

Capitolo 5

Studio dell'effetto del biofouling sulle prestazioni del rivelatore

Nei capitoli 3 e 4 sono stati presentati i risultati ottenuti dall'analisi delle misure fatte nel sito abissale di Capo Passero (a circa 3350 metri di profondità), per un periodo di circa due anni. In questa analisi è stato possibile osservare che la trasparenza delle superfici esterne dei moduli ottici decresce in funzione del tempo e che questo effetto è più marcato per le superfici che sono rivolte verso l'alto. Le superfici rivolte verso il basso sono meno soggette alla deposizione di sedimenti, ma vengono comunque “colonizzate” da batteri, che producono una sottile pellicola biologica che ne diminuisce la trasparenza, anche se in maniera minore rispetto all'accumulo di sedimenti.

La “velocità” con cui tali fenomeni di oscuramento hanno luogo sembra diminuire con il tempo, stabilizzandosi in molti casi dopo circa un anno dalla messa in acqua dell'apparato.

Le colonie di batteri e i sedimenti possono in questo modo ridurre l'efficienza di trasporto dei fotoni fino al fotocatodo e quindi degli stessi PMT: può dunque ridursi progressivamente anche la capacità dell'apparato di ricostruire le tracce dei muoni, che “testimoniano” l'avvenuta interazione di un neutrino.

Si vuole ora stimare l'effetto di questo processo di deterioramento delle prestazioni dei moduli

ottici, utilizzando una simulazione al computer della propagazione, e successiva rivelazione, di muoni nel volume di un apparato Čerenkov con la geometria di NEMO.

Il programma **OPNEMO**, scritto in linguaggio *Fortran 77* e tuttora in via di perfezionamento all'interno della collaborazione NEMO, simula la struttura dell'apparato (le cui caratteristiche principali sono schematicamente riassunte in tabella 5.1), genera una distribuzione casuale di muoni con energia ed angolo opportuni, traccia i muoni nell'apparato seguendone le interazioni e simulando la luce Čerenkov da essi generata.

In ogni piano (vedi figura 2.11) due PMT sono rivolti verso il basso e due PMT sono posizionati

# Torri	81
# Piani per torre	16
# OM per piano	4
# Totale di PMT	5832
Distanza tra due torri consecutive	140 m
Distanza tra due piani successivi	40 m

Tabella 5.1: Alcune caratteristiche dell'apparato NEMO, inserite all'interno del programma OPNEMO.

con l'asse orizzontale e rivolti verso l'esterno del piano stesso.

I muoni sono generati secondo una distribuzione in energia uniforme in $\log E_\mu$. Tale scelta non corrisponde ovviamente a condizioni fisiche reali, ma permette di studiare nel dettaglio i processi che avvengono all'interno del rivelatore anche ad energie elevate, cosa che sarebbe più difficile usando uno spettro simile a quello misurato sperimentalmente ($\frac{dN}{dE} \simeq E^{-3}$), che riprodurrebbe un flusso poco intenso ad energie elevate.

Ogni volta che il "MonteCarlo" di simulazione "segue" un fotone Čerenkov fino alla superficie di un PMT, registra l'informazione del tempo di arrivo e della posizione del PMT stesso.

Non tutti i muoni tracciati nell'apparato possono effettivamente essere ricostruiti. La ricostruzione di una traccia (cinque parametri nello spazio) sarà possibile solo se almeno cinque PMT mostrano un segnale associato al passaggio del muone. Per verificare quindi quante tracce possono essere, almeno in linea di principio, ricostruite possiamo selezionare quegli "eventi" simulati in cui almeno un PMT e/o 5 PMT hanno registrato un fotone Čerenkov.

In figura 5.1 è mostrata in nero la distribuzione dei muoni generati in funzione del logaritmo dell'energia, in rosso e in blu sono mostrate le distribuzioni dei muoni che hanno prodotto rispettivamente nell'apparato almeno un "hit" e almeno cinque "hit".

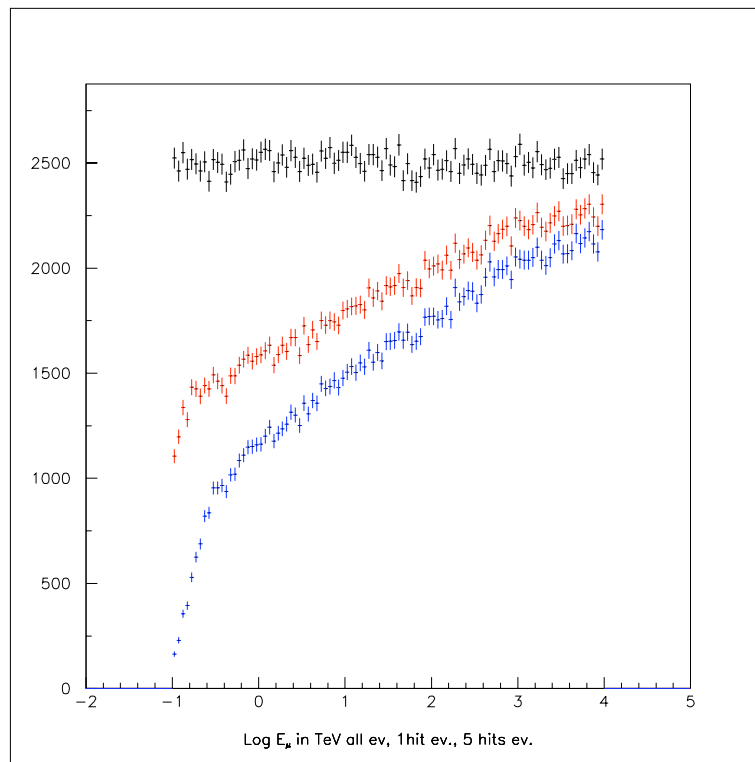


Figura 5.1: *Distribuzione del numero di muoni generati in funzione del logaritmo dell'energia dei muoni generati (in nero); dei muoni che hanno prodotto nel rivelatore almeno un "hit" (segnali in un PMT), in rosso; di quelli che hanno indotto nel rivelatore almeno cinque "hit" (in blu). Nella descrizione dell'apparato non è stata introdotta nessuna variazione di trasparenza dei moduli ottici, dovuta al biofouling.*

Si vede che la distribuzione, inizialmente piatta per i muoni generati, perde sempre più eventi

alle basse energie, mentre rimane sostanzialmente invariata alle alte energie.

L'intervallo di energia dei muoni generati dal programma può essere stabilito dall'esterno e nel nostro caso è stato scelto $E_\mu = 10^2 \text{GeV} \div 10^7 \text{GeV}$.

Le particelle vengono generate sulle pareti di una superficie che contiene il “Telescopio per Neutrini” e hanno direzioni distribuite uniformemente all'interno dell'angolo solido e dunque nel coseno di θ e in ϕ (figura 5.2).

