



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELL'INGEGNERIA
CURRICULUM ENERGETICA

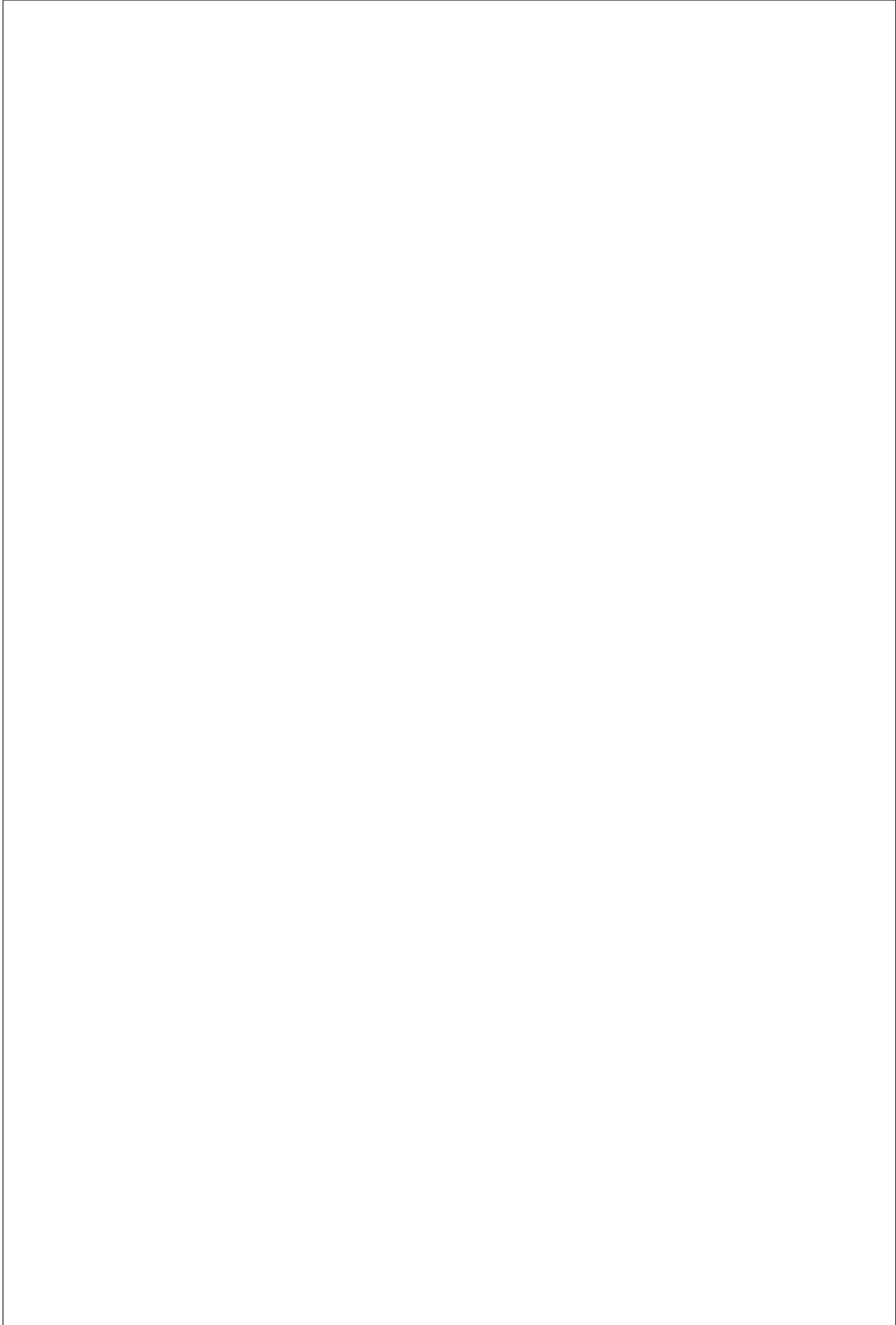
Valutazione della risorsa eolica di aree ad orografia complessa per mezzo di analisi fluidodinamica numerica di mesoscala

Tesi di Dottorato di:
Pierpaolo Garofalo

Tutor:
Ch.mo Prof. Renato Ricci

Coordinatore del Curriculum:
Ch.mo Prof. Massimo Paroncini

X Ciclo - Nuova Serie





UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELL'INGEGNERIA
CURRICULUM ENERGETICA

Valutazione della risorsa eolica di aree ad orografia complessa per mezzo di analisi fluidodinamica numerica di mesoscala

Tesi di Dottorato di:
Pierpaolo Garofalo

Tutor:
Ch.mo Prof. Renato Ricci

Coordinatore del Curriculum:
Ch.mo Prof. Massimo Paroncini

X Ciclo - Nuova Serie

Sommario

Lo scopo della presente ricerca è stato lo sviluppo di un protocollo numerico volto allo studio di siti eolici ad orografia complessa al fine di valutarne la producibilità energetica mediante l’uso di codici numerici di mesoscala. A tale proposito sono stati utilizzati i due codici numerici di mesoscala attualmente più usati per effettuare delle simulazioni annuali basate sia su griglie lasche che fini, del sito di interesse. Quest’ultimo è posizionato sul Col di Mezzo, una collina a metà strada tra il monte Tolagna ed il monte Miglioni nell’area del comune di Monte Cavallo (Mc). I risultati numerici sono stati confrontati con i dati sperimentali forniti da una torre anemometrica della “Comunità Montana di Camerino”, gestita dal Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (**DIISM**) dell’Università Politecnica delle Marche (**UNIVPM**), posizionata nel centro del dominio di calcolo.

Le aree ad orografia complessa sono quelle in cui le irregolarità del terreno sono tali da influenzare profondamente il campo di moto in maniera tale che i codici di microscala attualmente usati, sviluppati e affinati soprattutto per affrontare le situazioni di strato limite planetario stabile su terreni pianeggianti, non danno soluzioni del tutto soddisfacenti.

È ben noto infatti come l’energia in Italia sia soprattutto disponibile in quelle aree situate ad altitudini medio alte, dove le complessità del terreno ed i fenomeni convettivi giocano un ruolo cruciale nell’influenzare il campo di moto nei suoi valori medi, direzione e contenuto di turbolenza.

L’approccio classico finora adottato nello studio delle risorse eoliche in siti ad orografia complessa prevede tre passi successivi: un primo passo consiste nella raccolta dei dati di scala globale, disponibili da archivi accessibili on line, ottenuti da modelli General Circulation Model (**GCM**) che risolvono lo stato dell’atmosfera a livello globale terrestre; il secondo passo consiste nel passare le condizioni al contorno fornite dai **GCM** ad un modello Limited Area Model (**LAM**) (per esempio un codice di mesoscala quale Mesoscale Model Fifth Generation (**MM5**) o Weather Re-

search Forecast Mesoscale Model (**WRF**) del National Center for Atmospheric Research (**NCAR**) che a sua volta risolve, la maggior parte delle volte parametrizzando i fenomeni meteo locali, le equazioni nelle scale che vanno dal migliaio di chilometri a pochi chilometri; il terzo passo consiste nel passare in termini di condizioni al contorno, i dati calcolati dal modello di mesoscala ad un modello Computational Fluid Dynamics (**CFD**) di microscala che risolve il campo locale di velocità (per esempio il modello PHOENICS).

L’approccio perseguito in questa ricerca è stato basato sullo sfruttamento dei dati di orografia ad alta risoluzione Shuttle Radar Topography Mission (**SRTM**), che la National Aeronautics and Space Administration (**NASA**) mette a disposizione in rete, al fine di evitare il passo tre dell’approccio consueto. Sebbene siano disponibili dati relativi a risoluzioni di griglia che arrivano a 30 metri, è stata scelta la griglia a 200 metri in quanto è risultata un buon compromesso tra le necessità di avere una adeguata stabilità numerica ed un peso computazionale non troppo oneroso.

L’alta definizione dei dati **SRTM** ha permesso di spingere le potenzialità di calcolo sia dell’ultima versione di **WRF**, che di **MM5** alla risoluzione numerica di fenomeni locali che normalmente vengono parametrizzati. In questo modo, il limite di quelle erano definite simulazioni ad alta risoluzione, basate su dati di orografia Global 30 Arc Second Elevation Data (**GTOPO30**) (ossia griglie di lato di circa 900m), è stato portato verso il nuovo valore di 200 metri. Tuttavia, al fine di poter sfruttare la risorsa offerta dai dati **SRTM**, il codice sorgente di **MM5** ha dovuto essere alterato mentre **WRF**, già predisposto per ingerire i dati **SRTM** ha necessitato solo della scrittura di codice per la conversione dei dati in un formato compatibile.

Il confronto dei dati numerici e sperimentali ha dato risultati incoraggianti ed in buon accordo con i dati misurati sperimentalmente.

Abstract

The goal of this research has been the development of a numerical protocol aimed to the study of complex orography sites in order to evaluate available wind resources by means of mesoscale model software. At this purpose the two most widely used mesoscale numerical models, the National Center for Atmospheric Research (**NCAR**) Mesoscale Model Fifth Generation (**MM5**) and Weather Research Forecast Mesoscale Model (**WRF**), were used to run annual simulations based on both coarse and fine grids on a domain area centred on Col di Mezzo, a hill located half way between Monte Tolagna and Monte Miglioni in the town-hall of Montecavallo (Mc). The results were compared to measured data available from the weather station mast owned by “Comunità Montana di Camerino, and supervised by Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (**DIISM**) of Università Politecnica delle Marche (**UNIVPM**).

Complex areas are those in which terrain orography is such that it influences profoundly the behaviour of wind field in a way that, commonly available micro scale codes, mostly developed, tailored and tuned to tackle the study of stable planetary boundary layer on flat terrain, often give unsatisfactory solutions.

It is a well known fact that wind energy in the Country is mainly available in those areas located at relevant heights, where the complexities of terrain and convective phenomena play a crucial role in influencing the wind field mean values and direction as well as its turbulence content.

The classical approach to studying wind resources in complex orography sites has been so far that relying on a three steps protocol: the first step consists in collecting data available from General Circulation Model (**GCM**) which solve numerically for the state of the atmosphere globally around the Earth; the second step consists in passing the boundary conditions provided by the **GCM** used in step one to a Limited Area Model (**LAM**) (e.g. **NCAR** mesoscale models such as **MM5** and **WRF**) which in turn solves or more often parametrizes weather phenomena in scale ranges that go from thousands of kilometres to a few kilometres;

the third step consists in feeding in data, worked out by the mesoscale models used in step two, as boundary conditions to a Computational Fluid Dynamics (**CFD**) micro scale models (e.g. the PHOENICS model) which solves for the local wind field.

The approach pursued in this research is based on the exploitation of National Aeronautics and Space Administration (**NASA**) Shuttle Radar Topography Mission (**SRTM**) terrain orography data and aims to skip the third step of the classical approach. Even though **SRTM** data grid are available down to resolutions of thirty meters, a 200 metres grid was used. This grid dimension turned up to be acceptable both from the computational power demand and numerical stability point of view.

The more powerful latest versions of **WRF** in particular, and **MM5** mesoscale models were let to resolve for most of the local phenomena rather than relying on parametrization, thanks to finer grids whose use was made it possible by the availability of **SRTM** data. This way in this research the limits of what was commonly referred to as a high resolution 30 seconds of degree grid (approximately 900 metres) was pushed forward to a finer 200 metres grid. However, in order to make use of such a fine grid, some alterations to the source code were necessary in the case of **MM5** mesoscale model whereas some minor code writing was enough to enable the **WRF** model to ingest new high resolution **SRTM** terrain data.

The comparison between numerical results and experimental data has showed that this new approach results in a step beyond in the evaluation of complex orography sites wind resources.

Introduzione

Vale sempre la pena approfondire un qualunque sforzo nella direzione dello sviluppo ed affinamento dei metodi numerici, che permettano una valutazione più precisa ed accurata della producibilità energetica di un sito eolico.

Un margine di errore del 3% fatto sulla valutazione della velocità media annuale per un dato sito, determina infatti un margine di errore di quasi il 10% sulla valutazione dell'energia annuale prodotta. Un tale errore è il limite superiore da non superare, affinché il finanziamento della realizzazione di un dato sito eolico sia ritenuto “interessante” da parte degli istituti bancari. Da quanto appena detto appare chiara e giustificata l'affermazione di apertura della presente introduzione.

Con questo lavoro di ricerca è stato quindi sviluppato un protocollo numerico basato sul modello di mesoscala Weather Research Forecast Mesoscale Model (**WRF**) con un duplice intento:

- prima di tutto si è voluto fare un primo lavoro di valutazione delle sue prestazioni numeriche rispetto al suo predecessore Mesoscale Model Fifth Generation (**MM5**), il cui sviluppo è stato da tempo abbandonato dalla comunità scientifica in favore di **WRF**. **MM5** è attualmente in uso da anni presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (**DIISM**) dell'Università Politecnica delle Marche (**UNIVPM**) e presso i maggiori centri di ricerca meteorologica nel mondo, tuttavia nel futuro prossimo la sua sostituzione con **WRF** sarà inevitabile. A tale proposito è stata iniziata, con questo lavoro, una procedura di “affiancamento” dei due modelli per poter nei prossimi anni, dopo ulteriori indagini, procedere alla definitiva sostituzione;
- in secondo luogo si è voluto fare questo confronto nell'ambito della valutazione della producibilità energetica eolica in aree ad orografia complessa. In queste aree la previsione della produzione risulta sempre fortemente critica e di elevata difficoltà rispetto alle aree pianeggianti. Tuttavia, essendo le prime proprio quelle maggior-

mente disponibili in termini di contenuto energetico in Italia, si capisce come lo studio della previsione in tali zone sia di importanza strategica. A tale proposito si è proceduto nella sperimentazione dell’uso di modelli di orografia che meglio rappresentassero la morfologia del terreno di tali aree, al fine di avere una previsione degli andamenti del vento più aderenti alla realtà. Si è ricorso all’uso di modelli di orografia Shuttle Radar Topography Mission (**SRTM**) e la risoluzione di griglia adottata per le simulazioni numeriche è stata spinta dai 1000m, una volta ritenuti limite massimo ottenibile, a 200m.

Sono state condotte delle simulazioni numeriche annuali su un dominio di calcolo comprendente una torre anemometrica (individuata in questa tesi con la sigla CMC1) della “Comunità Montana di Camerino”, gestita dal **DIISM** dell’**UNIVPM**, posizionata sul Col di Mezzo, una collina tra il monte Tolagna ed il monte Miglioni nell’area del comune di Monte Cavallo (Mc). Le simulazioni sono state condotte utilizzando rappresentazioni di orografia in formato **SRTM** e Global 30 Arc Second Elevation Data (**GTOPO30**) con i modelli di mesoscala **WRF** e **MM5**. I risultati numerici ottenuti dai due modelli di calcolo sono stati confrontati sia tra loro, al fine di “inquadrare” in comportamento numerico di **WRF** rispetto a quello già sperimentato di **MM5**, sia con i dati sperimentali forniti dagli strumenti di misura in dotazione alla torre.

La presente tesi risulta suddivisa in cinque capitoli principali e due appendici:

Capitolo 1: è un capitolo introduttivo che vuole essere un compendio breve ma necessario per la comprensione di quanto descritto nei capitoli successivi. Nella prima parte del capitolo vengono richiamati i concetti fondamentali legati alla termodinamica dell’atmosfera terrestre ([**Borr 06**]). Successivamente si accenna al Planetary Boundary Layer (**PBL**) ed alle problematiche legate ai complessi fenomeni che ne determinano lo stato. Nella parte finale vengono riassunti i punti fondamentali legati ai meccanismi di formazione e sviluppo della turbolenza in atmosfera.

Capitolo 2: viene riportata una panoramica sulla Numerical Weather Prediction (**NWP**) con una particolare attenzione ai modelli di mesoscala. I modelli di mesoscala utilizzati nel presente lavoro sono Advanced Research WRF (**ARW**) e **MM5** con il primo che sta negli ultimi anni gradualmente sostituendo il secondo, del quale è il successore. Vengono riportate le caratteristiche salienti comuni a tutti i modelli di mesoscala, ma vengono risaltate maggiormente

le caratteristiche di **ARW**. Nella parte finale vengono riportate, in un paragrafo dedicato, le principali differenze tra i due modelli.

Capitolo 3: nella prima parte viene fatta una panoramica sugli strumenti più comunemente usati per l’acquisizione dei dati sperimentali di componenti medie e fluttuanti della velocità del vento e della temperatura. Successivamente viene presentato l’apparato di misura della stazione meteorologica gestita dal **DIISM** dell’**UNIVPM**, e individuata la sua posizione geografica. Nell’ultima parte del capitolo sono riportati ed analizzati in dettaglio i dati misurati dalla stazione.

Capitolo 4: viene riportata in dettaglio l’implementazione del protocollo numerico oggetto del presente lavoro di ricerca. Nella prima parte del capitolo sono descritti i formati di memorizzazione dei dati di orografia terrestre usati nel presente lavoro. Viene poi brevemente descritto l’hardware di calcolo utilizzato per eseguire le simulazioni con risoluzione di griglia di 30”. Si riportano di seguito i parametri di calcolo e di configurazione del modello numerico e vengono presentati gli script sviluppati ad-hoc per le fasi di pre, run, e post processing.

Capitolo 5: nella parte iniziale sono riportati, sotto la forma di grafici e di tabelle, i risultati prodotti dalle simulazioni numeriche condotte con i modelli **MM5** e **WRF** ciascuno con dati di orografia **SRTM** e **GTOPO30**. Successivamente i risultati numerici prodotti dai due modelli vengono singolarmente confrontati con le misure sperimentali all’altezza di 30m sul livello del suolo (**sls**). Nella parte finale segue un confronto critico dei dati sperimentali con i dati numerici derivanti dalle simulazioni con orografia **SRTM**, ossia quelle che si sono rilevate più accurate.

Appendice A: si è preferito riportare in questa apposita appendice sia una parte di richiami a leggi regole e teoremi, sempre utile a chi volesse leggere la presente tesi, sia lo sviluppo dei termini presenti nelle equazioni del moto usate dai modelli numerici e presentate nel Capitolo 2.

Appendice B: in questa appendice vengono riportati i listati dei codici di pre e post processamento più importanti scritti nell’ambito del protocollo numerico sviluppato.

Acronimi

ABL	Atmospheric Boundary Layer
AFWA	Air Force Weather Agency
ARW	Advanced Research WRF
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
CAM	Community Atmosphere Model
CAPE	Convective Available Potential Energy
CAPS	Center for Analysis and Prediction of Storms
COSMO-LEPS	COntortium for Small Scale MOdel Limited-Area Ensemble Prediction System
CFD	Computational Fluid Dynamics
CCSM	Community Climate System Model
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant-Friedrichs-Levy Number
COAMPS	Navy’s Coupled Oceanographic and Atmospheric Mesoscale Prediction System
CSV	Comma Separated Values
DALR	Dry Adiabatic Lapse Rate
DEM	Digital Elevation Model
DIISM	Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche
DLR	Deutsche Forschungsanstalt für Luft-Und Raumfahrt

ECMWF	European Centre for Medium-range Weather Forecast
EROS	Earth Resources Observation and Science
FAA	Federal Aviation Administration
FDDA	Four Dimensional Data Assimilation
FSL	Forecast System Laboratory
GCM	General Circulation Model
GFS	Global Forecasting System
GRIB	Gridded Binary Data
GTOPO30	Global 30 Arc Second Elevation Data
JMA-MANAL	Japan Meteorological Agency Mesoscale ANALysis model
KAMM	Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model
LAM	Limited Area Model
LCL	Lifting Condensation Level
LiDAR	Light Detection And Ranging
MCS	Mesoscale Convective System
MM5	Mesoscale Model Fifth Generation
MMM	Mesoscale and Microscale Meteorology
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Protection
NetCDF	Network Common Data Form
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
NMM	Nonhydrostatic Mesoscale Model
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRL	Naval Research Laboratory

NWP	Numerical Weather Prediction
NTC	Negative Temperature Coefficient
PBL	Planetary Boundary Layer
PSD	Power Spectral Density
PTC	Positive Temperature Coefficient
PTR	Platinum Resistance Termometer
RADAR	Radio Detection And Ranging
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RASS	Radio Acoustic Sounding System
RK2	schema di integrazione Runge-Kutta del secondo ordine
RK3	schema di integrazione Runge-Kutta del terzo ordine
RTD	Resisatance Temperature Detector
SALR	Saturated Adiabatic Lapse Rate
SL	Surface Layer
sls	sul livello del suolo
SoDAR	Sound Detection And Ranging
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UCAR	University Corporation for Atmospheric Research
UCM	Urban Canopy Model
UNIVPM	Università Politecnica delle Marche
UTM	Universal Transvere Mercator
USGS	United States Geological Survey
WGS84	World Geodetic System 1984
WMO	World Meteorological Organization
WPS	WRF Preprocessing System
WRF	Weather Research Forecast Mesoscale Model
WSF	Weather Software Framework

Nomenclatura

η	Terrain following hydrostatic pressure vertical coordinate	37
μ	Massa della colonna d’aria che insiste sull’area unitaria	37
μ_d	Massa della colonna d’aria secca che insiste sull’area unitaria	46
$\bar{\mu}_d$	μ_d in condizioni di equilibrio idrostatico	46
μ'_d	Perturbazione di μ_d	46
ρ	Densità dell’aria	38
α	Volume specifico dell’aria umida	46
α_d	Volume specifico dell’aria secca	46
$\bar{\alpha}$	Volume specifico dell’aria in equilibrio idrostatico	46
α'	Perturbazione di α	46
ϕ	Geopotenziale	46
$\bar{\phi}$	Geopotenziale in equilibrio idrostatico	46
ϕ'	Perturbazione di ϕ	46
p	Pressione	46
p_h	Componente idrostatica della pressione	37
p_{ht}	Componente idrostatica della pressione al top	37
p_{hs}	Componente idrostatica della pressione al suolo	37
\bar{p}	Pressione dell’aria in equilibrio idrostatico	46
p'	Perturbazione della pressione	46
g	Accelerazione di gravità	38
U	Componente ridefinita della quantità di moto u	46
V	Componente ridefinita della quantità di moto v	46
W	Componente ridefinita della quantità di moto w	46
Ω	Componente ridefinita della quantità di moto $\dot{\eta}$	46
Θ	Temperatura potenziale ridefinita	46
Q_m	Generica quantità scalare ridefinita	46
u	Componente u del vettore velocità	46
v	Componente v del vettore velocità	46
w	Componente w del vettore velocità	46
t	Tempo	46
x	Coordinata orizzontale x	46
y	Coordinata orizzontale y	46

η	Coordinata verticale “eta”	37
m_x	Fattore di mappa in direzione X	46
m_y	Fattore di mappa in direzione Y	46
c_p	Calore specifico a pressione costante	4
c_v	Calore specifico a volume costante	4
c_s	Velocità del suono	54
γ	c_p/c_v	46
q	Rapporto di mescolanza	46
R	Costante universale dei gas pari a $8,314472 J/(Kmol)$	4
R_d	Costante specifica dell’aria secca pari a $287.05 J/(KgK)$	68
q_m	Rapporto di mescolanza medio	46

Indice

Introduzione	v
1 L'atmosfera terrestre	1
1.1 La circolazione atmosferica	2
1.1.1 Comportamento termodinamico dell'atmosfera . . .	4
1.1.2 Comportamento dinamico dell'atmosfera	6
1.2 Le scale dei moti atmosferici	10
1.2.1 Spettro della velocità del vento	12
1.3 Circolazione generale planetaria	14
1.3.1 Circolazione secondaria di natura termica	15
2 La Numerical Weather Prediction	19
2.1 Breve storia	20
2.2 Uso della NWP per la valutazione di producibilità di siti eolici	22
2.3 Caratteristiche dei modelli di mesoscala	24
2.3.1 Modelli idrostatici e non idrostatici	25
2.3.2 Necessità di avere una risoluzione adeguata	26
2.3.3 Il nesting	27
2.3.4 Parametrizzazione	29
2.3.5 Condizioni al contorno	36
2.4 Il solutore ARW	36
2.5 Coordinata verticale η	37
2.6 Influenza del tipo di proiezione	38
2.7 Equazioni del modello ARW	42
2.7.1 Equazioni in forma di perturbazione	47
2.8 Soluzione numerica delle equazioni alle differenze finite . .	48
2.8.1 Discretizzazione temporale delle equazioni	49
2.8.2 Discretizzazione spaziale delle equazioni	55
2.8.3 Il passo temporale di calcolo: limiti di stabilità . .	64

INDICE

2.9	Condizioni iniziali e al contorno nel modello ARW	66
2.10	Il passaggio da MM5 a WRF	70
2.10.1	Panoramica sulla struttura di MM5	71
2.10.2	Confronto tra i modelli	72
3	I dati sperimentali	74
3.1	Osservazione del PBL: strumenti di misura	75
3.1.1	Sensori in situ	77
3.1.2	Sensori a distanza	91
3.2	Stazione meteorologica gestita dal DIISM dell’UNIVPM	96
3.2.1	Localizzazione	96
3.2.2	La torre anemometrica CMC1	98
3.2.3	I dati rilevati sperimentalmente	101
4	Implementazione del protocollo numerico	116
4.1	Formato dei file dati di orografia	117
4.1.1	Il formato GTOPO30	117
4.1.2	Il formato SRTM	122
4.2	Hardware di calcolo per le simulazioni con risoluzione 1000m	126
4.2.1	Caratteristiche hardware e configurazione software	127
4.2.2	Configurazione del resource manager e dello scheduler	136
4.3	Installazione di WRF-ARW sul cluster del DIISM dell’UNIVPM	140
4.4	Configurazione del modello di mesoscala WRF-ARW	143
4.5	Fase di pre processamento	155
4.6	Fase di processamento	157
4.7	Fase di post processamento	159
5	Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali	164
5.1	Risultati delle simulazioni numeriche	166
5.1.1	WRF con orografia SRTM	166
5.1.2	WRF con orografia GTOPO30	171
5.1.3	MM5 con orografia SRTM	176
5.1.4	MM5 con orografia GTOPO30	181
5.2	Confronto tra i risultati numerici	186
5.2.1	WRF: confronto tra risultati con orografie SRTM e GTOPO30	186
5.2.2	MM5: confronto tra risultati con orografie SRTM e GTOPO30	187

INDICE

5.2.3	Confronto tra MM5 e WRF con orografia GTO-PO30 a 30m sls	189
5.2.4	Confronto tra MM5 e WRF con orografia SRTM	190
5.3	Confronto tra risultati numerici e sperimentali	192
5.3.1	WRF: confronto dei dati sperimentali con quelli numerici ottenuti con orografie SRTM e GTOPO30	192
5.3.2	MM5: confronto dei dati sperimentali con quelli numerici ottenuti con orografie SRTM e GTOPO30	195
5.4	Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali	198
	Conclusioni	220
	A Richiami	222
A.1	Operazione di derivazione	222
A.1.1	Derivata sostanziale o totale di una funzione vettoriale	222
A.1.2	Derivata di un vettore in un riferimento rotante	224
A.1.3	Accelerazione in coordinate sferiche	227
A.1.4	Derivata di versori in coordinate cilindriche	236
A.1.5	Gradiente	236
A.1.6	Laplaciano	237
A.1.7	Laplaciano di un vettore	238
A.1.8	Divergenza	240
A.1.9	Rotore	240
A.2	Teoremi	242
A.2.1	Teorema di Gauss	242
A.2.2	Teorema del trasporto di Reynolds	243
A.2.3	Teorema di reciprocità di Cauchy	245
A.2.4	Considerazioni sul rotore della velocità	245
A.3	Equazioni di bilancio	246
A.3.1	Equazione del bilancio di massa	246
A.3.2	Equazione di bilancio della quantità di moto	248
A.3.3	Equazione di bilancio dell'energia	261
A.4	Gruppi adimensionali notevoli	263
A.4.1	Numero di Biot	263
A.4.2	Numero di Froude	264
A.4.3	Numero di Knudsen	265
A.4.4	Numero di Lipschitz	266
A.4.5	Numero di Mach	267

INDICE

A.4.6	Numero di Nusselt	267
A.4.7	Numero di Prandtl	268
A.4.8	Numero di Reynolds	268
A.4.9	Numero di Richardson	269
A.4.10	Numero di Rossby	270
B	Codice sviluppato	271
B.1	Conversione del file di dati Nomad2	271
B.2	Conversione file binari HGT in formato little endians.	273
B.3	Conversione file di orografia in formato geogrid.	274
B.4	Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1	279
B.4.1	Compilazione delle librerie	279
B.4.2	Compilazione WRF	301
B.4.3	Compilazione WPS	303
B.5	Esecuzione di WRF	304
B.5.1	Fase di pre processamento	304
B.5.2	Fase di processamento	308
B.5.3	Fase di post processamento	315
	Bibliografia	399

Elenco delle figure

1.1	Modello esemplificato di circolazione per differenza di temperatura.	2
1.2	Inclinazione dell’asse di rotazione terrestre.	3
1.3	Effetto semplificato dell’irraggiamento sulla genesi dei venti.	3
1.4	Gradiente verticale di pressione.	7
1.5	Effetto della forza di Coriolis sulle masse d’aria in movimento.	8
1.6	Spirale di Ekman: effetto della forza di attrito sulla direzione del vento nel ABL.	10
1.7	Categorizzazione delle diverse scale caratteristiche.	11
1.8	Tipica carta sinottica.	12
1.9	Spettro di Van der Hoven (1957).	13
1.10	Rappresentazione della circolazione globale terrestre.	15
1.11	Struttura semplificata di un ciclone.	16
1.12	Formazione del Fohen.	17
2.1	Processi atmosferici con effetti non idrostatici ²	25
2.2	Due domini innestati all’interno di un dominio <i>genitore</i>	27
2.3	Cinque domini innestati centrati sulla posizione della stazione anemometrica CMC1.	28
2.4	Un sottodominio innestato in un dominio genitore con rapporto di raffinamento 1:2	29
2.5	Schemi di parametrizzazioni di microfisica. ¹	31
2.6	Schema del processo di formazione dei cumuli ¹	32
2.7	Interazione tra i vari strati del PBL. ¹	33
2.8	Andamento tipico della temperatura potenziale virtuale in uno strato limite convettivo. L’andamento della temperatura potenziale virtuale mette in risalto i vari strati del PBL.	34
2.9	Schema dei processi di radiazione. ¹	35
2.10	Struttura a blocchi del modello WRF ¹	37

ELENCO DELLE FIGURE

2.11	La coordinata verticale η	38
2.12	Proiezioni comunemente usate nei modelli meteo	39
2.13	Relazione tra gli incrementi di griglia e quelli sulla sfera terrestre per una proiezione polare stereografica	41
2.14	Variazione di una grandezza in lungo una coordinata generalizzata s	44
2.15	Griglie monodimensionali, non sfalsata e sfalsata	58
2.16	Griglie monodimensionali, non sfalsata e sfalsata	59
2.17	Griglia sfalsata Arakawa B	60
2.18	Griglia sfalsata Arakawa C	61
2.19	Pre e post processing di ARW	66
2.20	Griglia di calcolo proiettata sulla superficie terrestre.	67
2.21	Ampiezza tipica della zona di rilassamento e di definizione delle condizioni al contorno laterali.	70
2.22	Framework di MM5	71
3.1	Stazione meteo dell’ENEA in Antartide ¹	78
3.2	Catena logica di misura.	79
3.3	Anemometro a coppette e banderuola	80
3.4	Risposta dell’anemometro a coppette all’onda quadra	81
3.5	Anemometro ad elica	82
3.6	Errori sulla risposta cosinusoidale di anemometri a coppa e ad elica. Da [Kaim 94]	83
3.7	Sistema di misura della temperatura mediante termocoppia.	84
3.8	Alloggiamento schermato per termocoppia	85
3.9	Uso di RTD in circuiti partitivi. Da [Sozz 02].	87
3.10	Termistori NTC	88
3.11	Asse di un anemometro sonico	89
3.12	Trasmettitore e ricevitore	89
3.13	Anemometro sonico a tre assi ortogonali	90
3.14	Anemometro sonico a tre assi non ortogonali (Gill Instruments Ltd.)	90
3.15	Tilting tipico di un sistema sodar	92
3.16	Sistema SoDAR dell’UNIVPM	93
3.17	Un sistema RASS (Origine: http://www.esrl.noaa.gov).	94
3.18	Localizzazione del dominio di calcolo.	96
3.18	Individuazione della torre anemometrica: viste da Sud e da Nord-Ovest.	97
3.19	Posizione della torre anemometrica CMC1.	98
3.20	Strumentazione in dotazione alla stazione anemometrica CMC1	101
3.21	Torre anemometrica CMC1 (Da [Mazz 09].)	102

ELENCO DELLE FIGURE

3.22	Il programma di gestione data logger Nomad2 Desktop. . .	103
3.23	Andamento delle velocità rilevate dall’anemometro sonico e tensione di alimentazione dei dispositivi elettronici. . . .	104
3.24	Andamenti delle medie giornaliere della temperature interna e delle velocità: in evidenza i giorni di blocco degli anemometri.	105
3.25	Andamenti “originali” delle medie mensili della velocità. .	106
3.26	Andamenti “trattati” delle medie mensili della velocità. .	107
3.27	Andamento medio giornaliero delle velocità del vento rilevato a 20m sls.	108
3.28	Andamento medio giornaliero delle velocità del vento rilevato a 30m sls.	108
3.29	Andamento medio giornaliero delle velocità del vento rilevato a 44m sls.	109
3.30	Andamento della temperatura media mensile a 10m sls. .	109
3.31	Andamenti dei valori medi giornalieri orari della temperatura a 10m sls.	110
3.32	Rose dei venti a 30m sls.	112
3.33	Rosa dei venti media annuale (sui mesi validi): energia per direzione di provenienza.	112
3.34	Andamento dell’intensità di turbolenza a 40m.	113
3.35	Rose dei venti mensili: energia per direzione di provenienza.	115
4.1	Settore W020N90.	118
4.2	Mappa globale per il prelievo del settore di interesse. . .	122
4.3	Mappa SRTM dell’Italia centrale.	123
4.4	Rappresentazioni DEM a 20m, GTOPO30 a 900m e SRTM a 90m di risoluzione a confronto. Si noti lo “smoothing” del SRTM e ancor più del GTOPO30 sull’orografia.	125
4.5	Cluster Gentoo Linux usato per le simulazioni con griglia di lato 1000m.	127
4.6	Schema di collegamento delle schede di rete.	135
4.7	Schema di funzionamento del resource manager e dello scheduler ¹	138
4.8	Cluster con otto nodi del DIISM dell’UNIVPM.	140
4.9	Schema di costruzione dei domini innestati.	145
4.10	Domini innestati per le simulazioni con risoluzione massima di 1000m e 200m.	146
4.11	Confronto tra le griglie con passo 200m (+) e con passo 1000m (★).	146
4.12	Estensione dei domini interni d5 per le simulazioni con 200m e 1000m di griglia.	147

ELENCO DELLE FIGURE

4.12	Confronto tra i domini di calcolo rappresentati con diversa risoluzione di orografia attraverso le curve di isolivello. L’orografia a 200m di griglia è quella vista da WRF che ingerisce i dati SRTM 90m rigrigliandoli a 200m con geogrid.exe. Nell’orografia GTOPO30 tutti i monti tranne il Tolagna sono stati spianati.	149
4.13	Rosa dei venti prodotta in formato post script. In questo caso è relativa all’anemometro 202, all’altezza dal suolo di 149m, nel mese di aprile 2009.	161
4.14	Programma WISH Analyzer.	163
5.1	Schema riassuntivo del lavoro di confronto tra i dati.	165
5.2	Andamento dei valori medi mensili della velocità calcolati con WRF e orografia SRTM a 30m sls.	166
5.3	Andamenti dei valori medi giornalieri orari della velocità calcolati con WRF e orografia SRTM a 30m sls.	167
5.4	Andamento della temperatura media mensile calcolato con WRF e orografia SRTM a 10m sls.	168
5.5	Andamenti dei valori medi giornalieri orari della temperatura calcolati con WRF e orografia SRTM a 10m sls.	168
5.6	Rose dei venti trimestrali WRF con SRTM a 30m sls: energia per direzione di provenienza.	169
5.7	Rose dei venti mensili WRF con SRTM: energia per direzione di provenienza.	170
5.8	Andamento dei valori medi mensili della velocità calcolato con WRF e orografia GTOPO30 a 30m sls.	171
5.9	Andamento dei valori medi giornalieri della velocità calcolati con WRF e orografia GTOPO30 a 30m sls.	172
5.10	Andamento della temperatura media mensile calcolato con WRF e orografia GTOPO30 a 10m sls.	173
5.11	Andamenti dei valori medi giornalieri orari della temperatura calcolati con WRF e orografia GTOPO30 a 10m sls.	173
5.12	Rose dei venti trimestrali WRF con GTOPO30 a 30m sls.	174
5.13	Rose dei venti mensili WRF con GTOPO30: energia per direzione di provenienza.	175
5.14	Andamento dei valori medi mensili della velocità calcolati con MM5 e orografia SRTM a 30m sls.	176
5.15	Andamento dei valori medi giornalieri della velocità calcolati con MM5 e orografia SRTM a 30m sls.	177

ELENCO DELLE FIGURE

5.16	Andamento dei valori medi mensili della temperatura calcolati con MM5 e orografia SRTM a 10m sls.	178
5.17	Andamenti dei valori medi giornalieri orari della temperatura calcolati con MM5 e orografia SRTM a 10m sls.	178
5.18	Rose dei venti trimestrali MM5 con SRTM a 30m sls.	179
5.19	Rose dei venti mensili MM5 con SRTM: energia per direzione di provenienza.	180
5.20	Andamento dei valori medi mensili della velocità calcolati con MM5 e orografia GTOPO a 30m sls.	181
5.21	Andamento dei valori medi giornalieri della velocità calcolati con MM5 e orografia GTOPO30 a 30m sls.	182
5.22	Andamento dei valori medi mensili della temperatura calcolati con MM5 e orografia GTOPO30 a 10m sls.	183
5.23	Andamenti dei valori medi giornalieri orari della temperatura calcolati con MM5 e orografia GTOPO30 a 10m sls.	183
5.24	Rose dei venti trimestrali MM5 con GTOPO30 a 30m sls.	184
5.25	Rose dei venti mensili MM5 con GTOPO30: energia di provenienza per direzione.	185
5.26	Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati a 30m sls con WRF adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30.	186
5.27	Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati a 10m sls con WRF adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30.	187
5.28	Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati a 30m sls con MM5 adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30.	188
5.29	Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati a 10m sls con MM5 adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30.	188
5.30	Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati a 30m sls con MM5 e WRF adottando il modello di orografia GTOPO30.	189
5.31	Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati a 10m sls con MM5 e WRF adottando il modello di orografia GTOPO30.	190
5.32	Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati a 30m sls con MM5 e WRF adottando il modello di orografia SRTM.	191

ELENCO DELLE FIGURE

5.33	Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati a 10m sls con MM5 e WRF adottando il modello di orografia SRTM.	191
5.34	Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati con WRF adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30 ed i valori misurati dall’anemometro a coppette a 30m sls.	193
5.35	Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati con WRF adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30 ed i valori misurati dal termometro a 10m sls.	193
5.36	Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati con MM5 adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30 ed i valori misurati dall’anemometro a coppette a 30m sls.	195
5.37	Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati con MM5 adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30 ed i valori misurati dal termometro a 10m sls.	196
5.38	Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dall’anemometro a coppette a 30m sls.	200
5.39	Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dal termometro a 10m sls.	200
5.40	Confronto tra gli andamenti giornalieri della velocità calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dall’anemometro a coppette a 30m sls nel mese di luglio 2009.	203
5.41	Confronto tra gli andamenti giornalieri della velocità calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dall’anemometro a coppette a 30m sls nel mese di ottobre 2009.	203
5.42	Confronto tra gli andamenti giornalieri della velocità calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dall’anemometro a coppette a 30m sls nel mese di gennaio 2010.	204

ELENCO DELLE FIGURE

5.43	Confronto tra gli andamenti giornalieri della velocità calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dall’anemometro a coppette a 30m sls nel mese di aprile 2010.	204
5.44	Confronto tra gli andamenti giornalieri della temperatura calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dal termometro a 10m sls nel mese di luglio 2009.	205
5.45	Confronto tra gli andamenti giornalieri della temperatura calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dal termometro a 10m sls nel mese di ottobre 2009.	205
5.46	Confronto tra gli andamenti giornalieri della temperatura calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dal termometro a 10m sls nel mese di gennaio 2010.	206
5.47	Confronto tra gli andamenti giornalieri della temperatura calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dal termometro a 10m sls nel mese di aprile 2010.	206
5.48	Rose dei venti: media sul trimestre maggio÷luglio 2009 a 30m sls.	207
5.49	Rose dei venti: media sul trimestre agosto÷ottobre 2009 a 30m sls.	208
5.50	Rose dei venti: media sul trimestre novembre 2009÷gennaio 2010 a 30m sls.	209
5.51	Rose dei venti: media sul trimestre febbraio÷aprile 2010 a 30m sls.	210
5.52	Rose dei venti mensili CMC1 a 30m sls: frequenza per direzione di provenienza.	211
5.53	Rose dei venti mensili WRF a 30m sls: frequenza per direzione di provenienza.	212
5.54	Rose dei venti mensili MM5 a 30m sls: frequenza per direzione di provenienza.	213
5.55	Rose dei venti mensili CMC1 a 30m sls: velocità media per direzione di provenienza.	214
5.56	Rose dei venti mensili WRF a 30m sls: velocità media per direzione di provenienza.	215
5.57	Rose dei venti mensili MM5 a 30m sls: velocità media per direzione di provenienza.	216
5.58	Rose dei venti mensili CMC1 a 30m sls: energia per direzione di provenienza.	217

ELENCO DELLE FIGURE

5.59	Rose dei venti mensili WRF a 30m sls: energia per direzione di provenienza.	218
5.60	Rose dei venti mensili MM5 a 30m sls: energia per direzione di provenienza.	219
A.1	Riferimenti inerziale e rotante	225
A.2	Componente centripeta dell’accelerazione	226
A.3	Coordinate sferiche	227
A.4	Variazione di \vec{v} con λ	229
A.5	Variazione di \vec{j} con λ e ϕ	231
A.6	Variazione di \vec{k} con λ e ϕ	233
A.7	Accelerazioni: componenti in coordinate sferiche	235
A.8	Coordinate cilindriche.	236
A.9	Volume di controllo V_c tra gli istanti iniziale e finale di osservazione	244
A.10	Cubetto elementare di lato ε	246
A.11	Stati di deformazione pura e rotazione rigida pura.	247
A.12	Tetraedro elementare	251
A.13	Accelerazione di gravità \tilde{g}	260
A.14	Moti vibrazionali in una molecola biatomica	262
A.15	Forze idrostatiche e viscosse su tetraedro elementare di fluido	262

Elenco delle tabelle

1.1	Classificazione di base dei principali fenomeni meteo. . . .	11
2.1	Interazione tra i modelli di parametrizzazione in WRF. . .	35
2.2	Fattore di mappa per diversi tipi di proiezioni	43
2.3	Sequenza di integrazione temporale RK3	54
2.4	CFL massimo ammesso per uno schema avvertivo 1D . . .	65
3.1	Principali tipi di termocoppie	81
3.2	Coefficienti polinomiali delle caratteristiche tensione - temperatura	82
3.3	Coefficienti polinomiali delle caratteristiche della resistenza ohmica di diversi metalli.	85
3.4	Canali e corrispondenti grandezze vento.	100
3.5	Valori tabellati della velocità media mensile rilevata dagli anemometri a coppette.	107
3.6	Parametri per la classificazione degli aerogeneratori secondo [IEC 08].	113
3.7	Valori riepilogativi delle grandezze misurate dagli anemometri della torre CMC1.	114
3.8	Valori medi mensili dell'intensità di turbolenza e classificazione secondo la IEC 61400-1. Valori relativi ai soli dati ritenuti validi.	114
4.1	Estensione del settore W020N90.	117
4.2	Contenuto di W020N90.tar.gz.	118
4.3	Caratteristiche del file e dell'orografia dell'Italia centrale di Fig. 4.3 srtm_39_04.asc	124
4.4	Organizzazione dei dati in un file binario geogrid.	124
4.5	Contenuto della cartella GEOG_WRF.	127
4.6	Script da sottomettere tramite qsub a pbs_server.	137
4.7	Script wrapper per lanciare wrf.exe.	137
4.8	Script di avvio della coppia Torque - MAUI.	140

ELENCO DELLE TABELLE

4.9	Quote dal suolo dei centri delle celle di calcolo.	151
4.10	Tempi di simulazione dei domini d5 con differenti risoluzioni di griglia.	159
4.11	Struttura dati degli anemometri virtuali.	160
4.12	Struttura dati binari nei file di tabelle di occorrenza .cwd	160
4.13	Struttura di un file .info per la sigma level a 29m dal suolo.	162
5.1	Valori tabellati della velocità media mensile calcolati da WRF SRTM a 30m sls.	167
5.2	Valori tabellati della velocità media mensile calcolati da WRF con orografia GTOPO30 a 30m sls.	172
5.3	Valori tabellati della velocità media mensile calcolata da MM5 con orografia SRTM a 30m sls.	177
5.4	Valori tabellati della velocità media mensile calcolata da MM5 con orografia GTOPO30 a 30m sls.	182
5.5	Valori tabellati della velocità media mensile calcolati da WRF con orografia SRTM e GTOPO30 e misurati dall’anemometro a coppette posto a 30m sls.	194
5.6	WRF: confronto tra i valori medi annuali della temperatura.	194
5.7	Valori medi annuali della temperatura.	195
5.8	Valori tabellati della velocità media mensile calcolati da MM5 con orografia SRTM e GTOPO30 e misurati dall’anemometro a coppette posto a 30m sls.	197
5.9	Valori tabellati della velocità media mensile calcolati da MM5 e WRF con orografia SRTM e misurati dall’anemometro a coppette posto a 30m sls.	201
5.10	Valori tabellati della temperatura media mensile calcolati da MM5 e WRF con orografia SRTM e misurati dal termometro posto a 10m sls.	202

Capitolo 1

L’atmosfera terrestre

Il presente è un capitolo introduttivo che non vuole aggiungere nulla a quanto già presente nella vastissima letteratura dedicata alla descrizione dei fenomeni meteorologici ed allo studio dell’atmosfera, tuttavia, vuole essere un compendio breve ma necessario per la comprensione di quanto descritto nei capitoli successivi.

