



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

## Analisi di umidità del suolo con la tecnica del Cosmic-Rays Neutron Sensing (CRNS)

**Relatore**

**Prof. Marcello Lunardon**

**Correlatore**

**Prof. Luca Stevanato**

**Laureando**

**Nicola Zancopè**

**Anno Accademico 2020/2021**



---

Alla prof.ssa Perin



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Misura di umidità del suolo con tecniche tradizionali . . . . .	1
1.2	<i>Cosmic-Rays Neutron Sensing</i> (CRNS) . . . . .	1
1.3	La sonda Finapp . . . . .	3
1.4	<i>Particle Discrimination</i> . . . . .	5
1.5	Siti sperimentali . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Analisi dati</b>	<b>7</b>
2.1	Correzione dei conteggi . . . . .	7
2.2	Threshold variabile - simulazione con ROOT . . . . .	8
2.3	Analisi del guadagno . . . . .	10
2.4	Confronto correzioni . . . . .	10
2.5	Muoni . . . . .	11
2.6	I risultati di San Pietro Capofiume . . . . .	12
2.7	I risultati di Ceregnano . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>15</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>17</b>



# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Misura di umidità del suolo con tecniche tradizionali

L'umidità del suolo è un'importante variabile per la comprensione dei fenomeni climatici locali e dei processi idrogeologici a differenti scale spaziali e temporali; essa, infatti, costituisce un'informazione fondamentale per la previsione di frane ed allagamenti, oltre che per la caratterizzazione dei fenomeni meteorologici locali influenzati dallo scambio di energia tra suolo e bassa atmosfera. Inoltre, il problema della scarsità d'acqua e l'emergente crisi climatica hanno reso di fondamentale importanza la corretta gestione delle risorse idriche; l'organizzazione per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO) stima che il 70% dell'utilizzo delle scorte d'acqua sia dedicato all'agricoltura [1], evidenziando la necessità di conoscere con precisione il contenuto idrico del suolo per ottimizzare l'irrigazione e prevenire sprechi. Le tecniche tradizionali di stima dell'umidità del suolo si basano principalmente su sonde che effettuano misure puntuali. A causa dell'eterogeneità del suolo, però, esse sono sfruttabili solamente su aree molto ridotte, altrimenti si correrebbe il rischio di compiere errori nell'interpretazione delle condizioni idrogeologiche del suolo. Per monitorare una zona più ampia, sarebbe necessario introdurre molteplici sonde puntuali, facendo emergere nuove problematiche legate ai costi, alla gestione dei terreni, all'alimentazione elettrica, all'elevata invasività e alla difficile manutenzione. Pertanto tali strumenti non risultano utilizzabili per aree vaste con terreno eterogeneo. Un'ulteriore tecnica, all'estremo opposto, prevede l'utilizzo di satelliti che, analizzando le microonde, permettono di ottenere una buona stima del contenuto idrico per zone sufficientemente estese ( $> \text{km}^2$ ). Questo approccio, però, offre una stima dell'umidità solamente dei primi centimetri di suolo, e la risoluzione temporale (tipicamente settimanale) non corrisponde sempre alle esigenze agricole. L'utilizzo di satelliti presenta inoltre ulteriori problemi (limitata capacità di misura in presenza di vegetazione, impossibilità di stima del contenuto di ghiaccio nel suolo, etc.) che evidenziano la necessità di un nuovo approccio per la misura di umidità del suolo [2].

### 1.2 *Cosmic-Rays Neutron Sensing* (CRNS)

Nell'ultimo decennio, per superare le difficoltà tecniche sopra presentate e per colmare il gap tra misure puntuali e satellitari, è stata sviluppata una tecnica denominata *Cosmic-Rays Neutron Sensing* (CRNS) che, sfruttando i neutroni prodotti dai raggi cosmici incidenti sul terreno, permette di fornire una stima dell'umidità del suolo con numerosi vantaggi: è poco invasiva, contactless e permette di effettuare misure su aree significativamente grandi (decine di ettari) a profondità di decine di centimetri con una sola sonda.

In particolare, il flusso di neutroni prodotti al suolo a seguito dell'interazione coi raggi cosmici è fortemente influenzato dalla presenza d'acqua, che agisce da moderatore per le particelle in questione, diminuendone l'energia. Un maggior contenuto idrico rispetto alle condizioni standard, quindi, si riflette in una diminuzione del numero di neutroni veloci rivelabili al di sopra del terreno (e viceversa). La regione dello spettro energetico di maggior interesse per la stima dell'umidità del suolo è quella

epitermica/veloce, caratterizzata da energie tra 0.025 eV e 100 keV, evidenziata in azzurro in Figura 1.1 [3]; i neutroni termici, invece, presentano sensibilità anche alla composizione chimica del suolo e non solo al contenuto di acqua, come evidenziato in Figura 1.2 [4].

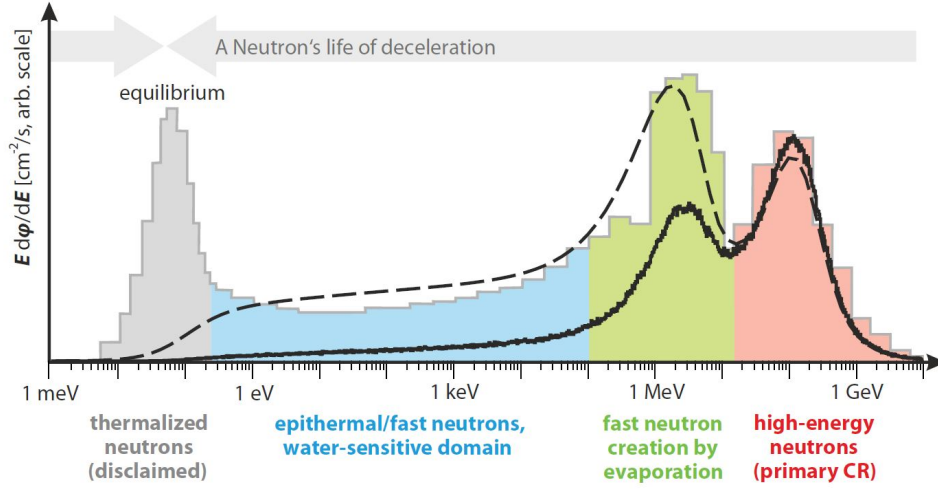


Figura 1.1: Spettro energetico dei neutroni; viene evidenziata la regione di anticorrelazione conteggi-umidità. Figura da [3]

È importante sottolineare che i conteggi dei neutroni sono influenzati non solo dall'umidità del suolo, ma anche da condizioni atmosferiche (quali pressione, temperatura e umidità dell'aria) e dal flusso incidente di raggi cosmici (*incoming*), pertanto una buona misura di intensità del flusso dovrà presentare dei fattori correttivi che tengano in considerazione gli effetti di tali variabili esterne. Le sonde che sfruttano il CRNS, quindi, dovranno essere dotate di sensori di pressione, di temperatura e umidità relativa (o essere posti nei pressi di strumenti per la loro rilevazione); per il flusso *incoming*, invece, è possibile affidarsi al Neutron Monitor Database (NMDB) [8] che fornisce dati da numerose stazioni nel mondo. La sonda analizzata nel presente lavoro di tesi, però, è equipaggiata con un rivelatore di muoni che dovrebbe permettere di ricavare il flusso di raggi cosmici incidente localmente. La relazione che permette di convertire il conteggio di neutroni in umidità del suolo è [2]:

$$\theta(N) = \left( \frac{0.0808}{\frac{N}{N_0} - 0.372} - 0.115 - \theta_{offset} \right) \frac{\rho_{bulk}}{\rho_w} \quad (1.1)$$

ove  $N$  è l'intensità dei neutroni (conteggi per ora),  $\theta$  è l'umidità volumetrica del suolo,  $\rho_{bulk}$  e  $\rho_w$  sono le densità di suolo e acqua, rispettivamente, e  $N_0$  il numero di conteggi su suolo secco, ottenuto spesso come parametro interpolante su una misura di umidità del suolo con tecniche differenti.

