density gr/cm ³	1.4		
Carota interna		Umidità	Prondità est
Peso saturo		0.096653751	5
Peso secco con cilindro	501.9	0.136225674	16
Peso secco senza cilindro	420.7	0.132283465	28.5
Volume	327.9102		

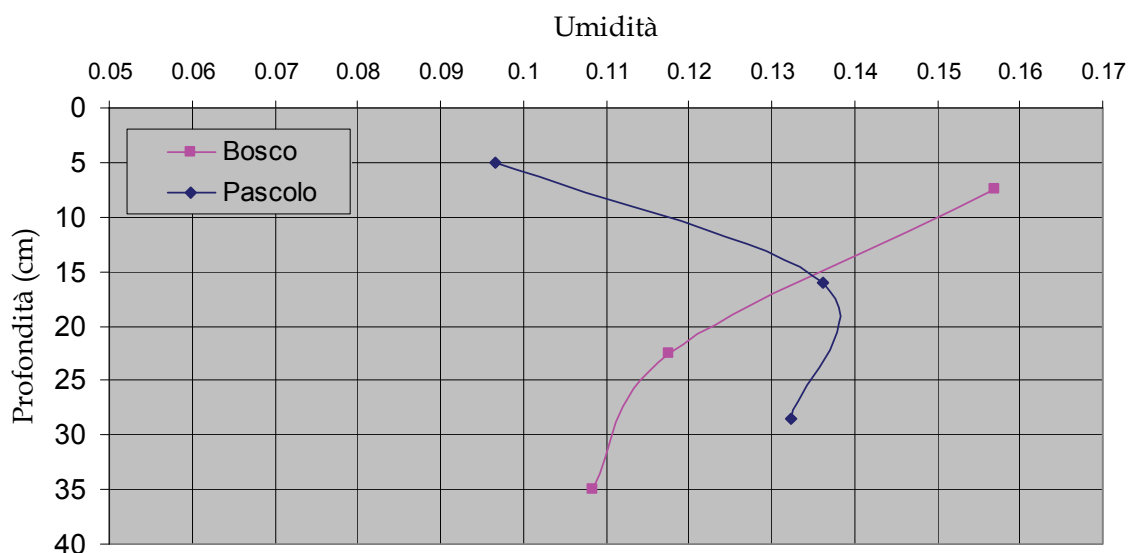


Figura 14: Distribuzione verticale dell'umidità del suolo risultante dalle analisi eseguite in laboratorio sul campione prelevato il 23 giugno 2009

Carota esterna		Umidità	Profondità
Peso saturo		0.080802792	7.5
Peso secco con cilindro	501.9	0.071344041	20
Peso secco senza cilindro	420.7	0.095843521	28.5
Volume	327.9102	0.18511648	38.5
Dry density gr/cm ³	1.4	0.152586938	49
Carota interna		Umidità	Profondità
Peso secco con cilindro	501.9	0.194717687	8.5
Peso secco senza cilindro	420.7	0.124680181	23.5
Volume	327.9102	0.098690246	33.5
Dry density gr/cm ³	1.282973	0.12016516	50

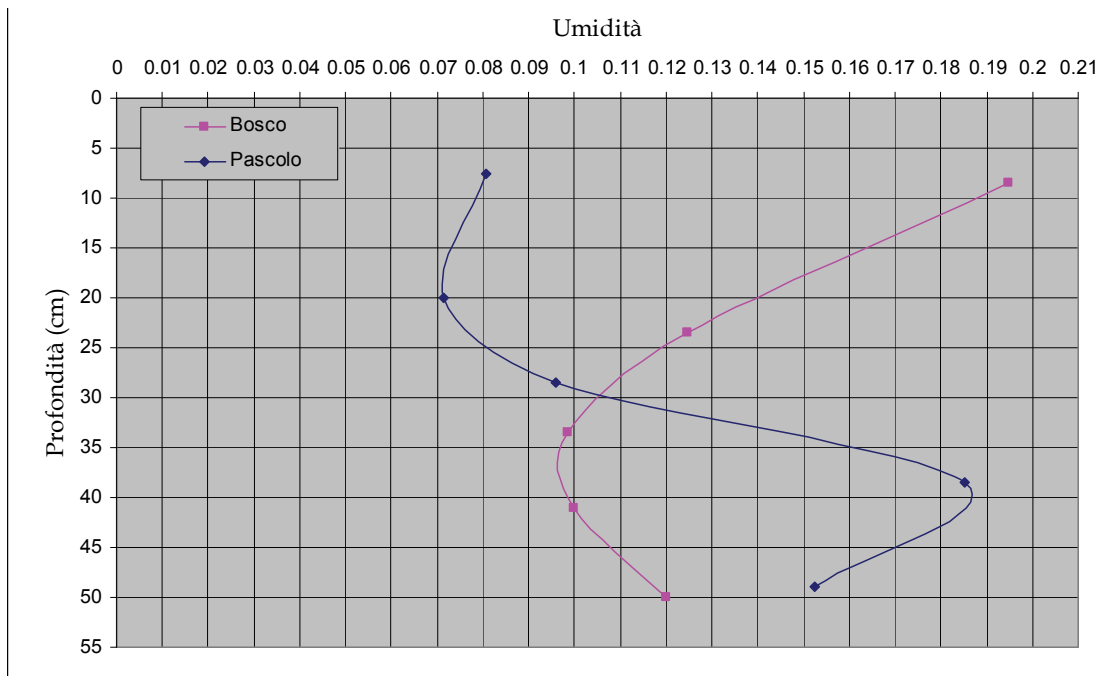


Figura 15: Distribuzione verticale dell'umidità del suolo risultante dalle analisi eseguite in laboratorio sul campione prelevato il 3 luglio 2009

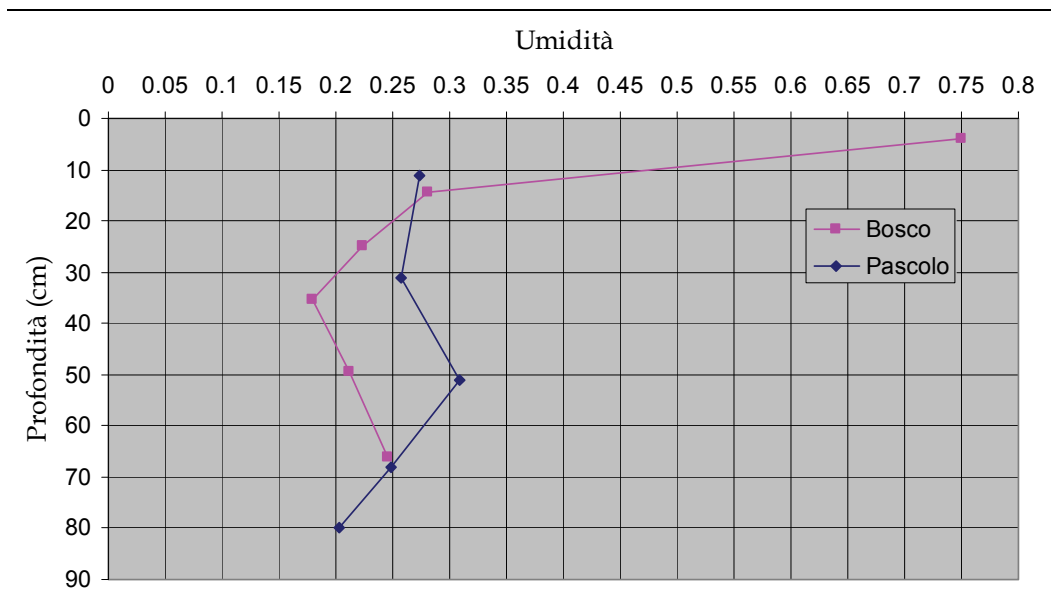


Figura 16: Risultati delle analisi eseguite in laboratorio sul campione prelevato il 17 novembre 2009

Associando ai valori del segnale forniti dalle sonde i valori di umidità dei campioni prelevati nei diversi punti, si sono ottenute le curve di calibrazione evidenziate in figura 17.

Le curve di calibrazione mettono in evidenza che le sonde posizionate nel bosco raggiungono valori massimi di umidità del 50 % circa, mentre per sonde posizionate nel pascolo, il valore massimo si aggira intorno al 40%.

Tali curve sono sostanzialmente differenti da quelle proposte dalla ditta produttrice delle sonde TDR. Ciò è dovuto al differente tipo di substrato. Le curve di calibrazione così ottenute saranno in grado di fornirci i valori di umidità, sia per il suolo ricoperto dalla macchia, sia per quello a pascolo.

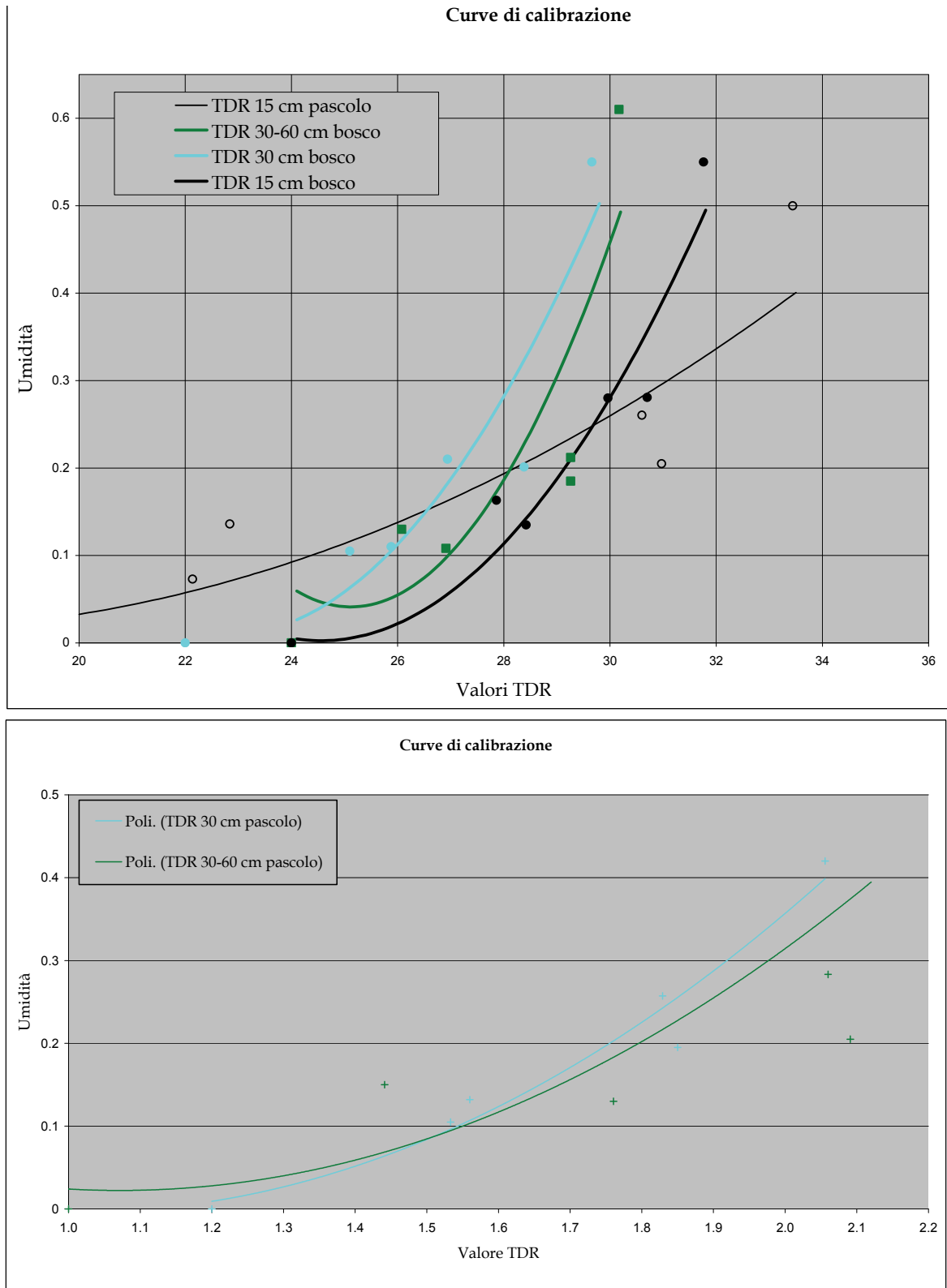


Figura 17: Andamento delle curve di calibrazione per le sei sonde TDR.

3.4 STIMA DELL'UMIDITÀ DEL SUOLO

Una volta ottenute le curve di calibrazione per le 6 sonde, i valori del segnale misurati in campo sono stati trasformati in valori di umidità del suolo. Nelle figure 18 e 19 sono riportati i valori di umidità misurati alle diverse profondità, rispettivamente per l'anno 2009 e 2010 sia per l'area a pascolo sia per quella a macchia. Per ogni grafico sono inoltre riportate le relative precipitazioni che sono state misurate nelle due aree di studio.

I risultati mostrati nelle figure 18 e 19 identificano l'aumento dell'umidità in corrispondenza del verificarsi di eventi piovosi.

Le umidità osservate a differenti profondità nel suolo sotto la macchia e sotto il pascolo sono riassunte in figura 20, per il periodo di monitoraggio compreso tra gennaio 2009 e settembre 2010. Alcune proprietà statistiche calcolate per le serie temporali di umidità osservata sono state riportate in figura 21.