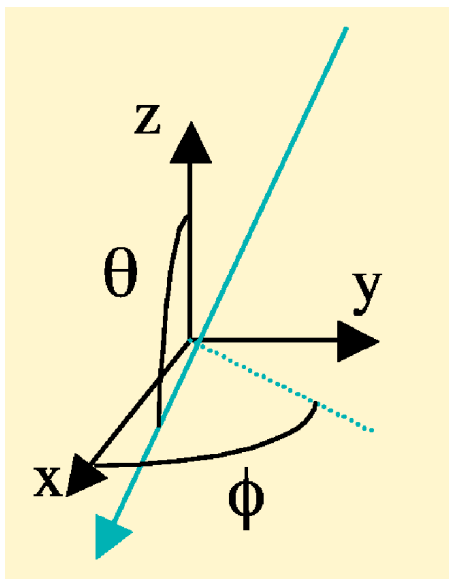


Figura 5.2: Convenzione usata per gli angoli θ e ϕ , che individuano la posizione del muone all'interno del rivelatore.

Ogni lato della superficie in cui vengono generati i muoni eccede di $3\lambda_{ass}$ il corrispondente lato dell'apparato (λ_{ass} indica la lunghezza di assorbimento di un fotone in acqua, come discusso nel paragrafo 2.2), ciò permette di valutare la probabilità di osservare anche tracce che, pur rimanendo esterne all'apparato, generano fotoni registrati dai PMT.

Il campione di eventi prodotto dal programma OPNEMO può essere poi processato da un opportuno programma di analisi, scritto in linguaggio *Fortran 77*, che utilizzando la conoscenza della posizione dei PMT che hanno registrato un segnale ed il tempo di formazione del segnale stesso ricostruisce la geometria della traccia del muone. Scopo di questa tesi non è l'ottimizza-

zione dei programmi di simulazione ed analisi. Abbiamo utilizzato tali programmi per simulare le prestazioni del detector nel ricostruire gli eventi indotti dai muoni, anche in presenza del fenomeno del biofouling sulla superficie dei PMT.

L'efficienza del programma di ricostruzione è chiaramente funzione del numero di PMT che hanno registrato un segnale: il numero medio di PMT “accesi” va da poche decine a diverse centinaia, passando da $E_\mu \sim 100 \text{ GeV}$ ad $E_\mu > 100 \text{ TeV}$.

In figura 5.3 mostriamo una visualizzazione (in scala approssimata) dell'apparato NEMO ed un “evento” indotto da un muone con $E_\mu \simeq 100 \text{ TeV}$. I PMT accesi sono rappresentati da un

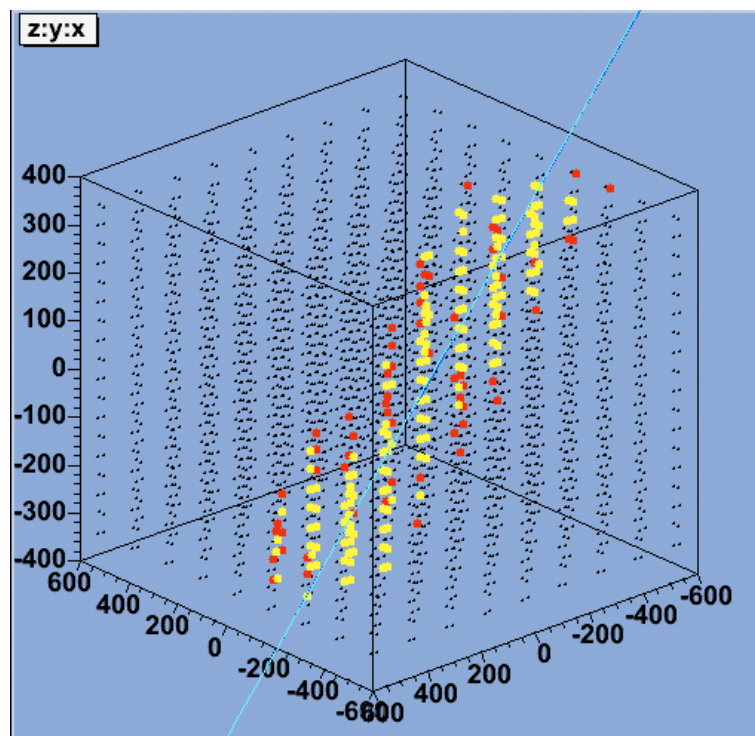


Figura 5.3: Rappresentazione di un evento all'interno dell'apparato NEMO generato dal programma OPNEMO. La scatola esterna rappresenta l'apparato, con i PMT rappresentati in nero. In giallo sono rappresentati i PMT che hanno registrato l'evento e che sono stati usati per la ricostruzione della traccia; in rosso sono rappresentati invece i PMT che, pur avendo rivelato un segnale, non sono stati utilizzati per la ricostruzione. Le tracce generate e ricostruite sono invece rappresentate da due rette colorate.

simbolo colorato e la traccia del muone (generato e ricostruito) da una linea continua.

In figura 5.4 è mostrata la distribuzione dell'angolo θ (angolo tra la verticale, l'asse z rappresentato in figura 5.2, e la direzione del muone incidente: $\theta = 0^\circ$ corrisponde ad un muone che viene dal basso, mentre $\theta = 180^\circ$ corrisponde ad un muone che viene dall'alto).

La linea nera rappresenta i muoni generati, mentre in rosso è rappresentata la distribuzione dei muoni che hanno prodotto almeno cinque *hit* nell'apparato. Il rapporto tra i muoni che hanno prodotto almeno cinque *hit* e i muoni generati rappresenta l'efficienza di rivelazione: poiché nella simulazione i fototubi dei PMT sono rivolti parte verso il basso e parte verso l'orizzontale, vengono ricostruiti meglio quei muoni le cui direzioni formano un angolo $\theta < 90^\circ$ con la verticale (*up-going*), o vengono dall'orizzontale; la capacità di ricostruire gli eventi è invece leggermente minore per i muoni che vengono dall'alto ($\theta > 90^\circ$), come è evidente osservando la figura 5.4.

La distribuzione nell'angolo ϕ è invece piatta e rimane sostanzialmente inalterata nella forma, anche considerando solo gli eventi che hanno indotto almeno cinque eventi nel PMT, come si vede in figura 5.5. L'efficienza di ricostruzione in funzione dell'angolo ϕ risulta quindi praticamente uniforme e le piccole fluttuazioni nell'andamento sono dovute alla geometria del telescopio e al fatto che, avendo il rivelatore una forma cubica, esistono delle direzioni lungo le quali si trovano un maggior numero di PMT ed è dunque più facile rivelare degli eventi.