Il termine  $\theta_{offset}$ , invece, include i contributi di idrogeno non sottoforma di acqua; infatti, una sonda CRNS è in grado di rivelare l'elemento appena citato che, però, si può trovare in diverse forme: nell'acqua

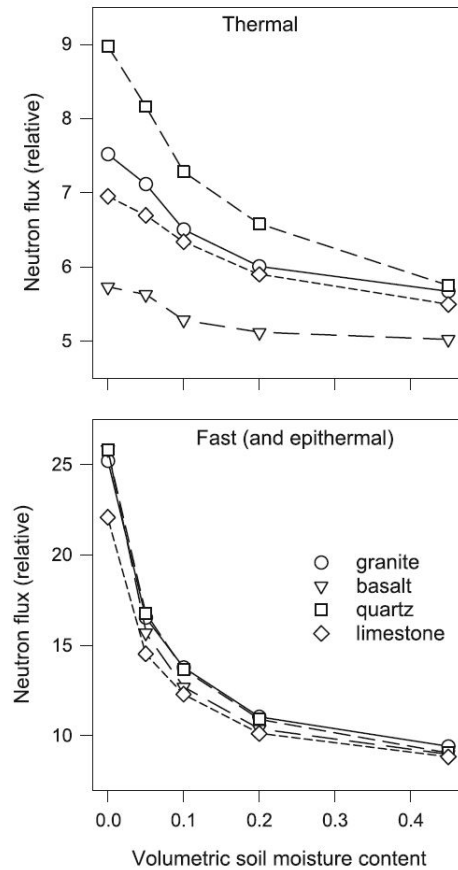


Figura 1.2: Correlazione umidità del suolo e neutroni termici (in alto) e epitermici (in basso) al variare della composizione del suolo. Figura da [4]



(soil moisture  $SM$ ), nelle molecole organiche (organic matter,  $OM$ ) e nei minerali (lattice water  $LM$ ). Le ultime due fonti di idrogeno non sono utilizzabili dalle piante, pertanto vengono sottratte dal conteggio di umidità del suolo ponendo  $\theta_{offset} = 0.5 OM + LW$ , il fattore 0.5 deriva da considerazioni stechiometriche. I diversi parametri contenuti nella formula 1.1 possono essere stimati mediante analisi di campioni di suolo prelevati nel luogo di installazione della sonda a diverse profondità; ad esempio, i contributi di  $OM$  e  $LW$  si ottengono dalla differenza di massa del campione a seguito di un processo di riscaldamento (diverse ore a centinaia di gradi) che permette all'idrogeno sotto forma di acqua di evaporare.

Per molti anni la rivelazione dei neutroni per la tecnica CRNS si è basata su detector a  $^3\text{He}$  (per la parte termica) e su scintillatori (per quella veloce), tecniche che presentano alcuni svantaggi.  $^3\text{He}$  viene prodotto principalmente dal decadimento  $\beta^-$  del trizio ( $t_{1/2} = 12.32$  anni), le cui riserve derivano, per la maggior parte, dallo smantellamento delle armi nucleari. Pertanto, a seguito della riduzione degli arsenali nucleari, si è assistito ad un notevole calo nella produzione di tale nuclide e, quindi, un conseguente aumento del prezzo. Questa situazione ha portato ad una spinta nella ricerca di nuove soluzioni nel campo della rivelazione dei neutroni. Inoltre, gli scintillatori (plastici o liquidi) erano spesso costituiti da materiali velenosi e infiammabili, non compatibili con l'utilizzo in ambito ambientale-agricolo. I motivi appena citati, uniti alla difficoltà di individuare una procedura standard per la correzione dei conteggi, ha relegato la tecnica del CRNS agli ambienti di ricerca. Si riporta a lato un esempio di stima di umidità del suolo con sonde a  $^3\text{He}$  (Figura 1.3) [4]. Il problema della tossicità degli scintillatori è stato risolto nell'ultimo decennio con lo sviluppo di materiali a bassa tossicità, compatibili con l'utilizzo commerciale.

Il presente lavoro di tesi ha come scopo lo studio di una sonda innovativa per CRNS che, basandosi sugli appena citati scintillatori plastici atossici (commerciali) e abbandonando i contatori ad  $^3\text{He}$ , potrebbe rappresentare una valida alternativa ai tradizionali metodi di rivelazione per la tecnica del *Cosmic-Rays Neutron Sensing*.

### 1.3 La sonda Finapp

La sonda Finapp si basa sul rivelatore commerciale EJ426, uno scintillatore che sfrutta il  $^6\text{Li}$  per la rivelazione di neutroni termici; in particolare, il Litio è contenuto sotto forma di polvere di lithium-6-fluoride ( $^6\text{LiF}$ ) mischiata a zinc sulfide phosphor ( $\text{ZnS:Ag}$ ) dispersi e compattati in una matrice legante [10]. La rivelazione si basa sul processo di cattura neutronica  $^6\text{Li} + n \rightarrow ^3\text{H} + ^4\text{He} + 4.78 \text{ MeV}$  che presenta una grande sezione d'urto (941 barns) per neutroni a 0.025 eV. Il trizio e la particella alfa ionizzano poi i cristalli di solfuro di zinco che emettono luce di scintillazione rilevabile.

Le energie caratteristiche delle particelle rilevate sono inferiori a 0.025 eV mentre, come già evidenziato nella Sezione 1.2, la porzione di spettro energetico utile per stime di umidità del suolo è quella epitermica/veloce (tra 0.025 eV e 100 keV); per rendere rivelabili i neutroni veloci, quindi, si ricopre il detector con alcuni centimetri di polietilene, un materiale ricco di idrogeno che funge da moderatore. Si evidenzia, inoltre, che lo scintillatore permette di rivelare anche raggi gamma e muoni cosmici.

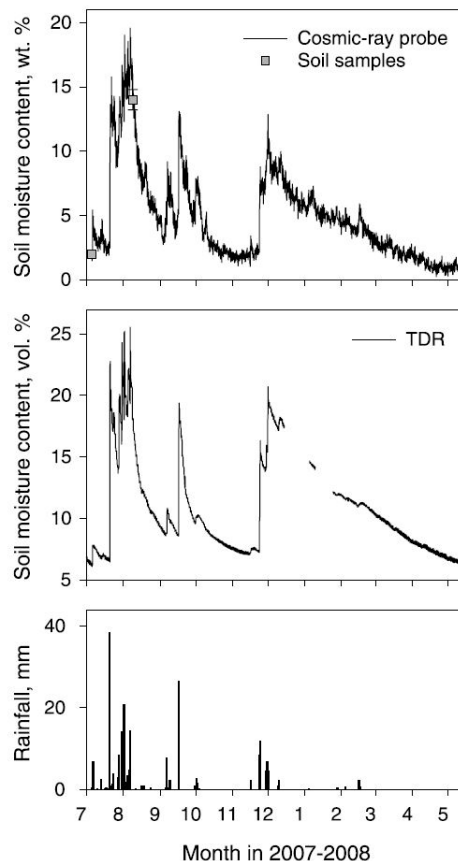


Figura 1.3: Umidità del suolo misurata con sonda a raggi cosmici (alto), con time-domain reflectometry TDR (in mezzo) e precipitazione cumulativa oraria (basso). Figura da [4]

Questi ultimi, in particolare, potrebbero costituire una valida alternativa ai database per la stima del valore di incoming e, pertanto, nel presente lavoro di tesi tutte le analisi verranno effettuate in parallelo su conteggi di neutroni e di muoni.

Ogni sonda viene assemblata creando un'alternanza di strati di EJ426 e di EJ280, un wave length shifter che modifica la lunghezza d'onda della luce di scintillazione per ottimizzare l'accoppiamento col fotomoltiplicatore. Il complesso di scintillatori e guide di luce viene poi ricoperto da Alanold, un materiale altamente riflettente che permette di evitare la dispersione dei fotoni prodotti dalla cattura neutronica; questi ultimi, in particolare, vengono rivelati mediante un fotomoltiplicatore Hamamatsu R878. Il tutto viene poi ricoperto da nastro isolante nero (compreso il PMT, che presenta un fototubo trasparente) per mantenere il dispositivo al buio. Si conclude con la copertura del tubo fotomoltiplicatore con un cilindro di MuMetal per schermare il campo magnetico terrestre.

Si riporta in Figura 1.4 il processo di assemblaggio del detector.