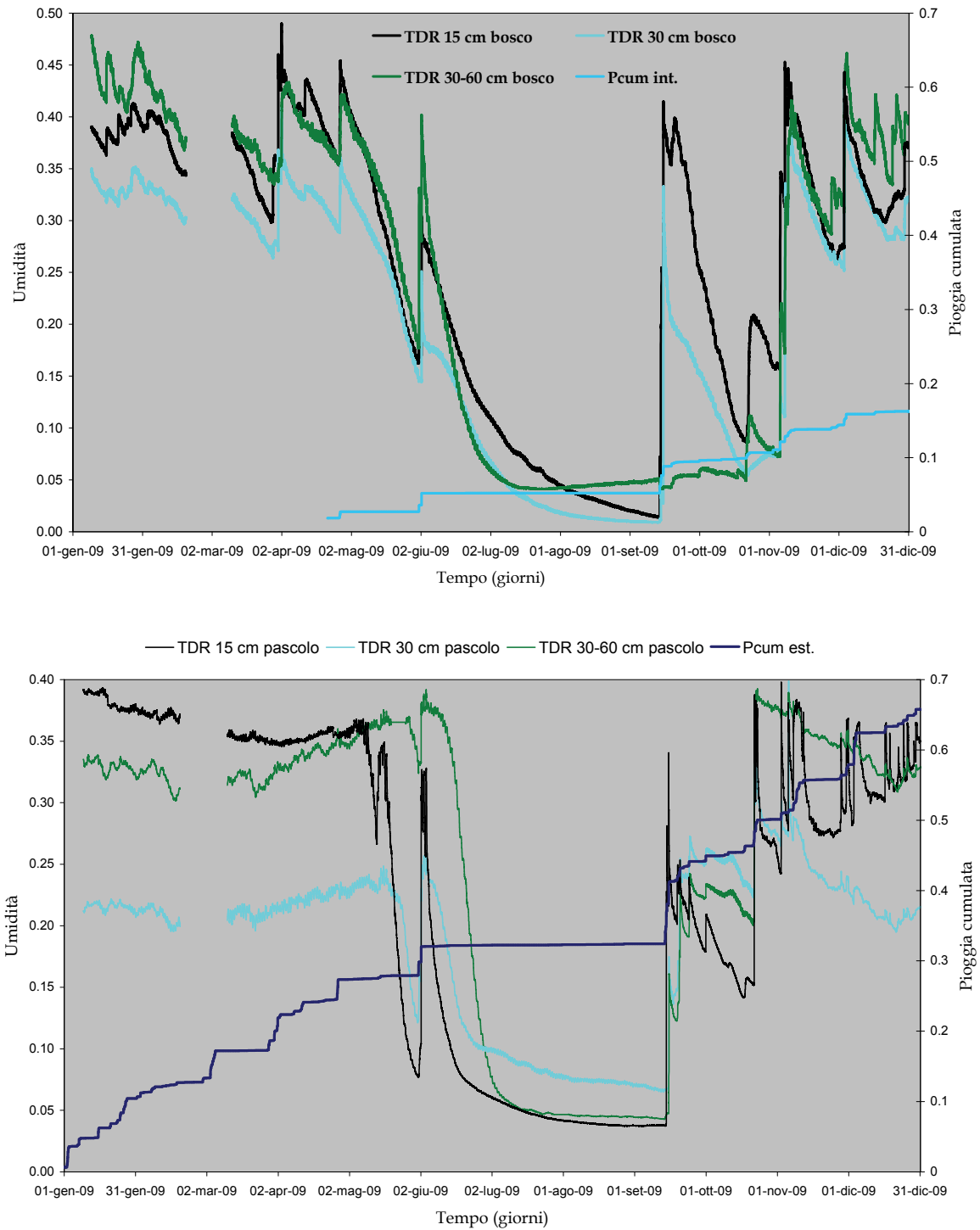


Figura 18: Valori di umidità del suolo calcolati utilizzando le curve di calibrazione inerenti al suolo ricoperto da bosco e pascolo per l'anno 2009.

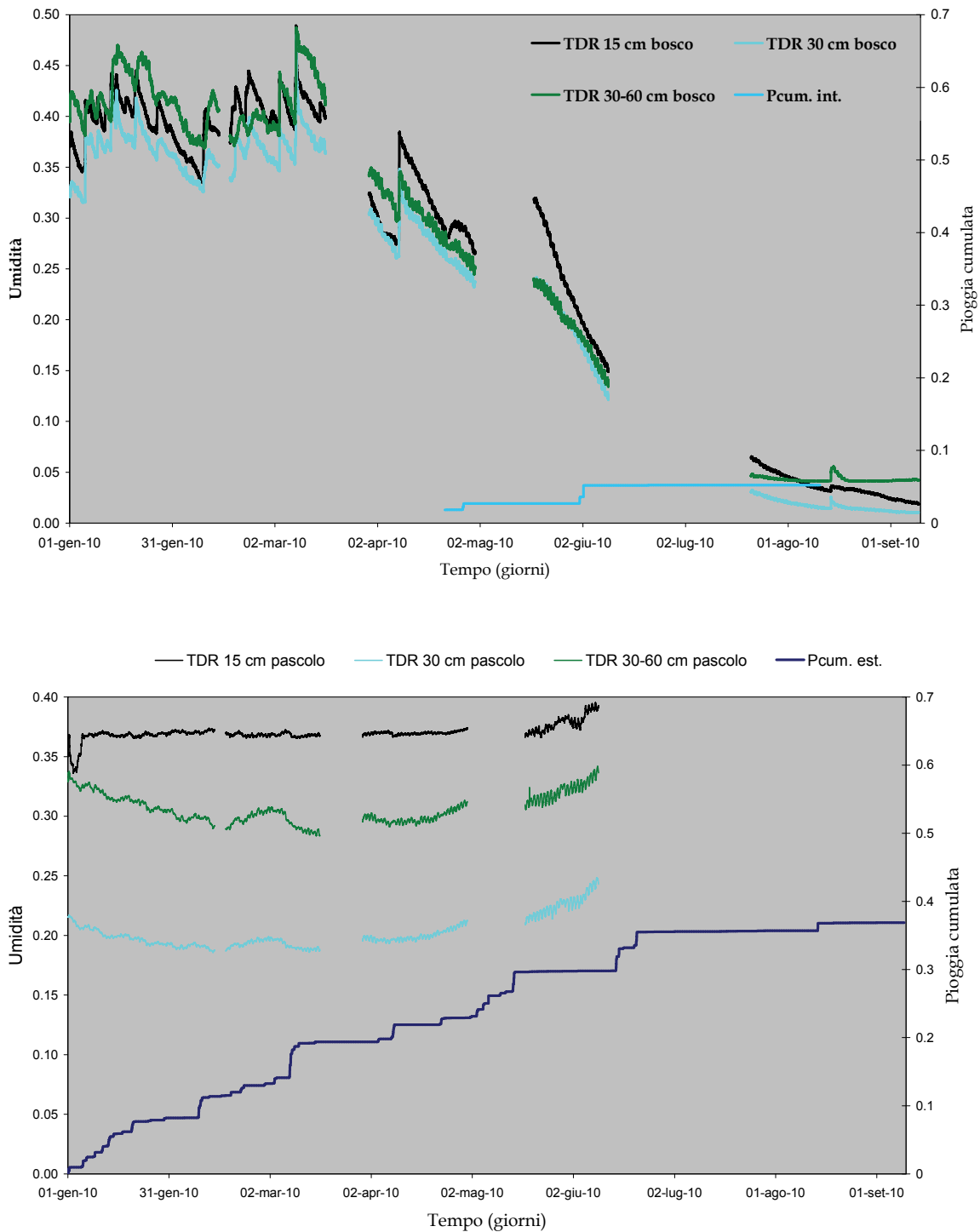


Figura 19: Valori di umidità del suolo calcolati utilizzando le curve di calibrazione inerenti al suolo ricoperto da bosco e pascolo per l'anno 2010.

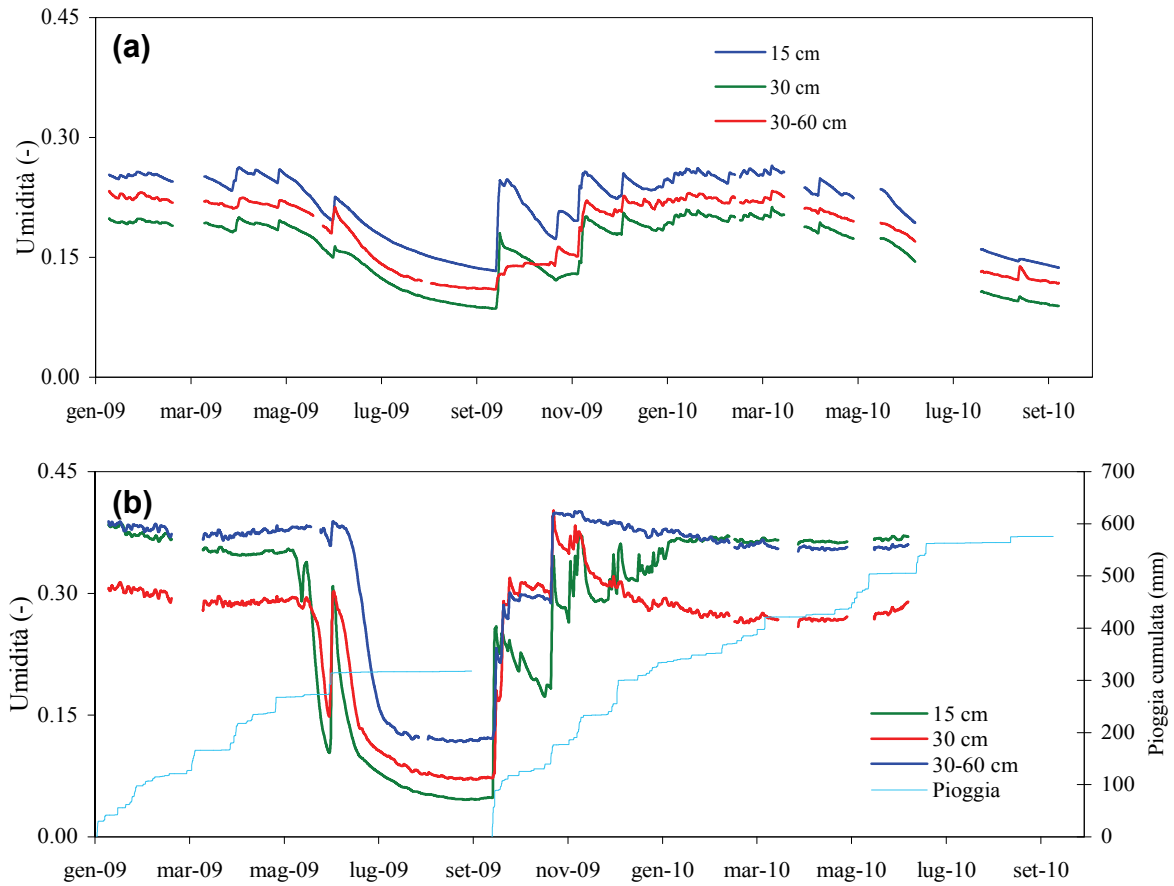


Figura 20. Pioggia cumulata e umidità osservata a differenti profondità nel suolo (a) sotto la macchia e (b) sotto il pascolo, nel periodo compreso tra gennaio 2009 e settembre 2010.

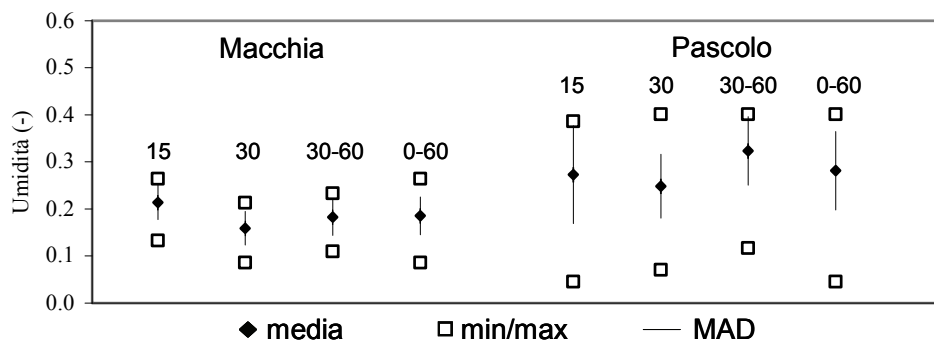


Figura 21. Proprietà statistiche delle umidità osservate nel periodo di monitoraggio a differenti profondità nel suolo sotto la macchia e sotto il pascolo.

I risultati ottenuti hanno indicato che i suoli sotto le due coperture vegetali presentano differenti dinamiche di umidità. Sotto la macchia, a tutte le profondità monitorate, il suolo è stato mediamente più asciutto rispetto a quanto osservato nel suolo sotto il pascolo. Nella macchia i contenuti idrici massimi sono stati inferiori rispetto a quelli osservati nel pascolo. Per contro, i valori minimi di umidità osservati sono stati superiori a tutte le profondità rispetto al suolo col pascolo. In particolare la sonda più superficiale, posizionata nel suolo a 15 cm, raggiunge il valore massimo di umidità (saturazione) corrispondente a 0,49 il 2 Aprile 2009 e il 9 Marzo 2010. Si può notare come il comportamento dell'umidità nel tempo sia molto simile all'interno delle tre profondità in cui sono stati rilevati i dati.

I valori di contenuto di umidità più elevati si verificano nel primo strato di suolo, per poi passare a valori via via minori nelle altre due profondità. Nel grafico viene riportata la pioggia cumulata nel sotto bosco, dove in corrispondenza di eventi piovosi, abbiamo un aumento dell'umidità nel suolo in maniera crescente, dallo strato dei 15 cm fino a quello dei 30-60 cm. Questo non si verifica in corrispondenza delle precipitazioni dei primi giorni di giugno, dove abbiamo valori di umidità superiori nello strato più profondo.