Una volta generato, il muone può interagire con il mezzo nel quale si propaga, dando luogo a processi che possono portare a segnali sui PMT, inducendo direttamente la luce Čerenkov oppure, dopo un processo di Bremsstrahlung, uno sciame elettromagnetico in cui gli elettroni relativistici inducono a loro volta luce Čerenkov in misura anche maggiore. I fotoni così prodotti possono propagarsi nel mezzo trasparente, fino a raggiungere un fotomoltiplicatore e a questo punto produrre elettroni sul fotocatodo, con una probabilità che dipende dall'efficienza quantica (Q. E.) del PMT, si ha infatti:

$$P(e^-) = P(\lambda) \cdot Q.E. \cdot P_{Benthos} \quad (5.1)$$

Nella formula 5.1 $P(\lambda)$ rappresenta la probabilità di propagazione del fotone in acqua (dal punto in cui è stato generato, fino al PMT) ed $P_{Benthos}$ la probabilità che il fotone attraversi la

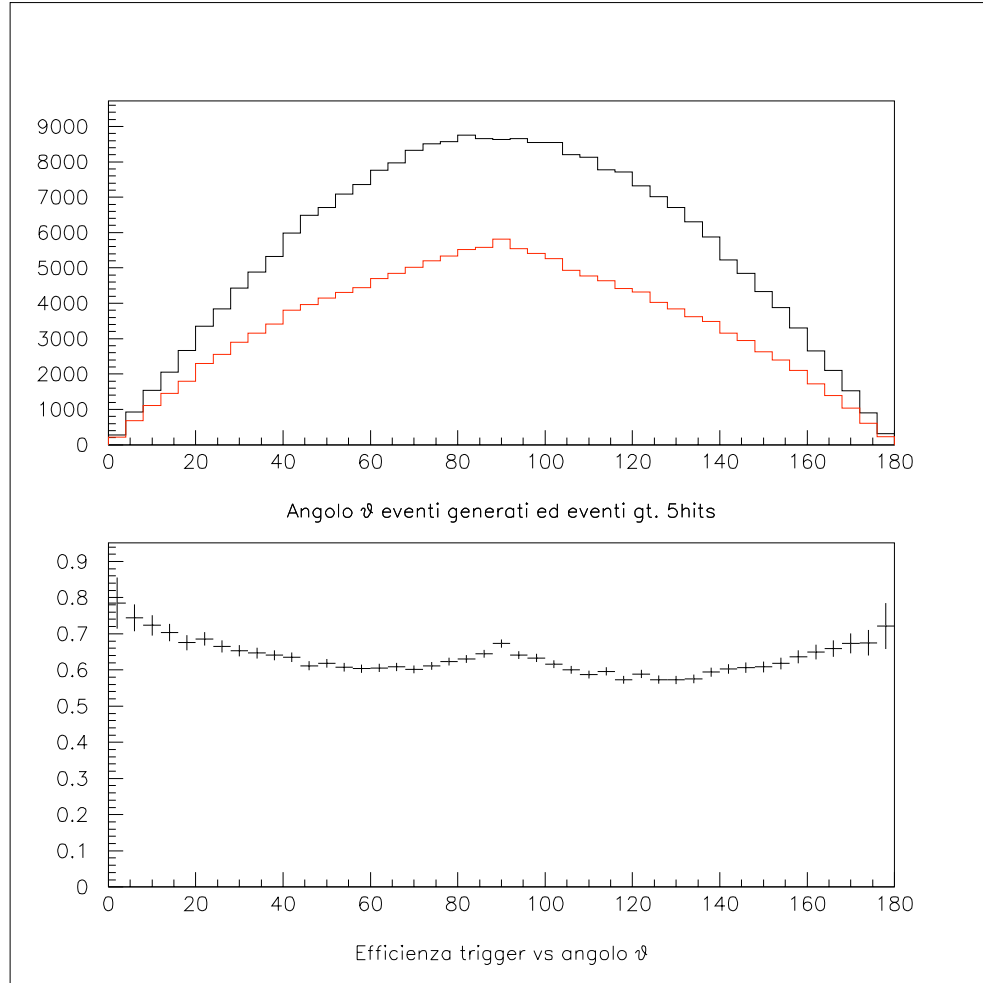


Figura 5.4: *Distribuzione dell'angolo θ formato tra la verticale e la direzione del muone incidente. In alto: distribuzione riferita ai muoni generati (in nero), distribuzione dell'angolo per i muoni che hanno generato nell'apparato almeno un "hit"; In basso: l'efficienza del trigger viene stimata con il rapporto tra le due distribuzioni sopra rappresentate.*

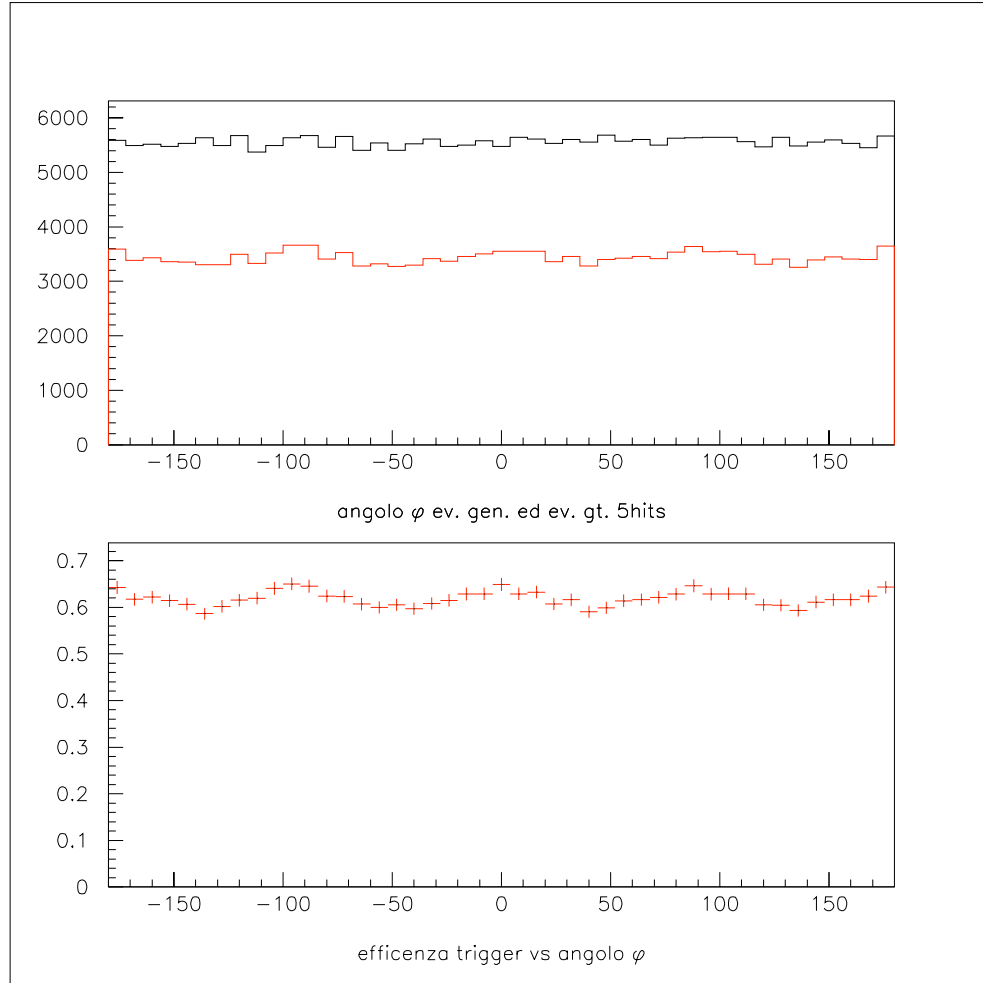


Figura 5.5: *Distribuzione dell'angolo ϕ che individua la posizione del muone sul piano orizzontale. In alto: distribuzione riferita ai muoni generati (in nero), distribuzione dell'angolo per i muoni che hanno generato nell'apparato almeno un "hit"; In basso: l'efficienza del trigger viene stimata con il rapporto tra le due distribuzioni sopra rappresentate.*

superficie della sfera BENTHOS, eventualmente oscurata dal biofouling.