Nella prima parte del capitolo vengono richiamati i concetti fondamentali legati alla termodinamica dell’atmosfera terrestre ([Borr 06]). Successivamente si accenna al Planetary Boundary Layer (**PBL**) ed alle problematiche legate ai complessi fenomeni che ne determinano lo stato. Nella parte finale si riassumono i punti fondamentali legati ai meccanismi di formazione e sviluppo della turbolenza in atmosfera.

Capitolo 1. L'atmosfera terrestre

1.1 La circolazione atmosferica

Il motore responsabile della circolazione delle masse d'aria che compongono l'atmosfera terrestre è senza dubbio l'irraggiamento solare. A causa di questo si generano, tra diverse zone a differente irraggiamento con temperature diverse, delle differenze di pressione che determinano la nascita di venti tra punti alle medesime quote. Al fine di comprendere tali moti risulta necessaria la profonda comprensione dei fenomeni e delle grandezze termodinamiche in gioco.

Un efficace esempio sulla meccanica del funzionamento dell'atmosfera terrestre è quello dato di seguito e schematizzato in Fig. 1.1 in cui si

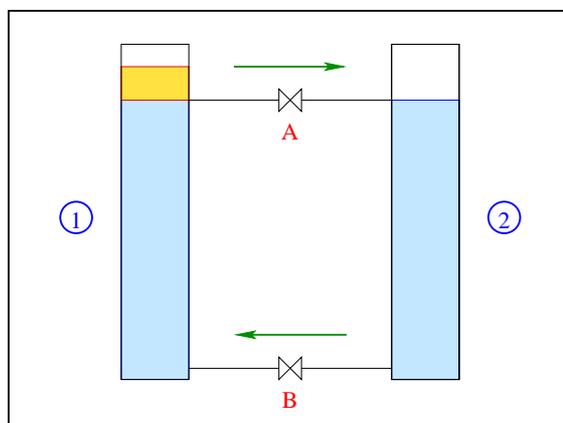


Figura 1.1: Modello esemplificato di circolazione per differenza di temperatura.

hanno due colonne di fluido inizialmente allo stesso livello e alla medesima temperatura in comunicazione attraverso due condotti intercettati da due valvole. Supponendo di mantenere chiuse le valvole di intercettazione A e B si aumenti la temperatura nella colonna 1, mantenendo invariata la temperatura della colonna 2. A causa del riscaldamento, il fluido presente nella colonna 1 si espanderà ed il suo pelo libero si solleverà rispetto alla quota iniziale. Chiaramente il peso delle due colonne di fluido rimarrà invariato per cui l'apertura della valvola di intercettazione B non sortirà alcun effetto sulla redistribuzione del fluido tra i due contenitori. In effetti però, l'apertura della valvola di intercettazione A favorirà la migrazione di parte del fluido, attraverso il condotto di comunicazione superiore, dalla colonna 1 alla colonna 2. Si intuisce facilmente come l'apertura della valvola di intercettazione B inneschi una circolazione oraria di fluido che avviene, nel condotto superiore, dalla

1.1. La circolazione atmosferica

zona più calda alla zona più fredda, e nel condotto inferiore dalla zona più fredda alla zona più calda. Il motore che genera questa circolazione è costituito dalla differenza di temperatura tra i due contenitori e si manterrà fintanto che questa non si annulli. L'asse terrestre è inclinato

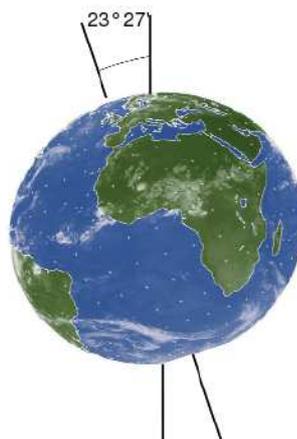


Figura 1.2: Inclinazione dell'asse di rotazione terrestre.

di $23^{\circ}27'$ rispetto alla normale al piano dell'orbita, pertanto le regioni equatoriali e tropicali risultano maggiormente irraggiate, e dunque riscaldate, rispetto a quelle polari. Si comprende quindi come il modello precedentemente descritto, seppur estremamente esemplificativo, possa spiegare l'origine della genesi dei venti.

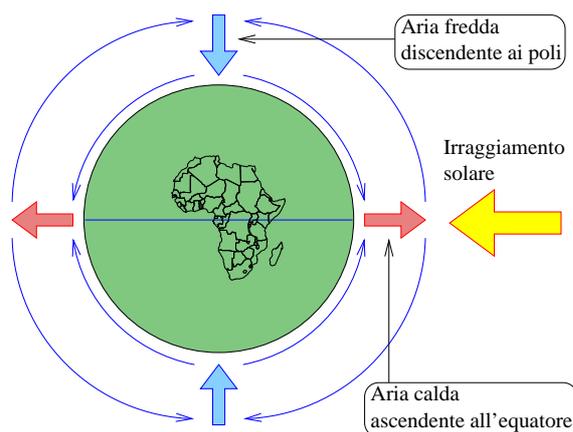


Figura 1.3: Effetto semplificato dell'irraggiamento sulla genesi dei venti.

Capitolo 1. L'atmosfera terrestre

1.1.1 Comportamento termodinamico dell'atmosfera

Stabilito che la differenza di temperatura è il motore principale che determina il movimento ventoso delle masse d'aria dell'atmosfera, è interessante capire quali siano i fenomeni che ne determinano la variazione locale. Essenzialmente possono essere così riassunti:

Irraggiamento solare La fonte primaria di energia necessaria per spostare le masse d'aria è il Sole. Tuttavia, l'atmosfera terrestre si comporta in maniera quasi trasparente all'irraggiamento solare che raggiunge nella quasi totalità la superficie terrestre.

Radiazione terrestre La superficie terrestre, scaldandosi, rilascia l'energia assorbita dal sole in forma di calore a lunghezze d'onda molto più lunghe di quelle caratteristiche della luce solare. A queste lunghezze d'onda, l'atmosfera terrestre non è trasparente. L'energia radiante emessa dalla superficie terrestre viene per la maggior parte assorbita dall'atmosfera e in parte riflessa, mentre solo una piccola parte la attraversa tornando nello spazio.

Radiazione nell'atmosfera L'energia emessa dalla superficie della terra e degli oceani è assorbita dagli strati d'aria nelle sue immediate vicinanze. Questi strati a loro volta la irradiano verso il basso e verso l'alto. Gli strati sovrastanti assorbono il calore e lo emettono ancora verso il basso e verso l'alto in un processo a catena che si ripete attraverso tutta l'atmosfera.

Compressione ed espansione dell'aria La pressione atmosferica è esercitata dal peso dell'aria sovrastante. Una particella d'aria secca che si muova verticalmente nell'atmosfera, subisce una variazione di pressione ed una variazione di temperatura ricavabili attraverso la legge di stato dei gas perfetti ed il primo principio della termodinamica:

$$p v = R T \quad (1.1)$$

$$dq = c_v dT + p dv \quad (1.2)$$

in cui p è la pressione, v il volume specifico, R è la costante dei gas per l'aria secca, T è la temperatura assoluta, dq è la quantità di calore trasferita alla massa d'aria in moto, e c_v è il calore specifico a volume costante. Differenziando la prima e sostituendo la quantità $p dv$ si ottiene:

$$dq = (c_v + R) dT - v dp$$

1.1. La circolazione atmosferica

Nel caso di una trasformazione isobara il calore scambiato può essere espresso dalla $dq = c_p dT$ ottenendo la nota relazione $R = c_p - c_v$ che sostituita nella precedente porta a scrivere:

$$dq = c_p dT - R \frac{dp}{p}$$

Se la particella d’aria si muove in modo da poter ritenere la sua evoluzione adiabatica, allora si ottiene:

$$\frac{dT}{T} = \frac{R}{c_p} \frac{dp}{p}$$

la cui integrazione porta ad ottenere la relazione di Poisson:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (1.3)$$

in cui $R/c_p = 0.288$ per l’aria secca. L’ipotesi di adiabaticità è realistica per moti verticali abbastanza veloci da poter trascurare lo scambio termico della particella di cui si segue l’evoluzione con l’ambiente che la circonda. La Eq. (1.3) mostra come l’ascensione di una particella d’aria secca venga accompagnata da un suo raffreddamento di $10^\circ C/Km$ che prende il nome di Dry Adiabatic Lapse Rate (**DALR**). La relazione ora trovata si presta a delle semplici considerazioni relative alla stabilità dello stato dell’atmosfera. Si supponga che una particella d’aria, per un qualsiasi motivo venga spostata verso l’alto. Se il movimento è abbastanza rapido (ipotesi normalmente accettabile) da ritenere il suo moto adiabatico, essa si raffredderà rispetto da una temperatura T_1 iniziale alla quota Z_1 di partenza, ad una temperatura T_2^* alla quota $Z_2 > Z_1$ dove l’aria circostante si troverà alla temperatura T_2 . Si preconfigurano tre possibili situazioni relativamente al tipo di stratificazione dell’atmosfera in cui si muove la particella d’aria:

1. La temperatura della particella è inferiore a quella dell’aria che la circonda $T_2^* < T_2$, di conseguenza la sua densità sarà maggiore di quella del fluido che la circonda. Nascerà una forza stabilizzante verso il basso che si opporrà al moto ascensionale della particella riportandola alla posizione di partenza con un moto possibilmente oscillatorio alla frequenza di Brunt-Väisälä (Si veda [Holt 04] 2.7.3). Una frequenza alta delle oscillazioni denota una alta stabilità della stratificazione mentre il contrario può dirsi per una bassa frequenza [Smit 07]. In questo caso si dice che l’atmosfera è stratificata stabilmente.

Capitolo 1. L'atmosfera terrestre

2. La temperatura della particella è superiore a quella dell'aria che la circonda $T_2^* > T_2$ e di conseguenza la sua densità sarà minore di quella del fluido che la circonda. Nascerà una forza instabilizzante verso l'alto che accelererà ulteriormente la particella nel suo moto ascensionale. In questo caso si ha una stratificazione instabile dell'atmosfera.
3. Se il gradiente di temperatura della particella è lo stesso dell'atmosfera che la circonda allora si ha una stratificazione neutra dell'atmosfera.

Condensazione ed evaporazione del vapor d'acqua La pressione dell'aria umida, secondo la legge di Dalton, è data dalla somma delle pressioni parziali dell'aria secca e del vapore acqueo presente: $p_u = p_s + e$. In condizioni di saturazione, la pressione parziale del vapore raggiunge un valore limite E detto di saturazione che dipende dalla temperatura, e parte del vapore eccedente condensa in acqua liquida. Una particella ascendente d'aria umida non satura subisce una diminuzione di temperatura cui corrisponde una diminuzione di pressione di saturazione. Quando la particella raggiunge salendo le condizioni di saturazione $e = E$, si ha la condensazione del vapor d'acqua. In questo processo si libera il calore latente di vaporizzazione che contribuisce all'ascesa della particella fornendo ulteriore energia oltre a quella interna, che garantisce il movimento verticale dell'aria secca. Poiché viene liberato il calore latente di vaporizzazione, la diminuzione della temperatura della particella d'aria umida in ascesa è minore rispetto al caso d'aria secca, pertanto aiuta la convezione dell'aria verso livelli più alti dell'atmosfera. In questo caso si parla di Saturated Adiabatic Lapse Rate (**SALR**) che vale circa $5 \div 6^\circ C/Km$.

1.1.2 Comportamento dinamico dell'atmosfera

Il moto di una massa elementare d'aria è determinato dalla seconda legge di Newton, $F = ma$, dove m è la massa, a è l'accelerazione, ed F è la risultante delle forze agenti sulla massa stessa.

Forze di pressione Si consideri un elemento infinitesimo di volume $dx dy dz$ come in Fig. 1.4, soggetto alle forze $p dx dy$ e $p + \frac{\partial p}{\partial z} dz$ agenti rispettivamente sulla faccia inferiore e superiore. La forza di pressione per unità di volume agente sull'elemento sarà $-\partial p / \partial z$ nella direzione verticale e $-\partial p / \partial x$ e $-\partial p / \partial y$ rispettivamente lungo

1.1. La circolazione atmosferica

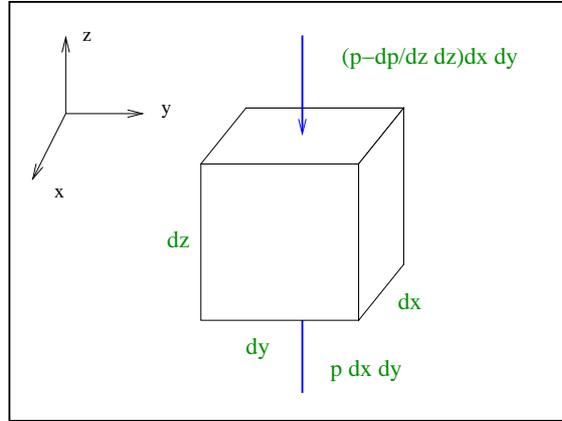


Figura 1.4: Gradiente verticale di pressione.

le direzioni orizzontali x e y . La risultante delle forze di pressione orizzontali il nome di gradiente di pressione orizzontale $-\partial p/\partial n$, con \vec{n} versore nel piano xy normale all'isobara passante per la particella considerata. Il gradiente di pressione orizzontale è il responsabile del moto orizzontale dell'aria spinge l'aria verso regioni caratterizzate da pressione minore.

Forze apparenti L'atmosfera terrestre si muove in un sistema non inerziale fisso alla Terra e ruotante solidalmente con essa. Per un osservatore solidale alla superficie terrestre, una particella che si muove è soggetta a delle forze d'inerzia *apparenti* (cfr. A.1.3). Nelle Eq. (A.21) si nota la comparsa di contributi di accelerazione dovuti alla curvatura terrestre e contributi di Coriolis (cfr. Eq. (A.19)):

$$F_c = 2m\vec{\Omega} \wedge \vec{U}$$

in cui m è la massa della particella, \vec{V} è la velocità della particella relativa ad un sistema di coordinate solidale alla superficie terrestre, Ω è la velocità angolare terrestre.

$$|\vec{F}_c| = 2m|\vec{V}||\Omega| \sin \phi = m f U$$

Il termine $f = 2\Omega \sin \phi$ è chiamato *parametro di Coriolis* funzione di ϕ che rappresenta la latitudine della particella d'aria. È intuitivo immaginare l'insorgere dei termini di Coriolis se si ha presente che una particella che ruoti solidale alla superficie terrestre è dotata di un certo momento della quantità di moto che, qualora

Capitolo 1. L'atmosfera terrestre

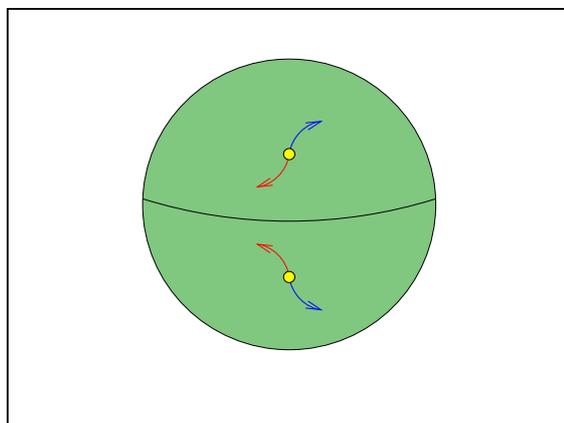


Figura 1.5: Effetto della forza di Coriolis sulle masse d'aria in movimento.

dovesse allontanarsi dalla sua posizione, tenderebbe a conservarsi. A titolo di esempio si supponga di spostare perpendicolarmente all'asse di rotazione terrestre verso quote più elevate una particella. A seguito di un tale spostamento, si può facilmente immaginare che, al fine di conservare la sua quantità di moto la particella tenderebbe ad arretrare verso ovest. Ad un aumento della distanza dal centro di rotazione corrisponderebbe infatti una diminuzione della velocità e quindi una deriva ad occidente. Da quanto ora detto si evince il perché, nell'emisfero boreale, uno spostamento verso nord della particella la porterebbe a deviare verso oriente ed uno spostamento verso sud al contrario la porterebbe in deriva verso occidente. Chiaramente nell'emisfero australe la situazione sarebbe duale a quella appena descritta.

Forze d'attrito Ad una quota sufficientemente alta, gli effetti delle forze di attrito possono essere trascurati. In ipotesi di moto stazionario, il moto è garantito dall'equilibrio tra la forza di gradiente di pressione, la forza di Coriolis e la forza centrifuga. Nell'ulteriore ipotesi esemplificativa che il raggio della traiettoria seguita dalla particella sia tale da rendere trascurabile la forza centrifuga allora la particella si muoverà parallelamente alle isobare lasciandosi alla destra quella dal valore di pressione maggiore. Si è in questo caso nell'ipotesi di *approssimazione geostrofica*. Essendo una situazione tempo invariante, la relazione matematica risultante in tale ipotesi sarà di tipo diagnostico, ossia che non da possibili

1.1. La circolazione atmosferica

informazioni sull’evoluzione futura del moto.

$$2\vec{\Omega} \wedge \vec{U} = -\frac{1}{\rho}\nabla p$$

Una misura della validità dell’ipotesi geostrofica è data dal numero di Rossby (cfr. Sec. A.4.10), che esprime il rapporto tra le forze d’inerzia e le forze di Coriolis. In tale situazione di equilibrio, tra le forze di pressione e la forza di Coriolis si determina quello che viene chiamato “equilibrio geostrofico”. Il vento corrispondente prende il nome di **vento geostrofico**. L’approssimazione geostrofica può essere ritenuta valida a quote in cui gli effetti delle forze di attrito sono trascurabili e a latitudini medie (cfr. [Holt 04] 2.4.1).

$$V_G = \frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial n}$$

Nel caso più generale in cui le isobare sono curve, dovrà essere tenuta in conto anche la forza centrifuga. In questo caso si parlerà di **velocità di gradiente** e per l’equilibrio la sua traiettoria sarà comunque diretta parallelamente alle isobare. Nella condizione di equilibrio, la velocità prende il nome di **velocità di gradiente** del vento che coincide con la velocità geostrofica se la curvatura $r \rightarrow \infty$.

$$V_{gr} f \pm \frac{V_{gr}^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}$$

Se la massa d’aria si trova nell’emisfero Nord, il segno positivo si riferisce ad una circolazione ciclonica (ovvero antioraria intorno ad un centro a bassa pressione), ed il segno negativo ad una circolazione anticiclonica (ossia oraria intorno ad un centro ad alta pressione).

Con l’avvicinarsi alla superficie terrestre gli effetti dell’attrito aumentano al punto da non poter essere più ritenuti trascurabili al di sotto di una altezza che definisce quello che viene chiamato **strato limite atmosferico** o Atmospheric Boundary Layer (ABL). L’atmosfera al di sopra dello strato limite prende il nome di atmosfera libera. Nell’atmosfera libera l’approssimazione geostrofica fa sì che i venti siano paralleli alle isobare col verso tale da avere la pressione maggiore alla loro destra. Di mano in mano che la quota diminuisce, la forza di attrito entra in gioco nell’equilibrio dinamico della particella. Questa, di verso opposto al vettore velocità, fa in modo che, aumentando verso altezze minori, la velocità stessa ruoti in senso antiorario. La punta del vettore velocità descrive così una curva detta **spirale di Ekman**.

Capitolo 1. L'atmosfera terrestre

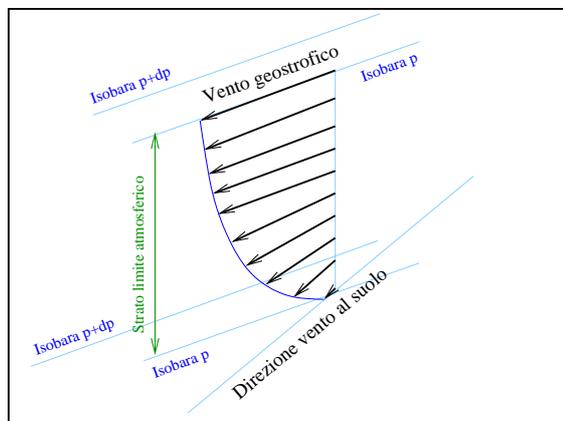


Figura 1.6: Spirale di Ekman: effetto della forza di attrito sulla direzione del vento nel ABL.

1.2 Le scale dei moti atmosferici

Il moto dell'atmosfera è talmente complesso che, al fine di esemplificarne lo studio e l'osservazione, conviene focalizzare l'attenzione sui singoli fenomeni cui si è interessati. A tale proposito, l'insieme degli eventi meteo può essere categorizzato secondo scale spaziali (e temporali) caratteristiche che variano da millimetri a chilometri (da secondi a ore e giorni). L'osservazione dei moti atmosferici può quindi essere condotta in maniera relativamente più semplice ponendo l'attenzione su quelle grandezze la cui scala è tale da influenzare effettivamente il fenomeno in studio e trascurare l'influenza delle altre di ordini di grandezza diversi. Essenzialmente si individuano tre scale:

Macroscala o Scala Sinottica L'osservazione dei fenomeni meteo da una scala sinottica fornisce un quadro generale, non di dettaglio (cfr. Fig. 1.8), della situazione meteo. I fenomeni che vengono osservati sono caratterizzati da scale con una dimensione caratteristica di almeno 500 km ed una durata di almeno 2 giorni con numeri di Rossby $Ro < 1$.

Mesoscala o Scala Convettiva I fenomeni di mesoscala sono quelli caratterizzati da scale comprese tra la sinottica e la microscala con numeri di Rossby $Ro = 1 \div 100$. Tuttavia una distinzione netta di questa categoria di fenomeni non è sempre possibile. Ad esempio i fronti ed gli uragani hanno dimensioni che spesso li collocano su diverse scale. Inoltre, l'influenza di alcune grandezze non dipende

1.2. Le scale dei moti atmosferici

After Orlanski's proposal (1975)

Scales	> 1 mo	1 mo - 1 d	1 d - 1 h	1 h - 1 m	1 m - 1 s	
larger 10000 km	Standing waves, ultra-long waves, tidal waves					<u>Macro-</u>
10000 km 2000 km		Baroclinic waves				<u>Macro-</u>
2000 km 200 km		Fronts, tropical cyclones				<u>Meso-</u>
200 km 20 km			LL jets, MCSs, sea breezes			<u>Meso-</u>
20 km 2 km			Thunderstorms, internal gravity waves, clear-air turbulence			<u>Meso-</u>
2 km 200 m				Tornadoes		<u>Micro-</u>
200 m 20 m				Dust devils, thermals		<u>Micro-</u>
20 m smaller					Turbulence	<u>Micro-</u>

Figura 1.7: Categorizzazione delle diverse scale caratteristiche.

solo dalla loro scala ma anche dalla latitudine. Basti pensare, per esempio, all'influenza della forza di Coriolis che all'equatore è nulla (quindi con $Ro \rightarrow \infty$): a tali latitudini anche fenomeni caratterizzati da scale e tempi ampi dovranno essere trattati come fenomeni “dinamicamente” piccoli.

Microscala La microscala comprende quei moti che hanno una dimensione che non supera i 20 km ed una durata minore di un'ora. In quest'ultima categoria rientra anche la turbolenza atmosferica.

Scala sinottica	Mesoscala
Correnti a getto	Temporal
Linee di fronti	Tempeste tropicali
Promontori e saccature	Brezze
Onde barocliniche	Getti notturni
	Effetto presenza laghi

Tabella 1.1: Classificazione di base dei principali fenomeni meteo.

Capitolo 1. L'atmosfera terrestre

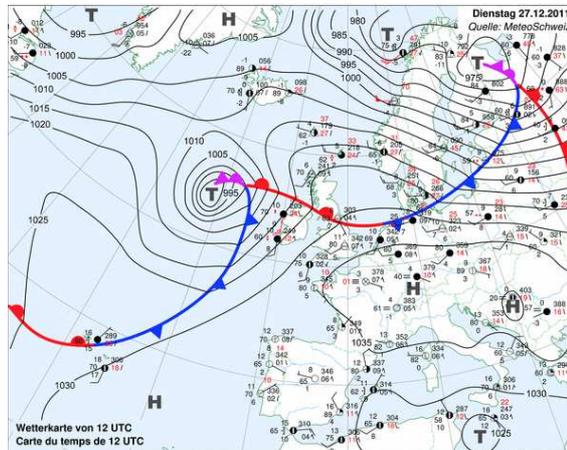


Figura 1.8: Tipica carta sinottica.

1.2.1 Spettro della velocità del vento

Come si è fin ora osservato, i fenomeni in gioco nella circolazione atmosferica sono caratterizzati da scale spaziali e temporali che variano in un ampissimo campo di valori per cui tale sarà anche la caratteristica dei fenomeni ventosi. Un grafico che riassume l'andamento dell'energia associata ai fenomeni ventosi al variare della loro frequenza (e quindi della loro dimensione nell'ipotesi di congelamento della turbolenza di Taylor [Sozz 02] 1.3.1.4) è lo spettro di Van der Hoven. Esso fu inizialmente ottenuto dalla componente longitudinale della velocità del vento ad una quota di 100m. Fornisce una misura della varianza statistica del vento turbolento, ossia il peso delle componenti armoniche, che compongono la parte variabile del vento inteso come segnale del quale si esegue l'analisi di Fourier, nel perturbare il segnale rispetto al suo valore medio. Un segnale di vento, campionato in N istanti successivi può essere visto in termini della sua trasformata discreta di Fourier:

$$U = a_0 + \sum_{k=1}^{N-1} a_k \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + \sum_{k=1}^{N-1} b_k \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)$$

1.2. Le scale dei moti atmosferici

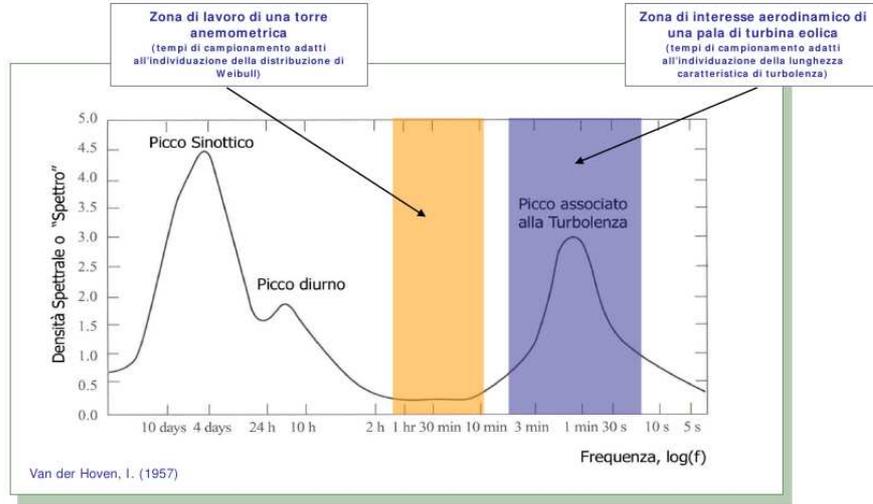


Figura 1.9: Spettro di Van der Hoven (1957).

con:

$$f_k = k/(N\Delta t) \quad (1.4)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U_n \quad (1.5)$$

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U_n \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (1.6)$$

$$b_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U_n \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (1.7)$$

in cui la Eq. (1.5) rappresenta in valor medio della velocità. La densità spettrale può essere in prima approssimazione data da:

$$P_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

e più sarà alto il valore di P_k più il segnale somiglierà ad un segnale periodico di frequenza f_k (cfr. [Sozz 02] 1.3.2.1). Nella zona caratterizzata dalle basse frequenze, e quindi da ampie dimensioni dei vortici, si hanno i fenomeni macrometeorologici. Tale regione dello spettro presenta due picchi: uno corrispondente alla periodicità del vento giornaliera (breeze caratterizzate da un periodo pari a 12 ore); l'altro relativo al normale periodo di passaggio dei fronti ossia circa 4 giorni (100 ore). Lo spettro

Capitolo 1. L'atmosfera terrestre

presenta un ulteriore massimo in corrispondenza della periodicità annuale. Alle alte frequenze è possibile osservare un picco intorno a fenomeni della durata di 1-2 minuti, da attribuire alla turbolenza atmosferica che, pur non influenzando la circolazione atmosferica, è importante nelle pratiche progettuali. Nella zona centrale di grafico di Fig. 1.9, la varianza risulta minima e pressoché costante in un periodo di tempo compreso tra 10 minuti e 1 ora. Tale zona prende il nome di *gap spettrale* e separa la parte a sinistra caratteristica dei fenomeni turbolenti da quella di destra caratteristica dei fenomeni meteo periodici. Essa fornisce un'utile informazione per la valutazione della velocità di riferimento di un determinato sito. Essendo minima e costante la varianza, è minima l'escursione della componente fluttuante della velocità eolica rispetto alla sua media che pertanto può essere calcolata con buona approssimazione mediando le registrazioni su un periodo compreso tra 10 minuti ed 1 ora. Poiché la velocità media è stazionaria all'interno del gap spettrale, in base all'ipotesi di Reynolds sarà possibile considerare la componente vento come somma del valore medio ottenuto su un periodo di 10-60 minuti e della componente fluttuante di origine turbolenta.

1.3 Circolazione generale planetaria

L'effetto combinato della rotazione terrestre e della frizione prodotta dalla superficie terrestre, rende la circolazione atmosferica più complessa rispetto al modello descritto al Par. 1.1. In particolare, si può pensare di schematizzare la circolazione atmosferica in tre cellule come in Fig. 1.10. Tale schema è coerente con l'esistenza di un fronte di bassa pressione intorno al polo (50° - 60° di latitudini Nord) e di un fronte di alta pressione nella zona subtropicale (circa 30° di latitudine), che si formano in corrispondenza della superficie di incontro di venti che provengono da direzioni diverse. Questo modello risulta ulteriormente complicato dagli effetti stagionali, come la variazione della posizione e dell'intensità dei fronti di pressione e geografici, la differenza della proprietà fisiche del terreno e la distribuzione non uniforme dei mari sul globo. I grandi continenti presenti nell'emisfero boreale provocano deviazioni spesso importanti rispetto a tale modello. Complicazioni analoghe interessano l'emisfero australe, che ha però un comportamento meno variabile rispetto a quello boreale. Generalmente, la circolazione che interessa l'emisfero australe e quella che interessa l'emisfero boreale possono essere considerate separatamente.

1.3. Circolazione generale planetaria

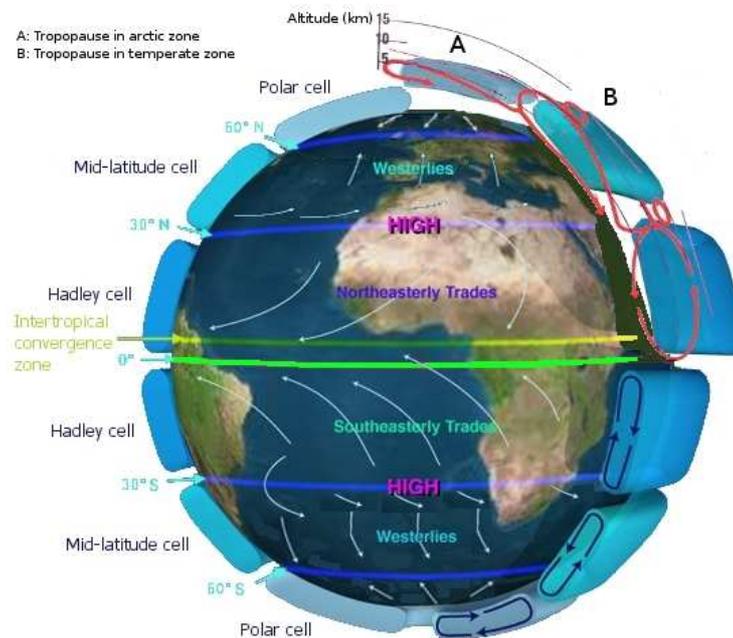


Figura 1.10: Rappresentazione della circolazione globale terrestre.

1.3.1 Circolazione secondaria di natura termica

Alla circolazione generale si aggiungono delle circolazioni secondarie, indotte dalla differenza di temperatura. In particolare, queste circolazioni si generano quando i centri di alta o bassa pressione vengono creati per effetto di un riscaldamento o raffreddamento dei livelli più bassi dell'atmosfera. I venti principali appartenenti a questa categoria sono:

Monsoni A causa del minor riscaldamento, durante l'estate, della superficie degli oceani rispetto ai continenti, in corrispondenza di questi l'aria più calda tende a salire. Per la conservazione della massa, si attiva dunque una circolazione dagli oceani verso i continenti nel periodo estivo mentre durante l'inverno il fenomeno procede al contrario. I monsoni sono venti caratteristici tipici del continente asiatico, vista la sua notevole estensione.

Cicloni tropicali Hanno origine sugli oceani tropicali dove la temperatura dell'acqua supera i 26°C. L'energia di questi venti deriva dal rilascio di calore latente. In particolare, per certe condizioni climatiche, l'aria calda e umida da origine alla formazione di nubi in cui il vapore, condensando, rilascia calore latente. L'energia

Capitolo 1. L'atmosfera terrestre

liberata dalla condensazione del vapore nelle correnti ascendenti causa un ciclo di auto amplificazione. L'aria si scalda, salendo di più, e ciò incrementa la condensazione. L'aria che fuoriesce dalla sommità ridiscende verso il basso sotto forma di venti potenti. L'elevata energia liberata è talmente elevata che i venti che ne conseguono possono essere disastrosi. Generalmente si formano ad una latitudine tra i 5° - 20° , ed il loro diametro raggiunge le centinaia di chilometri. Nella Fig. 1.11 è schematizzata la struttura di un

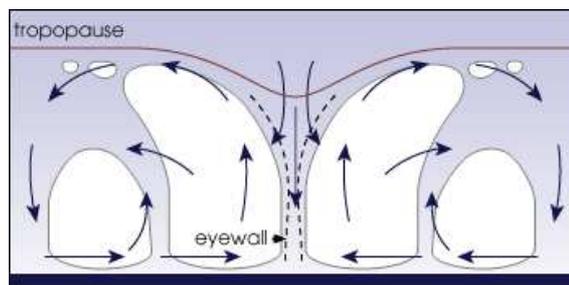


Figura 1.11: Struttura semplificata di un ciclone.

ciclone tropicale. Nella regione interna risiede l'occhio del ciclone ossia una regione caratterizzata da aria quasi secca relativamente calma. Lungo il contorno dell'occhio l'aria sale lentamente, e successivamente cade in corrispondenza del centro. Nella regione immediatamente esterna l'aria calda e umida sale, il vapore condensa rilasciando una grande quantità di calore latente (e dunque di energia) causando piogge molto intense. Nelle regioni superiore e interna l'aria viene richiamata dall'occhio lungo la superficie del suolo, ed incanalata nella regione centrale dove è sospinta ad un'altezza di circa 10 km rispetto all'occhio del ciclone stesso. In corrispondenza della superficie oceanica l'aria calda e umida, in moto nella regione a contatto col mare defluisce nella regione centrale fornendo ulteriore energia all'uragano. In corrispondenza della terra ferma, la frizione con il terreno produce una perdita di energia, pertanto il ciclone tende gradualmente ad estinguersi.

Cicloni extratropicali Generati o per l'azione meccanica prodotta da ostacoli (montagne e barriere) su correnti atmosferiche di larga scala, o per l'interazione di masse d'aria in corrispondenza di diversi fronti. Le zone di transizione tra diverse masse d'aria prendono il nome di zone frontali. La variazione delle proprietà fisiche dell'atmosfera in corrispondenza delle zone frontali è rapida ed avviene

1.3. Circolazione generale planetaria

lungo le cosiddette superfici frontali che sono superfici di discontinuità. L'intersezione di una superficie frontale con una superficie avente la stessa quota prende il nome di fronte. Un fronte può essere freddo o caldo in base alla direzione del suo moto verso arie più calde o più fredde. Generalmente, un fronte caldo si sposta lentamente e non è associato ad avverse condizioni meteorologiche, mentre un fronte freddo si muove più rapidamente e può causare maltempo. Le masse d'aria messe in moto dai cicloni extratropicali, hanno proprietà pressoché costanti lungo distanze orizzontali comparabili alle dimensioni degli oceani e dei continenti.

Venti locali: Fohen e Bora L'influenza di correnti di piccola scala sulla circolazione generale è trascurabile, tuttavia la loro intensità può essere talvolta considerevole. Venti forti e localizzati possono generarsi per effetto della variazione di altezza del terreno. Se una massa d'aria si sposta da una zona pianeggiante verso una regione montuosa o collinare, l'aria si raffredda durante l'ascesa di $10^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ di altitudine (**DALR**). Quando la temperatura scende sotto il valore di saturazione in prossimità del Lifting Condensation Level (**LCL**), il vapore d'acqua condensa portando piogge o neve, e la variazione di temperatura con l'altezza si assesta a circa $5^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ (**SALR**).

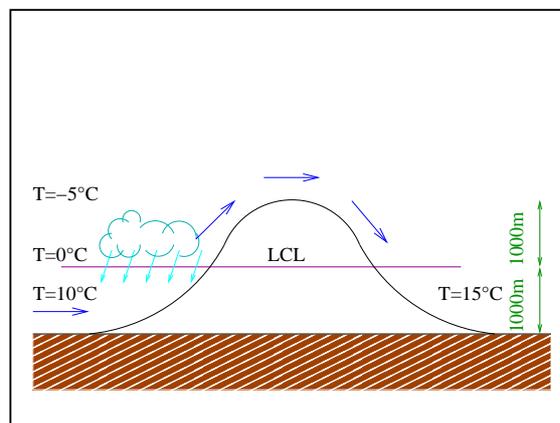


Figura 1.12: Formazione del Fohen.

L'aria a questo punto, liberatasi da parte dell'umidità risulta più secca. Oltrepastato il picco del rilievo, la massa d'aria ridiscende variando la sua temperatura col **DALR** tornando alla quota di

Capitolo 1. L'atmosfera terrestre

partenza più calda. In questo caso il vento caldo che si stabilisce prende il nome di Fohen. Nel caso in cui la massa d'aria non riesca a riscaldarsi a sufficienza si ha la formazione della Bora.

Capitolo 2

La Numerical Weather Prediction

La Numerical Weather Prediction (**NWP**) si propone, sfruttando opportuni modelli matematici dell’atmosfera, di fornire la previsione meteo in una certa area (locale o globale) sfruttando come condizioni iniziali e al contorno, i valori reali misurati delle grandezze fisiche in gioco. I modelli di mesoscala utilizzati nel presente lavoro sono Advanced Research WRF (**ARW**) e Mesoscale Model Fifth Generation (**MM5**). Il primo sta negli ultimi anni gradualmente sostituendo il secondo, del quale è il successore. Nella descrizione che segue si riportano le caratteristiche salienti comuni ai modelli di mesoscala in genere, ma ci si sofferma più in dettaglio sulle caratteristiche di **ARW**, peraltro molto simili al suo predecessore. Le principali differenze tra i due modelli vengono evidenziate nella parte finale del capitolo.

Capitolo 2. *La Numerical Weather Prediction*

2.1 Breve storia

La storia della **NWP** risale all’inizio del diciannovesimo secolo [Lync 08] quando Abbe, Richardson e Bjerksen per primi affrontarono il problema della previsione numerica delle condizioni meteo.

Nel 1904 Vilhelm Bjerknes suggerì che le condizioni meteo potevano essere previste risolvendo un set di sette equazioni primitive della fluidodinamica e della termodinamica insieme a precisi valori delle condizioni atmosferiche nello stato iniziale. Fu così che iniziò quell’approccio qualitativo, piuttosto che quantitativo, al problema meteo noto come [Bjer 04] “Bergen school”.

In quegli anni lo scienziato britannico Lewis F. Richardson [Rich 04] fallì il famoso tentativo di calcolare *a mano* una previsione meteo confermando così che, a quel tempo, previsioni numeriche affidabili erano ancora lontane dall’essere ottenute. Richardson tentò di risolvere il set di equazioni indicate da Abbe [Abbe 01] e Bjerksen per mezzo della tecnica numerica delle differenze finite. Purtroppo gli errori risultanti dal calcolo furono grandi al punto tale da rendere i risultati del tutto inaccettabili. Tuttavia, egli si accorse che quegli errori non erano una conseguenza del metodo utilizzato per la soluzione, ma piuttosto di condizioni al contorno “*sbilanciate*” che davano origine alla comparsa, nelle soluzioni, di onde gravitazionali [Gill 82]. Richardson suggerì allora che, al fine di ottenere delle condizioni al contorno congruenti, sarebbe stato necessario applicare un processo, per così dire, di “*pulizia*” ora conosciuto col nome di “*inizializzazione*”. Il processo di inizializzazione, in pratica, agisce sulle condizioni iniziali di un modello **NWP** in modo da filtrare via le soluzioni ad alta frequenza indesiderate [Dale 91]. La procedura consiste in una integrazione fortemente smorzata delle equazioni intorno all’istante iniziale, in avanti e in dietro, alle differenze finite.

Dopo la seconda guerra mondiale la nascita di una rete di stazioni aeree e lo sviluppo dei primi calcolatori elettronici resero possibile l’inizio dello sviluppo della **NWP** secondo la via suggerita da Bjerknes, sebbene ci si rese subito conto che la complessità del problema era maggiore di quanto ci si fosse fino ad allora aspettato.