Come si vede in figura 20, nei due periodi invernali monitorati il suolo con copertura a pascolo è stato sempre prossimo alla saturazione con valori di umidità maggiori nel primo strato e minori in quello centrale. A partire dal periodo primaverile-estivo, questo suolo si è disseccato rapidamente per effetto degli intensi processi evapotraspirativi, dapprima in superficie e poi in profondità, raggiungendo l'umidità minima del 5%. A differenza di quanto osservato nel suolo col pascolo, nel suolo sotto la macchia non è mai stata osservata la saturazione idrica. In seguito alle precipitazioni, le sonde nel suolo sotto la macchia hanno spesso risposto in maniera simultanea alle varie profondità, indicando la presenza di flussi idrici preferenziali nella macroporosità del suolo. Nel periodo primaverile-estivo, il suolo sotto la macchia si è asciugato gradualmente, in maniera simultanea a tutte le profondità osservate, raggiungendo alla fine dell'estate un contenuto idrico minimo del 12%. Il differente comportamento idrologico del suolo sotto la macchia rispetto a quello nel pascolo è probabilmente legato a molteplici aspetti, legati sia all'uso del suolo che alla vegetazione. Infatti il suolo sotto macchia, in particolare nel primo orizzonte organico, si presenta con maggiori caratteristiche di ritenzione idrica e con una maggiore permeabilità, impedendo

quindi il formarsi di ristagni idrici. Inoltre, questo suolo presenta una maggiore potenza rispetto a quello nel pascolo, poiché in quest'ultimo le continue lavorazioni e i processi idrici erosivi hanno portato ad un impoverimento dello strato superficiale di suolo. Per quanto riguarda la vegetazione, la fitta copertura a macchia durante il periodo piovoso per effetto dell'intercettazione fogliare determina minori afflussi idrici al suolo rispetto a quanto avviene per il pascolo; tuttavia, durante il periodo estivo, le chiome delle piante intercettano la radiazione solare, limitando notevolmente i flussi evaporativi dal suolo, il quale, quindi, rimane più umido rispetto al suolo nel pascolo.

3.5 PRECIPITAZIONE SOTTOCHIOMA E TEMPERATURA DEL SUOLO

La precipitazione sottochioma è stata misurata per il periodo compreso tra febbraio e luglio 2009. In questo periodo, la pioggia sottochioma è stata circa il 30% della precipitazione misurata nella stazione climatica fuori vegetazione. Come mostrato in figura 22, la quota di pioggia intercettata è stata massima per precipitazioni di piccola entità, ed è diminuita all'aumentare della precipitazione giornaliera.

La temperatura del suolo sotto la macchia e sotto il pascolo è stata monitorata per il periodo compreso tra gennaio 2009 e settembre 2010. La temperatura media del suolo registrata nel periodo di monitoraggio è stata di 16.4 C° sotto la copertura a pascolo e di 15.4 C° sotto la macchia. Anche nella figura 24 (che mostra la variazione della temperatura durante l'intero periodo di monitoraggio sia per il pascolo che per la macchia, misurata alla profondità di 15 cm) si nota come la temperatura del suolo sotto il bosco risulta sempre più bassa di quella misurata nel pascolo tranne all'inizio e alla fine dell'anno dove tendono a sovrapporsi. Come si può vedere in figura 23, il suolo col pascolo ha mostrato in estate una temperatura media giornaliera di circa 5 C° più elevata rispetto a quella registrata sotto la macchia. Le escursioni termiche giornaliere nel suolo sotto il pascolo sono state massime nel periodo primaverile, pari a circa 5 C°, e generalmente inferiori ad 1 C° in inverno. Nel suolo sotto la macchia, le escursioni termiche hanno presentato una minore variabilità stagionale, e sono state generalmente inferiori ad 1 C° durante tutto il periodo di monitoraggio. Quest'effetto, dovuto alla schermatura dalla radiazione solare da parte della chioma degli alberi, ha come conseguenza un minore consumo idrico per evaporazione diretta dal suolo.

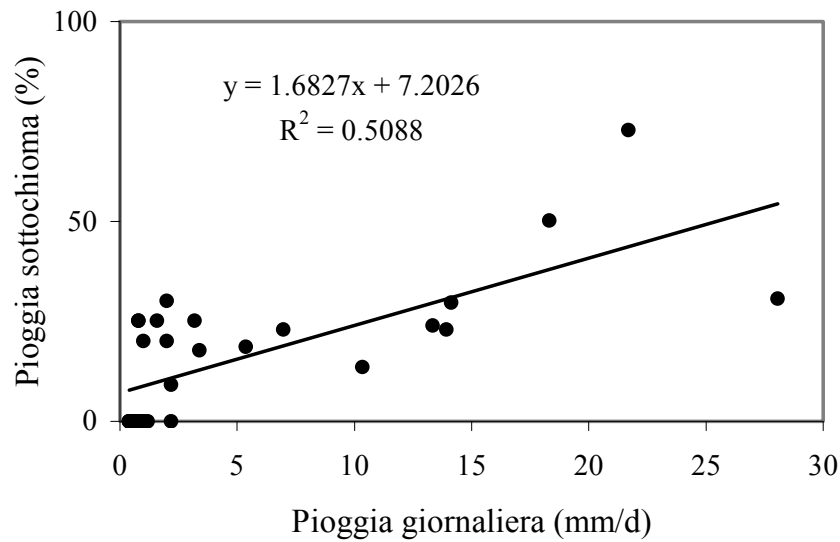


Figura 22. Relazione tra la pioggia giornaliera misurata nella stazione climatica e la pioggia misurata sotto la copertura a macchia nel periodo compreso tra gennaio e luglio 2009.

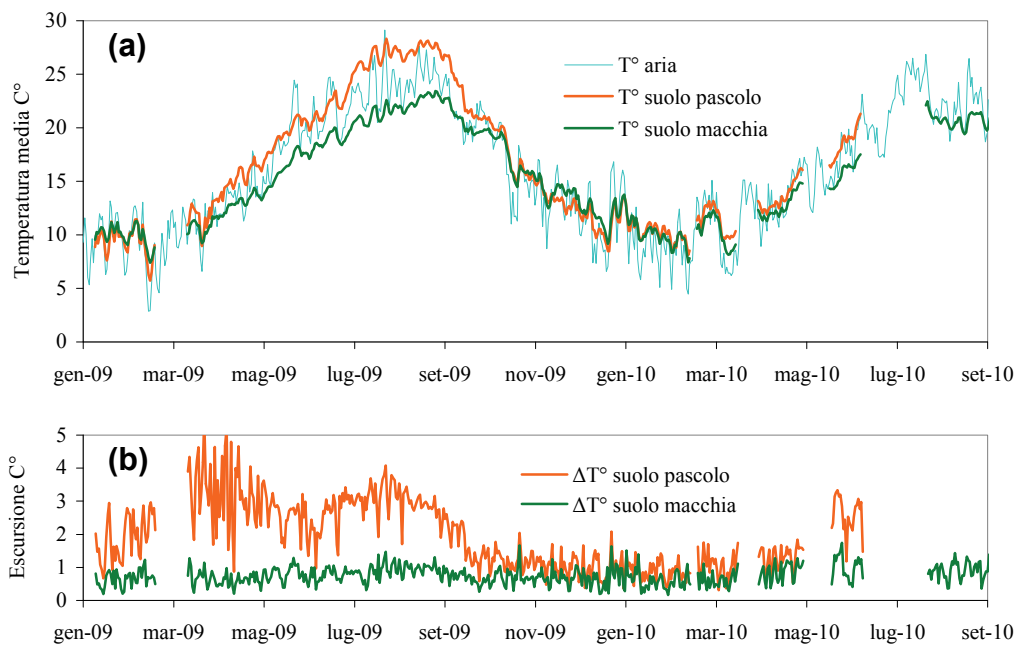


Figura 23. Serie temporale a) della temperatura media giornaliera dell'aria e dei suoli con la macchia e con il pascolo e b) escursioni termiche giornaliere osservate nei due suoli.

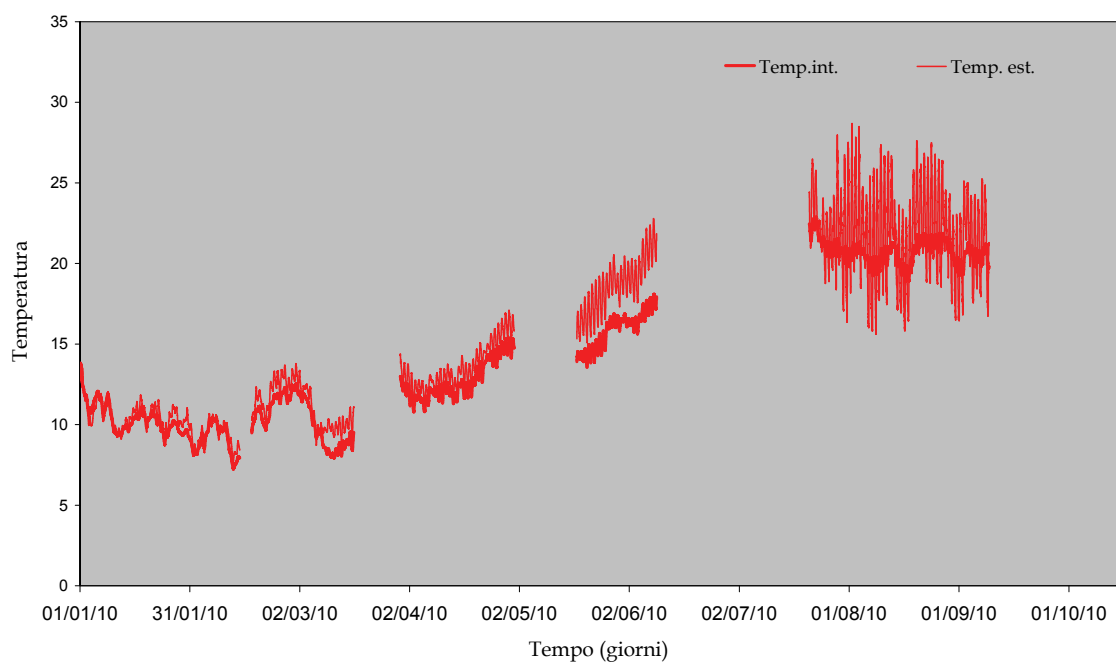
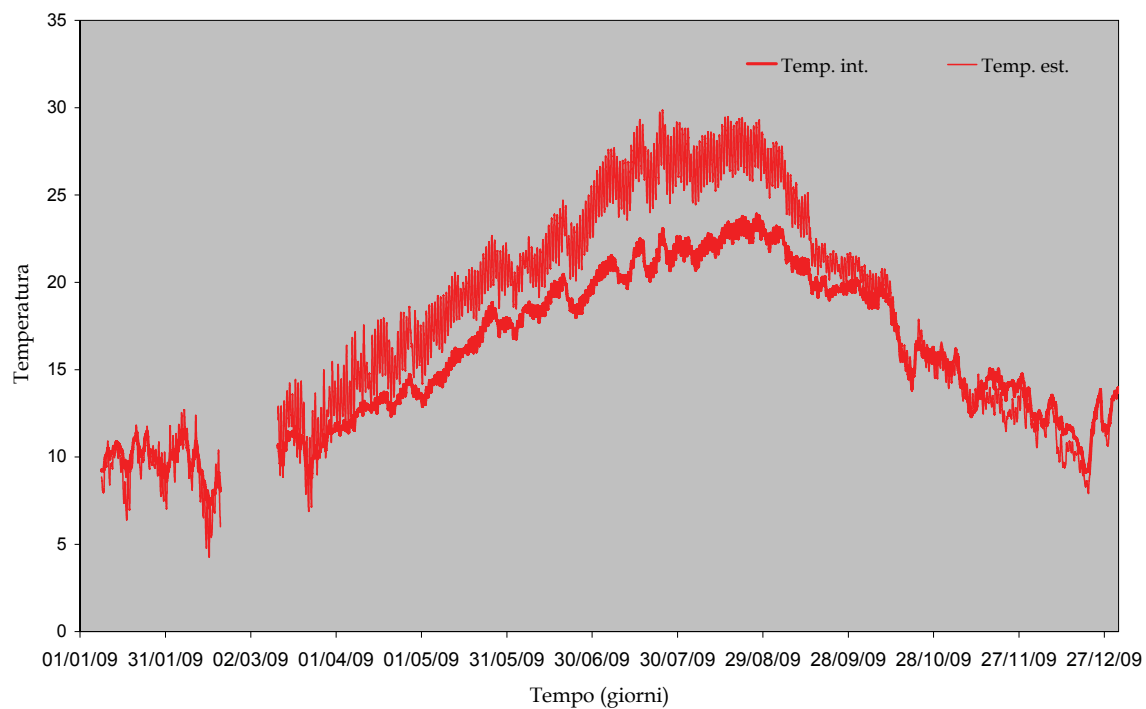


Figura 24: Valore di Temperatura misurata alla profondità di 15 cm, nel versante a macchia (int.) e a pascolo (est.), per l'anno 2009 - 2010.

3.6 CARATTERIZZAZIONE IDRAULICA DEI SUOLI

La stima delle curve di ritenzione idrica dei suoli sotto le due coperture vegetali è stata effettuata tramite due esperimenti di evaporazione (metodologia di Win) Romano e Santini, 1999), svolti su due campioni di suolo indisturbati (volume pari a 300 cm³) prelevati rispettivamente alla profondità di 10 cm nella macchia (eliminando quindi la lettiera e lo strato organico superficiale), e superficialmente nel pascolo. Le prove di evaporazione sono state compiute utilizzando le procedure sperimentali indicate in Arya (2002). Alle stesse profondità di prelievo dei campioni, la conducibilità idrica del suolo quasi saturo è stata determinata in campo con un infiltrometro a tensione (disco di 20 cm di diametro) (Angulo-Jaramillo et al., 2000), misurando le velocità di infiltrazione stazionaria per le tensioni sequenziali di -10, -5, -2, -1 e -0.5 cm, sia nel suolo sotto la macchia, sia sotto il pascolo.

I risultati delle prove di caratterizzazione idraulica effettuate sui campioni di suolo prelevati sotto la macchia e sotto il pascolo sono illustrati in figura 25. Il campione di suolo prelevato nella macchia ha presentato una porosità del 49%, con una densità apparente (Dry density) di 1275 kg/m³. La porosità del campione prelevato nel suolo destinato a pascolo è risultata pari al 40%, con una densità apparente di 1400 kg/m³. In base a tali risultati mediante il metodo Van Genuchten, è stato possibile ricavare le due curve di ritenzione idrica, distinte per i due tipi di suolo.