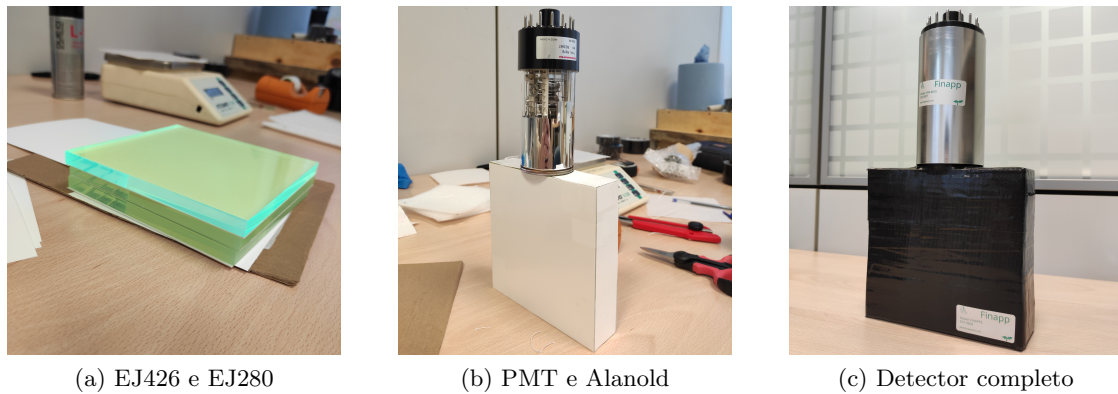


Figura 1.4: Assemblaggio delle componenti del detector

Il sistema descritto viene poi collocato in una scatola stagna assieme alla scheda elettronica a basso consumo (circa 0.4 Wh) e a una batteria tampone da 14 Ah, ricoprendo il detector con uno strato di polietilene. Inoltre, viene installato anche un rivelatore di muoni (scintillatore plastico EJ200) già testato e studiato che permette di validare le analisi sui muoni del rivelatore principale.

La sonda risulta quindi pronta per l'installazione nel sito di misura, la quale viene effettuata mediante un palo a vite che, inserito all'interno del terreno, funge da sostegno per l'apparato di misura. Una caratteristica fondamentale dello strumento è che risulta complessivamente contactless; la trasmissione dei dati viene realizzata con un'antenna GSM (posta all'interno o all'esterno del contenitore metallico, a seconda dell'esigenza), mentre l'alimentazione fa affidamento su un pannello fotovoltaico da 20 W. Si riportano in Figura 1.5 delle foto di una sonda Finapp installata a San Pietro Capofiume (BO).

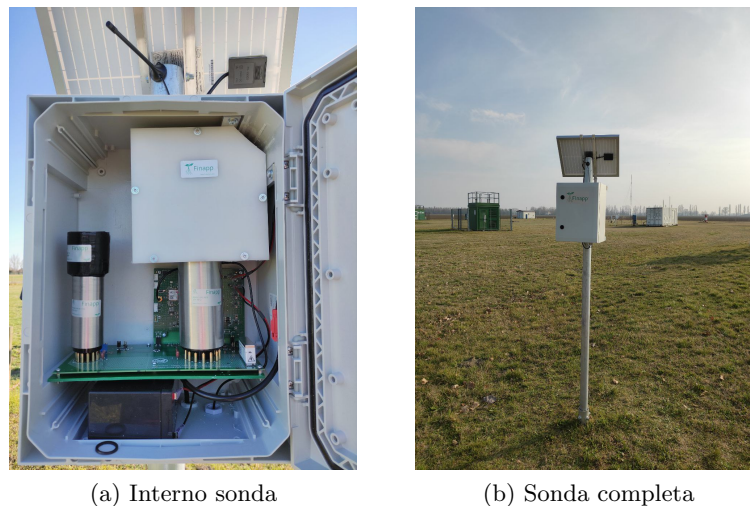


Figura 1.5: Sonda completa ed installata

## 1.4 Particle Discrimination

Come precedentemente esposto, lo scintillatore commerciale EJ426 è in grado di rivelare non solo neutroni lenti, ma anche raggi gamma, neutroni veloci e muoni. La discriminazione e l'identificazione delle varie particelle avviene mediante un algoritmo basato sul metodo del *pulse shape discrimination* (*PSD*). Questa tecnica sfrutta i diversi processi di interazione particella-scintillatore; in particolare, studiando le diverse forme d'onda generate dal passaggio della radiazione è possibile stimare il parametro *PSD*, definito come:

$$PSD = \frac{Long\ Integral - Short\ Integral}{Long\ Integral}$$

ove *Long Integral* è il segnale del PMT integrato su un lungo periodo, mentre *Short Integral* su uno breve. Il primo è associato alla luce proveniente da tutte le componenti, mentre il secondo solo a quelle veloci. La Figura 1.6 mostra un istogramma bidimensionale *PSD* vs energia per un rivelatore composto da EJ299 ed EJ240. La discriminazione tra le varie particelle può essere effettuata mediante selezione delle regioni significative del plot [2].

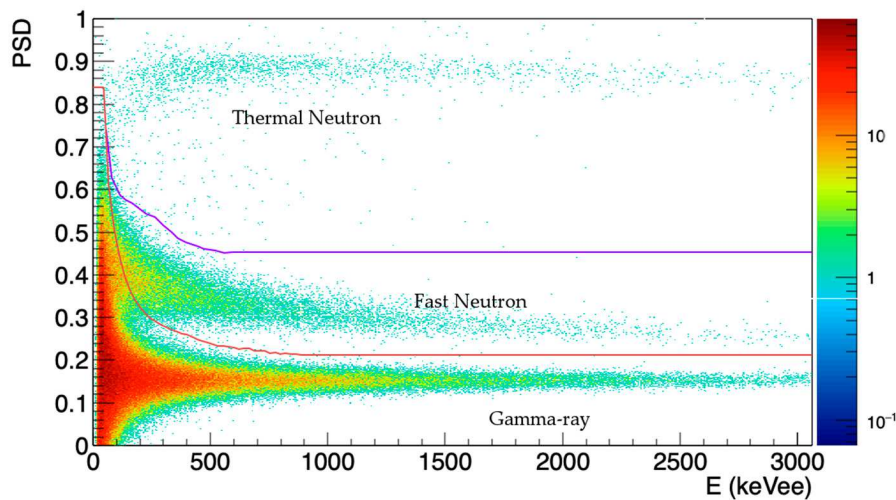
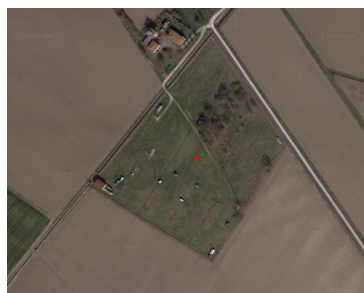


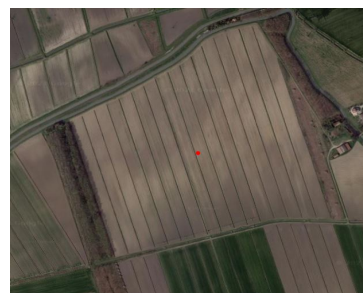
Figura 1.6: Parametro *PSD* vs energia; le diverse zone sono identificative mediante curve polinomiali. Figura da [2]

## 1.5 Siti sperimentali

Le sonde Finapp, essendo ancora in fase di test, vengono installate in stazioni agro-meteorologiche o in aziende agricole che presentano strumenti di misura (come pluviometri o igrometri) per controllare i risultati ottenuti. In particolare, le sonde analizzate nel presente lavoro di tesi sono due, una installata nella stazione meteorologica di San Pietro Capofiume (BO) (N 44.653703, E 11.623707) e una nell'Azienda Pilota e Dimostrativa Sasse Rami, Ceregnano (RO) (N 45.058481, E 11.852171).



(a) San Pietro Capofiume (BO)



(b) Ceregnano (RO)

Figura 1.7: Foto satellitari dei luoghi di installazione



# Capitolo 2

## Analisi dati

L'analisi dati è stata effettuata mediante l'utilizzo del software ROOT [11]. In particolare, per la gestione della data è stata sfruttata la classe TDate, mentre per i dati TGraph, TH1 e TH2.

### 2.1 Correzione dei conteggi

Come anticipato nella Sezione 1.2, il flusso di neutroni è influenzato non solo dalla presenza di acqua, ma anche da fattori atmosferici/cosmici, pertanto, prima di convertire il conteggio di neutroni in umidità è necessario applicare delle correzioni. L'equazione correttiva standard è [5]:

$$N = N_{raw} \cdot e^{\beta(p-p_{ref})} \cdot [1 + \alpha(h - h_{ref})] \cdot \frac{I_{ref}}{I} \quad (2.1)$$

ove  $N$  è il numero corretto,  $N_{raw}$  il dato della sonda,  $p$  la pressione in mbar e  $p_{ref} = 1013$  mbar,  $h$  l'umidità assoluta in  $g \cdot m^{-3}$  e  $h_{ref}$  la media dell'umidità assoluta nel periodo di misurazione. Il termine  $\frac{I_{ref}}{I}$  è il rapporto tra incoming di riferimento e incoming al momento di misura ottenibile dai database [8] che, fornendo l'aumento percentuale del flusso incidente  $J = \frac{I - I_{ref}}{I_{ref}}$  permette di calcolare  $\frac{I_{ref}}{I} = \frac{1}{J+1}$ . In particolare, per l'analisi delle due sonde sono stati sfruttati i dati forniti dalla stazione di Atene con una risoluzione temporale di 1 giorno. I coefficienti dell'equazione, invece, valgono  $\alpha = 0.0054$  e  $\beta = 0.0076$  per neutroni,  $\beta = 0.0021$  per muoni.

