

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea in
Ingegneria delle Telecomunicazioni



**MODELLO METEOROLOGICO CONTINENTALE PER APPLICAZIONI DI
TELECOMUNICAZIONE AD ALTA FREQUENZA**

Relatore: Prof. Carlo CAPSONI

Correlatore: Ing. Lorenzo LUINI

Tesi di Laurea di:

Francesco FICARRA Matr. 711226

Anno Accademico 2009 - 2010

“La scienza non può svelare il mistero fondamentale della natura. E questo perché, in ultima analisi, noi stessi siamo parte dell'enigma che stiamo cercando di risolvere.”

Max Planck

Ringraziamenti

In primo luogo desidero ringraziare il Professor Capsoni che mi ha dato l'opportunità di lavorare a questa Tesi e che si è rivelato un importante aiuto durante tutti questi mesi. Ringrazio anche Lorenzo che mi ha affiancato passo dopo passo in questo lungo percorso e senza il quale avrei certamente avuto difficoltà molto più grandi in tutte le fasi di questo lavoro.

In diversi momenti mi hanno dato il loro importante contributo, e per questo li ringrazio, il Professor Paraboni con la sua carta *Wahrscheinlichkeitsnetz*, il "meteorologo" (assiduo compagno di open space) e Maurizio venuto da quel di Genova.

Un mostruoso ringraziamento va alla mia mamma e al mio papà, perché mi sono stati sempre vicini, per la loro infinita pazienza (io forse non ne avrei avuta così tanta), per il loro continuo appoggio e per TUTTO il resto. Ringrazio mia sorella per la poca pazienza che mostra quando inizio a parlare di cose "strane".

Non voglio assolutamente dimenticare tutti i miei parenti e per tutti intendo proprio tutti (nonna "Parmina" in testa): grazie.

Ringrazio Delca, Gian, Ste, Guglio, Teo, Andrea e Beppe coloro con cui ho passato tutti quei momenti trascorsi in università e non solo.

Concludo ringraziando la persona alla quale ho forse reso la vita meno facile in tutti questi anni e che mi è stata sempre vicina. Ora che ho finito spero di darti indietro tutto ciò che mi sono preso in certi momenti di difficoltà e che ho superato soprattutto grazie alla sola tua presenza. Grazie Issima.

Indice

Introduzione.....	4
Capitolo 1	7
Effetti atmosferici sulla propagazione elettromagnetica	7
1.1 La propagazione delle onde elettromagnetiche in presenza di precipitazione	10
<i>1.1.1 Diffusione dell'onda su una singola particella.....</i>	<i>10</i>
<i>1.1.2 Diffusione da una dispersione di particelle.....</i>	<i>12</i>
<i>1.1.3 Attenuazione da pioggia.....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.4 Attenuazione dovuta a vapore acqueo e ossigeno.....</i>	<i>14</i>
<i>1.1.5 Attenuazione dovuta a nubi e nebbia.....</i>	<i>15</i>
<i>1.1.6 Altri effetti provocati da fenomeni meteorologici sulla propagazione elettromagnetica.....</i>	<i>19</i>
1.2 Generalità degli scenari possibili	20
<i>1.2.1 Broadcasting Satellite Services (BSS).....</i>	<i>20</i>
<i>1.2.2 Interactive Multimedia Broadband Services (IMMBS).....</i>	<i>21</i>
<i>1.2.3 Identificazione delle PIMTs.....</i>	<i>22</i>
<i>1.2.4 Applicabilità delle PIMTs.....</i>	<i>23</i>
1.3 Modello utilizzato dal sistema satellitare sperimentale.....	25
1.4 Ipotesi di modello.....	27
Capitolo 2	28
I dati meteorologici.....	28
2.1 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).....	28

2.1.1	<i>Il modello atmosferico globale dell'ECMWF</i>	30
2.2	Il progetto ERA-40	32
2.2.1	<i>Le osservazioni satellitari</i>	33
2.2.2	<i>L'archivio dei dati</i>	34
2.2.3	<i>Generazione dei risultati di previsione</i>	35
2.3	Analisi statistica dei dati	36
2.3.1	<i>Total Column Water Vapor</i>	37
2.3.2	<i>Total Column Liquid Water</i>	42
2.3.3	<i>Total precipitation</i>	46
2.4	Correlazione statistica tra i dati	50
2.4.1	<i>Correlazione tra il dato di vapore ed il dato di liquido</i>	50
2.4.2	<i>Correlazione tra il dato di liquido ed il dato di precipitazione</i>	53
2.5	Studio dei dati in funzione di posizione e stagionalità	56
2.5.1	<i>Studio dei dati in funzione della posizione</i>	56
2.5.2	<i>Studio dei dati in funzione della stagionalità</i>	59
2.6.1	<i>Coefficienti delle leggi di proporzionalità</i>	62
Capitolo 3		70
Creazione del modello e validazione dei risultati		70
3.1	Il modello	71
3.1.1	<i>Normalizzazione della statistica del vapore acqueo</i>	72
3.1.2	<i>Generazione della matrice delle covarianze</i>	73
3.1.3	<i>Generazione della mappa di vapore</i>	76

3.1.4 Schema a blocchi riassuntivo per la generazione della mappa di vapore.....	80
3.1.5 Generazione della mappa di liquido sospeso e di pioggia.....	81
3.2 Validazione dei risultati	83
3.2.1 Mappe sintetiche di vapore acqueo.....	83
3.2.2 Mappe sintetiche di liquido sospeso.....	86
3.2.3 Mappe sintetiche di precipitazione.....	89
3.3 Mappe cumulative	93
3.4 Analisi delle mappe di liquido sospeso e precipitazione.....	96
3.4.1 Legge di proporzionalità tra vapore acqueo e liquido sospeso	96
3.5 Analisi della correlazione spaziale	100
Conclusioni.....	102
Indice delle Figure	106
Bibliografia.....	111

Introduzione

Nel moderno panorama delle telecomunicazioni, l'uso di frequenze di trasmissione sempre più alte, necessarie per usufruire di servizi multimediali e di tipo broadcasting via satellite, è divenuto di primaria importanza. Ciò è dovuto sia alla congestione nella trasmissione di dati alle basse frequenze oggi utilizzate, sia alla continua richiesta di maggiore larghezza di banda da parte dell'utente finale. L'evoluzione tecnologica si spingerà quindi verso l'uso della banda Ka (20-30GHz) ed in futuro della banda Q/V (40-75GHz).

Il design dei sistemi di comunicazione operanti a frequenze superiori a 20GHz deve necessariamente considerare tecniche per contrastare le elevate attenuazioni che il segnale satellitare subisce nell'attraversamento dell'atmosfera. Non è possibile far fronte a tale problema attraverso un approccio classico (margine fisso di potenza), perché ciò potrebbe portare ad un irrealistico sovradimensionamento dei terminali, degli apparati e/o delle antenne, sia di terra che di bordo. Al contrario diventa necessario l'uso di tecniche intelligenti atte a sfruttare la de-correlazione spaziale e temporale dell'attenuazione atmosferica, principalmente imputabile ai fenomeni meteorologici. I sistemi di telecomunicazione in questione dovranno dunque implementare tecniche di mitigazione dell'attenuazione (PIMTs - Propagation Impairment Mitigation Techniques) per offrire una qualità di servizio adeguata. Per progettare le PIMTs diventa quindi necessario conoscere a fondo le

caratteristiche dei processi atmosferici che sono responsabili della degradazione del segnale elettromagnetico.

Questo lavoro di Tesi si colloca nel contesto della modellistica del canale radio atmosferico e si concentra sul problema dello sviluppo di uno scenario meteorologico sintetico su scala continentale, attraverso la generazione di mappe sintetiche di vapore acqueo, liquido in sospensione (nubi) e precipitazioni a larga scala. A differenza dei modelli finora proposti, incentrati principalmente sullo studio e sulla rappresentazione delle precipitazioni, il modello qui presentato si pone l'obiettivo di generare congiuntamente mappe sintetiche di vapore acqueo, nubi e precipitazioni tra loro correlate. Ciò permetterà il non indifferente vantaggio di poter determinare con maggior precisione i livelli di attenuazione sull'area in esame e di derivare statistiche utili alla progettazione di sistemi che sfruttano la de-correlazione spaziale dell'attenuazione (ridistribuzione della potenza a bordo del satellite o sistemi in diversità di spazio) garantendo diversi vantaggi anche dal punto di vista della qualità del servizio. Quanto ci si pone l'obiettivo di sviluppare potrebbe portare vantaggi anche nelle pianificazioni di sistemi satellitare e nello studio di nuove PIMTs o nello sviluppo di quelle fino ad oggi oggetto di test. In questo contesto appare chiara l'importanza della disponibilità di previsioni meteorologiche attendibili, e per questo motivo, la valutazione e lo studio statistico della situazione meteorologica dell'area di interesse è uno dei primi passi di questo algoritmo.

Questo lavoro si concentra anche su questo aspetto e prevede la generazione dello scenario meteorologico sintetico, utilizzando i dati rilevati dalle mappe di previsione meteorologica, infatti le mappe sintetiche prodotte verranno poste a confronto diretto con i dati reali ricavati dal progetto ERA-40 del Centro Europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine (ECMWF) per determinare la bontà del modello sviluppato.

Il primo capitolo di questo lavoro di Tesi si occupa delle principali problematiche che si affrontano nello studio della propagazione di onde elettromagnetiche all'interno della troposfera, trattando anche in modo analitico il fenomeno dell'attenuazione troposferica nei casi di interesse per il modello che si

vuole creare. Successivamente si discutono gli scenari principali delle comunicazioni satellitari e le tecniche di mitigazione (PIMTs) oggi considerate per un loro possibile utilizzo in questi sistemi di nuova generazione. Nella parte finale del capitolo viene fatto un breve accenno alle caratteristiche principali di un possibile sistema di telecomunicazioni che sfrutta uno o più di un algoritmo di compensazione dell'attenuazione.

Nel secondo capitolo si ricavano tutte le stime e le statistiche di precipitazione, nubi e vapore necessarie per produrre un modello che sia il più possibile affine alla realtà analizzando le statistiche del primo e del secondo ordine dei dati ricavati dal progetto ERA-40 e si spiegano i passaggi eseguiti per produrre le leggi di proporzionalità utilizzate per la generazione delle mappe sintetiche di liquido e precipitazione.

Nel terzo capitolo di questo lavoro di Tesi sono descritti tutti i passaggi seguiti per generare le mappe sintetiche di vapore acqueo, liquido sospeso e precipitazione, ponendo l'accento sugli aspetti più critici e spiegando inoltre il perché delle scelte effettuate nella sviluppo del modello. Nella seconda parte del capitolo si analizzano i risultati evidenziando gli aspetti positivi e quelli negativi del modello, descrivendo i motivi che hanno portato ai risultati ottenuti nella generazione delle mappe sintetiche.

Sfruttando un'analisi più approfondita degli aspetti critici del modello oggetto di questo lavoro di Tesi, vengono inoltre spiegate le motivazioni che hanno spinto a suggerire nuovi approcci e possibili sviluppi futuri atti a migliorare le prestazioni del modello stesso.

Capitolo 1

Effetti atmosferici sulla propagazione elettromagnetica

La propagazione delle onde elettromagnetiche può essere fortemente influenzata da componenti atmosferici quali vapore acqueo, nubi, nebbia, pioggia e neve. Questa influenza, con diversi effetti, può avvenire a qualsiasi banda di frequenza superiore ai 10GHz circa.

In particolare, vapore acqueo, nubi e pioggia risultano predominanti in banda Ka (vedere Tabella 1.1) e fanno tutti parte del processo di formazione delle precipitazioni [1]. Il vapore acqueo sospeso nella colonna verticale della troposfera è il risultato dell'evaporazione dell'acqua di oceani, mari, corsi d'acqua dolce, vegetazione e anche del suolo. La troposfera è il primo strato dell'atmosfera che termina ad un'altezza di circa 8 km ai poli e 20 km all'equatore. Man mano che il vapore procede nel suo moto ascendente, si condensa a formare piccole gocce d'acqua di dimensioni dell'ordine dei μm . La condensazione avvenuta non è però sufficiente a produrre precipitazione, infatti, grazie alla presenza di liquido sospeso (particelle di pulviscolo e cristalli di ghiaccio che agiscono come "nuclei igroscopici" o "di condensazione" aventi dimensioni comprese tra $0.1\mu\text{m}$ e $4\mu\text{m}$), si ottiene la trasformazione dello stato delle particelle di vapore in gocce d'acqua. Fino a quando le gocce formate non precipitano sono ancora da considerarsi liquido sospeso. Infatti,

per precipitare, le gocce formate devono possedere una forza peso maggiore rispetto alla resistenza esercitata dal moto ascendente che ha portato alla formazione della nube stessa e che tende a mantenere le gocce in sospensione. Occorrono centinaia di milioni di gocce di nube per formare una goccia di pioggia del diametro compreso tra $200\mu m$ e qualche millimetro. Solo dopo il cosiddetto “processo di accrescimento” può avvenire la precipitazione.

Gli effetti più noti e rilevanti delle idrometeorie sulla propagazione delle onde radio sono:

- Attenuazione causata da assorbimento e diffusione del segnale incidente;
- Depolarizzazione.

Inoltre, le gocce più grandi (dell'ordine dei mm) producono anche effetti di perdita di coerenza spaziale e temporale del fronte d'onda, dovuta al moto rapido delle particelle e alle riflessioni multiple dei contributi di reirradiazione fra una goccia e l'altra.

Per fornire una contromisura all'attenuazione, l'obiettivo dei progettisti è quello di creare nuovi sistemi satellitari in grado di adattarsi in tempo reale alle variazioni temporali e spaziali dell'attenuazione stessa. Questi sistemi adattativi [2] devono essere in grado di mutare le proprie caratteristiche al variare della situazione meteorologica con l'obiettivo di minimizzare il numero di utenti non serviti nell'area d'interesse. Il modello studiato in questo lavoro di Tesi si pone l'obiettivo di generare le mappe sintetiche su scala continentale di vapore acqueo, liquido sospeso (nubi) e precipitazioni attraverso uno studio approfondito delle statistiche dei dati reali. Questo modello può trovare applicazione nel calcolo dell'attenuazione di segnale che affligge, ad esempio, la comunicazione satellitare in svariate situazioni quali:

- Trasmissione verso un singolo punto;
- Sistemi in diversità di spazio che sfruttano la de-correlazione spaziale tra due punti;
- Sistemi satellitari che sfruttano tecniche di riconfigurazione.

Per ottenere tale risultato, sono stati utilizzati i dati forniti dall'ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast). Tutto ciò è finalizzato a garantire una miglior stima della probabilità di fuori servizio sia all'utente di servizi broadcasting, sia all'utente di servizi dedicati (ad esempio Internet a larga banda via satellite).

In questo capitolo si descriverà la propagazione delle onde elettromagnetiche in presenza di precipitazioni, liquido sospeso e vapore acqueo. Successivamente si definirà l'attenuazione da pioggia, da nubi (gas atmosferici quali vapore acqueo e aria secca) e da nebbia. Infine si introdurrà qualche concetto base per un modello che riesca a considerare tutte e tre le componenti con la giusta correlazione spaziale che possano permettere di fare pianificazioni di sistema più specifiche e accurate di quelle che si potrebbero fare considerando la sola pioggia (soprattutto a frequenze dalla banda Ka in su). A titolo di riferimento la Tabella 1.1 [3] riporta lo standard di designazione IEEE della banda radio.

Banda	Frequenze
HF	3÷30 MHz
VHF	30÷300 MHz
UHF	300÷1000 MHz
L	1÷2 GHz
S	2÷4 GHz
C	4÷8 GHz
X	8÷12 GHz
Ku	12÷18 GHz
K	18÷26 GHz
Ka	26÷40 GHz
V	40÷75 GHz
W	75÷111 GHz

Tabella 1.1: Standard di designazione IEEE della banda radio.

1.1 La propagazione delle onde elettromagnetiche in presenza di precipitazione

In questa sezione verrà prima di tutto trattato il caso rappresentato dalla diffusione di una singola goccia d'acqua (idrometeora), successivamente si passerà all'effetto di diffusione dovuto ad una dispersione di particelle e alla conseguente attenuazione specifica. Per concludere questa breve trattazione sull'effetto prodotto dai componenti atmosferici sulle onde radio, si accennerà ad effetti quali la depolarizzazione da pioggia e le attenuazioni prodotte dalle molecole d'acqua nei suoi diversi stati (nubi o liquido sospeso, nebbia, vapore acqueo).

1.1.1 Diffusione dell'onda su una singola particella

Quando un'onda elettromagnetica incide su una particella isolata [4], accadono sostanzialmente due fenomeni:

- Diffusione;
- Dissipazione.

Il fenomeno di diffusione consiste nel fatto che una parte dell'energia dell'onda incidente viene indirizzata in molteplici direzioni. Il fenomeno di dissipazione consiste nell'assorbimento dell'energia incidente e nel suo rilascio sotto forma di calore (effetto Joule). Quanto detto evidenzia il fatto che, considerando l'energia incidente alla particella, avviene una perdita di energia in uscita dalla particella nella direzione di trasmissione.

A seguito di quanto detto, la particella può essere considerata elettromagneticamente come una minuscola antenna ricevente, caratterizzata da un'area equivalente C_{ext} , detta *sezione di estinzione*, definita come l'area efficace di una ipotetica antenna che, immersa in una certa densità di potenza incidente, capti una potenza pari a quella complessivamente sottratta all'onda. Chiamando P_{ass} la potenza tolta all'onda (diffusa e assorbita), e S_i la densità di potenza incidente sulla particella, si ottiene una relazione lineare tra questi tre elementi che permetta di

calcolare, una volta note le dimensioni fisiche della particella in questione, la potenza che la particella stessa è in grado di sottrarre all'onda incidente:

$$P_{ass} = C_{ext} \cdot S_i \quad (1.1)$$

Come detto, la potenza sottratta tiene conto dei due contributi di potenza tolta all'onda incidente; cioè quella diffusa e quella dissipata per effetto Joule. Per questo motivo la sezione di estinzione può essere suddivisa in due termini: C_{sc} (*sezione totale di diffusione*) e C_{abs} (*sezione di assorbimento*). Diventa possibile poter calcolare separatamente la potenza reirradiata e diffusa nello stesso modo in cui è stata calcolata la potenza sottratta all'onda:

$$P_{sc} = C_{sc} \cdot S_i \quad (1.2)$$

$$P_{abs} = C_{abs} \cdot S_i \quad (1.3)$$

Se, come detto, la potenza diffusa sommata alla potenza assorbita produce la potenza totale sottratta, vale la relazione:

$$C_{ext} = C_{sc} + C_{abs} \quad (1.4)$$

Il campo diffuso segue gli stessi concetti definiti per la potenza. Infatti il campo elettrico diffuso è legato al campo incidente dalla relazione:

$$\bar{E}_{sc} = \frac{e^{-j\beta_0 r}}{j\beta_0 r} \bar{S}(\theta, \phi, \psi) \bar{E}_{in} \quad (1.5)$$

Dove r rappresenta la distanza del punto di osservazione dalla particella che diffonde, β_0 rappresenta la costante di fase, mentre $\bar{S}(\theta, \phi, \psi)$ rappresenta la *matrice di scatter*, i cui coefficienti sono detti *ampiezze di diffusione* (dipendono dalla geometria della particella, dalla sua dimensione, dalle caratteristiche elettriche, dalla frequenza dell'onda incidente e dall'angolazione d'incidenza). Per via della variabilità dei valori assunti dalle ampiezze di diffusione, la polarizzazione dell'onda diffusa può essere diversa dalla polarizzazione dell'onda incidente. L'onda che viene diffusa dalla particella, trasporta anch'essa una certa quantità di potenza. A questo proposito si introduce un nuovo parametro: la *sezione di diffusione* σ_{sc} .

La sezione di diffusione definisce l'area efficace di un'ipotetica antenna immersa nella densità di potenza incidente che, captando una certa quantità di potenza, la reirradia isotropicamente fornendo, per chi osserva, una densità di potenza pari a quella diffusa. La definizione di σ_{sc} è quindi la seguente:

$$\sigma_{sc} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{4\pi^2 |E_{sc}|^2}{|E_m|^2} \quad (1.6)$$

Sostituendo a E_{sc} la relazione (1.5) si ottiene:

$$\sigma_{sc} = \frac{4\pi}{\beta_0^2} |S|^2 \quad (1.7)$$

1.1.2 Diffusione da una dispersione di particelle

Come è logico pensare, quando un'onda elettromagnetica viaggia nella troposfera con presenza di idrometeore, vapore acqueo, oppure liquido sospeso (nubi), non incontra una particella isolata, ma una dispersione di numerosissime particelle che possiedono dimensioni e orientazioni diverse. In generale, la popolazione delle particelle è descritta tramite la cosiddetta *distribuzione dei diametri* $N(D)dD$. Questa distribuzione è definita come il numero (N) di particelle di diametro D che sia compreso tra $N(D) - dD/2$ e $N(D) + dD/2$. Una delle distribuzioni più utilizzate per descrivere la quantità di particelle di pioggia esistenti in un metro cubo è stata calcolata sperimentalmente da Marshall e Palmer con il metodo della carta assorbente [4]. Questa densità di particelle è rappresentata con la seguente legge esponenziale:

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D} \quad (mm^{-1}m^{-3}) \quad (1.8)$$

D è espresso in mm , $N_0=8000$ e Λ viene espresso in funzione dell'intensità di precipitazione R ($mm \cdot h^{-1}$) con la relazione seguente:

$$\Lambda = 4.1R^{-0.21} \quad (1.9)$$

Più recentemente sono state proposte altre distribuzioni, come ad esempio, quella di tipo Gamma:

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} \quad (1.10)$$

1.1.3 Attenuazione da pioggia

Si consideri un'onda piana uniforme che si propaga in direzione z e che incide su uno strato di pioggia che abbia dimensioni $1 \times 1 \times dz$ come mostrato nella Figura 1.1. Si assuma inoltre che la pioggia sia composta da una dispersione di N particelle per metro cubo tutte uguali.

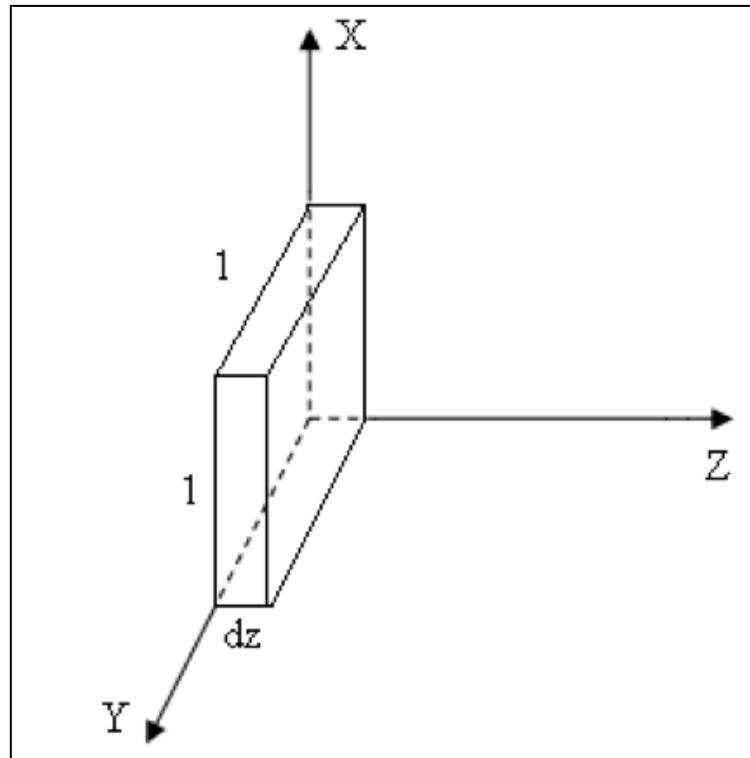


Figura 1.1: Volume elementare di pioggia avente dimensioni $1 \times 1 \times dz$.

Utilizzando i concetti espressi nei paragrafi precedenti è possibile calcolare la potenza sottratta all'onda per ogni metro quadro di superficie trasversa. Infatti si può esprimere la variazione della potenza dP (negativa) dell'onda incidente nel seguente modo:

$$dP = -NC_{ext} S dV = -NC_{ext} S dz \quad (1.11)$$

S rappresenta la densità di potenza incidente e si può affermare che, essendo l'area trasversa pari ad un metro quadrato, la variazione della potenza dP è pari alla variazione della densità di potenza dS (la densità di potenza S si esprime in $W \cdot m^{-2}$).

Quanto detto ci porta ad ottenere:

$$dS = -NC_{ext}Sdz \quad (1.12)$$

L'equazione (1.12) è un'equazione differenziale la cui soluzione è:

$$S(z) = S(0)e^{-NC_{ext}z} \quad (1.13)$$

Poiché la (1.13) fornisce la legge esponenziale negativa con la quale si estingue la densità di potenza al crescere della distanza e sapendo che in un generico mezzo dissipativo vale la relazione:

$$S(z) = S(0)e^{-2\alpha z} \quad (1.14)$$

si può affermare che l'attenuazione specifica α [$Np \cdot m^{-1}$] è pari a:

$$\alpha = \frac{1}{2}NC_{ext} \quad (Np \cdot m^{-1}) \quad (1.15)$$

La conversione in dB si ottiene ricordando che $1Np = 8,686dB$ e quindi si ha:

$$\alpha = 4340NC_{ext} \quad (dB \cdot km^{-1}) \quad (1.16)$$

L'approccio energetico appena mostrato non consente però di calcolare la costante di fase β che risulta necessaria per lo studio dei fenomeni di depolarizzazione.

1.1.4 Attenuazione dovuta a vapore acqueo e ossigeno

Come già specificato, la trattazione mostrata all'inizio del paragrafo precedente è valida se si considerano solo fenomeni precipitativi. Questo è dovuto al fatto che le gocce non hanno tutte le stesse dimensioni (le particelle di vapore acqueo e liquido sospeso in genere hanno dimensioni decisamente inferiori a quelle dei fenomeni di precipitazione) e per questo motivo, tenendo conto della distribuzione dei diametri, l'attenuazione diventa pari all'integrale mostrato nella formula (1.17).

$$\alpha = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} N(D) C_{ext}(D) dD \quad (Np \cdot m^{-1}) \quad (1.17)$$

Considerando quest'ultima espressione, diventa necessario studiare la C_{ext} , nota la geometria del diffusore, ed inoltre si deve classificare le particelle in funzione del loro diametro (bisogna valutare $N(D)$). Come mostrato dalle (1.8) e (1.10), si hanno due espressioni distinte per il calcolo del numero di particelle con diametro D all'interno di un metro cubo. La distribuzione di Marshall-Palmer (1.8) risulta ottima se si considerano basse frequenze, mentre tende a sovrastimare le dimensioni delle gocce ad alte frequenze. Quindi, per quanto riguarda il calcolo di $N(D)$ nel caso di vapore acqueo e nubi, che influenzano la propagazione a frequenze molto più alte di quanto non faccia la precipitazione, si ottengono prestazioni migliori utilizzando la distribuzione di tipo Gamma (la 1.10).

1.1.5 Attenuazione dovuta a nubi e nebbia

La raccomandazione ITU-R P.840-3 [6] fornisce uno studio approfondito sull'attenuazione dovuta a nubi e nebbia per frequenze superiori ai 10GHz.

Per nubi e nebbia (composte da piccole particelle generalmente di dimensioni inferiori a $0.01cm$), l'approssimazione di Rayleigh è valida per frequenze al di sotto dei 200GHz ed è possibile esprimere l'attenuazione in termini di liquido totale per unità di volume. In questo modo l'attenuazione specifica dovuta a nubi e nebbia può essere scritta nel modo mostrato dalla formula (1.18).

$$\gamma_c = k_l M \quad (dB \cdot km^{-1}) \quad (1.18)$$

Dove k_l rappresenta il coefficiente di attenuazione specifica espresso in $(dB \cdot km^{-1})/(g \cdot m^3)$ mentre M rappresenta la densità di liquido nella nube o nella nebbia.

La raccomandazione ITU-R P.838-3 mostra che l'attenuazione da pioggia in banda V è pari a circa $6dB/km$ e diminuisce man mano che si sale in frequenza, l'attenuazione dovuta a nebbia risulta non trascurabile per queste frequenze dove la

nebbia fitta produce un'attenuazione maggiore di 1.5dB/km man mano che si sale in frequenza. Infatti, la densità di liquido per la nebbia è circa pari a $0.05\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, per nebbia media (visibilità fino a 300m) e $0.5\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, per nebbia fitta (visibilità sotto i 50m). L'andamento del coefficiente di attenuazione k_l è mostrato in Figura 1.2.

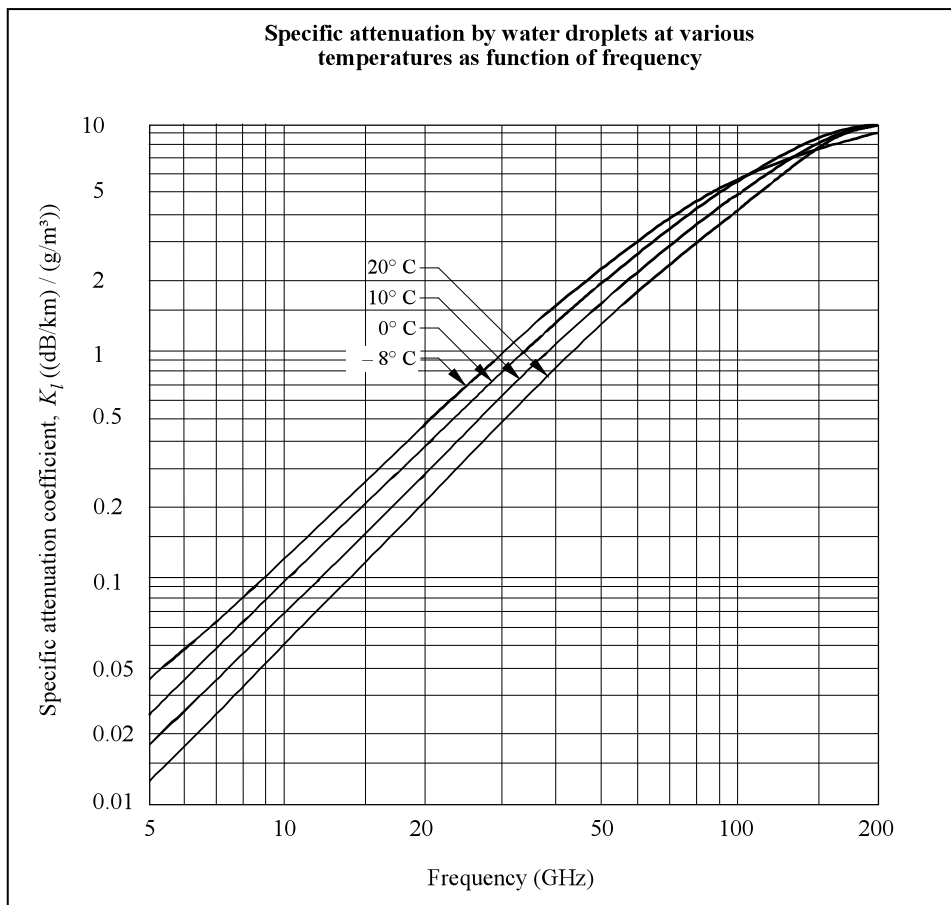


Figura 1.2: Andamento del coefficiente di attenuazione k_l in funzione della frequenza (Fonte ITU-R P.840-3).

La raccomandazione ITU-R P.676-6 [5] fornisce un'analisi approfondita dell'attenuazione dovuta a gas atmosferici quali vapore acqueo e ossigeno per frequenze che vanno da 1GHz a 350GHz a specifici livelli di pressione, temperatura e densità di vapore acqueo (si ricorda che la banda di frequenza considerata in questo lavoro è la Ka e superiore). Il risultato dell'attenuazione specifica per comunicazioni terrestri è mostrato in Figura 1.3, mentre quello relativo a collegamenti satellitari è mostrato in Figura 1.4 (puntamento zenitale).

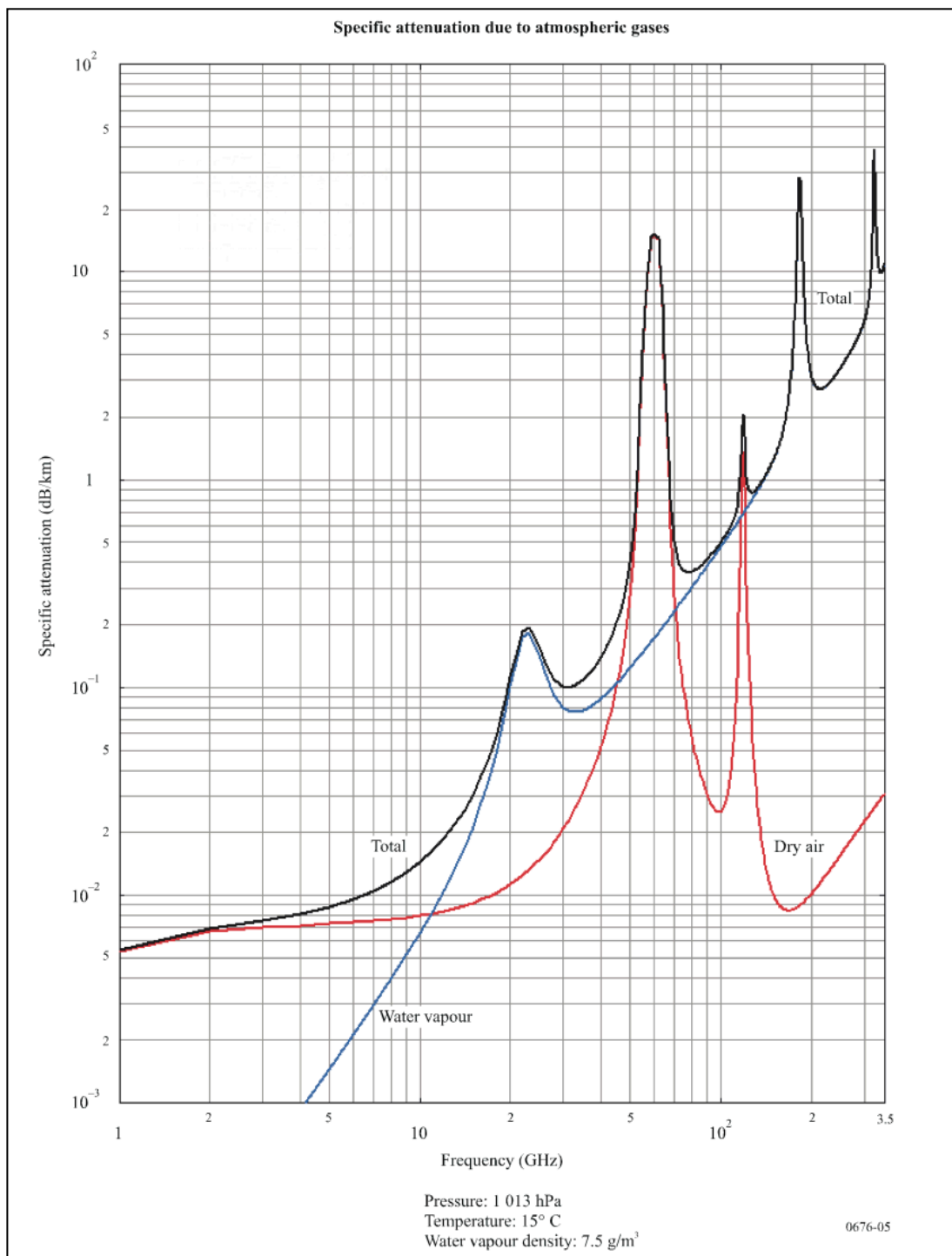


Figura 1.3: Attenuazione prodotta da vapore acqueo e ossigeno (indicato come dry air) per un collegamento terrestre (Fonte ITU-R P.676-6).