Le curve di ritenzione idrica determinate per i suoli sotto la macchia e nel pascolo, sono illustrate in Figura 26.

I risultati delle prove di evaporazione hanno mostrato che le curve di ritenzione e di conducibilità idrica dei due suoli sono simili nell'intervallo della tensione tra -600 cm e -50 cm. In prossimità della saturazione, queste curve mostrano un incremento della pendenza, in misura più marcata nel suolo con copertura a macchia. La curva di ritenzione idrica del campione sotto la macchia, raggiunge il valore massimo di umidità pari a 0.455 cm³/cm³ circa, in corrispondenza di valori di tensione minima di circa 1 cm. Lo stesso comportamento lo si denota anche per il campione riferito al pascolo, il quale a differenza del precedente raggiunge il valore massimo di umidità a 0,39 cm³/cm³ circa.

Dott.ssa Silvia Tola

**INDAGINI SPERIMENTALI E MODELLAZIONE DEGLI EFFETTI IDROLOGICI DEI CAMBIAMENTI DI USO DEL
SUOLO IN AMBIENTE MEDITERRANEO**

Dottorato di ricerca in Monitoraggio e controllo degli ecosistemi forestali in ambiente mediterraneo

La conducibilità idrica del suolo a pascolo è risultata pari a 0.25 e 13 mm/h, rispettivamente per le tensioni di -10 cm e -0.5 cm. Per gli stessi valori di tensione, la conducibilità idrica del suolo sotto la macchia è risultata più elevata, pari rispettivamente a 0.65 e 21 mm/h.

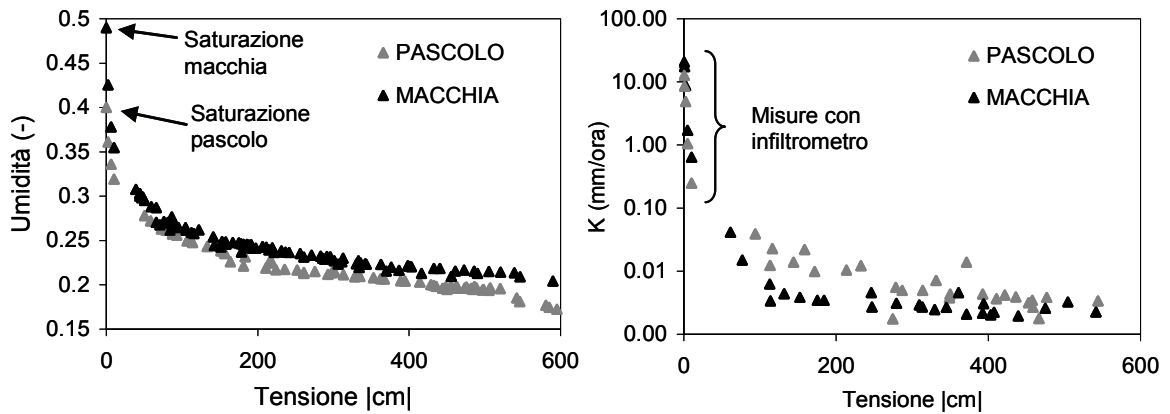


Figura 25. Confronto tra le curve di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica stimate per i suoli sotto la copertura a macchia e a pascolo.

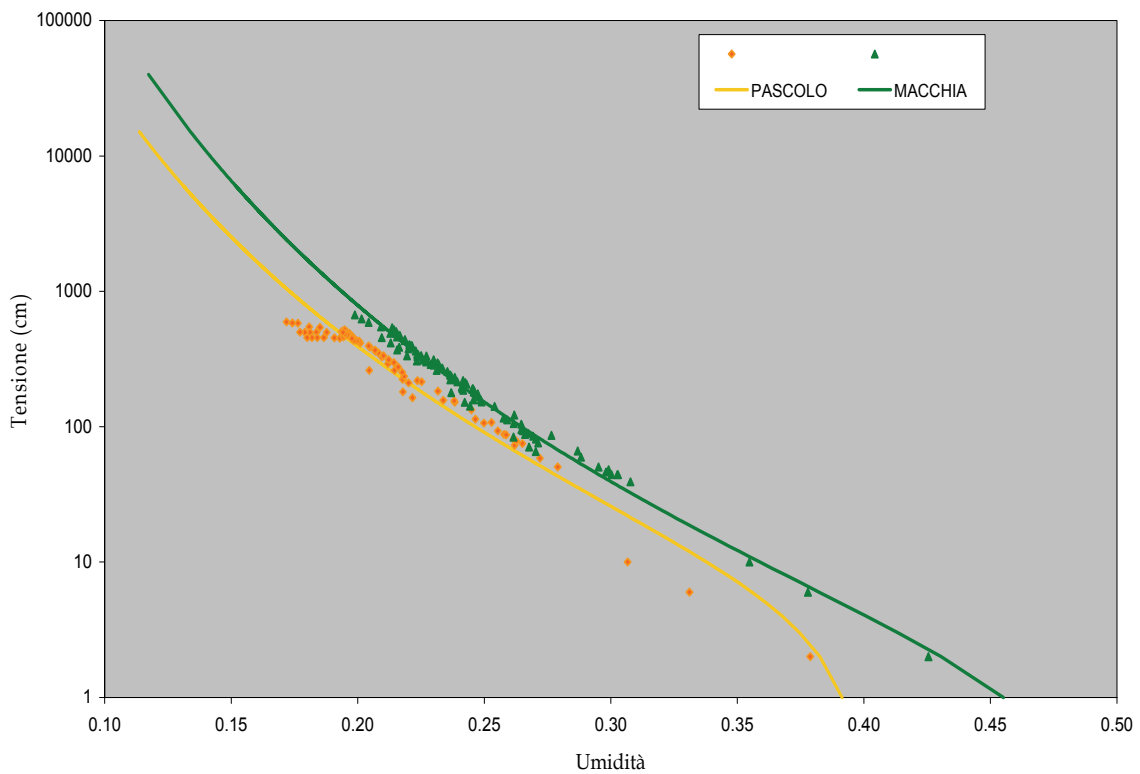


Figura 26: curva di ritenzione idrica per i due differenti usi del suolo.

3.7 DETERMINAZIONE DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE

L'evapotraspirazione ET rappresenta una grandezza chiave dei modelli climatici e un termine fondamentale dei bilanci idrologici e idrici del suolo, sia per finalità irrigue sia per la determinazione del pericolo potenziale di incendi.

Per evapotraspirazione si intende la perdita di acqua da parte del terreno con copertura vegetale, attraverso processi contemporanei di evaporazione del suolo (E) e di traspirazione da parte delle piante (T). Tale fenomeno richiede una notevole quantità di energia, in quanto comporta il passaggio dell'acqua dalla fase liquida a quella di vapore.

Nelle procedure di stima dei fabbisogni idrici delle colture, il flusso evapotraspirativo viene riferito alla coltura di riferimento (ET_o) e alla coltura specifica (ET_c). Il flusso evapotraspirativo viene così identificato nelle condizioni standard, vale a dire quelle condizioni in cui i processi di sviluppo e crescita delle piante non sono limitati dalla disponibilità idrica o da altri eventuali fattori di stress. In realtà le piante, in particolare negli ambienti caratterizzati da riduzione delle precipitazioni per diversi periodi dell'anno, non si trovano nelle condizioni definite standard. Risulta quindi fondamentale riuscire a determinare l'evapotraspirazione reale, o effettiva (ET_a), del flusso evapotraspirativo nelle condizioni meteorologiche e fisiologiche reali.

La compilazione del bilancio idrico del suolo richiede la stima quindi dell' ET_a ; in condizioni reali, quando la disponibilità della risorsa idrica appare limitata, il flusso evapotraspirativo appare minore di quello massimo della coltura di riferimento (ET_c).

Il modello FAO, per quantificare questa differenza tra ET_c ed ET_a si basa sull'utilizzo di un coefficiente di stress idrico K_s che descrive l'effetto dello stress idrico sul flusso traspirativo.

L' ET_a viene stimata attraverso l'espressione:

$$ET_A = K_S ET_C = K_S K_C ET_O$$

dove K_c è il coefficiente culturale. Nel modello FAO, il valore di K_s è in funzione del contenuto idrico del suolo. Nelle condizioni standard, il valore di K_s è pari a 1 e quindi ET_a coincide con ET_c ; in condizioni normali invece, quando la disponibilità idrica è limitata, il valore di K_s sarà inferiore a 1.

La stima dei valori di ET, è stata effettuata tramite l'impiego del modello ECOWAT (Spano et al., 2009), basato appunto sull'approccio dei coefficienti culturali, dal DESA per l'anno 2009-2010. Il modello ECOWAT utilizza i dati di una stazione meteorologica standard (ubicata in un'area con caratteristiche evapotraspirative confrontabili) per la stima dell'evapotraspirazione di riferimento ET_0 . Il modello, una volta calibrato, è capace di fornire stime dei valori di ET reale (ET_a) per l'area in esame. Il modello ECOWAT calcola, partendo dal valore di evapotraspirazione di riferimento (ET_0), l'ET reale dell'ecosistema (ET_a), tramite la seguente equazione:

$$(ET_A) = ET_0 \times K_M \times K_V \times K_D \times K_S \times K_E$$

dove:

K_m è un coefficiente che tiene conto delle differenze microclimatiche tra il sito dov'è ubicata la stazione di riferimento e l'area oggetto di studio;

K_v è un fattore che lega la ET_0 del sito di riferimento all'evapotraspirazione dell'area oggetto di studio (in condizioni di assenza di limitazioni idriche);

K_d tiene in considerazione la densità della copertura vegetale;

K_s è un coefficiente che tiene conto dello stato di deficit idrico;

K_e è un fattore legato all'evapotraspirazione da suolo nudo.

Per poter applicare tale metodologia sono state effettuate delle analisi preliminari, allo scopo di quantificare le superfici del bacino suddivise per tipologia vegetazionale e unità spaziali

omogenee per giacitura ed esposizione, utilizzando le basi cartografiche realizzate dal DIT relative all'anno 2008.

La stima dei valori di ET, è stata effettuata in funzione delle classi di esposizione e pendenza in piano ($0^\circ \leq 10^\circ$, figura 27), moderata pendenza ($10^\circ \geq 30^\circ$, figure 28, 30, 32 e 34) ed elevata pendenza ($\geq 30^\circ$, figure 29, 31, 33 e 35). Per ogni tipo di vegetazione, in funzione dell'apparato radicale, è stata identificata una profondità adeguata. Tale valore sta ad indicare sino a che profondità la specie erbacea o arborea è in grado di prelevare acqua dal suolo.

Tipologia vegetazionale	Profondità (m)
Seminativo Pascolo	30 cm piano 33cm 40%
Macchia Mediterranea	1.25
Bosco di latifoglie	1.25
Boschi conifere	1.25

Per la stima dei valori di evapotraspirazione effettiva, sono stati utilizzati per l'anno 2009 - 2010, i dati meteorologici e di copertura del suolo forniti dal DIT, abbinati ai dati raccolti dal DESA, elaborati nell'applicazione del modello ECOWAT.

I dati di evapotraspirazione calcolati con il modello ECOWAT permettono di fare delle comparazioni, tra le diverse tipologie di vegetazione e in base alla pendenza e all'esposizione dei versanti.

I grafici 28, 30, 32 e 34 evidenziano come per tutte le tipologie di vegetazione, con pendenza massima del 20%, l'evapotraspirazione reale sia maggiore per le superfici esposte a Sud le quali ricevono maggiori quantitativi di radiazione solare,rispetto a quelle a Est,

Ovest e a Nord. Di contro, per quanto concerne i versanti con pendenze che si appressano al 40% (figure 29, 31, 33 e 35) si identificano, in alcuni periodi dell'anno, valori di ETa del versante a Nord che vanno a superare quelli esposti a Sud. Tale risultato, non molto chiaro è attualmente oggetto di attenzione.

I risultati di ETa del seminativo – pascolo e della macchia mediterranea, calcolati dal D.E.S.A. sono stati utilizzati nel calcolo del bilancio idrico del suolo, per riscontrare se le perdite di umidità del suolo nei due versanti seguono lo stesso andamento delle curve cumulate di evapotraspirazione.

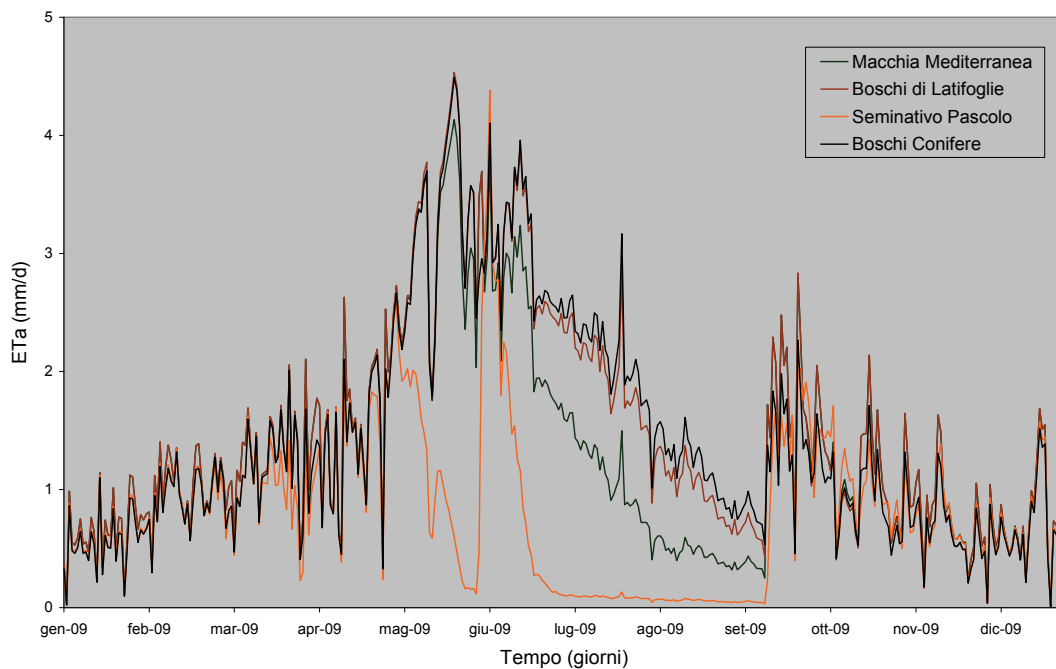


Figura 27: Valori di ETa giornalieri delle quattro tipologie di vegetazione su superficie piana.