Si presenta quindi il problema di determinare il numero di neutroni  $N_{raw}$ ; essendo il rivelatore studiato sensibile a neutroni, muoni e raggi gamma, vengono utilizzati degli algoritmi di PSD per filtrare i dati. Tali filtri, però, non permettono di eliminare completamente il fondo noise e gamma a bassa energia dai conteggi dei neutroni, pertanto si impone una soglia inferiore sotto cui scartare i dati. La soglia hardware si rivela invece sufficiente per la distinzione dei segnali relativi ai muoni, però la variazione di guadagno del PMT (analizzata in Sezione 2.3) richiede l'utilizzo di una threshold anche per tali conteggi. Di seguito una rappresentazione degli spettri (e della soglia fissa) ottenuti dai dati di San Pietro Capofume nella settimana 24-31/03/2021.

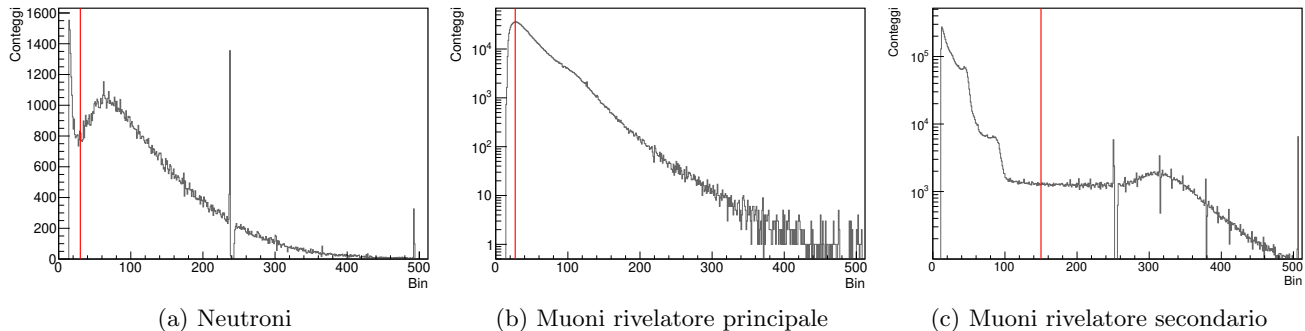


Figura 2.1: Spettri senza correzioni con threshold fissa evidenziata

Il rivelatore secondario è sensibile a raggi gamma e muoni, per distinguere i dati è sufficiente imporre una soglia inferiore oltre al fondo gamma (di cui si possono riconoscere le spalle Compton in Figura 2.1c). Infine, è importante notare la presenza di molti eventi in saturazione, ovvero particelle con energia oltre il range della DAQ che, quindi, saturano all'ultimo bin disponibile.

## 2.2 Threshold variabile - simulazione con ROOT

Si decide di effettuare un'analisi più approfondita sulla soglia inferiore per la determinazione di  $N_{raw}$ . Il guadagno del fotomoltiplicatore costituisce un elemento fondamentale da tenere in considerazione per l'impostazione di una soglia corretta; se il guadagno dovesse diminuire, ad esempio, lo spettro verrebbe deformato verso sinistra e una threshold fissa finirebbe per scartare conteggi di neutroni non appartenenti al fondo. Le modifiche nel guadagno del PMT non sono eventi anomali, anzi, sono strettamente legati alla variazione della temperatura interna alla sonda, pertanto si vuole determinare un metodo efficace per imporre una soglia variabile in funzione della variazione di guadagno del fotomoltiplicatore, che dovrebbe poi corrispondere a un termine correttivo di temperatura non contenuto nella formula 2.1.

Una quantità facilmente stimabile che presenta correlazione col guadagno è l'energia media dello spettro  $\langle E \rangle$ ; se il guadagno diminuisse, ad esempio, lo spostamento verso sinistra dei conteggi in energia porterebbe a una diminuzione di  $\langle E \rangle$ . Pertanto si vuole individuare un modo per simulare l'effetto di una variazione del guadagno del PMT e, osservando la conseguente modifica dell'energia media, individuare una relazione che leghi le due quantità appena citate. Si sceglie quindi un istogramma di riferimento (periodo 24-31/03/2021,  $T \in [17, 22]$  °C ove non sono presenti evidenti fluttuazioni) e, mediante il metodo `GetRandom()` della classe TH1, vengono generati dei numeri casuali secondo la distribuzione definita dallo spettro; tali punti, poi, vengono moltiplicati per un fattore  $k$  (che rappresenta l'amplificazione sul guadagno del fotomoltiplicatore) e inseriti in un nuovo istogramma di cui si calcola l'energia media (metodo `GetMean()`). Ripetendo tali operazioni al variare di  $k$ , è possibile plottare  $\langle E \rangle(k)$ , Figura 2.2.

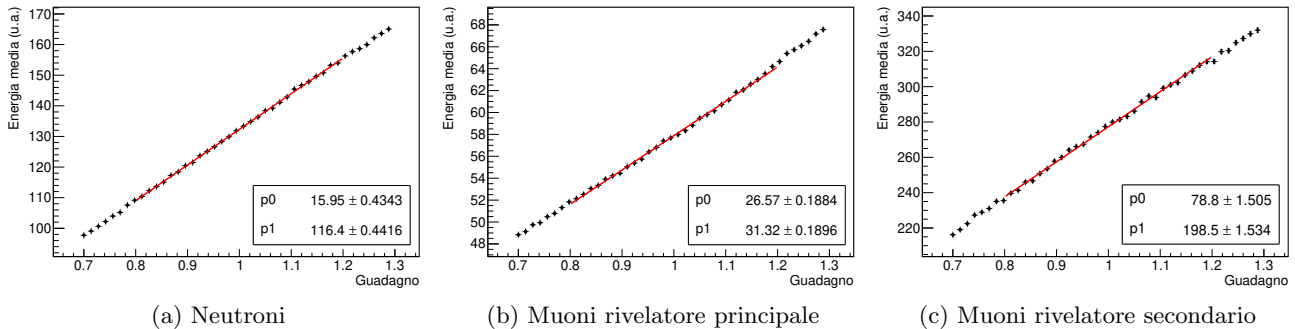


Figura 2.2: Grafici  $\langle E \rangle(k)$

È facile osservare l'andamento lineare della relazione cercata; si procede pertanto ad effettuare dei fit lineari per trovare la dipendenza di  $\langle E \rangle$  da  $k$ . Ottenuta la relazione cercata, essa può essere invertita per ricavare la variazione sul guadagno a partire dall'energia media di ogni spettro orario (relativo, quindi, a una singola acquisizione della sonda). La soglia variabile (variable threshold,  $VT$ ) sarà pari alla soglia fissa (fixed threshold,  $FT$ ) per l'amplificazione (funzione di  $\langle E \rangle$ ):  $VT = k(\langle E \rangle) \cdot FT$ .

La correzione appena descritta rimuove gran parte della dipendenza dei conteggi dalla temperatura, che è il parametro che influisce maggiormente sul guadagno del PMT. Resta tuttavia una dipendenza residua dalla temperatura dovuta al noise e ad altri effetti dell'elettronica, che può essere eliminata attraverso un parametro aggiuntivo  $a$ , ottenuto minimizzando la correlazione nei plot  $N_\mu$  vs  $T$ ; in particolare, sotto questa ipotesi la stima di soglia variabile assume la forma  $VT = [(k-1) \cdot a + 1] \cdot FT$ , con  $a = 1.2$ . La correzione apportata è, pertanto, piccola, considerando che un valore unitario riporterebbe alla prima formula per la stima di  $VT$ .