La geometria dell'apparato ed alcune caratteristiche dei PMT, come l'area efficace del fotocatodo, posta uguale a 511cm^2 , la Q. E. dei PMT e la loro "Transit Time Spread" (T. T. S.) sono note al programma di simulazione.

La *Quantum Efficiency* (Q. E.) indica la probabilità con la quale un fotone incidente sul fotocatodo di un PMT viene poi convertito in un elettrone.

Per studiare l'accuratezza con la quale le tracce vengono ricostruite si studia la grandezza $\Delta\theta$, ovvero la differenza, nello spazio, tra la direzione dei muoni generati e ricostruiti.

Usualmente per confrontare le prestazioni di diversi apparati, o dello stesso apparato in diverse condizioni di selezione degli eventi, si definisce la grandezza "mediana della distribuzione" (mostrata in figura 5.6), come quel valore di $\Delta\theta_{\text{mediana}}$ tale che

$$\int_0^{\Delta\theta_{\text{mediana}}} \frac{dN}{d\Delta\theta} d\Delta\theta = \frac{1}{2} N_{TOT} \quad (5.2)$$

Ci aspettiamo che la risoluzione angolare dell'apparato migliori con l'aumentare del numero di PMT "accesi" e quindi con l'aumentare dell'energia del muone. In effetti, calcolando la $\Delta\theta_{\text{mediana}}$ per campioni di eventi suddivisi in base all'energia del muone, si verifica quanto aspettato (figura 5.7). Dovendo rivelare il passaggio di neutrini di altissima energia caratterizzati, come visto nel capitolo 1, da un flusso molto basso, l'apparato sperimentale deve avere un'area di rivelazione di almeno 1km^2 .

L'area "geometrica", ossia quella occupata dall'apparato, non coincide necessariamente con l'area massima, posta in prossimità dell'apparato, che un muone deve attraversare per essere rivelato dall'apparato (area efficace).

L'area efficace, se indichiamo con $A_{\text{generazione}}$ l'area sulla quale vengono generati i muoni che poi interagiscono all'interno del rivelatore, può essere espressa come:

$$A_{\text{eff}} = \frac{N_{\mu\text{ric}}}{N_{\mu\text{gen}}} \cdot A_{\text{generazione}} \quad (5.3)$$

dove $N_{\mu\text{ric}}$ indica il numero dei muoni ricostruiti e $N_{\mu\text{gen}}$ quello dei muoni generati. Come detto in precedenza l'area di generazione $A_{\text{generazione}}$ eccede l'area geometrica dell'apparato

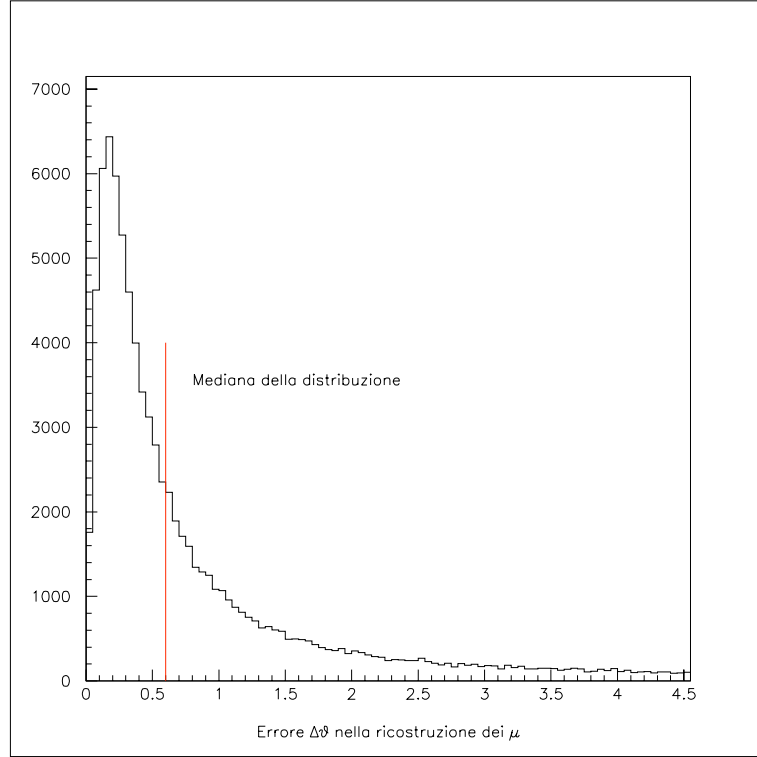


Figura 5.6: Distribuzione della grandezza $\Delta\theta$, che rappresenta l'errore sulla ricostruzione della traccia del muone generato, ed è data dalla differenza tra la direzione del muone generato e quello ricostruito, espressa in gradi, per tutte le energie. La linea rossa rappresenta il valore della “mediana” della distribuzione di $\Delta\theta$.

(ogni lato della superficie di generazione eccede di $3\lambda_{ass}$ il corrispondente lato dell'apparato). Tale scelta può sembrare arbitraria, potremmo far crescere a piacimento $A_{generazione}$. In effetti ad una crescita di $A_{generazione}$ corrisponderebbe una diminuzione dell'efficienza di rivelazione $\frac{N_{\mu ric}}{N_{\mu gen}}$, con un valore costante della quantità A_{eff} . In figura 5.8 riportiamo A_{eff} , in funzione del $\log E_\mu$ del muone generato: ad energie elevate l'area efficace diventa massima: per energie $E_\mu < 1\text{TeV}$ risulta infatti più difficile un'accurata ricostruzione delle tracce.