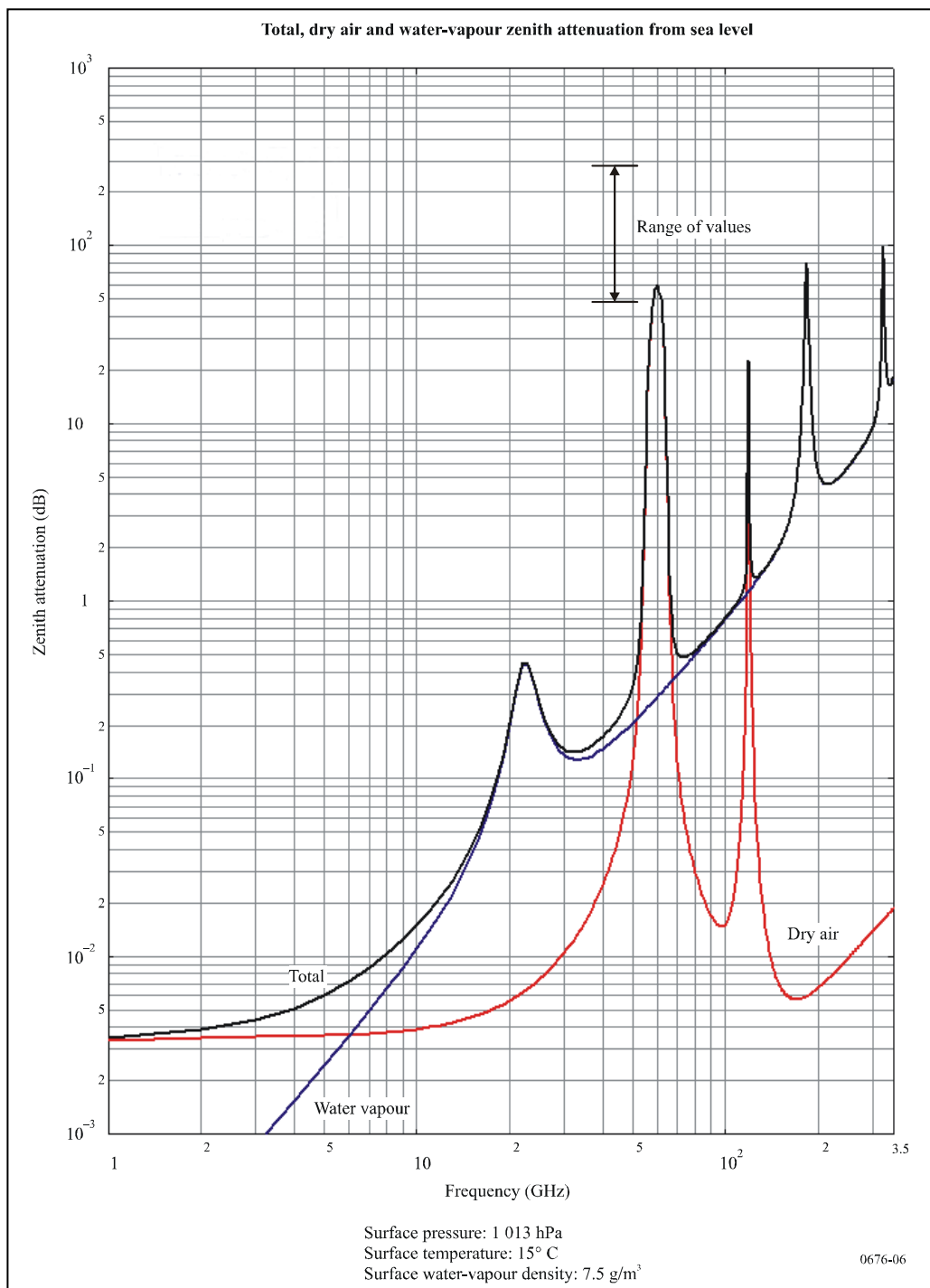


Figura 1.4: Attenuazione prodotta da vapore acqueo e ossigeno (indicato come dry air) per un collegamento satellitare (Fonte ITU-R P.840-3).

1.1.6 Altri effetti provocati da fenomeni meteorologici sulla propagazione elettromagnetica

La diffusione dell'energia in tutte le direzioni da parte delle idrometeore crea possibili condizioni di interferenza tra sistemi di comunicazione normalmente non accoppiati. L'accoppiamento non voluto è determinato da più cause. Oltre ad un studio di tipo pluviometrico, si deve considerare anche la geometria del sistema di trasmissione ed in particolar modo la funzione di direttività delle antenne e del loro puntamento.

La depolarizzazione avviene per via della non sfericità delle idrometeore che hanno una forma di sferoide oblato per via del loro moto di caduta libera durante il fenomeno precipitativo. La circolazione d'aria attorno alla goccia di pioggia e la resistenza offerta dall'aria stessa durante la precipitazione tendono a schiacciare la goccia sull'asse verticale. Questa deformazione dà luogo al passaggio di una parte dell'energia elettromagnetica associata all'onda incidente con una certa polarizzazione all'onda con polarizzazione incrociata. Questo passaggio di energia da una polarizzazione all'altra è un fenomeno di entità modesta (si è nell'ordine di $-15\text{dB} \div -20\text{dB}$) dal punto di vista prettamente energetico, ma diventa comunque deleterio se l'onda trasporta informazione anche nell'altra polarizzazione. In questo caso, la potenza trasferita da una polarizzazione all'altra risulta a tutti gli effetti un segnale di interferenza. Oltre che dalla ellitticità delle gocce, la depolarizzazione è determinata anche dal loro assetto rispetto ai piani di polarizzazione delle onde elettromagnetiche stesse. Un'onda incidente polarizzata linearmente, il cui campo elettrico giace sul primo o sul secondo piano principale di simmetria, non subisce depolarizzazione. Inoltre se il mezzo è isotropo (gocce sferiche) non si ha depolarizzazione comunque sia polarizzata l'onda incidente; se il mezzo è anisotropo (sferoidi oblato) non si ha depolarizzazione solo se il campo elettrico dell'onda incidente (polarizzata linearmente) giace in uno dei piani principali di simmetria.

1.2 Generalità degli scenari possibili

Questa sezione fornisce una panoramica dei possibili scenari che coinvolgono i moderni sistemi di comunicazione satellitare [7]. Si farà un breve accenno ai due rami principali di comunicazione satellitare quali BSS (Broadcasting Satellite Services) e IMMBS (Interactive MultiMedia Broadband Services) per poi individuare le tecniche migliori (PIMTs - Propagation Impairments Mitigation Techniques) atte a contrastare le attenuazioni prodotte nella trasmissione satellitare in entrambe le tipologie di scenario.

1.2.1 Broadcasting Satellite Services (BSS)

Lo scenario dell'applicazione BSS prevede contenuti digitali di tipo broadcasting. Il sistema, come nella già esistente banda Ku per le comunicazioni satellitari, si basa su canali multiplati dal satellite per il DVB-S2. Il DVB-S2 (Digital Video Broadcasting - Satellite Second generation) [8] è un sistema basato sul DVB-S che lo precede e prevede la trasmissione di uno o più flussi audio/video digitale della famiglia MPEG-2, utilizzando un sistema di modulazione QPSK o MAPSK, con codifica concatenata. Le principali novità introdotte, rispetto agli standard esistenti, risiedono nella capacità di variare i parametri di codifica e di modulazione (VCM, Variable Coding and Modulation) ad ogni trama, e nella possibilità di rendere adattativo il cambiamento di tali parametri (ACM, Adaptive Coding and Modulation), sulla base delle informazioni raccolte dal canale di ritorno di ogni singolo utente.

La configurazione tipica consiste in un limitato numero di collegamenti per i canali multiplati del DVB-S2 che servono un elevato numero di ricevitori per il collegamento con gli utenti. Una interattività limitata quale la selezione della lingua, pagamenti per servizi VoD (Video on Demand), raccolta di dati per indici di ascolto e sondaggi di opinione pubblica, può essere fornita attraverso canali di ritorno a basso rate supportati da infrastrutture terrestri.

Il collegamento per gli utenti può essere servito da un singolo fascio continentale, come nell'attuale sistema basato su banda Ku, oppure da un fascio per

ogni nazione con un ingombro che si estende all'interno di ognuna di esse. Quale delle due soluzioni preferire è ancora oggi oggetto di discussione.

La copertura a singolo fascio continentale risulta avere una più facile implementazione e le informazioni linguistiche possono essere convogliate grazie alla possibilità, prevista dallo standard DVB-S2, di selezionare lo stream audio preferito associato al canale video. Il singolo fascio continentale è ottimo anche per via dei due aspetti seguenti:

- Il fornitore del servizio (ad esempio il broadcaster), che vuole ottenere il più elevato livello di audience, non deve necessariamente limitare i suoi confini nazionali;
- L'utente può ricevere i suoi programmi nazionali anche quando sta viaggiando o mentre vive all'estero.

La copertura del territorio attraverso multipli fasci linguistici ha il vantaggio in termini di efficienza di banda grazie alla possibilità intrinseca di fare riuso di frequenza. Vale la pena far notare che i fasci linguistici erano già stati proposti negli anni '80, ma non ebbero un grosso successo.

1.2.2 Interactive Multimedia Broadband Services (IMMBS)

Lo scenario dell'applicazione IMMBS prevede di creare collegamenti broadband interattivi tra un numero limitato di stazioni gateway, connesse alla rete terrestre principale e ad un elevato numero di terminali.

Oggi l'interattività, la multimedialità e la banda larga sono indissolubilmente legate alla fornitura di servizi internet: nelle comunicazioni satellitari, la tendenza attuale è rappresentata dall'utilizzo dello standard DVB-S2 come contenitore IP attraverso incapsulamento. Nel collegamento inverso invece verrà adottato lo standard DVB-RCS (servizi interattivi con accesso ad Internet per le applicazioni d'utente).

In questo scenario applicativo, la quasi totalità dei capitali investiti nel segmento terrestre è naturalmente dominata dai terminali degli utenti. Considerando quanto detto, nel terminale dell'utente i costi totali sono imputabili fino all'85% al

trasmettitore, il design deve necessariamente privilegiare un elevato guadagno per compensare il basso EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) che ha di solito l'antenna ricevente dell'utente.

1.2.3 Identificazione delle PIMTs

Come detto, le PIMTs (Propagation Impairments Mitigation Techniques) sono tecniche di compensazione che l'onda subisce nella sua propagazione in atmosfera. Questo lavoro di tesi si pone l'obiettivo di fornire un modello in grado di generare uno scenario realistico della situazione meteorologica per permettere la pianificazione del sistema ed, eventualmente, la valutazione delle prestazioni di varie tecniche di mitigazione. Le PIMTs oggi applicate ed oggetto di test sono di seguito elencate.

- *Site Diversity*

Consiste nel utilizzare due o più stazioni riceventi (o trasmettenti), per sfruttare la decorrelazione spaziale delle componenti atmosferiche. In questo modo, è possibile selezionare il miglior segnale fra quelli disponibili in ogni istante, in modo da ridurre al minimo i periodi di fuori servizio del sistema.

- *Uplink Power Control*

Consiste nel controllo della potenza sul canale in salita verso il satellite. Ogni qual volta il livello di potenza si abbassa viene regolato al valore necessario secondo specifica di sistema.

- *On-board Reconfigurable Antenna Pattern*

Antenna in grado di riconfigurare il proprio diagramma di radiazione per inseguire in tempo reale le variazioni meteorologiche e fornire maggior potenza nelle zone più attenuate, sottraendola alle zone meno attenuate, dato il fatto che la potenza disponibile a bordo è limitata.

- *Adaptive Coding Modulation*

Sistema capace di variare i parametri di codifica e modulazione (VCM - Variable Coding Modulation) e di rendere adattativa questa variazione sulla base delle

informazioni di ritorno in arrivo dal canale di trasmissione. Le informazioni ricavate permettono di capire lo stato del canale, il livello di attenuazione, di interferenza, etc.

- *Data rate adaptation*

Capacità di adattare il rate di trasmissione (aumentare o diminuire la quantità di bit per secondo trasmessi) in funzione delle condizioni rilevate per il canale trasmissivo.

1.2.4 Applicabilità delle PIMTs

In questa sezione si mostreranno attraverso tabelle riassuntive i casi in cui le PIMTs descritte sono o non sono applicabili ai due scenari descritti nelle sezioni 1.2.1 e 1.2.2. La tabella seguente si riferisce alle PIMTs applicabili per lo scenario dell'applicazione BSS.

PIMT	Applicabile	Note
Site Diversity	SI	Può effettivamente mitigare l'attenuazione in uplink ed incrementare la disponibilità del collegamento
Uplink Power Control	SI	Non necessario se a bordo si ha il controllo automatico di guadagno AGC
Reconfigurabile Antenna Pattern	SI	Unica PIMTs in grado di mitigare l'attenuazione in downlink
ACM	NO	Se il provider di servizi richiede un rate costante non è applicabile
Data rate adaptation	NO	Non è applicabile se la larghezza di banda è fissa e il rate è costante

Tabella 1.2: Applicabilità delle PIMTs nello scenario BSS.

Le tabelle seguenti mostrano l'applicabilità delle PIMTs nello scenario IMMBS per i collegamenti gateway - terminale utente e viceversa.

PIMT	Applicabile	Note
Site Diversity	NO	Può effettivamente mitigare l'attenuazione in uplink ed incrementare la disponibilità del collegamento
Uplink Power Control	SI	Non necessario se a bordo si ha il controllo automatico di guadagno AGC
Reconfigurabile Antenna Pattern	SI	In grado di mitigare l'attenuazione in downlink
ACM	SI	Può effettivamente incrementare la disponibilità e la capacità del collegamento
Data rate adaptation	NO	Non è applicabile se la larghezza di banda è fissa e il rate è costante

Tabella 1.3: Applicabilità delle PIMTs nello scenario IMMBS per il collegamento gateway - terminale utente.

PIMT	Applicabile	Note
Site Diversity	SI	Può effettivamente mitigare l'attenuazione in uplink ed incrementare la disponibilità del collegamento
Uplink Power Control	SI	Non necessario se a bordo si ha il controllo automatico di guadagno AGC
Reconfigurabile Antenna Pattern	SI	In grado di mitigare l'attenuazione in downlink
ACM	SI	Può effettivamente incrementare la disponibilità e la capacità del collegamento
Data rate adaptation	SI	Non è applicabile se la larghezza di banda è fissa e il rate è costante

Tabella 1.4: Applicabilità delle PIMTs nello scenario IMMBS per il collegamento terminale utente - gateway.

1.3 Modello utilizzato dal sistema satellitare sperimentale

Nel prossimo futuro si prevede di installare un sistema d'antenna a bordo di un satellite geostazionario, che si trova nello spazio su un'orbita circolare attorno all'equatore, ad una distanza dalla superficie terrestre di 35800km circa, detta *orbita geostazionaria*. Con un'orbita di questo tipo, il satellite viene visto dalla stazione ricevente sempre nello stesso punto dello spazio per tutta la durata della sua rivoluzione; se fosse su una qualsiasi altra orbita, esso, per un osservatore posto a terra, sorgerebbe e tramonterebbe, ciò indurrebbe necessariamente ad impiegare sistemi d'antenna in grado di inseguirne la posizione.

Il classico approccio dei sistemi di telecomunicazione satellitare è quello di assegnare un margine fisso di potenza a bordo che possa garantire un dato livello di disponibilità del collegamento su tutta l'area che si vuole servire [2]. Quando questo approccio è applicato ad un sistema satellitare operante in banda Ka, esso conduce alla progettazione di un sistema d'antenna front-end non realistico e ad un livello di potenza richiesto a bordo molto elevato per fare in modo che sia in grado di mitigare le attenuazioni che si ottengono nella trasmissione satellitare. Inoltre, per via del fatto che i fenomeni meteorologici (in particolare la pioggia) sono localizzati nello spazio e nel tempo e considerando che il sistema radio satellitare copre una larga area, molta della potenza trasmessa risulta essere in eccesso.

L'approccio di tipo adattativo, basato su un sistema di antenna front-end riconfigurabile, riesce invece ad allocare la potenza a sua disposizione solamente dove essa è richiesta grazie alla sua abilità nel disporla nello spazio e nel tempo in accordo con le attuali condizioni di propagazione rilevate. Questo approccio può risultare di efficienza rilevante per la gestione delle risorse a bordo del satellite. L'incremento della complessità e del costo della quantità di dati da trasmettere può essere alleviata grazie alla disponibilità di tecnologie quali *Multi-Port Amplifier* (amplificatori multiporta - MPA) e *Flexible Traveling-Wave.Tubes* (guide d'onda flessibili - FTWT), e dall'utilizzo di antenne riconfigurabili in grado di fornire servizi satellitari flessibili.

Il sistema satellitare descritto è applicato a trasmissioni di tipo broadcasting e broadband. Per il sistema di tipo broadcasting tutti gli spot dell'antenna a multi-fascio sono alimentati con lo stesso segnale e creano un unico fascio in grado di deformarsi a seconda delle esigenze propagative, mentre nel sistema di tipo broadband i fasci sono alimentati da segnali differenti ed il controllo attivo d'antenna fornisce una potenza variabile, partizionandola in modo coerente ad ogni singolo fascio/cluster. Gli ingressi del sistema sono rappresentati dalle analisi meteorologiche e le previsioni dell'evoluzione temporale e spaziale dei campi di pioggia prodotti dalle immagini satellitari fornite da ECMWF e da Meteosat Second Generation (MSG) e ridistribuite da EUMETSAT su griglie regolari in latitudine e longitudine.

1.4 Ipotesi di modello

Questo lavoro di Tesi si pone l'obiettivo di mettere le basi per la generazione di un modello meteorologico complesso che possa essere usato per eseguire pianificazioni di sistema ancora più accurate di quelle finora studiate e che considerano solo i fenomeni di tipo precipitativo, attraverso la generazione congiunta di mappe sintetiche a larga scala di vapore acqueo, liquido sospeso e precipitazioni. Le pianificazioni di sistema in questione permetteranno quindi di migliorare l'efficienza e la qualità dei sistemi di telecomunicazione satellitare.

Il modello in questione può essere descritto dai seguenti punti:

1. Sfruttando i dati reperiti dal sito dell' ECMWF (Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine) se ne ricavano le caratteristiche principali quali statistiche del primo ordine e correlazione spaziale;
2. Si svincola dai dati dell'ECMWF e genera in modo congiunto mappe sintetiche su scala continentale di vapore acqueo, liquido sospeso e precipitazioni;
3. Effettua simulazione di campi di pioggia, nubi e vapore acqueo;
4. Permette di derivare le relative statistiche di attenuazione utili per la simulazione e la valutazione delle PIMTs che sfruttano la de-correlazione spaziale dei componenti atmosferici quali, ad esempio, sistemi di site diversity e di antenna riconfigurabile.

Un possibile sviluppo del modello, che è ancora alle fasi iniziali della sua evoluzione, potrà considerare risoluzioni spaziali e temporali molto più fitte rispetto a quelle ricavate dai dati di ECMWF che possiedono una risoluzione spaziale e temporale limitata.

Capitolo 2

I dati meteorologici

Lo scopo di questo lavoro consiste nella generazione di un modello che sia in grado di sintetizzare, su tutto il territorio europeo, mappe meteorologiche di precipitazione, nubi e vapore acqueo in modo da riprodurre correttamente su scala continentale la distribuzione spaziale di ogni singola componente e da preservare la correlazione fra le tre componenti. Per ricavare le statistiche utilizzate nella creazione del modello sono stati utilizzati i dati del Centro Europeo per le Previsioni meteorologiche a media scala (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), in particolare i dati del progetto ERA-40. Nei paragrafi seguenti si forniranno alcuni cenni su ECMWF e su ERA-40 per poi analizzare le statistiche dei dati utilizzati per la creazione del modello.

2.1 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)

Il Centro Europeo per le Previsioni meteorologiche a media scala (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), la cui sede si trova a Reading in Inghilterra, è un'organizzazione indipendente intergovernativa supportata da 31 Stati membri [9]. Sono stati conclusi anche accordi di cooperazione con diverse organizzazioni, tra le quali ci sono il World Meteorological Organisation

(WMO), l'European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), l'African Centre o Meteorological Applications for Developmente (ACMAD) e, tra le altre, anche L'ESA (European Space Agency). Le prime previsioni a medio termine in tempo reale sono state fornite nel Giugno del '79 dal progetto COST (European Co-operation in Science and Technology) che ha prodotto previsioni fino al primo di Agosto dello stesso anno.

Gli obiettivi del centro sono i seguenti:

- Sviluppo di metodi numerici per la previsione meteorologica a medio termine;
- Preparazione di previsioni del tempo a medio termine per la distribuzione di servizi meteorologici agli Stati membri;
- Ricerche tecniche e scientifiche atte a migliorare le previsioni;
- Collezionare ed immagazzinare appropriati dati meteorologici.

In aggiunta, l'ECMWF:

- mette a disposizione una parte delle sue facilities di calcolo agli stati membri per le loro ricerche;
- assiste l'WMO nell'implementazione dei suoi programmi;
- fornisce corsi avanzati nel campo della previsione meteorologica numerica a staff scientifici degli stati membri;
- mette a disposizione i suoi vasti archivi di dati ad organizzazioni esterne.

Una nave lascia Tokyo per navigare fino a San Francisco. Il suo viaggio durerà circa dieci giorni. Quale rotta dovrebbe seguire per completare il viaggio nel minor tempo possibile, utilizzando meno carburante possibile, evitando forti venti contrari e mare mosso che potrebbero danneggiare il carico?

Per rispondere a queste domande è necessario produrre previsioni meteorologiche (*NWP*, Numerical Weather Prediction) con un buon anticipo e ciò richiede l'utilizzo di modelli numerici tra i più sofisticati [10], un database di osservazioni meteorologiche che sia il più completo possibile e computer tra i più potenti. Riconoscendo i benefici economici e sociali derivati da previsioni a medio termine più accurate, gli stati europei si sono accordati per combinare le loro risorse tecniche e scientifiche e per questo motivo nasce l'ECMWF. L'ECMWF fornisce i

suoi prodotti numerici agli uffici meteorologici degli Stati membri tramite reti di comunicazione dedicate. Gli Stati membri usano questi prodotti per generare le previsioni a medio termine per gli utenti finali.

2.1.1 Il modello atmosferico globale dell'ECMWF

Il modello atmosferico globale dell'ECMWF [11] produce previsioni meteorologiche numeriche (*NWP*, Numerical Weather Prediction) sulla base delle osservazioni meteorologiche a disposizione. Nelle zone in cui la quantità delle osservazioni disponibili è inferiore a quella necessaria per avere un determinato grado di accuratezza, i dati vengono ricavati da osservazioni satellitari: temperatura, umidità e radianza delle nuvole si ottengono tramite i satelliti *NOAA* (National Oceanic and Atmospheric Administration, ente civile statunitense per la meteorologia e l'oceanografia), la direzione del vento, invece, viene ricavata dai dati dei satelliti geostazionari.

Il modello ECMWF, in quanto *NWP*, tratta l'atmosfera come un fluido vasto e turbolento caratterizzato da sorgenti e pozzi di energia; la teoria che sostiene questi modelli fu formulata per la prima volta da Bjerknes nel 1904 [11] ed è basata sui seguenti elementi:

- I principi fisici di conservazione di momento, massa ed energia, applicati alle equazioni di moto di Navier-Stokes ed alle particelle dell'aria.
- Le leggi della termodinamica.
- L'equazione di stato.

A partire da una specifica condizione iniziale, il problema consiste nella risoluzione di un sistema di equazioni differenziali non lineari in 3 dimensioni spaziali con il tempo che funge da quarta variabile indipendente.

Il primo modello numerico ECMWF era costituito da una griglia di punti, dotata di livelli verticali fino a 10 hPa; la risoluzione orizzontale era 1.875 gradi in latitudine ed in longitudine. Nell'aprile del 1983 il modello a griglia di punti fu sostituito da una rappresentazione spettrale con troncamento triangolare al numero d'onda 63 (T63): la tecnica spettrale era più accurata rispetto alla tecnica impiegata

in precedenza a pari costo computazionale. Grazie alle alte risoluzioni ottenibili attualmente, la differenza in termini di accuratezza tra le due tecniche si è ridotta in modo drastico; inoltre, la tecnica semi-lagrangiana rimuove una causa di diversità tra i due approcci. Nel maggio 1985 il numero di livelli verticali fu aumentato a 16 ed il troncamento spettrale fu esteso al numero d'onda 106 (T106). Il numero di livelli fu aumentato a 19 nel 1986.

Nel settembre 1991 divenne operativo un modello spettrale ad alta risoluzione, in cui il troncamento spettrale fu esteso al numero d'onda 213 (T213) ed il numero di livelli incrementato a 31. Il modello faceva uso di una griglia con risoluzione di circa 60 km. Nel 1998 la risoluzione fu aumentata arrivando a contemplare il numero d'onda 319 (T319) e l'anno seguente il numero di livelli fu portato a 50. Successivamente, nel 1999, la risoluzione la risoluzione verticale fu ulteriormente aumentata, fornendo un totale di 60 livelli.

Fino al 1995 il modello non teneva conto in maniera esplicita delle nuvole, ma faceva riferimento ad altri campi, come umidità relativa, precipitazioni e gradiente verticale di temperatura. Nell'aprile 1995 fu introdotto un nuovo schema in cui le nuvole comparivano come parametri prognostici, definiti tramite la copertura nuvolosa, il contenuto di acqua allo stato liquido e di ghiaccio. L'ozono fu aggiunto, in termini di variabile predetta, nel 1999.

Fino al 1996 il sistema di analisi era basato su un meccanismo di interpolazione ed ottimizzazione; in tale anno esso fu sostituito da un sistema variazionale tridimensionale, *3DVAR*, che venne sviluppato e, nel 1997, divenne quadridimensionale, *4DVAR*.

2.2 Il progetto ERA-40

I dati del forniti dal progetto ERA-40 sono dati di previsioni meteo di una certa porzione della giornata, rianalizzate e migliorate in base alle osservazioni meteo del medesimo slot temporale. In altre parole, si parte da una previsione meteo 6 ore avanti, la si confronta con l'effettiva situazione meteo riscontrata 6 ore dopo e la si migliora (ad esempio rimuovendo eventuali bias), rianalizzando il dato di previsione.

La produzione e la prima fase di convalida del progetto ERA-40 è stata finanziata per un periodo di 3 anni dal primo aprile del 2000 dall'Unione Europea all'interno del programma energetico, dell'ambiente e dello sviluppo sostenibile [10].

La politica di archiviazione di ERA-40 prende come riferimento la tipologia di archiviazione adottata da ECMWF, la quale è evoluta per più di 20 anni per immagazzinare analisi operative e previsioni per un loro successivo utilizzo da parte degli stati membri [13]. Questa politica è stata poi rivista nel tempo dal comitato tecnico e scientifico dell'ECMWF, più recentemente nel 1999 e nel 2000. L'archivio di ERA-40 si è basato inoltre sull'esperienza acquisita nell'archiviazione del progetto ERA-15 che lo ha preceduto.

Nello sviluppare un piano di archiviazione bisogna tenere in considerazione sia i costi di generazione e i vincoli sui volumi di archivio, sia la loro capacità di recupero, infatti l'hardware ed i volumi di archivio disponibili per la gestione dei dati nell'ECMWF pone un limite massimo sulla dimensione dei dati che possono essere salvati.

Come per la preparazione del sistema di assimilazione dei dati per ERA-40, è stato rivisto anche il piano di archivio dai membri dello "Steering and External Advisory Groups", ed il piano è stato presentato alla comunità degli utenti. Esso prevede una serie di aggiunte a ciò che è stato collezionato fino ad ora dalla assimilazione dei dati operativi e delle previsioni e a ciò che è stato collezionato da ERA-15. Ciò include sia nuovi prodotti all'interno dei flussi convenzionali dei dati di output e un numero di nuovi flussi di prodotti proposti dai membri dello Steering Group, che rappresentano particolari classi di utenti. I nuovi flussi comprendono:

- Campi a superfici isoentropiche (superficie a temperatura potenziale costante) e a $PV=2$ (PV - Potential Vorticity Surfaces, Superfici di Vorticità Potenziale);
- Campi di radiazione da cielo limpido;
- Integrali verticali per l'energia, per la massa, per l'acqua e per le previsioni sull'ozono;
- Campi addizionali derivati durante previsioni a breve termine per il supporto di modelli di trasporto chimico e altri studi di traiettoria.

Inoltre, sono stati prodotti dettagliate griglie di punti per la misurazione di campo di siti e di bacini idrografici.

Sotto la richiesta dell'Amministrazione Marittima dell'Islanda durante la cooperazione con ECMWF sono stati inclusi prodotti quali le onde oceaniche e successivamente aggiunti prodotti inerenti agli integrali verticali dei flussi di vapore acqueo in vista della sempre più diffusa necessità di utilizzare anche questo dato da parte degli utenti nei primi periodi del "re-analyses". Le serie temporali, altri nuovi flussi e flussi di dati di griglia a risoluzione di 2.5° sia per la latitudine che per la longitudine dovrebbero contribuire a ridurre la quantità dei dati necessari a soddisfare le richieste di molti utenti. Ciò potrebbe dare beneficio producendo tempi di scaricamento dei dati molto più brevi tramite un accesso diretto ai sistemi di computer dell'ECMWF.

2.2.1 Le osservazioni satellitari

Il primo progetto di re-analysis di ECMWF (ERA-15) ha coperto il periodo che va dal 1979 al 1993, durante il quale il sistema di osservazione è stato relativamente omogeneo [14]. Nel progetto ERA-15 c'erano due sorgenti di dati satellitari, i dati dei satelliti TOVS, satelliti che equipaggiano un rilevatore di radiazioni infrarosse ad alta risoluzione (HIRS), un'unità di rilevazione a microonde (MSU) e un'unità di rilevazione stratosferica (SSU) [15], definivano il CCR (Cloud Cleared Radiances), mentre i dati dei satelliti geostazionari definivano il CMW (Cloud Motion Winds). Nel progetto ERA-40 sono stati utilizzati i dati di questi due satelliti per il periodo di ERA-15 e, in modo più completo, allungando il periodo (dal

1979 al 1998) grazie all'ottenimento di nuovi dati dai TOVS del NCAR (National Center of Atmospheric Research), della NASA e dell'LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique). I dati TOVS e ATOVS dal 1998 ad oggi sono stati presi dagli archivi dell'ECMWF. I dati VTPR (Vertical Temperature Profiler Radiometer) tra il 1972 e il 1979 sono stati usati per la prima volta assimilandoli a dati di radianza.

2.2.2 L'archivio dei dati

L'obiettivo primario di ERA-40 era [16]:

1. Produrre e promuovere l'uso di un set di analisi globali che descrivano lo stato dell'atmosfera, del terreno e delle condizioni dell'oceano durante il periodo di 45 anni che va da settembre del 1957 ad agosto del 2002;
2. Favorire la ricerca europea ed internazionale producendo osservazioni, analisi e studi disponibili per tutti.

Un elemento essenziale per permettere questo è la realizzazione di un archivio di dati. Ciò è necessario sia per sostenere la rianalisi stessa, sia per supportare il conseguente utilizzo delle osservazioni, le analisi e le informazioni diagnostiche prodotte dal processo di analisi stesso. L'archivio è progettato per:

- Preservare tutti i dati primari;
- Rispondere alle esigenze del sistema produttivo delle rianalisi;
- Rispondere alle esigenze degli utenti: coloro che hanno accesso diretto all'intero archivio e coloro che sono supportati dal servizio dati dell'ECMWF;
- Per coloro i quali vi accedono per ridurre la risoluzione dei dati.

I dati supportati comprendono le osservazioni, l'analisi e la previsione di campi dai modelli assimilati ad alta risoluzione valutati a livelli standard di pressione, le analisi e le previsioni di campi attraverso le onde oceaniche sulla griglia $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ di latitudine/longitudine, le medie mensili, le varianze e le covarianze. Il modello atmosferico usato da ERA-40 è conosciuto come IFS CY23r4 e maggiori dettagli, possono essere reperiti all'indirizzo web <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY23r4/index.html>.

La risoluzione di ERA-40 è la seguente:

- 60 livelli verticali;
- Rappresentazione ad armoniche sferiche T159 per la rappresentazione dinamica base dei campi;
- Una griglia ridotta Gaussiana con spaziatura approssimativamente pari a 125km per la superficie. Tutte queste informazioni possono essere trovate e consultate all'indirizzo <http://data.ecmwf.int/data>. Tutti i dati sono inoltre interpolati dai valori archiviati sul modello della griglia Gaussiana oppure valutati dalla rappresentazione ad armoniche sferiche T159.

2.2.3 Generazione dei risultati di previsione

La suite di assimilazione dei dati e di previsione di ERA-40 produce:

- 4 analisi al giorno alle ore 00, 06, 12 e 18 UTC;
- 2 previsioni al giorno con un anticipo di 6 ore, alle 06 e alle 18 UTC;
- 2 previsioni al giorno con anticipo di 36 ore alle 00 e alle 12 UTC.

Inoltre, le previsioni vengono mandate in esecuzione con anticipo di 10 giorni alle 00 e alle 12 UTC.

Le analisi e i dati di previsione a breve termine vengono interamente archiviate. I dati di previsione vengono archiviati con passo di 3 e 6 ore rispettivamente alle 09, 12, 15, 18, 21, 24 UTC e alle 00, 06, 12, 18 UTC. I dati di previsione resi pubblici sono solo quelli con passo di 6 ore. La griglia del modello T159 con la quale vengono fatte le previsioni e le rianalisi è, come già detto, Gaussiana e simmetrica intorno all'equatore, con una separazione nord-sud praticamente uniforme in latitudine con spaziatura di circa 1.121° . I dati che fruibili gratuitamente dal web ed utilizzati in questo lavoro, sono a risoluzione $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ con griglia regolare.

2.3 Analisi statistica dei dati

Per produrre il modello oggetto di questo lavoro di tesi, si è eseguita un'analisi statistica approfondita dei dati ricavati dal progetto ERA-40. I dati presi in considerazione sono i parametri di superficie a livello singolo. Essi sono salvati sul modello a griglia Gaussiana e sono frutto di analisi o di previsione. I parametri scaricati dal sito dell'ECMWF sono i seguenti:

- Total column water [$kg \cdot m^{-2}$];
- Total column water vapor [$kg \cdot m^{-2}$];
- Total precipitation (accumulata) [m d'acqua];
- Convective precipitation (accumulata) [m d'acqua].

Con l'asserzione "accumulata" si intende il totale della pioggia caduta al suolo durante il periodo di integrazione (nel caso specifico 6 ore) [16].

Tutti i dati scaricati dal sito del progetto ERA-40 si riferiscono al periodo che va dal 1996 al 2001 e coprono tutta l'area europea con le seguenti coordinate: $35^\circ \div 75^\circ$ Nord, -27.5° Ovest $\div 45^\circ$ Est. Come già descritto, la risoluzione spaziale è pari a $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ e la risoluzione temporale è di 6 ore, in questo modo si ottengono 4 mappe al giorno di dimensioni pari a 18×30 pixel, per un totale di 540 pixel per mappa, i quali hanno dimensione di circa 208×208 km producendo un'area totale pari a circa $23.4 \cdot 10^6$ km² (mostrata in Figura 2.2). Dai dati menzionati sono stati ricavati altri due parametri quali:

- Total column liquid water [$kg \cdot m^{-2}$];
- Stratiform precipitation [m d'acqua].

Il primo dato è stato ricavato dalla sottrazione tra Total column water e Total column water vapor. In altre parole si è sottratta la quantità di vapore acqueo alla quantità di acqua entrambe sospese nell'intera colonna verticale della troposfera. In questo modo si è ottenuta la quantità di liquido precipitabile (Total column liquid water). Il secondo dato si è invece ottenuto sottraendo al dato Total precipitation il dato Convective precipitation.

In linea generale, per il modello oggetto di questo lavoro di tesi, si vogliono sfruttare i dati di Total column water vapor e i dati ricavati di Total column liquid water e Total precipitation (considerate in questo lavoro come le precipitazioni totali cumulate sull'intero continente). Nelle sezioni seguenti viene presentata l'analisi statistica di tali dati, necessaria per lo sviluppo di un modello che punta a riprodurre le caratteristiche principali.

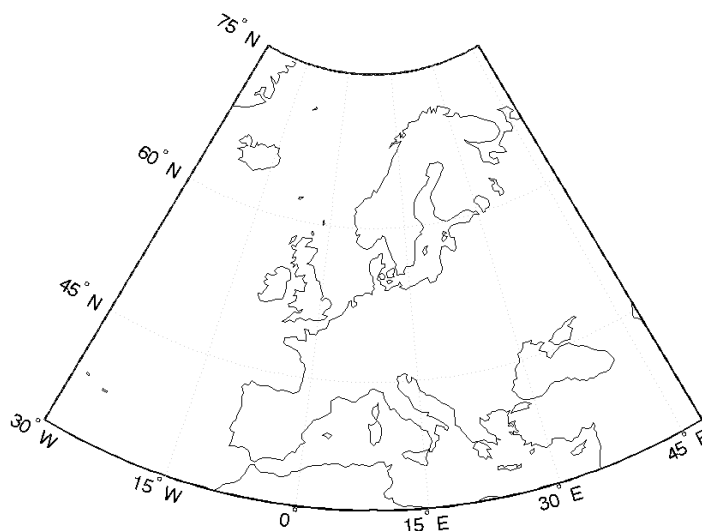


Figura 2.1: Zona dell'Europa considerata per la produzione del modello.

L'analisi prodotta per la generazione del modello verte sull'indagine di due aspetti fondamentali:

- Statistiche del primo e del secondo ordine per ogni singolo componente;
- Analisi della correlazione fra le componenti.

2.3.1 Total Column Water Vapor

Il dato Total Column Water Vapor rappresenta la quantità di vapor d'acqua sospesa all'interno di tutta la colonna verticale della troposfera. Innanzitutto si è analizzata la statistica del primo ordine del vapore acqueo (densità di probabilità o PDF) sull'intera area europea, considerando i valori dell'intero periodo (5 anni). Osservando la statistica del dato (Figura 2.2), si evince che essa ha un andamento di tipo lognormale con media pari a $15.17mm$, varianza pari a $114.67mm^2$ ed un valore massimo che si assesta di poco sotto ai $60mm$. I valori di media e varianza riportati,

si riferiscono alla curva di massima verosimiglianza (di colore rosso) che riproduce al meglio la statistica del dato.