Fu Von Neumann, il cui “*Fast Automating Computing Machinery*” fu costruito tra il 1946 e il 1952, che si accorse che il fallimento dell’esperimento di Richardson fu anche dovuto a grossi problemi di instabilità numerica legati al Courant-Friedrichs-Levy Number (**CFL**) [Cour 67]. L’esistenza di soluzioni ad alta frequenza nella forma di onde gravitazionali rese necessaria l’adozione di timestep e dimensioni di griglia di calcolo molto corti e comunque adeguati che a quel tempo richiedevano risorse computazionali non ancora disponibili.

2.1. Breve storia

Alla fine degli anni 40, Charney [Char 47] ed il suo gruppo trovarono un metodo per mezzo del quale riuscirono a modificare il set di equazioni e a filtrare le soluzioni indesiderate. In ogni modo, le equazioni filtrate di natura quasi-geostrofica, erano adatte solamente alla rappresentazione di fenomeni di scala globale [Holt 04]. Per questa ragione, l’interesse si spostò di nuovo verso il set di equazioni non filtrate con condizioni al contorno opportunamente inizializzate.

Nel 1955 Phillips [Phil 56] mise a punto il primo General Circulation Model (GCM) mettendo a punto un esperimento numerico basato su un modello di atmosfera a 2 strati ed una griglia cilindrica di 16x17 celle.

Dopo Phillips, prima con Smagorinsky e Manabe, poi con Mintz e Arakawa, i modelli GCM diventarono via via sempre più complessi. Già prima del 1964 una simulazione del clima per l’intero globo era stata portata a termine. Questa, seppur basata su un modello di atmosfera a due strati, comprendeva comunque un modello geografico abbastanza realistico ed una inclusione degli effetti della presenza degli oceani e delle coperture nevose. I risultati ottenuti, nonostante non fossero del tutto corretti, mostravano comunque le caratteristiche di base dei venti e di altre grandezze meteo in maniera più o meno corretta.

Un altro lavoro che merita di essere ricordato è quello di Kasahara e Washington [Kasa 67] che implementarono il modello di Richardson nell’intento di derivare la componente verticale della velocità. Il lavoro ispirò la nascita di altri modelli negli anni che seguirono come per esempio il Community Atmosphere Model (CAM), che a sua volta fa parte del Community Climate System Model (CCSM). Il CAM è un modello completamente accoppiato atmosfera-oceano il cui scopo è quello di simulare il clima presente passato e futuro del pianeta.

Nel 1964 il gruppo dell’National Center for Atmospheric Research (NCAR) a Boulder, in Colorado mise a punto il suo primo modello meteo molto simile a quello di Richardson ma senza i suoi problemi di stabilità che incorporava gli effetti della radiazione. Comunque fu subito evidente come, per trattare i fenomeni di piccola scala come per esempio lo sviluppo dei cumuli, fosse necessaria una qualche forma di parametrizzazione e che questa non fosse in ogni caso ancora sufficiente ad ottenere risultati soddisfacenti. Mancava infatti la disponibilità di dati meteo affidabili da fornire al modello nella forma di condizioni iniziali e al contorno. Tale mancanza influenzava pesantemente l’accuratezza dei risultati.

Col passare degli anni, la potenza di calcolo resasi disponibile con l’evoluzione delle nuove famiglie di calcolatori, ha sempre più sopperito alla complessità crescente dei modelli matematici e la loro fame di risorse computazionali.

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

Oggi, due dei più importanti centri mondiali che lavorano allo sviluppo di sempre più accurati **GCM** sono l’European Centre for Medium-range Weather Forecast (**ECMWF**)¹ fondato in Europa nel 1973, che:

- si basa su metodi spettrali, è semi-lagrangiano e semi-implicito;
- si basa su griglie spaziali di 25km e una risoluzione verticale di 91 strati;
- utilizza dati iniziali provenienti da un processo di assimilazione Four Dimensional Data Assimilation (**FDDA**) che si appoggia su un’enorme quantità di dati raccolti per un periodo di 12 ore;

e l’**NCAR**-National Center for Environmental Protection (**NCEP**) fondato in America nel 1988 che:

- è un Global Forecasting System (**GFS**) basato su metodi spettrali;
- permette di avere risoluzioni orizzontali fino a 0.5”x0.5”, con 64 strati verticali;
- prevede l’uso di modelli fisici come correzione da introdurre nei calcoli della dinamica.

I modelli **GCM** sono essenziali per fornire ai modelli di mesoscala le opportune condizioni al contorno, per esempio appoggiandosi alla **FDDA** [Stau 90] [Stau 91]. Le differenze esistenti tra le griglie pertinenti ai modelli **GCM** e quelli di mesoscale richiedono opportune tecniche di “nesting”.

2.2 Uso della NWP per la valutazione di produttività di siti eolici

La valutazione della risorsa eolica offerta da un sito, consiste in un laborioso e accurato processo di raccolta di dati del vento, messo in atto tramite l’installazione di stazioni meteorologiche nel luogo di interesse, oppure lo sfruttamento delle informazioni disponibili e fornite da stazioni preesistenti. Purtroppo, visto l’elevato costo, il numero di stazioni che viene installato non è mai elevato, ed inoltre le stazioni esistenti, che possono essere sfruttate per ottenere le informazioni richieste, sono, nella quasi totalità dei casi, locate in aree specifiche quali aeroporti,

¹Una previsione a medio termine si riferisce ad un lasso di tempo che va da una settimana e si estende fino a dieci giorni.

2.2. Uso della NWP per la valutazione di producibilità di siti eolici

porti, centri cittadini, ben lontani dal sito da studiare. Le stazioni meteo da installare devono rispettare le specifiche tecniche, regolamentate dal World Meteorological Organization (**WMO**), come quelle di misurare grandezze meteo fondamentali a differenti altezze: per esempio la temperatura a 2m dal suolo e la velocità del vento a 10m dal suolo. La lunghezza del periodo di rilevazione dei dati, inoltre, non deve essere inferiore ad un anno, il che ritarda ovviamente di un anno l’ottenimento delle informazioni richieste.

Per far fronte a queste limitazioni, negli ultimi anni, si sta ricorrendo sempre più spesso all’uso della **NWP** come mezzo della stima della producibilità eolica di un sito di interesse. I modelli meteo di mesoscala più frequentemente adottati sono **MM5**, Weather Research Forecast Mesoscale Model (**WRF**), Consortium for Small Scale Model Limited-Area Ensemble Prediction System (**COSMO-LEPS**), Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model (**KAMM**), Regional Atmospheric Modeling System (**RAMS**) con risoluzioni orizzontale e verticale di griglia commisurate alla potenza di calcolo disponibile.

Si riportano qui di seguito alcuni lavori che testimoniano il sempre più frequente ricorso alla **NWP** come mezzo per la stima dell’energia fornita da un sito di interesse adatto alla installazione di un parco eolico.

In [**Jime 07**] viene fatto uno studio comparativo, relativamente ad un sito off-shore, in cui il modello **MM5**, con una griglia di passo 9Km e 24 strati verticali, utilizzando i dati **NCEP** per l’anno 2004, fornisce una sottostima dei dati di produzione energetica del 4% a 10m e a 100m. Altresì **MM5** fornisce risultati in buon accordo alle altezze di 30m e 40m.

In [**CGui 09**] è stato usato il modello **WRF** con griglie di 3Km e 6Km, 42 strati verticali e dati di rianalisi **NCEP** come condizioni al contorno e i risultati hanno sottostimato di circa il 5% i dati misurati.

Un altro studio fatto circa la capacità dei modelli di mesoscala di fornire una valutazione di producibilità di siti off-shore è riportato in [**Shim 09**]. In questo lavoro sono stati usati i modelli **MM5** e **WRF** con una risoluzione di griglia di 4.5Km e 1.5Km per produrre una mappa di ventosità del Giappone utilizzando come condizioni al contorno, i dati con risoluzione di 10Km forniti dal Japan Meteorological Agency Mesoscale ANALysis model (**JMA-MANAL**). Lo studio ha mostrato come sia **MM5** che **WRF** abbiano prodotto risultati numerici in accordo con i dati sperimentali affetti da un errore sulla media mensile variabile tra 0.24 e 1.9m/s. Una miglior performance è stata fornita dai modelli numerici alle quote maggiori, attribuendo così alla modellizzazione del **PBL** e dei processi di superficie, l’errore maggiore risultante nella previsione della ventosità vicino alla superficie.

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

In [Hiro 06] gli autori fanno ricorso al modello **RAMS** per valutare il potenziale eolico intorno all’area di Tokio. Il modello usa griglie di 8Km e 2Km e fornisce risultati, relativamente alla media annuale, che si discostano dai valori misurati dalla stazione meteo di Choshi del 4.8%.

In [Mort 06] vengono analizzati i dati prodotti da uno studio di ventosità per l’Egitto prodotto mediante il modello **KAMM** con una griglia di 7.5Km e dati al contorno **NCEP**. I risultati sono stati soddisfacenti per alcune zone e pienamente in accordo con i dati misurati sperimentalmente, mentre in altre zone, a causa della scarsa risoluzione dei dati **NCEP**, della complessità dell’orografia e dei valori adottati di lunghezza di rugosità, hanno mostrato un discostamento importante dai dati misurati.

In [Keys 77] si riporta un interessante lavoro relativo al confronto tra dati sperimentali provenienti da una rete di 16 boe posizionate nei mari della California, ed il loro confronto con i dati numerici ottenuti da simulazioni decennali con **MM5**. Gli autori osservano come la lunghezza dalla simulazione (11 anni complessivi) sia necessaria al fine di mediare i cambiamenti stagionali che si possono avere di anno in anno. La griglia usata, di tipo innestato a due domini, è di 1.6Km e 5Km e i dati forniti dalla rete di boe, relativamente a venti misurati alla quota di 5m, sono risultati in buon accordo con quelli calcolati, nel dominio più fine, alla quota di 10m.

2.3 Caratteristiche dei modelli di mesoscala

I modelli di mesoscala sono caratterizzati da risoluzioni spaziali e temporali più alte di quelle adottate nei modelli di scala globale **GCM**. Essi mirano a fornire una descrizione regionale, piuttosto che globale, dei fenomeni meteorologici ricevendo le informazioni di ingresso necessarie dai **GCM** operanti su griglie più lasche. In altre parole i modelli di scala sinottica forniscono le condizioni iniziali e al contorno ai modelli di mesoscala. Essi forniscono in tal modo previsioni meteo più dettagliate, seppur relative ad aree di estensione limitata.

In ogni modo, mentre i modelli di scala sinottica, che trattano fenomeni meteo la cui scala può eccedere i 2000km, catturano caratteristiche come ad esempio saccature, promontori e fronti, i modelli di mesoscala risolvono principalmente quei fenomeni il cui ordine di grandezza varia tra i 2km e i 2000km nello spazio, e da 5 minuti a 2 giorni nel tempo.

Tuttavia, anche se i modelli ad *alta risoluzione* non idrostatici sono in grado di prevedere in dettaglio fenomeni quali i sistemi convettivi associati a fronti e le conseguenti variazioni di temperatura associate

2.3. Caratteristiche dei modelli di mesoscala

o, per esempio, gli effetti dei cumuli e la loro influenza sulle variazioni di temperatura, purtroppo la previsione dell'evoluzione iniziale della convezione è soggetta ad errori importanti.

Nonostante la risoluzione più fine dei modelli di mesoscala, bisogna sempre considerare che l'approssimazione geostrofica e idrostatica non possono dare risultati affidabili. L'equilibrio geostrofico esiste dove si instaura l'equilibrio tra le forze di pressione orizzontali e quelle di Coriolis. Alle latitudini extratropicali e in atmosfera libera, l'approssimazione geostrofica può fornire risultati accettabili a livello di scala sinottica, ma non in mesoscala.

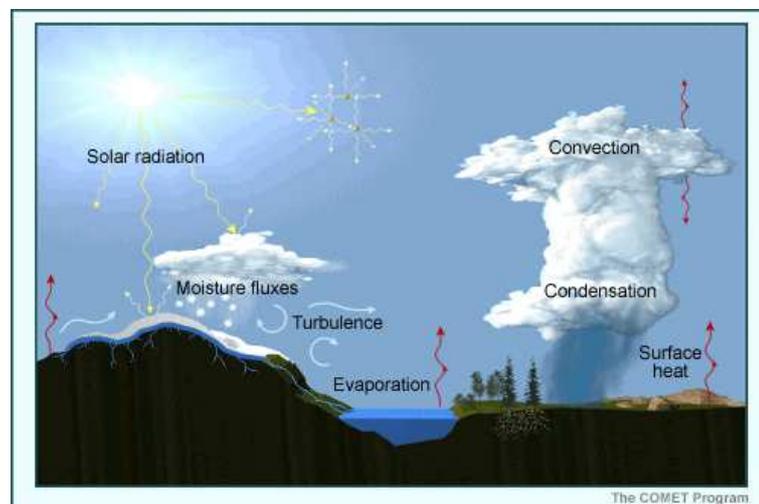


Figura 2.1: Processi atmosferici con effetti non idrostatici ²

2.3.1 Modelli idrostatici e non idrostatici

A scala sinottica l'atmosfera può essere considerata in equilibrio idrostatico e, di conseguenza, il movimento verticale delle particelle d'aria può essere considerato considerevolmente più lento rispetto ai moti orizzontali.

Lo stesso non può essere affermato nel caso di fenomeni di mesoscala in cui le velocità verticali, derivanti da moti di galleggiamento o effetti topografici, possono spesso eccedere le velocità orizzontali. Segue quindi che le caratteristiche di mesoscala sono spesso determinate da fenomeni non idrostatici che possono essere tenuti in conto introducendo nel

²Figura da <http://www.met.ed.ucar.edu>

Capitolo 2. *La Numerical Weather Prediction*

modello una ulteriore equazione prognostica. È questa l'equazione che tratta direttamente il moto verticale e che, piuttosto che derivare gli effetti dal bilancio di massa orizzontale e verticale, esegue un bilancio degli effetti di avvezione, galleggiamento, gradiente di pressione verticale non idrostatico e della resistenza aerodinamica causata dalle idrometeore dovute alle precipitazioni.

2.3.2 **Necessità di avere una risoluzione adeguata**

Le dimensioni caratteristiche dei fenomeni meteo di mesoscala sono tali da richiedere una griglia di discretizzazione abbastanza fine. Va di conseguenza il fatto che più la griglia è fine maggiori saranno i dettagli catturabili dal modello. L'importanza di una adeguata risoluzione di griglia è perfino più evidente se si considera che, al fine di cogliere un dato fenomeno, sono necessari almeno 5 punti di discretizzazione per rappresentarne la forma d'onda. In pratica ciò vuol dire che, lanciare la simulazione di un modello di mesoscala con griglia da 5km, vuol dire che si accetta la condizione che il modello sarà in grado di cogliere caratteristiche che si estendono per più di 20km. Purtroppo, l'adozione di una griglia più fine comporta un incremento del costo computazionale che vede i tempi di calcolo allungarsi considerevolmente. Per esempio, il dimezzamento della dimensione di griglia implica sia il quadruplicare dei nodi di calcolo, sia un raddoppio dei time step che sono necessari per tenere il CFL sotto controllo.

Per quanto riguarda la risoluzione verticale, il suo rapporto con quella orizzontale deve essere adeguato in relazione alla pendenza, con l'altezza, della grandezza caratteristica alla quale si è interessati, e inoltre essere fitta abbastanza dove più opportuno. Di conseguenza, la discretizzazione verticale sarà opportunamente infittita sia in prossimità della superficie terrestre dove sono importanti i fenomeni di irraggiamento ed evaporazione, sia in corrispondenza del confine della tropopausa in modo da catturare al meglio la presenza di eventuali correnti a getto.

Un altro aspetto che influenza in maniera critica i risultati numerici dei modelli di mesoscala è l'accuratezza del modello di orografia, soprattutto quando la simulazione viene effettuata su aree di estensione molto limitata. Fenomeni quali per esempio le brezze di terra e di mare, l'effetto venturi che si verifica attraverso i rilievi, gli effetti di accelerazione orografica richiedono che il modello di terreno sia discretizzato molto accuratamente.

Tutto ciò rende necessario il ricorso ai Digital Elevation Model (**DEM**) al fine di dare una rappresentazione dell'orografia appropriata e in modo che il modello di mesoscala possa incorporare la topografia dell'area

2.3. Caratteristiche dei modelli di mesoscala

digitalizzata. A tale proposito è importante che le risoluzioni del DEM e quella adottata nel modello meteorologico siano congruenti al fine di ottenere delle previsioni significative.

2.3.3 Il nesting

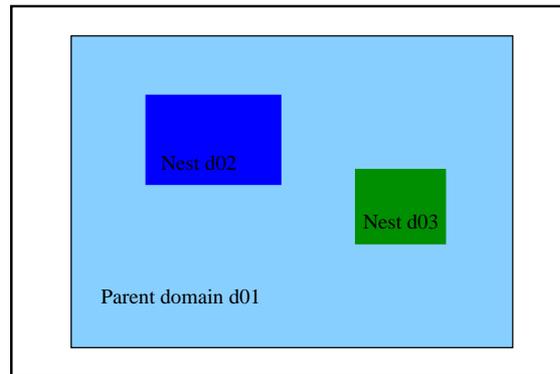


Figura 2.2: Due domini innestati all’interno di un dominio *genitore*

Il nesting è una tecnica che permette di ottenere delle risoluzioni di griglia più fini limitatamente all’area di interesse che risulta così essere inglobata in un dominio genitore dalla risoluzione più lasca.

È da notare che l’approccio di infittimento nesting è un tipo di affinamento della griglia che differisce sostanzialmente dall’approccio normalmente usato in Computational Fluid Dynamics (CFD), come nel caso ad esempio del trattamento “*near wall*” in cui il dominio di calcolo è unico. Al fine di evitare l’effetto della riflessione delle soluzioni d’onda al confine tra aree con una brusca variazione della risoluzione di griglia [Davi 83], è sicuramente preferibile adottare la tecnica del nesting. Questa consiste nell’innestare domini con griglia via via sempre più fine permettendo così una variazione graduale della risoluzione desiderata. I sottodomini innestati possono essere statici oppure mobili, utili per inseguire i fenomeni atmosferici come gli uragani. Questi possono inoltre interagire col dominio genitore in due modalità: “*one-way*” oppure “*two-way*” attraverso i primi 4-5 nodi di confine su entrambe i lati del confine di separazione. Sia nella modalità one-way che two-way le condizioni al contorno laterali sono ottenute per interpolazione partendo dal dominio genitore, ma mentre nella modalità one-way l’informazione viaggia esclusivamente dal dominio genitore a sottodominio,

Capitolo 2. *La Numerical Weather Prediction*

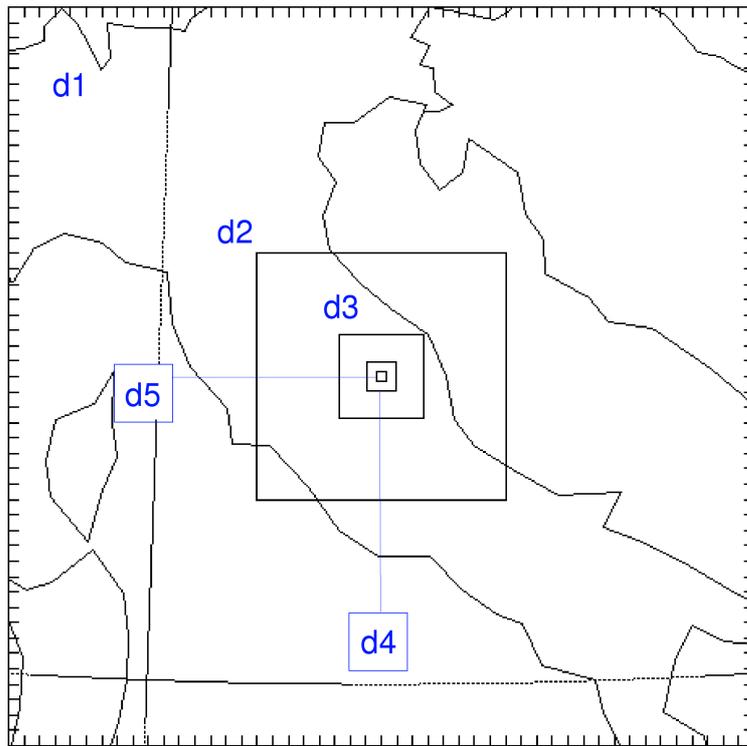


Figura 2.3: Cinque domini innestati centrati sulla posizione della stazione anemometrica CMC1.

2.3. Caratteristiche dei modelli di mesoscala

nella modalità two-way, le soluzioni nei nodi di griglia del sottodominio rimpiazzano la soluzione nei nodi coincidenti del dominio genitore.

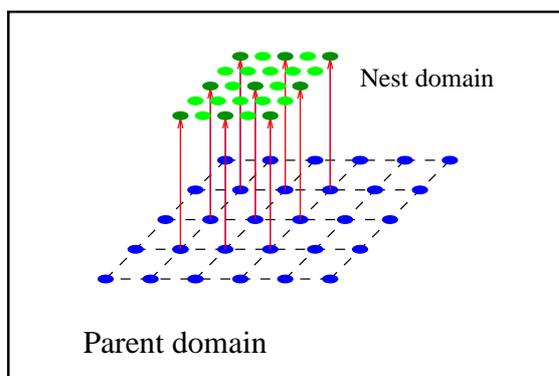


Figura 2.4: Un sottodominio innestato in un dominio genitore con rapporto di raffinamento 1:2

2.3.4 Parametrizzazione

Nonostante i modelli di mesoscala permettano l'adozione di griglie con risoluzione più fine, esistono comunque fenomeni meteo che, risultando completamente inglobati all'interno di una singola cella, non possono essere risolti numericamente. Ci sono inoltre fenomeni la cui complessità è talmente elevata da non poter essere risolti qualunque sia la finezza della risoluzione di griglia. Tuttavia tali fenomeni influenzano profondamente la previsione per cui non possono certamente essere semplicemente trascurati. La via seguita al fine di tener conto degli effetti di questi fenomeni senza effettivamente risolverli va sotto il nome di *parametrizzazione*. Questa consiste nella modellizzazione degli effetti di un processo piuttosto che nella modellizzazione del processo stesso. Alcuni dei fenomeni parametrizzati nei modelli numerici previsionali di mesoscala sono raggruppati in base alla tipologia dei fenomeni coinvolti. Per maggiori dettagli sui modelli di parametrizzazione si vedano ad esempio [Sten 09] [Sozz 02] e [Skam 08a].

Parametrizzazione dei processi fisici

microfisica riguarda la convezione del vapor d'acqua in atmosfera e gioca un ruolo cruciale nella formazione dei fenomeni meteorologici. Le nubi che si producono, e che possono anche permanere su

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

una data zona per mesi, influenzano profondamente l’assorbimento della radiazione solare da parte della superficie terrestre. La presenza delle nubi inoltre influenza la concentrazione delle particelle sospese (aerosol) attraverso la loro rimozione e precipitazione al suolo. La loro formazione è dovuta a processi convettivi dell’aria che, salendo a quote maggiori, per effetto del raffreddamento diventa satura al raggiungimento del **LCL**. La formazione di goccioline d’acqua dà origine alla formazione delle nubi. I processi di microfisica delle nubi rappresentano una fonte notevole di incertezza nei modelli climatici. Se si considera per esempio l’incremento della concentrazione di aerosol nell’aria, questo determina l’aumento della concentrazione delle goccioline di acqua e, per un dato contenuto di acqua, una riduzione delle loro dimensioni con un conseguente aumento dello *spessore ottico* della nube.

La microfisica delle nubi è inoltre fondamentale nella formazione e nello sviluppo di fenomeni atmosferici di breve durata quali i temporali. Essa mostra come i fenomeni microscopici di formazione delle goccioline, a scala molecolare, influenzino fenomeni di ben più ampia scala. Con la riduzione della griglia di discretizzazione, nei modelli numerici possono essere incorporate ulteriori equazioni (v. Fig. 2.5.) che tengano conto del cambiamento di fase del vapor d’acqua presente nell’atmosfera e realizzare quella che viene chiamata parametrizzazione esplicita. Al contrario, la parametrizzazione implicita, anche detta convettiva, tiene conto solo dell’effetto finale di formazione delle nubi per effetto della convezione. In effetti le due parametrizzazioni vengono usate entrambe nei modelli numerici: la parametrizzazione convettiva viene usata per la parte di sviluppo convettivo del fenomeno di formazione della nube e solo successivamente, nel momento della saturazione dell’atmosfera, viene fatta entrare in gioco la parametrizzazione esplicita con le sue equazioni. In base all’esperienza condotta dai vari centri di ricerca quali per esempio il National Oceanic and Atmospheric Administration (**NOAA**) non è tuttora possibile definire una dimensione di griglia ottimale per la risoluzione esplicita dei fenomeni di microfisica, tuttavia il valore comunemente trovato in letteratura, al di sopra del quale la parametrizzazione diretta è del tutto sconsigliabile è di 4km. Le sfide più importanti da affrontare nella microfisica sono comunque due e consistono:

1. nel numero degli stati di aggregazione in cui può trovarsi presente l’acqua. I cambiamenti di fase che possono avvenire nell’acqua sono essenzialmente:

2.3. Caratteristiche dei modelli di mesoscala

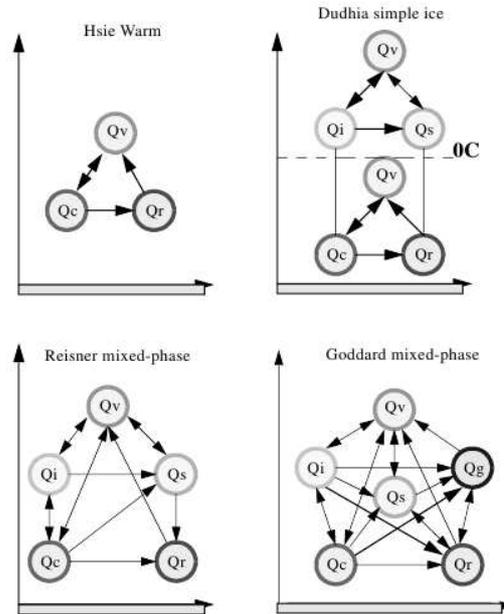


Figura 2.5: Schemi di parametrizzazioni di microfisica.³

condensazione	vapore	→	liquido
evaporazione	liquido	→	vapore
congelamento	liquido	→	solido
fusione	solido	→	liquido
brinamento	vapore	→	solido
sublimazione	solido	→	vapore

e non avvengono in condizioni di equilibrio termodinamico;

- il numero delle interazioni tra le particelle che precipitano e la nube. Le forme in cui l'acqua è presente sono numerose; si possono avere goccioline (droplets) d'acqua, gocce di pioggia di varie dimensioni che cadendo a diverse velocità possono collidere ed unirsi accrescendo, cristalli di ghiaccio, particelle di ghiaccio, corpuscoli di neve (graupel), neve, grandine e aghi di ghiaccio. La presenza contemporanea di tutte o parte di queste forme complica notevolmente lo studio dell'interazione tra le particelle stesse e la nube.

Numerosi sono i modelli di parametrizzazione disponibili in letteratura ed in particolare nel modello **WRF**.

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

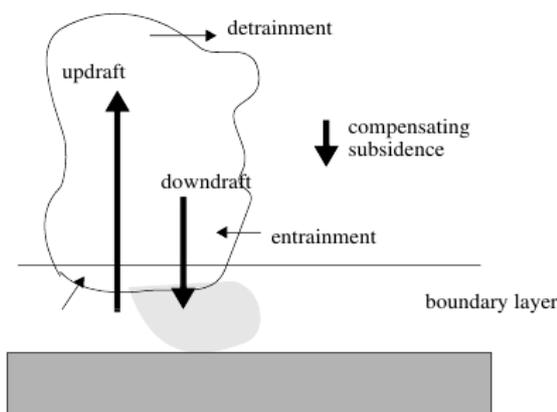


Figura 2.6: Schema del processo di formazione dei cumuli³.

parametrizzazione dei cumuli tiene conto degli effetti di sotto griglia e della formazione di nubi basse (v. Fig. 2.6.) modellizzando i fenomeni di ascendenza e discendenza che non possono essere risolti. Operano sulla singola colonna che ha per base la cella di calcolo fornendo il profilo verticale di temperatura e umidità ed alcuni schemi più raffinati forniscono anche la tendenza alla precipitazione nella colonna stessa. La parametrizzazione dei cumuli e i suoi schemi ha senso solo per griglie con dimensioni maggiori di 10Km al fine di tener conto del calore latente in gioco durante la formazione dei cumuli. Non ha senso per griglie con lato minore di 5Km.

strato superficiale o surface layer valutano la velocità di attrito ed i coefficienti di scambio che permettono il calcolo dei flussi di calore e di vapore con la superficie attraverso gli schemi di **PBL** e di superficie (v. [Sozz 02]). Nel modello **WRF** lo schema di surface layer scelto è in relazione allo schema di **PBL** scelto.

PBL lo strato limite atmosferico è quella zona in cui si instaurano i flussi di sotto griglia dovuti al trasporto turbolento verso tutta la colonna d'aria sovrastante (v. [Sozz 02]). Quando uno schema di **PBL** viene attivato, in un modello numerico, il calcolo esplicito della diffusione verticale viene inibito ed è lo schema stesso che procede alla sua modellizzazione previa opportuna scelta dei coefficienti di diffusione k_h e k_v orizzontale e verticale (cfr. [Wang 10]). I flussi di superficie sono forniti dagli schemi di surface layer e di superficie. Gli schemi di **PBL** (v. Fig. 2.7.) valutano l'andamento dei flussi all'interno dello strato di rimescolamento (cfr. Fig. 2.8)

2.3. Caratteristiche dei modelli di mesoscala

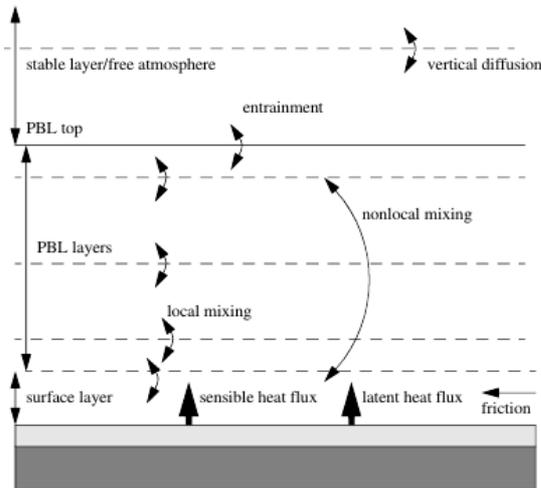


Figura 2.7: Interazione tra i vari strati del PBL.³

e nello strato stabile fornendo gli andamenti della temperatura, dell'umidità e della quantità di moto orizzontale nell'intera colonna d'aria che sovrasta la cella di calcolo. Gli schemi di **PBL** sono monodimensionali ed assumono una netta separazione tra i vortici di sottogriglia ed i vortici risolti per dimensioni di griglia non fini. Quando la dimensione di quest'ultima scende al di sotto delle centinaia di metri allora i vortici di piccole dimensioni iniziano ad essere risolti e in questi casi lo schema da adottare dovrebbe essere uno tridimensionale di turbolenza di sottogriglia come quello a diffusione di energia cinetica turbolenta.

radiazione questi schemi (v. Fig. 2.9) forniscono modelli per la determinazione del flusso radiante totale in una data cella di calcolo. Forniscono il flusso radiante a livello della superficie, necessario per il bilancio dei flussi della superficie del terreno, ed il flusso radiante verticale necessario per valutare il riscaldamento o raffreddamento dei volumi di atmosfera soprastanti la cella. Il flusso termico si manifesta tramite onde elettromagnetiche di varia lunghezza d'onda. Le radiazioni ad onda lunga comprendono le radiazioni infrarosse assorbite ed emesse dai gas dall'aria e dalle superfici. Il flusso radiante di onda lunga verso l'alto emesso dalle superfici dipende dalla emissività superficiale che a sua volta dipende dall'uso del suolo e dalla sua temperatura. Le radiazioni di onda corta comprendono tutte quelle onde nello spettro del visibile e la cui sorgente è il Sole. Queste provengono direttamente da quest'ul-

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

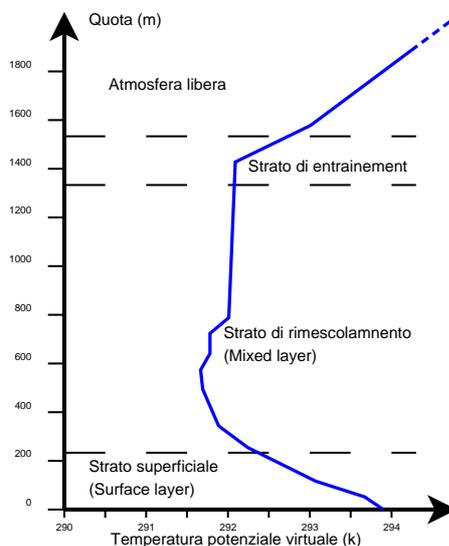


Figura 2.8: Andamento tipico della temperatura potenziale virtuale in uno strato limite convettivo. L’andamento della temperatura potenziale virtuale mette in risalto i vari strati del PBL.

timo o sono riflesse, assorbite e diffuse attraverso l’atmosfera. Il flusso di onda corta emesso per riflessione dalle superfici dipende dall’albedo di queste ultime. Gli schemi di radiazione disponibili in **WRF** sono monodimensionale e sono pertinenti alla colonna di atmosfera che insiste sulla cella di calcolo così che ciascuna colonna è considerata in maniera indipendente dalle altre. Il flusso viene calcolato come se fosse proveniente da una superficie infinita orizzontale uniforme; chiaramente una tale approssimazione è tanto più valida quanto lo spessore dei layer di calcolo è minore dell’estensione orizzontale delle celle.

Parametrizzazione dei processi di superficie del terreno Il modello di superficie del terreno interagisce a livello numerico con tutti gli altri modelli di parametrizzazione: usa le informazioni relative all’atmosfera passategli dal modello di surface layer, i dati di flusso radiante dai modelli di radiazione, le informazioni relative alle precipitazioni dal modello di microfisica e dal modello di convezione. Esso elabora e fornisce i dati relativi ai flussi di calore e umidità che poi vengono sfruttati dal modello di **PBL** in qualità di condizioni al contorno di superficie. Esistono modelli di superficie che hanno vari gradi di sofisticatezza. In generale

2.3. Caratteristiche dei modelli di mesoscala

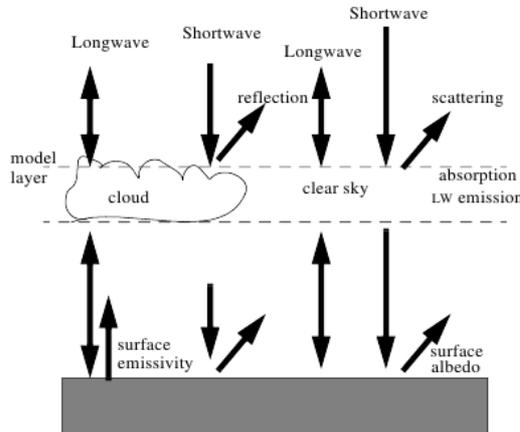


Figura 2.9: Schema dei processi di radiazione.³

gestiscono i flussi termici e di umidità col suolo ma alcuni possono anche includere gli effetti della vegetazione, della presenza di aree urbane e della copertura della neve. Questi modelli non sono diagnostici ma forniscono comunque dati variabili nel tempo quali la temperatura del suolo, il profilo di temperatura del suolo, il profilo di umidità presente nel suolo e la copertura della neve. Sono comunque modelli monodimensionali per cui non viene presa in considerazione l'interazione con le colonne di atmosfera adiacenti a quella di calcolo.

		Rad	MP	CP	PBL	Sfc
Stato o tendenza dell'atmosfera	Quantità di moto			i	io	
	Temperatura potenziale	io	io	io	io	
	Vapor d'acqua	i	io	io	io	
	Nubi	i	io	o	io	
	Precipitazioni	i	io	o		
Flussi di superficie	Onda lunga Su	i				o
	Onda lunga Giù	o				i
	Onda corta Su	i				o
	Onda corta Giù	o				i
	Sup. pioggia conv.			o		i
	Sup. pioggia risolta		o			i
	Flusso di calore				i	o
	Flusso di umidità				i	o
	Sforzi superficiali				i	o

Tabella 2.1: Interazione tra i modelli di parametrizzazione in WRF.

³Figura da [Dudh 05].

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

2.3.5 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno dei modelli di mesoscala Limited Area Models (LAMs)⁴, sono le condizioni meteo, in termini di valori numerici dei vari campi coinvolti nel calcolo, ai confini dell’area di calcolo. Queste sono fornite dai modelli globali o regionali a risoluzione lasca. È utile precisare che un modello globale fatto girare con la stessa risoluzione di un modello di mesoscala e con le stesse opzioni di fisica e di parametrizzazione, sarebbe superiore, in termini qualità dei risultati, al modello LAM di mesoscala, proprio perchè non si avrebbero problemi relativi alla qualità delle condizioni al contorno. Purtroppo i modelli di scala globale sono ancora troppo esigenti dal punto di vista delle risorse computazionali necessarie per avere delle previsioni a breve termine, il che implica che i modelli di mesoscala possono solamente fornire dei risultati la cui bontà è determinata dalla bontà dei dati numerici usati come condizioni al contorno. Quanto fin ora detto porta ad osservare che l’uso di un modello LAM di mesoscala dovrebbe sempre preceduto dalla validazione dei dati numerici provenienti dal modello sinottico usati come condizioni al contorno.

2.4 Il solutore ARW

WRF è un modello di mesoscala sviluppato tra NCAR Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM) Division, NOAA, NCEP, Forecast System Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory (NRL), Center for Analysis and Prediction of Storms (CAPS), Federal Aviation Administration (FAA) e diverse università.

La Fig. 2.10 mostra le componenti del modello comuni ai solutori dinamici disponibili:

- l’ARW, anche noto come “Eulerian mass” o anche “em solver”, che viene sviluppato presso l’NCAR;
- il Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM), che viene sviluppato presso l’NCEP.

Entrambe i modelli condividono completamente l’Weather Software Framework (WSF) ma non tutti i modelli di fisica così che la compatibilità varia secondo gli schemi adottati.

⁴Modelli che sono limitati sia orizzontalmente che verticalmente

⁵Figura da [Skam 08a]

2.5. Coordinata verticale η

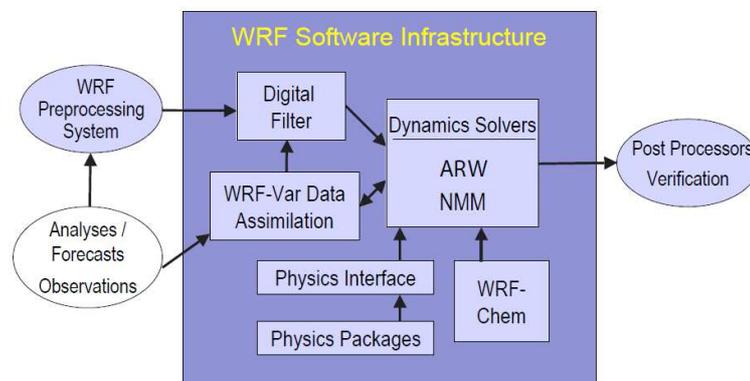


Figura 2.10: Struttura a blocchi del modello WRF⁵

L'**ARW** risolve un sistema di equazioni Euleriane, non idrostatiche, comprimibili, che sono conservative rispetto alle variabili scalari⁶. Le variabili prognostiche sono le componenti orizzontali u e v della velocità, la componente verticale w , la perturbazione della temperatura potenziale, la perturbazione del geopotenziale e la pressione dell'aria secca di superficie. Altre variabili prognostiche sono l'energia cinetica turbolenta, il rapporto di mescolanza del vapor d'acqua, il rapporto di mescolanza della pioggia e della neve, il rapporto di mescolanza di nube in relazione all'acqua e al ghiaccio e le speci chimiche.

2.5 Coordinata verticale η

Come osservato in [Kasa 74], le domande da porsi allorché ci si appresta alla scelta di una opportuna coordinata verticale sono:

- quale sistema è in grado di rappresentare meglio la struttura verticale dell'atmosfera ricorrendo alla minor risoluzione possibile?
- quale sistema riesce a gestire al meglio le variazioni orografiche della superficie terrestre?

Nei sistemi verticali di coordinata in pressione, altezza e temperatura potenziale, occorre adottare una procedura particolare per tener conto dell'orografia, che consiste nel far in modo che l'algoritmo di calcolo tratti opportunamente le condizioni al contorno nelle celle adiacenti alla

⁶Un approfondimento sul concetto di conservatività e non conservatività della forma delle equazioni lo si può trovare in [Ande 95]

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

superficie terrestre. Si intuisce facilmente come una tale procedura influenzi, rallentandole, le prestazioni dell’algoritmo di calcolo, soprattutto ove questo sia stato pensato per il calcolo parallelo.

Nelle equazioni si utilizza, come coordinata verticale, non la z ma piuttosto una coordinata formata sulla pressione idrostatica di tipo “*terrain following*” η :

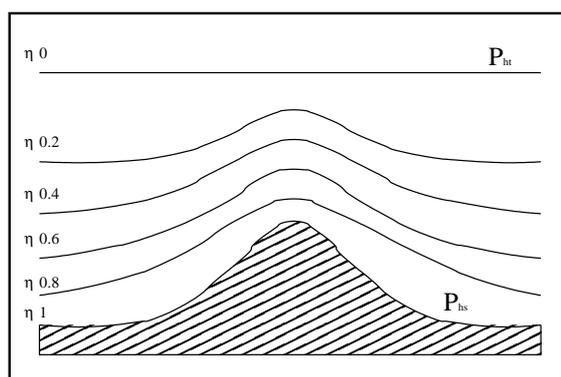


Figura 2.11: La coordinata verticale η

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{\mu} \quad [\eta = 0 \div 1] \quad (2.1)$$

in cui:

$$\mu = p_{hs} - p_{ht}$$

è il peso della colonna d’aria che insiste sull’unità di area di baricentro (x, y) , ovvero $\bar{\rho}g(Z_t - Z_s)$. L’adozione di un siffatto sistema di coordinate verticali rende le equazioni in forma Euleriana simili alle equazioni idrostatiche in coordinate isobariche dove anche sia introdotto il rilievo orografico [Lapr 92].

2.6 Influenza del tipo di proiezione

La proiezione cartografica permette di rappresentare, tramite delle relazioni geometriche [Gerr 73], le grandezze atmosferiche definite sulla quasi-sfera terrestre, o anche per esempio su una superficie isobarica, su di una superficie piatta come quella di una carta geografica o di una griglia di calcolo. La Fig. 2.12 mostra le relazioni geometriche tra una superficie sferica sulla quale risultano definite le grandezze fisiche di interesse e la superficie sulla quale tali grandezze vengono proiettate per

2.6. Influenza del tipo di proiezione

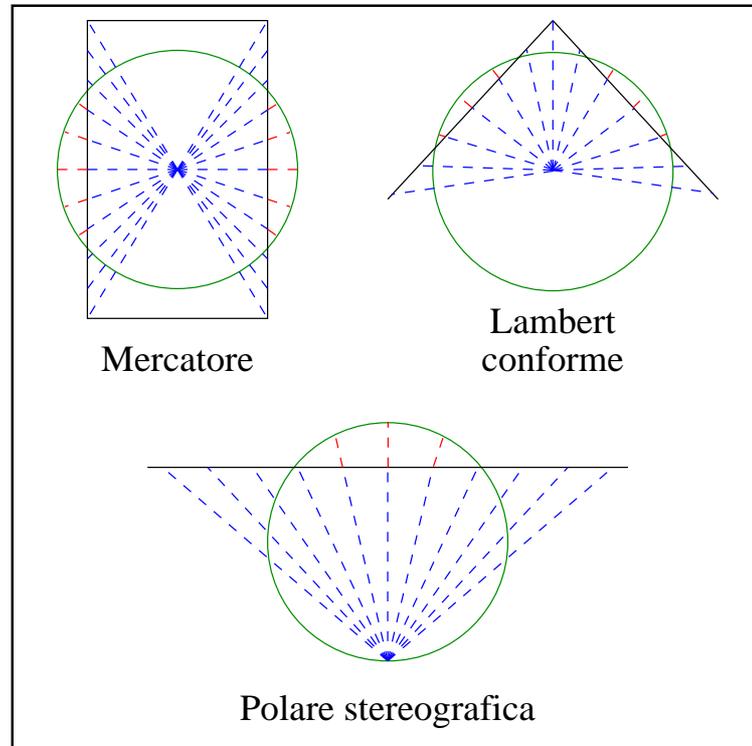


Figura 2.12: Proiezioni comunemente usate nei modelli meteo

i tre tipi più comuni di proiezioni usate. In ciascun caso la proiezione è costruita partendo da un insieme di raggi che vengono fatti partire da un punto sorgente e colpiscono la sfera e la superficie di proiezione su punti così messi in corrispondenza.