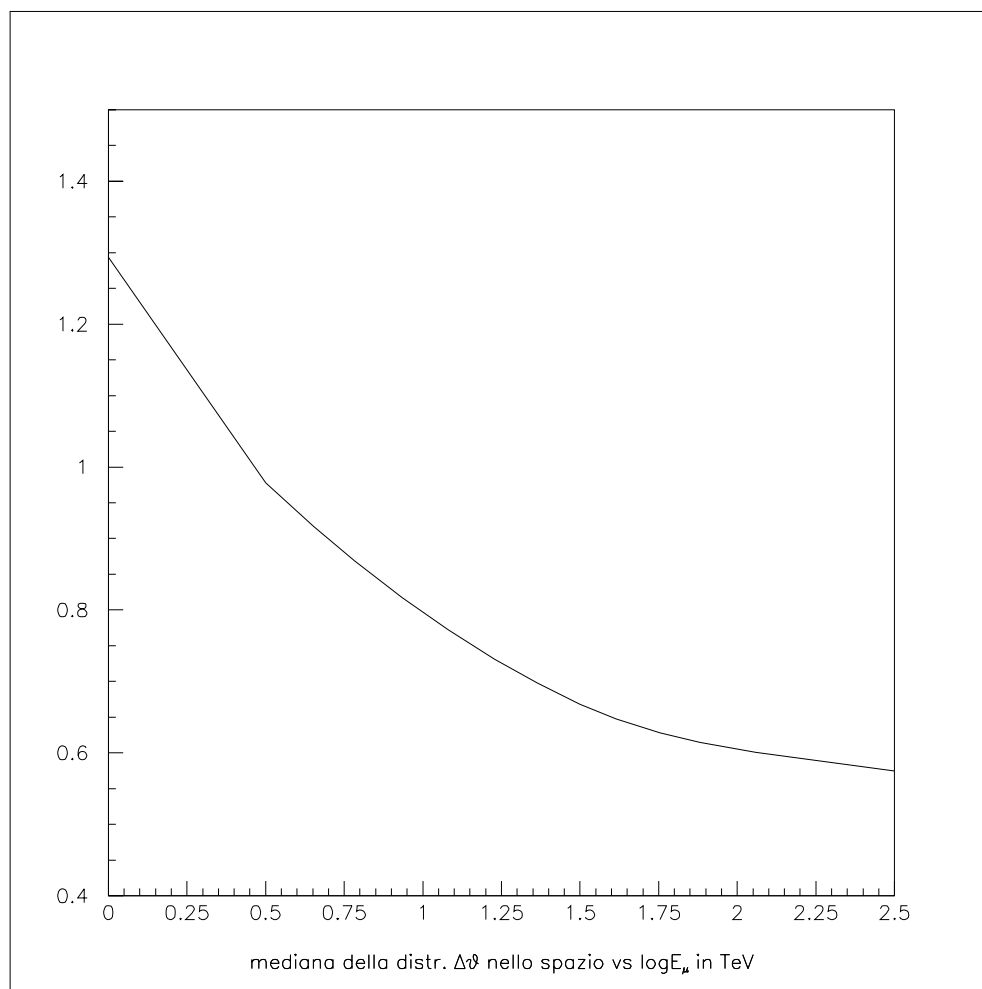


Figura 5.7: Andamento della grandezza $\Delta\theta_{\text{mediana}}$ nello spazio, che rappresenta l'errore sulla ricostruzione della traccia del muone generato, in funzione del logaritmo dell'energia del muone.

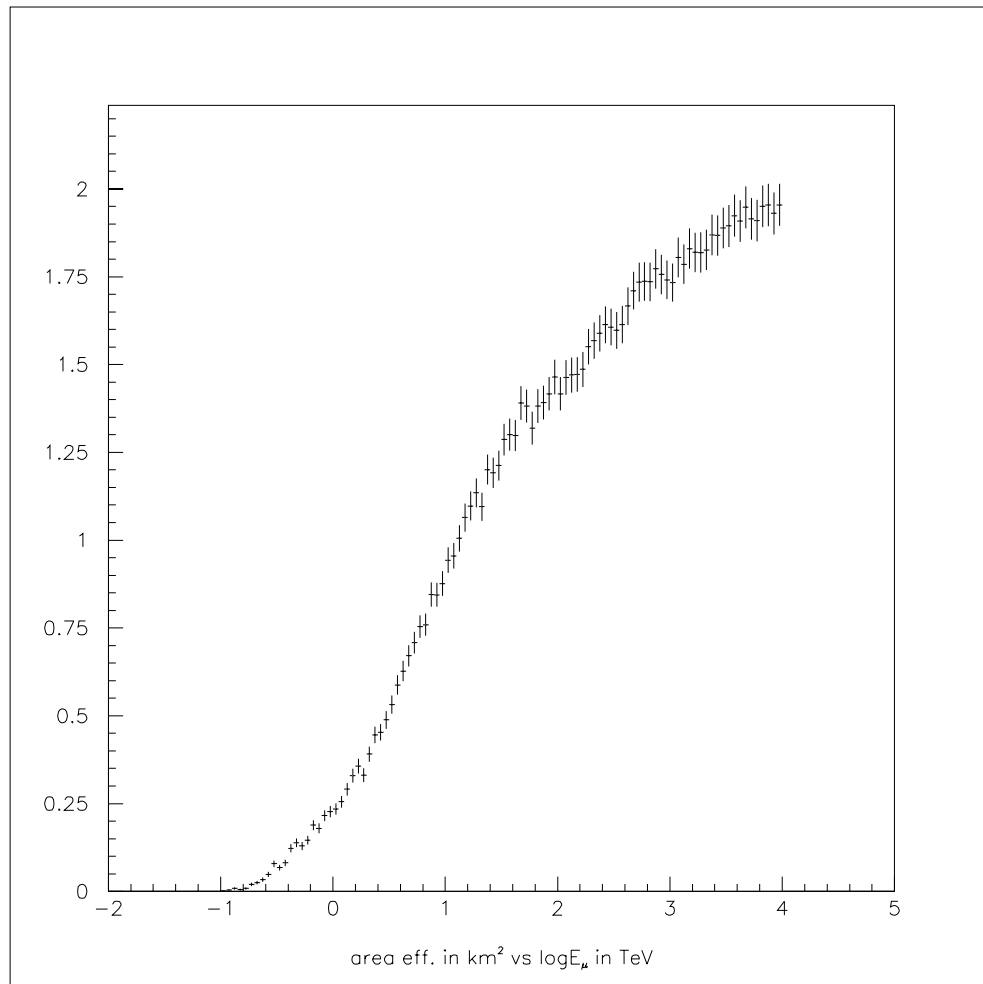


Figura 5.8: Area efficace dell'apparato, calcolata con la formula 5.3, in funzione del logaritmo dell'energia del muone.

5.1 Simulazione dell'effetto del biofouling

Il programma OPNEMO rappresenta l'apparato utilizzando le informazioni sulla geometria contenute in un apposito file, che contiene il numero di torri e di piani ed inoltre, per ogni PMT, indica l'efficienza quantica, l'area del fotocatodo (511 cm^2), la posizione ed i coseni direttori.

Su ogni piano sono montati quattro PMT che nella simulazione differiscono per posizione ed orientazione.

Le informazioni ottenute sull'andamento della trasparenza dei OM, descritte nei capitoli 3 e 4, sono state utilizzate per simulare l'apparato in modo ancora più dettagliato, tenendo conto, tramite la quantità $P_{Benthos}$ introdotta nel paragrafo precedente, del progressivo oscuramento dei moduli ottici e della differente entità con cui tale processo avviene, a seconda della latitudine, sul modulo ottico stesso.

$P_{Benthos}$ viene posta uguale ad uno al tempo iniziale e permette di simulare la trasparenza delle sfere Benthos per qualsiasi tempo successivo.