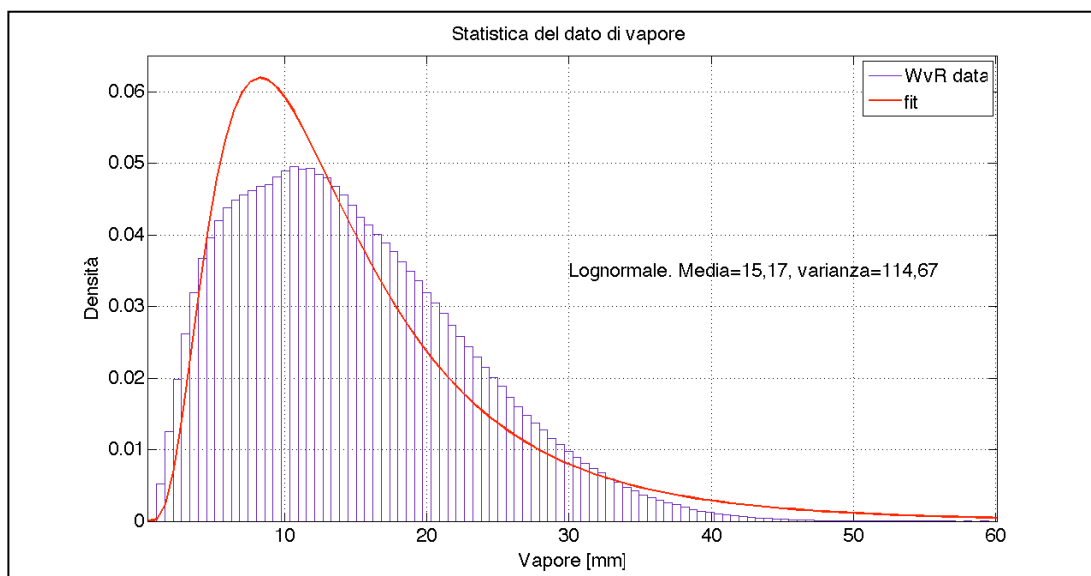


Figura 2.2: Statistica del dato di vapor d'acqua sui cinque anni.

Un'altra informazione interessante da valutare è il livello di copertura del vapore acqueo nell'area europea presa in considerazione. Per fare ciò si è determinata una soglia minima, al di sotto della quale si può considerare assenza di vapore all'interno del pixel. Questa soglia è stata posta a 1.2mm e si è quindi posto a 1 il pixel con valore maggiore (pixel coperto da vapore) e a 0 il pixel con valore inferiore (pixel non coperto da vapore). Si è ottenuta quindi una mappa di tipo binario in cui si descrive la presenza o meno del vapore sull'intera area europea. È altresì importante far notare che, ad ogni modo il valore di vapore acqueo contenuto in un pixel non è mai nullo.

In seguito è stata calcolata per ogni mappa la percentuale di area coperta dal vapore e se ne è ricavata la statistica. Dalla Figura 2.3 si evince che il livello di copertura del vapore acqueo sull'intero continente è sempre molto alto, infatti esso risulta abbondantemente al di sopra del 90%. Inoltre il grafico mostra che nella maggior parte dei casi l'Europa risulta totalmente, o almeno per il 99%, coperta da vapore.

Questi dati confermano, come ci si aspettava, che il vapor d'acqua è sempre presente nella troposfera anche se in piccole quantità.

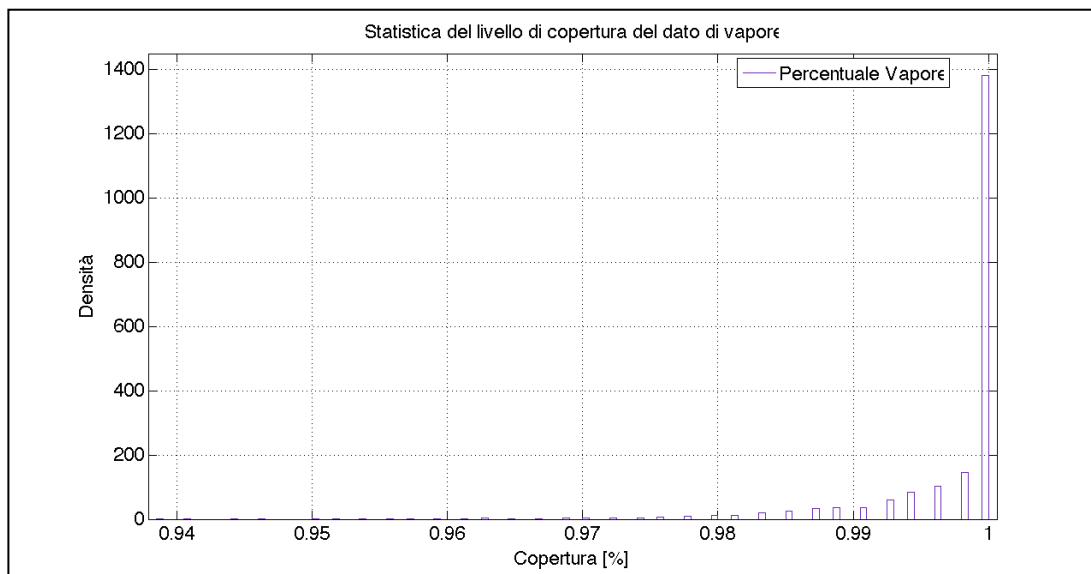


Figura 2.3: Statistica della percentuale di area coperta da vapore acqueo su tutta l'Europa.

Si è poi proceduto analizzando l'evoluzione temporale dei dati di copertura del vapore su scala continentale. Sfruttando i dati ricavati per produrre la statistica di Figura 2.3, è stato plottato, istante per istante (in totale 7308 campioni), il valore della percentuale di area coperta. In questo modo, si è potuto notare una ciclicità annuale nell'evoluzione temporale di questo parametro. Infatti, analizzando l'evoluzione annuale del dato di copertura, si notano valori di copertura pressoché fissi al 100% nei periodi più caldi, mentre si nota un andamento spesso al di sotto del valore di copertura totale nei mesi più freddi.

Quanto detto è mostrato in Figura 2.4 dove si ha l'andamento della copertura di vapore sui cinque anni ed in particolare quello sul primo anno. L'anno è formato da 1464 campioni e si vede chiaramente che dal campione 500 al campione 900 (periodo che va da fine Maggio a fine Agosto) la copertura del vapore sull'area continentale è pari al 100%. Ciò invece non avviene nei primi 4 e negli ultimi 4 mesi dell'anno.

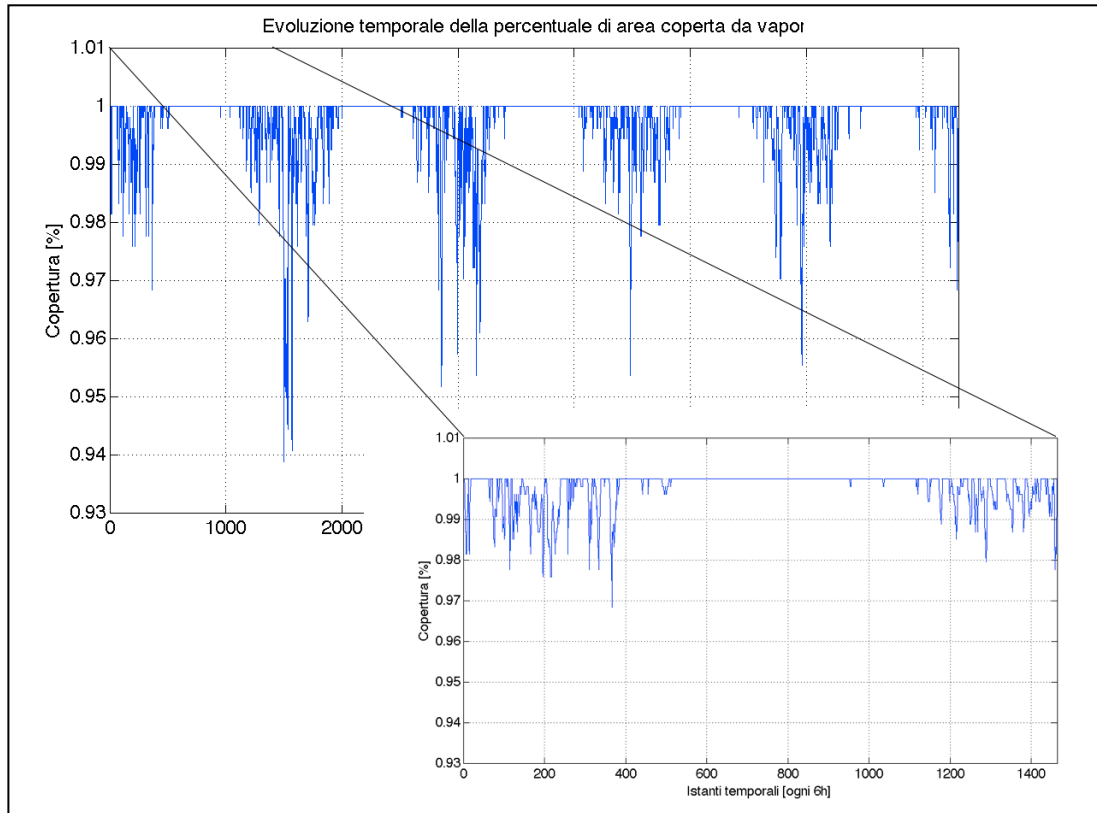


Figura 2.4: Evoluzione temporale della percentuale di area coperta da vapore nei 5 anni e durante il primo anno.

L'analisi del dato di vapore ci porta quindi allo studio della correlazione spaziale. Essa, definisce il coefficiente di correlazione fra coppie di pixel alla stessa distanza (mediato in Figura 2.5 e reale in Figura 2.6) ed è stata calcolata con la (2.1) [17].

$$\rho(d) = \frac{E[Wv_d^1 Wv_d^2] - E[Wv_d^1] E[Wv_d^2]}{\sigma(Wv_d^1) \sigma(Wv_d^2)} \quad (2.1)$$

Wv_d^1 e Wv_d^2 rappresentano il valore di vapore acqueo relativo a tutte le coppie di pixel che si trovano a distanza d (E e σ rappresentano rispettivamente le operazioni di media e deviazione standard). Osservando la correlazione mediata di Figura 2.5 si nota che essa decresce piuttosto lentamente risultando pari a circa 0.1 intorno ai 5000km a circa 0.3 intorno ai 2700km.

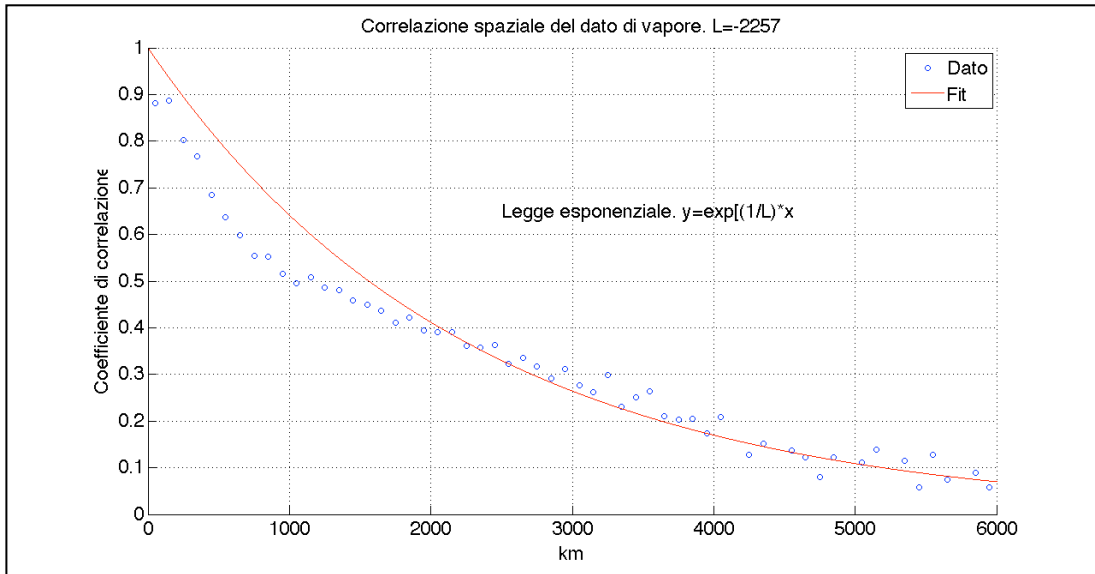


Figura 2.5: Correlazione spaziale media del dato di vapore acqueo

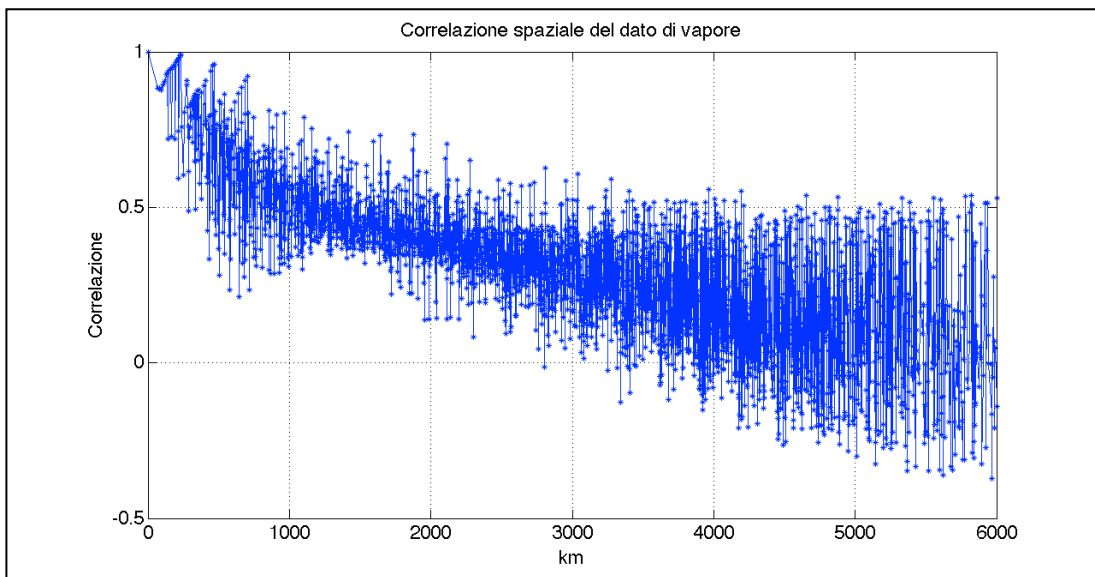


Figura 2.6: Correlazione spaziale del dato di vapore acqueo

Poiché la correlazione reale mostrata in Figura 2.6 presenta uno spread piuttosto evidente è diventato necessario calcolare la correlazione media (Figura 2.5) per poter produrre una legge più semplice come l'esponenziale negativa avente parametro L.

$$corr = e^{-d/L} \tag{2.2}$$

Con d che rappresenta la distanza ed L pari a -2257.

2.3.2 Total Column Liquid Water

Il dato Total Column Liquid Water rappresenta la quantità di liquido sospeso integrato su tutta la colonna della troposfera. Anche per questo dato si è analizzata la statistica generale di ogni mappa sull'intero periodo. Osservando la statistica (mostrata in Figura 2.7) si evince che essa ha un andamento di tipo lognormale con media pari a 0.14mm e deviazione standard pari a 0.037mm^2 , ed un valore massimo che si assesta di poco sotto ai 4mm . I valori di media e varianza riportati si riferiscono alla curva a massima verosimiglianza in rosso che riproduce al meglio la distribuzione del dato. Si noti che in blu è indicata la distribuzione esponenziale che meglio approssima il dato di Total Column Liquid Water. Da questo grafico si evince che i due fit sono molto simili ma, considerando che la quantità di liquido in buona parte della letteratura viene descritta con statistica lognormale (come ad esempio in [18]), si adotterà questa statistica anche in questo lavoro di tesi.

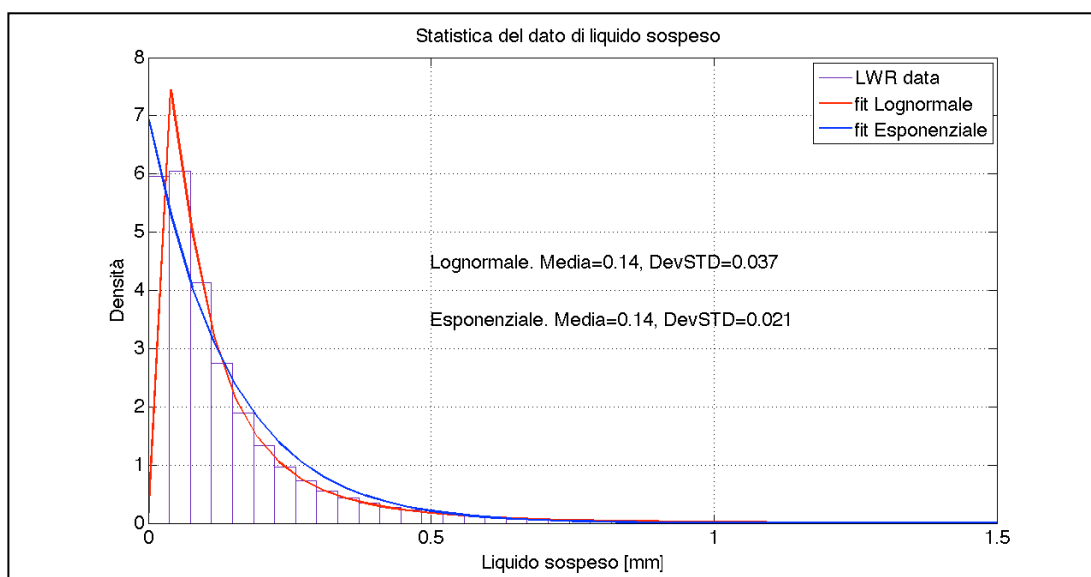


Figura 2.7: Statistica del dato di liquido non precipitato per il periodo considerato.

Anche in questo caso si è valutato il livello di copertura del liquido sospeso sull'intera area europea presa in considerazione. Si è quindi determinata una soglia minima, al di sotto della quale si può considerare assenza di liquido sospeso all'interno del pixel. Questa soglia è stata posta a 0.01mm e si è quindi posto a 1 il

pixel con valore superiore (pixel con presenza di liquido) e a 0 il pixel con valore inferiore (pixel senza liquido).

A questo punto, è stata calcolata per ogni mappa la percentuale di area in cui si ha liquido sospeso e se ne è ricavata la statistica. Dalla figura mostrata di seguito (Figura 2.8) si evince che l'area europea è coperta in media per il 78% da liquido sospeso con statistica normale.

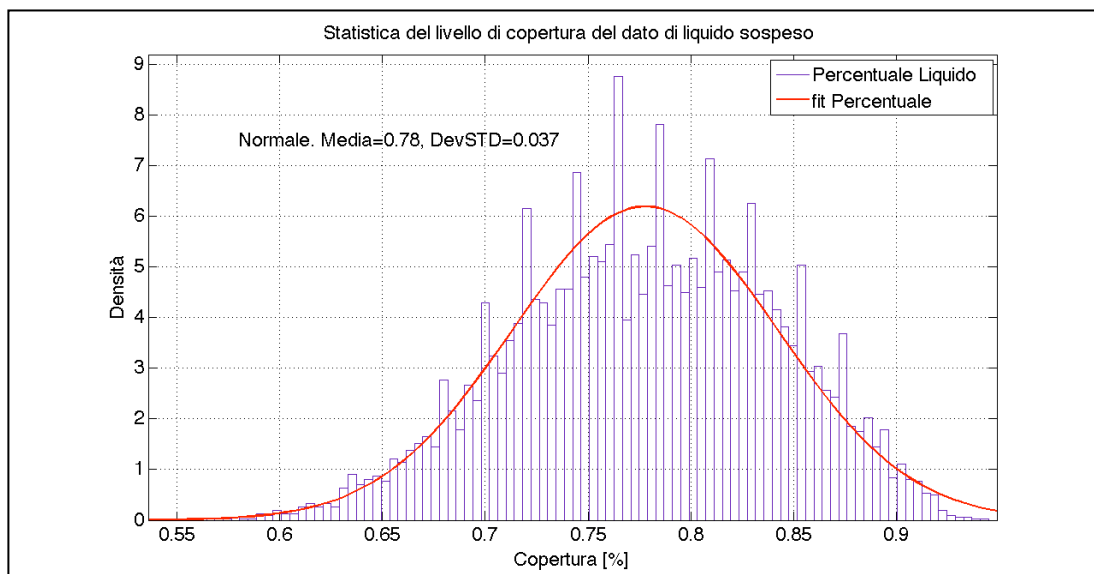


Figura 2.8: Statistica della percentuale di area coperta da liquido su tutta l'Europa.

Come fatto per il dato di vapore, si è prodotta l'evoluzione temporale del livello di copertura del dato di liquido sospeso. Anche in questo caso, sfruttando i dati ricavati per produrre la statistica mostrata sopra, è stato plottato, istante per istante, il valore della percentuale di area coperta da liquido. Si è notato che esiste una ciclicità annuale anche nell'evoluzione temporale di questo parametro. Infatti, analizzando l'evoluzione su base annuale, si notano valori di copertura più elevati nei periodi più freddi, mentre si nota un andamento decrescente man mano che si va verso i periodi più caldi. Quanto detto è mostrato in Figura 2.9 dove si ha l'andamento della copertura del liquido sospeso sui cinque anni ed in particolare quello sul primo anno. Si vede chiaramente che, nello stesso periodo dell'anno in cui la copertura del vapore è pari al 100%, il liquido tende verso il suo minimo. Quanto affermato trova riscontro nella fisica del problema, in cui è logico aspettarsi che se la

copertura di vapore è elevata si presuppone che il vapore sia elevato e quindi, causa la poca condensazione, si ottengono valori minimi di liquido sospeso (si pensi ai mesi più caldi).

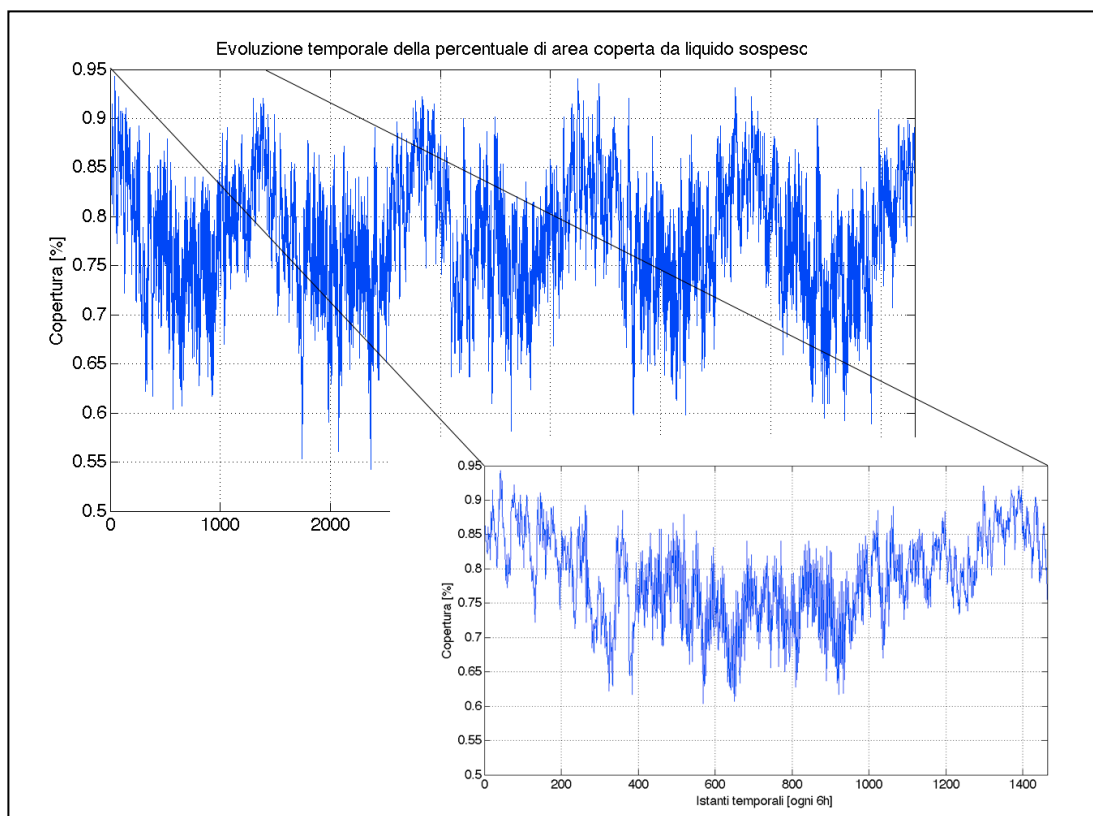


Figura 2.9: Evoluzione temporale della percentuale di area coperta da liquido sospeso nei 5 anni e durante il primo anno.

Come per l'analisi del dato di vapore si è prodotto uno studio del coefficiente di correlazione fra coppie di pixel alla stessa distanza anche per il dato di liquido sospeso. La funzione di correlazione mediata (Figura 2.10), decresce molto velocemente, infatti si nota che è pressoché nulla intorno agli 800km e pari a circa 0.3 a 350km di distanza. La correlazione media è stata fittata con una legge esponenziale negativa funzione della distanza con parametro L pari a -298 . L'andamento esponenziale di Figura 2.10 rappresenta la media della correlazione reale (Figura 2.11) perché, anche in questo caso, essa presenta una evidente variabilità spaziale.

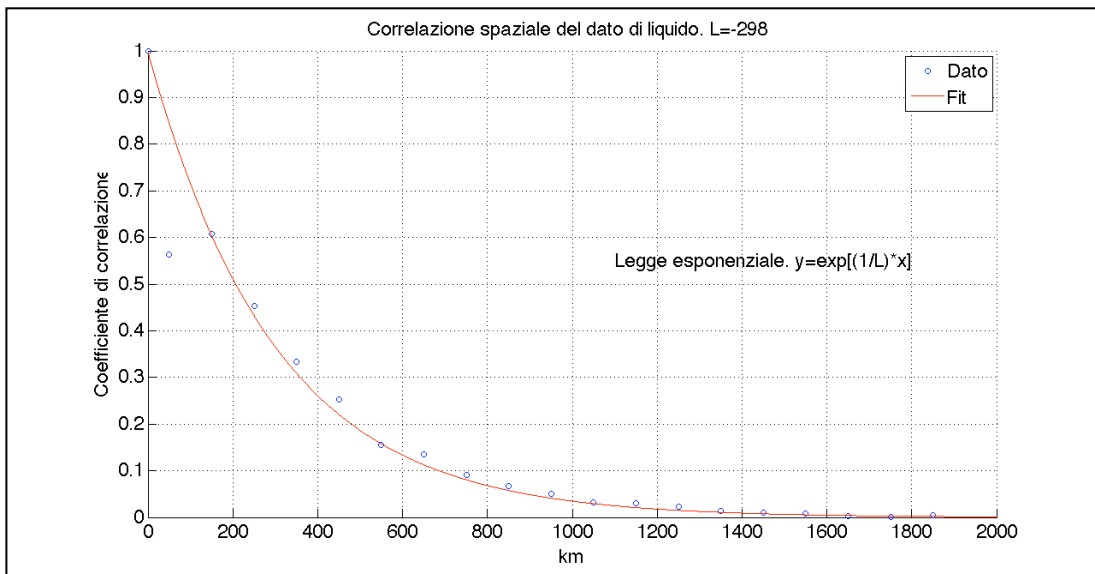


Figura 2.10: Correlazione spaziale media del dato di liquido sospeso in troposfera.

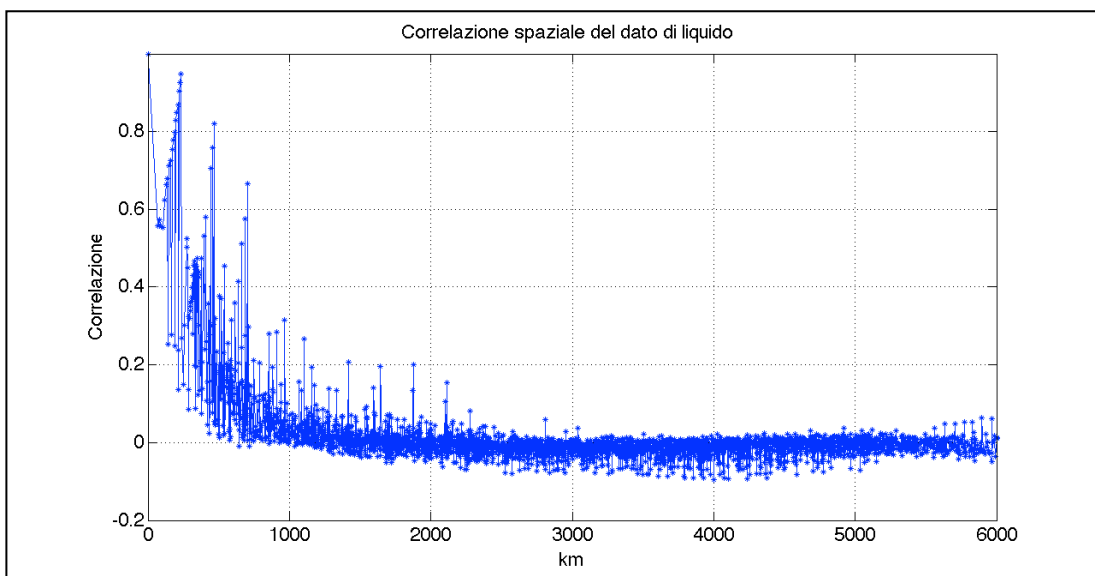


Figura 2.11: Correlazione spaziale del dato di liquido sospeso in troposfera.

2.3.3 Total precipitation

Il dato di Total Precipitation rappresenta la precipitazione rilevata su scala continentale. Come per i due paragrafi precedenti si è analizzata la statistica del valore assunto dal dato lungo l'intero periodo considerato, la statistica della percentuale d'area coperta, l'evoluzione temporale della percentuale di copertura e la correlazione spaziale del dato esistente su tutto il territorio europeo. In Figura 2.12 è mostrata la statistica della quantità media di precipitazione cumulata in un singolo pixel nelle 6h che rappresentano la risoluzione temporale dei dati in possesso.

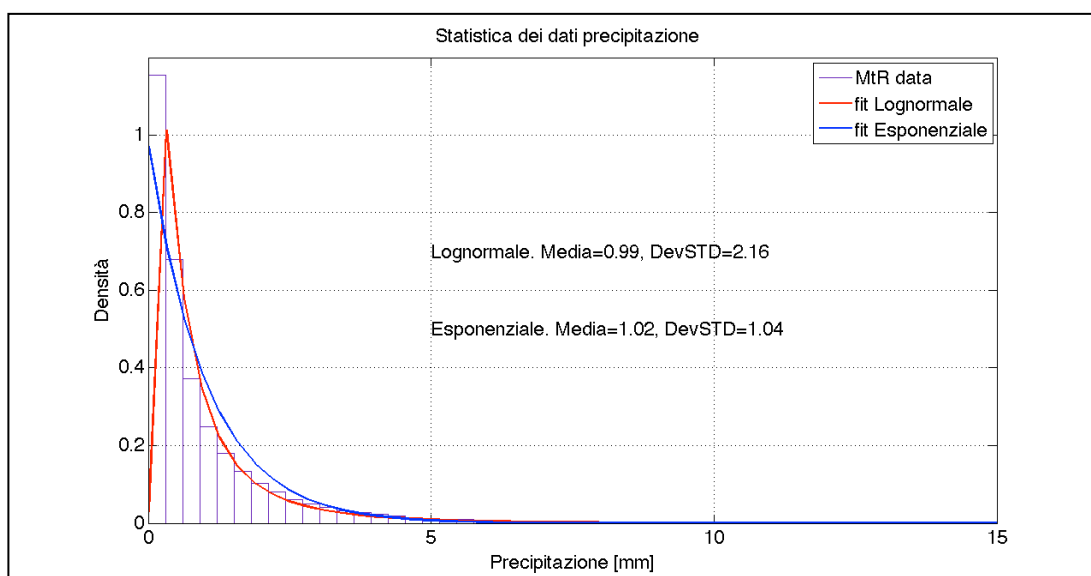


Figura 2.12: Statistica del dato di precipitazione per il periodo considerato.

Anche in questo caso si ha una statistica di tipo lognormale (fit in rosso) con media circa pari a 1mm e deviazione standard pari a $2,16\text{mm}^2$ e, così come per il dato di liquido sospeso, essa può essere descritta anche da una statistica esponenziale (fit in blu) con valor medio pari a 1.02mm e deviazione standard pari a 1.04mm^2 . In questo caso la letteratura afferma che la pioggia accumulata è proporzionale all'area coperta nel pixel [19], che ha statistica esponenziale, e quindi la statistica della precipitazione tende a essere di tipo esponenziale. Per questo motivo si considererà la statistica esponenziale (linea blu)

Come per i due casi analizzati in precedenza, si è eseguito uno studio statistico sulla percentuale di area coperta da precipitazione nel periodo preso in considerazione.

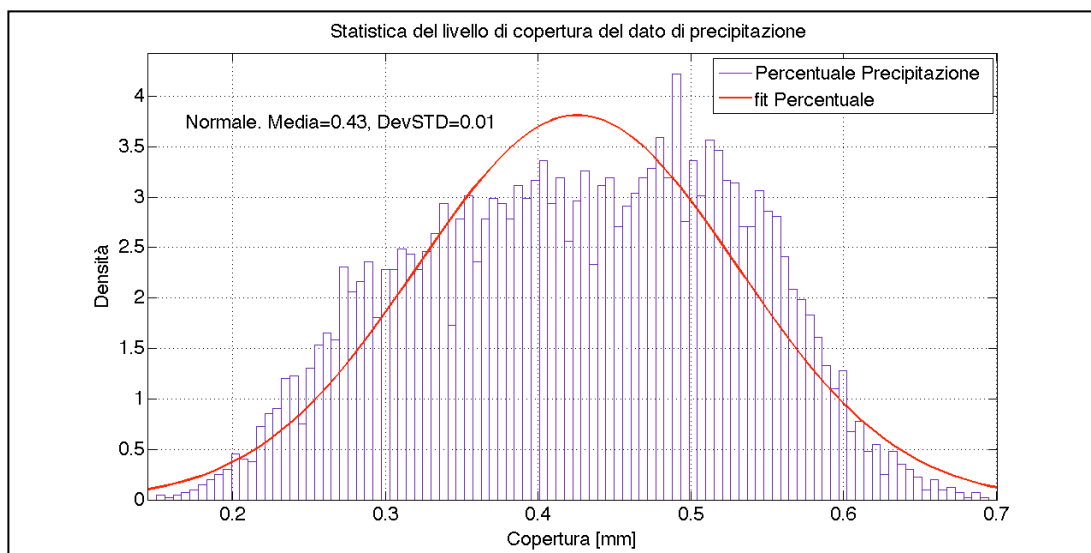


Figura 2.13: Statistica della percentuale di area coperta da precipitazione su tutta l'Europa.

La statistica mostrata in Figura 2.13 è normale con valor medio pari a circa 0,43 *mm*, ciò significa che l'Europa è coperta da precipitazioni con statistica normale ed in media per il 40% del territorio.

Come per gli altri dati si passa ora all'analisi dell'evoluzione temporale della copertura dell'area europea. Ancora una volta emerge una ciclicità stagionale in cui la variabilità del dato si ripete annualmente. Quanto detto è mostrato chiaramente in Figura 2.14: si nota un andamento periodico del livello di copertura del territorio da parte del dato di precipitazione su tutti i 5 anni e si evince chiaramente che le precipitazioni seguono sostanzialmente l'evoluzione temporale del dato di liquido sospeso (a valori assoluti inferiori). Infatti si nota che il fenomeno precipitativo è più esteso nelle stagioni più fredde e meno in quelle più calde. Anche in questo caso l'analisi corrisponde in modo logico alla fisica del problema che presuppone maggior condensazione nei periodi più freddi e quindi maggior probabilità di precipitazione (mesi in cui temperatura e pressione sono più basse), mentre nei mesi più caldi (in

cui temperatura e pressione sono più alte) ciò è inficiato dalla presenza di maggior vapor d'acqua, minor liquido sospeso e quindi minor possibilità di precipitazione.