La proiezione di Mercatore viene ottenuta proiettando i raggi su una superficie cilindrica il cui asse passa per il centro della sfera. Le grandezze sulla sfera vengono mappate sulla superficie cilindrica la quale a sua volta viene sviluppata in una superficie piana. In maniera del tutto simile la superficie piana della proiezione polare stereografica e la superficie conica della proiezione conforme di Lambert costituiscono altre superfici di proiezione. Nei modelli meteo, quasi sempre, gli assi del cono, del cilindro e l'asse perpendicolare alla superficie piana della proiezione polare stereografica coincidono con l'asse di rotazione terrestre. Per ciascuna di tali proiezioni, la superficie può intersecare (come nella Fig. 2.12) o essere tangente alla sfera. Nel primo caso si parlerà di *proiezione secante*, mentre nel secondo caso di *proiezione tangente*. La proiezione, qualunque essa sia, non conserva le proprietà valide sulla su-

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

perficie sferica. In pratica, sulla superficie piana di proiezione, alcune caratteristiche geometriche quali l’area, la forma o gli angoli non vengono conservate. Nella Fig. 2.12 si vede come nella proiezione di Mercatore ad esempio, le distanze e le aree delle località ad elevata latitudine siano notevolmente aumentate, mentre invece il contrario avviene nella proiezione polare. La conservazione delle proprietà geometriche avviene, comunque, solamente in corrispondenza dei paralleli di intersezione delle superfici di proiezione con la sfera. Le tre proiezioni di cui fin qui si è parlato sono dette *proiezioni conformi* nel senso che esse conservano gli angoli tra due curve e la distorsione di distanza in un punto qualunque è indipendente dalla direzione lungo la quale viene valutata. Questa caratteristica le rende adatte ad essere utilizzate nei modelli meteo in quanto risulta di fondamentale importanza conservare gli angoli, come ad esempio nel caso della direzione del vento e le curve isobare. La mancanza di conformità relativa alle forme e alle distanze viene mitigata facendo in modo che tali modelli di proiezione siano applicati in corrispondenza delle latitudini dove la distorsione è minima. Nei modelli **LAM**, che impiegano un sistema di coordinate cartesiane sulla superficie di proiezione e risolvono su questa le equazioni, la trasformazione tra la superficie sferica e la superficie piana di proiezione, è una parte integrante delle equazioni stesse. I valori rilevati, per esempio, in punti individuati in coordinate lat-long, devono essere applicati nei punti di opportune coordinate cartesiane sulla griglia di calcolo posta sulla superficie piana di proiezione. A causa dell’effetto di distorsione della proiezione, le dimensioni di griglia usate nelle equazioni alle differenze finite devono rispecchiare la distanza vera tra due punti sulla superficie sferica. La Fig. 2.13 mostra come la griglia di calcolo definita sulla superficie di proiezione venga distorta sulla superficie sferica: i punti di calcolo sono equidistanziati sulla griglia ma non lo sono sulla superficie fisica per cui la distanza tra di essi varia secondo la posizione. La misura di tale distorsione è introdotta nelle equazioni attraverso un un fattore di scala detto *map factor* (vedi [Warn 11]):

$$m = \frac{\Delta X_g}{\Delta X_e}$$

che nel caso di una proiezione polare stereografica vera a 60° risulta essere:

$$m = \frac{1 + \sin 60^\circ}{1 + \sin \phi} \quad (2.2)$$

La distorsione introdotta dalla proiezione fa sì che i calcoli vengano, in realtà, fatti su una griglia reale che risulta deformata sulla superficie sferica. Ciò comporta l’introduzione di errori nella soluzione delle

2.6. Influenza del tipo di proiezione

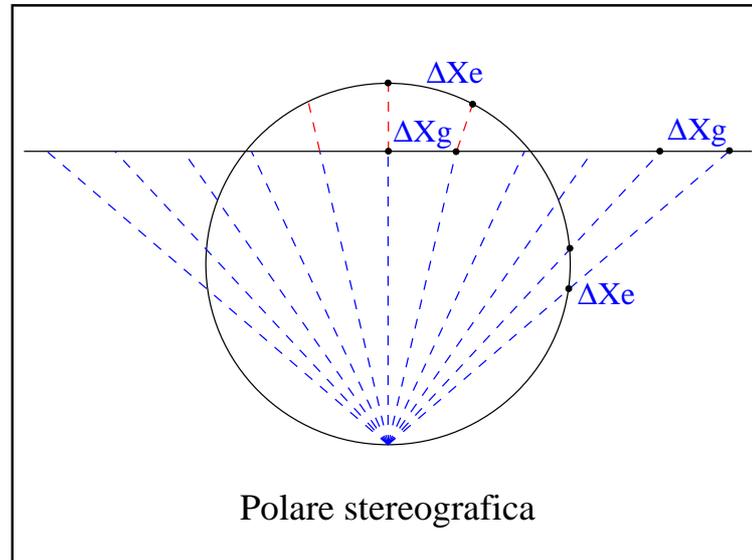


Figura 2.13: Relazione tra gli incrementi di griglia e quelli sulla sfera terrestre per una proiezione polare stereografica

equazioni. Infatti, alla stessa soluzione d'onda sulla griglia di calcolo corrisponderanno onde con velocità di fase e gruppo differenti secondo la latitudine, e ci saranno altresì differenze, in termini di latitudine, nelle condizioni necessarie per mantenere la stabilità numerica della soluzione. Ciò suggerisce l'adozione di criteri opportuni per la scelta del tipo di proiezione:

- minimizzare il più possibile l'allontanamento dal valore unitario del fattore di scala;
- minimizzare le variazioni con la latitudine del fattore di scala.

In generale queste condizioni vengono soddisfatte al meglio ricorrendo:

- alla proiezione di Mercatore quando il dominio di calcolo interessa le latitudini tropicali;
- alla proiezione polare stereografica quando il dominio di calcolo interessa zone situate a latitudini elevate;
- alla proiezione conforme di Lambert quando il dominio di calcolo risulta localizzato a medie latitudini.

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

2.7 Equazioni del modello ARW

Partendo dalle Eq. (A.55), si arriva alle equazioni del modello ARW tenendo conto delle modifiche introdotte dal tipo di proiezione cartografica scelta, e del cambiamento di coordinata verticale η definita dalla Eq. (2.1). Vengono introdotti i fattori di mappa m_x m_y :

$$m_{x,y} = \frac{(\Delta x, \Delta y)}{d} \quad (2.3)$$

in cui d è la distanza misurata sulla sfera terrestre mentre Δx e Δy le distanze sulla mappa. Le variabili di velocità vengono inoltre così opportunamente ridefinite (si veda [Klem 07] e [Skam 08a]):

$$\begin{aligned} U &= \frac{\mu_d u}{m_y} & V &= \frac{\mu_d v}{m_x} & W &= \frac{\mu_d w}{m_y} \\ \Omega &= \frac{\mu_d \dot{\eta}}{m_y} & \Theta &= \mu_d \theta & Q_j &= \mu_d q_j \end{aligned} \quad (2.4)$$

in cui (u, v, w) sono le componenti controvarianti del vettore velocità e $\dot{\eta}$ la componente covariante della nuova velocità verticale. I lavori Kasahara [Kasa 74] e Laprise [Lapr 92] descrivono in maniera dettagliata il percorso da seguire per passare dalla coordinata z alla coordinata η , mentre Ooyama in [Ooya 90] riporta l’approccio da seguire per riscrivere le equazioni prognostiche in termini delle variabili conservative per l’atmosfera umida. Si può vedere come, nel caso ad esempio della Eq. (2.9), il passaggio alla coordinata verticale η porti i termini:

$$\mu_d \alpha \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial \eta}$$

Si procede compiendo due passi successivi, ovvero si passa dapprima ad una coordinata di pressione π e successivamente alla η . Se si considera l’equazione di bilancio della quantità di moto orizzontale:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mu_d \alpha \nabla_z p = \mathbf{F} \quad (2.5)$$

si dovrà quindi esprimere il termine $\nabla_z \rightarrow \nabla_\eta$. Occorrerà, più in generale, trovare l’espressione:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial c} \right)_s$$

Tabella 2.2: Fattore di mappa per diversi tipi di proiezioni [Gerr 73]

Proiezione	Parametri caratteristici	Fattore di mappa
Lambert	ϕ_1, ϕ_2 paralleli di intersezione del cono di proiezione con la sfera terrestre	$m(\phi) = \frac{\cos \phi_1}{\cos \pi} \left(\frac{\tan(\pi/4 - \phi/2)}{\tan(\pi/4 - \phi_1/2)} \right)^K$ $K = \frac{\ln\left(\frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2}\right)}{\tan(\pi/4 - \phi_1/2) - \tan(\pi/4 - \phi_2/2)}$
Mercatore	$\pm\phi_0$ paralleli di intersezione del cilindro con la sfera terrestre	$m(\phi) = \frac{\cos \phi_0}{\cos \phi}$
Polare Stereografica	ϕ_0 parallelo di intersezione del piano di proiezione con la sfera terrestre	$m(\phi) = \frac{1 + \sin \phi_0}{1 + \sin \phi}$

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

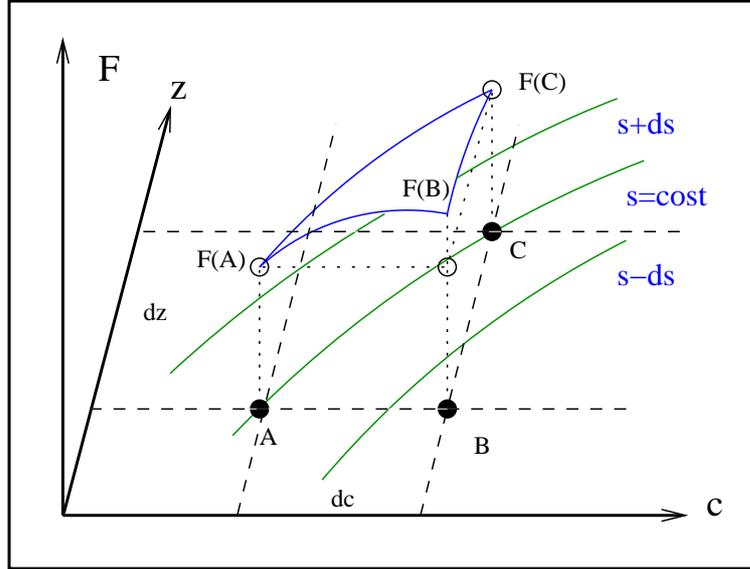


Figura 2.14: Variazione di una grandezza in lungo una coordinata generalizzata s

per la coordinata generalizzata s funzione monotona di z , in cui F è una generica grandezza scalare esprimibile sia in funzione di z che di s . Osservando la figura Fig. 2.14 si può scrivere:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\delta F}{\delta c}\right)_s &= \left(\frac{F_C - F_A}{\delta c}\right)_s \\
 &= \left(\frac{F_C - F_B + F_B - F_A}{\delta c}\right)_s \\
 &= \frac{[F_C - F_B]_c + [F(B) - F(A)]_z}{\delta c} \\
 &= \left(\frac{F_C - F_B}{\delta c}\right)_c + \left(\frac{F_B - F_A}{\delta c}\right)_z \\
 &= \left(\frac{F_C - F_B}{\delta z}\right)_c \left(\frac{\partial z}{\partial c}\right)_s + \left(\frac{F_B - F_A}{\delta c}\right)_z \\
 &\xrightarrow[\delta c \rightarrow 0]{\delta z \rightarrow 0} \\
 \left(\frac{\partial F}{\partial c}\right)_s &= \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)_c \left(\frac{\partial z}{\partial c}\right)_s + \left(\frac{\partial F}{\partial c}\right)_z \\
 &= \frac{\partial F}{\partial s} \left(\frac{\partial s}{\partial z}\right)_c \left(\frac{\partial z}{\partial c}\right)_s + \left(\frac{\partial F}{\partial c}\right)_z
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

2.7. Equazioni del modello ARW

ponendo quindi $c = x, y, t$ si ottiene la relazione cercata [Kasa 74]:

$$\nabla_s F = \nabla_z F + \nabla_{sz} \frac{\partial F}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial z} \quad (2.7)$$

Si può a questo punto esprimere la Eq. (2.5) in termini della coordinata di pressione π che è legata alla z dalla relazione:

$$d\pi = -\rho g dz$$

$$\nabla_z p = \nabla_\pi p - \frac{\partial \pi}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial \pi} \nabla_\pi z$$

e finalmente in termini della coordinata η definita nella (2.1):

$$\eta = \frac{\pi}{\mu} \longrightarrow d\eta = -\frac{\rho g}{\mu} dz$$

applicando di nuovo la Eq. (2.7):

$$\begin{aligned} \nabla_z p &= \nabla_\pi p - \frac{\partial \pi}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial \pi} \nabla_\pi z \\ &= \nabla_\eta p - \frac{\partial \eta}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial \eta} \nabla_\eta z - \\ &\quad \frac{\partial \pi}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial \pi} \left(\nabla_\eta z - \frac{\partial \eta}{\partial z} \nabla_\eta z \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) \\ &= \nabla_\eta p - \frac{\partial \eta}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial \eta} \nabla_\eta z \\ &= \nabla_\eta p + \frac{\rho g}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \eta} \nabla_\eta z \\ &= \nabla_\eta p + \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \eta} \nabla_\eta \phi \end{aligned}$$

Considerando la sola componente x della Eq. (2.5) si ottiene:

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} + \mu_d \alpha \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_z &= F_x \\ \frac{dU}{dt} + \mu_d \alpha \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_d \alpha \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial x} &= F_x \\ \frac{dU}{dt} + \mu_d \alpha \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_d}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial x} &= F_x \\ \frac{dU}{dt} + \mu_d \alpha \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial p}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial x} &= F_x \\ \frac{\partial U}{\partial t} + \left(\frac{\partial(Uu)}{\partial x} + \frac{\partial(Vu)}{\partial y} \right) + \frac{\partial(\Omega u)}{\partial \eta} + \\ \mu_d \alpha \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial \eta} &= F_x \end{aligned} \quad (2.8)$$

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

che rappresenta la Eq. (2.9) priva della correzione del fattore di mappa. Procedendo in maniera analoga si orrengolo le altre equazioni fondamentali.

In definitiva il set di equazioni da risolvere risulta composto da un gruppo di relazioni prognostiche:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + m_x \left(\frac{\partial(Uu)}{\partial x} + \frac{\partial(Vu)}{\partial y} \right) + \frac{\partial(\Omega u)}{\partial \eta} + \mu_d \alpha \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial \eta} = F_U \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + m_y \left(\frac{\partial(Uv)}{\partial x} + \frac{\partial(Vv)}{\partial y} \right) + \frac{m_y}{m_x} \frac{\partial(\Omega v)}{\partial \eta} + \mu_d \alpha \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial \eta} = F_V \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{m_x m_y}{m_y} \left(\frac{\partial(Uw)}{\partial x} + \frac{\partial(Vw)}{\partial y} \right) + \frac{\partial(\Omega w)}{\partial \eta} + \frac{1}{m_y} g \left[\frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial p}{\partial \eta} - \mu_d \right] = F_W \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + m_x m_y \left(\frac{\partial(U\theta)}{\partial x} + \frac{\partial(V\theta)}{\partial y} \right) + m_y \frac{\partial(\Omega \theta)}{\partial \eta} = F_\Theta \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \mu_d}{\partial t} + m_x m_y \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) + m_y \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{\mu_d} \left[m_x m_y \left(U \frac{\partial \phi}{\partial x} + V \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + m_y \Omega \frac{\partial \phi}{\partial \eta} - m_y g W \right] = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t} + m_x m_y \left(\frac{\partial(Uq_m)}{\partial x} + \frac{\partial(Vq_m)}{\partial y} \right) + m_y \frac{\partial(\Omega q_m)}{\partial \eta} = F_{Q_m} \quad (2.15)$$

e diagnostiche:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = -\mu_d \alpha_d \quad (2.16)$$

$$p = p_0 \left(\frac{R_d \theta_m}{p_0 \alpha_d} \right)^\gamma \quad (2.17)$$

in cui $\alpha = \alpha_d (1 + q_v + q_n + q_p + q_g + \dots)^{-1}$.

Nelle equazioni Eq. (2.9), Eq. (2.10), Eq. (2.11) i termini al secondo membro contengono i contributi di Coriolis e di curvatura oltre alle forzanti fisiche dovute ad esempio al galleggiamento e alla viscosità. Se si adotta una proiezione isotropica, come quelle di Lambert, Mercatore o Polare Stereografica, i fattori di scala $m_x = m_y = m$ e i termini di

2.7. Equazioni del modello ARW

curvatura e di Coriolis possono essere espressi nella seguente forma:

$$\begin{aligned} F_{U_{cor}} &= \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) V - eW \cos \alpha_r - \frac{uW}{r_e} \\ F_{V_{cor}} &= - \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) U - eW \sin \alpha_r - \frac{vW}{r_e} \\ F_{W_{cor}} &= e(U \cos \alpha_r - V \sin \alpha_r) + \left(\frac{uU + vV}{r_e} \right) \end{aligned}$$

2.7.1 Equazioni in forma di perturbazione

Le equazioni sopra riportate possono essere convenientemente riarrangiate nella forma delle piccole perturbazioni delle variabili⁷. In questo modo si ha la riduzione dell’errore di troncamento derivante dal calcolo del gradiente di pressione orizzontale (piccoli valori ottenuti come differenza di grandi numeri), e la riduzione dell’errore macchina cumulato nei termini di gradiente verticale di pressione e nei termini di galleggiamento (vedi [Klem 07]). A tale proposito, le nuove variabili sono definite come perturbazioni dello stato di equilibrio idrostatico (vedi [Skam 08a]) che viene preso come riferimento, e sono funzioni della sola quota \bar{z} :

$$p = \bar{p}(\bar{z}) + p' \quad (2.18)$$

$$\phi = \bar{\phi}(\bar{z}) + \phi' \quad (2.19)$$

$$\alpha = \bar{\alpha}(\bar{z}) + \alpha' \quad (2.20)$$

$$\mu_d = \bar{\mu}_d(x, y) + \mu'_d \quad (2.21)$$

Le superfici di riferimento \bar{p} , $\bar{\phi}$ e $\bar{\alpha}$ saranno quindi funzioni delle coordinate x , y e della coordinata verticale terrain following η . Nell’espressione del gradiente di pressione il termine idrostatico potrà essere eliminato senza commettere nessuna approssimazione. Le Eq. (2.22), Eq. (2.23), Eq. (2.24) sono le equazioni di bilancio della quantità di moto, l’Eq. (2.26) rappresenta l’equazione di continuità, l’Eq. (2.27) del geopotenziale, l’Eq. (2.25) e l’Eq. (2.28) sono le equazioni della temperatura potenziale e di bilancio delle specie chimiche mentre le Eq. (2.29) e Eq. (2.30) sono rispettivamente l’equazione di equilibrio idrostatico e

⁷Fatta salva l’equazione di stato Eq. (2.30)

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

di stato.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + m_x \left(\frac{\partial(Uu)}{\partial x} + \frac{\partial(Vu)}{\partial y} \right) + \frac{\partial(\Omega u)}{\partial \eta} + \mu_d \left(\alpha' \frac{\partial p'}{\partial x} + \alpha \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \frac{\alpha}{\alpha_d} \left(\mu_d \frac{\partial \phi'}{\partial x} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial x} - \mu'_d \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = F_U \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + m_y \left(\frac{\partial(Uv)}{\partial x} + \frac{\partial(Vv)}{\partial y} \right) + \frac{\partial(\Omega v)}{\partial \eta} + \mu_d \left(\alpha' \frac{\partial p'}{\partial y} + \alpha \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) + \frac{\alpha}{\alpha_d} \left(\mu_d \frac{\partial \phi'}{\partial y} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial y} - \mu'_d \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = F_V \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{m_x m_y}{m_y} \left(\frac{\partial(Uw)}{\partial x} + \frac{\partial(Vw)}{\partial y} \right) + \frac{\partial(\Omega w)}{\partial \eta} + \frac{1}{m_y} g \frac{\alpha}{\alpha_d} \left[\frac{\partial p'}{\partial \eta} - \mu_d (q_v + q_c + q_r) \right] + \frac{1}{m_y} \mu'_d g = F_W \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + m_x m_y \left(\frac{\partial(U\theta)}{\partial x} + \frac{\partial(V\theta)}{\partial y} \right) + m_y \frac{\partial(\Omega \theta)}{\partial \eta} = F_\Theta \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial \mu'_d}{\partial t} + m_x m_y \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) + m_y \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial \phi'}{\partial t} + \frac{1}{\mu_d} \left[m_x m_y \left(U \frac{\partial \phi}{\partial x} + V \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + m_y \Omega \frac{\partial \phi}{\partial \eta} - m_y g W \right] = 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t} + m_x m_y \left(\frac{\partial(Uq_m)}{\partial x} + \frac{\partial(Vq_m)}{\partial y} \right) + m_y \frac{\partial(\Omega q_m)}{\partial \eta} = F_{Q_m} \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial \phi'}{\partial \eta} = -\bar{\mu}_d \alpha'_d - \alpha_d \mu'_d \quad (2.29)$$

$$p = p_0 \left(\frac{R_d \theta_m}{p_0 \alpha_d} \right)^\gamma \quad (2.30)$$

Si nota che, a causa dell’espressione esponenziale, l’equazione di stato Eq. (2.17) non può essere espressa in termini di perturbazioni per cui la Eq. (2.30) e la Eq. (2.17) coincidono. Tuttavia, per piccole perturbazioni, quest’ultima può essere comunemente linearizzata nella variabile perturbata. Le variabili prognostiche possono essere ordinate nel vettore:

$$\Phi = (U, V, W, \Theta, \phi', \mu', Q_m) \quad (2.31)$$

2.8 Soluzione numerica delle equazioni alle differenze finite

Nei modelli ARW e MM5 la soluzione delle equazioni avviene ricorrendo al metodo delle differenze finite adottando opportune griglie di discretizzazione nello spazio e nel tempo.

2.8. Soluzione numerica delle equazioni alle differenze finite

2.8.1 Discretizzazione temporale delle equazioni

La discretizzazione temporale delle equazioni può essere fatta in modo esplicito, implicito o una combinazione dei due. Con il metodo *esplicito*, le equazioni prognostiche possono essere risolte per il valore della variabile dipendente all’istante di tempo successivo. Questo viene a trovarsi al primo membro, mentre al secondo membro si trovano tutti i valori noti dipendenti dagli istanti precedenti. Con il metodo *implicito* le variabili dipendenti all’istante successivo si trovano sia al primo che al secondo membro per cui le equazioni dovranno essere risolte in modo iterativo. I metodi *semi-impliciti* risolvono alcune variabili in maniera esplicita ed altre in maniera implicita.

Indipendentemente dal metodo usato, ammesso di non adottare l’ipotesi di Bousinesque, sono soluzioni delle equazioni sia le onde di tipo acustico che quelle di tipo gravitazionale le quali si spostano alla velocità del suono. Queste differenti famiglie di soluzioni, insieme quelle riguardanti i fenomeni meteorologici che si vogliono risolvere, hanno tempi caratteristici differenti e, di conseguenza, anche frequenze caratteristiche differenti. Al fine di adottare degli intervalli temporali di calcolo congruenti con i tempi caratteristici dei fenomeni in gioco, ARW fa ricorso a metodi *time splitting* in cui i termini delle equazioni associati ai fenomeni acustici e gravitazionali sono calcolati ricorrendo a time step più brevi, e i termini legati ai processi meteo sono risolti ricorrendo a time step più lunghi e congruenti con la velocità più bassa delle onde ad essi legate [Marc 67]. Nei metodi semi impliciti, la modalità implicita viene utilizzata per il trattamento delle onde acustiche e gravitazionali, mentre la modalità esplicita è utilizzata per il trattamento delle onde associate ai fenomeni meteo.

Schemi espliciti

Ci sono essenzialmente due tipi di discretizzazione temporale esplicita. Ad un tipo appartengono, ad esempio, la discretizzazione in avanti (*forward*), la centrata e lo schema di Adam-Bashfort, in cui si usa un unico step di calcolo per ottenere il valore della variabile dipendente all’istante di tempo successivo. Indicando con F l’approssimazione alle differenze finite del secondo membro delle equazioni prognostiche e con θ la variabile dipendente la tipica rappresentazione di un modello con schema centrale ad uno step può essere in generale scritta:

$$\theta_j^{\tau+1} = \theta_j^{\tau-1} + 2\Delta t F_j^\tau$$

Ad un altro tipo appartengono gli schemi a più step, più pesanti dal punto di vista computazionale ma superiori, in quanto ad accuratezza,

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

ai primi. Quando i passi sono due allora lo schema prende il nome di *predictor-corrector* in cui il primo step è il *predictor* ed il secondo è il *corrector*. Indicando con θ^* la soluzione intermedia si può scrivere, per esempio facendo riferimento ad uno schema predictor-corrector quale quello di Lax-Wendroff:

$$\begin{aligned}\theta^* &= \frac{1}{2}(\theta_{j+1}^\tau + \theta_{j-1}^\tau) + \frac{\Delta t}{2}F_j^\tau && \text{(step predictor)} \\ \theta_j^{\tau+1} &= \theta_j^\tau + \Delta t F_j^* && \text{(step corrector)}\end{aligned}$$

Il passo predictor si fa una previsione della variabile dipendente con modalità forward a metà del time step di calcolo. Nel passo corrector, questa previsione viene usata per calcolare la variabile dipendente inserendola nel vettore delle forzanti al secondo membro. Un altro schema a due passi è quello di Eulero backward così posto:

$$\begin{aligned}\theta_j^* &= \theta_j^\tau + \Delta t F_j^\tau \\ \theta_j^{\tau+1} &= \theta_j^\tau + \Delta t F_j^*\end{aligned}$$

Schemi time-splitting

Le tecniche di integrazione time-splitting con passo temporale lungo che si sono rivelate stabili sono ad esempio quelle che utilizzano:

- il metodo leapfrog [Klem 78b] [Skam 92];
- lo schema di integrazione Runge-Kutta del secondo ordine (RK2) [Wick 98];
- lo schema di integrazione Runge-Kutta del terzo ordine (RK3) [Wick 02].

Secondo [Klem 07] lo schema leapfrog è il più semplice da implementare ma purtroppo è uno schema a tre livelli e i passi acustici devono essere integrati su un intervallo $2\Delta t$ per ciascuno dei time step di bassa frequenza. Esso è inoltre stabile solo quando i termini di avvezione sono centrati (quindi di ordine pari), e risulta essere accurato al primo ordine. Lo schema RK2 è uno schema in cui i termini di avvezione devono essere integrati due volte per ciascuno dei time step lunghi. È uno schema stabile solo quando metodi upwind (di ordine dispari) sono usati per la discretizzazione dei termini avvevativi. Inoltre il time step è notevolmente limitato allorché vengono usati schemi di avvezione di ordine elevato [Wick 98]. Lo schema RK3 è stabile sia quando i termini avvevativi sono discretizzati con metodi centrati che quando sono usati metodi upwind. Il time step utilizzabile è circa il doppio di quello permesso dal leapfrog [Wick 02]. È accurato al terzo ordine, per lo meno quando usato equazioni lineari.

2.8. Soluzione numerica delle equazioni alle differenze finite

La discretizzazione temporale nel modello ARW Come osservato in [Klem 07], nel costruire uno schema di integrazione esplicito *time splitting* per la soluzione delle equazioni in coordinata η , verranno identificati quei termini che sono responsabili della propagazione delle onde acustiche e gravitazionali e saranno integrati procedendo con un time step piccolo. Al contrario, i rimanenti termini dovuti ai contributi di avvezione, diffusione, forze di Coriolis e derivanti dai modelli di parametrizzazione utilizzati, saranno integrati usando un time step più grande.

Nel Modello ARW può essere usato uno RK2 oppure uno RK3. La selezione del primo oppure del secondo va fatta tramite l’opzione *rk_ord* nel file *namelist.input* nella sotto sezione *Edynamics*. Quest’ultimo prevede tre passi per far avanzare la soluzione da $\Phi(t)$ a $\Phi(t + \Delta t)$ in cui Δt rappresenta il time step di bassa frequenza, e Φ vettore delle variabili prognostiche introdotto dalla Eq. (2.31):

$$\Phi_j^* = \Phi_j^t + \frac{\Delta t}{3} R_j^t \quad (2.32a)$$

$$\Phi_j^{**} = \Phi_j^t + \frac{\Delta t}{2} R_j^* \quad (2.32b)$$

$$\Phi_j^{t+\Delta t} = \Phi_j^t + \frac{\Delta t}{3} R_j^{**} \quad (2.32c)$$

all’interno dello schema *time-splitting* descritto da Wicker in [Wick 02]. Questo si appoggia sul RK3 per l’integrazione dei fenomeni a bassa frequenza per i quali, tuttavia, l’estensione del time step Δt risulterebbe condizionato dai moti di alta frequenza non significativi dal punto di vista meteorologico, e su uno schema implicito *forward-backward* per l’integrazione temporale dei fenomeni ad alta frequenza (si veda [Klem 78b]). In particolare nelle equazioni di bilancio della quantità di moto orizzontale viene usato un approccio *forward* mentre nelle equazioni della temperatura potenziale e della densità si adotta un approccio *backward* (si veda ad esempio [Skam 08c] e [Klem 07], [Klem 78a], [Skam 09]). Dal momento, inoltre, che le dimensioni verticali di griglia risultano spesso essere più piccole delle dimensioni orizzontali, la risoluzione con metodi espliciti dei modi acustici verticali imporrebbe una pesante restrizione sulle dimensioni del time step da adottare. A causa di ciò si preferisce quindi adottare un approccio implicito nella risoluzione dei time step più piccoli. Lo schema implicito usato per la propagazione verticale permette di compensare la limitazione imposta al CFL dall’adozione di griglie la cui dimensione verticale non risulta congruente con quelle orizzontali [Warn 11].

In definitiva, all’interno di ciascuno dei tre sotto passi temporali, i modi acustici sono integrati usando dei time step più corti. I modi

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

orizzontali vengono integrati esplicitamente mentre quelli verticali sono integrati implicitamente [Skam 08c]. Per facilitare l'integrazione delle equazioni su un passo temporale acustico, si preferisce definire delle nuove variabili che rappresentano la variazione rispetto al più recente dato predictor calcolato al tempo t^* (relativo cioè a Φ^t , Φ^* o Φ^{**}):

$$\begin{aligned} V'' &= V - V^{t^*} & \Omega'' &= \Omega - \Omega^{t^*} & \Theta'' &= \Theta - \Theta^{t^*} \\ \phi'' &= \phi' - \phi'^{t^*} & p'' &= p' - p'^{t^*} & \alpha'' &= \alpha' - \alpha'^{t^*} \\ \mu'' &= \mu' - \mu'^{t^*} \end{aligned} \quad (2.33)$$

La sostituzione di queste nuove variabili nelle equazioni risolte per il time step acustico di ampiezza $\Delta\tau$:

$$R_U^{t^*} = \delta_\tau U'' + \mu^{t^*} \alpha^{t^*} \frac{\partial p''^\tau}{\partial x} + \left(\mu^{t^*} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) \alpha''^\tau + \frac{\alpha}{\alpha_d} \left[\mu^{t^*} \frac{\partial \phi''^\tau}{\partial x} + \frac{\partial \phi^{t^*}}{\partial x} \left(\frac{\partial p''}{\partial \eta} - \mu'' \right)^\tau \right] \quad (2.34)$$

$$R_V^{t^*} = \delta_\tau V'' + \mu^{t^*} \alpha^{t^*} \frac{\partial p''^\tau}{\partial y} + \left(\mu^{t^*} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) \alpha''^\tau + \frac{\alpha}{\alpha_d} \left[\mu^{t^*} \frac{\partial \phi''^\tau}{\partial y} + \frac{\partial \phi^{t^*}}{\partial y} \left(\frac{\partial p''}{\partial \eta} - \mu'' \right)^\tau \right] \quad (2.35)$$

$$R_{\mu_d^{t^*}} = \delta_\tau \mu_d'' + m_x m_y \left(\frac{\partial U''}{\partial x} + \frac{\partial V''}{\partial y} \right)^{\tau+\Delta\tau} + m_y \frac{\partial \Omega''^{\tau+\Delta\tau}}{\partial \eta} \quad (2.36)$$

$$R_\Theta^{t^*} = \delta_\tau \Theta'' + m_x m_y \left(\frac{\partial (U'' \theta^{t^*})}{\partial x} + \frac{\partial (V'' \theta^{t^*})}{\partial y} \right)^{\tau+\Delta\tau} + m_y \frac{\partial (\Omega''^{\tau+\Delta\tau} \theta^{t^*})}{\partial \eta} \quad (2.37)$$

$$\delta_\tau R_W^{t^*} = W'' - \frac{1}{m_y} g \left\{ \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right)^{t^*} \left[\frac{\partial (C \frac{\partial \phi''}{\partial \eta})}{\partial \eta} + \frac{\partial \left(\frac{c_s^2}{\alpha^{t^*}} \frac{\Theta''}{\Theta^{t^*}} \right)}{\partial \eta} - \mu_d'' \right] \right\}^\tau \quad (2.38)$$

$$R_\phi^{t^*} = \delta_\tau \phi'' + \frac{1}{\mu_d^{t^*}} \left(m_y \Omega''^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial \phi^{t^*}}{\partial \eta} - m_y g \overline{W''^\tau} \right) \quad (2.39)$$

I primi membri delle equazioni dalla Eq. (2.34) alla Eq. (2.39) sono termini costanti e noti durante i passi acustici compresi nell'intervallo di sottopasso **RK3** in corso di svolgimento. Essi vengono valutati all'istante

2.8. Soluzione numerica delle equazioni alle differenze finite

t^* usando il valore appropriato del vettore Φ , ovvero Φ_t , Φ^* oppure Φ^{**} :

$$R_U^{t*} = -m_x \left(\frac{\partial(Uu)}{\partial x} + \frac{\partial(Vu)}{\partial y} \right) + \frac{\partial(\Omega u)}{\partial \eta} - \mu_d \left(\alpha \frac{\partial p'}{\partial x} - \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) - \frac{\alpha}{\alpha_d} \left(\mu_d \frac{\partial \phi'}{\partial x} - \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \mu'_d \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + F_U \quad (2.40)$$

$$R_V^{t*} = -m_y \left(\frac{\partial(Uv)}{\partial x} + \frac{\partial(Vv)}{\partial y} \right) + \frac{m_y}{m_x} \frac{\partial(\Omega v)}{\partial \eta} - \mu_d \left(\alpha \frac{\partial p'}{\partial y} - \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) - \frac{\alpha}{\alpha_d} \left(\mu_d \frac{\partial \phi'}{\partial y} - \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial y} + \mu'_d \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + F_V \quad (2.41)$$

$$R_{\mu_d}^{t*} = -m_x m_y \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) - m_y \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} \quad (2.42)$$

$$R_{\Theta}^{t*} = -m_x m_y \left(\frac{\partial(U\theta)}{\partial x} + \frac{\partial(V\theta)}{\partial y} \right) - m_y \frac{\partial(\Omega\theta)}{\partial \eta} + F_{\Theta} \quad (2.43)$$

$$R_W^{t*} = -m_x \left(\frac{\partial(Uw)}{\partial x} + \frac{\partial(Vw)}{\partial y} \right) - \frac{\partial(\Omega w)}{\partial \eta} + \frac{1}{m_y} g \frac{\alpha}{\alpha_d} \left[\frac{\partial p'}{\partial \eta} - \bar{\mu}_d (q_v + q_c + q_r) \right] - \frac{1}{m_y} \mu'_d g + F_W \quad (2.44)$$

$$R_{\phi}^{t*} = -\frac{1}{\mu_d} \left[m_x m_y \left(U \frac{\partial \phi}{\partial x} + V \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + m_y \Omega \frac{\partial \phi}{\partial \eta} - m_y g W \right] \quad (2.45)$$

Nelle relazioni sopra riportate δ_{τ} rappresenta l'operatore di derivazione discreta per gli step acustici di ampiezza $\Delta\tau$:

$$\delta_{\tau} a = \frac{a^{\tau+\Delta\tau} - a^{\tau}}{\Delta\tau} \quad (2.46)$$

mentre l'operatore di media che compare invece nell'Eq. (2.44) e nell'Eq. (2.39) è definito:

$$\bar{a}^{\tau} = \frac{1+\beta}{2} a^{\tau+\Delta\tau} + \frac{1-\beta}{2} a^{\tau} \quad (2.47)$$

Questa media, di tipo non centrata in avanti, viene usata nella risoluzione implicita delle due equazioni. Secondo [Durr 83] un valore del parametro $0 < \beta \leq 1$ rende l'integrazione incondizionatamente stabile ed aiuta a smorzare le instabilità associate alla propagazione delle onde acustiche verticali. In ARW il valore tipicamente adottato, indipendentemente dalle dimensioni di griglia o di passo temporale, è $\beta = 0.1$.

L'algoritmo risolutivo, contenuto nel file sorgente “*solve.em.F*”, è riassunto in Tab. 2.3.

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

Inizio del passo temporale di bassa frequenza Δt

Inizio ciclo sui tre passi **RK3**

Si calcolano i termini F_Φ (per il primo passo del **RK3**) e R^{t^*}

Inizio ciclo su n passi acustici di ampiezza $\Delta\tau$

Scelta di n :

Primo passo RK: $n = 1$ e $\Delta\tau = \Delta t/3$

Secondo passo RK: $n = n_s/2$ con $n_s = \Delta t/\Delta\tau$

Terzo passo RK: $n = n_s$ con $n_s = \Delta t/\Delta\tau$

Loop su n passi acustici:

Si calcola $U''^{\tau+\Delta\tau}$ dalla Eq. (2.34) e $V''^{\tau+\Delta\tau}$ dalla Eq. (2.35)

Si ricava successivamente $\phi''^{\tau+\Delta\tau}$ dalla Eq. (2.36)

previa integrazione verticale dalla superficie al top in modo da eliminare la dipendenza da Ω :

$$\delta_\tau \mu_d'' = m_x m_y \int_1^0 \left(\frac{\partial U''}{\partial x} + \frac{\partial V''}{\partial y} \right)^{\tau+\Delta\tau} d\eta$$

Nota $\mu_d''^{\tau+\Delta\tau}$, si procede al calcolo della $\Omega''^{\tau+\Delta\tau}$ dalla Eq. (2.36) che viene integrata verticalmente dalla superficie,

dove $\Omega'' = 0$, al livello η

Dalla Eq. (2.37) si ricava $\Theta''^{\tau+\Delta\tau}$

Le equazioni (2.44) e (2.39) sono risolte in combinazione

in modo implicito ottenendo $W''^{\tau+\Delta\tau}$ e $\phi''^{\tau+\Delta\tau}$ con la condizione al contorno di superficie $\Omega = \Omega'' = 0$ e $p' = 0$ al top

Per finire si ricava $p''^{\tau+\Delta\tau}$ dalla equazione diagnostica Eq. (2.29)

che con le variabili (2.33) diventa: $\alpha_d'' = -\frac{1}{\mu_d^{t^*}} \left(\frac{\partial \phi''}{\partial \eta} + \alpha_d^{t^*} \mu_d'' \right)$

e $\alpha''^{\tau+\Delta\tau}$ dalla equazione di stato Eq. (2.30) che viene opportunamente linearizzata:

$$p'' = \frac{c_s^2}{\alpha_d^{t^*}} \left(\frac{\Theta''}{\Theta^{t^*}} - \frac{\alpha_d''}{\alpha_d^{t^*}} - \frac{\mu_d''}{\mu_d^{t^*}} \right)$$

Fine ciclo sui passi acustici

Si calcolano i termini di trasporto scalari dalla Eq. (2.28) e i valori di p' e α' dalla Eq. (2.29) e dalla Eq. (2.30)

Fine ciclo sui tre passi **RK3**

Si calcolano i contributi di microfisica non coinvolti nel **RK3**

giungendo al termine del passo temporale di bassa frequenza

Fine del passo temporale di bassa frequenza Δt

Tabella 2.3: Sequenza di integrazione temporale RK3

2.8. Soluzione numerica delle equazioni alle differenze finite

2.8.2 Discretizzazione spaziale delle equazioni

Modelli Euleriani

I modelli Euleriani calcolano i termini di trasporto avveztivo nelle equazioni in punti griglia fissi individuati dal sistema di coordinate orizzontali e verticale. Per esempio, una equazione del tipo (si veda [Warn 11]):

$$\left. \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right|_{x,y,z} = -\vec{V} \nabla \alpha + F(x, y, z, t)$$

viene risolta, per valori della derivata temporale, in punti specifici nei quali vengono valutati i contributi di avvezione e forzanti. In ogni caso, affinché il criterio di stabilità numerica sia rispettato, risultano imposti dei limiti all’ampiezza del time step adottato. Proprio a causa di questa limite intrinseco alla stabilità, si ricorre sempre di più all’adozione degli schemi semi-Lagrangiani.

Modelli Lagrangiani e Semi-Lagrangiani

Nei metodi *puramente Lagrangiani* le proprietà del fluido vengono calcolate inseguendo le singole particelle per cui, come si può intuire, il sistema di riferimento è determinato dalla posizione assunta dalle particelle stesse in movimento e non da una griglia ben definita [Warn 11]. La tipica relazione che descrive l’approccio Lagrangiano è quella che prevede la comparsa della derivata nel tempo nella sua forma detta *materiale*, *totale* o *sostanziale*:

$$\frac{d\alpha}{dt} = F(x, y, z, t) \quad (2.48)$$

Se la grandezza α si conserva perfettamente, cioè il valore di α non cambia inseguendo la particella, allora si potrà scrivere:

$$\frac{d\alpha}{dt} = 0 \quad (2.49)$$

In questo caso, più semplice, l’integrazione temporale dell’ Eq. (2.49) nell’ambito di un set più ampio di equazioni, porterebbe alla determinazione di come la grandezza conservata α viene redistribuita nello spazio dal vento. Un siffatto approccio potrebbe prevedere l’inizializzazione mediante l’assegnazione del campo iniziale di valori di α sui punti di una griglia regolare all’istante iniziale. Tuttavia, dopo un periodo iniziale di calcolo, l’evoluzione del sistema porterebbe ad una redistribuzione, nella maggior parte dei casi, irregolare delle particelle nello spazio che darebbe grossi problemi dal punto di vista della risoluzione spaziale. A causa di questo problema, si è rivolta l’attenzione verso quelli

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

che vengono chiamati *metodi semi-Lagrangiani* per la discretizzazione spaziale. Questi metodi, si veda [Stan 91], prevedono ad ogni time step la ridefinizione completa del set di particelle da inseguire. Esistono essenzialmente **due approcci** a questo metodo:

- uno consiste nel considerare noto il campo α con le particelle inizialmente posizionate nei punti griglia al tempo t e successivamente, al time step successivo $t + \Delta t$, valutarne la nuova posizione determinata dal trasporto subito in base al campo di velocità presente. La nuova posizione assunta dalle particelle, chiaramente, non definirà una griglia regolare, tuttavia la proprietà α sarà da queste conservata e una nuova distribuzione spaziale di α sarà definita in base ai punti finali delle traiettorie percorse. A questo punto si interpoleranno i valori di α nelle posizioni finali irregolari per ricavare i valori nei punti della griglia originale al tempo $t + \Delta t$;
- un approccio alternativo, ma più comune, è quello che permette di effettuare l'operazione di interpolazione spaziale partendo da una griglia regolare, al fine di determinare i valori di α su punti posizionati irregolarmente. Questa volta per il calcolo di α nei punti griglia al tempo $t + \Delta t$, si procederà effettuando un passo temporale indietro. Si valuteranno i punti di partenza delle traiettorie delle particelle che le hanno condotte nei punti griglia al tempo $t + \Delta t$. I valori assunti da α in quei punti, verranno calcolati interpolando i valori al tempo t della griglia regolare .