L'oscuramento dei moduli ottici, riscontrato per tutte le latitudini considerate, riduce la quantità di fotoni incidenti sul fotocatodo e dunque il numero di fotoelettroni prodotti: questo comporta quindi una riduzione della quantità $P_{Benthos} \cdot Q \cdot E$.

Come visto in precedenza, l'oscuramento è dipendente dalla latitudine: sulle superfici rivolte verso l'alto sia le colonie di batteri che l'occasionale deposizione di sedimenti e particolato in sospensione in acqua influiscono sulla diminuzione di trasparenza, mentre sulle superfici che si trovano in prossimità dell'orizzontale la variazione di trasparenza non sembra dipendere dalle correnti sottomarine ed è dunque ipotizzabile che in questo caso il contributo maggiore all'oscuramento sia dovuto alle colonie di batteri.

L'evoluzione temporale dell'efficienza di conversione di fotoni è dunque descrivibile con la funzione

$$Q \cdot E \cdot P_{Benthos}(t) \quad (5.4)$$

ottenuta moltiplicando la Q. E. di ogni PMT, pari al 25 %, per la trasparenza dei moduli ottici $P_{Benthos}(t)$, che è una funzione decrescente e compresa tra 1 e 0.

La variazione di trasparenza per ogni PMT è stata calcolata tenendo conto dell'angolo formato tra ogni elemento della superficie del PMT e la verticale, in base ai valori misurati e descritti nel capitolo 4. In particolare, dai risultati ottenuti, descritti in figura 4.11, abbiamo calcolato il valore di $\frac{\Delta Trasp(\theta)}{\Delta t}$ per diversi angoli di latitudine del PMT. L'andamento di $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ in funzione dell'angolo di latitudine è stato parametrizzato con l'espressione:

$$\frac{\Delta Trasp(\theta)}{\Delta t} = c_1 + c_2 e^{\frac{\theta}{c_3}} \quad (5.5)$$

In questo modo è stato dunque possibile ottenere un valore della variazione di trasparenza per unità di tempo anche per gli angoli per i quali non si avevano informazioni.

Sono stati quindi mediati tra loro i valori relativi a latitudini del modulo ottico inerenti il fotocatodo con l'asse orizzontale ($-55^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$) e quelli inerenti il PMT rivolto verso il basso ($-125^\circ \leq \theta \leq -35^\circ$).

Per ottenere il valore della trasparenza a tempi diversi è stato poi supposto che le velocità di oscuramento così ottenute siano costanti nel tempo. Ciò corrisponde ad una sovrastima dell'oscuramento delle superfici dei moduli ottici (come abbiamo visto con i risultati descritti nel capitolo 4) e quindi ad una sovrastima della riduzione dell'efficienza dell'apparato Čerenkov. Una analisi più dettagliata potrà essere effettuata in seguito.

In tabella 5.2 riportiamo la trasparenza media dei PMT orizzontali e verticali dopo sei mesi, un anno, cinque anni e dieci anni di biofouling.

	$P_{Benthos}(t)$ PMT rivolti in orizzontale	$P_{Benthos}(t)$ PMT rivolti verso il basso
t = 6 mesi	99,1 %	99,7 %
t = 1 anno	98,3 %	99,3 %
t = 5 anni	91,3 %	96,7 %
t = 10 anni	82,7 %	93,5 %

Tabella 5.2: *Trasparenza media dei PMT orizzontali e verticali dopo sei mesi, un anno, cinque anni e dieci anni di biofouling.*

5.2 Stima della variazione dell'efficienza del rivelatore sottomarino

L'insieme di OPNEMO e del programma di ricostruzione, perfettibili, permette di studiare $A_{eff}(E_\mu, \theta)$ e $\Delta\theta_{mediana}(E_\mu)$ per varie disposizioni geometriche dei moduli ottici. Utilizziamo questo strumento per valutare come le due grandezze considerate dipendono dalla quantità di biofouling accumulato sui moduli ottici.

Abbiamo generato 250.000 muoni, per ognuno dei tempi di “invecchiamento” indicati in tabella 5.2, con energia uniforme in $\log E_\mu$, $100 \text{ GeV} \leq E_\mu \leq 10 \text{ PeV}$, ed uniformi in ϕ e $\cos\theta$.

Abbiamo quindi confrontato l'efficienza di “trigger” in funzione di θ , l' A_{eff} e $\Delta\theta_{mediana}$ per i vari campioni.

Abbiamo visto, in figura 5.4, come il rivelatore sia più efficiente nel ricostruire le tracce dei muoni provenienti dal basso e dall'orizzontale, vista l'orientazione dei rivelatori che lo costituiscono.

La riduzione della trasparenza dei moduli ottici, più marcata per i fototubi con l'asse orizzontale, influenza quindi maggiormente la ricostruzione dei muoni *down-going*, rendendo ancora più evidente la differenza fra le efficienze di tracciamento dei muoni provenienti dai due emisferi (*down-going* e *up-going*). Abbiamo valutato tali efficienze dopo sei mesi e dopo uno, cinque e dieci anni di attività dell'apparato e quindi di *esposizione* agli effetti del biofouling, come mostrato in figura 5.9.

La ricostruzione dei muoni di bassa energia, con $E_\mu \leq 1 \text{ TeV}$, risulta influenzata dall'oscuramento dei moduli ottici, come si vede in figura 5.10, che mostra il numero di muoni ricostruiti alle varie energie e a diversi tempi. Tale effetto è più evidente in figura 5.11, che mostra la riduzione dell'area efficace dell'apparato in funzione di E_μ ed in funzione del tempo. Si vede che le differenze tra gli andamenti sono sensibili per $E_\mu \leq 1 \text{ TeV}$, mentre ad energie maggiori gli effetti sono trascurabili.

La risoluzione angolare, mostrata in figura 5.12, sembra essere affetta da un leggero peggiora-