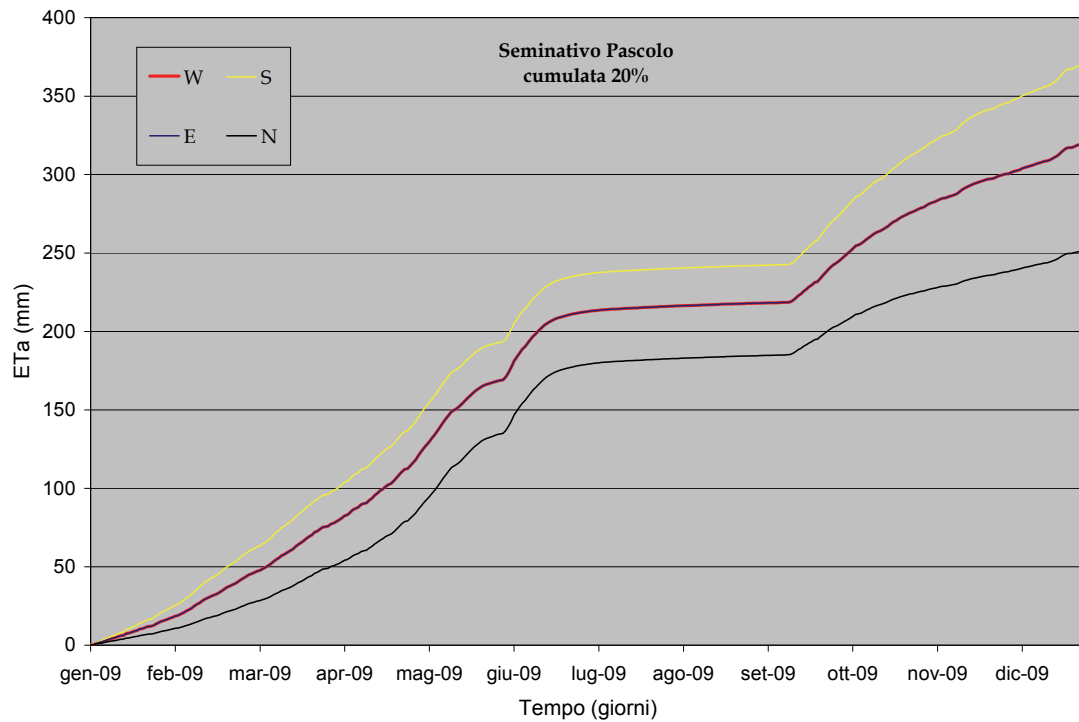
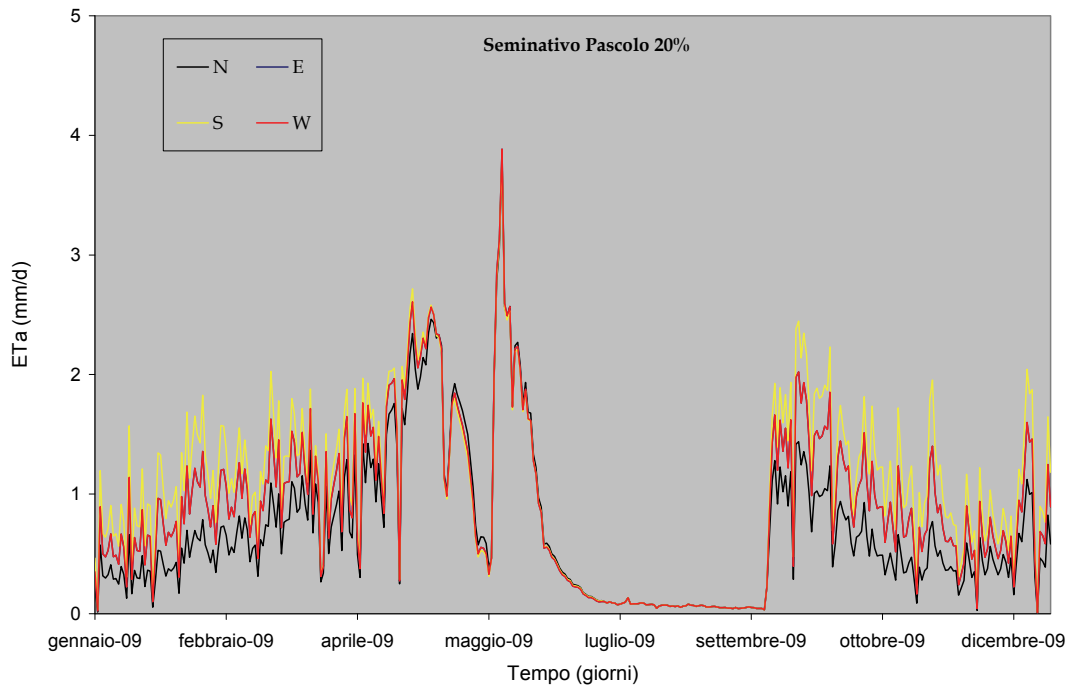


Figura 28: Valori di ETa giornalieri e cumulati della tipologia di vegetazione seminativo pascolo misurati col modello ECOWAT alla pendenza del 20%.

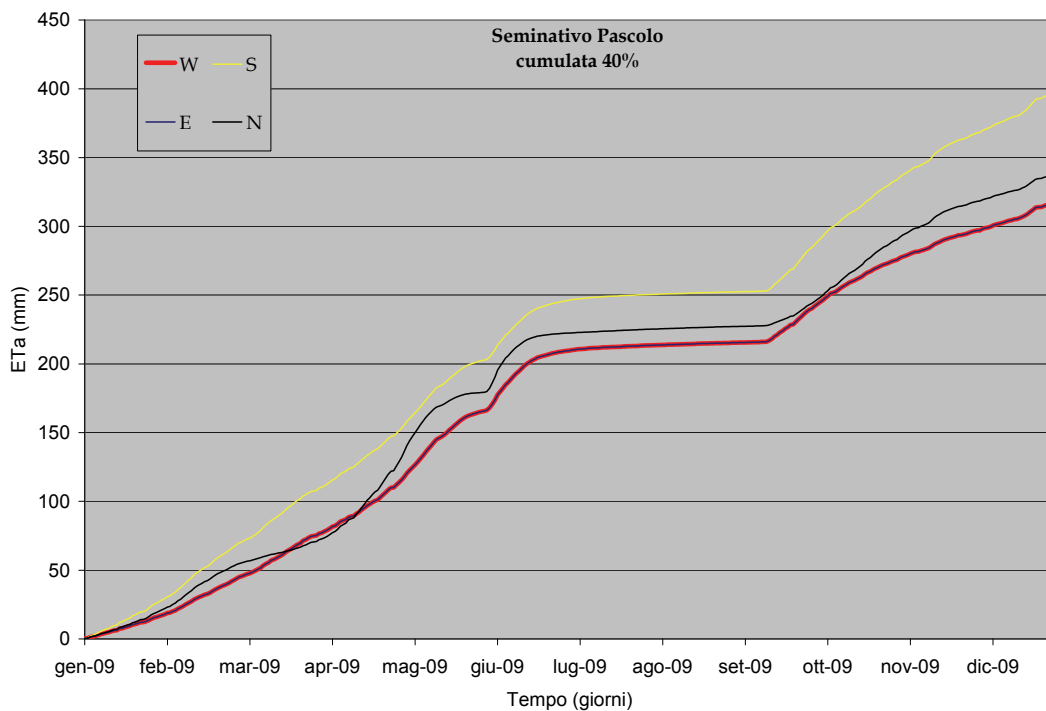
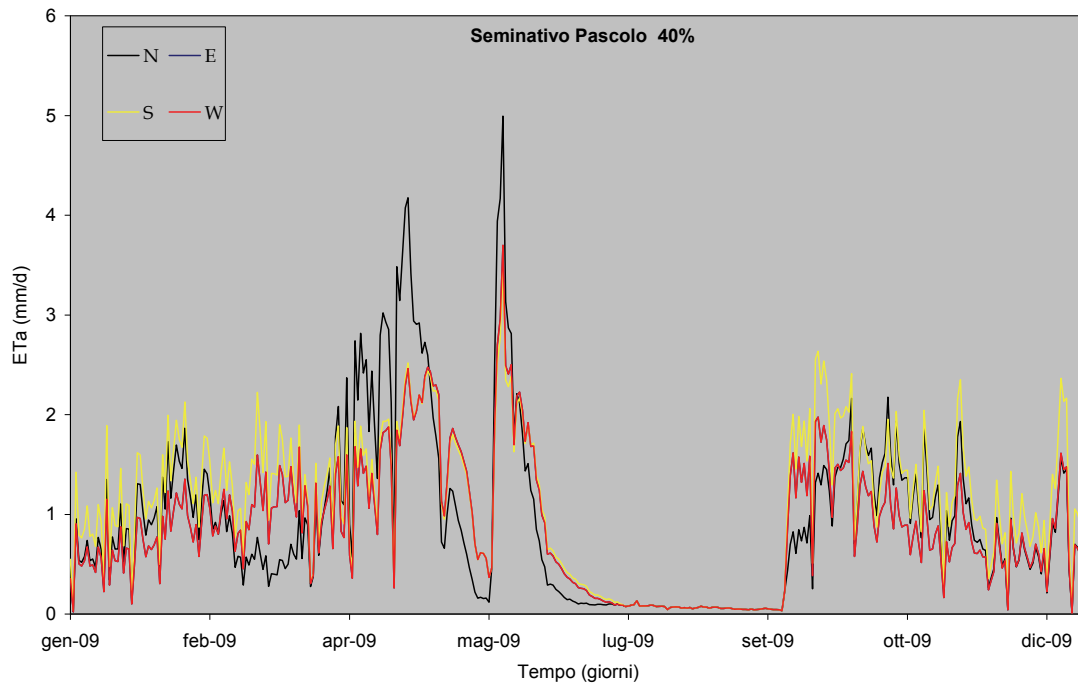


Figura 29: Valori di ETa giornalieri e cumulati della tipologia di vegetazione seminativo pascolo misurati col modello ECOWAT alla pendenza del 40%.

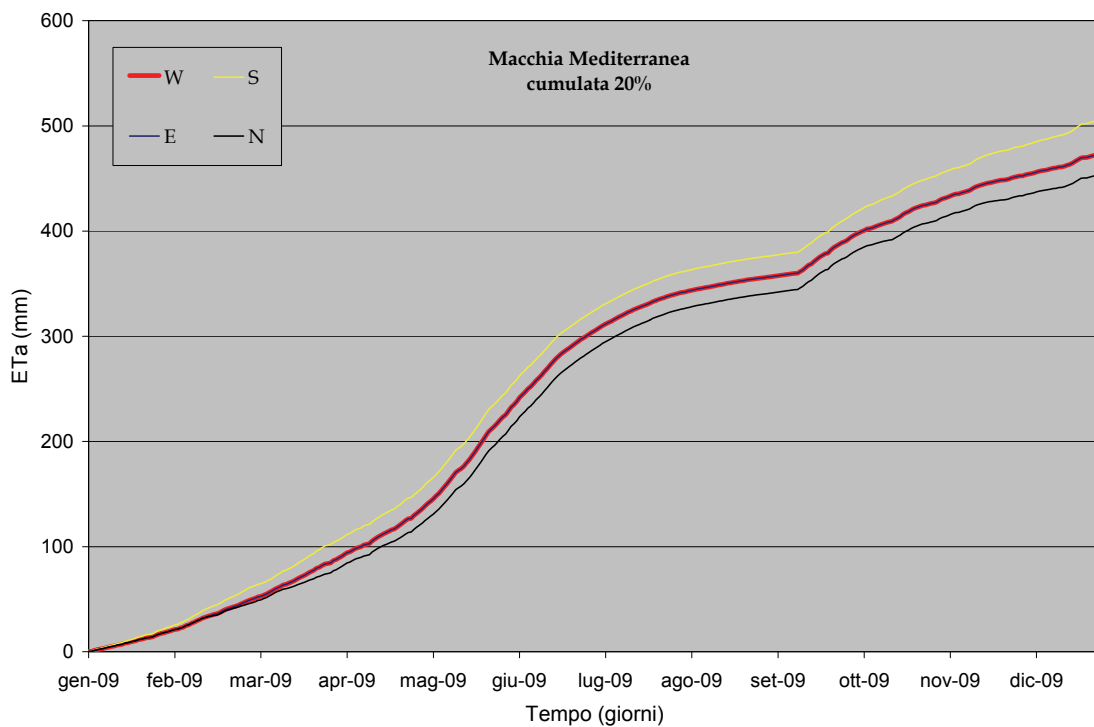
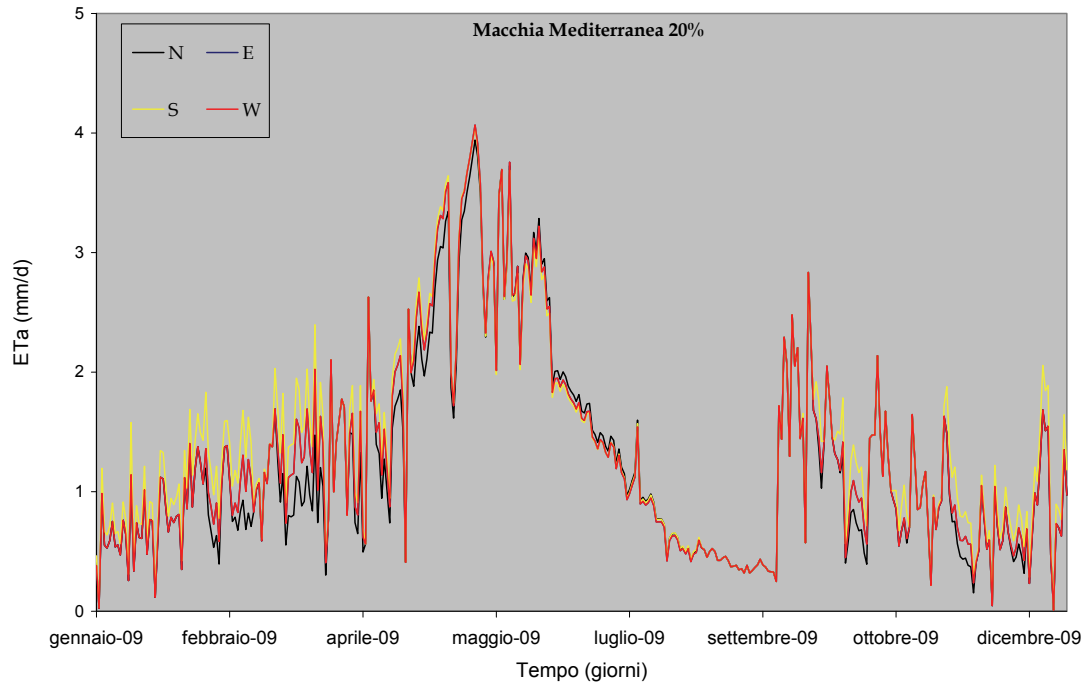