Come anticipato a inizio sezione, le modifiche di guadagno sono legate alla variazione della temperatura; si vuole tentare di verificare tale assunzione a posteriori dell'analisi svolta, osservando gli istogrammi bidimensionali dei conteggi vs la temperatura, con soglia variabile e con soglia fissa. Per migliorare la visualizzazione della correlazione tra  $N$  e  $T$  prima dell'applicazione della soglia variabile, si utilizzano i conteggi corretti per pressione e umidità secondo 2.1; i dati riportati sono relativi al periodo 21/03/2021-04/05/2021, data in cui è stata apportata una modifica alla tensione della batteria che, quindi, ha modificato il guadagno del fotomoltiplicatore. Si presentano pertanto i plot  $N_n$  e  $N_\mu$  vs  $T$  per il rivelatore principale della sonda di San Pietro Capofiume:

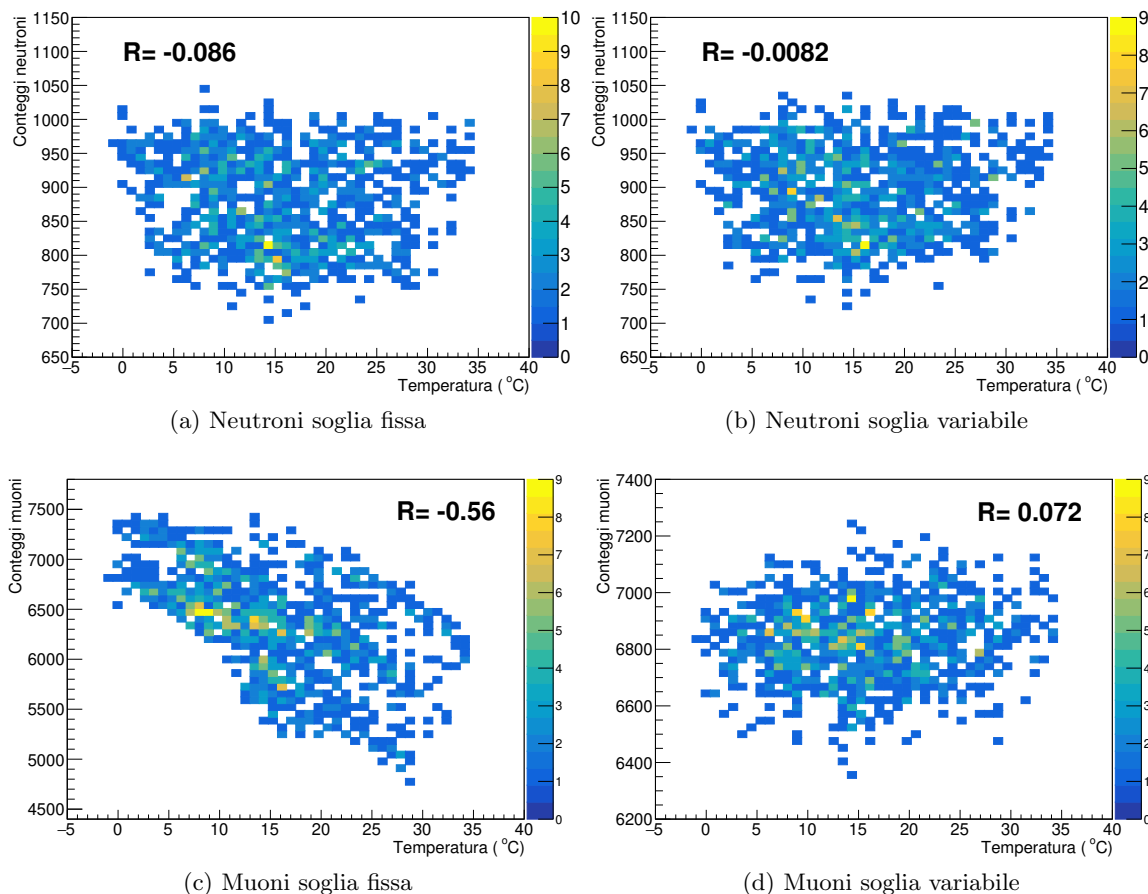


Figura 2.3: Grafici  $N$  vs  $T$

Il grafico relativo ai neutroni non presenta significative differenze prima e dopo l'applicazione della soglia variabile, inoltre, è evidente come la correlazione tra conteggi e temperatura sia pressoché assente nel caso delle particelle in questione. Viceversa, il flusso di muoni sembra molto più influenzato dalla temperatura, come è facile osservare in Figura 2.3c. A seguito dell'applicazione della soglia variabile, però, la correlazione sembra sparire, confermando l'ipotesi fatta in partenza (corrispondenza soglia variabile - correzione di temperatura) per il conteggio dei muoni. La differenza di comportamento tra muoni e neutroni è dovuta principalmente alla diversa forma dello spettro di energia, il cui valore medio è sensibilmente più alto di quello dei muoni. Un'ulteriore conferma dell'efficacia della correzione si può ricavare dall'indice di correlazione riportato nei grafici che diminuisce significativamente a seguito dell'applicazione della  $VT$ .

Si evidenzia che per la stima del parametro  $a$  è stato sfruttato proprio l'istogramma  $N_\mu$  vs  $T$  con threshold variabile cercando il valore che minimizzasse la correlazione tra le due quantità.

Infine, si segnala che la stessa analisi può essere effettuata sul rivelatore secondario ottenendo i medesimi risultati dei muoni del detector principale, confermando sia la presenza di correlazione tra  $N_\mu$  e  $T$ , che il legame tra  $VT$  e correzione di temperatura.

## 2.3 Analisi del guadagno

Individuato un metodo per la stima della variazione di guadagno del fotomoltiplicatore in funzione dell'energia media dello spettro orario, è possibile analizzare la serie storica di  $k$ , ovvero la variazione di  $k$  in funzione della data; in Figura 2.4 sono riportati tali grafici (per neutroni e muoni).

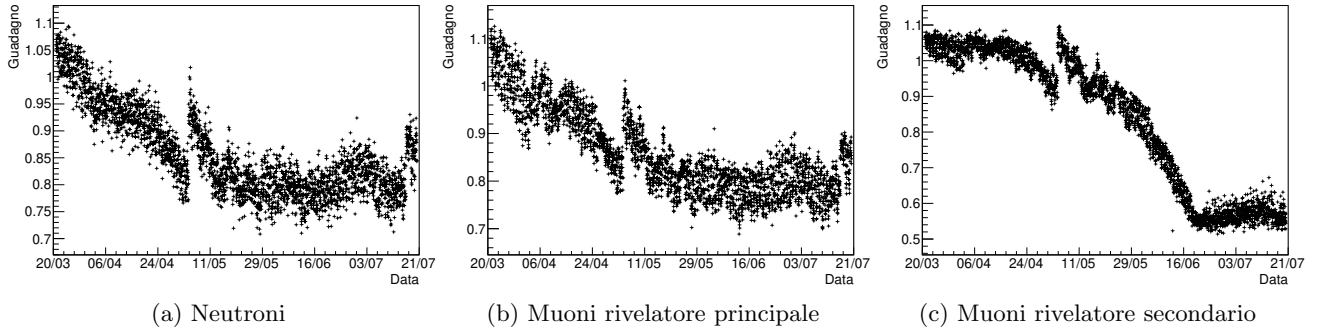


Figura 2.4: Serie storiche variazione di guadagno del PMT

È evidente come il guadagno non sia costante, anzi, diminuisca col tempo, indice di un possibile progressivo danneggiamento di alcune componenti della sonda. Le serie storiche per neutroni e muoni del rivelatore principale sono pressoché identiche, a parte una maggior variazione di  $k$  nell'arco della giornata, spiegabile ricordando la maggior dipendenza di  $N_\mu$  dalla temperatura (Sezione 2.2); esclusa questa leggera differenza, però, l'andamento è lo stesso, in accordo con le previsioni (essendo dati dello stesso rivelatore). Per quanto riguarda il rivelatore secondario, invece, la variazione di guadagno è molto più repentina nel periodo centrale.

Tutte le serie storiche presentano una discontinuità in data 04/05/2021, in corrispondenza della già citata modifica alla tensione della batteria. Inoltre, da metà giugno in poi la perdita di guadagno sembra cessare; tale effetto è ancora oggetto di studio, ma potrebbe essere legato a una stabilizzazione nel tempo delle caratteristiche di alcuni componenti critici (come la capacità di feedback dello stadio integratore).

## 2.4 Confronto correzioni

Una volta impostata la soglia variabile, è possibile ottenere una valida stima di  $N_{raw}$  che può poi essere corretto secondo l'equazione 2.1. Il termine correttivo principale è quello relativo alla pressione; infatti, plottando un istogramma bidimensionale  $N_{raw}$  vs  $P$  (pressione), è presente una evidente correlazione non visibile nei grafici vs  $I$  (incoming) e  $h$  (umidità). A seguito dell'applicazione del termine  $e^{\beta(P-P_{ref})}$ , la suddetta correlazione viene sensibilmente ridotta, indice della bontà della correzione effettuata. In Figura 2.5, i due istogrammi sopra citati per i neutroni della sonda di San Pietro Capofiume nel periodo 21/03/2021-20/07/2021; vengono inoltre riportati i coefficienti  $R$  per verificare la bontà della correzione.