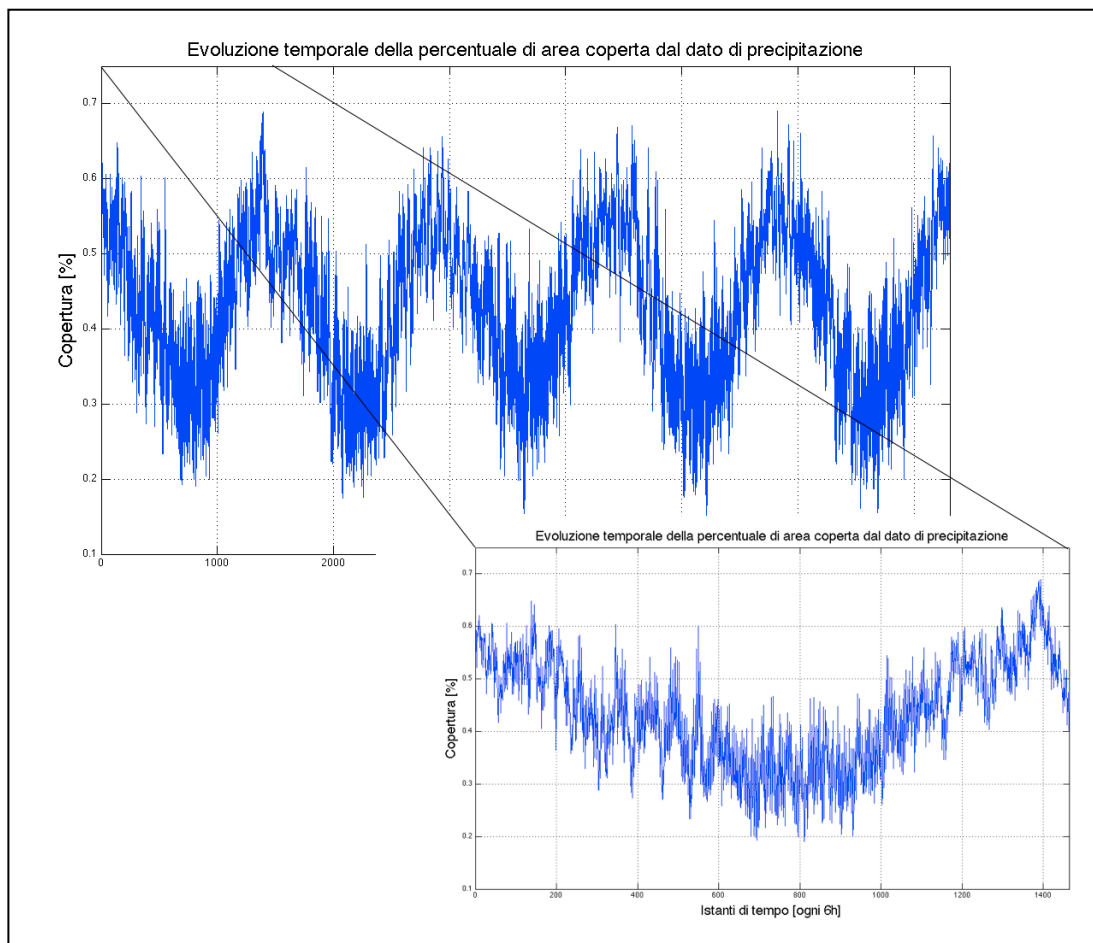


Figura 2.14: Evoluzione temporale della percentuale di area coperta da precipitazione nei 5 anni e durante il primo anno.

Le Figure 2.15 e 2.16 mostrano i grafici riferiti allo studio del coefficiente di correlazione fra coppie di pixel alla stessa distanza per il dato di precipitazione. Anche in questo caso, la correlazione decresce molto velocemente, infatti si nota che è pressoché nulla intorno agli $800km$ e pari a 0.3 intorno ai $300km$. La correlazione media è stata fittata con una legge esponenziale negativa funzione della distanza con parametro L pari a -258 . La correlazione di Figura 2.15 mostrata nella pagina seguente è calcolata come media della correlazione reale (Figura 2.16) poiché anche quest'ultima presenta un certo spread per via della variabilità del dato.

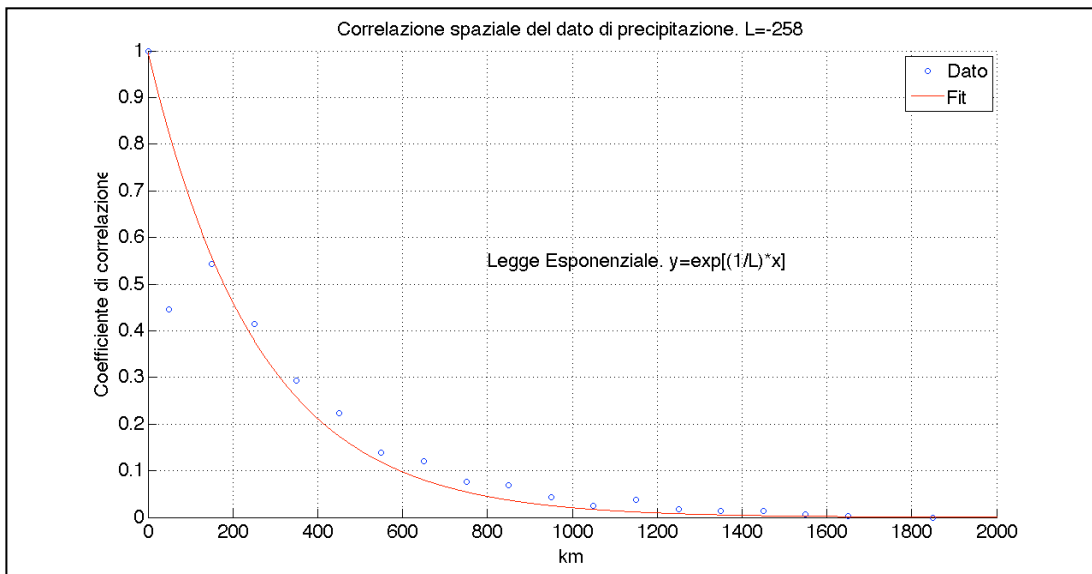


Figura 2.15: Correlazione spaziale media del dato di precipitazione.

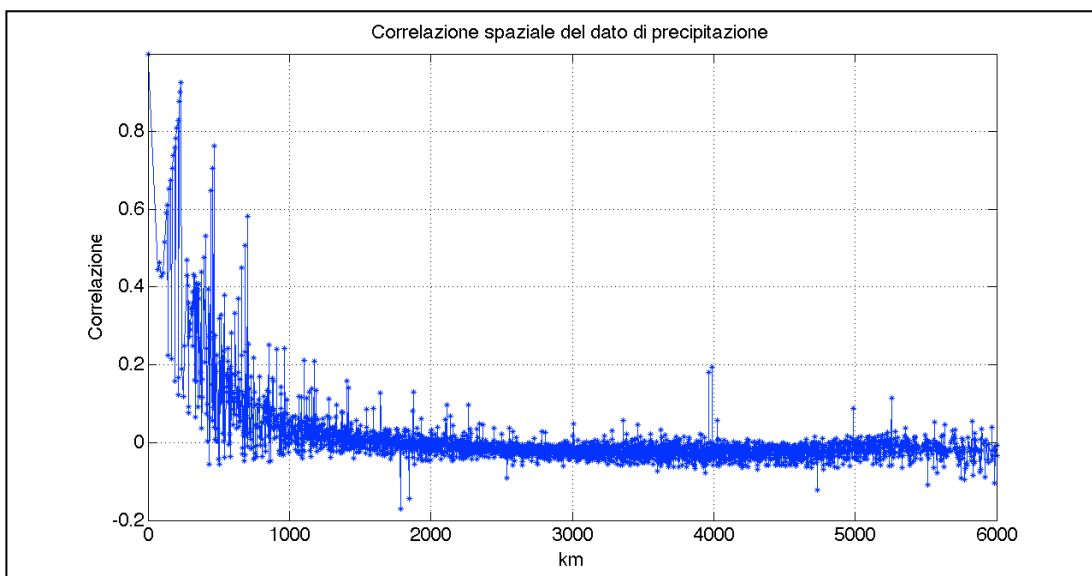


Figura 2.16: Correlazione spaziale del dato di precipitazione.

2.4 Correlazione statistica tra i dati

In questa sezione si analizzeranno le correlazioni esistenti tra vapore acqueo, nubi e precipitazione, necessari per lo sviluppo del modello presentato nel prossimo capitolo. L'obiettivo di questa analisi è quello infatti di approfondire il legame esistente fra le suddette componenti atmosferiche allo scopo di identificare la modalità più efficace per la loro modellizzazione congiunta.

2.4.1 Correlazione tra il dato di vapore ed il dato di liquido

In questo paragrafo si analizzerà la correlazione tra vapore acqueo e liquido sospeso da due distinti punti di vista: quello temporale e quello spaziale. Si prendono in considerazione le mappe binarie create in precedenza per determinare la statistica della percentuale di area coperta e la sua evoluzione temporale. Innanzitutto si può affermare che, confrontando le figure che mostrano l'evoluzione temporale della percentuale di area coperta dal dato di vapore e dal dato di liquido (Figure 2.4 e 2.9 rispettivamente), esiste una certa anticorrelazione tra i due dati nella loro evoluzione temporale. Ciò è supportato dal fatto che nei periodi in cui la percentuale di area coperta da vapore è massima, quella coperta da liquido tende al suo minimo (mesi più caldi), mentre quando la percentuale di area coperta da vapore diminuisce, quella coperta da liquido aumenta.

Quanto detto si traduce in una ciclicità stagionale anche per il livello di correlazione della percentuale di area coperta dai due dati. Si è calcolata la percentuale di area coperta contemporaneamente dai due dati per ogni singola mappa e se ne è plottata l'evoluzione temporale (Figura 2.17). Come si nota nello zoom effettuato per il primo anno, si ha conferma di quanto detto in merito alla diminuzione della correlazione tra i due dati; essa diminuisce man mano che ci si inoltra nei mesi più caldi. Nella Figura 2.18 si mostra la statistica della percentuale di copertura o assenza di copertura contemporanea dei due dati: essa è normale con valor medio pari a 0.78. Ciò vuol dire che in media, il 78% dell'area ha presenza o assenza contemporanea di vapore e liquido, mentre per il 22% dell'area totale si ha la presenza/assenza di un dato contemporaneamente all'assenza/presenza dell'altro.

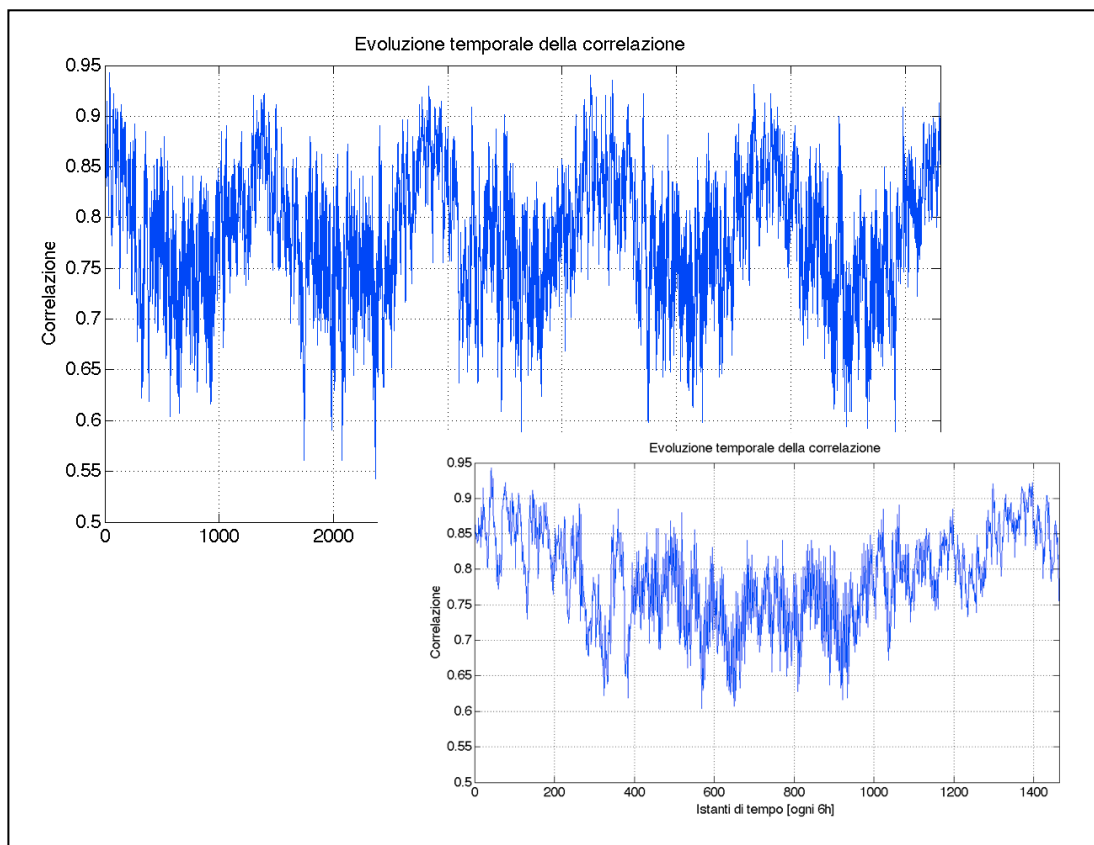


Figura 2.17: Evoluzione temporale della correlazione spaziale dei dati di vapore e di liquido sospeso.

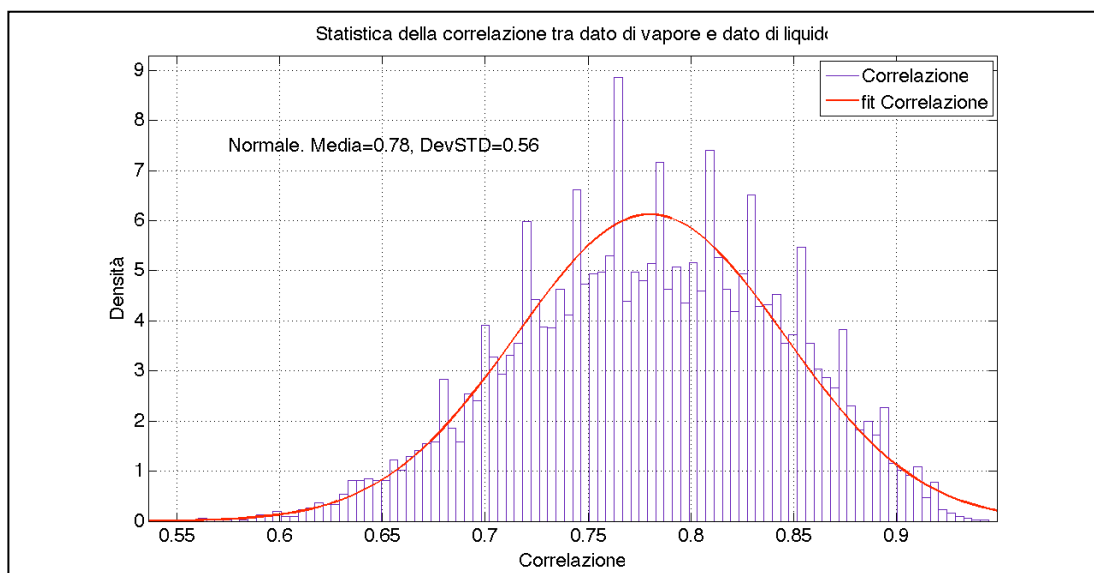


Figura 2.18: Statistica della correlazione spaziale dei dati di vapore e di liquido sospeso.

Si è notato che la correlazione tra i dati di vapore e liquido non è mai pari al 100%. Ciò significa che spesso può accadere che un pixel presenti un dato e non l'altro. È importante evidenziare che ciò avviene sempre quando il vapore è presente, mai, ovviamente, viceversa. Ciò è confermato, oltre che dalle evoluzioni temporali delle varie statistiche proposte finora, anche da uno studio più approfondito effettuato sulle singole mappe. Un esempio di quanto appena affermato è mostrato in Figura 2.19 dove i pixel in rosso mostrano la presenza di entrambi i dati, mentre i pixel in verde indicano la presenza del solo dato di vapore; non esistono pixel di colore blu che rappresentano presenza del solo dato di liquido e non di vapore.

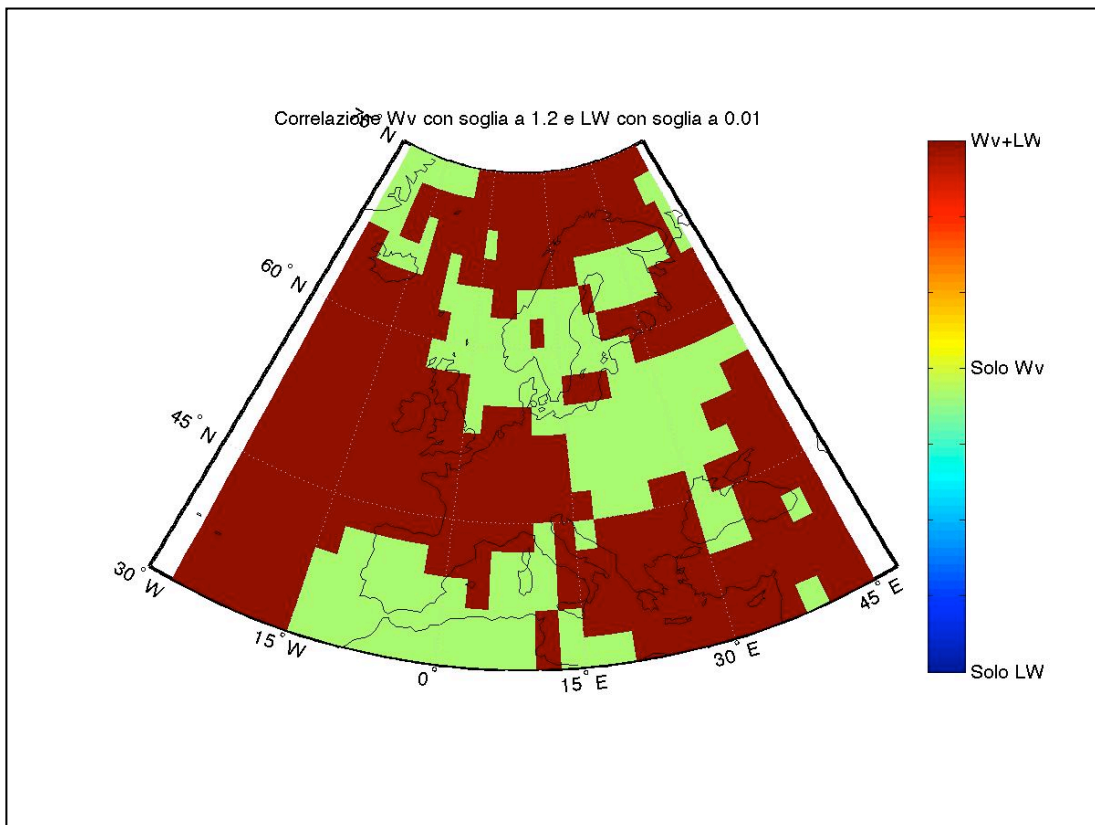


Figura 2.19: Esempio di correlazione spaziale tra il dato di vapore e di liquido.

2.4.2 Correlazione tra il dato di liquido ed il dato di precipitazione

Osservando quanto mostrato in precedenza per le statistiche e l'evoluzione temporale dei dati di precipitazione e di liquido si nota che, la ciclicità riscontrata in entrambi i casi è pressoché la stessa. La quantità di liquido sospeso e le precipitazioni totali sono maggiormente estese nei mesi più freddi, mentre man mano che ci si inoltra nei mesi più caldi, il liquido sospeso e le precipitazioni diminuiscono la loro estensione territoriale (Figure 2.9 e 2.14). Inoltre, dalle statistiche del primo ordine che mostrano la percentuale di area coperta, si nota che il valor medio dell'area coperta da liquido è maggiore del valor medio dell'area coperta dalle precipitazioni.

Un'ulteriore elemento di interesse è rappresentato dal fatto che l'area coperta da nuvole è sempre maggiore di quella interessata dalle precipitazioni, ciò significa che, come ci si può chiaramente aspettare, non sempre il liquido sospeso in atmosfera si trasforma in precipitazione. Anche in questo caso si è studiata la correlazione tra la percentuale di area coperta da liquido e precipitazione e la sua evoluzione temporale (Figura 2.21).

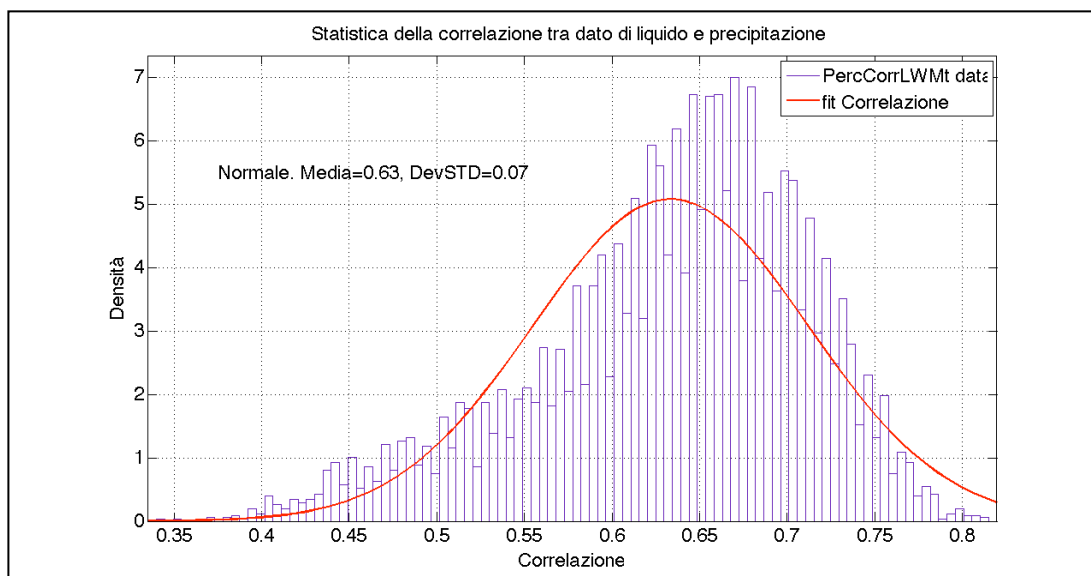


Figura 2.20: Statistica della correlazione tra copertura del dato di liquido e del dato di precipitazione.

In questo caso (Figura 2.20), in media il 63% dell'area totale ha contemporaneamente presenza/assenza di nubi e precipitazione. Quindi per il restante 37% dell'area totale si ha la presenza di un dato contemporaneamente all'assenza dell'altro.

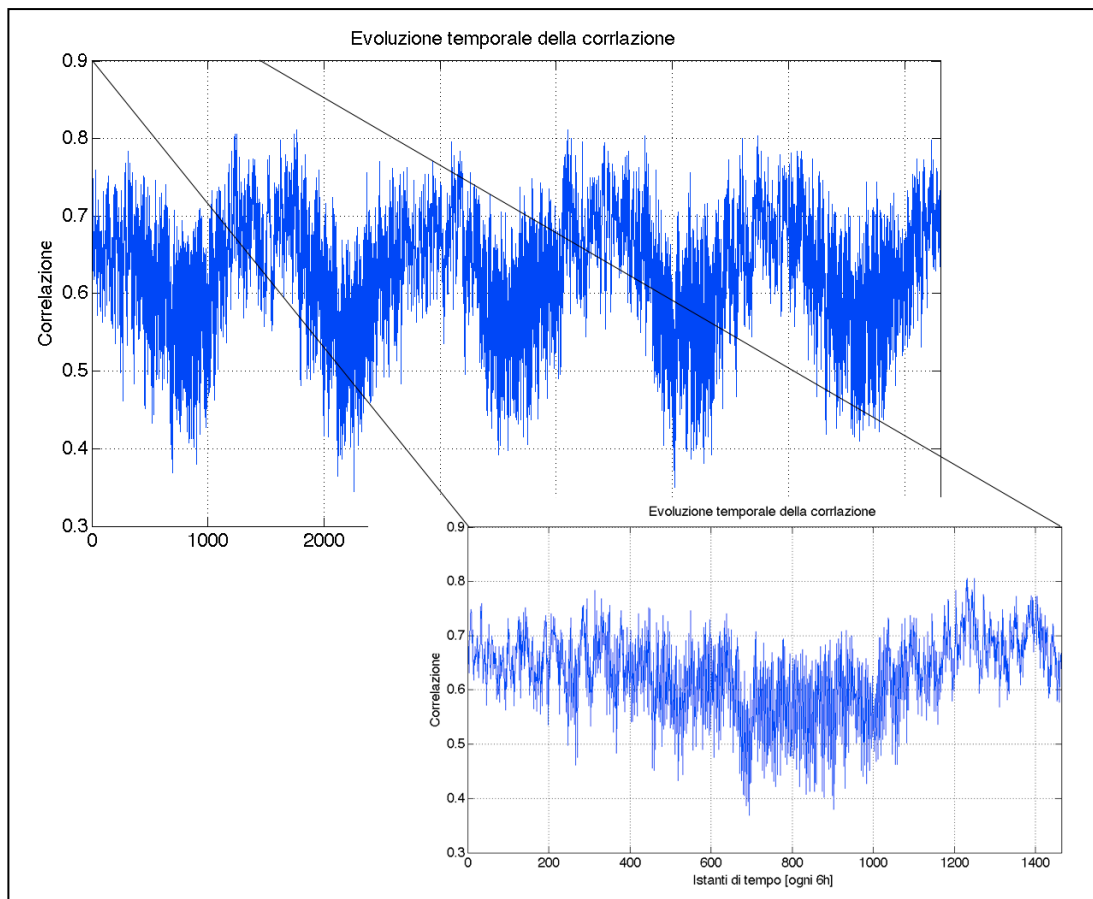


Figura 2.21: Evoluzione temporale della correlazione tra percentuale di area coperta da liquido e da precipitazione.

Anche la Figura 2.21 mostra la ciclicità della copertura congiunta dei due dati presi in considerazione, confermando quindi quanto asserito in precedenza. Il livello di copertura congiunta dei due dati è minore nei periodi più caldi e maggiore nei periodi più freddi. Ciò è imputabile al fatto che le precipitazioni su scala continentale, nei periodi più caldi, sono evento raro mentre si manifestano con più frequenza le precipitazioni convettive che non sono oggetto di studio in questo lavoro.

Un'ultimo aspetto molto interessante da evidenziare è mostrato in Figura 2.22.

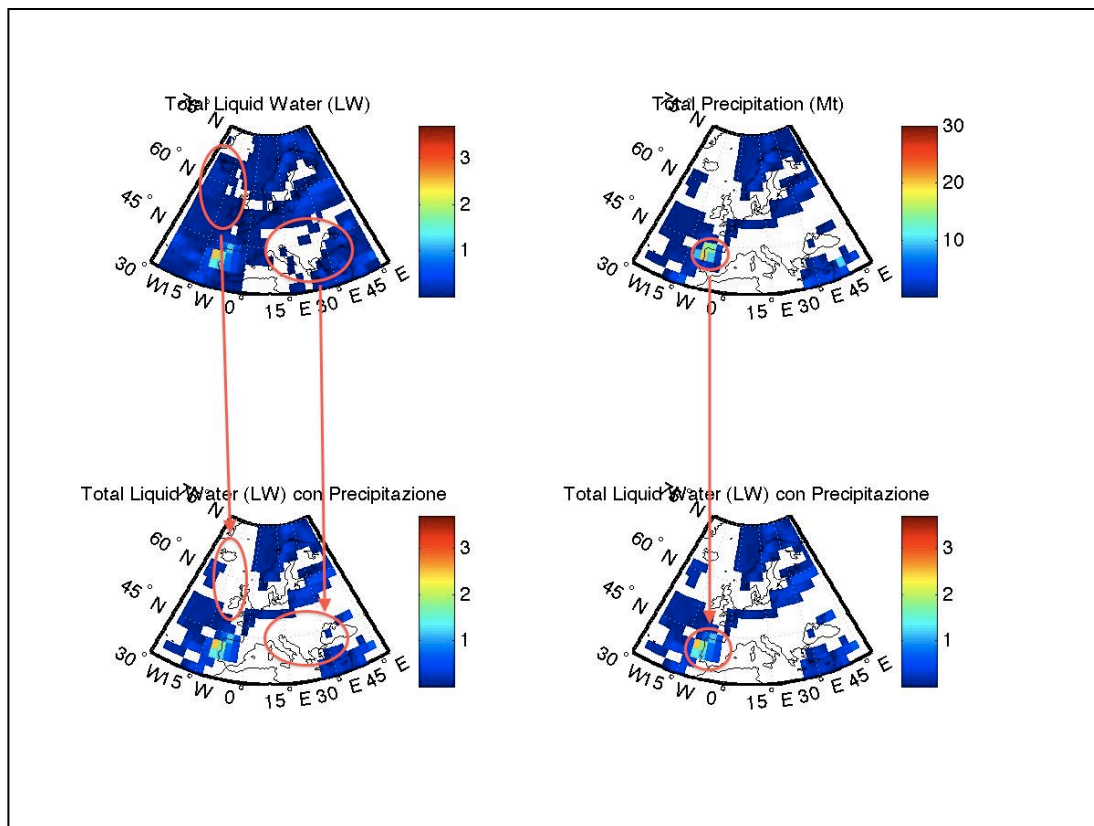


Figura 2.22: Confronto spaziale tra celle di liquido sospeso e celle di precipitazione.

La mappa in alto a sinistra rappresenta i valori di liquido sospeso in atmosfera, mentre la mappa in alto a destra rappresenta i valori di precipitazione a larga scala nello stesso istante. Eliminando dalla mappa di liquido i pixel in cui non ci sono precipitazioni si ottiene la mappa in in basso a sinistra che, per praticità è stata duplicata in basso a destra. Confrontando le due mappe nella colonna di sinistra si nota chiaramente che l'eliminazione di pixel in cui non piove comporta l'eliminazione di pixel in cui il livello di liquido è prossimo allo zero, e quindi trascurabile, e la conservazione del picco del livello di liquido sospeso che, invece, non può essere trascurato. Confrontando le due mappe nella colonna di destra si nota che la posizione del picco del valore della precipitazione, e quindi la cella di pioggia, coincide perfettamente con la posizione del picco del livello di liquido sospeso. Quanto mostrato indica che, se si verificano delle precipitazioni, esse avvengono, come è logico aspettarsi, laddove sono presenti celle di nubi.

2.5 Studio dei dati in funzione di posizione e stagionalità

Durante l'analisi riportata nella sezione precedente, si è notata una evidente dipendenza delle statistiche dei dati stessi dalla posizione e dalla stagione in cui il dato veniva analizzato: nella prossima sezione si analizzerà in maniera più approfondita questo aspetto.

2.5.1 Studio dei dati in funzione della posizione

Sulle differenze statistiche riscontrate da una posizione all'altra dell'area presa in considerazione incidono principalmente due fattori: la latitudine e l'orografia. Man mano che si scende dalla massima alla minima latitudine considerata, la temperatura dell'atmosfera, a parità di altitudine, aumenta. Questa situazione condiziona la tendenza del vapore a condensare poiché il fenomeno di condensazione dipende fortemente anche dalla temperatura. Ciò implica che, al diminuire della latitudine, non sempre ad una certa quantità di vapore può corrispondere la stessa quantità di liquido ed inoltre, la quantità di vapore stessa raggiunge valori più elevati a basse latitudini. Avendo mostrato nella sezione precedente che, con buona approssimazione, ad una cella di liquido sospeso corrisponde una cella di precipitazione, si può affermare che l'effetto descritto si verifica anche per eventuali fenomeni precipitativi a larga scala.

L'orografia del terreno incide anch'essa in modo evidente sulla quota parte di condensazione del vapore. In tutta la zona mediterranea e in quella atlantica, per ovvi motivi, la quantità di acqua è decisamente maggiore a quella che si trova nelle zone interne del continente. Quanto affermato porta ad un'ulteriore considerazione: la quantità di liquido che può evaporare è sicuramente maggiore nelle zone di mare che nelle zone terrestri. Infatti, analizzando i dati, ci si accorge che nelle due grandi zone marittime considerate nel modello oggetto di questo lavoro (zona dell'Atlantico e del Mediterraneo) i valori raggiunti dal vapore sono molto più elevati rispetto a quelli rilevati nelle zone interne al continente. Ciò si traduce, da un punto di vista statistico, in valori medi più alti nelle statistiche lognormali (già presentate in questo capitolo).

Unendo le due considerazioni fatte si è deciso di suddividere la regione d'interesse in 5 zone distinte (Figura 2.23), ognuna con diverse caratteristiche statistiche per singolo dato e di correlazione inter-dato.

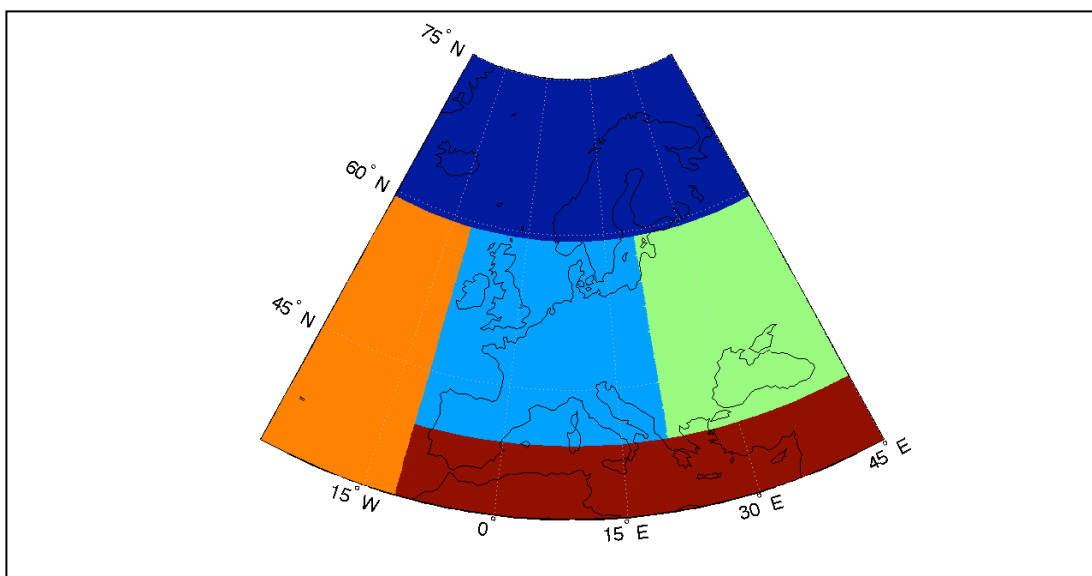


Figura 2.23: Suddivisione dell'area di interesse nelle 5 zone caratterizzate da statistiche diverse.

Di seguito si descrivono brevemente le caratteristiche climatiche delle cinque zone mostrate in Figura 2.24.

1. *Zona del Nord Europa (Blu)*: latitudine elevata, quindi temperature più basse, ma presenza di acqua dovuta al mare del Nord. Ciò permette medie quantità di vapore che condensano più facilmente e che quindi possono portare più spesso a precipitazioni;
2. *Zona del centro Europa (Azzurro)*: latitudine media con temperature miti. Il fenomeno dell'evaporazione è inferiore a quello presente nelle zone di mare, ma le temperature sono certamente superiori a quelle che si registrano nella zona del Nord Europa, quindi anche in questo caso la condensazione è un fenomeno frequente, così come le precipitazioni.
3. *Zona Est europea (Verde)*: la latitudine è la stessa della zona centro europea così come la quantità d'acqua evaporabile (per via della presenza del Mar Nero), per questo motivo, avendo la stessa capacità di condensazione della zona centro

europea può presentare lo stesso livello di vapore acqueo, liquido sospeso e precipitazioni.

4. *Zona atlantica (Arancione)*: questa zona è completamente sull'Oceano Atlantico, per questo motivo il livello di evaporazione sarà decisamente elevato per via della grossa quantità d'acqua presente e per via delle temperature che aumentano man mano ci si avvicina alla zona tropicale. Per via però delle temperature stesse, la condensazione è un fenomeno più raro rispetto a ciò che si riscontra ad esempio nella zona Nord europea. Per questi motivi, nella zona atlantica si è in presenza di due fenomeni: alta condensazione dell'elevata quantità di vapore a latitudini più alte, bassa condensazione dell'elevata quantità di vapore a latitudini più basse. La zona risulta quindi un'ibrido tra quella atlantica e quella mediterranea. Questa particolarità si ripercuote sul valor medio della statistica.
5. *Zona del Mar Mediterraneo (Marrone)*: in questa zona si è alle latitudini più basse della regione considerata. Ciò produce le temperature più elevate riscontrabili e quindi il fenomeno di condensazione risulta più raro rispetto alle altre zone. Il fenomeno di evaporazione è però presente per via delle alte temperature e dell'elevata quantità d'acqua. In compenso, rispetto alla zona atlantica l'evaporazione è leggermente inferiore e quindi l'aria risulta più secca.

Le statistiche del primo ordine zona per zona sono comunque lognormali (i risultati sono stati omessi per brevità). In Figura 2.24 sono mostrate media e deviazione standard delle statistiche zona per zona.