Nel caso più generale la grandezza α non si conserva per la singola particella per cui, nei punti iniziali e finali delle loro traiettorie, il valore di α sarà diverso. L'approccio potrà essere implicito o esplicito. Ad esempio in un caso monodimensionale:

$$\frac{d\alpha}{dt} = F(x, t)$$

ponendo $x_j = j\Delta x$, $t^n = n\Delta t$ e indicando con \tilde{x}^n la stima della posizione di partenza della particella al tempo t si può avere:

- una espressione implicita:

$$\frac{\alpha(x_j, t^{n+1}) - \alpha(\tilde{x}_j^n, t^n)}{\Delta t} = \frac{1}{2} [F(x_j, t^{n+1}) + F(\tilde{x}_j^n, t^n)]$$

in cui il valore di F viene calcolato nei punti griglia x_j direttamente mentre in \tilde{x}_j^n tramite interpolazione dai punti adiacenti;

2.8. Soluzione numerica delle equazioni alle differenze finite

- oppure una espressione esplicita:

$$\frac{\alpha(x_j, t^{n+1}) - \alpha(\tilde{x}_j^{n-1}, t^{n-1})}{2\Delta t} = F(\tilde{x}^n, t^n)$$

in cui il vincolo sul passo temporale è dato dal fatto che le traiettorie non possono incrociarsi e i punti finali devono comunque cadere all’interno della griglia.

Il successo dell’approccio semi-Lagrangiano nei modelli **LAM** è da ricercarsi:

- nella maggior efficienza rispetto all’approccio Euleriano dovuta alla mancanza della restrizione sul **CFL**. Tuttavia, come osservato in [Skam 06], il limite sul numero di Lipschitz $\Delta t(\partial u/\partial x) \leq 1$ rimane imponendo la condizione di non intersezione alle traiettorie delle particelle [Smol 92];
- nella possibilità di essere usato con schemi semi-impliciti che vengono applicati ai termini di gradiente di pressione e divergenza della velocità;
- nella mancanza dei termini non lineari di avvezione, principali responsabili della instabilità.

La critica maggiore espressa ai metodi semi-Lagrangiani deriva dal fatto che in genere non sono efficaci nel conservare grandezze quali massa ed energia.

Griglie di calcolo sfalsate

Lo sfalsamento di griglia consiste nel definire variabili diverse su griglie diverse. In pratica, dati due gruppi di grandezze, ciascuno definito su una sua griglia di discretizzazione spaziale, i punti di una sono sfalsati rispetto ai punti dell’altra tipicamente di mezzo passo di griglia [Comi 08]. In Fig. 2.15 è mostrato un esempio di griglia monodimensionale non sfalsata e sfalsata. Nella griglia non sfalsata un termine di trasporto avvevativo del tipo $u\partial\theta/\partial x$, discretizzato con uno schema centrale a tre punti, richiederebbe un’ampiezza di calcolo di $2\Delta x$ mentre, la versione sfalsata, richiederebbe il calcolo discreto della derivata sull’intervallo ampio Δx , riducendo gli effetti dell’errore di troncamento sulla soluzione. Un altro vantaggio dello sfalsamento (“*staggering*”) di griglia si ha nei modelli idrostatici. In questi la componente verticale della velocità viene ricavata dalla divergenza orizzontale nell’equazione diagnostica di conservazione della massa

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

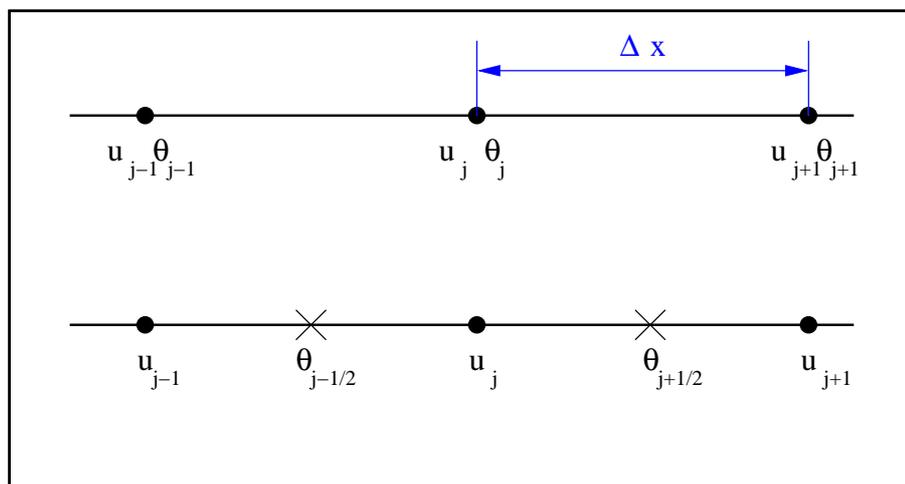


Figura 2.15: Griglie monodimensionali, non sfalsata e sfalsata

MM5 si basa sull'utilizzo di una griglia sfalsata di tipo Arakawa Lamb B (Fig. 2.17). In questo tipo di griglia le componenti della velocità u e v sono calcolate nei nodi (*dot point*) delle celle, mentre le grandezze scalari T , q , p' e la componente verticale della velocità w sono calcolate nei centri cella (*cross point*).

ARW si basa sull'utilizzo di una griglia sfalsata di tipo Arakawa C (Fig. 2.18) che, secondo [Arak 77], è la migliore per la soluzione delle onde gravitazionali. In questo tipo di griglia le componenti della velocità sono centrate nelle facce delle celle, quindi sfalsate di metà della dimensione di griglia rispetto alle grandezze scalari che invece sono calcolate nei centri cella. In pratica θ , μ , q_m , p , α sono locate in quelli che vengono definiti *mass point* mentre u negli *u point*, v nei *v point* e w , ϕ nei *w point*. **ARW** fa uso di dimensioni di griglia Δx e Δy costanti all'interno di ciascun dominio innestato e la distorsione di mappa, come già osservato in precedenza nel Par. 2.6, viene tenuta in conto nelle equazioni attraverso opportuni fattori di mappa. Per quanto riguarda la discretizzazione verticale, $\Delta \eta$ non è costante. I singoli valori vanno specificati nel file “*namelist.input*”, e variano da $\eta = 0$ al top a $\eta = 1$

2.8. Soluzione numerica delle equazioni alle differenze finite

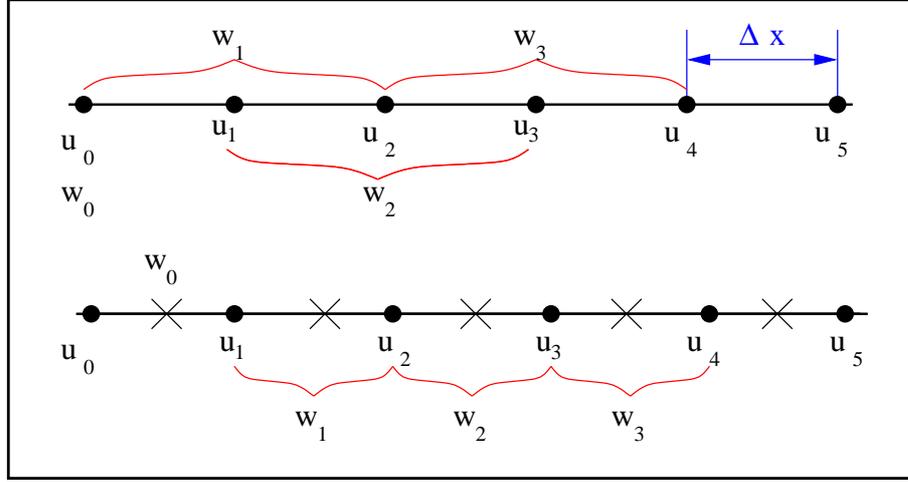


Figura 2.16: Griglie monodimensionali, non sfalsata e sfalsata

sulla superficie. Le equazioni acustiche discretizzate spazialmente sono:

$$R_U^{t^*} = \delta_\tau U'' + \overline{\mu^{t^*x} \alpha^{t^*x}} \delta_x p''^\tau + \left(\overline{\mu^{t^*x} \delta_x \bar{p}} \right) \overline{\alpha''^\tau}^x + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right)^x \left[\overline{\mu^{t^*x} \delta_x \phi''^\tau}^\eta + \delta_x \overline{\phi^{t^*x}}^\eta \left(\delta_\eta \overline{p''^\tau}^\eta - \overline{\mu''^x} \right)^\tau \right] \quad (2.50)$$

$$R_V^{t^*} = \delta_\tau V'' + \overline{\mu^{t^*y} \alpha^{t^*y}} \delta_y p''^\tau + \left(\overline{\mu^{t^*y} \delta_y \bar{p}} \right) \overline{\alpha''^\tau}^y + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right)^y \left[\overline{\mu^{t^*y} \delta_y \phi''^\tau}^\eta + \delta_y \overline{\phi^{t^*y}}^\eta \left(\delta_\eta \overline{p''^\tau}^\eta - \overline{\mu''^y} \right)^\tau \right] \quad (2.51)$$

$$R_{\mu_d^{t^*}} = \delta_\tau \mu_d'' + m_x m_y \left(\delta_x U'' + \delta_y V'' \right)^{\tau+\Delta\tau} + m_y \delta_\eta \Omega''^{\tau+\Delta\tau} \quad (2.52)$$

$$R_\Theta^{t^*} = \delta_\tau \Theta'' + m_x m_y \left[\delta_x \left(U'' \overline{\theta^{t^*x}} \right) + \delta_y \left(V'' \overline{\theta^{t^*y}} \right) \right]^{\tau+\Delta\tau} + m_y \delta_\eta \left(\Omega''^{\tau+\Delta\tau} \overline{\theta^{t^*\eta}} \right)^\eta \quad (2.53)$$

$$R_W^{t^*} = \delta_\tau W'' - \frac{1}{m_y} g \left\{ \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right)^{t^*\eta} \left[\delta_\eta \left(C \delta_\eta \phi'' \right) + \delta_\eta \left(\frac{c_s^2}{\alpha^{t^*}} \frac{\Theta''}{\Theta^{t^*}} \right) - \mu_d'' \right] \right\}^\tau \quad (2.54)$$

$$R_\phi^{t^*} = \delta_\tau \phi'' + \frac{1}{\mu_d^{t^*}} \left(m_y \Omega''^{\tau+\Delta\tau} \delta_\eta \phi^{t^*} - m_y g \overline{W''^\tau} \right) \quad (2.55)$$

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

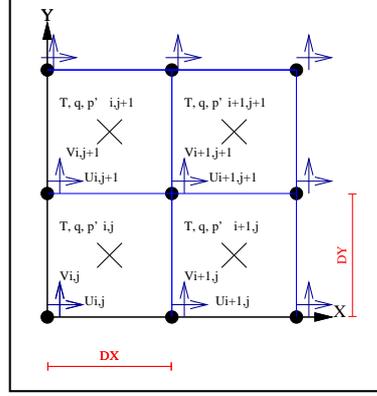


Figura 2.17: Griglia sfalsata Arakawa B

in cui gli operatori di discretizzazione sono:

$$\delta_x a = \frac{a_{i+1/2} - a_{i-1/2}}{\Delta x} \quad \delta_y a = \frac{a_{j+1/2} - a_{j-1/2}}{\Delta y} \quad \delta_\eta a = \frac{a_{k+1/2} - a_{k-1/2}}{\Delta \eta} \quad (2.56)$$

e la $\delta_\tau a$ è data dalla Eq. (2.47), mentre gli operatori di interpolazione dai centri faccia ai centri cella:

$$\bar{a}^x = \frac{a_{i+1/2} + a_{i-1/2}}{2} \quad \bar{a}^y = \frac{a_{j+1/2} + a_{j-1/2}}{2} \quad \bar{a}^\eta = \frac{a_{k+1/2} + a_{k-1/2}}{2} \quad (2.57)$$

I termini al secondo membro, delle equazioni della quantità di moto vengono così discretizzati:

$$\begin{aligned} R_U^{t*} &= -\bar{\mu}_d^x \left(\bar{\alpha}^x \delta_x p' - \bar{\alpha}^x \delta_x \bar{p} \right) - \\ &\quad \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right)^x \left(\bar{\mu}_d^x \delta_x \bar{\phi}^\eta - \delta_\eta \bar{p}^x \delta_x \bar{\phi}^\eta + \bar{\mu}_d^x \delta_x \bar{\phi}^\eta \right) + F_{Ucor} + \\ &\quad \text{avvezione} + \text{mixing} + \text{microfisica} \end{aligned} \quad (2.58)$$

$$\begin{aligned} R_V^{t*} &= -\bar{\mu}_d^y \left(\bar{\alpha}^y \delta_y p' - \bar{\alpha}^y \delta_y \bar{p} \right) - \\ &\quad \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right)^y \left(\bar{\mu}_d^y \delta_y \bar{\phi}^\eta - \delta_\eta \bar{p}^y \delta_y \bar{\phi}^\eta + \bar{\mu}_d^y \delta_y \bar{\phi}^\eta \right) + F_{Vcor} + \\ &\quad \text{avvezione} + \text{mixing} + \text{microfisica} \end{aligned} \quad (2.59)$$

$$\begin{aligned} R_W^{t*} &= \frac{1}{m} g \frac{\bar{\alpha}^\eta}{\alpha_d} \left(\delta_\eta p' + \bar{\mu}_d \bar{q}^\eta \right) - \frac{1}{m} \mu_d' g + F_{Wcor} + \\ &\quad \text{avvezione} + \text{galleggiamento} + \text{mixing} + \text{microfisica} \end{aligned} \quad (2.60)$$

2.8. Soluzione numerica delle equazioni alle differenze finite

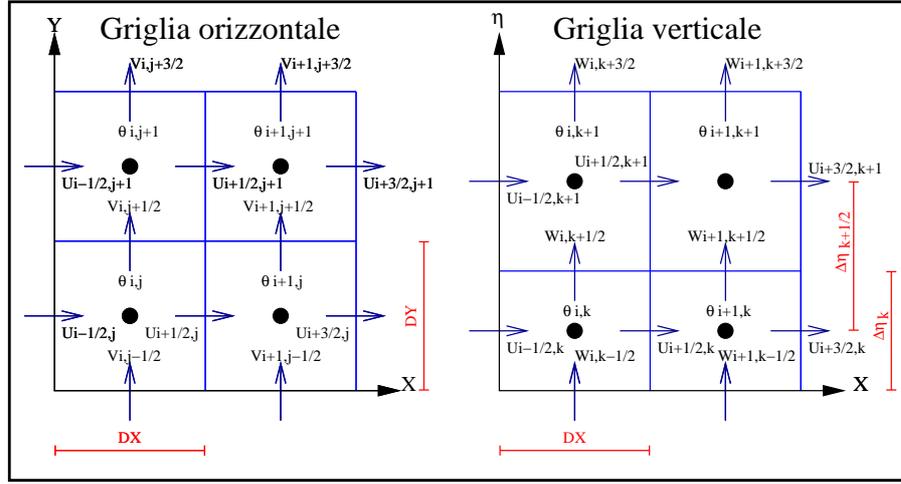


Figura 2.18: Griglia sfalsata Arakawa C

Termini di curvatura e di Coriolis

La discretizzazione spaziale dei termini forzanti di Coriolis, tenendo conto che per le proiezioni di mappa polare stereografica, Mercatore e Lambert si ha $m_x = m_y = m$ sar a:

$$F_{U_{cor}} = \left(\bar{f}^x + \overline{u^x \delta_y m} - \overline{v^y \delta_x m^x} \right) \overline{V^x y} - \bar{e}^x \overline{W^x \eta} \cos \alpha_r^x - \frac{u \overline{W^x \eta}}{r_e} \quad (2.61)$$

$$F_{V_{cor}} = - \left(\bar{f}^y + \overline{u^x \delta_y m} - \overline{v^y \delta_x m^y} \right) \overline{U^x y} - \bar{e}^y \overline{W^y \eta} \sin \alpha_r^y - \frac{v \overline{W^y \eta}}{r_e} \quad (2.62)$$

$$F_{W_{cor}} = e \left(\overline{U^x \eta} \cos \alpha_r - \overline{V^y \eta} \sin \alpha_r \right) + \left(\frac{\overline{u^x \eta} \overline{U^x \eta} + \overline{v^y \eta} \overline{V^y \eta}}{r_e} \right) \quad (2.63)$$

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

Discretizzazione dei termini avvettivi

$$R_{U_{adv}}^{t*} = -m_x \left(\frac{\partial(Uu)}{\partial x} + \frac{\partial(Vu)}{\partial y} \right) + \frac{\partial(\Omega u)}{\partial \eta} \quad (2.64)$$

$$R_{V_{adv}}^{t*} = -m_y \left(\frac{\partial(Uv)}{\partial x} + \frac{\partial(Vv)}{\partial y} \right) + \frac{m_y}{m_x} \frac{\partial(\Omega v)}{\partial \eta} \quad (2.65)$$

$$R_{\mu_{d_{adv}}}^{t*} = -m_x m_y \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) - m_y \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} \quad (2.66)$$

$$R_{\Theta_{adv}}^{t*} = -m_x m_y \left(\frac{\partial(U\theta)}{\partial x} + \frac{\partial(V\theta)}{\partial y} \right) - m_y \frac{\partial(\Omega\theta)}{\partial \eta} \quad (2.67)$$

$$R_{W_{adv}}^{t*} = -m_x \left(\frac{\partial(Uw)}{\partial x} + \frac{\partial(Vw)}{\partial y} \right) - \frac{\partial(\Omega w)}{\partial \eta} \quad (2.68)$$

$$R_{\phi_{adv}}^{t*} = -\frac{1}{\mu_d} \left[m_x m_y \left(U \frac{\partial \phi}{\partial x} + V \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + m_y \Omega \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right] \quad (2.69)$$

La Eq. (2.66) viene discretizzata centralmente al secondo ordine:

$$R_{\mu_{d_{adv}}}^{t*} = -m_x m_y (\delta_x U + \delta_y V)^{t*} - m_y \delta_\eta \Omega^{t*} \quad (2.70)$$

mentre le equazioni della quantità di moto, di trasporto degli scalari e del geopotenziale possono essere discretizzate con ordine fino al sesto [Hund 95]. La scelta dell'ordine di integrazione viene impostata tramite i parametri:

h_mom_adv_order, **h_sca_adv_order** per quanto riguarda i termini avvezione orizzontale della quantità di moto e degli scalari (da preferire il quinto ordine secondo [Wang 10] in base a quanto riportato in [Ande 74]);

v_mom_adv_order, **v_sca_adv_order** per quanto riguarda i termini di avvezione verticale della quantità di moto e degli scalari (da preferire il terzo ordine secondo [Wang 10] in base a quanto riportato in [Ande 74]);

nel file *namelist.input* nella sezione *ℓdynamics*. Ad esempio, il contributo avvettivo nella Eq. (2.28) di trasporto degli scalari:

$$R_{q_{adv}}^{t*} = m_x m_y \left(\frac{\partial(Uq_m)}{\partial x} + \frac{\partial(Vq_m)}{\partial y} \right) + m_y \frac{\partial(\Omega q_m)}{\partial \eta} \quad (2.71)$$

diventa:

$$R_{\mu_{adv}}^{t*} = m_x m_y [\delta_x (U \bar{q}^{x_{adv}}) + \delta_y (V \bar{q}^{y_{adv}})] + m_y \delta_\eta (\Omega \bar{q}^{\eta_{adv}}) \quad (2.72)$$

2.8. Soluzione numerica delle equazioni alle differenze finite

L'ordine dello schema di avvezione dipende dalla scelta fatta per l'operatore $\bar{q}^{x_{avv}}$. Per gli ordini pari:

$$2^\circ \text{ ordine: } (\bar{q}^{x_{avv}})_{i-1/2} = \frac{1}{2}(q_i + q_{i-1}) \quad (2.73)$$

$$4^\circ \text{ ordine: } (\bar{q}^{x_{avv}})_{i-1/2} = \frac{7}{12}(q_i + q_{i-1}) - \frac{1}{12}(q_{i+1} + q_{i-2}) \quad (2.74)$$

$$6^\circ \text{ ordine: } (\bar{q}^{x_{avv}})_{i-1/2} = \frac{37}{60}(q_i + q_{i-1}) - \frac{2}{15}(q_{i+1} + q_{i-2}) + \frac{1}{60}(q_{i+2} + q_{i-3}) \quad (2.75)$$

invece per gli ordini dispari:

$$3^\circ \text{ ordine: } (\bar{q}^{x_{avv}})_{i-1/2} = (\bar{q}^{x_{avv}})_{i-1/2}^{4^\circ} + \text{sign}(U) \frac{1}{12} [(q_{i+1} - q_{i-2}) - 3(q_i - q_{i-1})] \quad (2.76)$$

$$5^\circ \text{ ordine: } (\bar{q}^{x_{avv}})_{i-1/2} = (\bar{q}^{x_{avv}})_{i-1/2}^{6^\circ} + \text{sign}(U) \frac{1}{60} [(q_{i+2} - q_{i-3}) - 5(q_{i+1} - q_{i-2}) + 10(q_i - q_{i-1})] \quad (2.77)$$

Si vede dalle espressioni di ordine dispari, come queste siano date dall'espressione di ordine più alto pari più un termine diffusivo numerico introdotto dallo schema upwind. Infatti, se si suppone costante il flusso di massa e moltiplicando per Δt ad esempio l'espressione del 5° ordine, si ottiene:

$$\Delta t \delta_x (U \bar{q}^{x_{avv}}) = \Delta t \delta (U q) |^{6^\circ} - \left| \frac{U \Delta t}{\Delta x} \right| \frac{1}{60} (-q_{i-3} + 6q_{i-2} - 15q_{i-1} + 20q_i - 15q_{i+1} + 6q_{i+2} - q_{i+3}) \quad (2.78)$$

in cui si riconosce l'espressione del CFL che moltiplica un termine viscoso:

$$\Delta t \delta_x (U \bar{q}^{x_{avv}}) = \Delta t \delta (U q) |^{6^\circ} - \frac{Cr}{60} \Delta x^6 \frac{\partial^6 q}{\partial x^6} + \text{termini di ordine superiore} \quad (2.79)$$

Discretizzazione dei termini avvevivi per scalari passivi

Grandezze quali il rapporto di mescolanza o la concentrazione di specie chimiche, sono definite sempre quantità positive o al limite nulle. Lo schema di Tab. 2.3 nel quale è inserita la Eq. (2.71) purtroppo, pur assicurando la conservazione della massa, non garantisce la positività di

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

tali grandezze. In pratica la conservatività della massa impone che ogni termine negativo sia bilanciato da uno positivo il ch , in certi schemi di microfisica che semplicemente azzerano i termini negativi, porta ad un aumento della massa totale della specie in considerazione. Al fine di rimuovere tale inconveniente non fisico, nell’ultimo passo del **RK3** viene applicata una rinormalizzazione dei flussi. L’adozione di schemi di rinormalizzazione definiti a **trasporto positivo** aiuta a ridurre l’errore, generalmente in eccesso, della previsione, ad esempio, di pioggia al suolo. Ci    stato dimostrato da numerose simulazioni condotte al fine di comparare i modelli definiti positivi con quelli che non lo sono. Ad esempio l’equazione di trasporto del vapor d’acqua Eq. (2.15):

$$\frac{\partial \mu \phi}{\partial t} + \frac{\partial u \mu \phi}{\partial x} + \frac{\partial v \mu \phi}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\eta} \mu \phi}{\partial \eta} = \mu S_\phi$$

viene discretizzata:

$$(\mu \phi)^{t+\Delta t} = (\mu \phi)^t - \Delta t \{ m_x m_y [\delta_x (U \bar{q}^{xadv}) + \delta_y (U \bar{q}^{yadv})] - m_y \delta_\eta (\Omega \bar{q}^{\eta adv}) \} + \Delta t \mu S_\phi^t \quad (2.80)$$

e l’ultimo passo dello schema **RK3**, rappresentato dalla Eq. (2.32c) viene sostituito dalle due relazioni di seguito riportate:

$$(\mu \phi)^{***} = (\mu \phi)^t + \Delta t \mu S_\phi^t \quad (2.81a)$$

$$(\mu \phi)^{t+\Delta t} = (\mu \phi)^{***} - \Delta t \{ m_x m_y (\delta_x [(U \bar{q}^{xadv})^1 + R(U \bar{q}^{xadv})'] + \delta_y [(U \bar{q}^{yadv})^1 + R(U \bar{q}^{yadv})']) + m_y \delta_\eta [(\Omega \bar{q}^{\eta adv})^1 + R(\Omega \bar{q}^{\eta adv})'] \} \quad (2.81b)$$

Dapprima con la (2.81a) il valore predictor $(\mu \phi)^{***}$ del flusso del rapporto di mescolanza viene aggiornato tenendo conto della fisica e dei termini sorgenti. Successivamente, l’aggiornamento completo viene effettuato sommando al valore predictor una correzione, ossia il termine tra parentesi graffe della (2.81b), data dalla somma di:

- contributi upwind $()^1$ calcolati utilizzando il valore ϕ^{***}
- contributi di rinormalizzazione $R()'$.

La modalit  con cui opera **ARW**   descritta in dettaglio in [Skam 08b] e [Skam 06].

2.8.3 Il passo temporale di calcolo: limiti di stabilit 

Come si   visto al Par. 2.8.1, l’algoritmo **RK3** prevede l’adozione di un passo temporale lasco per l’integrazione dei fenomeni meteorologici

2.8. Soluzione numerica delle equazioni alle differenze finite

Schema temporale	Ordine spaziale			
	3°	4°	5°	6°
Leapfrog	<i>Instabile</i>	0.72	<i>Instabile</i>	0.62
RK2	0.88	<i>Instabile</i>	0.30	<i>Instabile</i>
RK3	1.61	1.26	1.42	1.08

Tabella 2.4: CFL massimo ammesso per uno schema avvevativo 1D

a bassa frequenza, e di un passo breve per l’integrazione dei fenomeni acustici. Il limite alla lunghezza del passo temporale di bassa frequenza è imposto sia dal **CFL** $u\Delta t/\Delta x$ che dalla scelta dello schema di avvezione descritto a Pag. 62. In [Wick 02] vengono riportati i valori limiti del **CFL** imposti dalla richiesta di stabilità, nel caso più semplice di avvezione monodimensionale, nello schema **RK3**:

Nel caso di flusso tridimensionale il **CFL** adottato dalla Tab. 2.4 dovrà essere ridotto di $1/\sqrt{3}$ e, per assicurare un ulteriore margine, moltiplicato ulteriormente per 0.75:

$$\Delta t_{max} < 0.75 \frac{CFL}{\sqrt{3}} \frac{\Delta x}{u_{max}} \quad (2.82)$$

La regola generale che viene suggerita in [Wang 10] è quella di adottare un passo temporale pari a sei volte il passo di griglia espresso in chilometri.

Il passo temporale acustico risulta limitato sempre dal **CFL** ma scalato rispetto alla velocità del suono $CFL = c_s \Delta t/\Delta x$. Il valore limite consigliato in [Wang 10] è:

$$\Delta \tau < 0.5 \frac{\Delta x}{c_s} \quad (2.83)$$

In [Skam 08a] si cita l’esempio di una simulazione fatta su di una griglia da $\Delta x = 10 \text{ km}$, con uno schema avvevativo del 5° ordine, che contempla la possibilità di catturare delle correnti a getto di intensità $u_{max} = 100 \text{ m/s}$ e una velocità del suono ipotizzata pari a $c_s = 300 \text{ m/s}$. La Eq. (2.82) fornisce un passo temporale di $\Delta t = 60 \text{ sec}$, da assegnare alla variabile `time_step` nel gruppo `Edomains` del file `namelist.input`. L’Eq. (2.83) da un passo acustico di $\Delta \tau = 16.6 \text{ sec}$ che viene arrotondato a $\Delta \tau = 15 \text{ sec}$ in modo da ottenere un sotto multiplo pari, uguale a 4, da assegnare alla variabile `time_step_sound` nel gruppo `Edynamics` del file `namelist.input`.

2.9 Condizioni iniziali e al contorno nel modello ARW

Le condizioni iniziali di partenza e le condizioni al contorno devono essere elaborate da un opportuno codice di pre processamento. Questo produce un set di dati che verranno utilizzati all’inizio ed in fase di *run* dal codice di mesoscala. Il pacchetto di programmi di *preprocessing* in ARW prende il nome di WRF Preprocessing System (WPS). Il compito dei codici contenuti nel pacchetto WPS è quello operare sui dati orografici (statici) e meteorologici (dinamici), questi ultimi generalmente disponibili in formato Gridded Binary Data (GRIB), in modo da renderli utilizzabili in ingresso dal programma di pre processamento proprio del codice ARW stesso. La prima cosa da fare, [Skam 08a], è definire

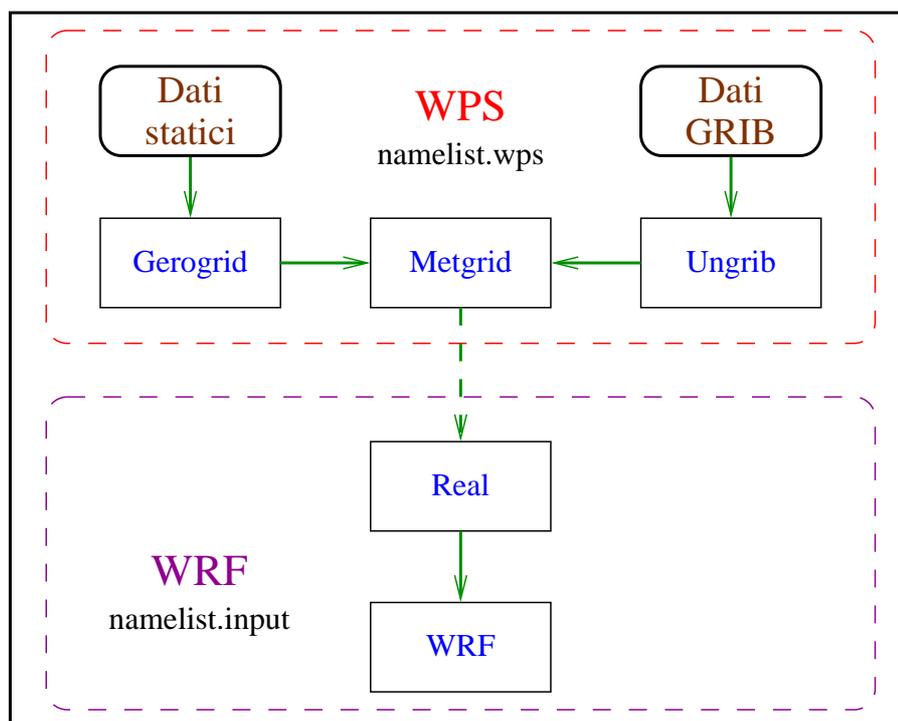


Figura 2.19: Pre e post processing di ARW

una griglia di calcolo centrata sulle coordinate geografiche del punto di interesse. Questa determinerà, secondo la proiezione cartografica scelta, una griglia deformata sulla superficie terrestre 2.20. I parametri di griglia, oltre al suo centro, sono il numero di nodi, la distanza tra questi

2.9. Condizioni iniziali e al contorno nel modello ARW

e la definizione di eventuali sottodomini innestati. Fissata la griglia di calcolo, i dati statici di orografia dovranno essere interpolati sui nodi da essa definiti (modulo Geogrid nella Fig. 2.19). I dati dinamici esterni, in

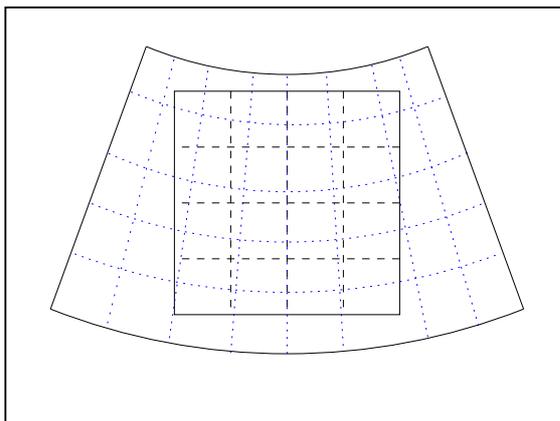


Figura 2.20: Griglia di calcolo proiettata sulla superficie terrestre.

formato **GRIB**, vengono rielaborati in modo da filtrare i dati necessari alla simulazione e riorganizzati in forma binaria compatibile con **ARW** (modulo Ungrib nella Fig. 2.19). A questo punto, avendo a disposizione i dati orografici e meteo in formato opportuno, è possibile interpolarli orizzontalmente sulla griglia di calcolo precedentemente definita (modulo Metgrid nella Fig. 2.19). Il pacchetto **WPS** fornisce quindi una fotografia tridimensionale dell'atmosfera in corrispondenza della griglia di calcolo definita all'istante di tempo richiesto. I dati così riorganizzati vengono elaborati dal programma di preprocessing del solutore **ARW** (modulo Real nella Fig. 2.19) prima di essere utilizzati da **WRF** con il programma centrale wrf.exe. Essi contengono campi di dati:

tridimensionali : la temperatura, l'umidità relativa, le componenti orizzontali della velocità già espresse nel riferimento ruotato (secondo il modello di proiezione cartografica adottato);

bidimensionali :

statici : l'albedo, i parametri di Coriolis, l'elevazione del terreno, l'uso del terreno ed il tipo di vegetazione, la maschera acqua/terra (per quei campi definiti esclusivamente o sul suolo o sul mare), i fattori di mappa, le rotazioni di mappa, il tipo di terreno, la frazione verde di vegetazione, la temperatura annuale media, la latitudine e la longitudine;

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

dinamici : ottenuti da **WPS**, quali la pressione al suolo e al livello del mare, temperatura degli strati del suolo e loro umidità, profondità della neve, temperatura al suolo, temperatura superficiale del mare, mappa acqua/ghiaccio.

Lo stato di riferimento

Come visto nel Par. 2.7.1, si conviene di studiare l’andamento delle perturbazioni di alcune grandezze fisiche in gioco rispetto ad uno stato “statico” di riferimento dell’atmosfera secca in quiete. Lo stato di riferimento risulta definito da:

- l’elevazione del terreno;
- la pressione al livello del mare, pari a $p_0 = 10^5$ Pa;
- la temperatura al livello del mare $T_0 = 270 \div 300$ K;
- la differenza di temperatura $A = 50$ K tra i livelli di pressione al suolo e $p/e = 36788$ Pa.

La pressione di riferimento al suolo dell’atmosfera secca è quindi [Skam 08a]:

$$p_{dhs} = p_0 \exp \left(-\frac{T_0}{A} + \sqrt{\left(\frac{T_0}{A}\right)^2 - \frac{2\phi_{sfc}}{AR_d}} \right) \quad (2.84)$$

Il campo di pressione di riferimento in termini della coordinata η risulta quindi essere:

$$p_{dh} = \bar{p}_d = \eta (p_{dhs} - p_{dht}) + p_{dht} \quad (2.85)$$

in cui p_{dht} è la pressione atmosferica al top, la temperatura:

$$T = T_0 + A \ln \frac{\bar{p}_d}{p_0} \quad (2.86)$$

la temperatura potenziale:

$$\bar{\theta}_d = \left(T_0 + A \ln \frac{\bar{p}_d}{p_0} \right) \left(\frac{p_0}{\bar{p}_d} \right)^{\frac{R_d}{C_p}} \quad (2.87)$$

la densità:

$$\bar{\rho}_d = \frac{1}{\bar{\alpha}_d} = \frac{p_0}{R_d \bar{\theta}_d} \left(\frac{\bar{p}_d}{p_0} \right)^\gamma \quad (2.88)$$

il peso della colonna d’aria:

$$\bar{\mu}_d = p_{dhs} - p_{dht} \quad (2.89)$$

2.9. Condizioni iniziali e al contorno nel modello ARW

e la relazione del geopotenziale:

$$\delta_\eta \bar{\phi} = -\bar{\alpha}_d \bar{\mu}_d \quad (2.90)$$

Il preprocessamento di **ARW** (modulo Real nella Fig. 2.19) effettua una interpolazione verticale delle grandezze in input da **WPS**. Queste comprendono sia i campi di pressione totale che di umidità relativa. Partendo dal top, “*real*” procede verso il basso rimuovendo il contributo di pressione parziale dovuto all’umidità presente in atmosfera fino al suolo. A questo punto, rimuovendo il valore di pressione del top, si trova la pressione al suolo esercitata dalla colonna di atmosfera secca:

$$\mu_d = \bar{\mu}_d + \mu'_d = p_{sd} - p_{dht} \quad (2.91)$$

Noti quindi p_{dht} e μ_d in ciascun punto della griglia di calcolo, si procede all’interpolazione verticale delle grandezze alle quote individuate dalla sequenza di η scelte e definite nel modulo *Edomains* dal parametro *eta_levels* nel file *namelist.input*. Il disturbo della pressione della colonna d’aria secca risulta quindi essere, nota la (2.91):

$$\mu'_d = \mu_d - \bar{\mu}_d$$

mentre il disturbo di pressione dell’aria umida:

$$\delta_\eta p' = \mu'_d + \bar{q}_v^\eta \bar{\mu}'_d$$

integrata dal top, dove $p' = 0$, fino al suolo e il volume specifico dell’aria secca:

$$\alpha_d = \frac{R_d}{p_0} \theta \left(1 + \frac{R_v}{R_d} q_v \right) \left(\frac{p'_d + \bar{p}_d}{p_0} \right)^{-\frac{C_v}{C_p}}$$

che permette di ottenere il disturbo:

$$\alpha'_d = \alpha_d - \bar{\alpha}_d$$

e infine il disturbo del geopotenziale:

$$\delta_\eta \phi' = -(\mu_d \alpha'_d + \mu'_d \bar{\alpha}_d)$$

È da osservare, tuttavia, che a causa della risoluzione della griglia definita in **ARW**, spesso molto più fitta di quella dei dati di input, può capitare di dover procedere alla estrapolazione dei valori piuttosto che alla classica interpolazione. In tal caso, le componenti orizzontali del vento e l’umidità relativa vengono mantenute costanti, mentre la temperatura potenziale viene fatta variare in accordo al valore standard del

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

lapse rate di -6.5 K/km. Le variabili utilizzate da **ARW** come condizioni al contorno laterali sono $u, v, \theta, q_v, \phi', \mu'$ e sono contenute nei file di dati di preprocessamento prodotti dal modulo *real*.

Al confine della griglia di calcolo, ovvero nella zona in cui sono applicate le condizioni laterali al contorno, viene individuata una zona detta di *rilassamento* nella quale il modello viene “*raccordato*” verso le condizioni al contorno, ricorrendo a delle opportune funzioni peso [Skam 08a]. L’ampiezza della zona di rilassamento viene definita nel

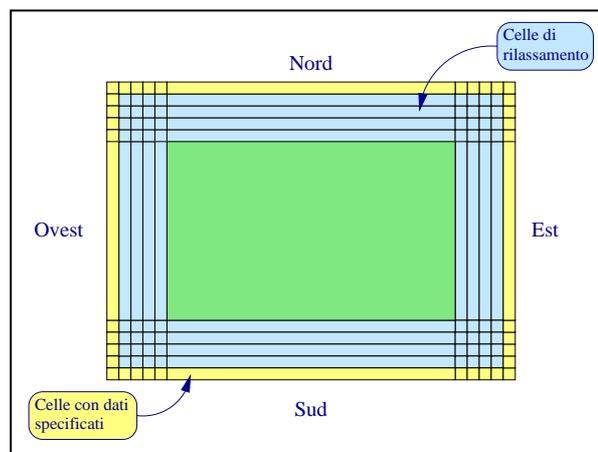


Figura 2.21: Ampiezza tipica della zona di rilassamento e di definizione delle condizioni al contorno laterali.

modulo *Ebdy_control* dal parametro *relax_zone* nel file *namelist.input*.

2.10 Il passaggio da MM5 a WRF

Il modello **MM5** è da anni utilizzato con successo presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (**DIISM**) dell’Università Politecnica delle Marche (**UNIVPM**) (v. [Arti 08] e [Ster 11]). Tutti i tool software di pre e post processamento sono stati sviluppati e testati e continuamente ottimizzati in base alle esperienze maturate dal continuo confronto tra i dati numerici prodotti e quelli sperimentali disponibili.

Il modello di mesoscala **MM5** fu originariamente sviluppato dal **NCAR**. Agli inizi del suo sviluppo già dimostrava buone doti previsionali, soprattutto in quelle zone in cui la topografia giocava un ruolo critico. Negli ultimi anni, tuttavia, nella comunità scientifica è stato sviluppato quello che è noto come il successore di **MM5**, ovvero il modello

2.10. Il passaggio da MM5 a WRF

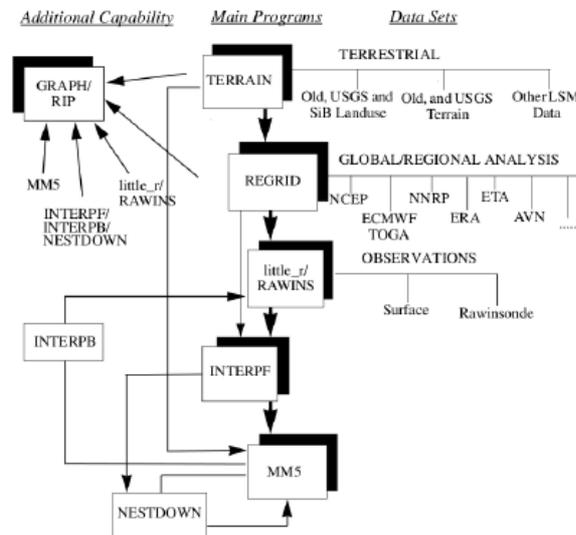


Figura 2.22: Framework di MM5

WRF. Il presente lavoro di ricerca si presenta quindi, anche come progetto pilota che inserisce **WRF** tra gli strumenti di lavoro meteorologici del Dipartimento, affiancandolo a **MM5** con la speranza, dopo un periodo di affiancamento e di confronto, di sostituirlo come già sta avvenendo presso la quasi totalità dei centri di ricerca mondiali.

2.10.1 Panoramica sulla struttura di MM5

MM5 (v. [Dudh 05]) è un modello **LAM** di mesoscala di griglia per cui, come tutti i modelli di griglia, ha bisogno di almeno cinque punti per poter cogliere numericamente una data caratteristica. In effetti tale limite sarebbe di due punti secondo quanto afferma il teorema di Shannon-Nyquist, però, visto l’uso di smoothing e di filtraggio numerico del rumore che si accumula durante la soluzione delle equazioni, è universalmente assodato considerare pari a cinque il numero minimo di punti.