Figura 30. Valori di ETa giornalieri e cumulati della tipologia di vegetazione Macchia Mediterranea misurati col modello ECOWAT alla pendenza del 20%

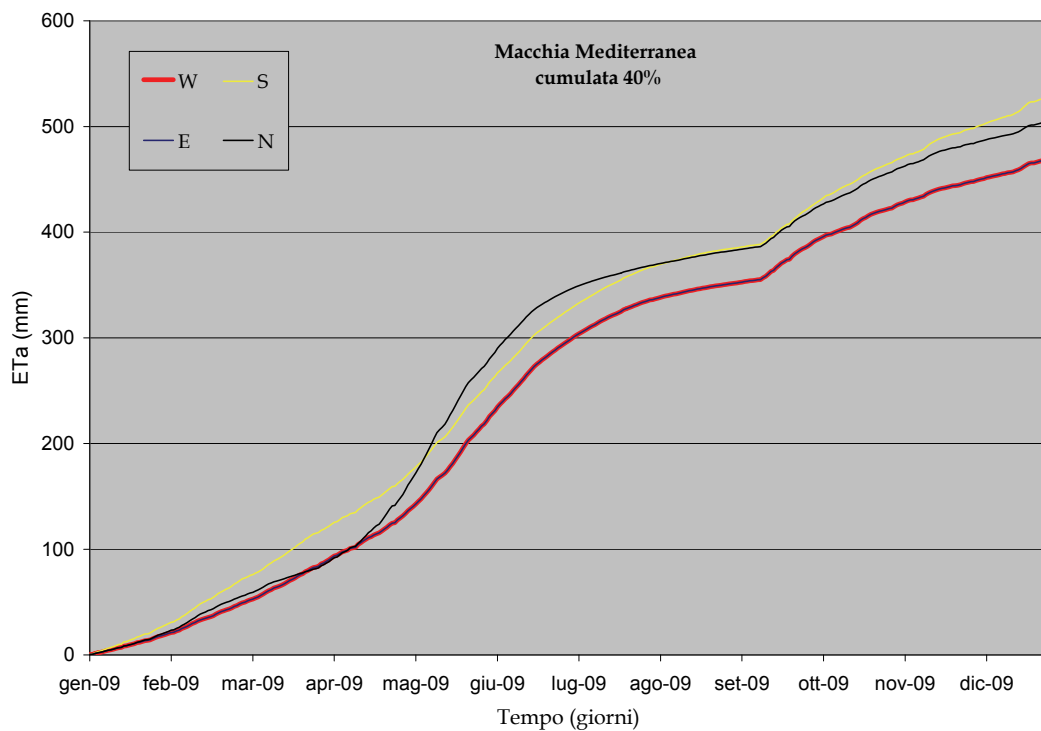
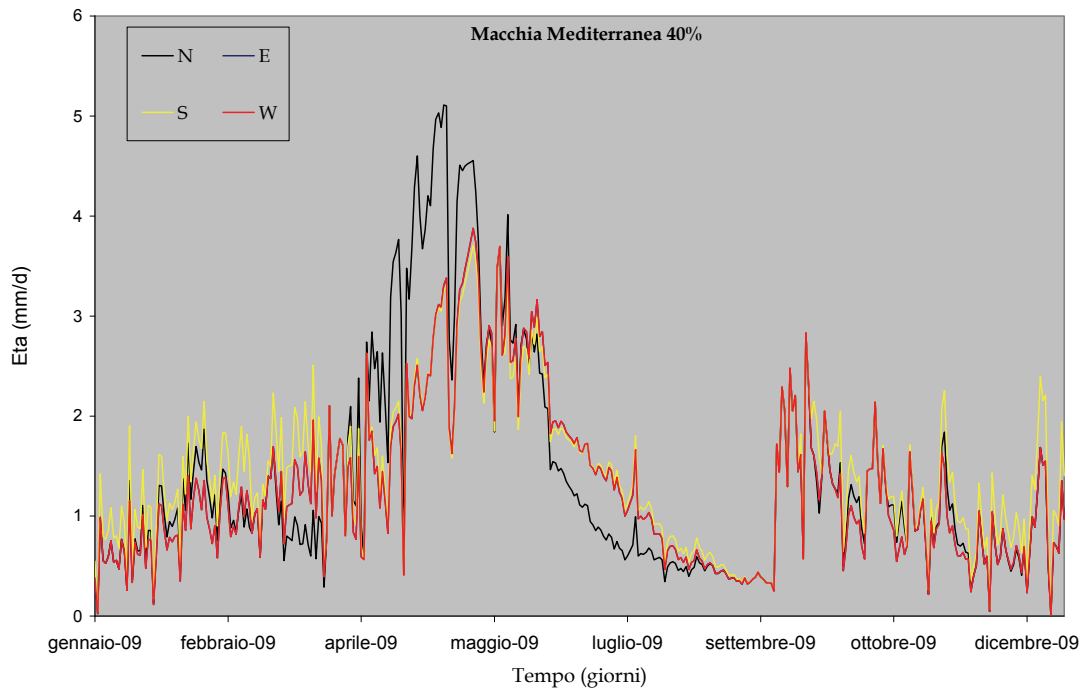


Figura 31. Valori di ETa giornalieri e cumulati della tipologia di vegetazione Macchia Mediterranea misurati col modello ECOWAT alla pendenza del 40%

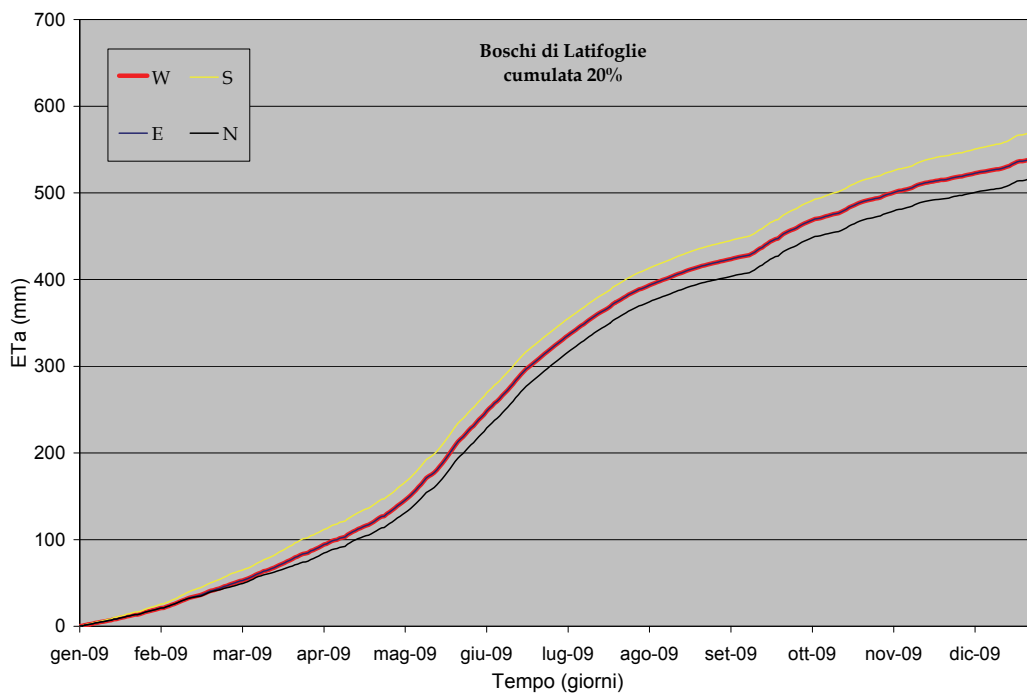
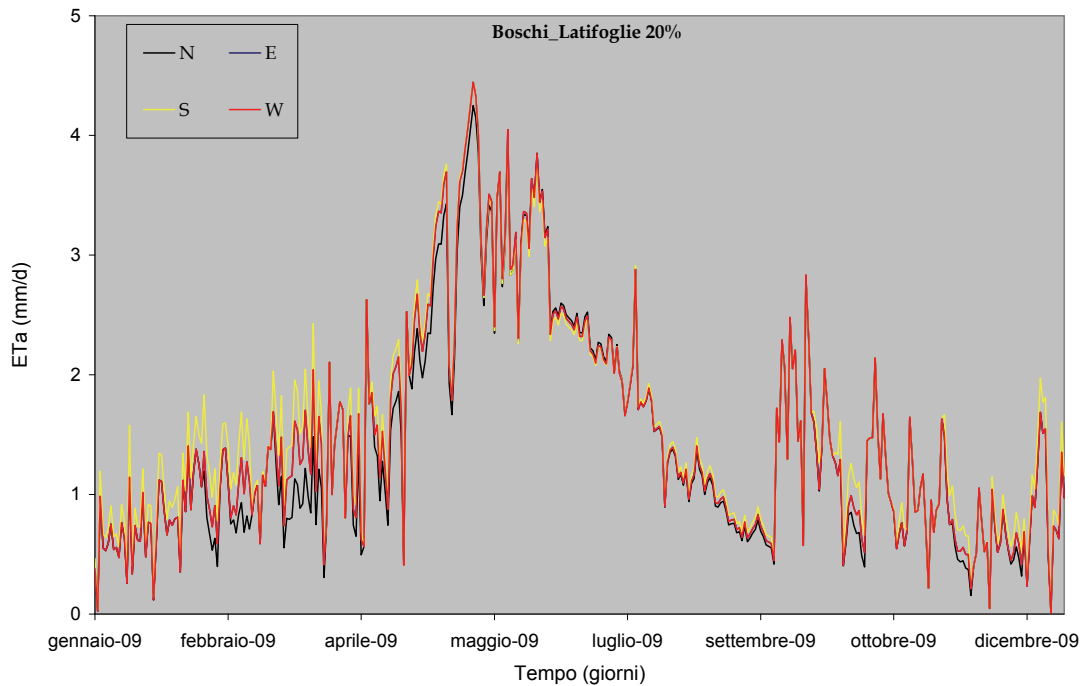


Figura 32. Valori di ETa giornalieri e cumulati della tipologia di vegetazione Boschi di Latifoglie misurati col modello ECOWAT alla pendenza del 20%