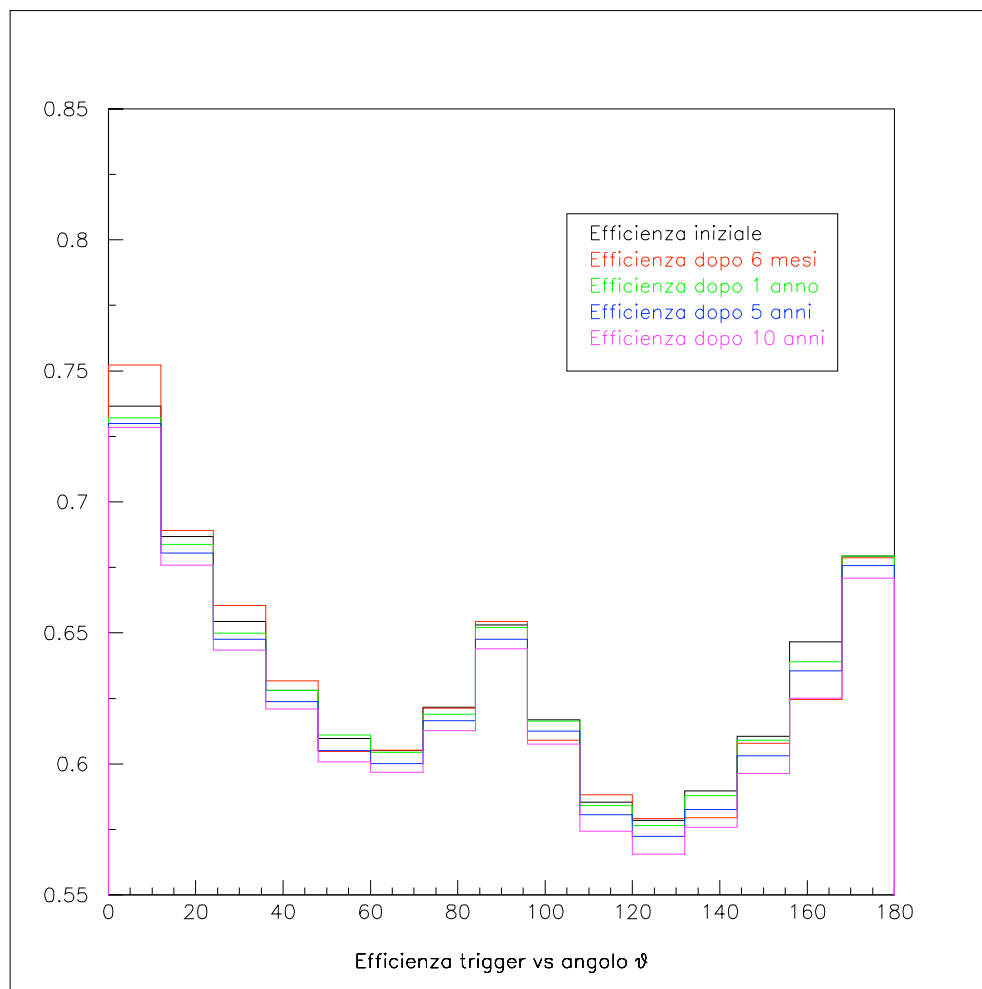


Figura 5.9: *Efficienza del rivelatore, calcolata come il rapporto tra la distribuzione dell'angolo θ (tra la verticale e la direzione del muone incidente) per i muoni che hanno prodotto almeno 5 “hit” nell'apparato e la distribuzione dei muoni generati. La linea nera rappresenta l'efficienza al tempo iniziale e le linee colorate rappresentano l'efficienza per tempi successivi, avendo introdotto l'effetto di biofouling.*

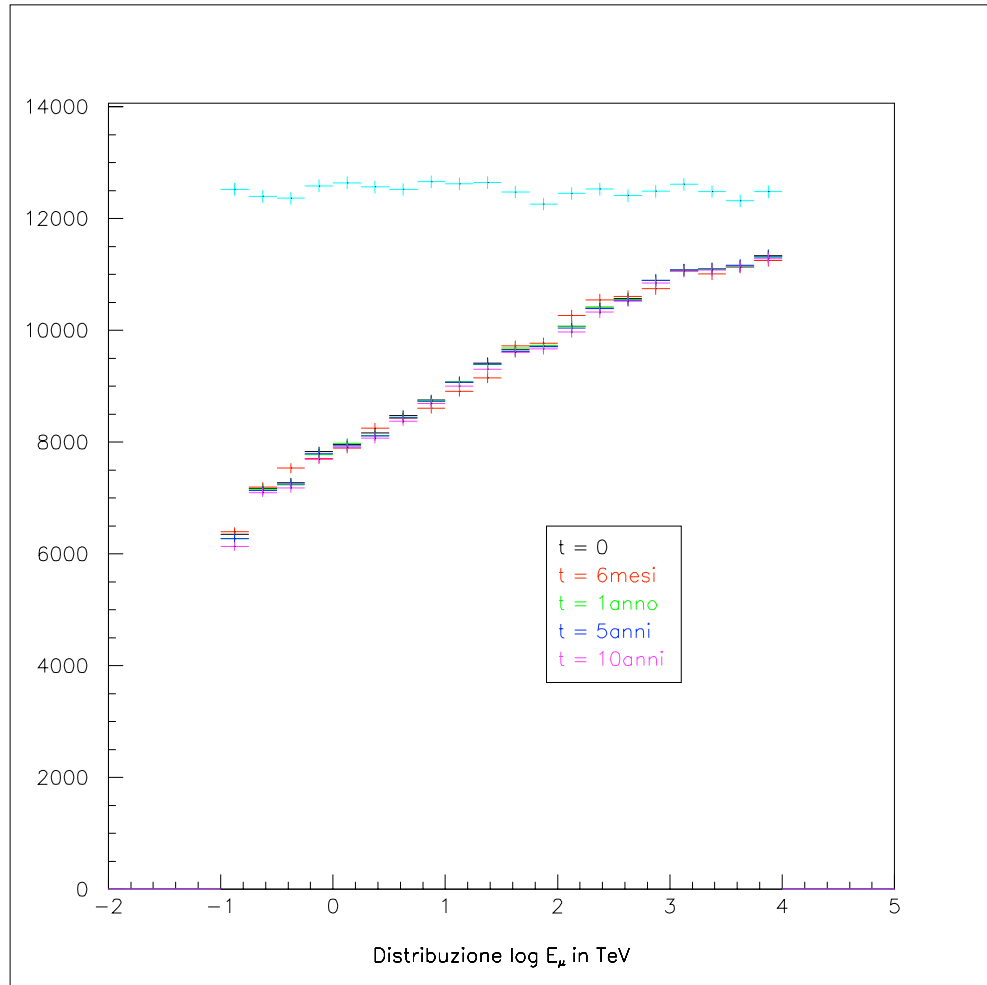


Figura 5.10: Distribuzione del numero di muoni generati in funzione del logaritmo dell'energia (in azzurro). In nero è rappresentata la distribuzione del numero di muoni ricostruiti in funzione del logaritmo dell'energia al tempo iniziale; le distribuzioni calcolate a tempi successivi sono rappresentate da punti colorati.

mento alle basse energie, più evidente per le curve blu e rosa che rappresentano l'andamento rispettivamente dopo cinque e dieci anni di attività dell'apparato. Gli andamenti simulati corrispondenti a tempi di esposizione più brevi (nera = tempo iniziale, rossa = sei mesi, verde = un anno) sembrano invece compatibili entro le fluttuazioni.