L'anomalia presentata dalla zona atlantica emerge nei valori estremi di valor medio e deviazione standard. Se dal Nord Europa fino al mediterraneo, le diverse zone forniscono valori medi sempre crescenti e deviazione standard decrescenti (la maggior parte dei valori è concentrata intorno al loro valor medio), la zona atlantica riflette il fatto di essere "ibrida" con un valor medio inferiore (dato inaspettato per via della posizione oceanica) e sigma maggiore (maggior dispersione di valori per via delle molte latitudini incluse nella zona). Probabilmente può risultare più utile suddividere questa zona in due distinte zone con una variazione minore in termini di

latitudine ma, questo tipo di partizione del territorio risulterà utile nella definizione di una legge di correlazione fra vapore acqueo e liquido sospeso.

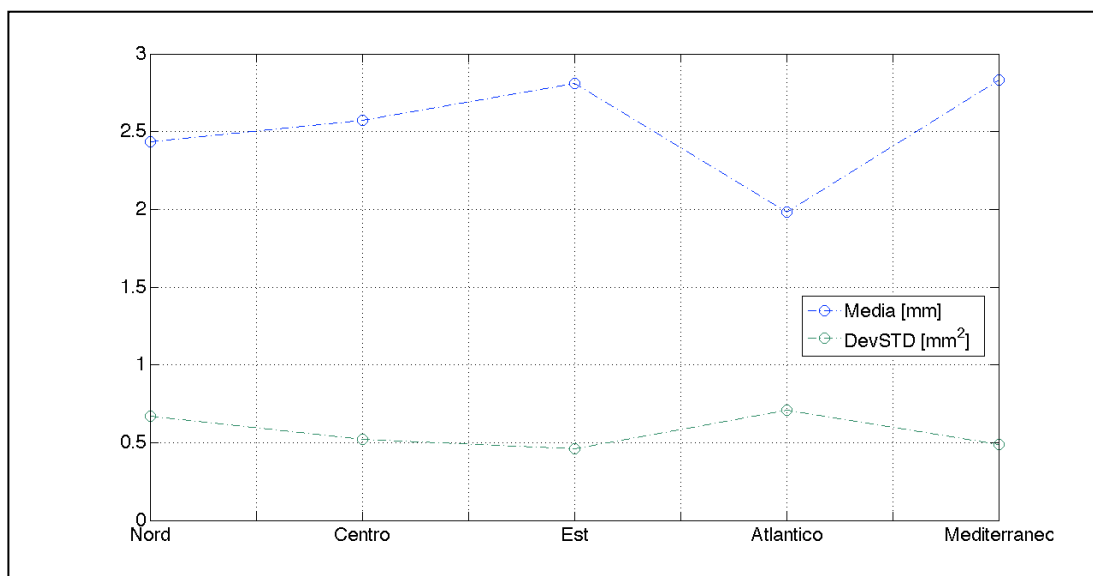


Figura 2.24: Andamento di media e sigma per le 5 zone.

2.5.2 Studio dei dati in funzione della stagionalità

Si è eseguito anche uno studio sulla variabilità stagionale di vapore acqueo, nubi e precipitazioni, alla luce del fatto che essa si presenta principalmente in due frangenti:

- I dati di vapore, liquido e precipitazione hanno mostrato sia nella statistica singola sia nella percentuale di copertura, una evidente variabilità stagionale;
- La correlazione tra dati di vapore e liquido e tra dati di liquido e precipitazione ha mostrato una variabilità stagionale.

Quanto detto è confermato dai risultati mostrati all'inizio del capitolo. Un esempio di variabilità è mostrato dal grafico in Figura 2.25 dove si mostra l'evoluzione mensile di media e deviazione standard del vapore. In linea generale, si può notare che il valor medio del vapore aumenta man mano che si entra nei mesi centrali dell'anno, quindi si può dire che esso è fortemente influenzato dalla temperatura stagionale. Infatti è logico assumere che maggior temperatura produca maggior evaporazione e viceversa. La deviazione standard invece ha un'andamento opposto; essa decresce man mano che ci si inoltra nei mesi più caldi. Ciò significa

che il livello di vapore in media aumenta, ma la dispersione dei dati diminuisce (sono molti i valori di vapore intorno al valor medio). Quanto detto si verifica anche per i dati di liquido e precipitazione.

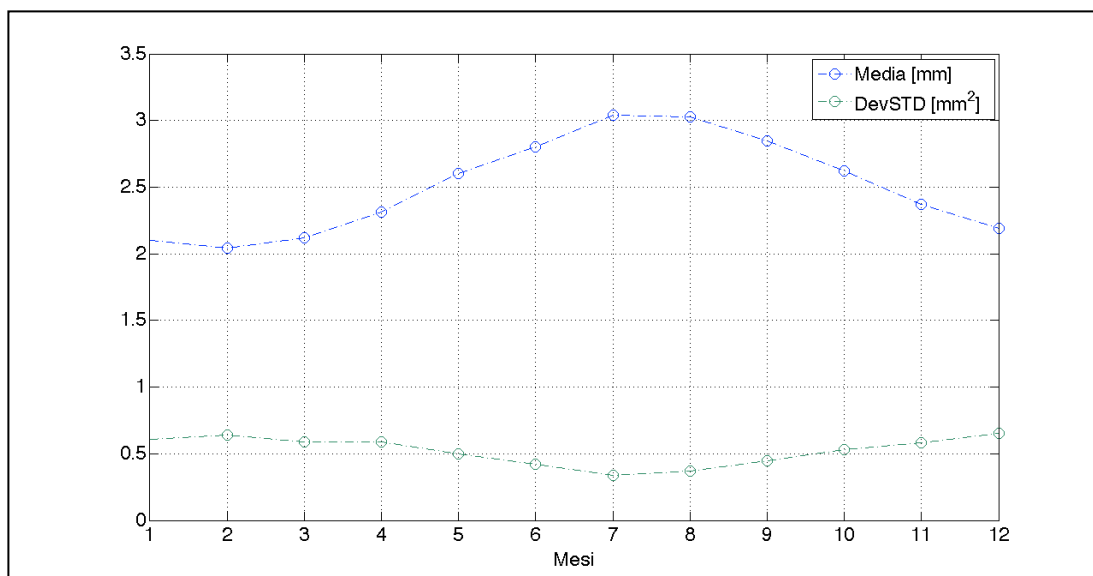


Figura 2.25: Andamento di media e varianza durante i 12 mesi dell'anno.

La variabilità stagionale per i dati di liquido sospeso e precipitazione può essere sfruttata in fase di sviluppo del modello per generare nel miglior modo possibile la legge di proporzionalità tra le tre componenti atmosferiche prese in esame. Le leggi di proporzionalità più rappresentative della correlazione fra le tre componenti, in linea di principio, possono essere ottenute considerando congiuntamente sia la suddivisione in zone proposta nel paragrafo precedente, sia la stagionalità. In base a ciò, sono stati analizzati, zona per zona e con cadenza mensile, degli scatter plot tra le due variabili che si volevano mettere in relazione, un esempio dei quali è mostrato Figura 2.26.

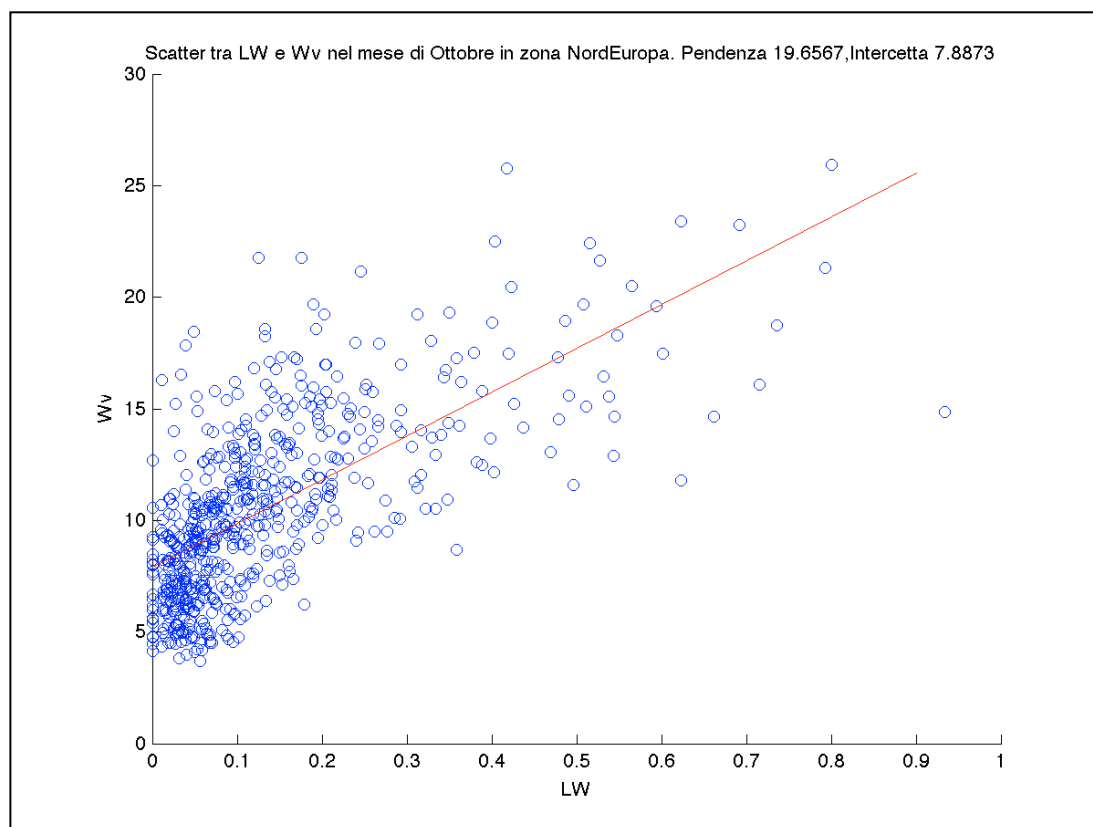


Figura 2.26: Esempio di scatter plot effettuato nella zona nord europea nel mese di ottobre.

Il grafico mostra che, nel mese di ottobre e all'interno della zona Nord europea, per generare il dato di liquido dal dato di vapore si potrebbe applicare ad esempio una legge di proporzionalità (in questo esempio si è scelta una legge lineare).

$$W_v = 19.6567 \cdot LW + 7.8873 \quad (2.3)$$

È stato seguito lo stesso approccio anche per quanto riguarda il calcolo della precipitazione a partire dal dato di liquido sospeso.

2.6 Analisi delle mappe di liquido sospeso e precipitazione

L'approccio originario nello sviluppo del modello consiste nel passare dal dato di vapore a quello di liquido e successivamente dal dato di liquido a quello di precipitazione sfruttando tutte le informazioni statistiche raccolte nella fase di analisi preventiva dei dati. Come già accennato, la strada da intraprendere nello sviluppo del modello sarà quella che porta a generare mappe sintetiche attraverso l'utilizzo di leggi di proporzionalità semplici che mettano in relazione il dato di vapore con quello di liquido sospeso ed il dato di liquido sospeso con quello di precipitazione.

Come accennato nelle sezioni precedenti i primi effetti dell'utilizzo delle leggi di proporzionalità si notano osservando le statistiche del primo ordine di liquido sospeso e precipitazione. Nella sezione seguente si analizzeranno questi effetti attraverso l'ideazione della legge di proporzionalità cubica adottata per il passaggio da vapore a liquido sospeso.

2.6.1 Coefficienti delle leggi di proporzionalità

La ricerca di una legge di proporzionalità che leghi i tre costituenti atmosferici in esame si inserisce nell'ottica del modello proposto in questo lavoro di Tesi. Anche se tale modello sarà descritto in maggior dettaglio nel prossimo capitolo, vale la pena anticipare che la sintetizzazione di mappe di vapore acqueo, liquido sospeso e precipitazioni prevede dapprima la generazione della mappa di vapore e in seguito la sua conversione in mappa di liquido, attraverso le suddette leggi di proporzionalità (quest'ultimo procedimento è applicato anche per la generazione della mappa di precipitazione a partire da quella di liquido).

Come già accennato, gli scatter plot fra vapore e liquido (così come fra liquido e precipitazione) mostrano una marcata dispersione, come indicato in Figura 2.27.

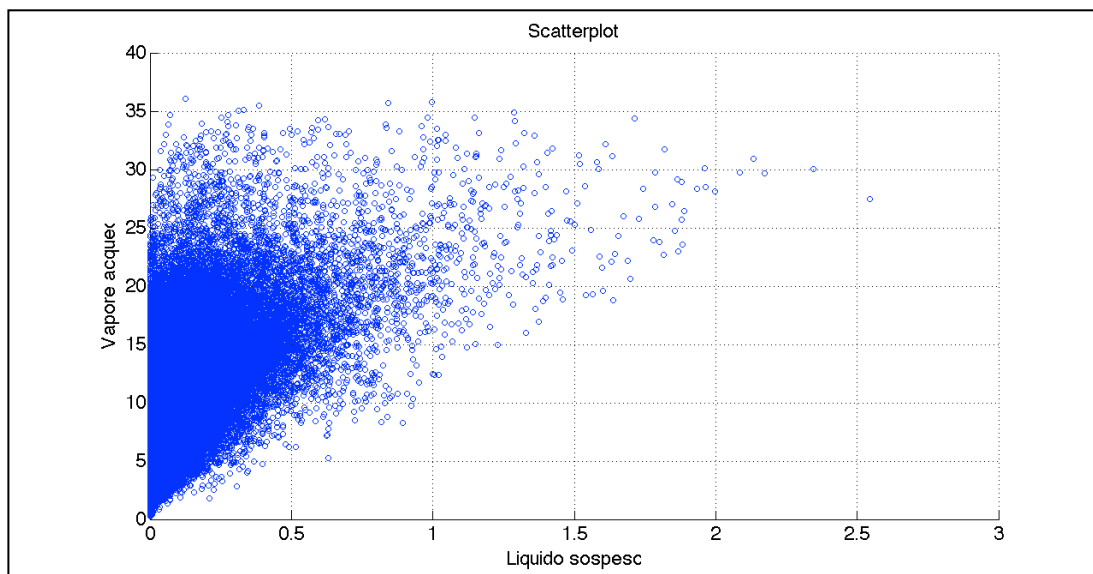


Figura 2.27: Esempio di scatterplot tra liquido sospeso e vapore acqueo sull'intero territorio nel periodo di gennaio.

Tale dispersione, purtroppo, rimane ampia anche se si riduce la scala temporale e si scende a considerare i pixel di una singola mappa (un solo slot temporale), come mostrato in Figura 2.28.

L'analisi dei dati ha dunque evidenziato che, seppur interessante, la suddivisione stagionale descritta nella sezione precedente, non porta a tangibili incrementi della correlazione fra i dati. Al contrario, il concetto di omogeneità climatologica all'interno delle zone descritte nella sezione 2.5.1 ha mostrato una sostanziale riduzione della dispersione negli scatter plot analizzati. In base a ciò, si è deciso dunque di determinare le leggi di proporzionalità limitandosi alla suddivisione dei dati in zone tralasciando invece di considerare la suddivisione in mesi.

In particolare, per la legge di proporzionalità che lega vapore acqueo e liquido sospeso si è utilizzata una funzione cubica, mentre per la legge di proporzionalità che lega liquido sospeso e precipitazione si è utilizzata una funzione di tipo lineare.

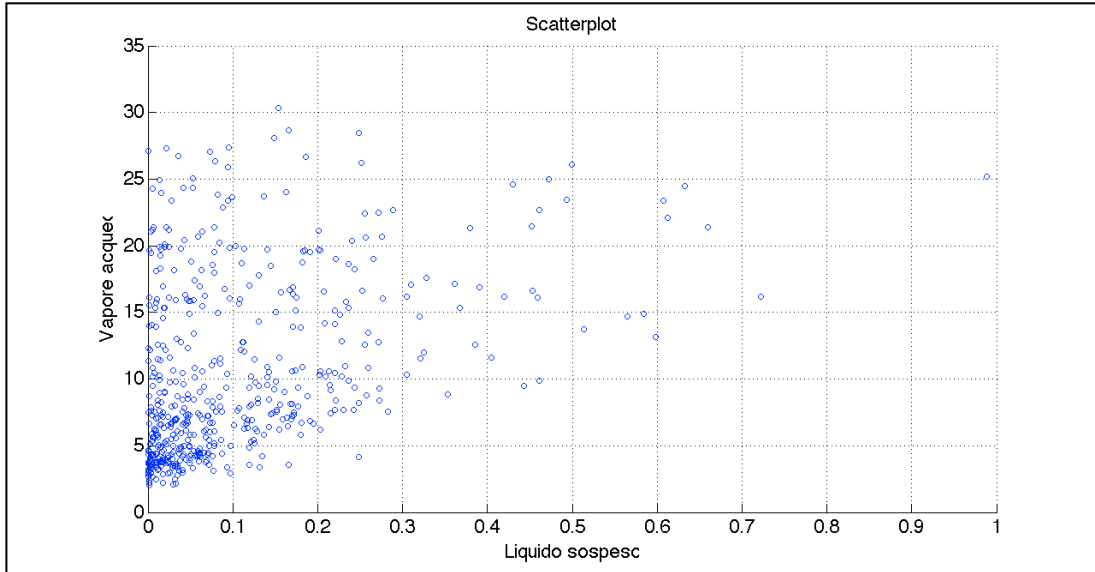


Figura 2.28: Esempio di scatterplot tra liquido sospeso e vapore acqueo sull'intero territorio in un singolo istante.

Il motivo di tali scelte per le leggi di proporzionalità (mostrate nelle (2.4) e (2.5)) verrà approfondito nei paragrafi seguenti.

$$LW_i = a_{zona} \cdot W_{v,i}^3 + b_{zona} \cdot W_{v,i}^2 + c_{zona} \cdot W_{v,i} + d_{zona} \quad (2.4)$$

$$M_{t,i} = LW_i \cdot e_{zona} \quad (2.5)$$

LW_i rappresenta il valore del liquido sospeso nel pixel i , $W_{v,i}$ rappresenta il valore del vapore acqueo generato dal modello nel pixel i mentre $M_{t,i}$ rappresenta il valore della precipitazione nel pixel i . a_{zona} , b_{zona} , c_{zona} e d_{zona} rappresentano i parametri della funzione di proporzionalità (legge cubica) tra vapore e liquido sospeso nella zona alla quale appartiene il pixel i mentre e_{zona} rappresenta il coefficiente di proporzionalità (funzione lineare) tra liquido sospeso e precipitazione.

2.6.2 Legge di proporzionalità tra vapore acqueo e liquido sospeso

Lo studio e la realizzazione della legge di proporzionalità tra vapore acqueo e nubi parte dai dati riportati negli scatter plot (il cui esempio è mostrato in Figura 2.26) in ognuna delle zone dell'area presa in considerazione. Sono state determinate delle classi di vapore di ampiezza crescente all'aumentare del valore di vapore e per ogni classe si è determinato il valor medio di liquido corrispondente a tale classe. A questo punto si è costruito un grafico che riporta in ascissa le classi di vapore ed in ordinata i valori medi del liquido per ogni classe. Si è infine fittata la legge di proporzionalità cubica (esempio mostrato in Figura 2.27) e si sono ricavati i coefficienti della (2.4).

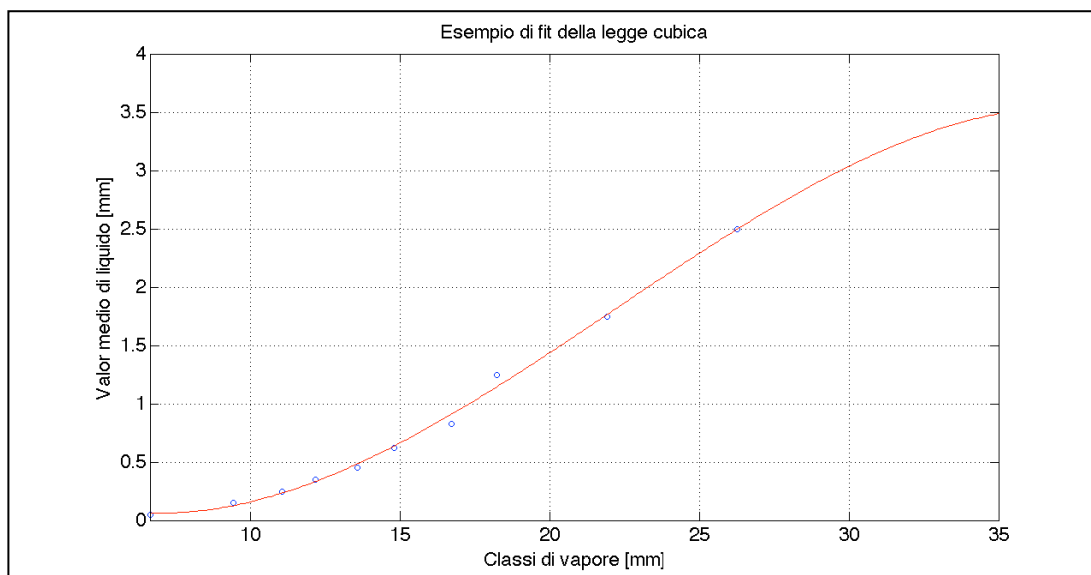


Figura 2.27: Esempio di fit della legge cubica.

Questa operazione è stata ripetuta per tutte e cinque le zone, le cui leggi sono mostrate in Figura 2.28.

Dalla Figura 2.28 si intuisce chiaramente quanto già dimostrato in precedenza con le statistiche del primo ordine. Con queste leggi, che pur riproducono nel migliore dei modi la proporzionalità tra vapore e liquido, non si otterranno mai valori di liquido al di sopra di 2mm poiché il valore massimo di vapore all'interno di un pixel non supererà mai quota 65mm . Inoltre, il profilo di queste leggi unito alla

statistica del primo ordine del vapore, ci anticipa che la maggior parte di pixel avranno un valore di liquido compreso tra $0mm$ e $0.4mm$.

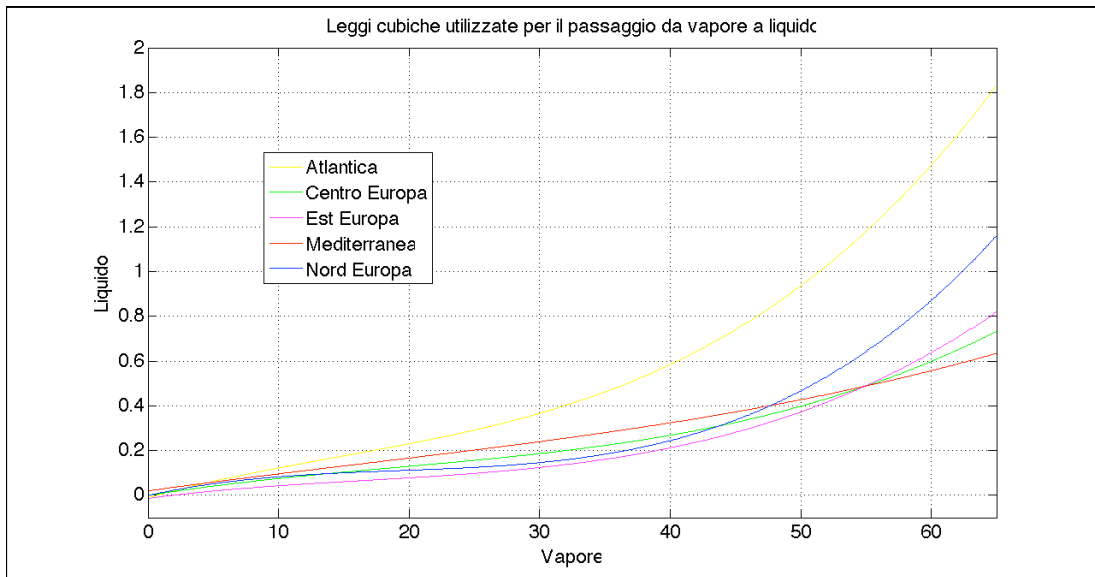


Figura 2.28: Leggi di proporzionalità zona per zona fittate dai dati di vapore e liquido.

Osservando la Figura 2.29 che mostra uno zoom della Figura 2.28 nell'intorno dell'origine si può osservare che la conversione da vapore acqueo a liquido sospeso può produrre pixel con valori negativi di liquido. Tutti i valori al di sotto della soglia pari a $0.01mm$ di liquido sono stati posti a zero.

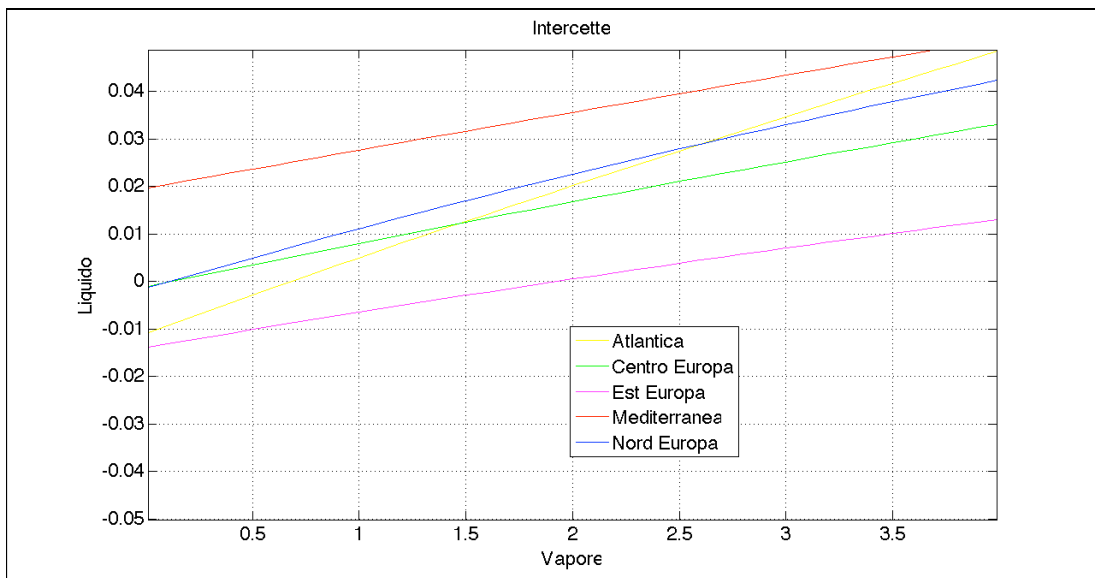


Figura 2.29: Punti di intercetta delle leggi cubiche mostrate in Figura 2.28.

2.6.3 Legge di proporzionalità tra liquido sospeso e precipitazione

Gli effetti di quanto finora mostrato si ripercuotono anche nella generazione delle mappe di precipitazione per via della scelta della legge di proporzionalità tra liquido e precipitazione (legge lineare). Questa scelta è stata determinata da quanto mostrato in questo capitolo nell'analisi dei dati; essa ha evidenziato che la presenza di celle nuvolose determina nello stesso punto la presenza di celle di pioggia. L'esperienza acquisita nello studio delle leggi di proporzionalità tra vapore e liquido ha permesso di capire che portare avanti uno studio analogo alla proporzionalità vapore-liquido anche per la legge che lega il liquido alle precipitazioni avrebbe condotto comunque a risultati non completamente soddisfacenti, per questo motivo ci si è limitati ad utilizzare una legge di proporzionalità lineare in grado di rispettare comunque alcuni aspetti tipici riscontrati nell'analisi dei dati reali. Questi aspetti sono i seguenti:

- Andamento della statistica del primo ordine (esponenziale come per i dati reali);
- Presenza di celle di pioggia laddove sono presenti celle nuvolose;
- Assenza di celle di pioggia laddove c'è assenza di celle nuvolose;
- Assenza di celle di pioggia laddove sono presenti celle nuvolose.

Bisogna altresì evidenziare che, come mostra la statistica del primo ordine, anche la precipitazione è sottostimata. Ciò è diretta conseguenza del fatto che, utilizzando una legge di proporzionalità lineare, si conservano tutte le caratteristiche statistiche riscontrate per le mappe di liquido sintetico. È già stato mostrato che la legge di proporzionalità cubica applicata per il passaggio da vapore a liquido sospeso porta a sottostimare i valori del dato sintetico di liquido e quindi si evince che questo effetto si ottiene anche per il dato sintetico di precipitazione.

Per rispettare la condizione che possano esistere pixel nuvolosi ma non piovosi, nella legge di regressione lineare applicata osservando lo scatter plot tra liquido e precipitazione è stata imposta un'intercetta negativa. Si è calcolato il valore mediano del valore di liquido condizionato all'evento "assenza di precipitazione" per ognuna delle 5 zone considerate; trovato questo valore, si è assunto che al di sotto di

questa soglia di liquido non potesse esserci precipitazione. A questo punto si sono generate rette che rispettassero il vincolo in questione.

Le Figure 2.30 e 2.31 mostrano rispettivamente le leggi di proporzionalità lineare ed un ingrandimento nell'intorno dello zero delle stesse. Dalla Figura 2.29 si evince che anche la precipitazione sarà sottostimata poiché, come già detto, il valore massimo di liquido sospeso generato non supera i $2mm$ (non si ottengono i valori reali di precipitazione mostrati dalla statistica del primo ordine che si assestavano a $30mm$ circa).

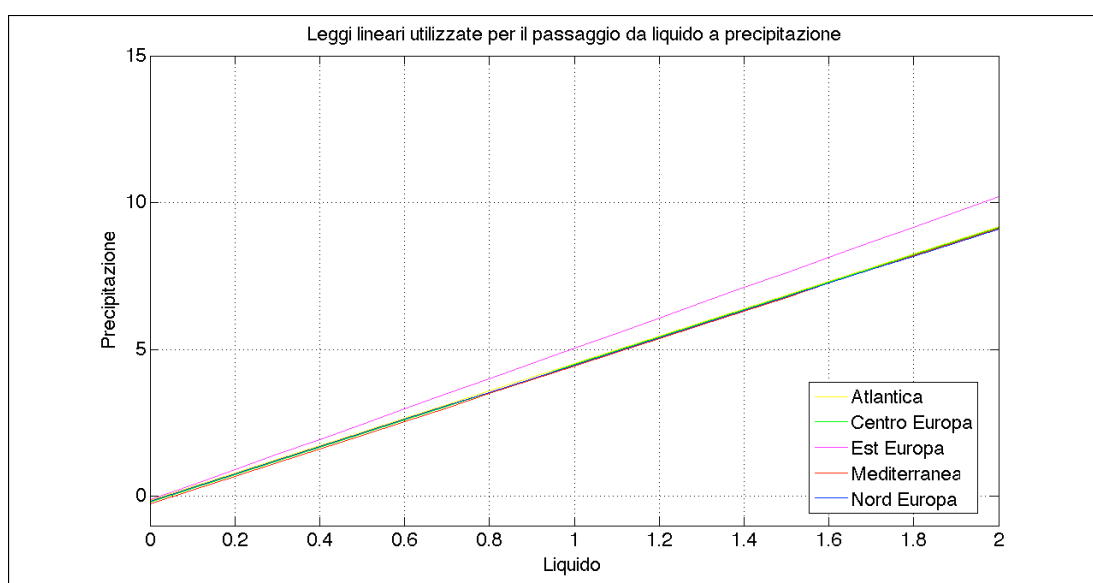


Figura 2.30: Leggi di proporzionalità zona per zona fittate dai dati di liquido e precipitazione.

Come mostrato in Figura 2.31, le intercette hanno tutte valori negativi e quindi impongono che la conversione lineare dia valori negativi al di sotto di un certo valore di liquido. I valori che risultano al di sotto della soglia minima, pari a $0.1mm$ per il dato di precipitazione, vengono posti a zero. In questo modo, coerentemente con il comportamento della zona si potranno avere pixel con presenza di nubi e assenza di precipitazioni.

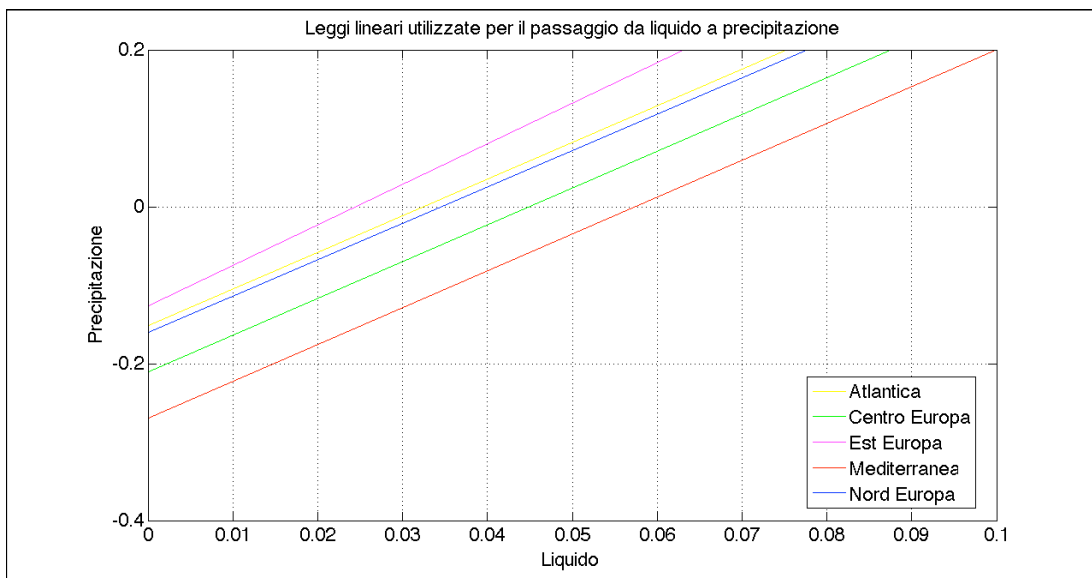


Figura 2.31: Punti di intercetta delle leggi lineari mostrate in Figura 2.29.

Di seguito viene mostrata una tabella riassuntiva dei valori dei coefficienti delle due leggi di proporzionalità utilizzate dal modello per generare le mappe sintetiche di liquido sospeso e precipitazione.

Zona	Cubica				Lineare
	a	b	c	d	
Nord	$9,9 \cdot 10^{-6}$	$-0,57 \cdot 10^{-3}$	$13,1 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	4,1
Centro	$3,58 \cdot 10^{-6}$	$-0,22 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	3,8
Est	$5,21 \cdot 10^{-6}$	$-0,26 \cdot 10^{-3}$	$7,71 \cdot 10^{-3}$	$-13,9 \cdot 10^{-3}$	3,68
Atlantica	$8,85 \cdot 10^{-6}$	$-0,39 \cdot 10^{-3}$	$16,3 \cdot 10^{-3}$	$-10,93 \cdot 10^{-3}$	4,02
Mediterranea	$1,34 \cdot 10^{-6}$	$-6,64 \cdot 10^{-5}$	$8,12 \cdot 10^{-3}$	$19,62 \cdot 10^{-3}$	3,73

Tabella 2.1: Coefficienti utilizzati per le leggi di proporzionalità.

Capitolo 3

Creazione del modello e validazione dei risultati

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di sviluppare un modello in grado di sintetizzare mappe europee di vapore, liquido sospeso e precipitazione, il cui insieme riproduca al meglio le statistiche del primo (distribuzione di probabilità) e del secondo ordine (correlazione spaziale), e preservi la correlazione esistente fra le suddette quantità. A tale scopo sono stati presi in considerazione tutti gli studi statistici effettuati nel capitolo precedente sui dati in possesso quali vapore acqueo, liquido sospeso (o nubi) e precipitazioni.

Come schema generale, il modello genera dapprima mappe di vapore acqueo, che rispettano le statistiche del primo e del secondo ordine del dato ERA-40. In seguito, considerando il legame fra le tre componenti atmosferiche, mostrato nel capitolo precedente, il modello genera mappe di liquido sospeso dalle mappe di vapore ed infine di precipitazione dalle mappe di liquido.

In questo capitolo, dopo avere fatto un breve accenno alle caratteristiche dell'area presa in considerazione, si analizzeranno nel dettaglio i vari passaggi che il modello compie per generare le mappe. In seguito si passerà all'analisi e alla validazione dei risultati.

3.1 Il modello

Le mappe sono matrici di dimensioni 18x30, per un totale di 540 pixel; questi valori sono determinati dal fatto che l'area si estende da 32.5° a 75° di latitudine Nord e da -27.5° di longitudine Ovest a 45° di longitudine Est con una risoluzione di 2.5° per pixel, sia in latitudine, sia in longitudine. Con questi parametri ci si concentra su un'area molto estesa, pari a circa $23.44 \cdot 10^6 km^2$. Nella figura seguente si riporta tale area.

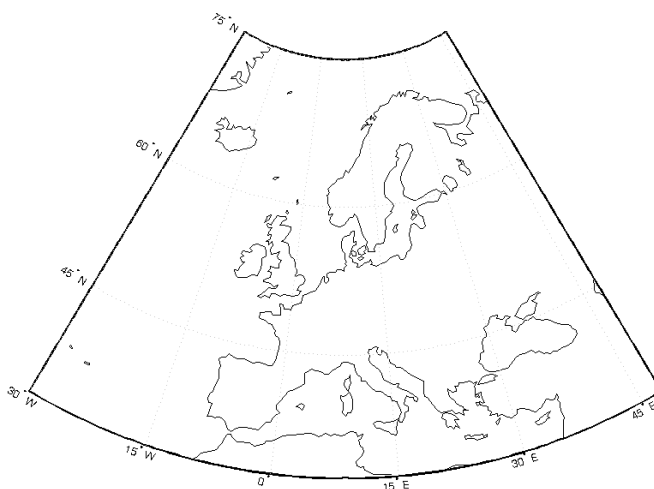


Figura 3.1: Area geografica totale presa in considerazione.