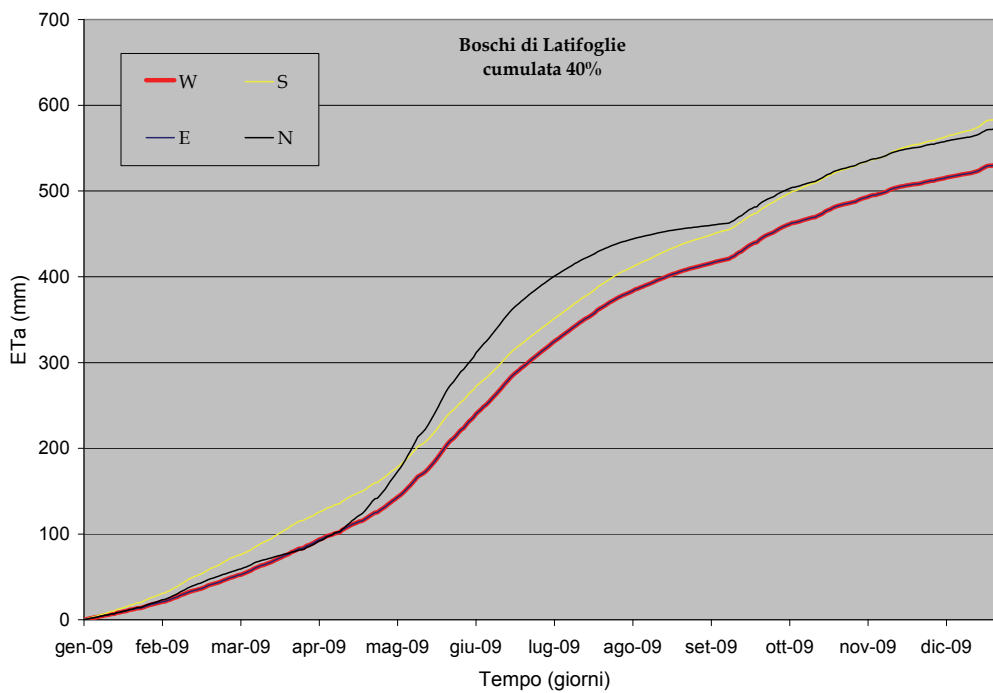
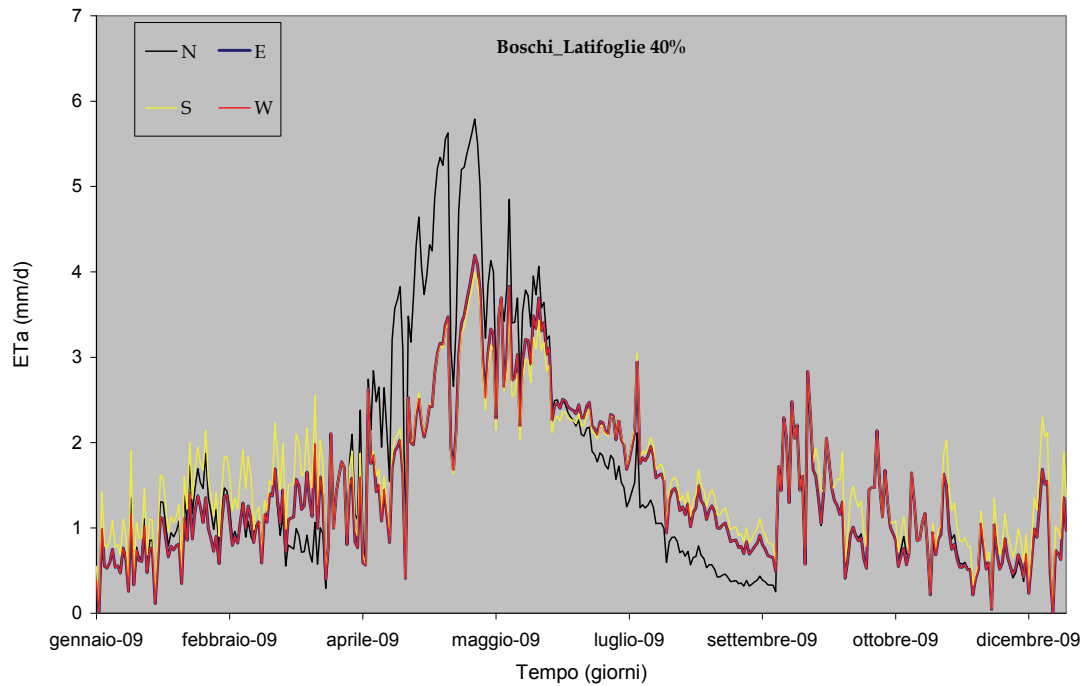


Figura 33. Valori di ETa giornalieri e cumulati della tipologia di vegetazione Boschi di Latifoglie misurati col modello ECOWAT alla pendenza del 40%

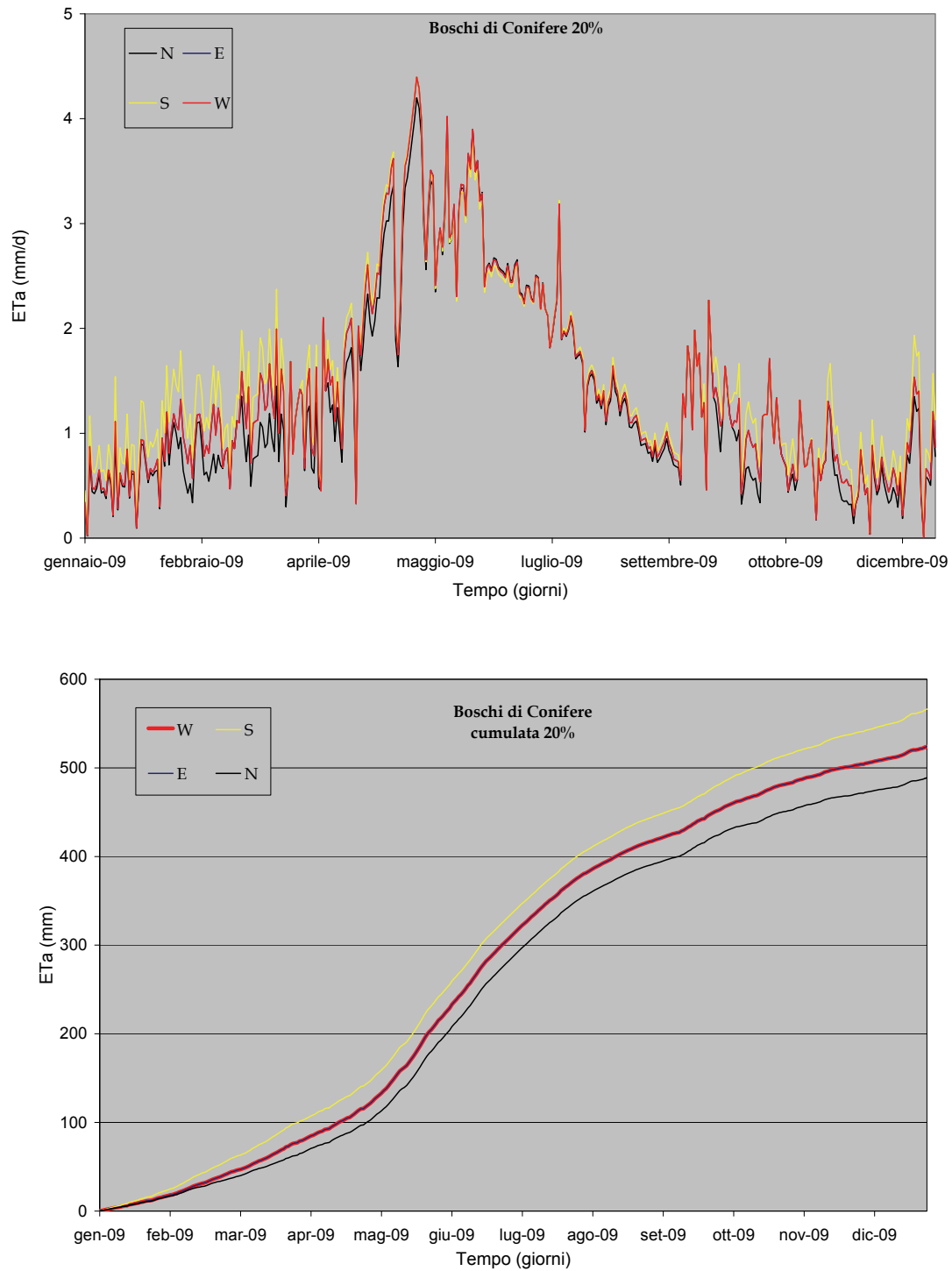


Figura 34. Valori di ETa giornalieri e cumulati della tipologia di vegetazione Boschi di Conifere misurati col modello ECOWAT alla pendenza del 20%

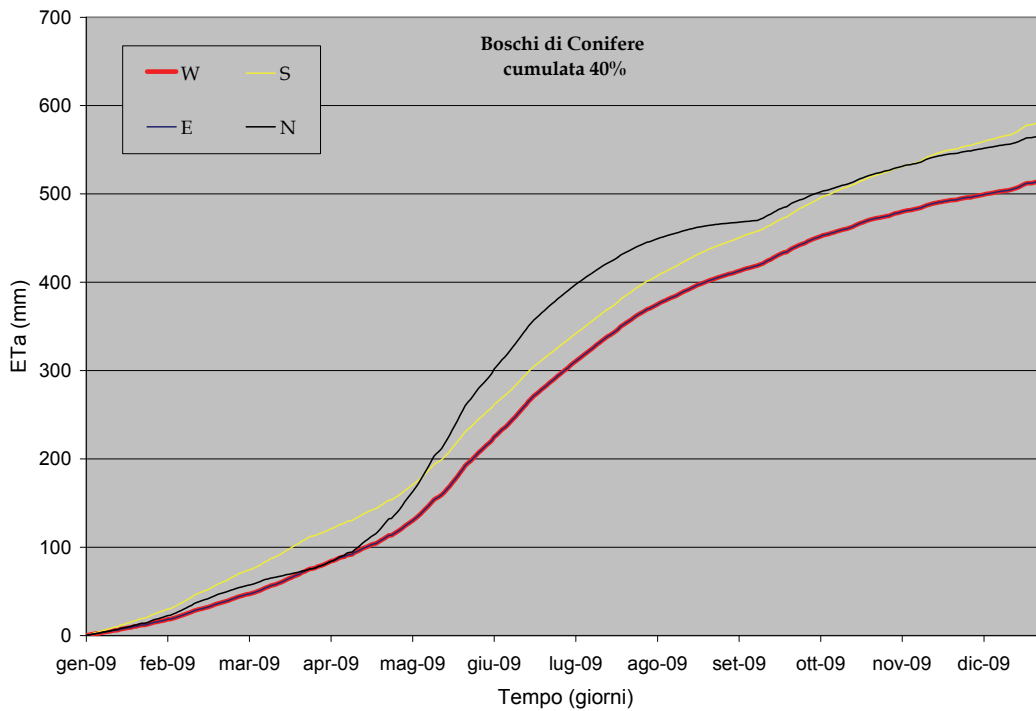
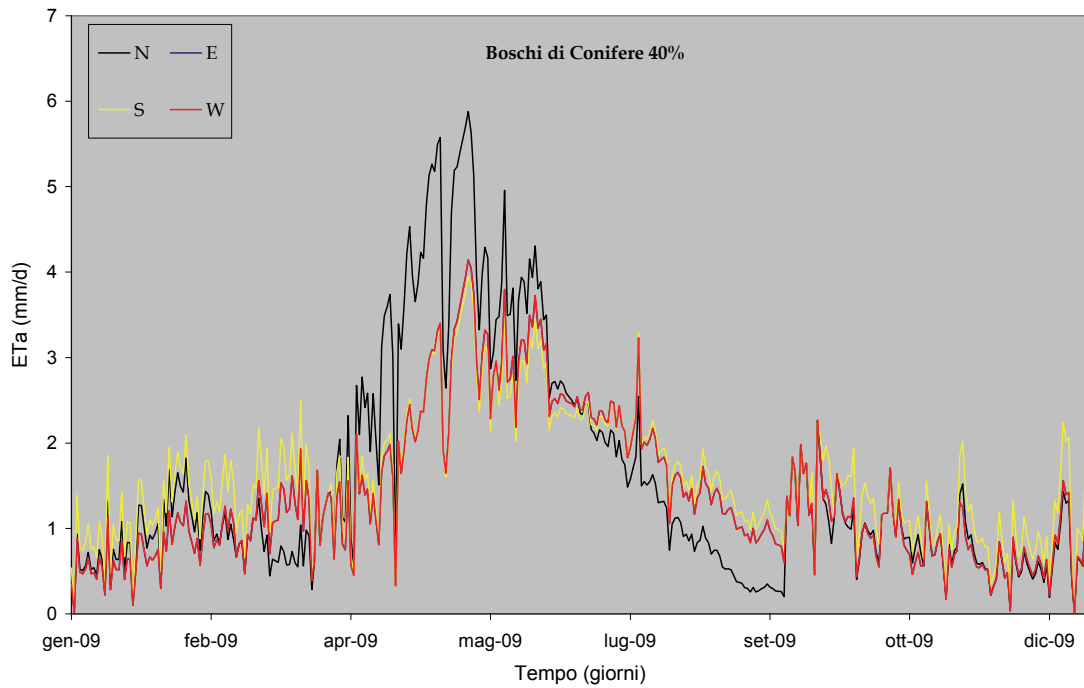


Figura 35. Valori di ETa giornalieri e cumulati della tipologia di vegetazione Boschi di Conifere misurati col modello ECOWAT alla pendenza del 40%

3.8 STIMA DEL BILANCIO IDRICO

Dai valori di umidità del suolo, stimati in base alle misure fornite dalle tre sonde TDR, posizionate a 15, 30 e 45 cm di profondità, si sono estratti i valori di umidità presente nei diversi strati considerati, sia per il pascolo sia per il bosco.

I valori di umidità rilevati dalle sonde TDR, opportunamente depurati dall'effetto della temperatura e corretti con le curve di calibrazione, sono stati quindi utilizzati per valutare il bilancio idrico del suolo. Per il bilancio si è considerato per le tre sonde poste nel suolo ricoperto a macchia uno spessore di suolo di 150 mm. Per quanto riguarda invece il bilancio delle tre sonde poste nel suolo ricoperto a pascolo, a causa di una maggiore presenza di scheletro e di un minore spessore di suolo sulla roccia impermeabile, si è considerato uno spessore di suolo di 150 mm per la sonda più superficiale, di 100 mm per la sonda intermedia e di 50 mm per la sonda più profonda. Gli incrementi di umidità di ciascuno strato dall'istante 1 all'istante 2 (ad intervalli di 300 s) è stato calcolato con la seguente formula:

$$\Delta\phi = (\text{Umidità}_2 - \text{Umidità}_1) * P \text{ (mm)}$$

dove U_2 è il valore di umidità misurato dal TDR, U_1 è il valore di umidità misurato nel momento precedente e P è la profondità di suolo che ogni TDR riesce ad esplorare. I valori puntuali di umidità così calcolati, per i tre TDR del bosco, sono stati sommati ed utilizzati per determinare il bilancio idrico su 60 cm del suolo. Tale metodica è stata attuata sia per il pascolo che per la macchia, si sono così ottenuti rispettivamente i bilanci esterni ed interni. I grafici in Figura 36 identificano il bilancio idrico del suolo per l'anno 2009 – 2010 sia per il suolo ricoperto dalla macchia sia per quello a pascolo. Sono inoltre identificate le piogge cumulate e l'evapotraspirazione reale sia della macchia sia del pascolo. Tali dati sono indispensabili per poter capire l'andamento del bilancio sia nell'aumento che nella diminuzione dei valori di umidità del suolo.