MM5, come **WRF** si basa su un sistema di coordinate verticali di tipo terrain following e come tutti i modelli **LAM** necessita di opportune condizioni al contorno. Il “framework” di **MM5** sebbene a prima vista più complesso di quello di **WRF**, essenzialmente è basato sulla stessa logica (cfr. Figg. 2.22 e 2.10). Si parte dai dati di orografia che devono essere interpolati sulla griglia di calcolo dal modulo “TERRAIN” (geogrid in **WRF**) e successivamente si passa al modulo “REGRID”. Questo ha il compito di interpolare i dati meteorologici sulla griglia orizzontale

Capitolo 2. La Numerical Weather Prediction

con le correzioni di mappa precedentemente eseguite dal modulo TERRAIN. Dopo aver eseguito le interpolazioni orizzontali dell’orografia e dei dati meteo si passa al modulo “INTERPF” il quale esegue l’interpolazione verticale dei dati meteorologici sui livelli verticali richiesti in fase di discretizzazione del dominio. Inoltre, INTERPF sfrutta i dati messi a disposizione dai moduli eseguiti in precedenza per la definizione delle condizioni iniziali e al contorno necessarie per la simulazione. Eseguita la fase di pre processamento, si può passare all’esecuzione vera e propria della simulazione, ossia al lancio del modulo MM5 . Di mano in mano che la simulazione procede verranno creati tante serie di file di output quanti i domini di nesting.

2.10.2 Confronto tra i modelli

Il codice di **WRF** è stato praticamente tutto riscritto rispetto a quello di **MM5** e incorpora numerose migliorie che si traducono in:

- un minor rumore numerico, che quindi necessita di un minor smoothing sull’output;
- una formulazione delle equazioni del modello più accurata;
- un approccio più modulare che ne favorisce l’evoluzione futura e l’aggiunta, tra gli altri, più diretta e semplice di ulteriori modelli di parametrizzazione rispetto a **MM5**;
- minor rischio di adottare combinazioni di schemi e modelli di parametrizzazione incompatibili;
- lo staggering del modello **WRF** è di tipo Arakawa C (v. Fig. 2.18) mentre il modello **MM5** prevede il modello di staggering Arakawa B (v. Fig 2.17). La griglia sfalsata di **MM5** produce soluzioni stabili ma, quando accoppiata con schemi numerici del secondo ordine, produce un rumore numerico nelle simulazioni di lungo periodo che deve essere eliminato mediante opportune tecniche di smoothing numerico. La griglia sfalsata usata da **WRF** è utilizzabile con schemi numerici di ordine più elevato a parità di dimensioni rispetto ad **MM5**;
- il codice di **WRF** è stato scritto tenendo in considerazione maggiormente i problemi di parallelizzazione. La scalabilità di **WRF** con l’aumento delle CPU è infatti maggiore di quella di **MM5**;
- opportunamente compilato con il supporto Network Common Data Form (**NetCDF**), **WRF** produce file di output direttamente

2.10. Il passaggio da MM5 a WRF

accessibili in linguaggio “ncl”. I file di output di **MM5** devono invece essere opportunamente convertiti dal formato binario nativo, al formato **NetCDF** prima di poter usufruire delle routine di interrogazione ncl;

- **WRF** ha il modulo che permette di trattare dei casi idealizzati che non hanno la necessità di condizioni al contorno esterne. Si possono in questo modo eseguire dei test su schemi e modelli di parametrizzazione rispetto a casi notevoli presi come riferimento.

Purtroppo, però:

- il modello **WRF** è relativamente giovane per cui contiene ancora dei bachi che pian piano vengono eliminati nelle successive versioni che vengono rilasciate;
- in **WRF** persiste il problema di **MM5** di una modellizzazione qualitativamente scarsa degli strati bassi dell’atmosfera. Entrambe, a prescindere dal modello di parametrizzazione utilizzato, tendono ad “ingrossare” il mixing layer;
- è esperienza di chi scrive e di parecchi utenti (v. per esempio <http://forum.wrfforum.com/viewtopic.php?f=6&t=3045>) che a parità di caratteristiche del dominio di simulazione e parametri di calcolo, compilatori e CPU usate, il modello **WRF** sia notevolmente più lento, in termini computazionali, del suo predecessore **MM5**. Tuttavia per poter trovare le ragioni e/o l’eventuale conferma a tale affermazione, sarebbe necessario effettuare uno studio mirato alla valutazione delle performance computazionali, approfondito e comparato.

Capitolo 3

I dati sperimentali

Nella prima parte di questo capitolo viene riportata una descrizione delle caratteristiche degli strumenti più comunemente usati per l’acquisizione dei dati sperimentali di componenti medie e fluttuanti della velocità del vento e temperatura. Successivamente viene descritto l’apparato di misura della stazione meteorologica gestita dal **DIISM** dell’**UNIVPM**, ed evidenziata la sua individuazione geografica. Nell’ultima parte del capitolo sono riportati ed analizzati in dettaglio i dati misurati dalla stazione.

3.1. Osservazione del PBL: strumenti di misura

3.1 Osservazione del PBL: strumenti di misura

I sensori comunemente usati per le misure delle grandezze caratteristiche del PBL possono essere raggruppati in due grosse categorie:

sensori in situ (*in situ sensors*) : in questa categoria cadono quei sensori montati direttamente sul terreno, su pali o torri, palloni vincolati o palloni liberi e aeroplani. Sono la scelta fatta comunemente per gli studi del Surface Layer (SL) o comunque della parte bassa dello strato limite, vista la loro capacità in termini di precisione e risoluzione richiesti per acquisizioni massicce di dati;

sensori a distanza (*remote sensors*) : in questa categoria cadono quei sensori montati a terra o su aeromobili che effettuano le misure della grandezza osservata attraverso le variazioni che questa induce sul tipo di onda emessa (acustica, infrarossa, ottica o microonda) dall'apparecchiatura stessa. Il principale vantaggio di questi strumenti risiede nella maggiore distanza alla quale riescono a rilevare la grandezza da misurare e la versatilità in termini di posizionamento. Per contro il loro limite risiede nel range minimo all'interno del quale riescono ad effettuare la misurazione.

In generale, l'uso combinato di sensori appartenenti alle due categorie fornisce una descrizione sicuramente più completa fornita da ciascuno utilizzato singolarmente [Kaim 94].

Le variabili che maggiormente interessano nella caratterizzazione dello strato limite sono:

- la velocità del vento misurata dall'anemometro;
- la temperatura dell'aria misurata dal termometro;
- la pressione dell'aria misurata dal barometro;
- l'umidità dell'aria misurata dall'igrometro;
- i flussi di:
 - quantità di moto;
 - massa;
 - calore;
 - energia radiante misurata col radiometro;
- la precipitazione atmosferica misurata col pluviometro

Capitolo 3. I dati sperimentali

Avendo a disposizione un sistema di acquisizione dotato di una opportuna velocità, è possibile effettuare le misure delle fluttuazioni delle componenti della velocità e degli scalari, e di conseguenza il calcolo dei flussi turbolenti associati ($\overline{u'w'}$, $\overline{w'\theta'}$). Nel caso in cui siano disponibili i gradienti delle medie delle grandezze allora i flussi possono essere calcolati ricorrendo alle relazioni di similarità di Monin-Obukhov [Sozz 02], ricordando comunque che tali relazioni sono applicabili solamente nel caso di terreno piano e strato limite stabile ovvero privo di fenomeni convettivi importanti.

Come si può facilmente intuire, le caratteristiche richieste ai sensori di misura dei valori medi delle grandezze differiscono da quelle richieste ai sensori per la misurazione delle fluttuazioni. I primi devono essere dotati di una elevata precisione e di stabilità sul lungo periodo, in grado di fornire valori accurati della media su periodi di dieci minuti e oltre. I secondi devono avere una risposta in frequenza ampia abbastanza da coprire tutte le scale di vortici coinvolte e precisione commisurata al valore medio della grandezza da misurare. In base alle conoscenze attuali della fisica dell'ABL, soprattutto su terreni piani, agli strumenti vengono richieste alcune caratteristiche tecniche che possono così essere riassunte:

- la precisione richiesta agli strumenti di misura dei valori medi e delle fluttuazioni risulta essere la stessa e pari a $\pm 0.05\text{m/s}$ per le velocità, $\pm 0.05\text{ }^\circ\text{C}$ per la temperatura, $\pm 0.05\text{mb}$ per la pressione;
- il tempo di risposta dei sensori di grandezze medie può anche arrivare al minuto mentre per i sensori di fluttuazioni non deve superare 0.1sec.

Parlando di caratteristiche prestazionali degli strumenti di misura, conviene soffermarsi sulla terminologia utilizzata per descriverne le caratteristiche:

rapporto di smorzamento: la risposta di una banderuola ad un cambio di direzione del vento rappresenta in generale una risposta oscillante smorzata. Il rapporto di smorzamento rappresenta il rapporto tra il valore dello smorzamento vero della banderuola e quello critico al quale la risposta non è oscillante, ossia priva di *overshoot*;

distanza di ritardo: rappresenta la distanza percorsa da una colonna d'aria che attraversa la banderuola al 50% della sua risposta ad un cambiamento repentino della direzione del vento;

3.1. Osservazione del PBL: strumenti di misura

costante di distanza: è la distanza percorsa dal fluido che attraversa l’anemometro a coppette o a elica nel momento in cui questo si trova al 63.2% della risposta ad un cambiamento repentino dell’intensità del vento;

range: rappresenta l’intervallo di valori all’interno del quale la misura viene fornita dal sensore con la precisione specificata;

soglia: la velocità minima oltre la quale anemometro e banderuola iniziano a funzionare;

costante di tempo: è il tempo necessario ad un sensore di temperatura per raggiungere il 63.2% della risposta ad un cambiamento repentino di temperatura. Questo parametro è proprio dei sensori del “primo ordine” ossia quelli che hanno una risposta asintotica al gradino (sensori di pressione, temperatura ecc.).

3.1.1 Sensori in situ

La stazione meteorologica a terra è il sistema utilizzato per l’acquisizione dei dati utilizzati nello studio oggetto del presente lavoro. La configurazione tipica di una stazione di rilevamento dati su traliccio è quella riportata in Fig. 3.1 in cui possono essere individuati i principali componenti:

- i sensori meteo opportunamente posizionati sul traliccio, realizzano la misura delle grandezze che si vogliono misurare;
- un armadio all’interno del quale sono posizionati:
 - il convertitore A/D;
 - il sistema di acquisizione che trasforma gli ingressi digitali in valori numerici;
 - il sistema di elaborazione dei dati che, operando sui valori numerici in ingresso calcola i parametri statistici di interesse;
 - un sistema di archiviazione dei dati acquisiti ed un sistema di trasmissione degli stessi in remoto;
- il sistema di alimentazione della stazione, composto da pannelli fotovoltaici, aerogeneratore e batterie di accumulo.

¹Immagine da <http://www.climantartide.it/>

Capitolo 3. I dati sperimentali

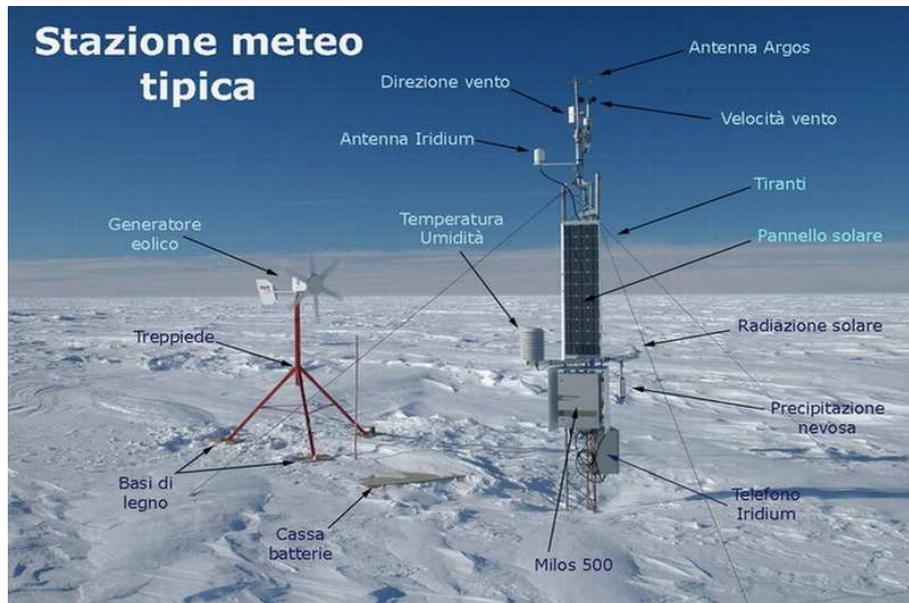


Figura 3.1: Stazione meteo dell'ENEA in Antartide ¹.

Gli strumenti della stazione costituiscono una *catena di misura* che può essere schematizzata come in Fig. 3.2 e che rappresenta ([Sozz 02]) l'insieme dei dispositivi che traducono le misure di una variabile meteorologica in una serie storica di numeri.

Sensori del vento medio

Gli anemometri a coppette e ad elica uniti ad una banderuola sono i dispositivi più comunemente usati per la loro economicità, robustezza e affidabilità. Avendo masse in rotazione la cui velocità deve adattarsi a quella del flusso che lo investe, questo dispositivo non è adatto, a causa dei tempi di risposta, alla misura di grandezze fluttuanti, ma si addice alla misura delle grandezze medie di velocità del vento. Per quanto riguarda gli anemometri a coppette, la velocità tipica di avvio di questi anemometri è di circa 0.5m/s e la precisione, se accuratamente calibrati in galleria del vento, si aggira intorno al $\pm 1\%$. La tendenza di questi anemometri è quella di fornire dei valori in eccesso della velocità (*overspeed*) [Kaim 94] del $5\% \div 10\%$, come si può vedere dalla Fig. 3.4, dovuta in parte alla risposta non lineare del sistema, e in parte alla sensibilità alla componente verticale della velocità. Gli anemometri ad elica non vanno in *overspeed* ma forniscono valori affidabili della misura solo

3.1. Osservazione del PBL: strumenti di misura

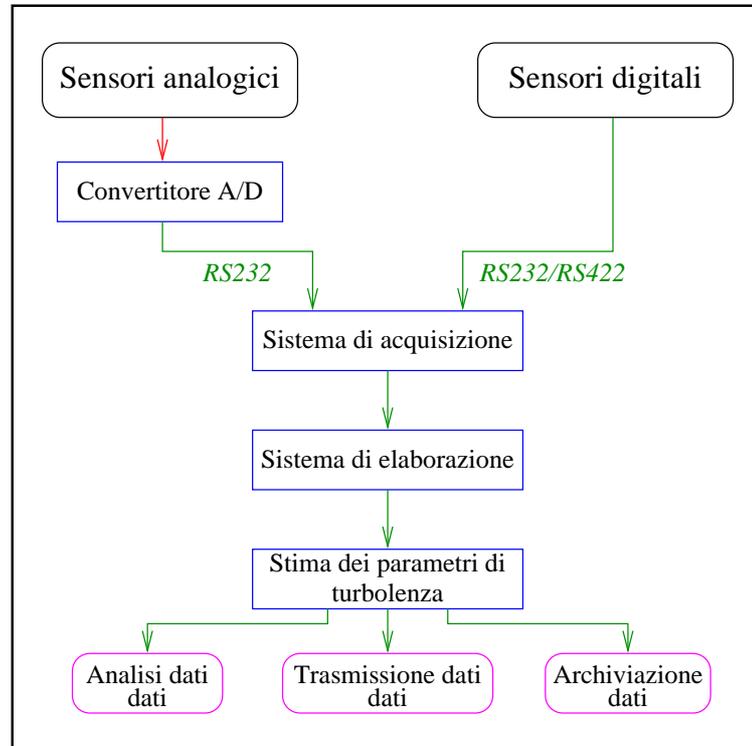


Figura 3.2: Catena logica di misura.

quando puntano nella direzione del vento. A tale proposito la banderuola assicura il corretto puntamento dell’anemometro. Sia l’anemometro a coppe che ad elica forniscono valori della velocità che sono affetti da errore nel caso di vento avente una componente verticale e purtroppo entrambi non hanno un valore perfettamente cosinusoidale della risposta. I principali pregi degli anemometri ad elica rispetto a quelli a coppette risiedono nella maggior velocità della risposta, nella soglia di attivazione più bassa, nell’effetto stabilizzante indotto per effetto giroscopico dalla rotazione dell’elica rispetto alle oscillazioni.

Sensori di temperatura media

I sensori di temperatura più usati comunemente sono termometri a resistenza di platino, termocoppie, termistori e termometri al quarzo. L’elemento sensibile è di solito all’interno di un involucro che lo protegge dall’aggressione degli agenti esterni aumentandone però il tempo di risposta che, per misurazioni di grandezze medie, non costituisce un pro-

Capitolo 3. I dati sperimentali



Figura 3.3: Anemometro a coppette e banderuola

blema. Precisioni dell'ordine di $0.05^{\circ}C$ e risoluzioni di $0.01^{\circ}C$ possono essere ottenute previa accurata calibrazione, realizzazione di giunzioni, messa a terra e schermatura.

Termocoppie Sono economiche, hanno connettori standard e possono essere usate per misurare ampi range di temperatura. Il più grande limite è la precisione: è difficile avere errori di lettura inferiori ad $1^{\circ}C$. L'uscita di una termocoppia è piccola, dell'ordine di $40\mu V/^{\circ}C$ per il tipo rame-costantana, ma ciò viene superato adottando opportuni amplificatori di segnale DC.

Nel 1822, un fisico estone di nome Thomas Seebeck casualmente scoprì che la giunzione tra due metalli diversi genera una tensione che è funzione della temperatura. Le termocoppie si basano su questo effetto detto Seebeck. Per realizzare una termocoppia è possibile utilizzare qualsiasi coppia di metalli diversi tra loro, ma vengono utilizzati dei tipi standard in quanto è possibile sia prevedere le tensioni ottenute che coprire larghi range di temperatura. La termocoppia di tipo K è quella più diffusa. A causa dell'effetto Seebeck, mettendo a contatto due metalli differenti in due punti di giunzione, si osserva che se i punti di giunzione:

3.1. Osservazione del PBL: strumenti di misura

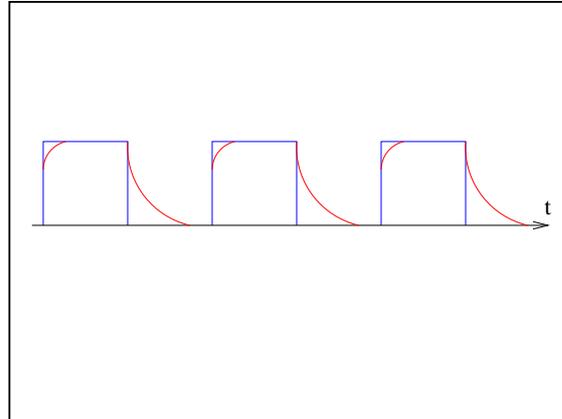


Figura 3.4: Risposta dell’anemometro a coppette all’onda quadra

Tipo	Metallo 1	Metallo 2
<i>tipo T</i>	rame	costantana
<i>tipo E</i>	chromel	costantana
<i>tipo K</i>	chromel	alumel
<i>tipo J</i>	ferro	costantana

Tabella 3.1: Principali tipi di termocoppie

- sono mantenuti a temperatura diversa, nei metalli si genera una forza elettromotrice netta;
- sono alla stessa temperatura, le forze elettromotrici che si generano nei punti sono uguali ed opposte in modo che la risultante netta risulti nulla. Secondo il tipo di coppia di metalli utilizzati si hanno differenti tipi di termocoppie:

La caratteristica ($\mu V - \Delta^\circ C$) delle termocoppie non ha un andamento rettilineo e può essere rappresentata da un andamento polinomiale [Sozz 02]:

$$T = a_1 V + a_2 V^2 + a_3 V^3 + a_4 V^4$$

Capitolo 3. I dati sperimentali



Figura 3.5: Anemometro ad elica

$[\text{°C}/\mu\text{V}]$	T	K	J	E
a_1	2.566129710^{-2}	2.436385110^{-2}	1.974505610^{-2}	1.697028710^{-2}
a_2	-6.195486910^{-7}	5.620693110^{-8}	-1.809425610^{-7}	-2.083060310^{-7}
a_3	2.218164410^{-11}	-3.882562010^{-12}	7.877791910^{-12}	4.651271710^{-12}
a_4	-3.550090010^{-16}	3.912020810^{-17}	-1.189722210^{-16}	-4.180578510^{-17}

Tabella 3.2: Coefficienti polinomiali delle caratteristiche tensione - temperatura

La costante di tempo di una termocoppia risulta [Lars 82]:

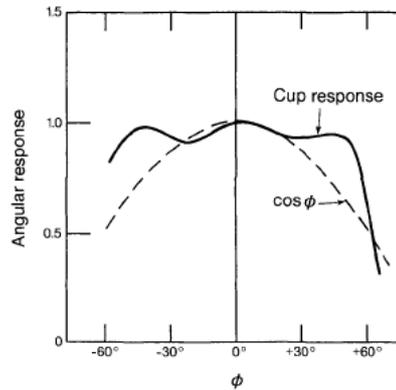
$$\tau = \frac{\rho_w C_w D^2}{4Nu k_a}$$

in cui ρ_w e C_w sono la densità del materiale costituente la termocoppia e il calore specifico, D è il diametro dei fili e Nu è il numero di Nusselt a tal proposito dato dalla relazione:

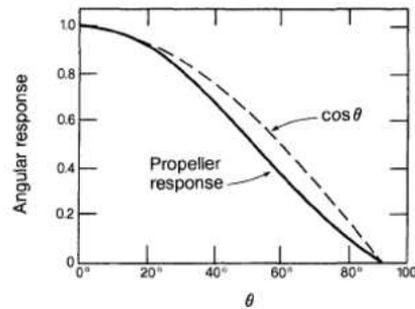
$$Nu = \frac{1}{\frac{1}{(0.24 + 0.56Re^{0.45})} + 2\frac{\lambda}{D}}$$

Si può vedere, diagrammando l'andamento di τ in funzione del diametro D dei fili e della velocità ([Sozz 02] pag.362), come la termocoppia sia adatta a misure di grandezze fluttuanti a patto che il diametro dei fili sia dell'ordine della decina di μm .

3.1. Osservazione del PBL: strumenti di misura



(a) Sensibilità alla velocità verticale di un anemometro a coppette



(b) Sensibilità alla velocità verticale di un anemometro a elica

Figura 3.6: Errori sulla risposta cosinusoidale di anemometri a coppa e ad elica. Da [Kaim 94]

Volendo leggere il valore di tensione prodotto non è possibile collegare un voltmetro alla termocoppia perchè i contatti genererebbero inevitabilmente altre due giunzioni. Per poter eseguire misure di una certa precisione questo effetto va compensato usando una tecnica specifica denominata CJC (Cold Junction Compensation). Questa tecnica si basa sul principio in base al quale un terzo metallo inserito tra i due metalli diversi della giunzione di una termocoppia non causerà alcun effetto ammesso che le due giunzioni siano alla stessa temperatura (legge dei metalli intermedi). Questa legge è importante per la costruzione delle giunzioni di termocoppie in quanto rende possibile saldare due metalli poiché il materiale di apporto della saldatura non influenzerà il valore di tensione.

Capitolo 3. I dati sperimentali

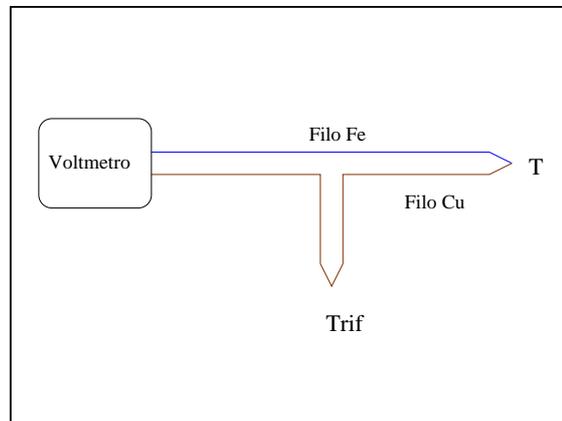


Figura 3.7: Sistema di misura della temperatura mediante termocoppia.

Bisogna inoltre ricordare che, con l'utilizzo di una termocoppia, si possono effettuare misurazioni della differenza di temperatura esistente tra i due punti di giunzione ma che, nel caso si voglia ottenere il valore assoluto della temperatura di uno dei due, allora la temperatura dell'altro deve essere necessariamente nota. Ciò implica la necessità di avere un termometro aggiuntivo che misuri la temperatura del giunto di riferimento, possibilmente inserito in un blocco di materiale ad alta capacità termica o comunque tale da renderne lentissimi i cambiamenti di temperatura. Quest'ultimo termometro, che può essere di tipo economico come ad esempio un termistore, è delegato al solo rilevamento della temperatura di riferimento.

Un aspetto importante da considerare relativamente all'installazione della termocoppia è quello della sua protezione dai raggi solari e dalla radiazione terrestre che altererebbero i valori misurati. La termocoppia deve essere opportunamente schermata ed installata in un opportuno *shield*. Lo schermo all'interno del quale viene collocata è in genere di colore bianco per riflettere il più possibile la radiazione incidente, provvisto di fessure di aerazione che favoriscono la ventilazione interna con una velocità dell'ordine dei m/s [Lars 82].

Termoresistenze Resistance Temperature Detector (**RTD**), offrono eccellente precisione su un largo range di temperatura (da $-200 \div +850^{\circ}\text{C}$). Il funzionamento delle termoresistenze si basa sul principio fisico in base al quale la resistenza elettrica dei metalli è

3.1. Osservazione del PBL: strumenti di misura



Figura 3.8: Alloggiamento schermato per termocoppia

influenzata dalla temperatura. In particolare, per i metalli più comunemente impiegati a tale proposito quali il platino, il rame, il tungsteno e il nichel, la resistenza elettrica aumenta all’aumentare della temperatura. Dei materiali citati sopra, il platino, in virtù della sua stabilità chimica Platinum Resistance Thermometer (**PTR**), è quello maggiormente usato. La caratteristica di una termoresistenza risulta ben approssimata dalla ([Sozz 02]):

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2]$$

in cui R_0 rappresenta la resistenza del materiale nota ad una temperatura di riferimento T_0 e i coefficienti α e β sono ([Sozz 02]):

Conduttore	α	β
<i>Tungsteno</i>	4.5010^{-3}	0.510^{-6}
<i>Rame</i>	4.3010^{-3}	-
<i>Platino</i>	3.9210^{-3}	-0.5510^{-6}
<i>Nichel</i>	6.7010^{-3}	-

Tabella 3.3: Coefficienti polinomiali delle caratteristiche della resistenza ohmica di diversi metalli.

Una termoresistenza di impiego molto comune è la PT100. Questa è una termoresistenza al platino che ha una resistenza elettrica di

Capitolo 3. I dati sperimentali

100Ω a 0°C e 138.4Ω a 100°C. Esistono comunque anche sensori PT1000 che hanno una resistenza di 1000Ω a 0°C.

Per un sensore PT100 la variazione di temperatura di 1°C provoca la variazione della resistenza di 0.384Ω, per cui anche un minimo errore nella misura della resistenza, come ad esempio la resistenza di contatto del connettore del sensore, può provocare un rilevante errore nella misura della temperatura. Per poter effettuare misure di precisione, i sensori hanno quattro fili, due per la corrente e due per misurare tensione sulla resistenza.

Un fenomeno importante da considerare è quello prodotto dal calore dovuto al passaggio di corrente per effetto Joule: una corrente di 1mA in una resistenza da 100Ω genera 100μW termici. Se l'elemento sensore non è in grado di dissipare questo calore sarà registrata una temperatura artificialmente più alta. Questo effetto può essere contenuto sia utilizzando sensori di grandi dimensioni sia assicurandosi che il contatto con il suo ambiente sia buono. Deve quindi, come nel caso della termocoppia, essere protetta da fonti di calore ed irraggiamento ed installata in appositi involucri schermati e ventilati.

Visti i bassi livelli dei segnali in gioco sarà opportuno tenere i cavi lontano da cavi elettrici, motori, commutatori e qualsiasi dispositivo che possa causare l'emissione di rumori elettrici. Può essere utile in tal caso utilizzare cavi schermati con lo schermo a massa per ridurre eventuali interferenze. Quando si usano cavi lunghi bisogna assicurarsi che lo strumento di misura sia in grado di gestire la resistenza di questi cavi. La maggior parte degli strumenti riesce a compensare fino a 100Ω per elemento.

I produttori offrono un notevole range di sensori conformi con le normative BS1904 classe B (DIN 43760): questi sensori hanno una precisione di ±0.3°C a 0°C. Per migliori precisioni esistono i sensori in classe A (±0.15°C) o 1/10-DIN (precisione ±0.03°C). Bisogna notare che questi valori di precisione si riferiscono esclusivamente ai sensori. E' necessario quindi aggiungere l'errore introdotto dallo strumento di misura. Le normative interessate sono le IEC751 e JISC1604-1989.

La termoresistenza non fornisce in uscita un segnale di tensione come la termocoppia. Essa deve essere alimentata in configurazione di partitore resistivo:

$$R(T) = \frac{V_u R}{V_0 - V_u} \quad (3.1)$$

3.1. Osservazione del PBL: strumenti di misura

o ponte di Wheatstone:

$$R(T) = \frac{R_1 \left[R_2 + \frac{V_u}{V_i} (R_1 + R_2) \right]}{R_1 - \frac{V_u}{V_i} (R_1 + R_2)} \quad (3.2)$$

al fine di ottenere un segnale di tensione in uscita.

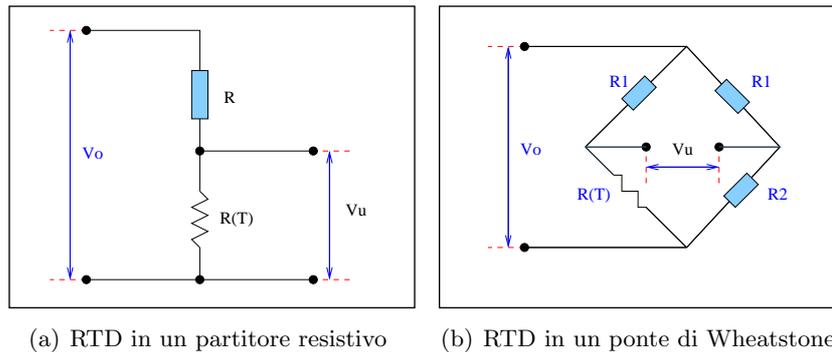


Figura 3.9: Uso di RTD in circuiti partitivi. Da [Sozz 02].

Per concludere, la termoresistenza, essendo un sensore del primo ordine, non è adatto alla misurazione di valori medi della temperatura.

Termistori I termistori, a differenza delle **RTD**, non usano metalli bensì materiali ceramici, polimerici o semiconduttori (silistori). I termistori hanno un elevato coefficiente di resistenza che può essere negativo Negative Temperature Coefficient (**NTC**) o positivo Positive Temperature Coefficient (**PTC**) e che vale circa dieci volte quello di una **PTC**. Hanno una forte tendenza al riscaldamento a causa del funzionamento ed una uscita fortemente non lineare:

$$R(T) = a e^{\frac{b}{T}}$$

in cui il coefficiente a tiene conto della forma del termistore e b del materiale adoperato per la sua costruzione ([Sozz 02]). La possibilità di usare materiale sinterizzato per la costruzione, permette di realizzare forme diverse e dimensioni talmente piccole che la costante di tempo può raggiungere valori di qualche millisecondo permettendo l'utilizzo anche come sensore per le componenti fluttuanti della velocità. Il termistore, in quanto elemento resi-

Capitolo 3. I dati sperimentali

stivo, viene inserito nei circuiti di misura come le termoresistenze (Fig. 3.9). Per evitare infine il problema dell’autoriscaldamento, si deve fare in modo che la corrente che lo attraversa sia la minima possibile.

Termometri al quarzo I termometri a circuito integrato forniscono in uscita un segnale a gradino la cui frequenza varia linearmente con la temperatura. Hanno una precisione dell’ordine di $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ e l’errore introdotto per effetto della schermatura e della ventilazione sono dell’ordine $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il principale difetto di questi termometri è il costo elevato, ripagato però dai benefici dovuti alla mancanza dei difetti intrinseci negli altri tipi di termometro visti.

Sensori per componenti le fluttuanti della velocità

Anemometro a filo caldo È l’anemometro comunemente usato nelle misure di turbolenza, soprattutto in laboratorio e in galleria del vento, dove le dimensioni devono essere ridotte e i campionamenti effettuati nell’ordine dei 10kHz . Purtroppo, alle ottime caratteristiche di rapidità di acquisizione, si contrappongono tre grossi inconvenienti:

- l’estrema sensibilità agli agenti atmosferici che ne rendono continuamente necessaria la calibrazione;
- la fragilità;
- il ristretto angolo tollerato per la direzione del vento incidente.

che non lo rendono adatto alla misura della turbolenza nel **PBL**.

Anemometro sonico L’anemometro sonico non ha nessuno dei problemi associati agli anemometri di tipo rotante. La misura della



Figura 3.10: Termistori NTC

3.1. Osservazione del PBL: strumenti di misura

velocità del vento avviene misurando l'effetto dell'aria in movimento sul tempo di transito di onde acustiche emesse e ricevute, attraverso una distanza nota, dallo strumento (Fig. 3.11).

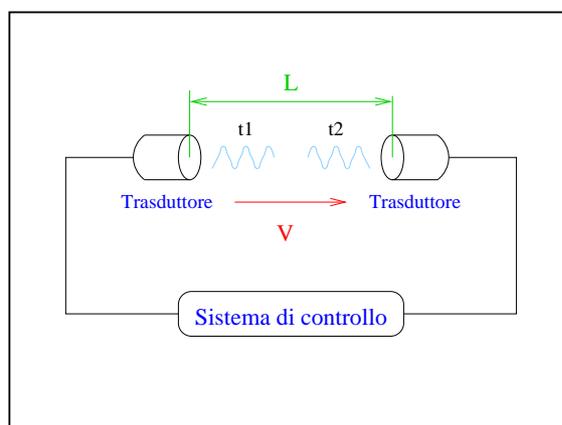


Figura 3.11: Asse di un anemometro sonico

I tempi di percorrenza tra i due trasduttori possono essere espressi come:

$$t_1 = \frac{L}{c \cos \gamma + V_d} \quad t_2 = \frac{L}{c \cos \gamma - V_d} \quad \gamma = \arcsin \left(\frac{V_n}{c} \right)$$

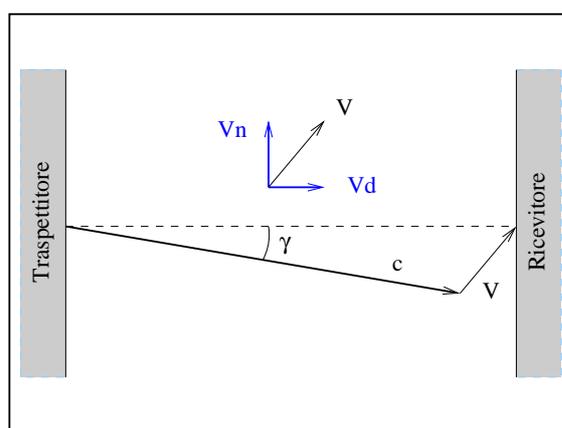


Figura 3.12: Trasmettitore e ricevitore

Capitolo 3. I dati sperimentali

in cui c è la velocità del suono e V_d è la componente del vento nella direzione dell'asse dello strumento.

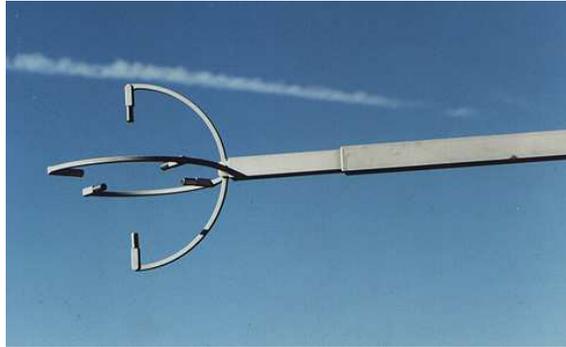


Figura 3.13: Anemometro sonico a tre assi ortogonali

La differenza dei reciproci dei tempi di percorrenza, misurata dallo strumento, è proporzionale alla componente del vento che si vuole misurare:

$$\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2}{L} V_d$$

per cui:

$$V_d = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$$

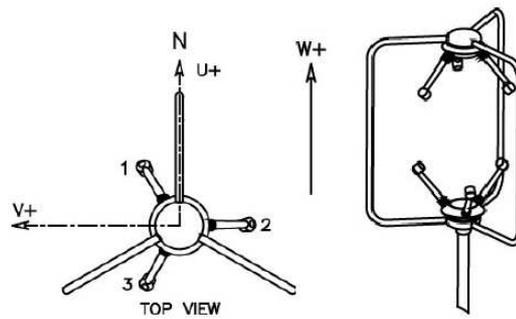


Figura 3.14: Anemometro sonico a tre assi non ortogonali (Gill Instruments Ltd.)

Se l'anemometro sonico ha tre assi, allora si potranno calcolare anche le componenti normali del vento agli assi stessi V_n . Questo

3.1. Osservazione del PBL: strumenti di misura

permette di misurare, con l’anemometro stesso, la temperatura dell’aria. Infatti dalla:

$$\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} = \frac{2}{L}(c^2 - V_n^2)$$

è possibile ricavare la velocità del suono:

$$c^2 = \frac{L}{4} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right)^2 + V_n^2$$

che è legata alla temperatura dell’aria umida dalla:

$$c^2 \simeq 402.7T(1 + 0.32e/P) \simeq 402.7T(1 + 0.38e/P) \approx 403T_v \quad (3.3)$$

in cui e è la tensione dell’acqua presente nell’aria:

$$T_v = \frac{L^2}{1612} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right)^2 + \frac{V_n^2}{403}$$

L’approssimazione consiste ([Kaim 94]) nell’aver uguagliato il coefficiente di e/P , che per T_v vale $[1 - M_w/M_a]$ e per la temperatura sonica invece $[C_w/C_a - M_w/M_a]$ in cui M_w è la massa molecolare dell’acqua, M_a è la massa molecolare dell’aria, C_w e C_a sono i calori specifici dell’acqua e dell’aria.

3.1.2 Sensori a distanza

I *remote sensors* sono sempre più utilizzati per lo studio del PBL poiché sono in grado di studiare aree di interesse ben al di sopra delle altezze delle comuni torri meteorologiche. Purtroppo la loro precisione e risoluzione spaziale non è ancora sufficiente per condurre studi dettagliati sulla turbolenza. Questi sensori possono essere raggruppati nelle seguenti categorie principali secondo il tipo di segnale emesso:

SoDAR Segnale acustico

RaDAR Segnale radio

LiDAR Segnale luminoso

RASS Segnale radio acustico

Si darà qui di seguito un cenno di descrizione ai soli sistemi Sound Detection And Ranging (**SoDAR**) e Radio Acoustic Sounding System (**RASS**) appartenenti all’equipaggiamento di misura dell’**UNIVPM**.

Capitolo 3. I dati sperimentali

II SoDAR

Il **SoDAR** ([Kaim 94]) è uno strumento per la misura a distanza delle componenti del vento sfruttando l'effetto Doppler. Funziona emettendo e ricevendo onde sonore generalmente ad una frequenza di circa 2KHz. Misura le componenti del vento lungo tre direzioni delle quali una punta verticalmente e le altre due sono inclinate dallo zenith puntando rispettivamente a est/ovest e nord/sud. Ciascuna antenna emette dapprima un

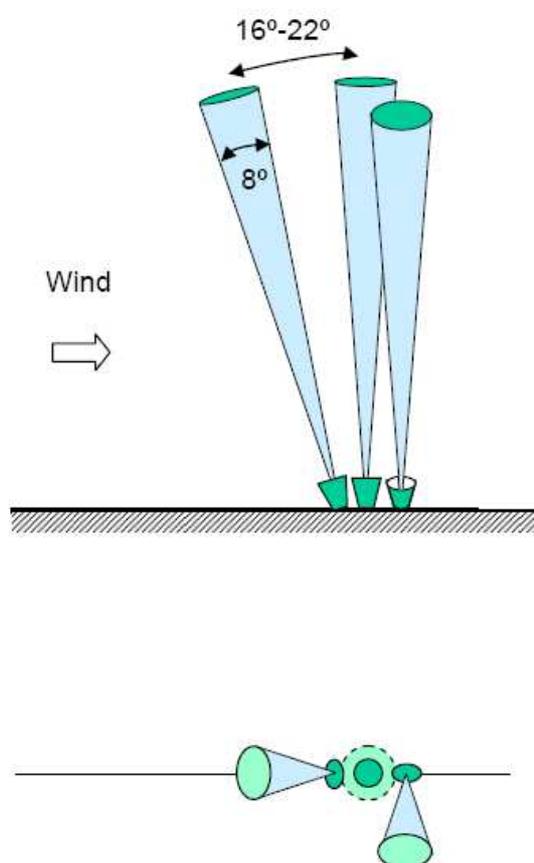


Figura 3.15: Tilting tipico di un sistema sodar

segnale sonoro per poi passare in modalità di ricezione. Le componenti del vento sono ottenute dallo sfasamento misurato nell'onda sonora di ritorno. Le tre onde sonore possono essere emesse sia da tre antenne separate, sia da un unico dispositivo che, munito di opportuna

3.1. Osservazione del PBL: strumenti di misura

elettronica, orienta il fascio sonoro nelle direzioni impostate gestendo automaticamente le funzioni di trasmissione e ricezione.



Figura 3.16: Sistema SoDAR dell’UNIVPM

Indicando con v_r la componente del vento lungo la direzione di trasmissione delle onde sonore, con c la velocità del suono assunta costante e pari a 340m/s, con f_t e f_r la frequenza dei segnali trasmesso e ricevuto, allora la f_r , tenendo conto dell’effetto Doppler sarà ([Sozz 02]):

$$f_r = F_t \frac{1 + v_r/c}{1 - v_r/c} \simeq f_t(1 + 2v_r/c)$$

e lo sfasamento di frequenza:

$$\Delta f = 2f_t(v_r/c) \rightarrow v_r = \frac{c}{2} \frac{\Delta f}{f_t}$$

Il range operativo varia dai 50m ai 500m con una risoluzione di circa 30m (cioè la lunghezza dell’impulso acustico trasmesso).

Il tempo ciclo tipico di una trasmissione è di 6s mentre il tempo per ottenere una stima affidabile della media delle componenti radiali del vento è di 6min con una accuratezza di $\pm 1m/s$.

II RASS

Il **RASS** è un sistema per la misura a distanza del profilo di temperatura nella bassa atmosfera ([Brad 08]) che utilizza, a tale scopo, una combinazione di tecnologie radar e acustica. La caratteristica essenziale del **RASS** è quella di avere un apparato di trasmissione acustico ed un apparato Radio Detection And Ranging (**RADAR**) ricetrasmittente.

Capitolo 3. I dati sperimentali

L'energia elettromagnetica emessa dal sistema **RADAR** viene riflessa dall'aria colpita da un treno di onde acustiche che ne varia, con nota periodicità, l'indice di rifrazione a causa dell'effetto di compressione ed espansione provocato dalle onde sonore stesse. La lunghezza d'onda del segnale **RADAR** è scelta pari alla metà di quella delle onde acustiche così che l'onda viene riflessa e si rinforza in modo costruttivo. Nota la caratteristica del segnale acustico, sarà nota anche la velocità del suono $c_a = f\lambda$ e quindi la temperatura dell'aria dalla Eq. (3.3).

Un tipo di **RASS**, ovvero il Doppler-RASS, traccia un impulso acustico mediante un'onda **RADAR** continua. L'effetto Doppler crea una variazione di fase che permette la valutazione della velocità del suono e quindi della temperatura. Un altro tipo di **RASS** funziona in base ad un principio complementare a quello appena descritto, ovvero con un segnale acustico continuo ed un impulso **RADAR**. Il Bragg-RASS consiste invece di un apparato radio trasmittente e di due unità acustiche, una trasmittente ed una ricevente. In ogni caso, il principio fondamentale



Figura 3.17: Un sistema RASS (Origine: <http://www.esrl.noaa.gov>).

alla base del funzionamento del **RASS** è quello di ottenere un'onda riflessa che si rinforza per interferenza in base alla condizione di Bragg. Per esempio con un **RADAR** a 915MHz occorrerebbe un segnale acustico di circa 2kHz alle temperature comunemente presenti nello strato limite.