Una volta impostata la soglia variabile e applicati i vari fattori correttivi, è possibile convertire il numero di conteggi in umidità del suolo secondo 1.1. Prima di effettuare tale procedimento, però, si può migliorare ulteriormente la stima di  $N$ . Essendo la statistica delle singole acquisizioni orarie bassa (500-1000 conteggi), è opportuno effettuare una media su  $n$  misure, essendo queste statisticamente indipendenti; generalmente, si pone  $n = 12$  o  $n = 24$ .

In Figura 2.6 un confronto tra la serie storica di  $N_{raw}$  e la serie storica di  $N$  (quindi con le correzioni applicate) con punti mediati su 24 ore ( $n = 24$ ) per la sonda di San Pietro Capofiume.

Sono evidenti delle repentine discese nel flusso di neutroni registrato dalla sonda, ci si aspetta che tali andamenti corrispondano a eventi di precipitazione atmosferica che, aumentando il contenuto idrico del suolo, riducono improvvisamente il numero di neutroni che arrivano al detector. Si può inoltre notare come nel periodo estivo (in cui ci si aspetta una minore umidità del suolo) i conteggi siano mediamente più alti rispetto alla stagione primaverile.



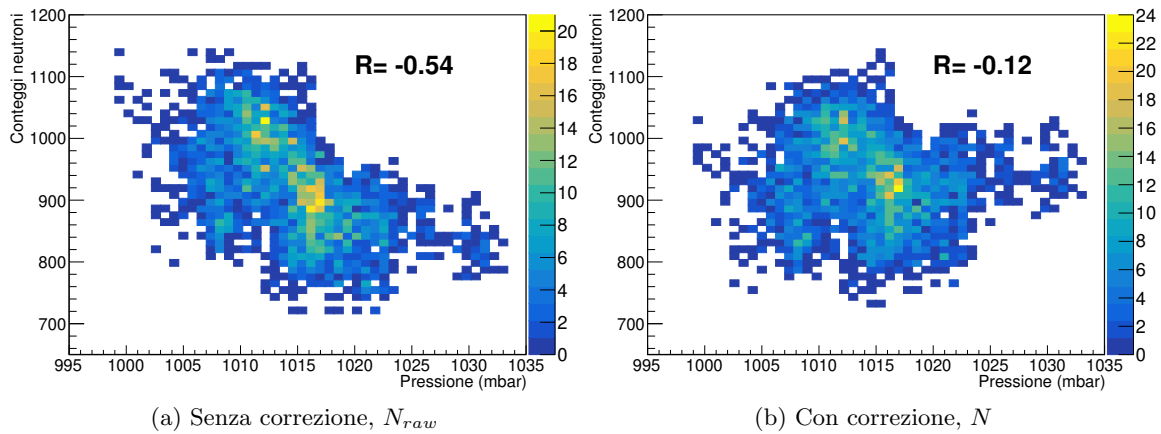


Figura 2.5: Grafici  $N$  vs  $P$

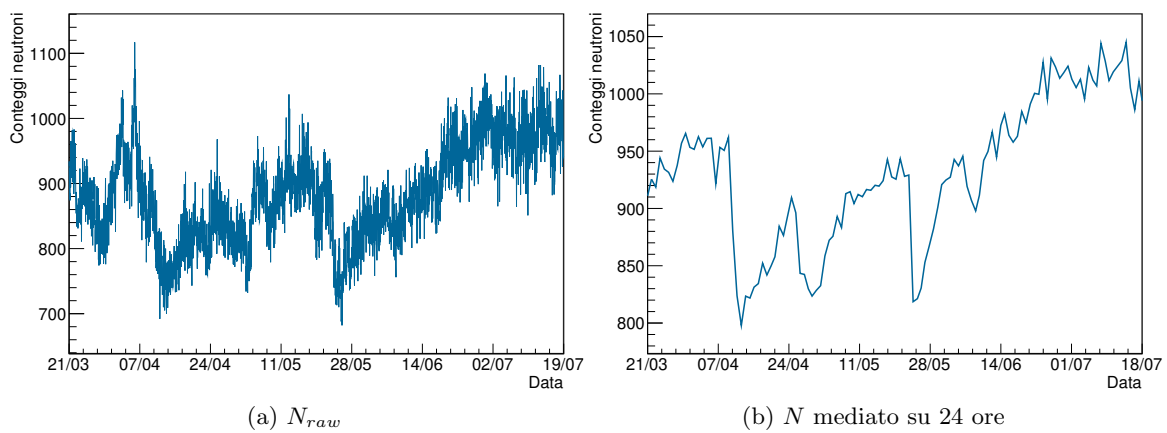


Figura 2.6: Grafico di confronto delle serie storiche dei conteggi orari dei neutroni grezzi e corretti

È quindi possibile procedere alla conversione di  $N$  in  $\theta(N)$  secondo l'equazione 1.1 per verificare se le diminuzioni dei conteggi evidenziate dalla serie storica siano imputabili a fenomeni meteorologici.

## 2.5 Muoni

Prima di confrontare  $\theta(N)$  con i dati pluviometrici, si vuole indagare se i conteggi di muoni per il rivelatore principale siano proporzionali a quelli del rivelatore secondario, già testato e brevettato. Si riporta in Figura 2.7a un confronto fra le serie storiche appena citate per la sonda di San Pietro Capofiume, con numero di muoni corretto per pressione e umidità e dati mediati su 24 ore.

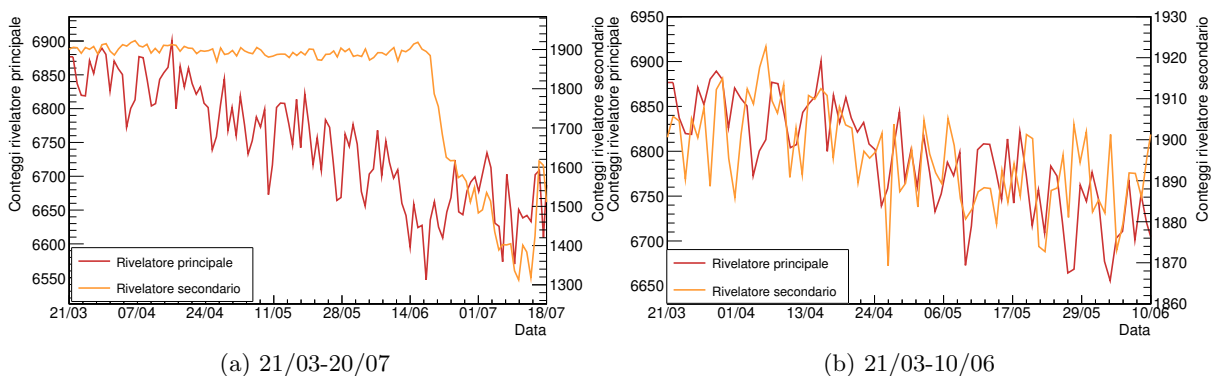


Figura 2.7: Confronto serie storiche muoni dei due rivelatori

Il grafico mostra delle nette differenze tra le due serie storiche. La linea rossa (rivelatore principale) cala gradualmente, mentre quella gialla rimane circa costante per poi scendere repentinamente a metà giugno, proprio nel periodo in cui il guadagno si stabilizza (Figura 2.4). Si può ipotizzare che la correzione di soglia variabile riesca a compensare il calo del guadagno fino ad un certo valore di  $k$ , oltre il quale si verifica una drastica riduzione del numero di muoni stimato. Ulteriori studi permetteranno di comprendere meglio il fenomeno appena descritto.

Nonostante il calare costante dei conteggi del rivelatore principale, non vi sono andamenti particolarmente anomali prima della stabilizzazione del guadagno estiva, pertanto si concentra l'analisi in tale finestra temporale (21/03-10/06) per cercare di individuare una corrispondenza tra le stime del numero di muoni; si riporta quindi un confronto dei conteggi nel suddetto periodo in Figura 2.7b. Il grafico risulta immediatamente più leggibile del precedente vista la diversa scala utilizzata per i conteggi del rivelatore secondario; infatti, proprio questi ultimi evidenziano un andamento leggermente decrescente, in accordo con le stime derivanti dall'altro detector. Inoltre, si può osservare un buon accordo nelle posizioni dei picchi delle due serie e si può anche notare come le differenze di conteggi tra salite e discese consecutive si aggirino attorno all'1-2% per entrambi i rivelatori. Queste considerazioni portano a concludere che il rivelatore di neutroni possa svolgere anche la funzione di rivelatore di muoni.