Il metodo seguito per la generazione della mappa di vapore sfrutta le proprietà di correlazione di variabili aleatorie gaussiane. In particolare il metodo consiste nei seguenti passi:

- Si genera un vettore composto da elementi incorrelati avente statistica normale con valor medio nullo e varianza unitaria (il numero di elementi è pari al numero dei pixel che compongono la mappa);
- Si correlano gli elementi del vettore tramite la funzione di correlazione desiderata che viene inserita nella matrice di covarianza
- Si trasforma la statistica del vettore da normale a lognormale;
- Si trasforma il vettore risultante in una matrice avente le dimensioni della mappa che si vuole riprodurre.

Dopo avere descritto alcune operazioni preliminari (quali la normalizzazione della statistica del vapore acqueo e la generazione della matrice delle covarianze), si passerà alla descrizione del modello vero e proprio.

3.1.1 Normalizzazione della statistica del vapore acqueo

Ai fini della generazione della mappa di vapore, è necessario derivare e analizzare le distribuzioni lognormali del vapore pixel per pixel. A tale scopo, per ogni pixel, è stata calcolata la PDF considerando tutti i campioni a disposizione (5 anni) e, in seguito, sono stati determinati il valor medio $\mu = E[\ln(\langle W_v \rangle)]$ e la deviazione standard σ . In Figura 3.2 sono mostrati i 540 valori di μ e σ , per ogni pixel della mappa.

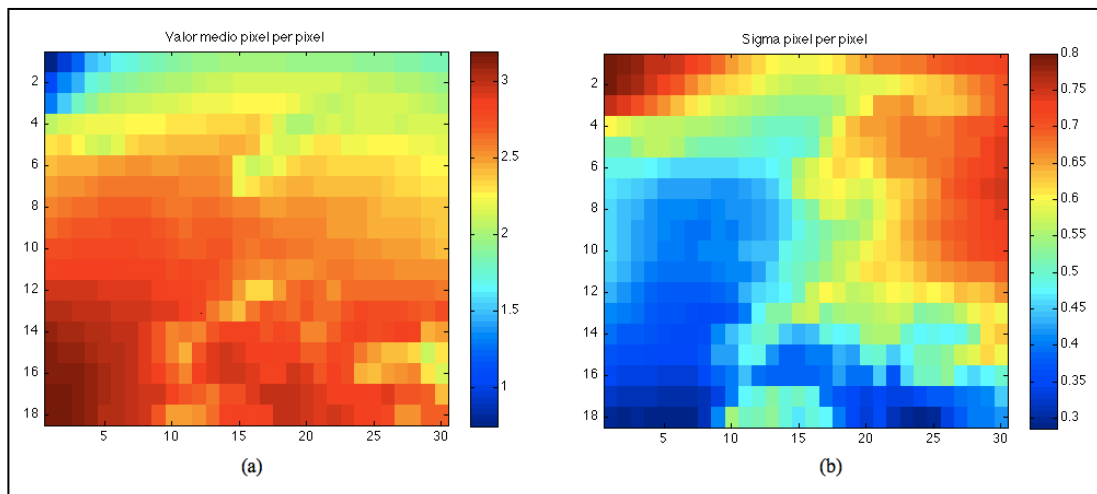


Figura 3.2: Valor medio μ (a) e deviazione standard σ (b) pixel per pixel.

Questi dati sono stati sfruttati per normalizzare le statistiche come mostrato nella (3.1).

$$w_v = \frac{\ln(W_v) - \mu}{\sigma} \tag{3.1}$$

Ciò è necessario per la generazione delle mappe di vapore ed il motivo verrà illustrato in seguito.

3.1.2 Generazione della matrice delle covarianze

Per la generazione delle mappe di vapore, è necessario ricavare dai dati ERA-40 anche la matrice delle covarianze. Essa permette infatti di correlare il valore di vapore di ogni singolo pixel con tutti gli altri pixel della mappa. Se vale l'assunzione di stazionarietà spaziale del dato di vapore è possibile esprimere la funzione di correlazione in sola dipendenza della distanza fra la coppia di pixel considerata. Per determinare la matrice delle covarianze, bisogna dunque passare per la creazione della matrice delle distanze a 3 dimensioni $i j z$ (nel caso specifico 18x30x540). Ognuna delle z matrici di dimensione $i j$ conserva la distanza di ogni singolo pixel con tutti gli altri pixel della mappa. Ad esempio, ogni elemento della matrice 1 riporterà il valore della distanza che intercorre tra il pixel in posizione 1,1 e tutti gli altri pixel della mappa.

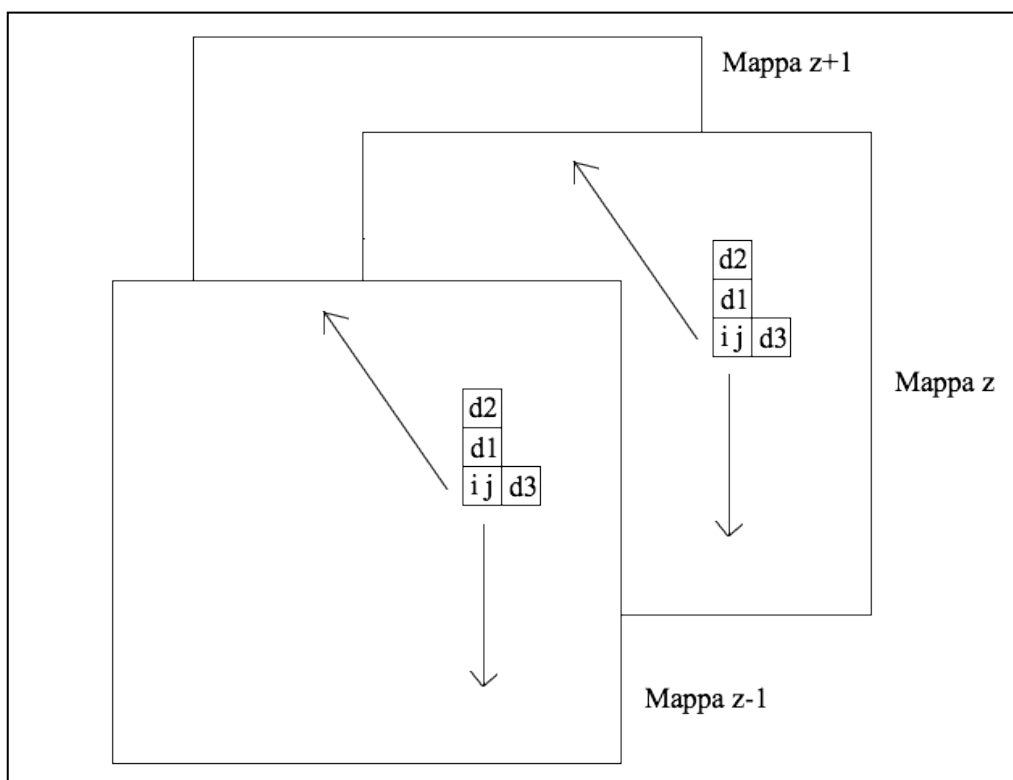


Figura 3.3 Esempio di matrice delle distanze a 3 dimensioni.

Come mostrato in Figura 3.3, la mappa z è riferita al pixel $i j$ (in cui $i j=z$ se si conta i pixel di ogni singola mappa da 1 a 540). Il pixel $i j$ della mappa z avrà valore nullo,

mentre d_1 , per via della sfericità della terra, sarà leggermente maggiore di d_3 e così via.

A questo punto, per le varie coppie di pixel (considerando la loro distanza) si costruisce la matrice della covarianza, partendo dalla funzione di correlazione (2.1) definita nel Capitolo 2 per il vapore acqueo. Si ottiene così la matrice delle correlazioni a 3 dimensioni. La matrice z a due dimensioni rappresenta la correlazione esistente tra il pixel $i j$ (in cui $i j=z$ se si conta i pixel di ogni singola mappa da 1 a 540) e gli altri pixel della mappa. Infine, la matrice delle covarianze si ottiene moltiplicando a ρ_{ij} il σ_i^2 corrispondente ed a ρ_{ij} la quantità $\sigma_i \cdot \sigma_j$ corrispondente. ρ_{ij} rappresenta l'elemento $i j$ della matrice delle correlazioni, mentre σ_i rappresenta la sigma della statistica del pixel i -esimo mostrata nel paragrafo precedente. Di seguito è mostrata l'espressione.

$$c(i, j, z) = \rho(i, j, z) \cdot \sigma_z \cdot \sigma_{((j-1) \cdot 18 + i)} \tag{3.2}$$

Il passo successivo consiste nel riordinare la matrice delle covarianze a 3 dimensioni in una matrice bidimensionale e simmetrica avente dimensione 540x540, in cui l'elemento $i i$ riporta la varianza di ogni singolo pixel mentre l'elemento $i j$ riporta le covarianze esistenti tra pixel. La struttura della matrice delle covarianze è mostrata di seguito.

$$\underline{\underline{C}} = \begin{bmatrix} \text{var}(p_1) & \text{cov}(p_1, p_2) & \cdots & \text{cov}(p_1, p_{540}) \\ \text{cov}(p_2, p_1) & \text{var}(p_2) & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}(p_{540}, p_1) & \cdots & \cdots & \text{var}(p_{540}) \end{bmatrix} \quad \text{dimensione } 540 \times 540 \tag{3.3}$$

La procedura appena descritta richiede che il processo “vapore acqueo” sia spazialmente stazionario. Nel caso in cui questa condizione non si dovesse verificare, diventa necessario effettuare uno studio più specifico calcolando la matrice della covarianza tra ogni coppia di pixel che compongono la mappa.

In questo caso non è necessario utilizzare la matrice delle distanze, infatti si prende in considerazione direttamente la matrice a tre dimensioni del dato di vapore. Si preparano 540 vettori riga di lunghezza pari al numero degli istanti che si vogliono

considerare (nel caso specifico 7308). Il vettore i -esimo (con $i=1,2,\dots,540$) porterà nell'elemento j (con $j=1,2,\dots,7308$) il valore del vapore assunto nel pixel i all'istante j . A questo punto si calcola il coefficiente di correlazione tra tutte le coppie di vettori (si ricorda che rappresentano i 540 pixel che compongono la mappa) e si compone la matrice simmetrica delle correlazioni di dimensione 540×540 (z, k).

Per produrre la matrice delle covarianze si deve moltiplicare agli elementi posti sulla diagonale della matrice delle correlazioni il valore di σ corrispondente elevato al quadrato, mentre per gli altri elementi si moltiplica il valore di $\sigma_z \cdot \sigma_k$. In altre parole si applica la (3.4).

$$c(z, k) = \rho(z, k) \cdot \sigma_z \cdot \sigma_k \quad (3.4)$$

La matrice delle covarianze così creata è più specifica alla zona considerata e alle sue caratteristiche di correlazione spaziale e per questi motivi considera le caratteristiche specifiche del processo “vapore acqueo” senza chiedersi se esso sia spazialmente stazionario o meno.

L'approccio appena descritto è stato applicato a questo modello perché il processo “vapore acqueo” sembra non essere spazialmente stazionario, come si evince dalla Figura 2.1 del capitolo 2 che mostra la variabilità della correlazione spaziale tra pixel alla stessa distanza.

3.1.3 Generazione della mappa di vapore

Di seguito vengono mostrati tutti i passaggi eseguiti dal modello per generare una mappa di vapore acqueo.

In ingresso al modello vengono forniti i seguenti dati:

- tutte le medie e le varianze delle statistiche di vapore descritte nel paragrafo 3.1.1;
- la matrice di covarianza descritta nel paragrafo 3.1.2
- tutti i parametri di conversione o coefficienti delle leggi che regolano la proporzionalità tra vapore e liquido e tra liquido e precipitazione per tutte e cinque le zone (vedi Tabella 2.1 nel capitolo 2);
- Le 5 zone definite all'interno dell'area considerata.

La generazione di una mappa di valori gaussiani standard correlati spazialmente passa attraverso la decomposizione di Cholesky [20].

In algebra lineare la decomposizione di Cholesky è la fattorizzazione di una matrice hermitiana (matrice a valori complessi che coincide con la propria trasposta coniugata) definita positiva, in una matrice triangolare inferiore e nella sua trasposta coniugata. Essa si può considerare come un caso speciale della più generale decomposizione LU [21] o decomposizione LUP o decomposizione di Doolittle che non è altro che una decomposizione di una matrice in una matrice triangolare inferiore L, una matrice triangolare superiore U e una matrice di permutazione P. Nel caso specifico, la decomposizione di Cholesky viene effettuata sulla matrice delle covarianze, mostrata nel paragrafo 3.1.2, che è una matrice quadrata, reale e simmetrica. Essa viene decomposta nel prodotto di due matrici triangolari, una inferiore e l'altra, che ne è la trasposta, superiore:

$$\underline{\underline{A}} = chol(\underline{\underline{C}}) \quad (3.4)$$

$$\underline{\underline{A}}^T \cdot \underline{\underline{A}} = \underline{\underline{C}} \quad (3.5)$$

Questo metodo, oltre che rappresentare un caso specifico della decomposizione LU (che ha in più una matrice di permutazione), risulta due volte più efficiente. La decomposizione di Cholesky fa parte della famiglia dei metodi statistici non parametrici. È utile per superare i problemi computazionali legati ai test esatti (ad

esempio i metodi basati sulla distribuzione binomiale e calcolo combinatorio, che per grandi campioni generano un numero di permutazioni eccessivo).

Alla matrice generata dalla decomposizione di Cholesky A^T si applica il vettore z di v.a gaussiane standard tra loro incorrelate. In Figura 3.4 è mostrato il vettore e la sua statistica.

$$\underline{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

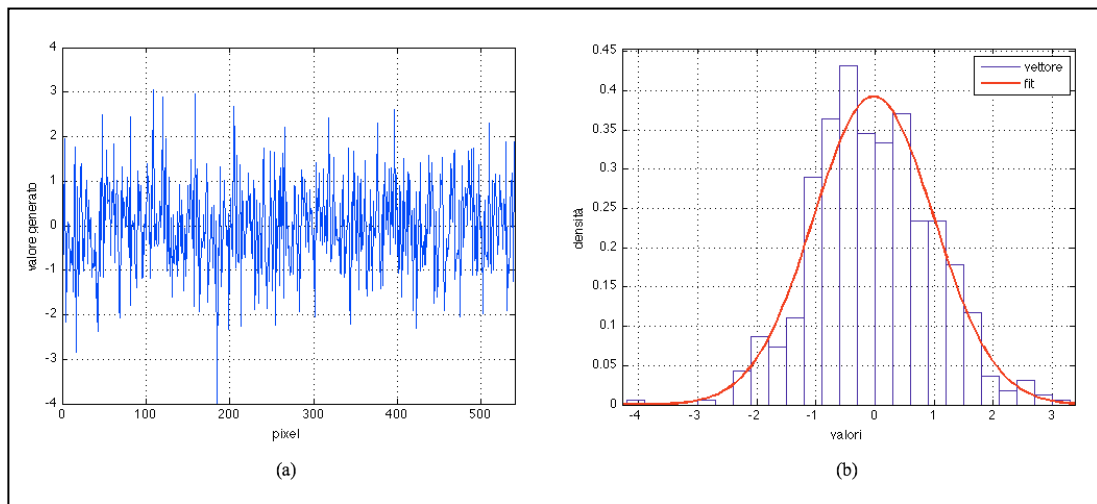


Figura 3.4: Andamento del vettore incorrelato pixel per pixel (a) e sua statistica (b).

Moltiplicando la matrice ottenuta dalla decomposizione di Cholesky per il vettore z si ottiene un vettore ancora una volta con statistica normale standard ma, questa volta, con elementi tra loro correlati secondo la matrice di covarianza fornita in ingresso alla procedura. È in questo modo che, nella generazione della mappa di vapore, si tiene traccia della funzione di correlazione spaziale estrapolata dai dati reali.

$$\underline{t} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_1 \\ \vdots \\ t_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ z_1 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

In Figura 3.5 sono mostrati i valori del vettore z incorrelato (sinistra) e quelli del vettore t correlato (destra) entrambi riordinati in modo da formare la mappa.

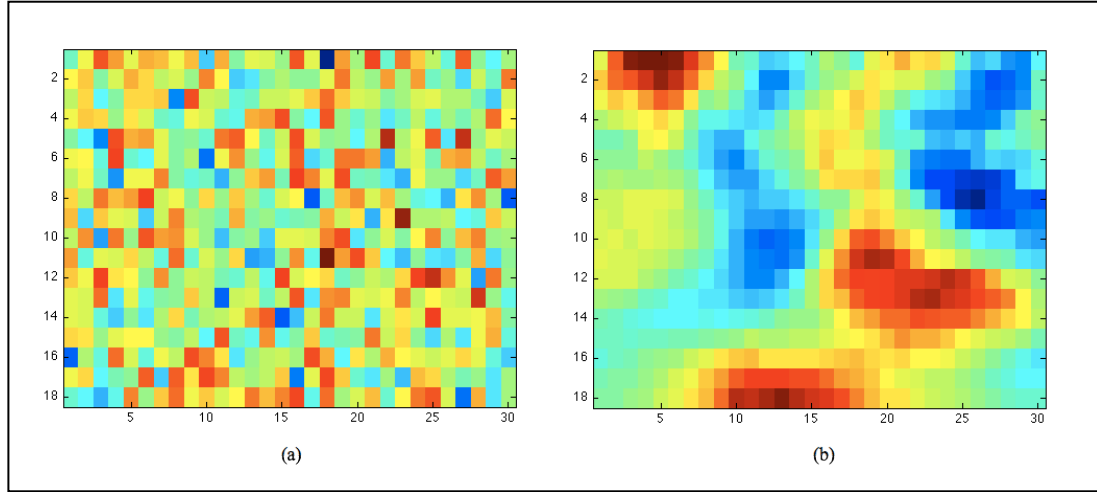


Figura 3.5: vettore z (a) e t (b) riordinati.

A questo punto è necessario invertire la trasformazione (3.1) operata nella sezione 3.1.1, ossia di normalizzare i valori del vettore t . Come descritto in [22] è possibile trasformare un campo gaussiano normale standard in un campo con statistica lognormale nel modo mostrato dalla (3.8)

$$L(x,y) = \psi(g(x,y)) = 0 \quad \text{per } g(x,y) < \alpha \quad (3.8)$$

$$L(x,y) = \psi(g(x,y)) = \exp\left(\mu + \sqrt{2}\sigma \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{\operatorname{erfc}(g(x,y)/\sqrt{2})}{P_0}\right)\right) \quad \text{per } g(x,y) \geq \alpha \quad (3.9)$$

dove la funzione erfc è la “funzione di errore complementare” e α rappresenta la soglia minima del valore di vapore acqueo. La soglia è determinata dalla (3.10).

$$\alpha = \sqrt{2}\operatorname{erfc}^{-1}(2P_0) \quad (3.10)$$

P_0 rappresenta la probabilità che il vapore acqueo sia presente (in termini spaziali, rappresenta la copertura). Da quanto mostrato nel capitolo 2 si può affermare che P_0 è pari a 1 (il vapore è sempre presente), e quindi la soglia α risulta pari a $-\infty$. Ciò ci porta ad escludere il caso in cui $g(x,y) < \alpha$.

Concentrandoci ora sulla (3.9) e sostituendo in essa $P_0=1$, si ottiene la più semplice relazione:

$$G(x,y) = \exp(\mu + \sigma g(x,y)) \quad (3.11)$$

che rappresenta il passaggio inverso fatto per normalizzare il campo di vapore con statistica lognormale dei dati reali mostrato nella (3.1), in cui $g(x,y)$ rappresenta w_v , mentre $G(x,y)$ rappresenta W_v . Un esempio del risultato del passaggio dalla statistica normale correlata (Figura 3.5(b)) a statistica lognormale correlata è mostrato in Figura 3.6.

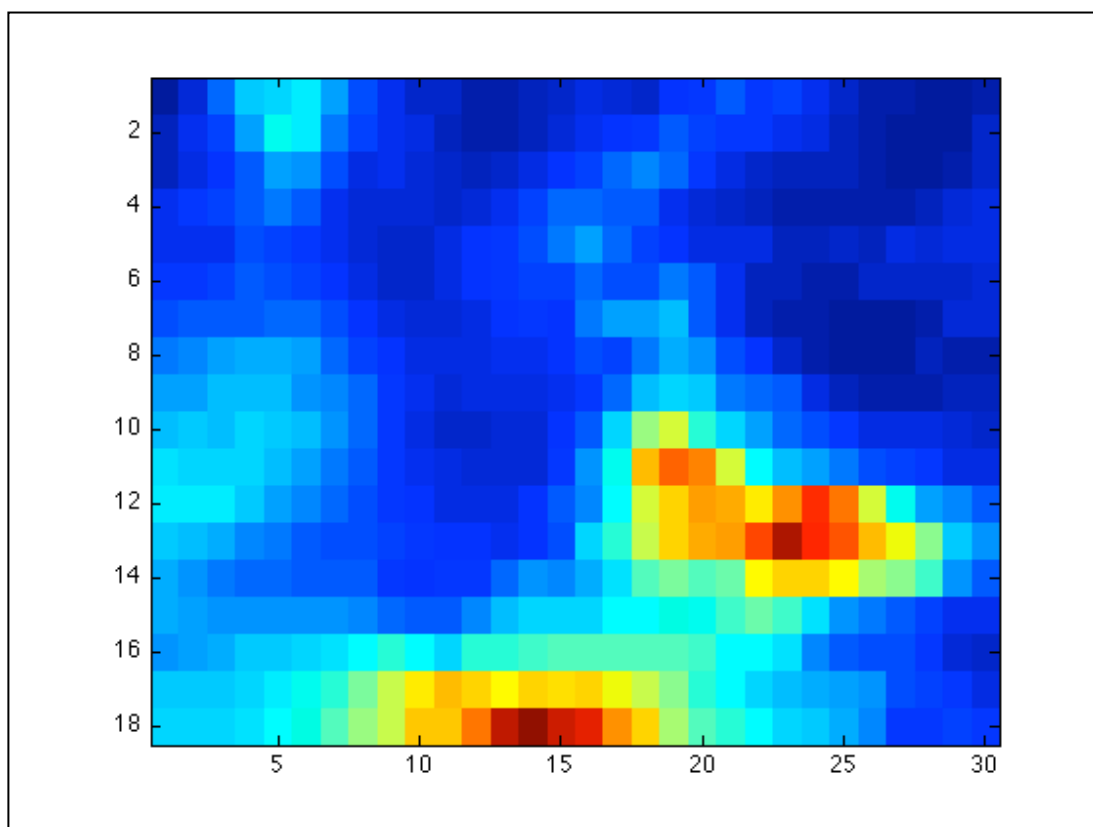


Figura 3.6: Risultato della denormalizzazione della statistica rappresentata in Figura 3.5(b).

Poiché l'interesse di questo lavoro di tesi è quello di generare una mappa di dimensioni $m \times n$ sull'area del continente europeo mostrata in Figura 3.1, non resta che assegnare i valori riportati in figura 3.6 alle coordinate di latitudine e longitudine dell'area di interesse, ottenendo il campo in Figura 3.7.

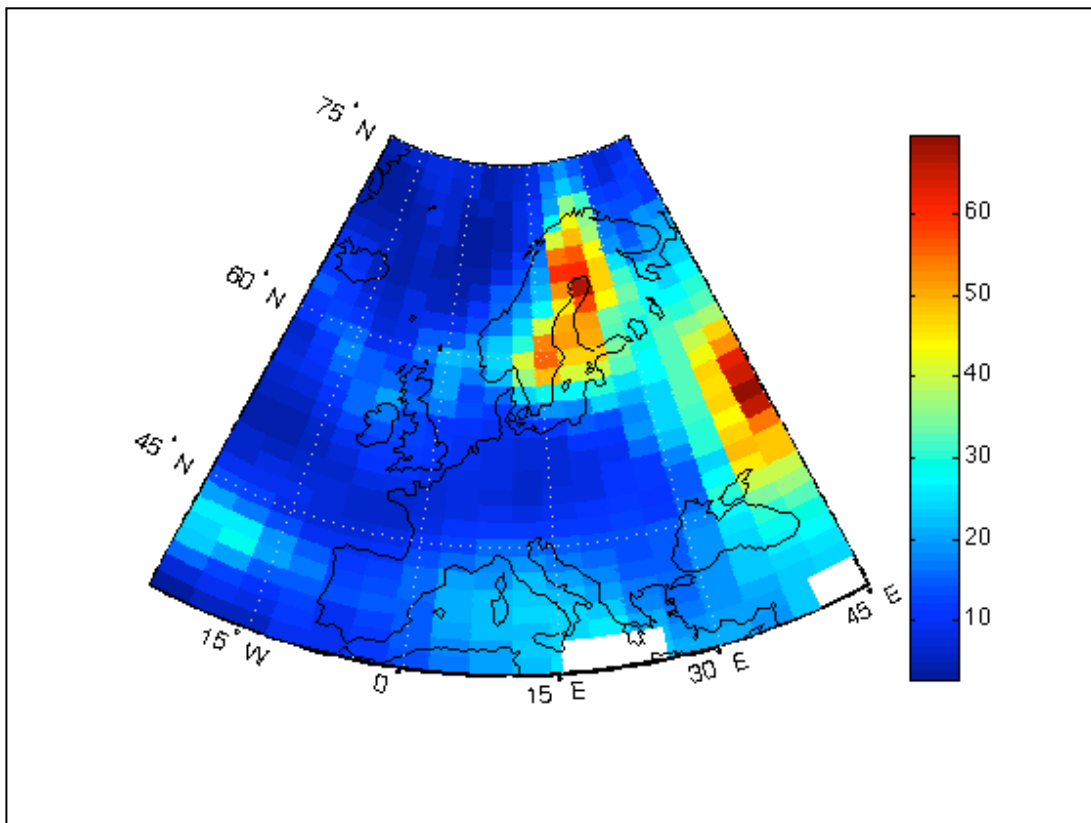


Figura 3.7: Esempio di mappa di vapore acqueo generata dal modello.

3.1.4 Schema a blocchi riassuntivo per la generazione della mappa di vapore

In questo paragrafo si fornirà lo schema a blocchi che mostra la sequenza completa dei passaggi eseguiti per generare la mappa sintetica di vapore acqueo. La parte prettamente inerente alla generazione della mappa sintetica (ultimi quattro blocchi dello schema) è preceduta da una fase preliminare (primi 4 blocchi) alla quale il modello stesso non può prescindere:

- creazione della matrice delle covarianze;
- decomposizione di Cholesky della matrice delle covarianze C ;
- calcolo e caricamento della matrice derivante dalla decomposizione di Cholesky;
- caricamento della matrice che definisce le 5 zone del continente.

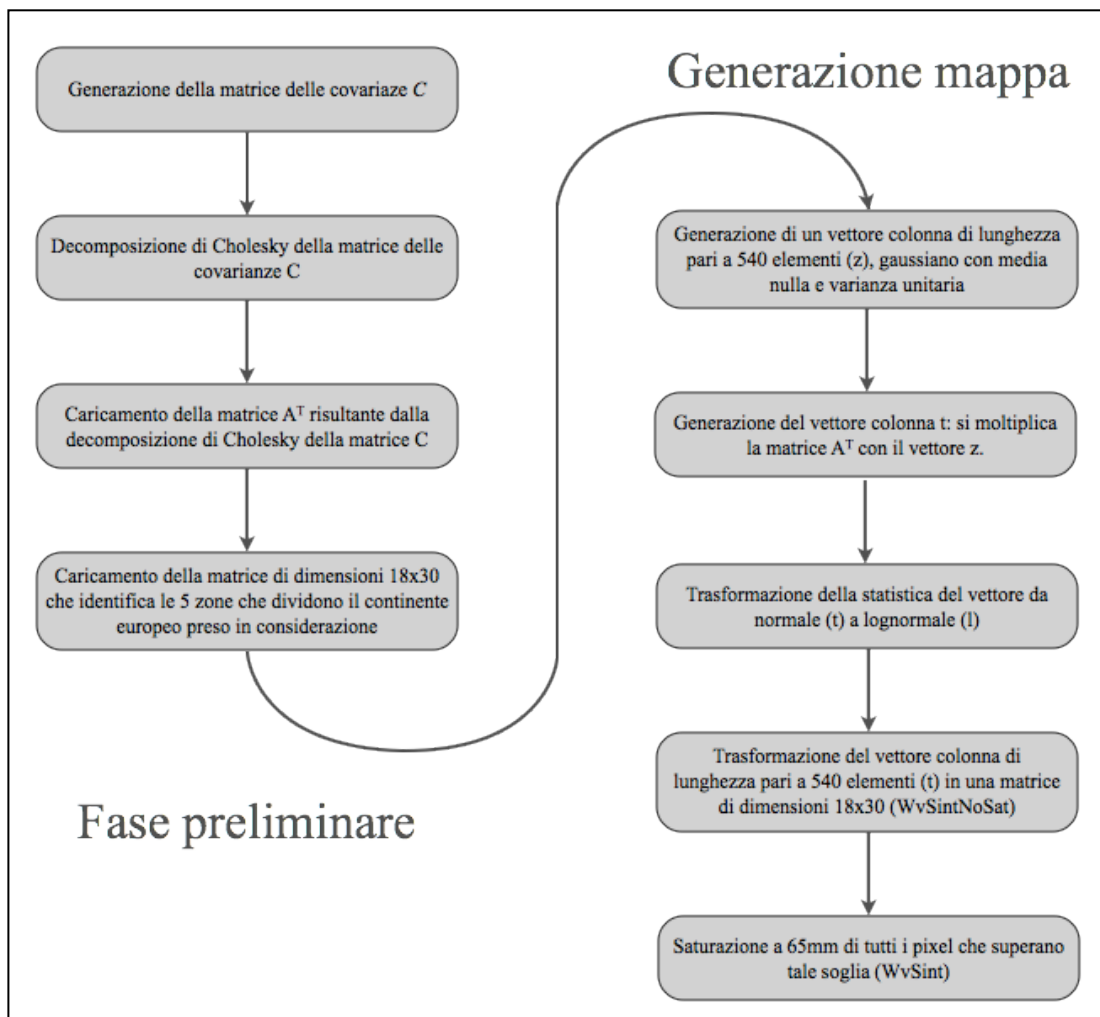


Figura 3.8: Schema a blocchi della generazione della mappa di vapore acqueo.

3.1.5 Generazione della mappa di liquido sospeso e di pioggia

La mappa di vapore acqueo sintetica risulta il punto di partenza per generare le corrispondenti mappe di liquido sospeso (nubi o liquido non precipitato) e di precipitazioni. Si sfrutta l’informazione data dalla matrice che identifica le 5 zone, (Tabella 2.1) caricata in ingresso al modello per determinare i punti in cui applicare le funzioni di proporzionalità tra vapore e liquido sospeso e, successivamente, tra liquido e precipitazioni.

Il tutto avviene controllando uno alla volta la posizione del pixel e, una volta individuata la sua zona di appartenenza, si applica la (2.3) per passare da vapore a nubi e successivamente la (2.4) per passare da nubi a precipitazioni, secondo quanto

ricavato dallo studio dei dati reali mostrato nel capitolo 2. Di seguito vengono riproposte le due leggi di proporzionalità utilizzate.

$$LW_i = a_{zona} \cdot W_{v,i}^3 + b_{zona} \cdot W_{v,i}^2 + c_{zona} \cdot W_{v,i} + d_{zona} \quad (3.12)$$

$$M_{t,i} = LW_i \cdot e_{zona} \quad (3.13)$$

Come già accennato nel capitolo 2, LW_i rappresenta il valore del liquido sospeso nel pixel i , $W_{v,i}$ rappresenta il valore del vapore acqueo generato dal modello nel pixel i mentre $M_{t,i}$ rappresenta il valore della precipitazione nel pixel i . a_{zona} , b_{zona} , c_{zona} e d_{zona} rappresentano i parametri della funzione di proporzionalità (legge cubica) tra vapore e liquido sospeso nella zona alla quale appartiene il pixel i mentre e_{zona} rappresenta il coefficiente di proporzionalità (funzione lineare) tra liquido sospeso e precipitazione.

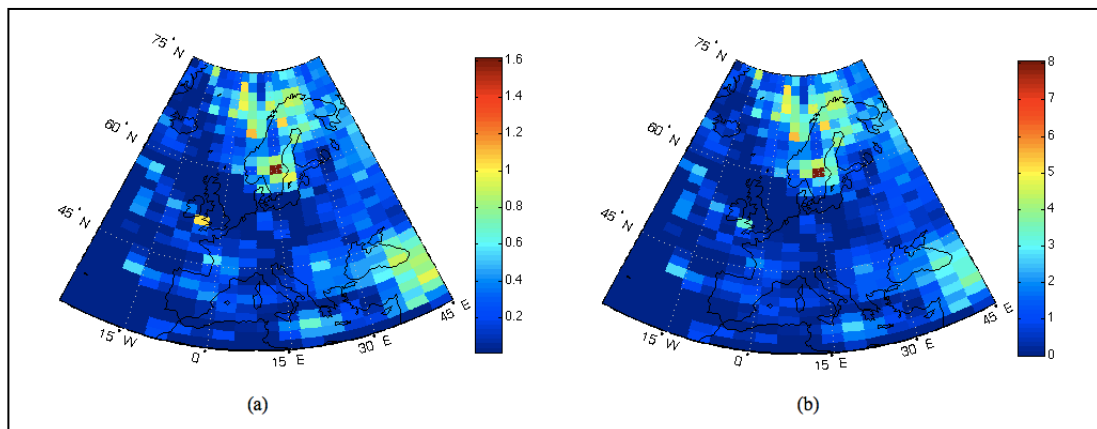


Figura 3.8: Esempi di mappa di liquido sospeso (a) e mappa di precipitazione (b) generate dal modello.

In Figura 3.8 è mostrato il risultato ottenuto dalla generazione della mappa di nubi e della mappa di precipitazione. Si identificano in blu i pixel in cui vi è assenza del dato. Entrambe le mappe sono riferite allo stesso istante e si può notare la coerenza spaziale tra i due dati generali nonché i valori raggiunti da entrambi i dati (espressi in mm e mm/h rispettivamente).

3.2 Validazione dei risultati

In questa sezione si metteranno a confronto i risultati ottenuti dalle mappe sintetiche generate e dalle mappe ERA-40 originali. Si compareranno le statistiche del primo ordine e la correlazione spaziale dei tre dati presi in considerazione in questo lavoro di tesi, quali vapore acqueo, liquido sospeso (nubi) e precipitazioni a larga scala.

3.2.1 Mappe sintetiche di vapore acqueo

In questo paragrafo si analizzeranno i risultati ottenuti dalle mappe sintetiche di vapore acqueo.

Innanzitutto si mostra la statistica del dato di vapore generato sinteticamente in un periodo di 5 anni (la stessa durata del periodo preso in considerazione nell'analisi dei dati reali). Le 7308 mappe sono ovviamente di dimensione 18x30 e hanno prodotto la statistica mostrata in Figura 3.9 (tutti i valori di vapore nello spazio e nel tempo).

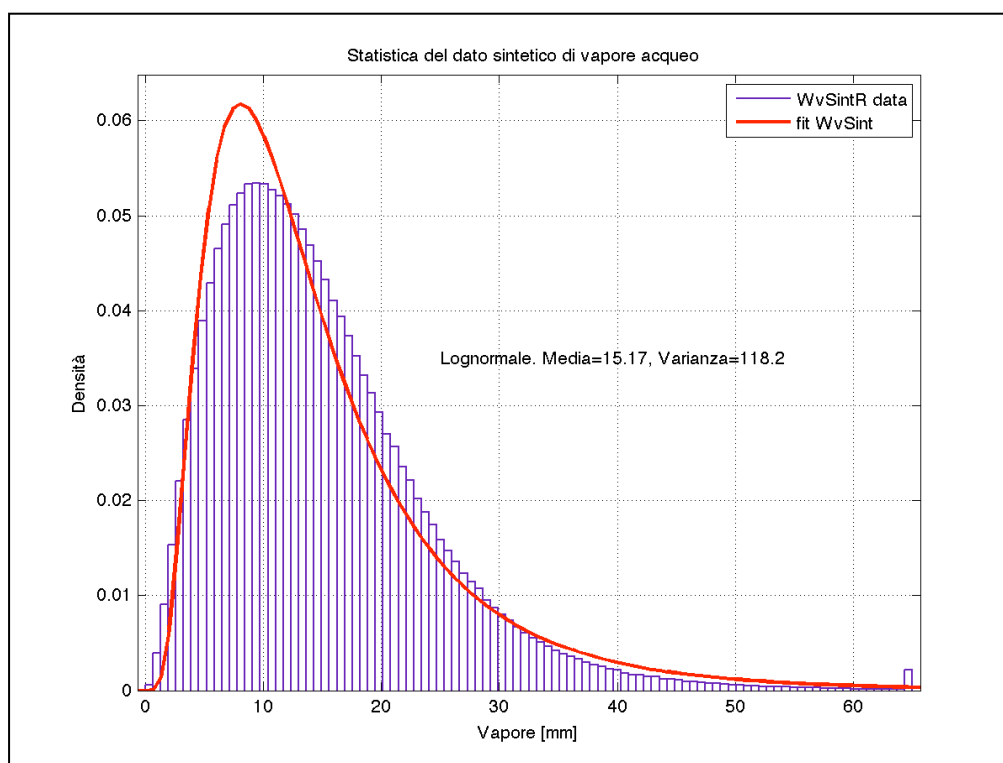


Figura 3.9: Statistica del dato sintetico di vapore acqueo.