La tecnologia **RADAR** è basata sulla forza del segnale riflesso e al suo sfasamento; onde a lunghezza più corta sono adatte alla misura delle principali idrometeorie mentre quelle a lunghezza maggiore sono più adatte a rilevare la variazione dell'indice di rifrazione. L'unità trasmittente **RADAR** è posta nel fuoco di un'antenna parabolica in modo da produrre un segnale direzionale che, riflesso, viene ricevuto da una unità

3.1. Osservazione del PBL: strumenti di misura

ricevente posta nel fuoco della medesima o di una diversa antenna parabolica. A causa della variazione spaziale e temporale della temperatura nello strato limite, risulta estremamente difficoltoso ottenere un accoppiamento esatto affidandosi ad una sorgente acustica con frequenza fissa. Per ovviare a questo inconveniente il segnale acustico trasmesso viene modulato in frequenza in modo da rispettare la condizione di Bragg a tutte le altezze da esplorare. Una volta raccolti i dati, che possono variare da scansione a scansione, e consolidati, i profili di temperatura che si ottengono si sono dimostrati accurati di $\pm 1^\circ C$ quando confrontati con quelli provenienti da radiosondaggi.

In tutti i sistemi **RASS** il range massimo raggiunto risulta limitato sia dai forti venti, sia dalla turbolenza e dai forti gradienti di temperatura: nel primo caso si ha un trasporto avvertivo, negli altri due casi si ha una distorsione delle onde acustiche che ne impedisce l'accoppiamento con le onde radar.

Il range massimo dei sistemi **RASS** è di 750m sebbene siano state condotte osservazioni fino a 1200m in aria umida. La presenza di forte umidità, infatti, migliora le prestazioni globali. Si è osservato infatti che nell'intorno dei 2kHz, alle temperature normalmente presenti nel **PBL**, l'assorbimento delle onde acustiche diminuisce all'aumentare dell'umidità presente nell'aria.

Capitolo 3. I dati sperimentali

3.2 Stazione meteorologica gestita dal DIISM dell'UNIVPM

3.2.1 Localizzazione

La torre anemometrica gestita dal **DIISM** dell'**UNIVPM** si trova nel comune di Monte Cavallo (Mc), precisamente nel punto di coordinate:

$$\begin{aligned}\phi &= 43.00537^\circ \\ \lambda &= 12.96585^\circ\end{aligned}$$

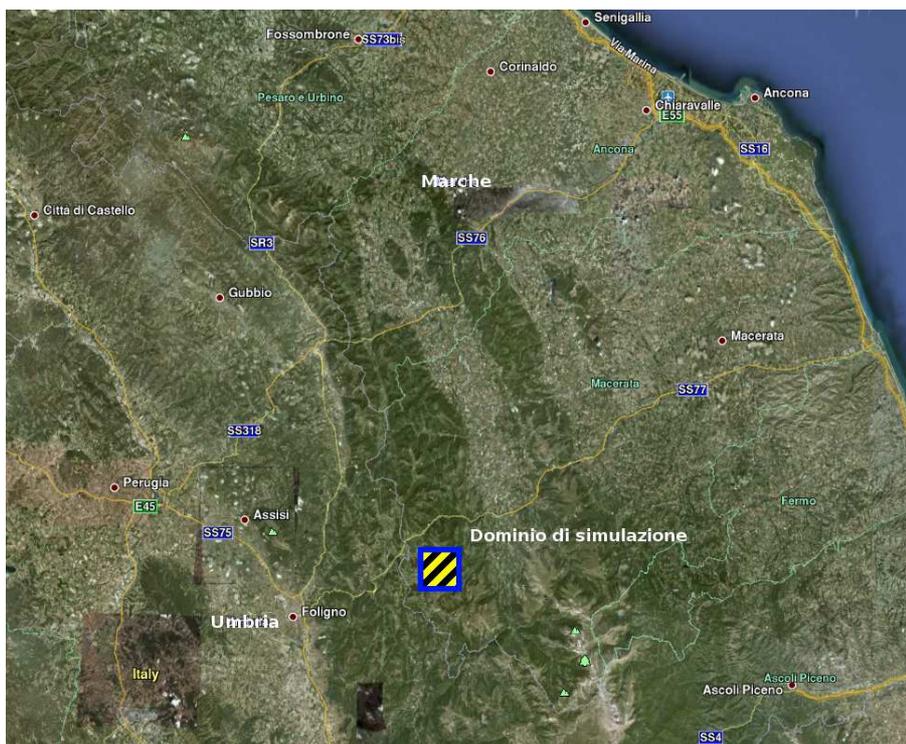


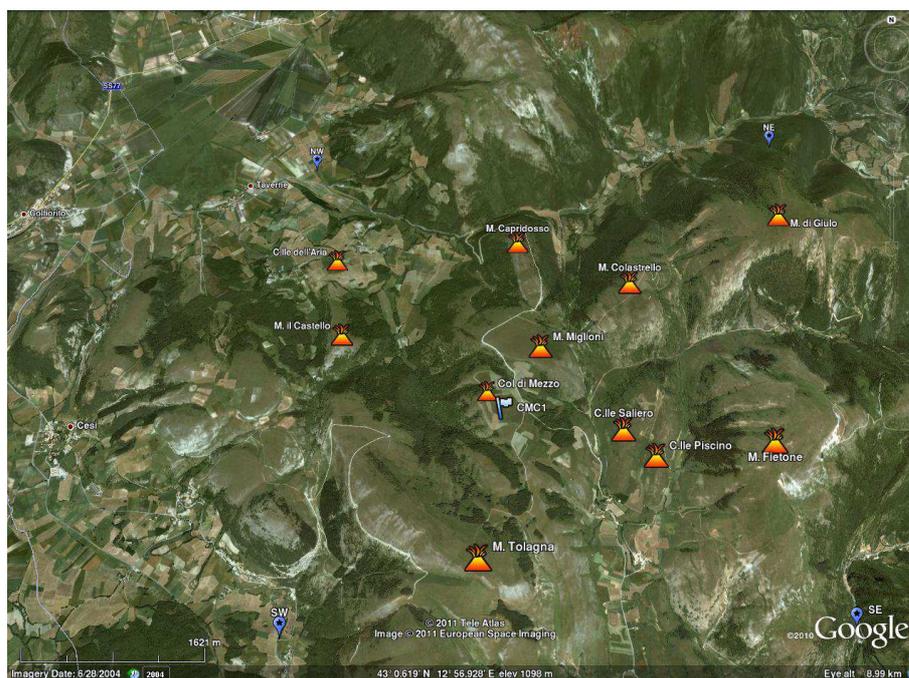
Figura 3.18: Localizzazione del dominio di calcolo.

sul Col di Mezzo (1182m), una collina che vede a nord-est il Monte Miglioni (1227m), a sud-ovest il Monte Tolagna (1404m), ad ovest i Colli Saliero (1225m) e Piscino (1213m) (Figg. 3.19, 3.19(a) e 3.18(b)).

3.2. Stazione meteorologica gestita dal DIISM dell'UNIVPM



(a) Torre anemometrica CMC1 vista da Nord-Ovest.



(b) Torre anemometrica CMC1 vista da Sud.

Figura 3.18: Individuazione della torre anemometrica: viste da Sud e da Nord-Ovest.

Capitolo 3. I dati sperimentali

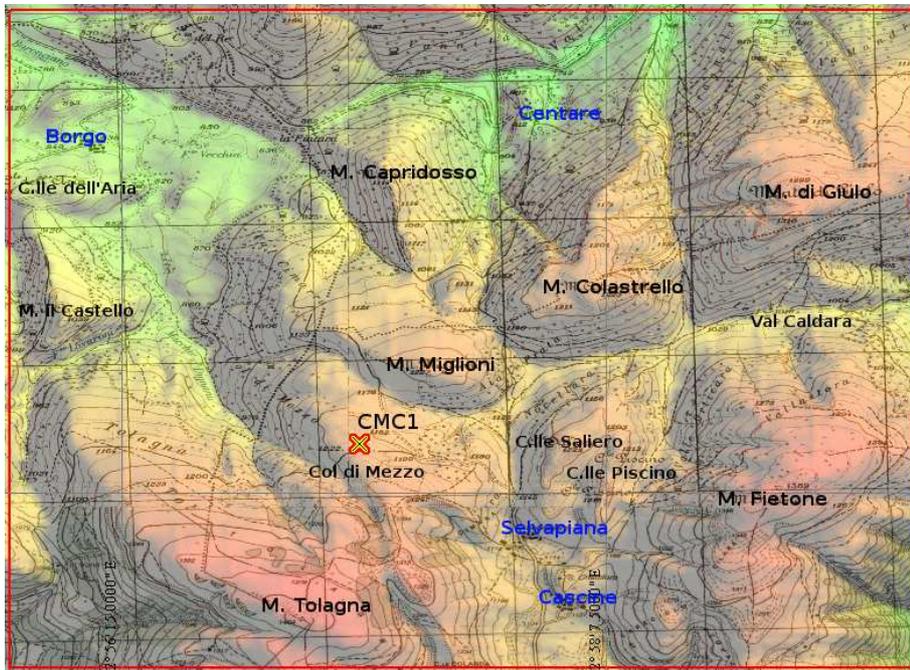


Figura 3.19: Posizione della torre anemometrica CMC1.

3.2.2 La torre anemometrica CMC1

La torre (v. [Mazz 09]) anemometrica denominata CMC1 gestita dal DIISM dell'UNIVPM è costituita un traliccio tubolare di forma triangolare fissata a terra su un basamento di cemento e con tre tiranti in acciaio. Su di essa sono montate, a varie altezze, le banderuole per la misura della direzione del vento, gli anemometri a coppette per la misura della velocità del vento e l'anemometro sonico per la misura delle componenti u , v e w . L'anemometro sonico è montato a 40 metri (Fig. 3.20(c)), i tre anemometri a coppette sono montati a 44, 30 e 20 metri e due banderuole a 30 e 44 metri dal lato opposto agli anemometri a coppette (Figg. 3.20(a), 3.20(b) e 3.20(d)). I dati in ingresso vengono acquisiti e memorizzati da un sistema data logger Nomad 2 mentre quelli in uscita vengono salvati in un file di testo organizzato in colonne. Ad ogni colonna corrisponde un gruppo di dati pertinente ad uno strumento identificato da uno dei codici riportati in Tab. 3.4. I dati vengono dapprima mediati su un periodo fisso di 10 minuti e poi scritti in memoria:

```
"Multi-Track Export - 06649 Col di Mezzo"
```

3.2. Stazione meteorologica gestita dal DIISM dell'UNIVPM

"Site Name: Col di Mezzo"
Nomad2 Name:06649
"Start Time: 11.50 lunedì 27 aprile 2009"
"Finish Time: 00.00 sabato 1 maggio 2010"
"368 days 12 hrs 10 mins"
Notes:

```
TimeStamp\  
C1-Maximum #40(m/s) @ 20m NE-10 min Average| \  
C1-Maximum #40(m/s) @ 20m NE-10 min Max Value| \  
C1-Maximum #40(m/s) @ 20m NE-10 min Std Dev| \  
C1-Maximum #40(m/s) @ 20m NE-10 min Time Of Max|\  
C2-Maximum #40(m/s) @ 30m NE-10 min Average| \  
C2-Maximum #40(m/s) @ 30m NE-10 min Max Value| \  
C2-Maximum #40(m/s) @ 30m NE-10 min Std Dev| \  
C2-Maximum #40(m/s) @ 30m NE-10 min Time Of Max| \  
C5-Maximum #40(m/s) @ 44m-10 min Average| \  
C5-Maximum #40(m/s) @ 44m-10 min Max Value| \  
C5-Maximum #40(m/s) @ 44m-10 min Std Dev| \  
C5-Maximum #40(m/s) @ 44m-10 min Time Of Max| \  
A1-Voltage(m/s)-10 min Average| \  
A1-Voltage(m/s)-10 min Max Value| \  
A1-Voltage(m/s)-10 min Std Dev| \  
A1-Voltage(m/s)-10 min Time Of Max| \  
A2-NRG 200P(°) @ 30m SW-10 min Vec Average| \  
A2-NRG 200P(°) @ 30m SW-10 min Vec Std Dev| \  
A4-NRG 110S(°C) @ 10m North-10 min Average| \  
A4-NRG 110S(°C) @ 10m North-10 min Std Dev| \  
A5-NRG 200P(°) @ 44m-10 min Vec Average| \  
A5-NRG 200P(°) @ 44m-10 min Vec Std Dev| \  
A6-Voltage(m/s)-10 min Average| \  
A6-Voltage(m/s)-10 min Max Value| \  
A6-Voltage(m/s)-10 min Std Dev| \  
A6-Voltage(m/s)-10 min Time Of Max| \  
A7-Voltage(m/s)-10 min Average| \  
A7-Voltage(m/s)-10 min Max Value| \  
A7-Voltage(m/s)-10 min Std Dev| \  
A7-Voltage(m/s)-10 min Time Of Max| \  
A8-Voltage(°)-10 min Average| \  
A8-Voltage(°)-10 min Std Dev| \  
TEMP-Inner Temp(°C)-10 min Average| \  
BAT1-Battery 1(V)-10 min Average| \  
BAT2-Battery 2(V)-10 min Average| \  
XPwr-12V Power(V)-10 min Average| \  
A1-Voltage(m/s)-10 min Average| \  
A1-Voltage(m/s)-10 min Max Value| \  
A1-Voltage(m/s)-10 min Std Dev| \  

```

Capitolo 3. I dati sperimentali

```

A1-Voltage(m/s)-10 min Time Of Max| \
A6-Voltage(m/s)-10 min Average| \
A6-Voltage(m/s)-10 min Max Value| \
A6-Voltage(m/s)-10 min Std Dev| \
A6-Voltage(m/s)-10 min Time Of Max| \
A7-Voltage(m/s)-10 min Average| \
A7-Voltage(m/s)-10 min Max Value| \
A7-Voltage(m/s)-10 min Std Dev| \
A7-Voltage(m/s)-10 min Time Of Max| \
A8-Voltage(°)-10 min Average| \
A8-Voltage(°)-10 min Std Dev
    
```

Le grandezze rilevate in relazione alla velocità del vento sono quindi: media, valore massimo, deviazione standard e tempo di raffica, mentre le grandezze rilevate in relazione alla direzione del vento sono la media e la deviazione standard.

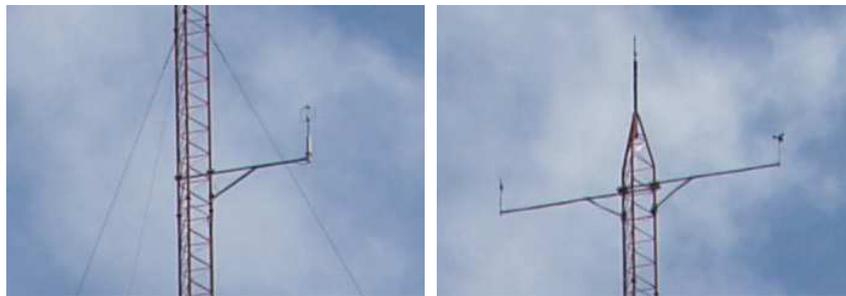
CANALI DELLA STAZIONE ANEMOMETRICA CMC-1			
Codice	Tipo	Grandezza	Altezza
A1	Anemometro Sonico WindMaster Gill Instruments	U	40m
A6		V	40m
A7		W	40m
A8		Dir	40m
C1	Anemometro a Coppette NRG	Vel	20m
C2	Anemometro a Coppette NRG	Vel	30m
C5	Anemometro a Coppette NRG	Vel	44m
A2	Banderuola NRG200P	Dir	30m
A5	Banderuola NRG200P	Dir	44m
A4	Termometro NRG110P	Temperatura	15m

Tabella 3.4: Canali e corrispondenti grandezze vento.

3.2. Stazione meteorologica gestita dal DIISM dell’UNIVPM



(a) Anemometro a coppette a 20m dal suolo. (b) Anemometro a coppette e banderuola a 30m dal suolo.



(c) Anemometro sonico a 40m dal suolo (d) Anemometro a coppette e banderuola a 44m dal suolo.

Figura 3.20: Strumentazione in dotazione alla stazione anemometrica CMC1

3.2.3 I dati rilevati sperimentalmente

I dati forniti dai sensori della torre anemometrica CMC1 sono relativi al periodo che va dalle 11:50 del 27 aprile 2009 alle 00:00 del 1 maggio 2010. Prima di procedere all’analisi degli stessi è stata necessaria l’esportazione in formato Comma Separated Values (**CSV**) con il programma di gestione del data logger Nomad2 Desktop.

Il programma Nomad2 Desktop è formato da un set di strumenti software adatti ad operare con i *Nomad 2 wind resource data loggers* che sostanzialmente permettono di:

- configurare i data logger Nomad 2;
- comunicare con i data logger sia in modalità locale che remota;
- mostrare i dati acquisiti in tempo reale;
- scambiare i file con i data logger;

Capitolo 3. I dati sperimentali



Figura 3.21: Torre anemometrica CMC1 (Da [Mazz 09].)

- archiviare i dati dei data logger e importarli nel database del Nomad Desktop;
- esaminare i dati acquisiti in numerosi formati sia grafici che report;
- stampare ed esportare grafici e report;
- esportare selettivamente i dati dal database verso altre applicazioni.

L'analisi dei dati è stata fatta ricorrendo al software Widographer previa esportazione dal formato **CSV** in uscita dal Nomad Desktop. A tale proposito è stato scritto e utilizzato lo script bash List. **B.1**.

3.2. Stazione meteorologica gestita dal DIISM dell'UNIVPM

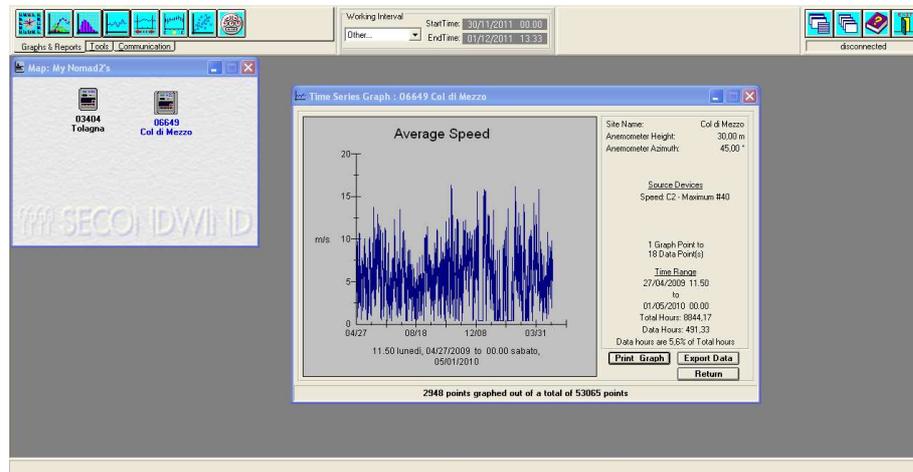
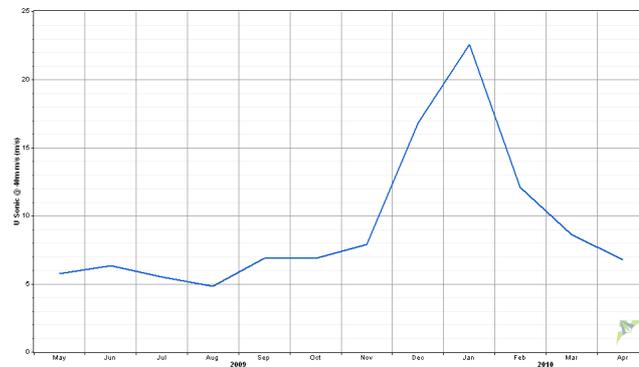


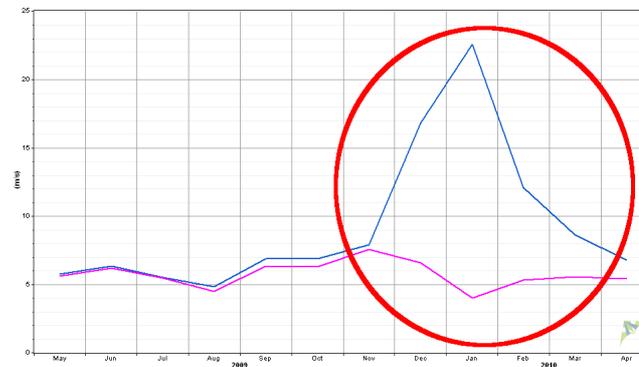
Figura 3.22: Il programma di gestione data logger Nomad2 Desktop.

Windographer è un software che permette l’analisi dei dati prodotti da torri meteorologiche, sistemi **SoDAR** e Light Detection And Ranging (**LiDAR**). Permette di organizzare la visualizzazione dei dati in forma di grafici e rose dei venti oltre a permettere il calcolo del *wind shear*, dell’intensità di turbolenza e la produzione di aerogeneratori le cui caratteristiche sono contenute in un archivio fornito a supporto del programma. Nella Fig. 3.25 vengono riportati gli andamenti delle velocità medie mensili misurate dagli anemometri a coppette e nella Fig. 3.23(a) l’andamento medio mensile calcolato dalle componenti di velocità u e v rilevate a 40m dal suolo dall’anemometro sonico. Dal confronto degli andamenti delle velocità rilevate a 40m dall’anemometro sonico e a 44m dall’anemometro a coppette si nota una discrepanza sospetta nei grafici che inizia a partire dal mese di dicembre del 2009 (Fig. 3.23(b)) Un andamento come quello riportato nella Fig. 3.23(b) suggerisce un malfunzionamento da parte dei sistemi di misura che richiede una ulteriore analisi dei dati. A tale proposito vengono osservati l’andamento delle temperature interne al quadro elettrico, al fine di poter individuare problemi di congelamento dei corpi rotanti, e della tensione delle batterie di alimentazione dei circuiti elettronici responsabili della gestione dei sensori.

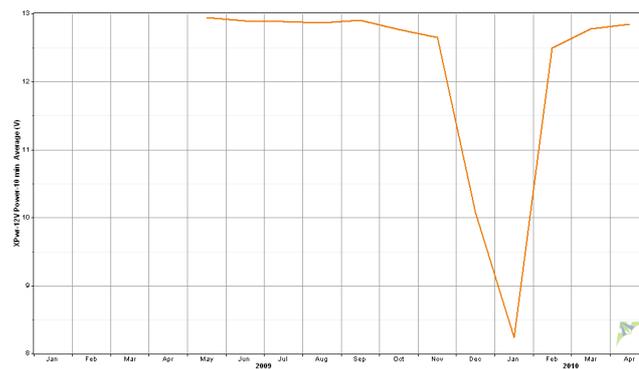
Capitolo 3. I dati sperimentali



(a) Andamento medio mensile calcolato dalle componenti orizzontali di velocità rilevate dall’anemometro sonico posto a 40 dal suolo.



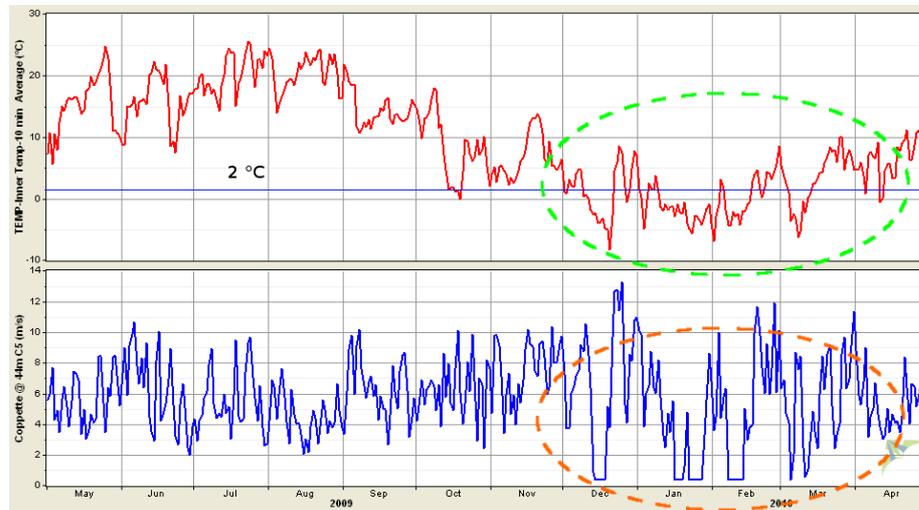
(b) Andamento anomalo delle velocità durante i mesi di dicembre gennaio e febbraio: in blu la velocità rilevata dall’anemometro sonico a 44m, in porpora quello dell’anemometro a coppette a 40m dal suolo.



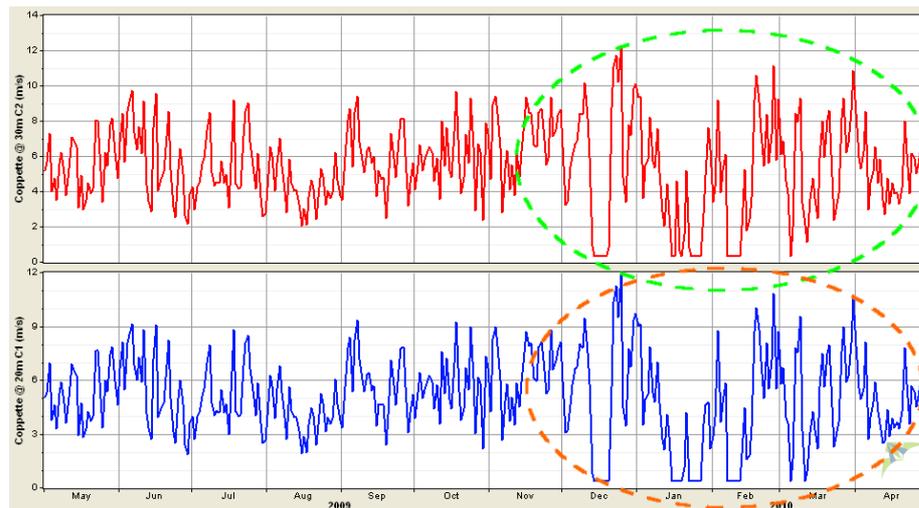
(c) Andamento anomalo delle tensione della batteria di alimentazione dell’equipaggiamento elettronico.

Figura 3.23: Andamento delle velocità rilevate dall’anemometro sonico e tensione di alimentazione dei dispositivi elettronici.

3.2. Stazione meteorologica gestita dal DIISM dell'UNIVPM



(a) Andamenti delle medie giornaliere della temperatura interna al quadro elettrico e della velocità rilevata dagli anemometri a coppette a 40m dal suolo.



(b) Andamenti delle velocità medie giornaliere rilevate dagli anemometri a coppette posti a 20m e 30m dal suolo.

Figura 3.24: Andamenti delle medie giornaliere della temperature interna e delle velocità: in evidenza i giorni di blocco degli anemometri.

Nella Fig. 3.24(a) si vede come la temperatura interna al quadro elettrico che ospita la parte circuitistica sia scesa, nei mesi da dicembre a marzo, molto frequentemente al di sotto dei 2°C . Una tale condizione è indicatrice di probabile formazione di ghiaccio la quale a sua volta può

Capitolo 3. I dati sperimentali

aver determinato un blocco meccanico delle parti in rotazione. Questa possibilità, in effetti, risulta confermata dalla presenza di numerosi giorni durante i quali l’attività dell’anemometro è risultata bloccata o comunque alterata in modo significativo. Lo stesso fenomeno di blocco si è avuto anche negli anemometri a coppette posti alle quote di 20m e 30m (Fig. 3.24(b)). Oltre al probabile blocco della rotazione degli anemometri a coppette e delle banderuole esiste la possibilità, peraltro confermata dall’andamento della tensione della batteria di alimentazione dell’equipaggiamento elettronico riportato in Fig. 3.23(c), che gli strumenti non abbiano funzionato anche per un calo della tensione di alimentazione. La situazione sopra descritta ha imposto una “pulizia” dei dati, consistente nell’eliminazione dei valori nulli dei dati misurati in condizioni di congelamento e/o mancata alimentazione elettrica in modo da fare i confronti solo sui dati utili. La procedura di eliminazione dei dati sperimentali corrispondenti agli istanti di blocco ha così dato luogo alla rimozione di un insieme di valori, da ritenere invalidi seppur buoni, ottenuti dalle simulazioni numeriche, al fine di avere un confronto tra i dati fatto su una base di tempi comune.

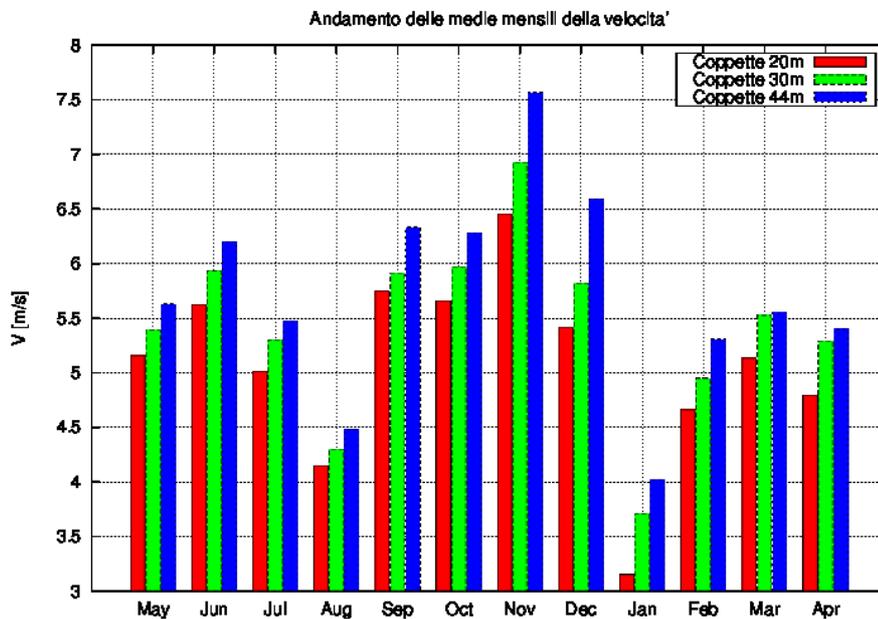


Figura 3.25: Andamenti “originali” delle medie mensili della velocità.

L’analisi condotta ha portato ad escludere dall’insieme dei

3.2. Stazione meteorologica gestita dal DIISM dell’UNIVPM

dati sperimentali da usare nel confronto con i risultati numerici, quelli relativi ai mesi di dicembre 2009, gennaio e febbraio 2010. Durante questi mesi, infatti, la porzione di dati validi è stata inferiore al 50% dei dati totali. Per avere coerenza sulla tecnologia usata nelle misurazioni, si è inoltre preferito considerare il solo gruppo di anemometri a coppette e tralasciare i dati dell’anemometro sonico. In Figura 3.26 viene riportato l’andamento mensile della velocità media relativo ai tre anemometri a coppette di cui è dotata la torre CMC1, mentre invece nelle Figure 3.27 3.28 e 3.29 si può osservare l’andamento medio giornaliero delle velocità in relazione all’ora alle altezze di installazione degli anemometri. La Figura 3.30 riporta l’andamento delle temperature medie mensili rilevate a 10m sls mentre in Figura 3.31 si può osservare il ciclo medio giornaliero dell’andamento della temperatura a 10m sls.

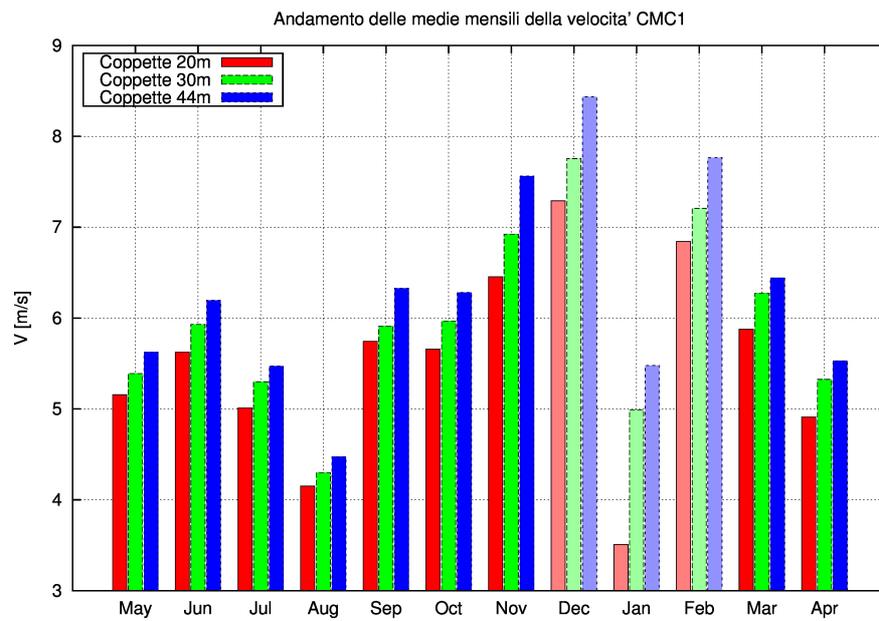


Figura 3.26: Andamenti “trattati” delle medie mensili della velocità.

Andamenti medi mensili delle velocità [m/s]												
Z sls [m]	2009							2010				
	Mag	Giu	Lug	Ago	Sett	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr
20m	5.16	5.62	5.01	4.15	5.74	5.66	6.43	7.29	3.51	6.84	5.88	4.91
30m	5.38	5.93	5.30	4.30	5.91	5.96	6.92	7.75	4.99	7.21	6.27	5.32
44m	5.62	6.19	5.47	4.47	6.33	6.28	7.56	8.44	5.48	7.76	6.44	5.53

Tabella 3.5: Valori tabellati della velocità media mensile rilevata dagli anemometri a coppette.

Capitolo 3. I dati sperimentali

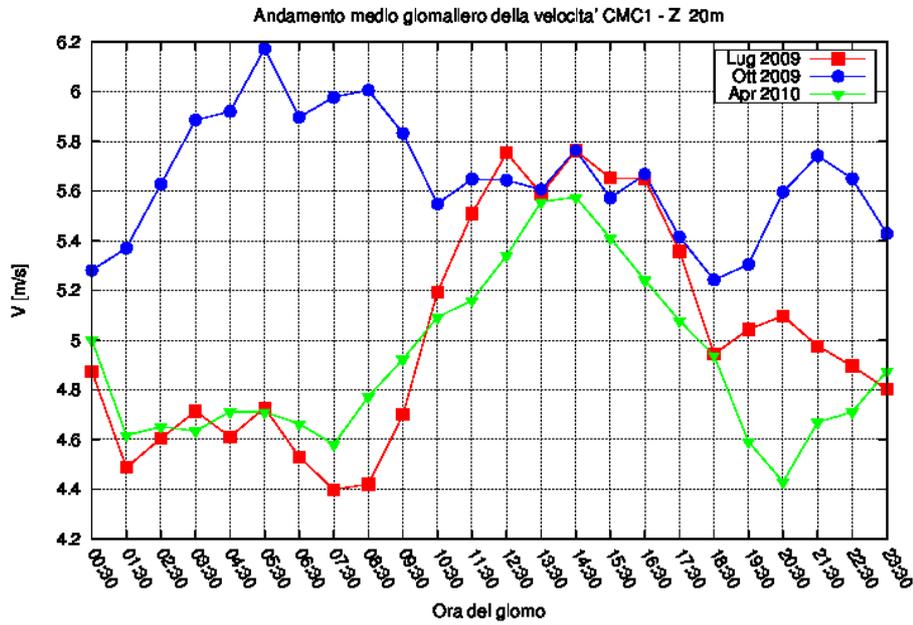


Figura 3.27: Andamento medio giornaliero delle velocità del vento rilevato a 20m sls.

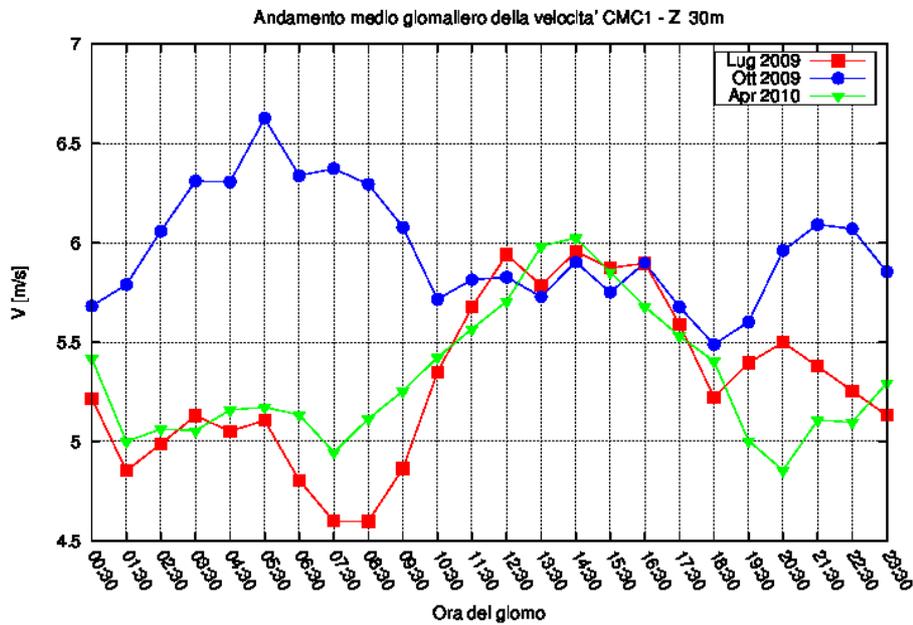


Figura 3.28: Andamento medio giornaliero delle velocità del vento rilevato a 30m sls.

3.2. Stazione meteorologica gestita dal DIISM dell'UNIVPM

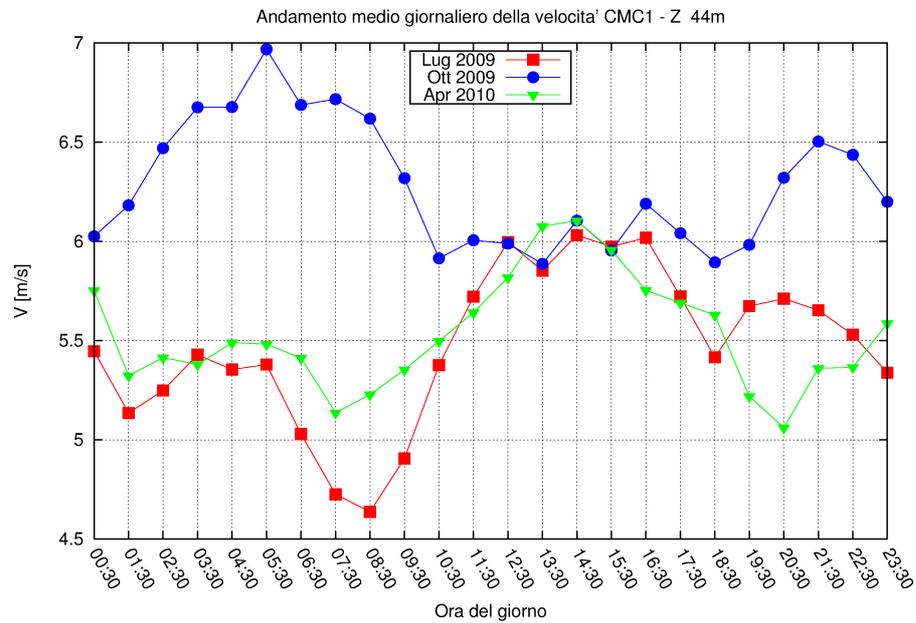


Figura 3.29: Andamento medio giornaliero delle velocità del vento rilevato a 44m sls.

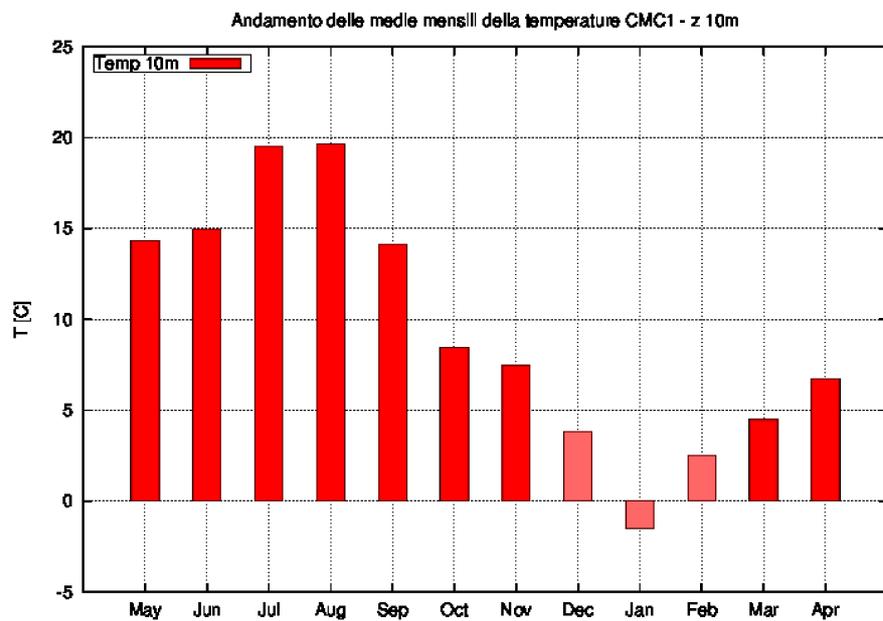


Figura 3.30: Andamento della temperatura media mensile a 10m sls.