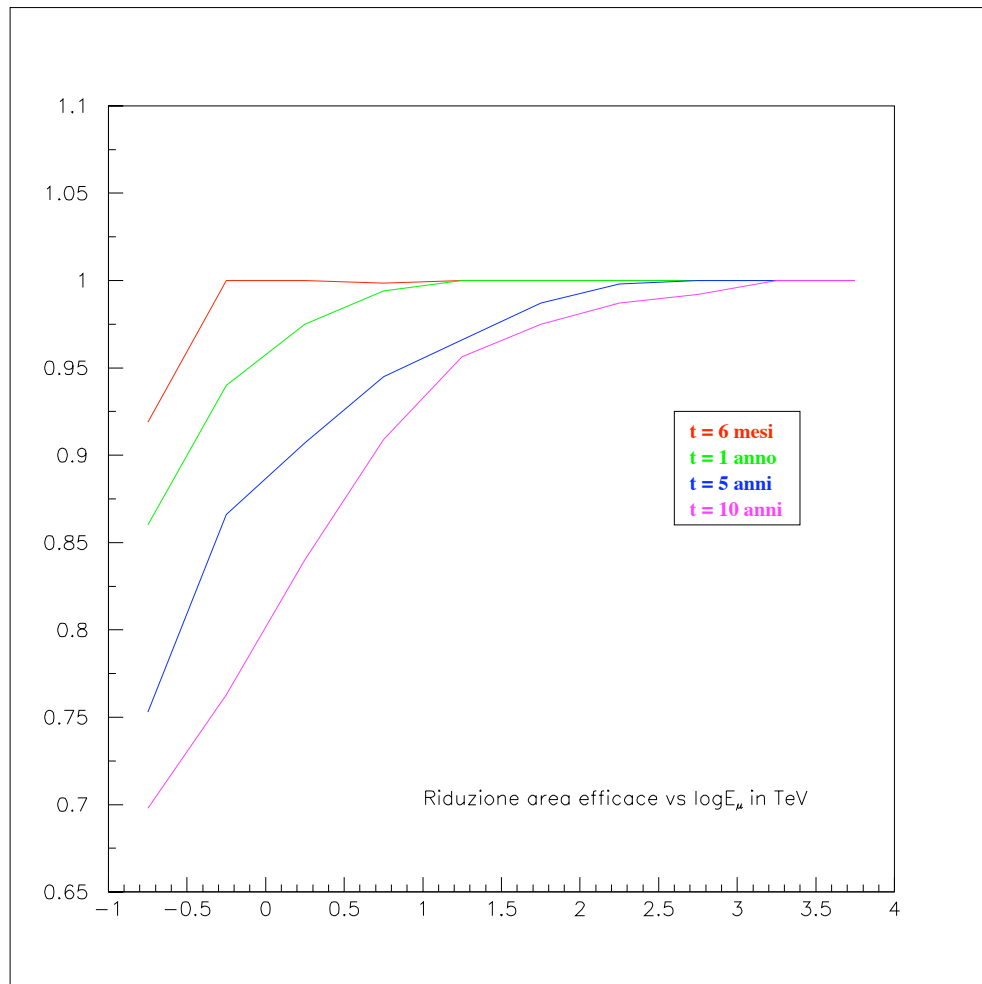


Figura 5.11: Riduzione dell'area efficace in funzione del logaritmo dell'energia del muone (espressa in TeV) dopo sei mesi, un anno, cinque anni e dieci anni.

La simulazione, nella quale è stato introdotto il processo di biofouling, ha permesso di fare una prima stima, senz'altro migliorabile, degli effetti di questo processo sulle prestazioni dell'apparato. È possibile apprezzare una progressiva diminuzione dell'efficienza di tracciamento dei

muoni, in particolare *down-going*, e della risoluzione dell'apparato per energie minori di 1 TeV. Tali effetti sono legati ad una diminuzione dell'area efficace per muoni di bassa energia e non sembrano invece rilevanti per energie maggiori di 1 TeV: a queste energie l'apparato potrà comunque essere in grado di rivelare muoni e i neutrini che li hanno generati, anche dopo cinque o dieci anni di attività. Per un'apparato sottomarino delle dimensioni di NEMO questo significa essere in grado di fare astronomia.

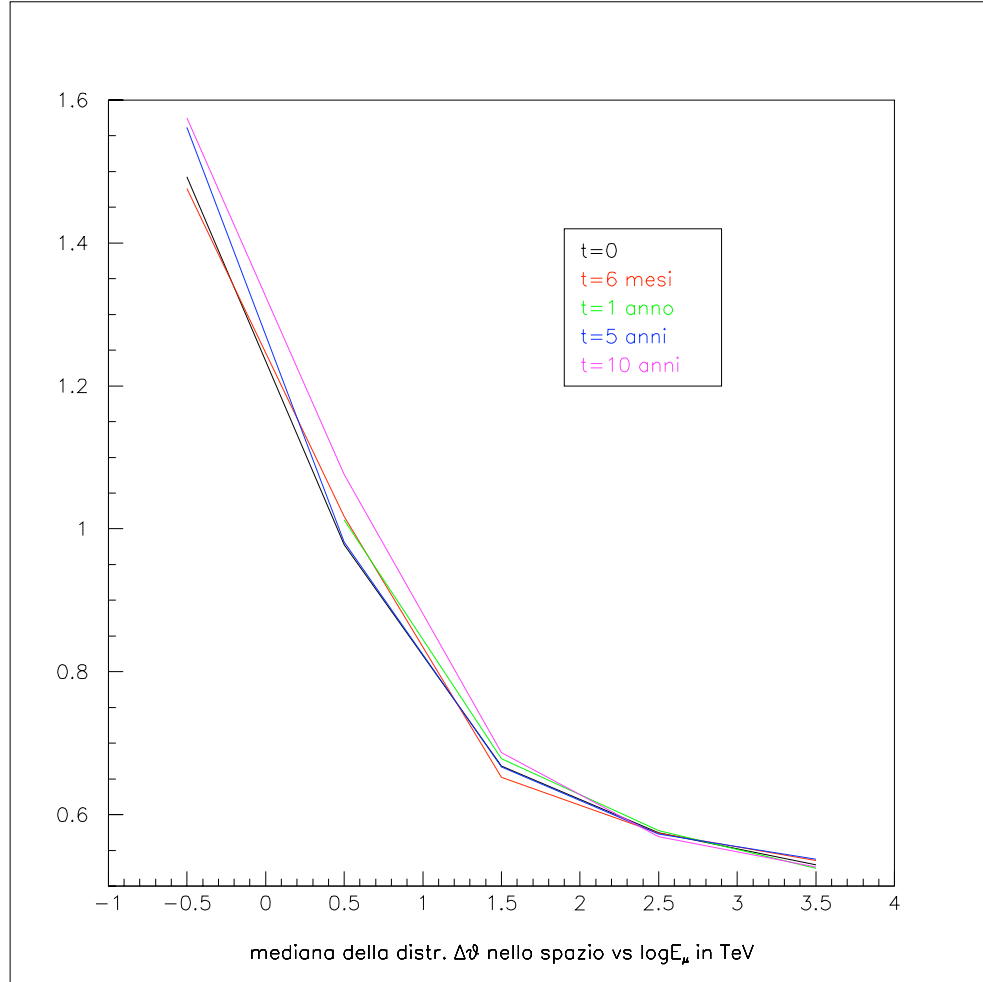


Figura 5.12: Risoluzione angolare in funzione del logaritmo dell'energia del muone: la linea nera si riferisce al tempo iniziale, mentre le linee colorate rappresentano la risoluzione dopo 6 mesi, un anno, cinque anni e dieci anni di biofouling.