La statistica del primo ordine risultante dal modello è lognormale, i valori di media e varianza sono molto simili a quelli del dato reale. Infatti i valori di media e varianza del dato reale del vapore acqueo si assestavano rispettivamente su valori pari a $15,17mm$ e $114,67mm^2$. Di seguito viene proposta una figura che mette a confronto diretto le due statistiche.

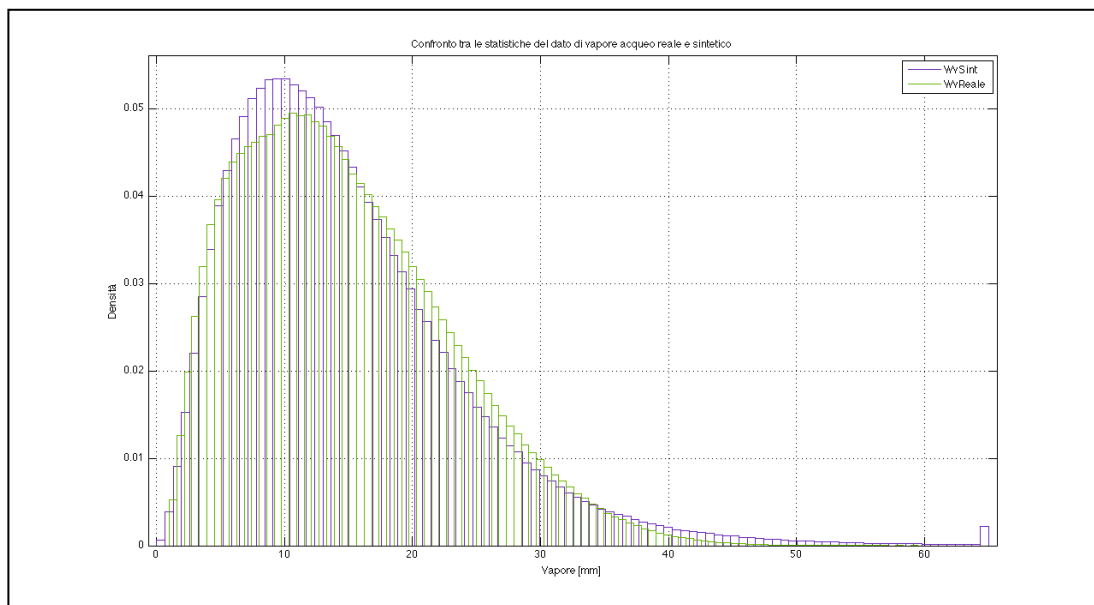


Figura 3.10: Confronto tra statistica del dato reale (verde) e sintetico (blu).

Nello 0.13% dei casi, il generatore casuale produce un effetto non realistico sul valore del pixel sintetico di vapore: in questi casi si hanno dei livelli di vapore acqueo abbondantemente al di sopra di quelli rilevati nei dati reali. Per questo motivo si è deciso di saturare tali valori ad una soglia imposta, pari a $65mm$ (soglia che corrisponde al livello più alto riscontrato nell’analisi dei dati reali). La statistica del dato sintetico ne riporta il risultato: si ottiene un picco in concomitanza con il valore di $65mm$ proprio per l’effetto della saturazione.

Passando alla correlazione spaziale del vapore, è utile ricordare a questo punto che le mappe sintetiche sono state generate usando come ingresso la matrice di covarianza calcolata come descritto nel paragrafo 3.1.3 (non stazionarietà del processo). Il grafico di confronto tra la correlazione spaziale risultante dal dato reale e dal dato sintetico è mostrato in Figura 3.11.

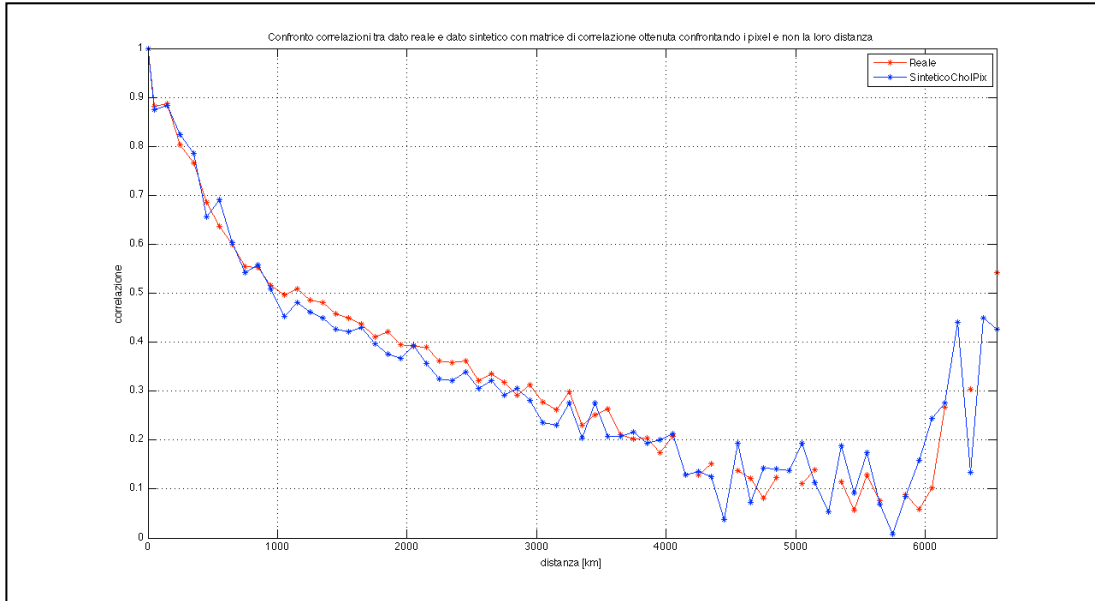


Figura 3.11: Confronto tra la correlazione spaziale del dato di vapore reale (rosso) e il dato di vapore sintetico (blu).

In ascissa vi sono le distanze, in ordinata il valore di correlazione. Come si può notare, il modello (linea blu) riproduce accuratamente l'andamento della correlazione spaziale media del dato di vapore reale (linea rossa). La correlazione è pari a 0.1 intorno ai 4000km in entrambi i casi e l'andamento è già dalle piccole distanze pressoché identico. Entrambe le funzioni di correlazione mostrate rappresentano l'andamento medio della funzione di correlazione che, in entrambi i casi, risulta molto variabile. Quanto detto è mostrato in Figura 3.12.

Il dato sintetico mostra la stessa variabilità emersa nell'analisi della correlazione spaziale del dato reale. Questa è una ulteriore conferma della bontà del modello così concepito per la generazione del dato sintetico di vapore acqueo.

Quanto mostrato in Figura 3.12 fornisce un'importante indicazione: la stessa coppia di pixel presenta un valore di correlazione molto variabile chiarendo quindi il fatto che il processo "vapore acqueo" non è spazialmente stazionario.

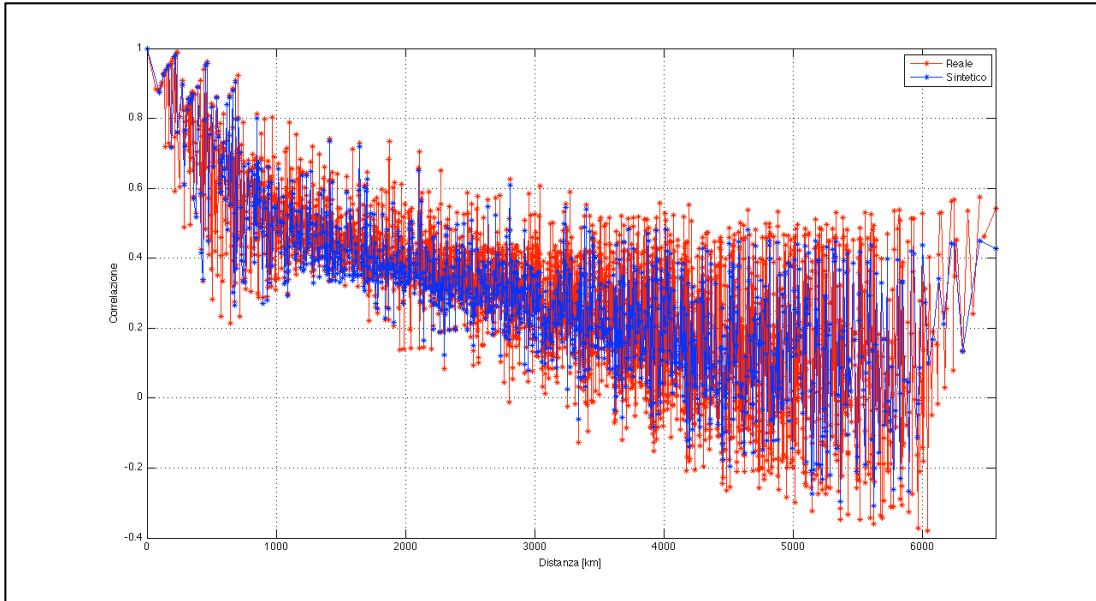


Figura 3.12: Confronto tra le correlazioni spaziali del dato reale e del dato di vapore.

3.2.2 Mappe sintetiche di liquido sospeso

In questo paragrafo si analizzeranno i risultati ottenuti nella generazione della mappa di liquido sospeso.

Viene mostrata in Figura 3.13 la statistica del dato di liquido generato sinteticamente in un periodo di 5 anni (tutti i valori di liquido sospeso nello spazio e nel tempo).

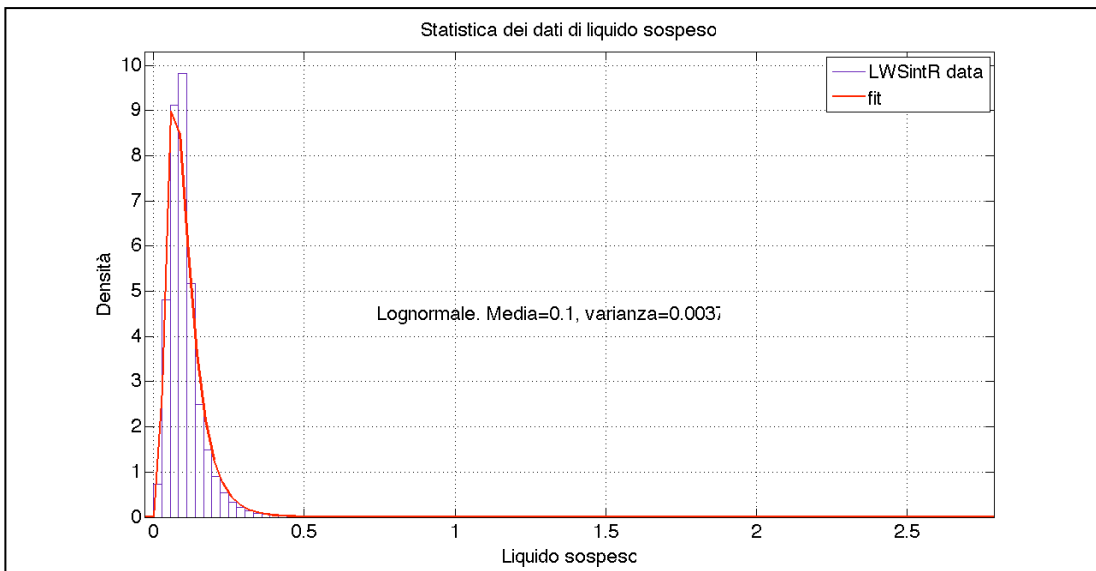


Figura 3.13: Statistica del dato sintetico di liquido sospeso.

Il fit della statistica è lognormale ed i valori di media e varianza sono rispettivamente pari a 0.1 e 0.0037. Di seguito viene proposto un grafico riassuntivo che mette a confronto diretto le due statistiche.

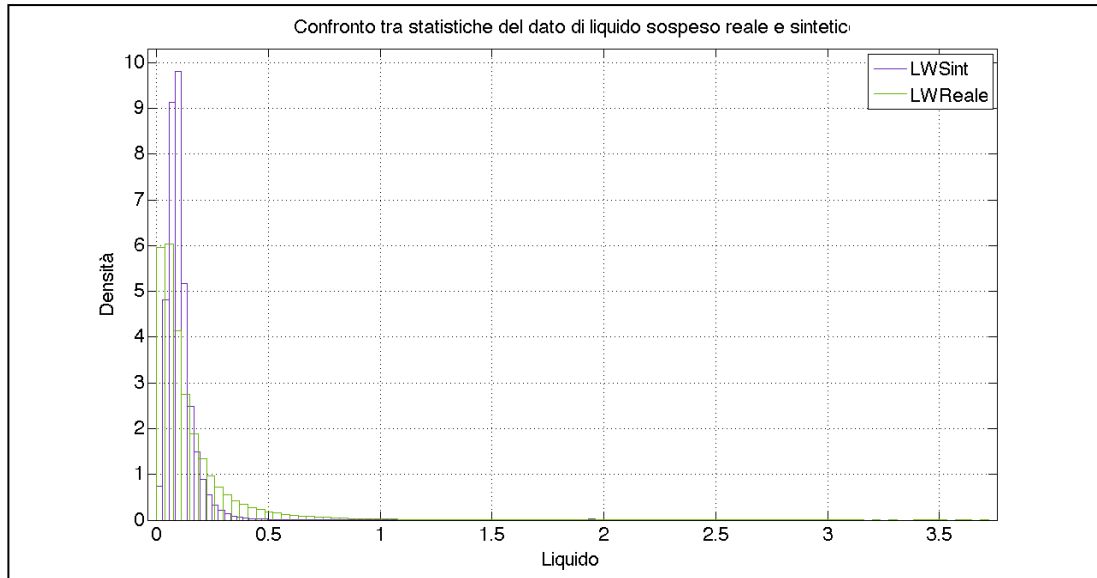


Figura 3.14: Confronto tra statistica del dato reale (verde) e sintetico (blu).

Si può notare che, utilizzando il metodo riproposto dalla (3.12) nel paragrafo 3.1.4 (legge di proporzionalità cubica) per passare da vapore a liquido, si ottiene sempre una statistica lognormale ma con parametri diversi. Il valor medio è inferiore poiché passa da 0.14 a 0.1, così come la varianza che passa da 0.037 a 0.0037. Quanto detto si traduce nelle seguenti osservazioni:

- I valori di liquido sintetico sono più spesso compressi nell'intervallo $0.01mm \div 0.5mm$;
- Il valore massimo registrato si attesta intorno ai $2.5mm$.

La Figura 3.15 riporta il confronto della correlazione spaziale del liquido sospeso, derivata dalle mappe reali (rosso) e dalle mappe sintetiche (blu).

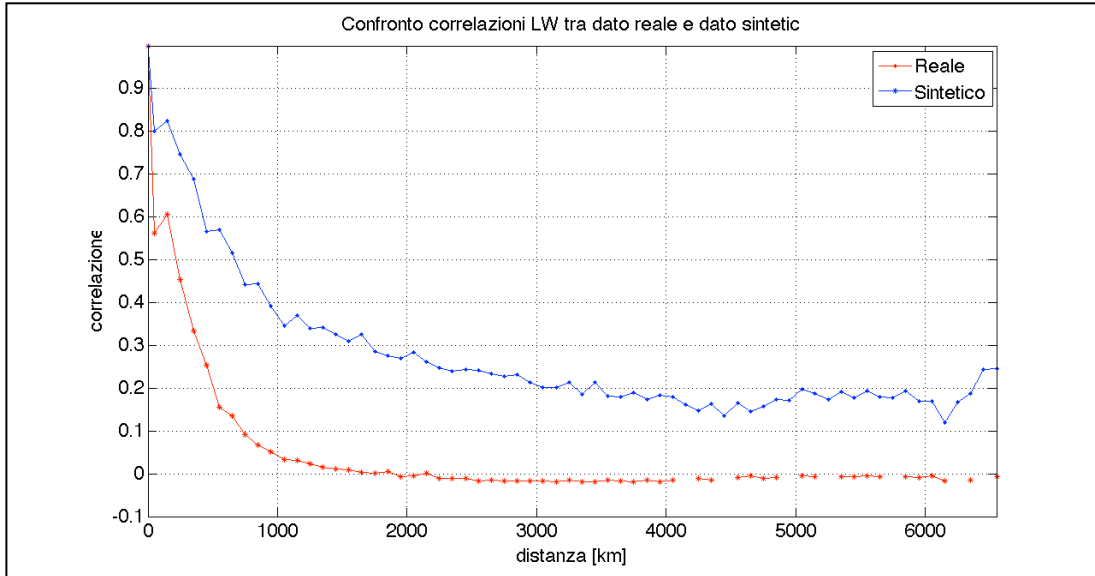


Figura 3.15: Confronto tra la correlazione spaziale del dato di liquido reale (rosso) e il dato di liquido sintetico (blu).

In ascissa vi sono le distanze, in ordinata il valore del coefficiente di correlazione. Come si può notare, il modello (linea blu) produce una de-correlazione con la distanza molto più lenta di quella osservata per il caso reale (linea rossa). La correlazione è pari a circa 0.05 intorno ai 1000km per il caso reale, mentre per quanto riguarda quella prodotta dal modello il valore di correlazione alla stessa distanza è molto maggiore (circa 0.35).

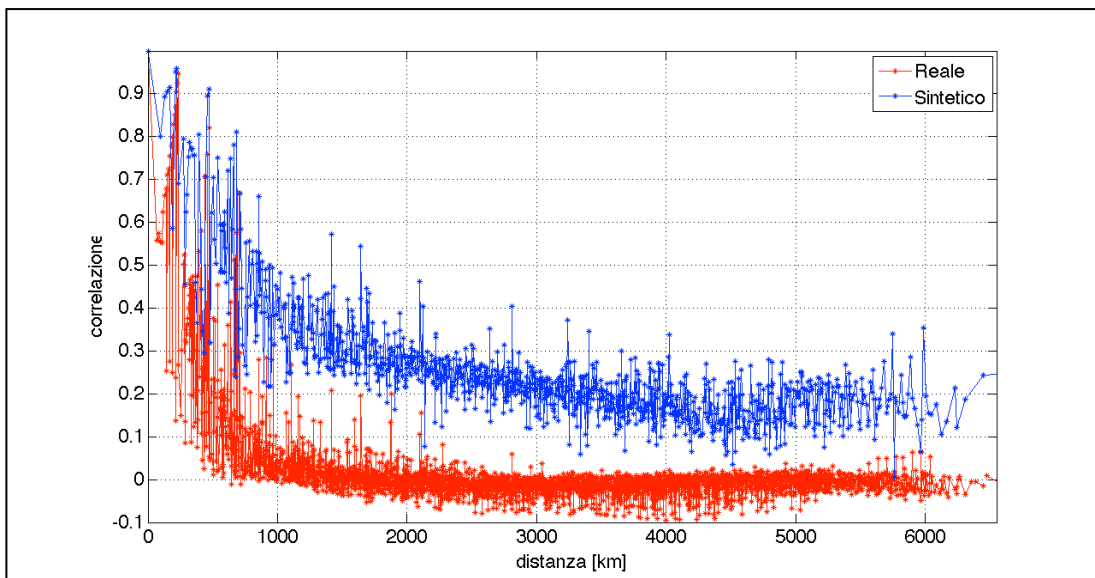


Figura 3.16: Confronto tra le correlazioni spaziali del dato reale e del dato di vapore.

Entrambe le funzioni di correlazione mostrate sono il risultato di un'andamento medio della funzione di correlazione che, in entrambi i casi, risulta piuttosto variabile. Quanto detto è mostrato in Figura 3.16.

3.2.3 Mappe sintetiche di precipitazione

In questo paragrafo si analizzeranno i risultati ottenuti nella generazione della mappa di precipitazione. In questo caso si sfrutterà la legge di proporzionalità lineare tra liquido e precipitazione (3.13) riproposta nel paragrafo 3.1.4 .

Viene mostrata in Figura 3.13 la statistica del dato di precipitazione di tutti i valori ottenuti nello spazio e nel tempo generati sinteticamente.

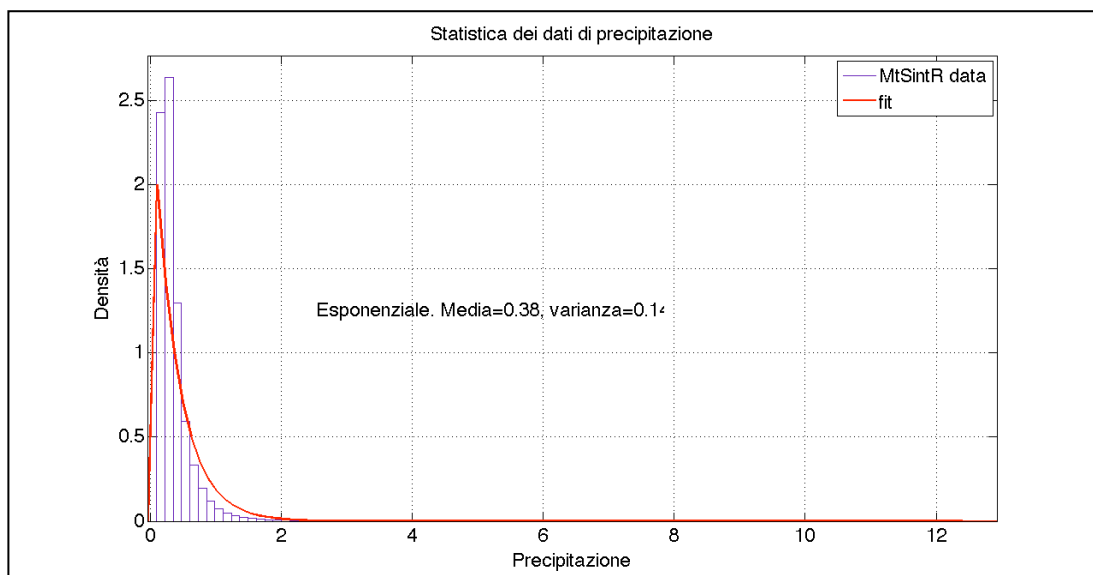


Figura 3.17: Statistica del dato sintetico di precipitazione.

Il fit della statistica è esponentiale ed i valori di media e varianza sono rispettivamente pari a 0.38 e 0.14. Di seguito viene proposto un grafico riassuntivo che mette a confronto diretto le due statistiche.

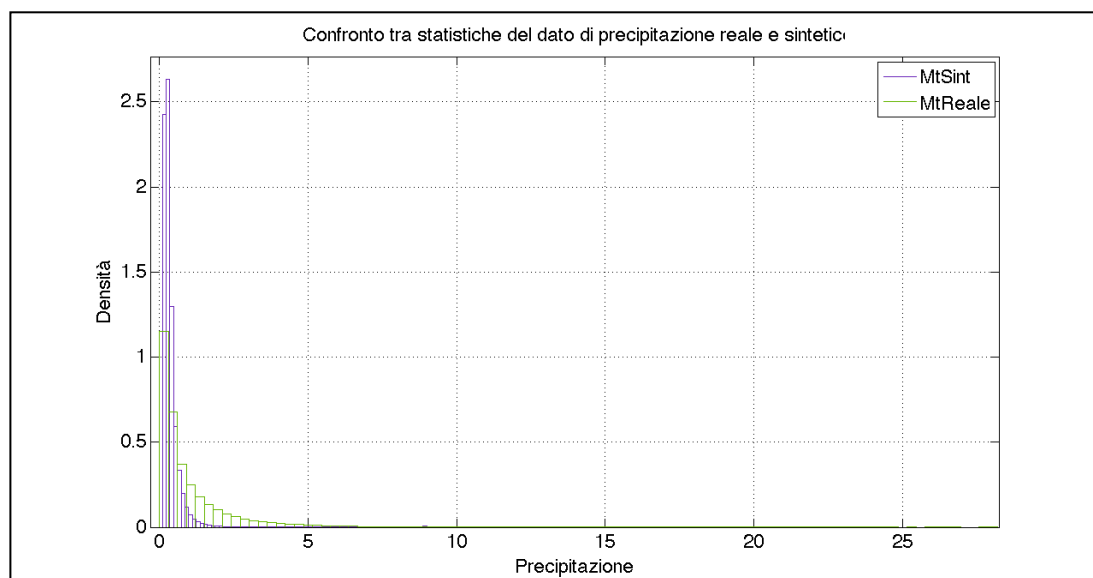


Figura 3.18: Confronto tra statistica del dato reale (verde) e sintetico (blu).

Si può notare che, utilizzando il metodo proposto nella sezione precedente (legge di proporzionalità lineare) per passare da liquido a precipitazione, si ottiene comunque una statistica lognormale ma con parametri leggermente diversi. Il valor medio passa da 1.02 a 0.38mm, mentre la varianza passa da 1.04 a 0.14mm². Quanto detto si traduce nelle seguenti osservazioni:

- I valori di precipitazione a larga scala determinati dal modello sono più spesso compressi nell'intervallo 0.1÷2 mm;
- Il valore massimo registrato si attesta intorno ai 12.8 mm.

A questo punto, non resta che porre l'accento sulla correlazione spaziale risultante dalle mappe di precipitazione generate dal modello. Il grafico di confronto tra la correlazione spaziale risultante dal dato reale e dal dato sintetico è mostrato in Figura 3.19.

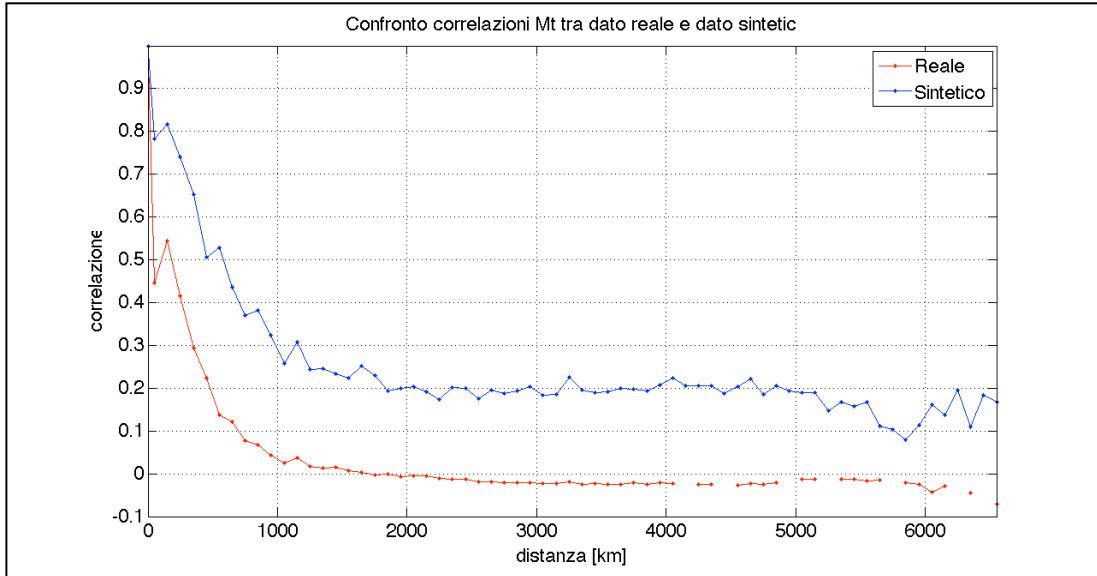


Figura 3.19: Confronto tra la correlazione spaziale del dato di liquido reale (rosso) e il dato di liquido sintetico (blu).

In ascissa vi sono le distanze, in ordinata il valore del coefficiente di correlazione. Come si può notare, anche in questo caso il modello (linea blu) produce una de-correlazione molto più lenta di quella osservata per il caso reale (linea rossa). La correlazione è pari a circa 0.03 intorno ai 1000km per il caso reale, mentre per quanto riguarda quella prodotta dal modello il valore di correlazione alla stessa distanza è molto maggiore (circa 0.29).

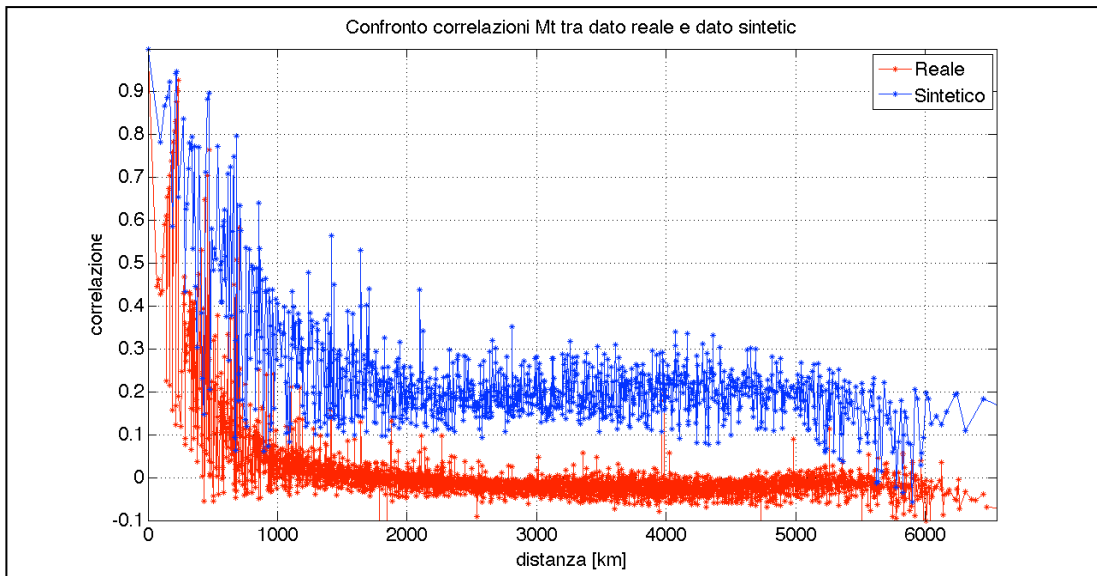


Figura 3.20: Confronto tra le correlazioni spaziali del dato reale e del dato di vapore.

Entrambe le funzioni di correlazione mostrate sono un andamento medio della funzione di correlazione che, in entrambi i casi, risulta piuttosto variabile. Quanto detto è mostrato in Figura 3.20.

3.3 Mappe cumulative

Per verificare ulteriormente la bontà del modello nel riprodurre le statistiche di vapore, liquido sospeso e precipitazioni, per ogni pixel, è stato calcolato il valore cumulato di tali quantità considerando tutto il periodo preso in considerazione (5 anni). Ciò è stato fatto sia per i dati reali che per i dati sintetici. Questi valori sono poi stati rappresentati in immagini che identificano la matrice 18x30 corrispondente al dato in questione. Si ricordi che le due matrici in questione rappresentano esattamente i livelli di vapore sull'area geografica presa in considerazione. Nelle figure seguenti sono mostrati i confronti fra i risultati ottenuti dai dati reali (a) e dai dati sintetici (b).

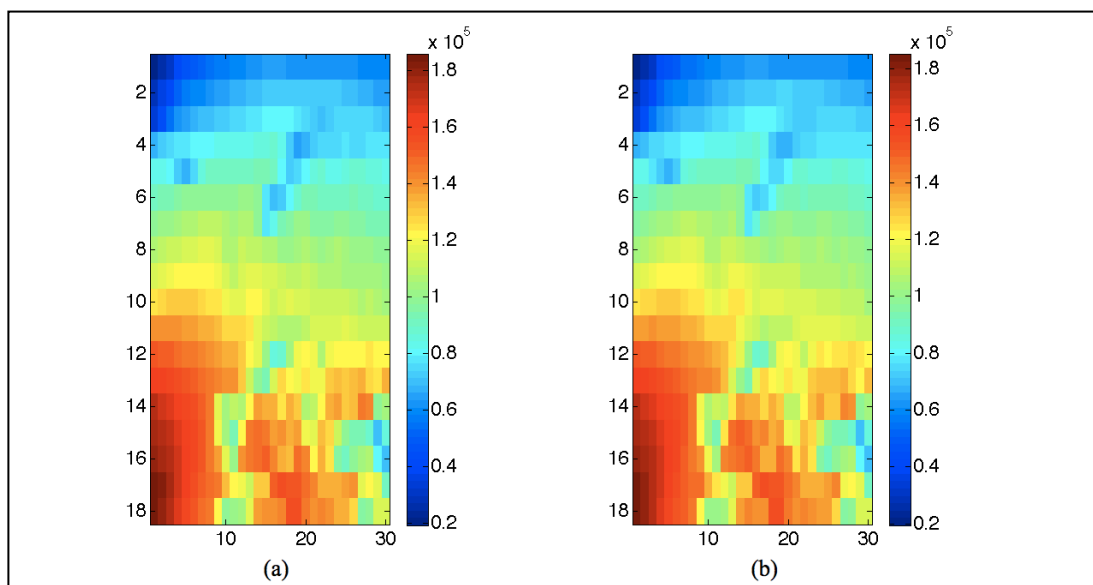


Figura 3.21: Confronto tra cumulative sui 5 anni. Vapore reale (a), vapore sintetico (b).

Dalla Figura 3.21 si ottengono 2 importanti informazioni:

- Il valore massimo di vapore cumulato è spesso molto simile per il caso reale e per il caso sintetico (pari a circa $1.8 \cdot 10^5$ mm);
- Le due mappe risultano praticamente identiche sia nei valori raggiunti per ogni pixel, sia nella loro distribuzione su tutta l'area considerata.

Quanto mostrato fino ad ora per il dato di vapore e per la sua riproduzione sintetica ottenuta grazie al modello, permette di evidenziare l'ottimo livello raggiunto dal

modello stesso nel riprodurre le condizioni reali che si riscontrano sull'intera area considerata.

In Figura 3.22 e 3.23 (illustrate nella pagina seguente) sono mostrate le immagini delle matrici che corrispondono rispettivamente al dato cumulativo di liquido sospeso e di precipitazione a larga scala. Osservando entrambe le mappe, si notano due importanti caratteristiche:

- Il livello massimo cumulato sui 5 anni per entrambi i dati sintetici risulta inferiore a quello reale;
- In certe zone della matrice si notano delle differenze piuttosto nette nel passaggio da un pixel all'altro.

Entrambe le anomalie riscontrate trovano spiegazione nella scelta delle leggi di proporzionalità che hanno permesso il passaggio da vapore a liquido prima e da liquido a precipitazione poi. L'effetto di sottostima (notato peraltro già nella sezione precedente in cui si mostravano le statistiche del primo ordine del dato sintetico) è dovuto esclusivamente alla difficoltà che si è incontrata nel cercare una legge di proporzionalità semplice che legasse il dato di vapore acqueo col dato di liquido ed il dato di liquido con il dato di precipitazione. L'effetto del salto repentino di valori tra un pixel e l'altro dipende invece dalle diverse intercette di ognuna delle leggi di proporzionalità utilizzate per ogni zona nelle quali è stata suddivisa l'area geografica in questione.

Per spiegare quanto detto si mostrerà nell'analisi conclusiva mostrata nella sezione seguente lo studio della legge di proporzionalità cubica utilizzata per determinare il valore di liquido sospeso dal valore di vapore in ogni singolo pixel.

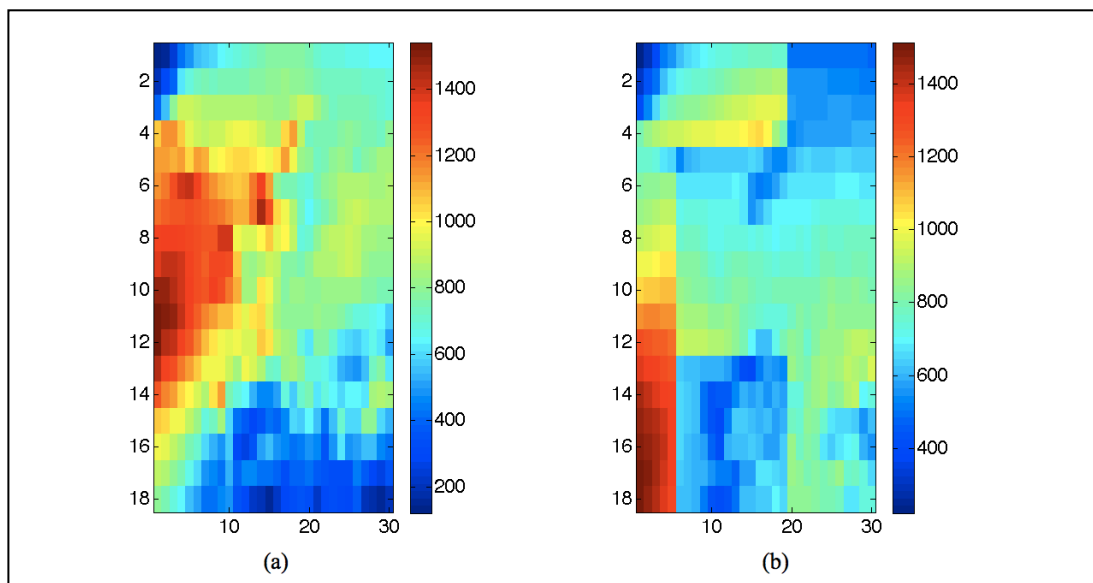


Figura 3.22: Confronto tra cumulative sui 5 anni. Liquido sospeso reale (a), Liquido sospeso sintetico (b).