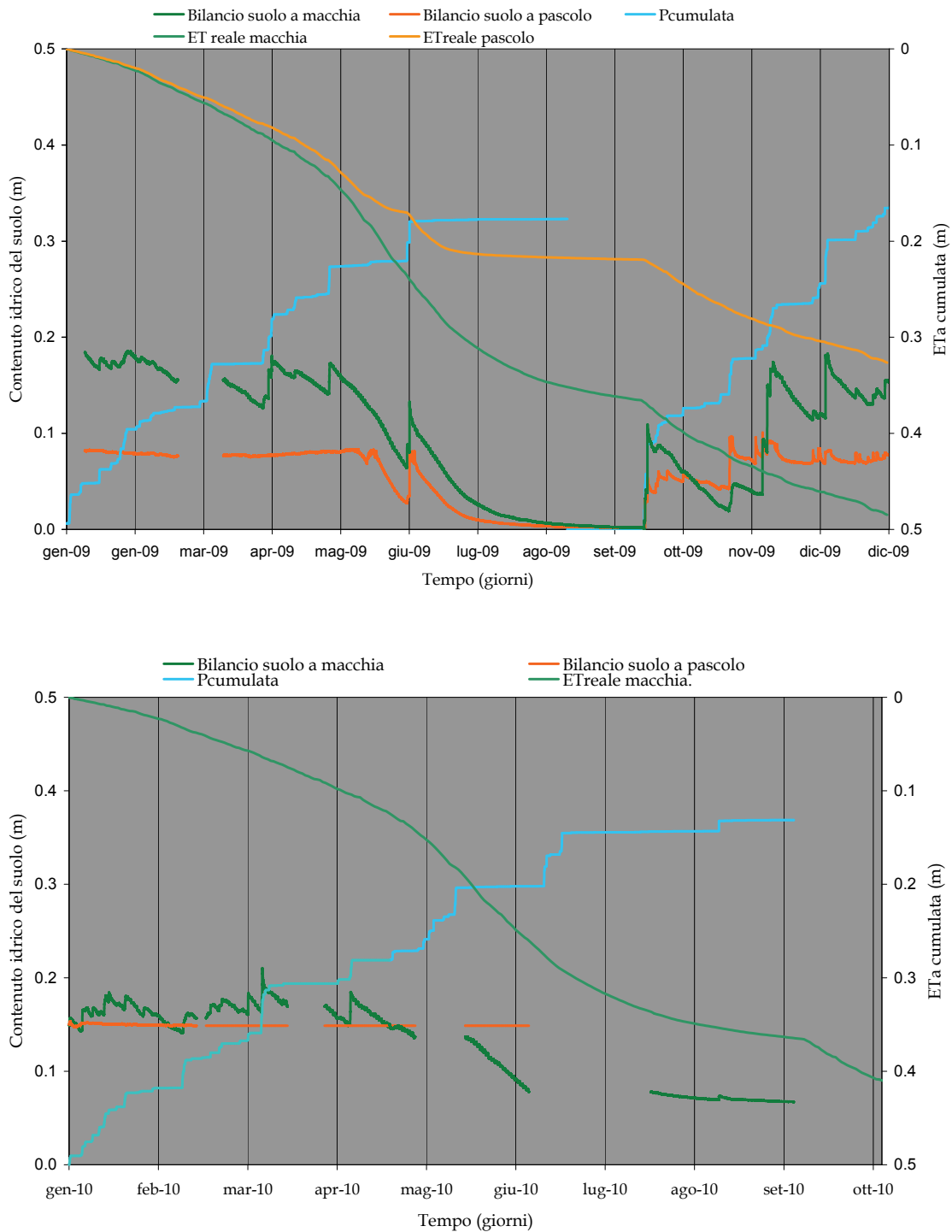


Figura 36. Valori giornalieri del bilanci idrico del suolo nella macchia e nel pascolo per l'anno 2009-2010 e confronto con l'evapotraspirazione reale calcolata dal D.E.S.A. e la pioggia cumulata.

Per entrambi i bilanci del suolo, ricoperto da macchia e quello a pascolo si evidenzia l'incremento di umidità in corrispondenza delle piogge e la riduzione di umidità per effetto dell'evapotraspirazione, più intensa nella stagione estiva e meno accentuata nella stagione invernale. Sia per quanto riguarda gli incrementi di umidità del suolo, sia i decrementi, si nota una buona corrispondenza rispettivamente con le altezze di pioggia e con le altezze di evapotraspirazione. Le differenze tra i valori stimati di umidità del suolo e gli input di pioggia e evapotraspirazione possono essere dovute sia agli errori insiti nelle diverse fasi della calibrazione del TDR, sia alla componente del drenaggio laterale derivante dagli apporti da monte e verso valle lungo il versante a ripida pendenza.

Per quanto riguarda il bilancio esterno, i valori di umidità si mantengono perlopiù costanti e prossimi alla saturazione per tutto il periodo invernale sino alla prima decade di maggio. Successivamente tendono a diminuire nel periodo primaverile, sino a raggiungere il valore minimo corrispondente al punto di appassimento. Nei mesi estivi non si osserva più alcuna variazione, fino alla metà di settembre in corrispondenza degli eventi piovosi, quando l'umidità del suolo tende a salire e a raggiungere il valore massimo di saturazione.

Il bilancio del suolo sotto la macchia presenta un andamento simile a quello del suolo a pascolo, tranne che per alcune sostanziali differenze di comportamento soprattutto nel periodo invernale. I valori massimi di umidità alla saturazione sono raggiunti soltanto in occasione delle piogge più intense, e sono mantenuti per brevissimi periodi. Questo diverso comportamento evidenzia la maggiore capacità di assorbimento idrico e di drenaggio del suolo sotto la macchia rispetto a quello a pascolo. Ciò dimostra che la diminuzione dell'umidità è dovuta unicamente al ET reale.

Il monitoraggio ha evidenziato come il suolo a pascolo raggiunge più rapidamente valori superiori di umidità durante le precipitazioni, ma anche come questo si asciuga più rapidamente durante i periodi estivi, rispetto allo strato di suolo ricoperto dalla macchia.

4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Lo studio degli effetti del cambiamento dell'uso del suolo sul bilancio idrico, considerato sia a scala di versante o di profilo di suolo, sia a scala di bacino, sta assumendo sempre più importanza nel campo delle scienze idrologiche e ambientali. Una migliore conoscenza dell'influenza delle diverse coperture vegetali sui processi idrologici superficiali e sottosuperficiali è di primaria importanza ai fini della gestione delle risorse idriche del suolo, della definizione di un razionale utilizzo del suolo, della difesa del suolo dall'erosione e dal dissesto idrogeologico e, più in generale, della salvaguardia degli ecosistemi forestali e agricoli.

Lo scopo di questo lavoro è quello di comprendere gli effetti idrologici derivanti dal cambio d'uso del suolo, attraverso la quantificazione delle diverse componenti del bilancio idrico del suolo e l'identificazione delle forzanti naturali e antropiche che le determinano, anche al fine di fornire soluzioni contro il processo di desertificazione evidenziato da una progressiva riduzione dell'umidità del suolo e dei volumi idrici delle falde.

Il versante oggetto di studio è risultato particolarmente adeguato ai fini della ricerca per la presenza contigua di due tipologie di vegetazione, la macchia e il pascolo, le quali vengono a trovarsi nelle medesime condizioni morfologiche, pedologiche e microclimatiche. Tale area ha subito negli scorsi decenni un profondo cambiamento dell'uso del suolo, consistito in un intenso disboscamento e successive lavorazioni del terreno, con conseguenze negative sui processi idrologici e sull'erosione.

Le prove di caratterizzazione idraulica effettuate sui campioni di suolo prelevati nella macchia e nel pascolo, hanno mostrato che i suoli sotto le due coperture vegetali hanno caratteristiche idrologiche differenti. Il campione prelevato nel pascolo ha mostrato una porosità minore e una maggiore densità apparente rispetto a quello prelevato sotto la macchia. Inoltre, nel suolo col pascolo è stata osservata una riduzione della capacità di ritenzione idrica e della conducibilità idraulica per le tensioni idriche prossime alla saturazione. Per i valori di tensione idrica compresi tra -50 e -600 cm le curve di ritenzione e di conducibilità idraulica dei due suoli sono risultate simili. Infatti, in questo campo di tensione, le caratteristiche idrauliche del suolo sono principalmente influenzate dalla matrice, che, nel versante oggetto di studio, è uguale nei due suoli con differente copertura vegetale. La quota di precipitazione sottochioma misurata nella copertura a macchia, pari al

30% della pioggia fuori vegetazione, è stata inferiore alle stime di pioggia relativa sottochioma riportate in bibliografia, comprese tra il 75% e il 34% nel caso di coperture arbustive (Llorenz e Domingo, 2007). Il risultato ottenuto è dovuto all'elevata densità della copertura vegetale presente nel sito della misura, e indica che in questo versante la macchia mediterranea fornisce un elevato grado di intercettazione fogliare.

Le sonde di temperatura inserite nel suolo sotto la macchia e sotto il pascolo hanno mostrato che nel periodo primaverile-estivo le temperature sono più elevate nel suolo col pascolo rispetto alla macchia. In questo periodo, le elevate temperature del suolo sotto il pascolo hanno l'effetto di intensificare i flussi evaporativi superficiali, causando un marcato disseccamento del suolo. Le minori temperature osservate nel suolo sotto la macchia possono essere attribuite a molteplici cause, tra cui l'effetto schermante dalla radiazione solare dovuto alla chioma degli alberi, l'effetto pacciamante della lettiera organica nella macchia e il maggior calore specifico del suolo organico. La modifica del regime termico del suolo in seguito all'eliminazione della copertura forestale può causare una importante alterazione dei normali flussi energetici scambiati tra il suolo e l'atmosfera. Come dimostrato in numerosi lavori (Bonan, 1997; Chase et al., 2000), quando questa alterazione si verifica su grandi scale spaziali, si può avere anche un significativo impatto sul ciclo idrologico globale.

Il monitoraggio dell'umidità del suolo e dei livelli della falda sottosuperficiale nel versante ha mostrato che i suoli con la copertura a macchia e con la copertura a pascolo presentano dinamiche idrologiche molto differenti. Nel pascolo, gli elevati contenuti idrici misurati nei periodi piovosi hanno indicato che questo suolo ha una velocità di drenaggio molto bassa. Questo risultato è confermato dalle misure dei livelli di falda nei piezometri, che hanno mostrato la presenza di una falda superficiale in tutto il periodo piovoso monitorato. Contrariamente a quanto osservato nel pascolo, le misure di umidità effettuate nella parte di versante coperta a macchia hanno indicato che, sotto questa copertura vegetale, il suolo raramente presenta eccessi idrici. La falda si forma nella parte inferiore del versante in occasione degli eventi di pioggia più intensi, e si esaurisce rapidamente. Questo comportamento è in parte dovuto all'elevato grado di intercettazione fogliare, che limita gli

afflussi idrici al suolo, e in parte alle permeabilità di questo suolo, che favorisce il rapido drenaggio verticale e laterale del versante.

Lo studio sperimentale effettuato ha messo in evidenza gli effetti sulle caratteristiche idrauliche, sul regime termico e sulla dinamica idrologica dei suoli, derivanti dalla rimozione della copertura naturale di macchia mediterranea, a favore di un utilizzo pascolativo del suolo. I risultati di questo studio potranno facilitare la comprensione degli effetti derivanti dal cambio dell'uso del suolo sul bilancio idrologico dei bacini idrografici in ambiente mediterraneo. Tale comprensione è fondamentale per la corretta gestione dell'uso del suolo, necessaria per la tutela delle risorse idriche naturali.

Bibliografia

- Angulo-Jaramillo R., Vandervaere J.-P., Roulier S., Thony J.L., Gaudet J.-P., Vauclin M. , 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers – A review and recent developments, *Soil and Tillage Research*, 55, 1–29.
- Arya L. A., Wind and hot-air methods. In: Dane J. H., e Topp G. C. (Ed.), 2002. *Methods of Soil Analysis, part 4, Physical Methods*, Soil Sci. Soc. of Am., Madison, Wis., pp. 916-926.
- Boizard H., Richard G., Roger-Estrade J., Durr C., Boiffin J., 2002. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France, *Soil and Tillage Research*, 64, 149–164.
- Bonan G.B., Effects of land use on the climate of the United States, 1997. *Climatic Change*, 37, 449-486.
- Bormann H., Klaassen K., 2008. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two German soils, *Geoderma*, 145, 295-302.
- Calder, I.R., 1997. Water use by forests, limits and controls, *Tree Physiology*, 18, 625-631.
- Celik I., 2005. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey, *Soil and Tillage Research*, 83, 270–277.
- Chase T. N., Pielke Sr. R. A., Kittel T. G. F., Nemani R. R., Running S. W., 2000. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter, *Climate Dynamic*, 16, 93-105.
- Costa M.H., Botta A., Cardille J.A., 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, *Southeastern Amazonia, Journal of Hydrology*, 283(1-4), 206-217.
- De Fries R., Eshleman K.N., 2004. Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future, *Hydrological Processes*, 18, 2183–2186.
- Llorens P., Domingo F., 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe, *Journal of Hydrology*, 335(1–2), 37-54.

- Martinez L.J., Zinck J.A.*, 2004. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia, *Soil and Tillage Research*, 75, 3–17.
- Romano N., Santini A.*, 1999. Determining soil hydraulic functions from evaporation experiments by a parameter estimation approach: Experimental verifications and numerical studies, *Water Resources Research*, 35 (11), 3343-3359.
- Sahin V., Hall M. J.*, 1996. The effects of afforestation and deforestation on water yields, *Journal of Hydrology*, 178 (1–4), 293-309.
- Schume H., Jost G, Hager H.*, 2004. Soil water depletion and recharge patterns in mixed and pure forest stands of European beech and Norway spruce, *Journal of Hydrology*, 289 (1-4) 258-274.
- Spano D, Snyder RL, Sirca C, Duce P.* 2009. ECOWAT—A model for ecosystem evapotranspiration estimation. *Agricultural and Forest Meteorology* **149**: 1584-1596. DOI:10.1016/j.agrformet.2009.04.011.