Si vuole, a questo punto, stabilire la presenza o meno di un legame tra variazione di flusso di raggi cosmici e numero di muoni rivelati dal detector principale. Per far ciò, si riportano in Figura 2.8 le serie storiche della variazione percentuale (relativa alla media) delle due quantità nel periodo di validità della stima del numero di muoni (21/03-10/06). I dati di incoming sono riferiti alla stazione di Atene.

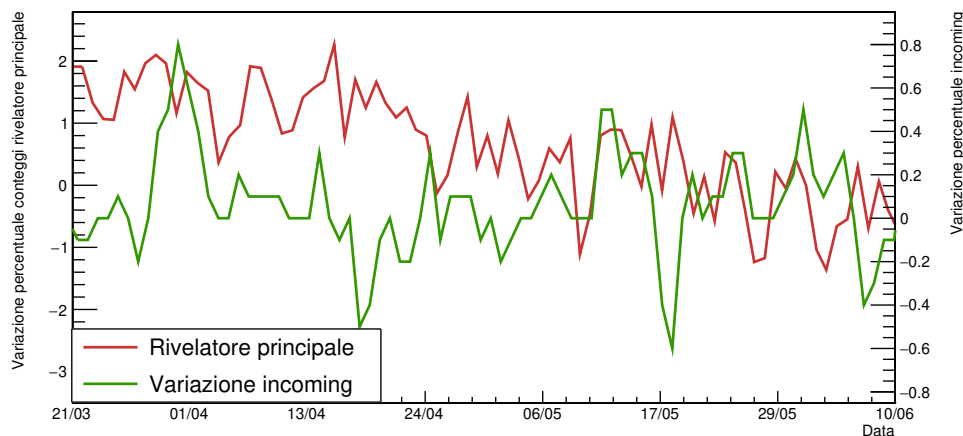


Figura 2.8: Grafico di confronto serie storica muoni e incoming

La figura mostra evidenti differenze tra le due serie, però si possono riconoscere degli andamenti simili in alcuni periodi (il mese di aprile e l'ultima settimana di maggio, ad esempio), indice che il conteggio dei muoni potrebbe fungere da stima di incoming. Inoltre, è necessario ricordare che il flusso di raggi cosmici presenta delle variazioni locali, pertanto è prevedibile che i dati di Atene siano leggermente differenti da quelli ottenuti dalla sonda Finapp. Nonostante queste conferme, rimane ancora da spiegare l'andamento calante del conteggio di muoni che, secondo alcuni studi, potrebbe essere ricondotto alla variazione di temperatura media dell'aria tra marzo e giugno [6]; tale effetto è attualmente sotto osservazione nelle diverse sonde installate.

In conclusione, è evidente la presenza di un legame tra le due grandezze analizzate, futuri studi permetteranno di caratterizzarlo con più precisione.

## 2.6 I risultati di San Pietro Capofiume

Come già anticipato, una delle sonde studiate nel presente lavoro di tesi è stata installata nella stazione meteorologica di San Pietro Capofiume, dotata di sistemi di rilevazione di temperatura, pressione

atmosfera, umidità relativa e precipitazioni. Proprio quest'ultimo dato permette di verificare, almeno a livello qualitativo, il corretto funzionamento della sonda per CRNS. Per effettuare la conversione a umidità volumetrica del suolo è necessario conoscere i parametri  $\rho_{bulk}$ ,  $\theta_{offset}$  e  $N_0$ ; quest'ultimo, in particolare, è usato come *tuning parameter* per interpolare l'umidità del suolo ottenuta dalla sonda Finapp ( $\theta(N)$ ) con una misura puntuale ottenuta con mezzi classici ( $SM$ ).

In data 15/03/2021 sono stati effettuati dei campionamenti del suolo che, a seguito di analisi in laboratorio, hanno riportato i seguenti risultati:

$SM$ (g/g)	$OM$ (g/g)	$LW$ (g/g)	$\rho_{bulk}$ (g/cm <sup>3</sup> )
0.119	0.028	0.084	1.43

Tabella 2.1: Parametri medi di misure su campioni di terreno raccolti in data 15/3/2021

In Figura 2.9 vengono riportate la serie storica di umidità del suolo e i dati pluviometrici ottenuti dalla webapp di estrazione dati dell'ARPAE [12], nel periodo 21/03/2021-20/07/2021.

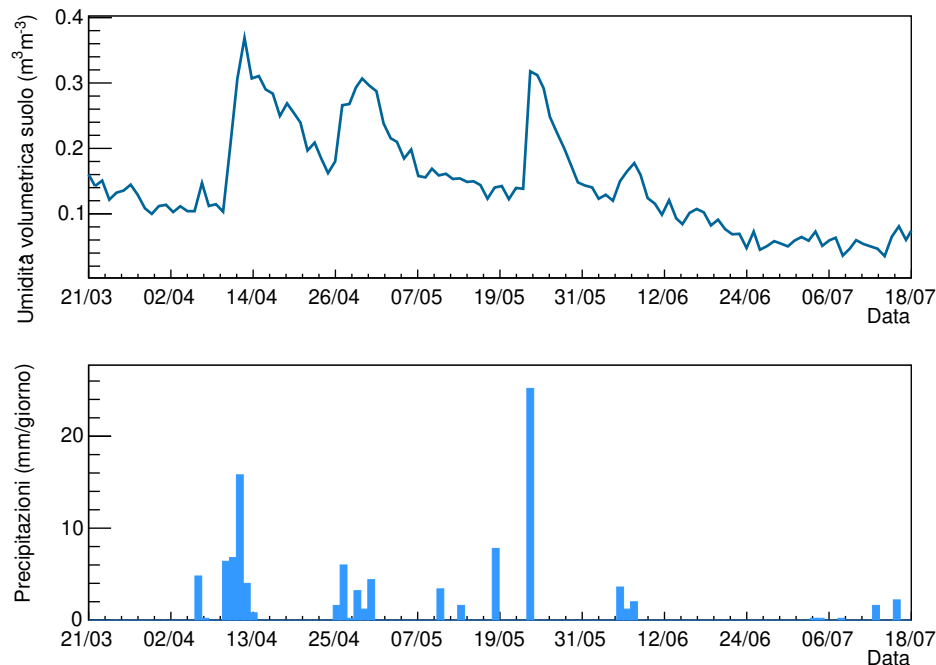


Figura 2.9: Confronto umidità del suolo stimata con sonda Finapp e dati pluviometrici della stazione meteo di San Pietro Capofiume

Il grafico mostra un buon accordo tra umidità del suolo e dati pluviometrici. Per ogni picco di precipitazione giornaliera è presente una risalita nella stima dell'umidità volumetrica, confermando almeno a livello qualitativo che la sonda Finapp può costituire un valido strumento per la tecnica del CRNS. Si potrebbe raffinare l'analisi utilizzando un diverso metodo per la misura dell'umidità del suolo che permetta di confermare con precisione le stime di  $\theta(N)$  o, in alternativa, si potrebbero utilizzare dei software che permettano di simulare la dinamica dell'umidità del suolo.

## 2.7 I risultati di Ceregnano

La sonda di Ceregnano è installata nell'Azienda Pilota e Dimostrativa Sasse Rami – Ceregnano (RO). I dati pluviometrici sono ottenuti dal sito dell'ARPAV [13], stazione meteorologica di Sant'Apollinare (RO).

Vengono quindi ripetute tutte le analisi precedentemente descritte sul detector di Ceregnano. Si comincia con la determinazione di una soglia fissa e, mediante simulazione con ROOT, si imposta una

threshold variabile in funzione del guadagno del PMT; si applicano poi le correzioni di pressione, umidità e incoming secondo 2.1 e si converte  $N$  in umidità del suolo. Come per la sonda di San Pietro Capofiume (Sezione 2.6), vengono raccolti dei campioni di terreno in data 10/03/2021 per la determinazione dei parametri utili alla conversione, i cui risultati sono riportati in Tabella 2.2

$SM$ (g/g)	$OM$ (g/g)	$LW$ (g/g)	$\rho_{bulk}$ (g/cm <sup>3</sup> )
0.184	0.0365	0.0761	1.6

Tabella 2.2: Parametri medi di misure su campioni di terreno raccolti in data 15/3/2021

La sonda risulta attiva dal mese di marzo, ma problemi hardware hanno costretto alla modifica di alcune componenti e, pertanto, i dati vengono analizzati a partire dal 28/05/2021. La serie storica dell'umidità del suolo stimata con tecnica CRNS e i dati pluviometrici ottenuti dal sito dell'ARPAV [13] sono riportati in figura 2.10.