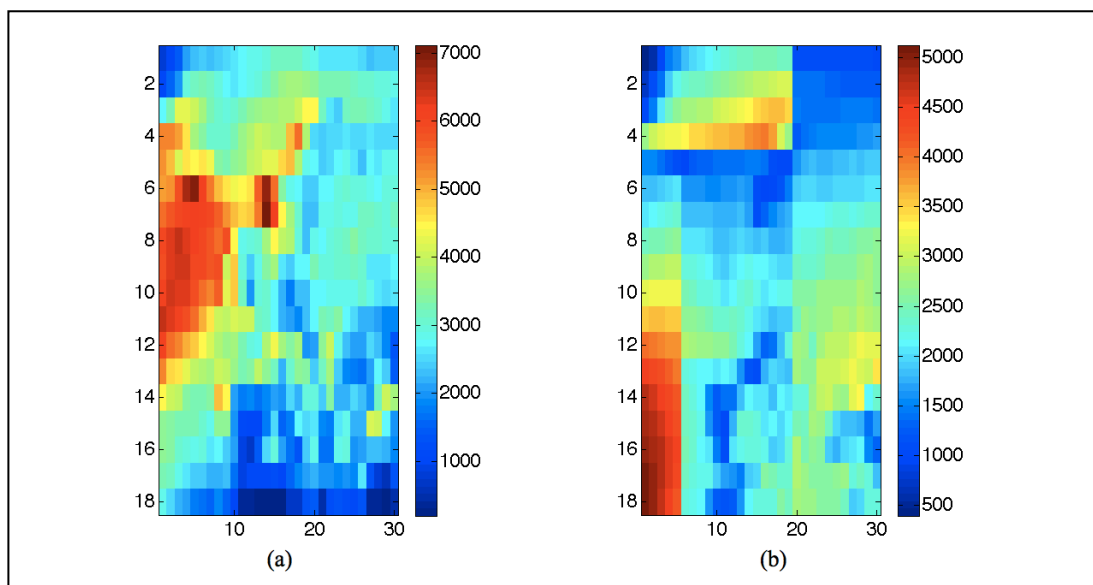


Figura 3.23: Confronto tra cumulative sui 5 anni. Precipitazione a larga scala reale (a), precipitazione a larga scala sintetico (b).

3.4 Analisi delle mappe di liquido sospeso e precipitazione

Come ormai chiaro, l'approccio originario nello sviluppo del modello consiste nel passare dal dato di vapore a quello di liquido e successivamente dal dato di liquido a quello di precipitazione sfruttando tutte le informazioni statistiche raccolte nella fase di analisi preventiva dei dati. Come già accennato, la strada intrapresa è stata quella che si poneva l'obiettivo di generare mappe sintetiche attraverso l'utilizzo di leggi di proporzionalità semplici che mettessero in relazione il dato di vapore con quello di liquido sospeso ed il dato di liquido sospeso con quello di precipitazione.

La scelta di suddividere l'area geografica considerata in zone che avessero al loro interno caratteristiche climatiche e meteorologiche più uniformi si è rivelata una scelta vincente poiché ha permesso di ottenere leggi di proporzionalità semplici e coerenti all'interno della stessa zona. Le leggi di proporzionalità scelte (cubica per il passaggio vapore liquido e lineare per il passaggio liquido precipitazione) hanno prodotto buoni risultati generando statistiche del primo ordine coerenti, anche se i valori di liquido e precipitazione sintetici risultano sottostimati, e mappe cumulative con evidenti salti di valore tra una zona e l'altra.

Gli effetti indesiderati dell'utilizzo delle leggi di proporzionalità si notano osservando sia le statistiche del primo ordine (vedi capitolo 2), sia le cumulative di liquido sospeso e precipitazione mostrate nella sezione 3.3.

Nelle sezioni seguenti si analizzerà proprio quest'ultimo aspetto attraverso l'osservazione nell'intorno dell'origine delle leggi di proporzionalità per il passaggio da vapore a liquido e da liquido a precipitazione.

3.4.1 Legge di proporzionalità tra vapore acqueo e liquido sospeso

Per spiegare il salto netto visibile nelle immagini delle cumulative si devono osservare le intercette delle leggi cubiche stesse come illustrato in Figura 3.26. Ogni qual volta il valore di liquido determinato dalla legge della zona di competenza risulta al di sotto del valore di soglia minima (0.01mm), esso è stato posto a 0. Di seguito vengono riproposte le Figure 2.28 e 2.29 mostrate nel capitolo 2.

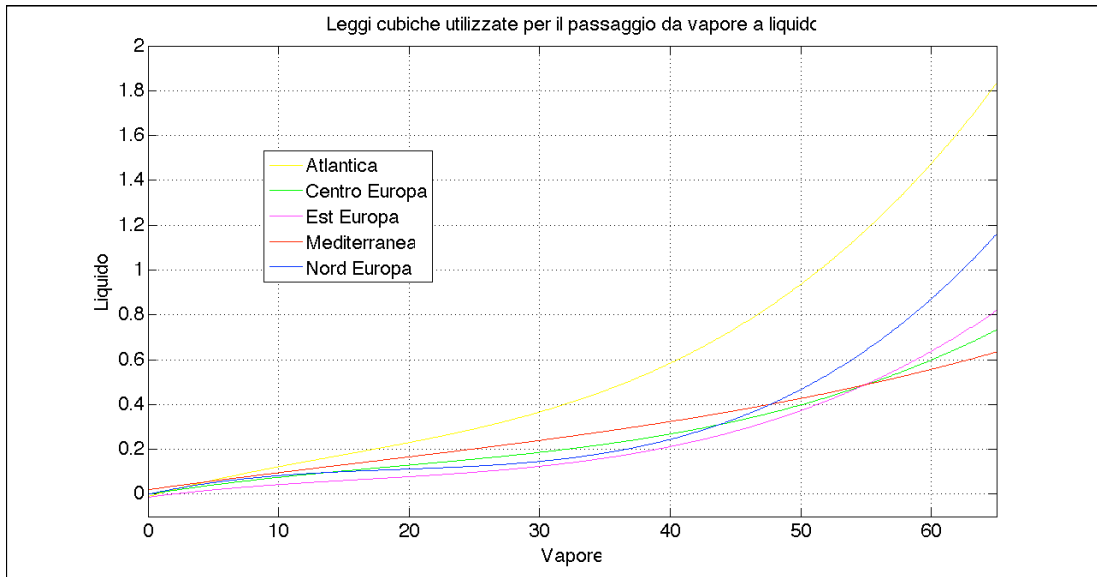


Figura 3.24: Leggi di proporzionalità zona per zona fittate dai dati di vapore e liquido.

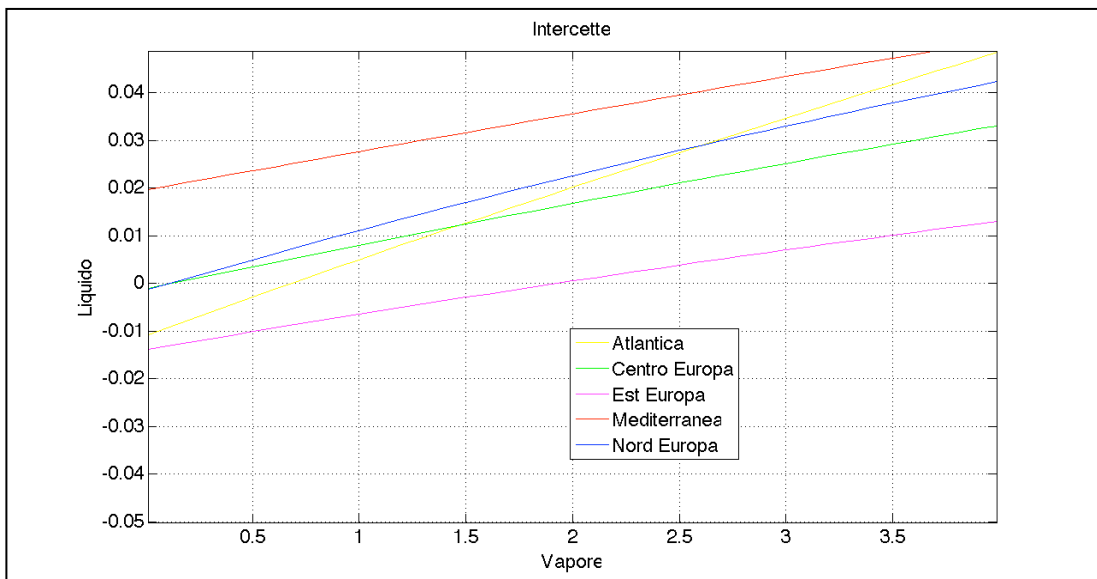


Figura 3.25: Punti di intercetta delle leggi cubiche mostrate in Figura 3.24.

Osservando la Figura 3.25 che mostra un ingrandimento della Figura 3.24 nell'intorno dello zero si può notare che le differenze di conversione da vapore a liquido in funzione delle diverse zone in cui si trovano, seppur piccole, vengono amplificate (e quindi rese più visibili) nel calcolo delle cumulative che considerano 7308 mappe totali. È altrettanto chiaro quindi che questo effetto non sarà visibile sulla singola mappa anche perché il dato di vapore ha una variabilità spaziale molto

dolce, come mostrato dall'andamento della sua correlazione spaziale che, si ricorda, è perfettamente riprodotta dal modello.

3.4.2 Legge di proporzionalità tra liquido sospeso e precipitazione

Anche quanto mostrato in merito ai salti netti del valore di liquido cumulato è ugualmente applicabile al valore di precipitazione cumulata. Ciò è dovuto a due fattori:

- Propagazione degli effetti dell'utilizzo della legge cubica nell'uso della legge lineare per il passaggio da liquido a precipitazione;
- Intercetta della legge lineare stessa.

Come visto nella sezione 3.3, il problema dei salti di valore da un pixel appartenente ad una zona ad uno appartenente alla zona vicina riscontrato nell'osservazione delle mappe cumulative di liquido, si verifica anche per quelle di precipitazione. Di seguito vengono riproposte le Figure 2.30 e 2.31 mostrate nel capitolo 2.

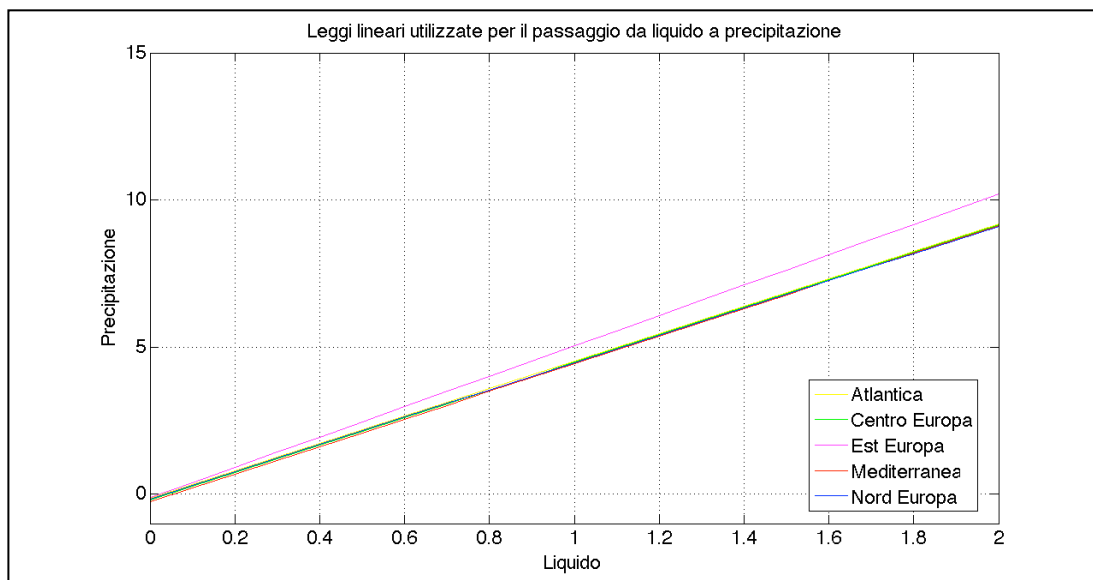


Figura 3.26: Leggi di proporzionalità zona per zona fittate dai dati di liquido e precipitazione.

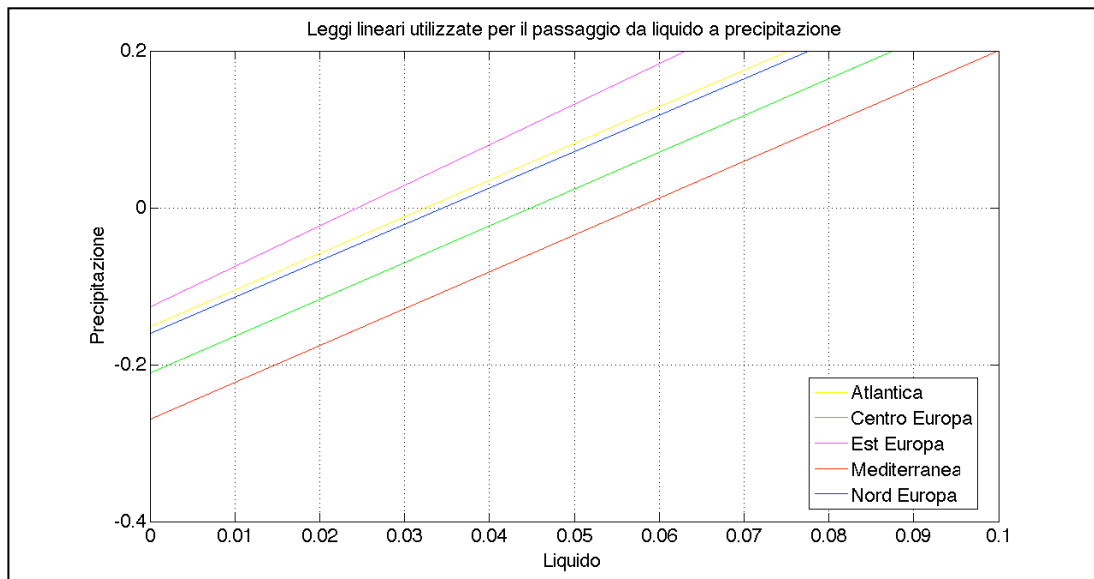


Figura 3.27: Punti di intercetta delle leggi lineari mostrate in Figura 3.26.

Osservando la Figura 3.27 che mostra un ingrandimento della Figura 3.26 nell'intorno dello zero si può notare che le differenze di conversione da liquido a precipitazione in funzione delle diverse zone in cui si trovano, seppur piccole, vengono amplificate (e quindi rese più visibili) nel calcolo delle cumulative che considerano le 7308 mappe totali. È altrettanto chiaro quindi che questo effetto non sarà visibile sulla singola mappa. Quanto detto ripropone il problema già riscontrato nelle mappe sintetiche di vapore.

3.5 Analisi della correlazione spaziale

L'analisi della correlazione spaziale conferma quanto mostrato fino ad ora: la generazione delle mappe sintetiche di vapore è efficiente e produce risultati statisticamente accurati mentre le prestazioni del modello per quanto riguarda la generazione delle mappe di liquido sospeso nella troposfera e di precipitazione a larga scala ha sicuramente margini di miglioramento.

Come già mostrato nelle Figure 3.15 e 3.19 che si riferiscono all'andamento della correlazione spaziale rispettivamente dei dati di liquido e precipitazione, il modello non è in grado di riprodurre l'andamento decrescente repentino che possiede la correlazione reale dei dati menzionati. Il passaggio ritenuto responsabile di questo effetto è ancora una volta la legge di proporzionalità cubica utilizzata per produrre la mappa sintetica di liquido dalla mappa sintetica di vapore. Osservando gli scatter plot che mettono in relazione vapore acqueo e liquido sospeso (ne è un esempio la Figura 3.28) si è notato in modo inequivocabile che all'interno di un singolo pixel esiste una forte concentrazione di valori bassi di liquido per valori di vapore che vanno dal minimo al massimo o quasi.

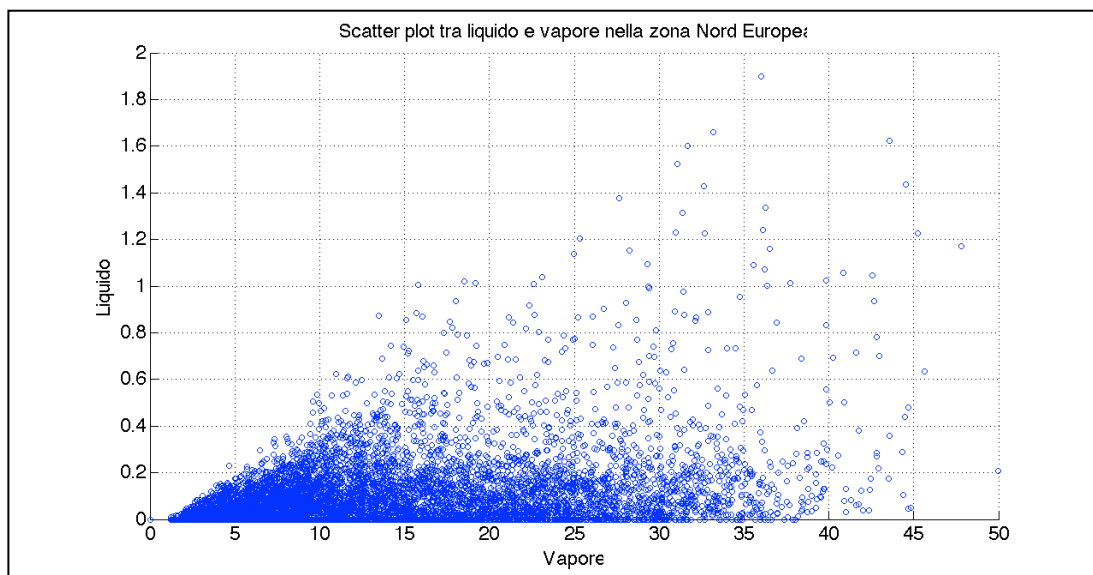


Figura 3.28: Esempio di scatter plot tra i dati di liquido e di vapore.

Questo significa che la legge cubica generata nel modo spiegato nella sezione 2.6.2, pur risultando un'ottimo fit, non potrà mai produrre valori di liquido bassi per valori elevati di vapore, cosa che invece nella realtà può avvenire (tipica giornata con elevata umidità e foschia, ma copertura nuvolosa ridotta la minimo).

La legge cubica mostrata per le varie zone in Figura 3.24, nel passaggio da vapore a liquido sospeso, produce sicuramente uno schiacciamento dei valori di quest'ultimo verso il basso (come peraltro mostrato dalla statistica del primo ordine), ma, per valori elevati di vapore, produrrà inevitabilmente dei valori elevati di liquido. Come già detto, il vapore è caratterizzato da una de-correlazione spaziale con la distanza piuttosto lenta, mentre liquido e precipitazione presentano una de-correlazione spaziale che decresce repentinamente con la distanza (infatti la correlazione a $1000km$ per il vapore è pari a circa 0.5, mentre per liquido e precipitazione è 10 volte inferiore).

La legge di proporzionalità cubica applicata ad un dato con una de-correlazione con la distanza così produce chiaramente una de-correlazione spaziale di liquido e precipitazione inferiore (a parità di distanza) rispetto al dato originale. Per il liquido sospeso generato dal modello, la correlazione spaziale a $1000km$ è pari a circa 0.35 mentre per la precipitazione (generata con legge di proporzionalità lineare dal liquido sospeso) risulta di poco inferiore a 0.3.

Conclusioni

In questo capitolo si riassumerà quanto svolto nel corso di questo lavoro di Tesi. Esso si inquadra nel filone della Propagazione elettromagnetica in atmosfera e si concentra sul problema dell'attenuazione dovuta a vapore acqueo, nubi e pioggia.

La prima parte di questo lavoro di Tesi si è concentrata proprio su questo aspetto del problema, ossia sullo studio dei dati ECMWF di "Total Column Water Vapor", di "Total Column Liquid Water" e di "Total Precipitation" ricavati dal progetto ERA-40 attivo dagli anni '60.

La zona interessata dallo studio è rappresentata da tutto il continente europeo. Per motivi climatologici si è ritenuto opportuno suddividere il territorio in 5 zone distinte, in ognuna delle quali le statistiche ed i comportamenti meteorologici risultano omogenei. L'analisi dei dati zona per zona ha evidenziato una ciclicità stagionale sia della percentuale di copertura del territorio da parte di ogni singolo dato, sia della percentuale di area coperta contemporaneamente da vapore e liquido e da liquido e precipitazione.

Durante lo studio della correlazione spaziale del dato di vapore acqueo si è evidenziato che tale processo non è spazialmente stazionario: ciò è principalmente dovuto alle dimensioni dell'area considerata. La principale conseguenza di ciò è stata l'impossibilità di modellizzare la covarianza del processo attraverso una legge che sia funzione della sola distanza fra i pixel considerati. Per modellizzare la covarianza

del processo è stata prodotta una matrice delle covarianze specifica che esprimesse la correlazione spaziale esistente fra ogni coppia di pixel.

Dopo aver generato la suddetta matrice, la generazione della mappa sintetica di vapore ha previsto i seguenti passaggi:

- Decomposizione di Cholesky della matrice delle covarianze;
- Generazione di un vettore colonna di valori incorrelati con statistica normale a media nulla e varianza unitaria;
- Correlazione degli elementi del vettore attraverso la moltiplicazione del vettore stesso con la matrice risultante dalla decomposizione di Cholesky;
- Conversione della statistica del vettore ottenuto da normale a lognormale;
- Conversione del vettore di lunghezza di 540 elementi in una matrice di dimensione 18x30.

Applicando una legge di proporzionalità cubica tra vapore acqueo e liquido sospeso è stata generata la mappa di liquido. La legge è stata calcolata tramite regressione ottima sui dati di vapore e liquido. In questo modo si sono ottenute 5 leggi di proporzionalità (una per zona) che sono state utilizzate per determinare, pixel per pixel, il valore di liquido dal valore di vapore generato dal modello.

Si è seguito lo stesso procedimento per il passaggio da liquido sospeso a precipitazione, l'unica differenza è rappresentata dal fatto che la legge utilizzata è di tipo lineare. In questo caso i vincoli principali erano rappresentati dal fatto che l'esistenza delle celle di pioggia era legata all'esistenza delle celle di liquido sospeso (o nubi) e che non potevano esistere pixel in cui c'era assenza di liquido sospeso contemporanea alla presenza di pioggia.

Per quanto riguarda la generazione delle mappe di vapore i risultati ottenuti sono stati eccellenti; le mappe di vapore generate rispecchiano perfettamente le statistiche del primo ordine sulla singola mappa e sull'intero periodo simulato (pari a 7308 mappe che nella realtà rappresentano un periodo di 5 anni), le statistiche del secondo ordine (correlazione spaziale) e i valori cumulati.

L'unico aspetto non realistico nella generazione delle mappe sintetiche di vapore acqueo (dovuto al generatore casuale del calcolatore) è rappresentato da una

percentuale di poco superiore allo 0.1% di pixel che riportano un valore maggiore del massimo riscontrato nello studio dei dati reali ($65mm$): il valore di questi pixel è stato saturato a $65mm$.

Le statistiche del primo ordine dei dati sintetici di nubi e precipitazione rispettano la distribuzione dei dati reali ma presentano un valor medio ed una varianza inferiori. Ciò significa che lo studio delle statistiche delle mappe di liquido e precipitazione ha evidenziato:

- sottostima dei valori;
- una maggior concentrazione di valori bassi.

I risultati ottenuti per le mappe sintetiche di nubi e precipitazione sono dovuti alla scelta di generare tali mappe attraverso semplici leggi di proporzionalità. Esse da sole non sono in grado di simulare la variabilità che esiste nel rapporto tra quantità di vapore e liquido all'interno di un singolo pixel. Questo effetto si verifica anche nel passaggio da liquido a precipitazione per via anche della legge di proporzionalità utilizzata (lineare).

L'esperienza acquisita durante la ricerca della miglior soluzione per generare le mappe di liquido sospeso dalle mappe sintetiche di vapore, ha permesso di capire che l'utilizzo di leggi di proporzionalità unita allo studio delle statistiche dei dati meteorologici non produce risultati soddisfacenti. Per questo motivo lo studio della legge di proporzionalità tra liquido e precipitazione si è fermato ad una più semplice legge lineare.

La correlazione spaziale dei suddetti dati sintetici, risulta molto maggiore rispetto a quella reale a qualsiasi distanza la si osservi; ad esempio per il dato reale di liquido essa si può considerare nulla poco al di sotto dei $1000km$, mentre per il dato sintetico essa è pari a 0.35.

La sovrastima della correlazione spaziale è dovuta anche in questo caso all'approccio scelto per generare la mappa di liquido da quella di vapore acqueo. La legge cubica è in grado di produrre da una correlazione spaziale molto dolce, quale è quella del vapore, una de-correlazione più veloce e più adatta a quella presentata dal

liquido, ma non è in grado di portare a risultati soddisfacenti. Quanto detto è applicabile anche al passaggio liquido-precipitazione.

L'aspetto più importante emerso durante queste fasi di sviluppo del modello è che il passaggio da un dato ad un altro tramite una legge di proporzionalità può essere integrato e migliorato introducendo l'informazione proveniente da ulteriori dati climatologici o meteorologici quali temperatura e pressione (che potrebbero ad esempio aiutare ad identificare la probabilità di saturazione del vapore) e stagionalità.

Nel caso in cui ci si ponesse l'obiettivo di generare un modello con meno dati possibili in ingresso, si suggerisce di sfruttare le caratteristiche migliori del modello oggetto di questo lavoro. Per questo motivo, si potrebbe utilizzare lo stesso approccio adottato per la generazione delle mappe di vapore anche per le mappe di liquido e precipitazione. In questo caso, la sfida principale sarebbe riuscire a correlare fra loro le 3 mappe generate sia dal punto di vista delle statistiche del primo e del secondo ordine sia in termini di valore assoluto del dato sul singolo pixel.

Indice delle Figure

Tabella 1.1...Standard di designazione IEEE della banda radio	9
Figura 1.1....Volume elementare di pioggia avente dimensioni $1 \times 1 \times dz$	13
Figura 1.2....Andamento del coefficiente di attenuazione kl in funzione della frequenza (Fonte ITU-R P.840-3).....	16
Figura 1.3....Attenuazione prodotta da vapore acqueo e ossigeno (indicato come dry air) per un collegamento terrestre (Fonte ITU-R P.676-6)	17
Figura 1.4....Attenuazione prodotta da vapore acqueo e ossigeno (indicato come dry air) per un collegamento satellitare (Fonte ITU-R P.840-3).....	18
Tabella 1.2 ..Applicabilità delle PIMTs nello scenario BSS	23
Tabella 1.3 ..Applicabilità delle PIMTs nello scenario IMMBS per il collegamento gateway - terminale utente.....	24
Tabella 1.4 ..Applicabilità delle PIMTs nello scenario IMMBS per il collegamento terminale utente - gateway	24
Figura 2.1Zona dell'Europa considerata per la produzione del modello.....	37
Figura 2.2....Statistica del dato di vapor d'acqua sui cinque anni	38
Figura 2.3....Statistica della percentuale di area coperta da vapore acqueo su tutta l'Europa	39
Figura 2.4....Evoluzione temporale della percentuale di area coperta da vapore nei 5 anni e durante il primo anno.....	40

Figura 2.5....Correlazione spaziale media del dato di vapore acqueo	41
Figura 2.6....Correlazione spaziale del dato di vapore acqueo	41
Figura 2.7....Statistica del dato di liquido non precipitato per il periodo considerato.....	42
Figura 2.8....Statistica della percentuale di area coperta da liquido su tutta l'Europa	43
Figura 2.9....Evoluzione temporale della percentuale di area coperta da liquido sospeso nei 5 anni e durante il primo anno	44
Figura 2.10..Correlazione spaziale media del dato di liquido sospeso in troposfera.	45
Figura 2.11 ..Correlazione spaziale del dato di liquido sospeso in troposfera	45
Figura 2.12..Statistica del dato di precipitazione per il periodo considerato	46
Figura 2.13..Statistica della percentuale di area coperta da precipitazione su tutta l'Europa	47
Figura 2.14..Evoluzione temporale della percentuale di area coperta da precipitazione nei 5 anni e durante il primo anno	48
Figura 2.15..Correlazione spaziale media del dato di precipitazione	49
Figura 2.16..Correlazione spaziale del dato di precipitazione.....	49
Figura 2.17..Evoluzione temporale della correlazione spaziale dei dati di vapore e di liquido sospeso	51
Figura 2.18..Statistica della correlazione spaziale dei dati di vapore e di liquido sospeso.....	51
Figura 2.19..Esempio di correlazione spaziale tra il dato di vapore e di liquido.....	52
Figura 2.20..Statistica della correlazione tra copertura del dato di liquido e del dato di precipitazione	53
Figura 2.21..Evoluzione temporale della correlazione tra percentuale di area coperta da liquido e da precipitazione.....	54

Figura 2.22..Confronto spaziale tra celle di liquido sospeso e celle di precipitazione	55
Figura 2.23..Suddivisione dell'area di interesse nelle 5 zone caratterizzate da statistiche diverse.....	57
Figura 2.24..Andamento di media e sigma per le 5 zone.....	59
Figura 2.25..Andamento di media e varianza durante i 12 mesi dell'anno	60
Figura 2.26..Esempio di scatter plot effettuato nella zona nord europea nel mese di ottobre.....	61
Figura 2.27..Esempio di scatterplot tra liquido sospeso e vapore acqueo sull'intero territorio nel periodo di gennaio.....	63
Figura 2.28..Esempio di scatterplot tra liquido sospeso e vapore acqueo sull'intero territorio in un singolo istante.....	64
Figura 2.29..Punti di intercetta delle leggi cubiche mostrate in Figura 2.28	66
Figura 2.30..Leggi di proporzionalità zona per zona fittate dai dati di liquido e precipitazione	68
Tabella 2.1...Coefficienti utilizzati per le leggi di proporzionalità	69
Figura 3.1....Area geografica totale presa in considerazione	71
Figura 3.2....Valor medio μ (a) e deviazione standard σ (b) pixel per pixel	72
Figura 3.3....Esempio di matrice delle distanze a 3 dimensioni	73
Figura 3.4....Andamento del vettore incorrelato pixel per pixel (a) e sua statistica (b)	77
Figura 3.5....vettore z (a) e t (b) riordinati	78
Figura 3.6....Risultato della denormalizzazione della statistica rappresentata in Figura 3.5(b)	79
Figura 3.7....Esempio di mappa di vapore acqueo generata dal modello	80
Figura 3.8....Schema a blocchi della generazione della mappa di vapore acqueo	81

Figura 3.8....Esempi di mappa di liquido sospeso (a) e mappa di precipitazione (b) generate dal modello	82
Figura 3.9....Statistica del dato sintetico di vapore acqueo.....	83
Figura 3.10..Confronto tra statistica del dato reale (verde) e sintetico (blu)	84
Figura 3.11 ..Confronto tra la correlazione spaziale del dato di vapore reale (rosso) e il dato di vapore sintetico (blu).....	85
Figura 3.12..Confronto tra le correlazioni spaziali del dato reale e del dato di vapore	86
Figura 3.13..Statistica del dato sintetico di liquido sospeso	86
Figura 3.14..Confronto tra statistica del dato reale (verde) e sintetico (blu)	87
Figura 3.15..Confronto tra la correlazione spaziale del dato di liquido reale (rosso) e il dato di liquido sintetico (blu)	88
Figura 3.16..Confronto tra le correlazioni spaziali del dato reale e del dato di vapore	88
Figura 3.17..Statistica del dato sintetico di precipitazione	89
Figura 3.18..Confronto tra statistica del dato reale (verde) e sintetico (blu)	90
Figura 3.19..Confronto tra la correlazione spaziale del dato di liquido reale (rosso) e il dato di liquido sintetico (blu)	91
Figura 3.20..Confronto tra le correlazioni spaziali del dato reale e del dato di vapore	91
Figura 3.22..Confronto tra cumulative sui 5 anni. Liquido sospeso reale (a), Liquido sospeso sintetico (b)	95
Figura 3.23..Confronto tra cumulative sui 5 anni. Precipitazione a larga scala reale (a), precipitazione a larga scala sintetico (b).....	95
Figura 3.24..Leggi di proporzionalità zona per zona fittate dai dati di vapore e liquido.....	97
Figura 3.25..Punti di intercetta delle leggi cubiche mostrate in Figura 3.24	97

Figura 3.26..Leggi di proporzionalità zona per zona fittate dai dati di liquido e precipitazione98

Figura 3.27..Punti di intercetta delle leggi lineari mostrate in Figura 3.2699

Figura 3.28..Esempio di scatter plot tra i dati di liquido e di vapore

Bibliografia

- [1] Giuliacci Mario, *Manuale di meteorologia*, Alpha Test, Milano, 2005². ISBN 88-483-0457-5
- [2] Politecnico di Milano, Space Engineering, *Reconfigurabile Ka-Band Antenna front-end for active rain fade compensation; propagation modelling*, Executive summary, ESA contract NO.17877/04/NL/JA, November 2007.
- [3] http://it.wikipedia.org/wiki/Banda_radio, Wikipedia, Banda radio - Designazione IEEE
- [4] Paraboni Aldo, D'Amico Michele, *Radiopropagazione*, McGraw-Hill, Milano, 2002
- [5] RECOMMENDATION ITU-R P.676-6, *Attenuation by atmospheric gases (Question ITU-R 201/3)*, 2005
- [6] RECOMMENDATION ITU-R P.840-3, *Attenuation due to clouds and fog (Question ITU-R 201/3)*, 1999
- [7] ONERA, Space Engineering, Identification of the test cases and performance criteria for channel models, ESA/ESTEC contract NO.208877/07/NL/LvH, November 2008
- [8] <http://it.wikipedia.org/wiki/DVB-S2>
- [9] <http://www.ecmwf.int/about/overview/>, ECMWF, *ECMWF Overview e The objectives of the centre*
- [10] http://www.ecmwf.int/about/overview/what_are_fc.html, ECMWF, *Short range forecasts e Mediumrange forecasts*

- [11] Capsoni C., Politecnico di Milano, *Reconfigurable kA-band antenna front-end for active rain fade compensation propagation modelling – WP 4000: Data Validation: data and meteo propagation models*, January 2005
- [12] <http://www.ecmwf.int/research/era/Project/Plan/>, ECMWF, *ERA-40 Project Plan*
- [13] http://www.ecmwf.int/research/era/Products/Archive_Plan/, ECMWF, *ERA-40 Archive document*
- [14] <http://www.ecmwf.int/research/era/ERA-40/Observations/index.html>, ECMWF, *Satellite observations*
- [15] <http://www.ozone.noaa.gov/action/tovs.htm>, NOAA, *TIROS Operational Vertical Sounder TOVS*
- [16] Per Kållberg, Adrian Simmons, Sakari Uppala and Manuel Fuentes, *The ERA-40 Archive*, ERA-40 Project Report Series NO.17, 2007
- [17] Lorenzo Luini, *Multiexcell: a large-scale rain field model for propagation applications and its experimental identification (Alphasat)*, PhD Thesis, 2009
- [18] Nicolas Jeannin, Laurent Feralt, Henri Sauvageott, Laurent Castanet, Joel Lemorton, *Modeling of rain fields at large scale*, IEEE Article, 2006
- [19] E.A.B. Eltahir, R.L. Bras, “Estimation of the fractional coverage of rainfall in climate models,” *J. Climate*, Vol. 6, pp. 639-644, 1993
- [20] http://it.wikipedia.org/wiki/Decomposizione_di_Choleski, Wikipedia, *Decomposizione di Cholesky*
- [21] http://it.wikipedia.org/wiki/Decomposizione_LU, Wikipedia, *Decomposizione LU*
- [22] N. Jeannin, L. Feral, H. Sauvageot, L. Castanet, J. Lemorton, F. Lacoste, *Stochastic spatio-temporal modelling of rain attenuation for propagation studies*, CNES contract NO.4500019862/DCT094