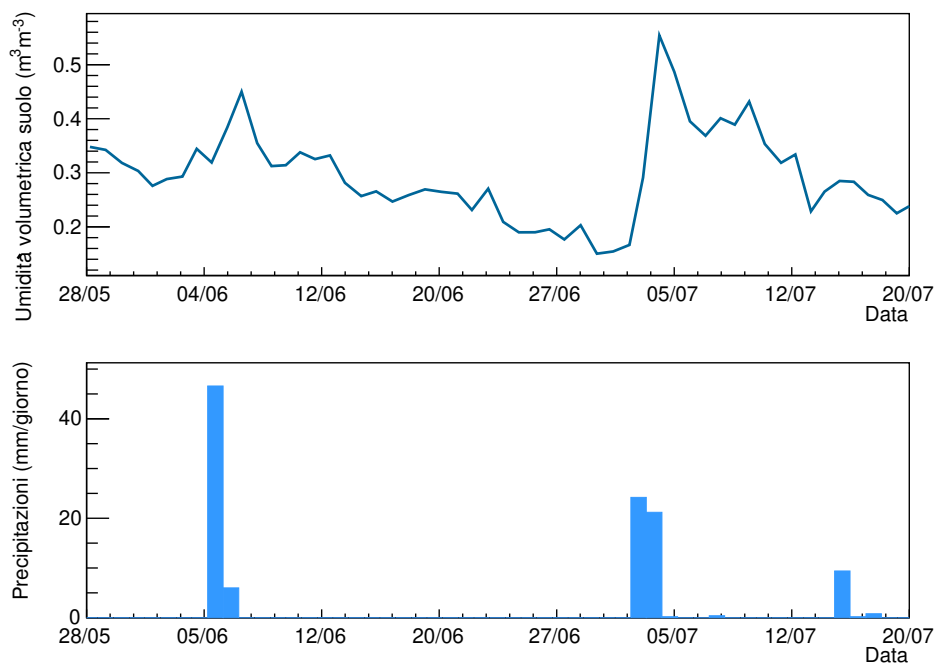


Figura 2.10: Confronto umidità del suolo stimata con sonda Finapp e dati pluviometrici della stazione meteo di Sant'Apollinare

Il grafico mostra un parziale accordo tra stima di umidità del suolo e dati pluviometrici. Al secondo picco di precipitazioni, in effetti, corrisponde una rapida salita nella misura di  $SM$ , come ci si aspetta; anche il piccolo terzo evento atmosferico sembra avere un riscontro nel grafico in alto. Il primo gruppo di precipitazioni, invece, corrisponde solo a un leggero aumento nella stima di  $\theta(N)$ , in disaccordo con le aspettative (considerando l'ingente quantità di pioggia). Si sottolinea, però, che i dati pluviometrici sono stati raccolti a qualche km dalla sonda di Ceregnano (Sant'Apollinare), pertanto tale distanza geografica potrebbe spiegare parzialmente la discrepanza; inoltre, a differenza di luglio, l'acquisizione partiva già con terreno piuttosto umido, portando a una differente dinamica di incremento dell'umidità del suolo. Per studiare meglio l'affidabilità della sonda, in ogni caso, sarebbe necessario ripetere le analisi con più statistica (quindi più eventi di precipitazione atmosferica). Come nel caso di San Pietro Capofiume, inoltre, si potrebbe raffinare l'analisi confrontando la stima dell'umidità del suolo con una tecnica tradizionale o, in alternativa, sfruttare delle simulazioni di dinamica idrogeologica.

## Capitolo 3

# Conclusioni

Il presente lavoro di tesi aveva lo scopo di studiare un'innovativa sonda per la stima dell'umidità del suolo su aree ampie sfruttando la tecnica del *Cosmic-Rays Neutron Sensing*. Tale detector presenta diversi vantaggi rispetto ai tradizionali rivelatori usati per CRNS: utilizza materiali plastici atossici e eco-sostenibili, è facilmente riciclabile e la tecnologia utilizzata permetterà di ridurre il costo al livello delle sonde puntuali attualmente in commercio. Inoltre, rispetto ai contatori ad  $^3\text{He}$ , il detector sfruttato da Finapp permette di rivelare anche muoni e raggi gamma; questi ultimi in particolare, potrebbero essere correlati all'umidità del suolo su piccole aree secondo alcuni studi [7]. I muoni, invece, come analizzato in Sezione 2.5, sono legati all'incoming. Pertanto futuri studi potrebbero rendere la sonda indipendente dai database e migliorare le stime ottenute solamente mediante neutroni.

Il sistema di rivelazione della sonda Finapp si basa sullo scintillatore commerciale EJ426 che, attraverso il processo di cattura neutronica del  $^6\text{Li}$ , permette di rilevare il passaggio di neutroni termici. La porzione di spettro energetico utile alla determinazione dell'umidità del suolo è, però, quella epitermica/veloce, pertanto i neutroni vengono moderati da uno strato di polietilene che ricopre interamente il rivelatore. Una volta assemblati i vari componenti della sonda, si procede all'installazione e alla raccolta dati. Nel presente elaborato sono stati studiati due detector, uno a San Pietro Capofiume (BO) e uno a Ceregnano (RO); il primo è situato all'interno di una stazione meteorologica dotata di sistemi di rilevazione pluviometrici e igrometrici, fondamentali per la validazione dell'esperimento, il secondo nell'Azienda Pilota e Dimostrativa Sasse Rami.

Nel complesso, le stime di umidità del suolo sembrano essere in buon accordo con le rilevazioni pluviometriche delle stazioni dell'ARPA. In particolare, la sonda di San Pietro Capofiume mostra una dinamica di umidità che segue molto bene l'andamento dei fenomeni di precipitazione; in presenza di piogge, il valore di umidità cresce in modo evidente, diminuendo poi nei periodi di assenza. La sonda di Ceregnano presenta alcune criticità che, come già discusso, potrebbero essere imputabili al breve periodo di misura e al fatto che i dati pluviometrici sono raccolti a qualche km di distanza dal sito di installazione, rendendo difficile l'interpretazione della dinamica del suolo.



# Bibliografia

- [1] Food and Agriculture Organization (FAO). Introduction. In *Water for Sustainable Food and Agriculture*; FAO: Rome, Italy, 2017; p. 1. ISBN 978-92-5-109977-3.
- [2] Stevanato, L., Baroni, G., Cohen, Y., Cristiano Lino, F., Gatto, S., Lunardon, M., Marinello, F., Moretto, S., Morselli, L., 2019. A Novel Cosmic-Ray Neutron Sensor for Soil Moisture Estimation over Large Areas. *Agriculture* 9, 202.
- [3] Kohli, M.; Schron, M.; Zreda, M.; Schmidt, U.; Dietrich, P.; Zacharias, S. Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons. *Water Resour. Res.* 2015, 51, 5772–5790.
- [4] Zreda, M.; Desilets, D.; Ferré, T.; Scott, R. Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophys. Res. Lett.* 2008, 35, L21402.
- [5] Schrön, M.; Zacharias, S.; Womack, G.; Köhli, M.; Desilets, D.; Oswald, S.E.; Bumberger, J.; Mollenhauer, H.; Kögler, S.; Remmler, P.; et al. Intercomparison of cosmic-ray neutron sensors and water balance monitoring in an urban environment. *Geosci. Instrum. Methods Data Syst.* 2018, 7, 83–99.
- [6] De Mendonça R.R.S. et al, 2016. The temperature effect in secondary cosmic rays (muons) observed at the ground: analysis of the global muon detector network data. *Astrophys. J.* 830, 88.
- [7] Baldoncini, M.; Albéri, M.; Bottardi, C.; Chiarelli, E.; Raptis, K.G.C.; Strati, V.; Mantovani, F. Investigating the potentialities of Monte Carlo simulation for assessing soil water content via proximal gamma-ray spectroscopy. *J. Environ. Radioact.* 2018, 192, 105–116.
- [8] <https://www.nmdb.eu/nest/>
- [9] <https://www.finapptech.com/>
- [10] <https://eljentechnology.com/>
- [11] <https://root.cern.ch/>
- [12] <https://simc.arpae.it/dext3r/>
- [13] [https://www.arpa.veneto.it/bollettini/meteo60gg/Staz\\_231.htm](https://www.arpa.veneto.it/bollettini/meteo60gg/Staz_231.htm)