Capitolo 3. I dati sperimentali

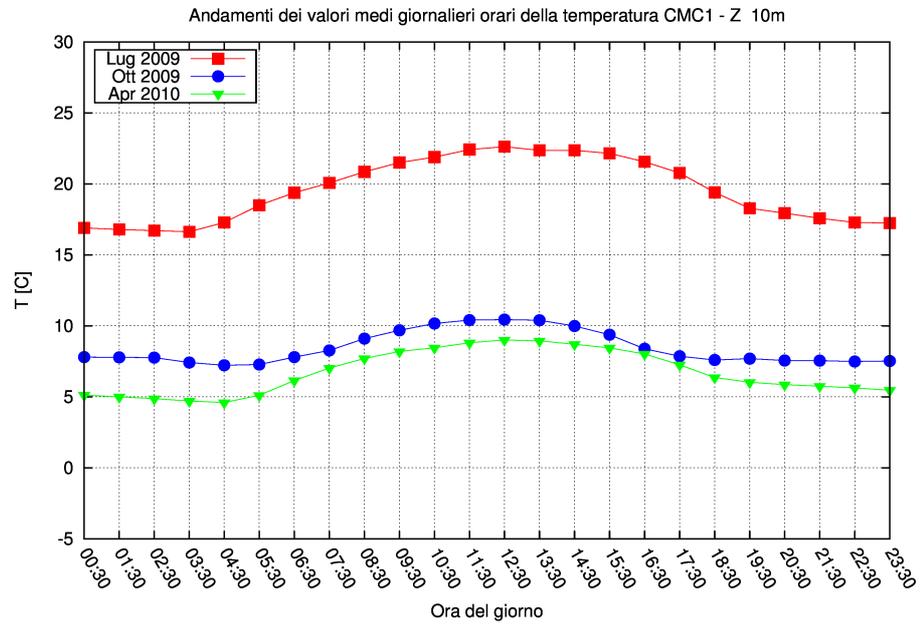
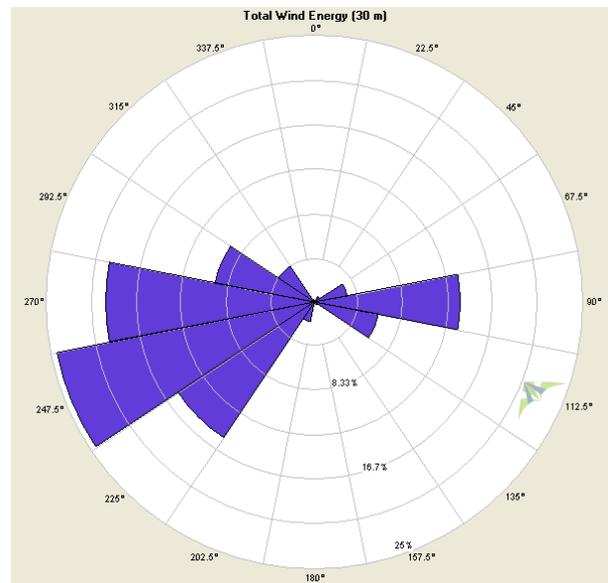
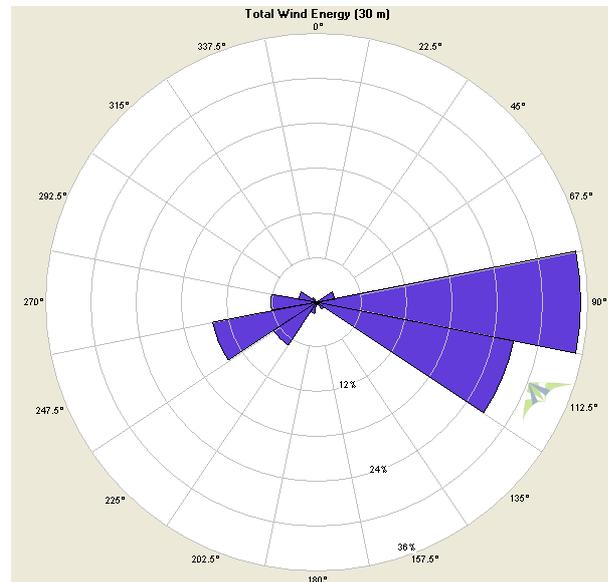


Figura 3.31: Andamenti dei valori medi giornalieri orari della temperatura a 10m sls.

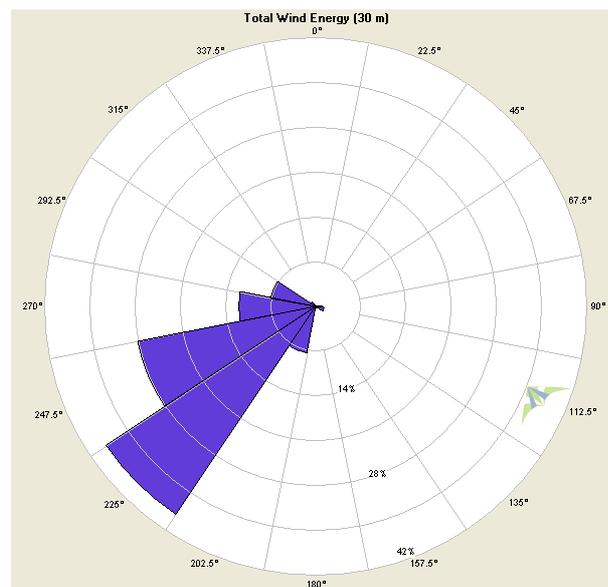


(a) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da maggio a luglio 2009.

3.2. Stazione meteorologica gestita dal DIISM dell'UNIVPM

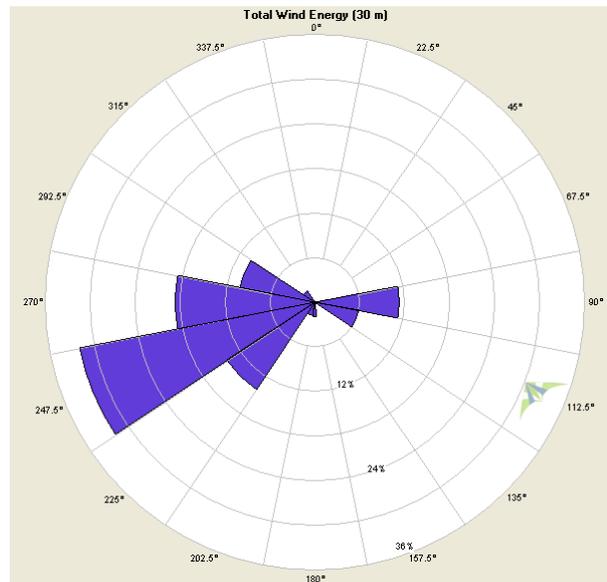


(b) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da agosto a ottobre 2009.



(c) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza novembre 2009.

Capitolo 3. I dati sperimentali



(d) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da marzo ad aprile 2010.

Figura 3.32: Rose dei venti a 30m sls.

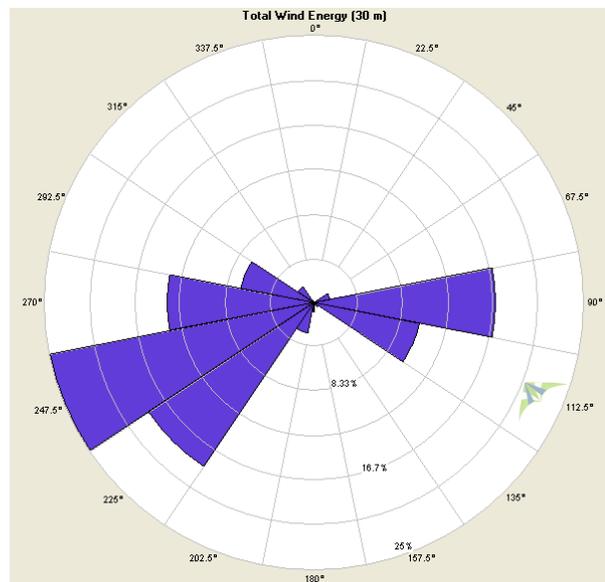


Figura 3.33: Rosa dei venti media annuale (sui mesi validi): energia per direzione di provenienza.

3.2. Stazione meteorologica gestita dal DIISM dell’UNIVPM

Wind Turbine Class		I	II	III	S
V_{ref}	m/s	50	42.5	37.5	Valore specificato dal progettista
A	I_{ref}	0.16			
B	I_{ref}	0.14			
C	I_{ref}	0.12			

Tabella 3.6: Parametri per la classificazione degli aerogeneratori secondo [IEC 08].

La Figura 3.32 mostra le rose dei venti rilevate all’altezza di 30m sls riportando le direzioni di provenienza dell’energia eolica. In particolare le Figure 3.32(a) e 3.32(b) sono relative alle media dei due trimestri da maggio ad ottobre 2009. In mancanza dei dati nei mesi di dicembre 2009, gennaio e febbraio 2010, si riportano le rose relative al mese di novembre 2009 (Fig. 3.32(c)) e al bimestre marzo aprile 2010 (Fig. 3.32(d)). Dalla rosa in Figura 3.33 si osserva chiaramente come le direzioni prevalenti di provenienza dei venti nei mesi considerati siano Ovest-Sud-Ovest ed Est. La Figura 3.35 da un quadro generale della situazione nei vari mesi dell’anno di misure. Nei vari grafici, si è preferito riportare i dati relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio con colori attenuati ma non completamente cancellati. L’anemometro sonico è stato sfruttato per la classificazione del sito secondo la normativa [IEC 08] da cui è tratta la Tabella 3.6.

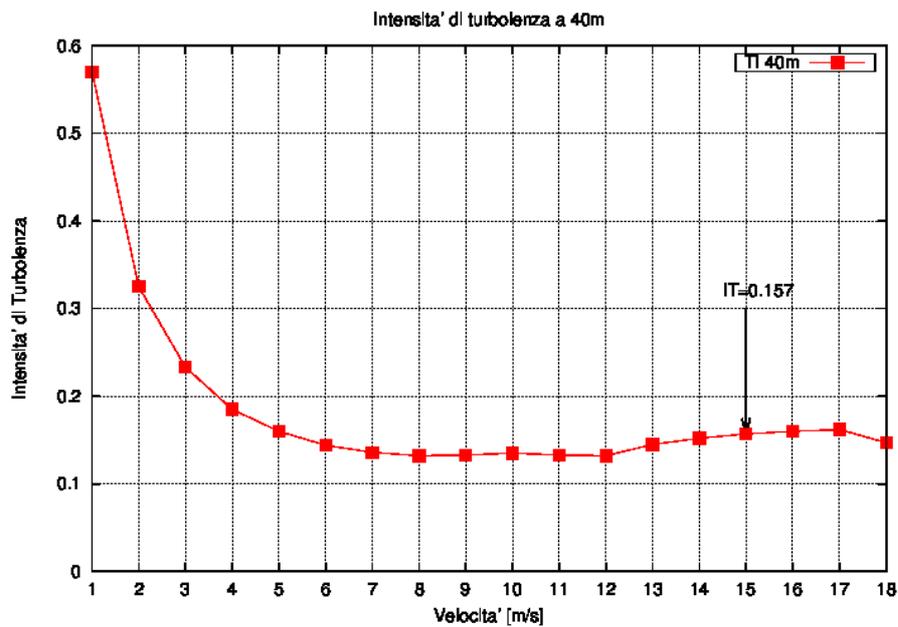


Figura 3.34: Andamento dell’intensità di turbolenza a 40m. 113

Capitolo 3. I dati sperimentali

Variable	Cup@44m	U @ 40m	Cup@30m	Cup@20m
Measurement height (m)	44	40	30	20
Mean wind speed (m/s)	5.530	6.025	5.325	4.912
MMM wind speed (m/s)	5.530	6.025	5.325	4.912
Median wind speed (m/s)	5.323	5.832	5.166	4.624
Min wind speed (m/s)	0.350	0.125	0.350	0.350
Max wind speed (m/s)	18.871	18.888	18.194	18.290
Weibull k	2.432	2.635	2.429	2.309
Weibull c (m/s)	6.222	6.762	5.988	5.529
Mean power density(W/sm)	173	209	154	127
MMM power density (W/sm)	173	209	154	127
Mean energy content (kWh/sm/yr)	1,515	1,830	1,347	1,112
MMM energy content (kWh/sm/yr)	1,515	1,830	1,347	1,112
Energy pattern factor	1.622	1.516	1.617	1.700
Frequency of calms (%)	0.00	0.00	0.00	0.00
Possible records	4,320	4,320	4,320	4,320
Valid records	4,108	4,078	4,108	4,108
Missing records	212	242	212	212
Data recovery rate (%)	95.09	94.40	95.09	95.09

Tabella 3.7: Valori riepilogativi delle grandezze misurate dagli anemometri della torre CMC1.

Data	2009					2010			
	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Mar	Apr
Mean TI @ 15m/s	0.110	0.149	-	-	0.081	0.103	0.118	0.132	0.191
Repres. TI @ 15m/s	0.125	0.167	-	-	0.114	0.134	0.159	0.171	0.230
Records	7	8	0	0	11	22	8	25	6
IEC Cat.	C	A	-	-	C	C	C	B	S

Tabella 3.8: Valori medi mensili dell’intensità di turbolenza e classificazione secondo la IEC 61400-1. Valori relativi ai soli dati ritenuti validi.

Nei dati riepilogativi rispetto agli anemometri a coppette e all’anemometro sonico, relativamente ai valori attendibili delle misurazioni, riportati in Tabella 3.7, si individua una velocità media annuale a 40m sls di $V_{ave} = 6.025$ m/s. L’andamento dell’intensità di turbolenza riportato in Figura 3.34 fornisce il valore di $I_{ref} = 0.157$ a 15m/s. Dalla (9) di [IEC 08] si ottiene:

$$V_{ref} = \frac{V_{ave}}{0.2} = 30.125 \text{ m/s}$$

che permette di classificare il sito nella classe III A.

3.2. Stazione meteorologica gestita dal DIISM dell'UNIVPM

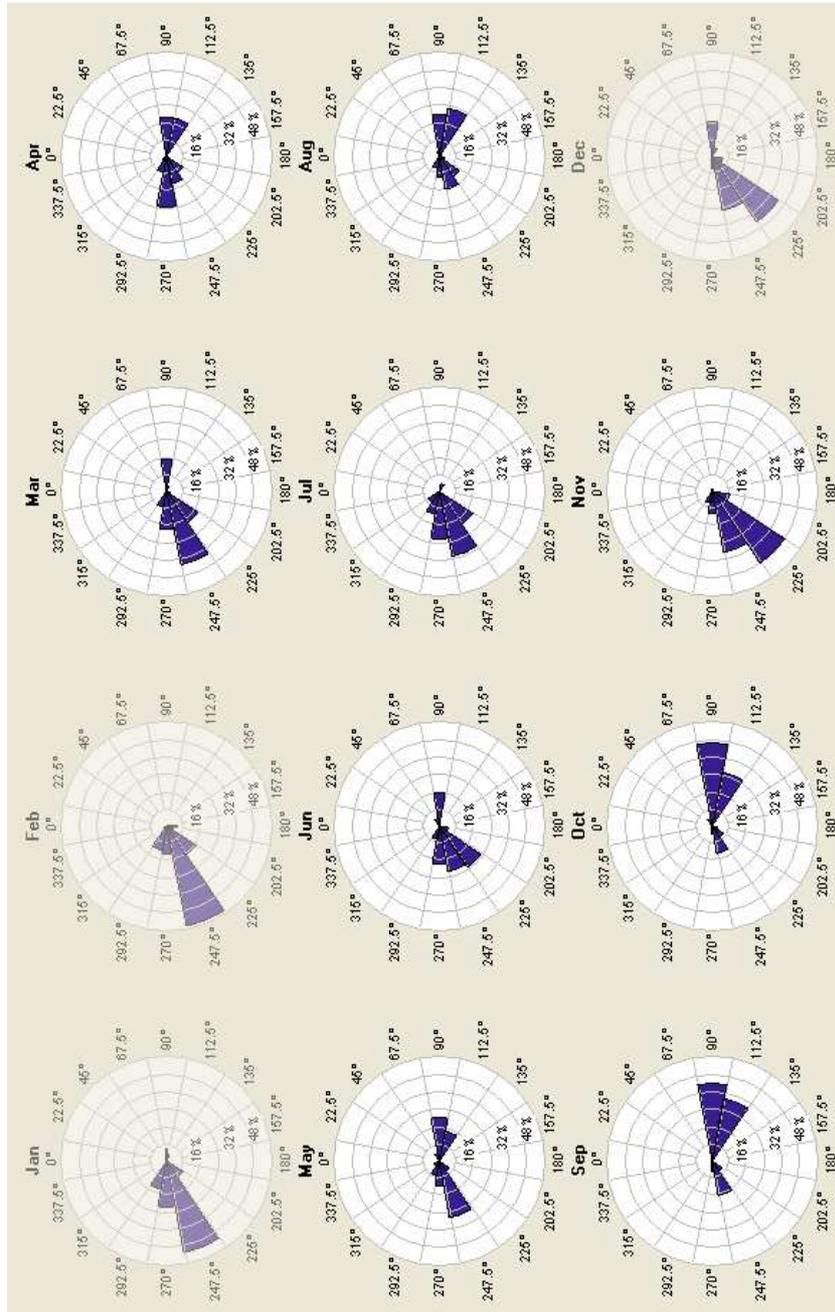


Figura 3.35: Rose dei venti mensili: energia per direzione di provenienza.

Capitolo 4

Implementazione del protocollo numerico

In questo capitolo viene riportata in dettaglio l’implementazione del protocollo numerico oggetto del presente lavoro di ricerca. In particolare nella prima parte sono descritti i formati Shuttle Radar Topography Mission (**SRTM**)¹, della National Aeronautics and Space Administration (**NASA**), e Global 30 Arc Second Elevation Data (**GTOPO30**)², del United States Geological Survey (**USGS**), dei file dati dell’orografia. Viene poi brevemente descritto il cluster costruito per eseguire le simulazioni con risoluzione di griglia di 30”. Successivamente sono descritti in dettaglio i parametri di calcolo e di configurazione del modello numerico. Vengono inoltre presentati gli script sviluppati ad-hoc per le fasi di pre, run, e post processing i cui listati completi sono riportati nell’Appendice **B**.

¹<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

²<http://eros.usgs.gov/>

4.1. Formato dei file dati di orografia

4.1 Formato dei file dati di orografia

4.1.1 Il formato GTOPO30

Il **GTOPO30** è un formato **DEM** sviluppato dal Earth Resources Observation and Science (**EROS**) locato in Sud Dakota presso le Sioux Falls. I punti, la cui elevazione è riportata in un file **GTOPO30**, sono equidistanziati di 30" di arco (ovvero $0.008\bar{3}$ gradi). La copertura dei dati **GTOPO30** sulla superficie terrestre è totale spaziando da 90° Nord a 90° Sud e da 180° Est a 180° Ovest. Con la risoluzione data, il **DEM** terrestre risulta formato da una matrice di 21600 righe e 43200 colonne. Ciascun punto è individuato da una coppia di numeri decimali che esprimono la sua latitudine e longitudine su un datum World Geodetic System 1984 (**WGS84**) mentre la coordinata verticale esprime l'elevazione in metri rispetto al livello del mare e varia da -407 a 8752m. I punti del **DEM** che cadono sugli oceani sono marcati come "no data" e riportano un valore di elevazione convenzionale posto pari a -9999. Le zone costiere emergono dalla superficie marina se hanno almeno una elevazione di un metro. Inoltre le piccole isole che cadono all'interno della griglia di lato $\sim 1\text{Km}$ (30") non vengono generalmente rappresentate. Per comodità l'intera superficie terrestre è ricoperta da 33 settori. L'area che si estende da 60° Sud a 90° Nord e da 180° Ovest a 180° Est è coperta da 27 settori ampi 40°x50° disposti su tre file e nove colonne. La parte antartica è coperta da 60° Sud a 90° Sud e da 180° Ovest a 180° Est da sei settori ampi 60°x30°. A ciascun settore viene assegnato un nome che per convenzione è formato dalla longitudine e dalla latitudine dell'angolo superiore sinistro (quello a Nord-Ovest). Il nome del settore di interesse che comprende l'Italia centro settentrionale è W020N90 (cfr. Fig. 4.1) ed il file corrispondente può essere scaricato da <http://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data/gtopo30/global/w020n90.tar.gz>.

Settore	Lat		Long		Altezza			
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Media	Dev. Std.
W020N90	40°	90°	-20°	20°	-30m	4536m	399m	425

Tabella 4.1: Estensione del settore W020N90.

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

Estensione	Contenuto
DEM	dati DEM
HDR	header del file DEM
DMW	world file
STX	file di statistiche
PRJ	tipo di proiezione
GIF	immagine in formato gif del settore (cfr. Fig. 4.1)
SRC	file sorgente
SCH	header del file sorgente

Tabella 4.2: Contenuto di W020N90.tar.gz.

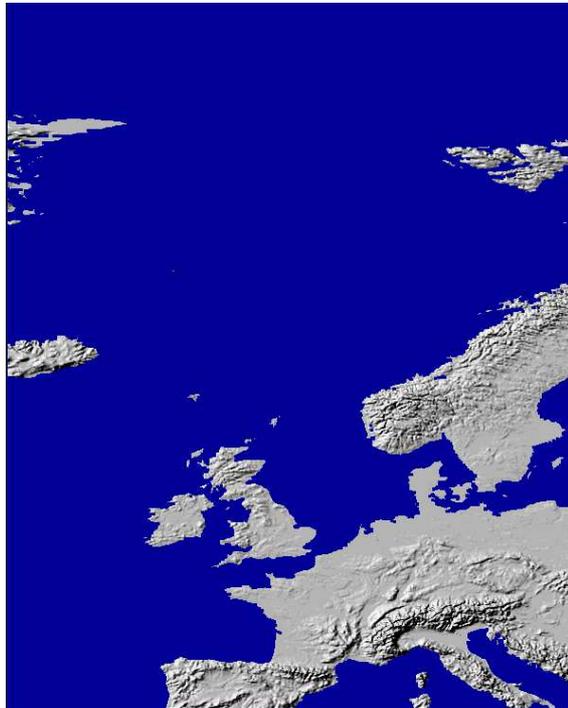


Figura 4.1: Settore W020N90.

Un ulteriore settore, in proiezione polare stereografica (v. pag.39), copre l’Antartide. Ciascuno dei 27 settori, alto 50° e largo 40° , conterrà una matrice di altezze formata da 6000 righe e 4800 colonne mentre ciascuno dei sei settori antartici, alto 30° e largo 60° , conterrà una matrice 3600 righe e 7200 colonne di altezze. L’archivio w020n90.tar.gz contiene otto file (cfr. Tab. 4.2).

4.1. Formato dei file dati di orografia

File .DEM È un file di dati, raster a 16 bit con segno, delle righe delle altezze memorizzate in successione.

File .HDR È il file header del file “.DEM” e contiene le informazioni relative a quest’ultimo. Per il W020N90 si ha:

BYTEORDER	M
LAYOUT	BIL
NROWS	6000
NCOLS	4800
NBANDS	1
NBITS	16
BANDROWBYTES	9600
TOTALROWBYTES	9600
BANDGAPBYTES	0
NODATA	-9999
ULXMAP	-19.995833333333333
ULYMAP	89.995833333333334
XDIM	0.008333333333333
YDIM	0.008333333333333

in cui:

BYTEORDER M indica il modo di memorizzazione dei dati a 16 bit in formato Motorola “*big endian*”

LAYOUT BIL ossia “band interleaved by line”, i dati vengono memorizzati secondo una successione di righe

NROWS Numero di righe dell’immagine ($6000 = 50^\circ / YDIM$)

NCOLS Numero di colonne dell’immagine ($4800 = 40^\circ / XDIM$)

NBANDS Numero di bande spettrali dell’immagine che vale 1 per il DEM

NBITS Numero di bit di memorizzazione dei dati

BANDROWBYTES Numero di byte per riga (ossia 4800 colonne per 2 Byte)

TOTALROWBYTES Numero di byte per riga per banda

BANDGAPBYTES Numero di byte tra le bande

NODATA Valore assegnato ai no data

ULXMAP Longitudine del centro del pixel dell’angolo in alto a sinistra ($-20^\circ + XDIM/2$)

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

ULYMAP Latitudine del centro del pixel dell’angolo in alto a sinistra ($40^\circ + YDIM/2$)

XDIM Dimensione orizzontale del pixel (30"/3600)

YDIM Dimensione verticale del pixel (30"/3600)

File .DMW Contiene le informazioni utili ad alcuni software per la georeferenziazione del file immagine:

```
0.0083333333333333
0.0000000000000000
0.0000000000000000
-0.0083333333333333
-19.995833333333333
89.995833333333334
```

in cui:

- la prima riga contiene la dimensione orizzontale dei pixel in gradi, positiva da Ovest verso Est;
- un termine di rotazione sempre nullo;
- un altro termine di rotazione sempre nullo;
- la dimensione verticale dei pixel, negativa perché diretta da Nord verso Sud;
- longitudine del centro del pixel dell’angolo in alto a sinistra;
- latitudine del centro del pixel dell’angolo in alto a sinistra.

File .STX File contenente il numero di bande, il valore minimo, massimo, medio e la deviazione standard del file .DEM.

```
1 -9999 4536 -7583.3 4396.1
```

File .PRJ File contenente le informazioni concernenti il tipo di proiezione cartografica usata dal file .DEM.

```
Projection      GEOGRAPHIC
Datum           WGS84
Zunits          METERS
Units           DD
Spheroid        WGS84
Xshift          0.0000000000
Yshift          0.0000000000
Parameters
```

4.1. Formato dei file dati di orografia

File .GIF File immagine in formato GIF che permette, una volta aperto con un qualunque programma di visualizzazione di immagini, di rendersi conto della posizione del settore. L'immagine ha una risoluzione di 240" (circa $240/60 \cdot 1852.4 \sim 8Km$) il che fa in modo che parecchi particolari, tra i quali piccole isole vadano persi.

File .SRC È un file binario ad 8 bit i cui valori sono codici che danno l'informazione relativa al pixel corrispondente di elevazione nel file .DEM.

0	Ocean
1	Digital Terrain Elevation Data
2	Digital Chart of the World
3	USGS 1-degree DEM's
4	Army Map Service 1:1,000,000-scale maps
5	International Map of the World 1:1,000,000-scale maps
6	Peru 1:1,000,000-scale map
7	New Zealand DEM
8	Antarctic Digital Database

Le celle con valore 0 costituiscono i dati no data col valore -9999 mentre i codici da 1 a 8 definiscono il suolo.

File .SCH È un file header per il file .SRC simile per contenuto al file .HDR.

```

BYTEORDER      M
LAYOUT         BIL
NROWS          6000
NCOLS          4800
NBANDS         1
NBITS          8
BANDROWBYTES   4800
TOTALROWBYTES  4800
BANDGAPBYTES   0
NODATA         -9999
ULXMAP         -19.995833333333333
ULYMAP         89.995833333333334
XDIM           0.00833333333333333
YDIM           0.00833333333333333
    
```

L'accuratezza dell'elevazione fornita dai dati **GTOPO30** varia da posizione a posizione in accordo con la provenienza dei dati stessi. In

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

generale i dati ricavati da raster di aree sono più precisi di quelli ricavati da dati vettorizzati di aree. I dati a piena risoluzione di 3” di arco, da cui sono ricavati i dati **GTOPO30** alla risoluzione di 30” di arco, hanno un’accuratezza verticale di $\pm 30\text{m}$ con un confidence level del 90%.

4.1.2 Il formato SRTM

Le missioni **SRTM** della navetta spaziale Shuttle hanno prodotto il modello **DEM**, fin ora più completo e ad alta risoluzione, della superficie terrestre (cfr. [Farr], [Rodr 05] e [Rabu 03]). Al progetto, iniziato nel 2000, collaborano la **NASA**, la National Geospatial-Intelligence Agency (**NGA**), la Deutsche Forschungsanstalt für Luft-Und Raumfahrt (**DLR**) e l’Agenzia Spaziale Italiana (**ASI**).

I dati, rilevati mediante la tecnica dell’interferometria radar da due antenne e poi successivamente rielaborati, vengono acquisiti alla risoluzione di 1” di arco (circa 30m). I dati di superficie disponibili coprono circa l’80% della superficie terrestre, sono disponibili per il download a due risoluzioni: 3” di arco (circa 90m) e 1” di arco (circa 30m) per i soli Stati Uniti. La versione iniziale dei dati venne rilasciata in forma di settori da 1°, non prevedeva il trattamento dei dati mancanti e presentavano spesso degli errori soprattutto vicino le linee costiere. Fu nel 2005 che i dati completi, corretti dei dati mancanti e degli errori, vennero rilasciati relativamente alla copertura globale della superficie terrestre. Purtroppo esistono aree nel mondo che presentano ancora dei vuoti che devono essere riempiti utilizzando, per esempio, dati **GTOPO30**.

I dati con la risoluzione di 90m possono essere scaricati in formato ASCII da: <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>, mentre sono disponibili in formato binario HGT da http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/.

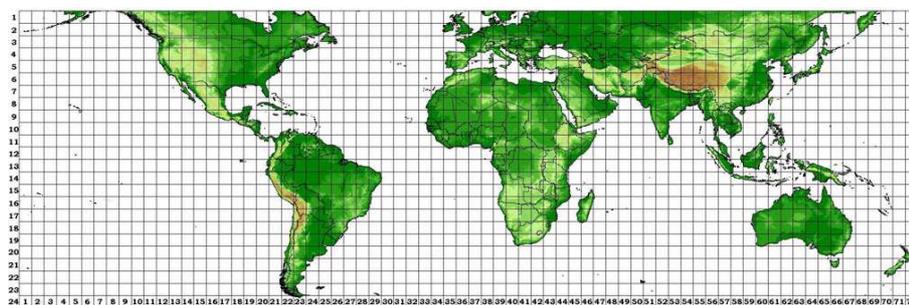


Figura 4.2: Mappa globale per il prelievo del settore di interesse.

4.1. Formato dei file dati di orografia



Figura 4.3: Mappa SRTM dell'Italia centrale.

I file con estensione .HGT sono file binari di interi con segno a 16 bit in formato big endian e i dati no data riportano il valore -32768. Per l'utilizzo su PC con processori Intel necessita la conversione dal formato big endian a little endian dei dati ad esempio con lo script List. **B.2.** Ciascun file .HGT copre un'area di $1^\circ \times 1^\circ$ così che per esempio il file N42E012.HGT copre la zona che va da 42° Nord a 43° Nord e si estende da 12° Est a 13° Est. Nel nome risulta infatti la coordinata del centro del pixel in basso a sinistra. I dati presenti nel file sono l'altezza sul livello del mare in metri e i punti sono referenziati in coordinate latitudine longitudine sul datum **WGS84**. I file con risoluzione $3''$ di arco sono organizzati in 1201 righe e 1201 colonne ($1^\circ \cdot 60' \cdot 60'' / 3'' = 1200$), ossia 1200 righe e colonne di dati più una riga Nord ed una ad Est di dati che si sovrappongono con quelli dei settori adiacenti. La dimensione di un file .HGT risulta quindi essere di 2.75Mb ($1201 \cdot 1201 \cdot 2 / 1024^2$).

Si è scelto infine di usare la versione in formato ASCII dei file di orografia perché, essendo di estensione più ampia ($5^\circ \times 5^\circ$), non dà problemi di sovrapposizione tra settori.

Il formato geogrid

In ogni caso, comunque, sia che si scelga di utilizzare i dati di orografia **SRTM** in formato binario che in formato ASCII, questi dovranno essere manipolati in maniera opportuna e tale da poter essere ingeriti dal pro-

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

```

Product      : SRTM 90m DEM version 4
Data File Name : srtm_39_04.zip
Mask File Name : srtm_mk_39_04.zip
Latitude min  : 40 N
              max  : 45 N
Longitude min : 10 E
              max  : 15 E
Center point  :
  Latitude    : 42.50 N
  Longitude   : 12.50 E
    
```

Tabella 4.3: Caratteristiche del file e dell’orografia dell’Italia centrale di Fig. 4.3 srtm_39_04.asc

gramma di pre-processamento geogrid.exe. Il formato geogrid accettato da WRF è un formato raster binario contenente una matrice dati.

a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	a_{20}
a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}
a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
a_1	a_2	a_3	a_4	a_5

inizio file → fine file

a_1	a_2	...	a_{20}
-------	-------	-----	----------

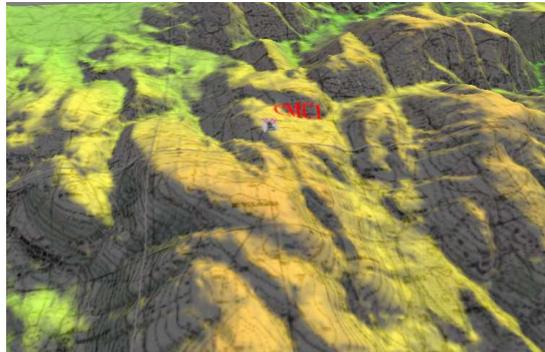
Tabella 4.4: Organizzazione dei dati in un file binario geogrid.

Per la conversione del file **SRTM** dal formato ASCII al formato binario compatibile si è evitato di utilizzare il linguaggio Fortran che avrebbe aggiunto dei marcatori di inizio e fine record non riconosciuti da geogrid.exe in fase di input. A tale proposito lo script in f90 List. B.4 chiama la funzione in C List. B.3, autore Michael G. Duda, che scrive il file convertito in formato geogrid. Il nome convenzionale che deve avere un file in formato geogrid è:

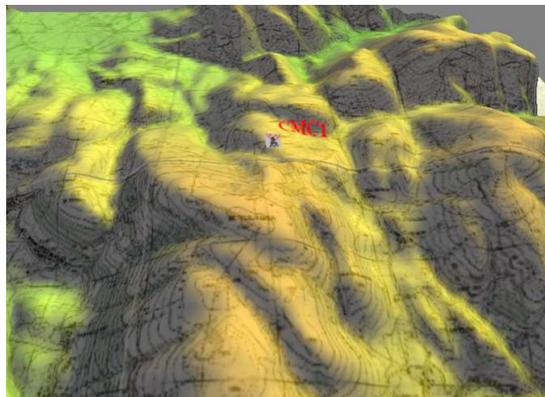
xxxxx-XXXXX.yyyyy-YYYYY

in cui “xxxxx” e “yyyyy” rappresentano gli indici di partenza delle x e delle y mentre “XXXXX” e “YYYYY” rappresentano gli indici finali delle x e delle y.

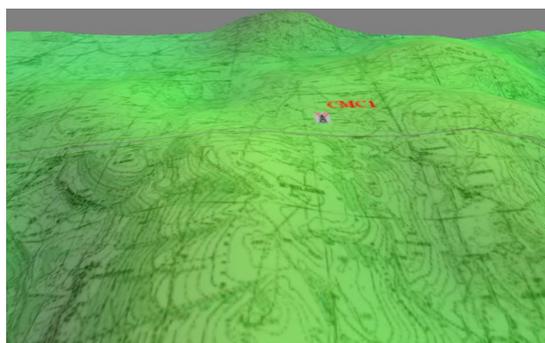
4.1. Formato dei file dati di orografia



(a) Vista del punto di installazione della torre CMC1 su terrain DEM 20m.



(b) Vista del punto di installazione della torre CMC1 su terrain DEM SRTM 90m.



(c) Vista del punto di installazione della torre CMC1 su terrain GTOPO30 900m.

Figura 4.4: Rappresentazioni DEM a 20m, GTOPO30 a 900m e SRTM a 90m di risoluzione a confronto. Si noti lo “smoothing” del SRTM e ancor più del GTOPO30 sull’orografia.

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

Il file `srtm.39_04.asc` convertito in formato geogrid assume il nome:

```
00001-06001.00001-06001
```

Il file di orografia così ottenuto è accompagnato da un opportuno file di nome “index”:

```
type = continuous
signed = yes
projection = regular_ll
dx = 0.000833333
dy = 0.000833333
known_x = 1.0
known_y = 1.0
known_lat = 39.999583575447
known_lon = 9.9995836238757
wordsize = 2
tile_x = 6001
tile_y = 6001
tile_z = 1
tile_bdr = 0
units="meters MSL"
description="Topography height"
```

in cui le grandezze da inserire sono evidenti dal nome stesso. I due file così ottenuti risiedono in una sotto cartella, di nome per esempio “SRTM”, della cartella “GEOG_WRF” in cui si trovano, tra gli altri, tutti gli altri dati di orografia alle diverse risoluzioni di griglia, gli usi del suolo, gli indici di albedo (cfr. Tab. 4.5). Per poter finalmente utilizzare i dati di orografia **SRTM** è stato necessario modificare il file “WRF/-WPS/geogrid/GEOGRID.TBL” nei campi `HGT_M`, `HGT_U` e `HGT_V` aggiungendo le informazioni relative alla nuova orografia disponibile:

```
...
interp_option =      SRTM:four_pt
...
rel_path       =      SRTM:SRTM/
...
```

4.2 Hardware di calcolo per le simulazioni con risoluzione 1000m

Per le simulazioni computazionalmente meno onerose con griglia di un chilometro, basate sull’orografia discretizzata sfruttando i file **DEM**

4.2. Hardware di calcolo per le simulazioni con risoluzione 1000m

```
pier@mindthegap /mnt/sda1/GEOG_WRF $ ls
SRTM hasynw hlenw hstdv landuse_30s
orogwd_1deg soiltype_bot_10m soiltype_top_2m topo_30s
albedo_ncep hasys hlenw hzmax landuse_5m
orogwd_20m soiltype_bot_2m soiltype_top_30s topo_5m
greenfrac hasysw hlenw islope maxsnowalb
orogwd_2deg soiltype_bot_30s soiltype_top_5m
hangl hasyw hlenw landuse_10m
modis_landuse_20class_30s orogwd_30m soiltype_bot_5m
topo_10m hanis hcnvx hslop landuse_2m orogwd_10m
soiltemp_1deg soiltype_top_10m topo_2m
```

Tabella 4.5: Contenuto della cartella GEOG_WRF.

GTOPO30, si è optato per la costruzione di un piccolo cluster a due nodi (cfr. [Vren 01]). La scelta del sistema operativo è caduta sulla distribuzione Linux Gentoo a 64bit con la quale l'autore ha maggior confidenza.



(a) Cluster Gentoo Linux a 2 nodi in fase di assemblaggio.



(b) Cluster Gentoo Linux a 2 nodi ultimato.

Figura 4.5: Cluster Gentoo Linux usato per le simulazioni con griglia di lato 1000m.

4.2.1 Caratteristiche hardware e configurazione software

Ciascun nodo è dotato di CPU quad-core Intel Q8400:

```
pier@mindthegap ~ $ cat /proc/cpuinfo
processor      : 0
```

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

```
vendor_id      : GenuineIntel
cpu family    : 6
model         : 23
model name    : Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q8400
              @ 2.66GHz
stepping     : 10
cpu MHz      : 2670.000
cache size   : 2048 KB
physical id  : 0
siblings     : 4
core id      : 0
cpu cores    : 4
apicid       : 0
initial apicid : 0
fpu          : yes
fpu_exception : yes
cpuid level  : 13
wp           : yes
flags        : fpu vme de pse tsc msr pae mce cx8 apic sep
              mtrr pge mca cmov pat pse36 clflush dts acpi
              mmx fxsr sse sse2 ss ht tm pbe syscall nx lm
              constant_tsc arch_perfmon pebs bts rep_good
              pni dtes64 monitor ds_cpl vmx est tm2 ssse3
              cx16 xtpr pdcm sse4_1 xsave lahf_lm
              tpr_shadow vnmi flexpriority
bogomips     : 5327.62
clflush size : 64
cache_alignment : 64
address sizes : 36 bits physical, 48 bits virtual
power management:
```

mentre la memoria è di 1Gb per core:

```
pier@mindthegap ~ $ cat /proc/meminfo
MemTotal:      4021600 kB
MemFree:       3936536 kB
...
```

Il disco rigido del nodo zero, ossia il nodo master con hostname “mindthegap”, ha le seguenti caratteristiche:

```
Disk /dev/sda: 500.1 GB, 500107862016 bytes
255 heads, 63 sectors/track, 60801 cylinders
Units = cylinders of 16065 * 512 = 8225280 bytes
Disk identifier: 0x000b1cb5
```

Device	Boot	Start	End	Blocks	Id	System
/dev/sda1	*	1	9119	73248336	83	Linux
/dev/sda2		9120	10093	7823655	82	Linux swap/Solaris
/dev/sda3	*	10094	19212	73248367+	83	Linux
/dev/sda4		19213	60801	334063642+	83	Linux

Il filesystem è di tipo ext3 journaled. Il file “/etc/fstab” riporta l’organizzazione delle cartelle e dei device di montaggio:

4.2. Hardware di calcolo per le simulazioni con risoluzione 1000m

```
# <fs>          <mountpoint>    <type><opts>          <dump/pass>
/dev/sda3       /                ext3 noatime             0 1
/dev/sda2       none             swap sw                0 0
/dev/sda1       /mnt/sda1        ext3 auto,user,exec     0 0
/dev/sda4       /mnt/sda4        ext3 auto,user,exec     0 0
/dev/myHD120GB1 /mnt/myHD120GB1 auto noauto,rw,user,exec 0 0
/dev/HD1T-1     /mnt/HD1T-1     auto noauto,rw,user,exec 0 0
/dev/HD1T-2     /mnt/HD1T-2     auto noauto,rw,user,exec 0 0
/dev/cdrom      /mnt/cdrom       auto noauto,ro,user,exec 0 0
shm             /dev/shm         tmpfs nodev,nosuid,noexec 0 0
```

Il nodo zero è dotato di quattro schede di rete, di cui una opzionale wireless USB gestita dal modulo `ndiswrapper`:

```
eth0 inet addr:192.168.0.129          -> LAN          100Mbps
eth1 inet addr:192.168.99.2 mindthegap-gb -> nodo1 dati   1000Mbps
eth2 inet addr:192.168.100.2 mindthegap    -> nodo1 comun. 100Mbps
```

eth0 ha indirizzo 192.168.0.129, collega il cluster alla rete LAN ed è parte della scheda madre. Essendo sempre alimentata è possibile inviare il pacchetto magico tramite WOL per l'accensione in remoto:

```
mindthegap etc # ethtool eth0 | grep Speed
Speed: 100Mb/s
```

eth1 ha indirizzo 192.168.99.2 (`mindthegap-gb`), è una scheda a 1000 Mbps collegata sulla sotto rete 192.168.99.0 ad una di analoga velocità sul nodo uno per il traffico dati:

```
mindthegap etc # ethtool eth1 | grep Speed
Speed: 1000Mb/s
```

eth2 ha indirizzo 192.168.100.2 (`mindthegap`), è una scheda da 100 Mbps collegata sulla sotto rete 192.168.100.0 ad una di analoga velocità sul nodo uno per il traffico dati:

```
mindthegap etc # ethtool eth2 | grep Speed
Speed: 100Mb/s
```

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

```

pier@mindthegap ~ $ cat /etc/hosts
127.0.0.1    localhost        localhost.localdomain
::1         localhost
192.168.100.2  mindthegap
192.168.100.3  node1
192.168.100.4  node2
#####
192.168.99.2   mindthegap-gb
192.168.99.3   node1-gb
192.168.99.4   node2-gb

```

Il nodo zero esporta alcune delle sue cartelle su filesystem di rete in modo da essere codivise con il nodo uno o altri eventualmente aggiunti successivamente:

```

pier@mindthegap /etc $ cat /etc/exports
# /etc/exports: NFS file systems being exported.  See exports(5).
#/diskless/192.168.100.21
#192.168.100.21(sync,rw,no_root_squash,no_all_squash,no_subtree_check)
#
/opt                \
192.168.100.3/4(sync,ro,no_root_squash,no_all_squash,no_subtree_check)
/usr/portage        \
192.168.100.3/4(sync,rw,no_root_squash,no_all_squash,no_subtree_check)
/home               \
192.168.100.3/4(sync,rw,no_root_squash,no_all_squash,no_subtree_check)
/mnt/sda4           \
192.168.100.3/4(sync,rw,no_root_squash,no_all_squash,no_subtree_check)
/mnt/sda1           \
192.168.100.3/4(sync,rw,no_root_squash,no_all_squash,no_subtree_check)
/mnt/HD1T-1        \
192.168.100.3/4(sync,rw,no_root_squash,no_all_squash,no_subtree_check)
/mnt/HD1T-2        \
192.168.100.3/4(sync,rw,no_root_squash,no_all_squash,no_subtree_check)

```

Il nodo zero funge anche da server ntp per il sincronismo dell'ora:

```

mindthegap etc # cat ntp.conf

server ntp1.ien.it
restrict ntp1.ien.it
server ntp2.ien.it
restrict ntp2.ien.it

stratum 10

driftfile          /var/lib/ntp/ntp.drift

logfile /var/log/ntp
broadcast 192.168.100.255

restrict default kod

```

4.2. Hardware di calcolo per le simulazioni con risoluzione 1000m

```
restrict 127.0.0.1
restrict 192.168.100.0 mask 255.255.255.0
```

Il kernel è il 2.6.31:

```
mindthegap etc # uname -ar
Linux mindthegap 2.6.31-gentoo-r6 #25 SMP Thu Jul 29 16:27:18 CEST
2010 x86_64 Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q8400 @ 2.66GHz GenuineIntel
GNU/Linux
```

Nel file di configurazione del GRUB boot loader è stato previsto l’echo di avvio su terminale seriale qualora il monitor esterno non fosse disponibile:

```
pier@mindthegap /etc $ cat /boot/grub/grub.conf
default 0
timeout 5
splashimage=(hd0,2)/boot/grub/splash.xpm.gz

title Gentoo wifi
root (hd0,2)
kernel /boot/kernel_wifi root=/dev/sda3 vga=792 console=ttyS0,9600
```

I moduli strettamente indispensabili caricati sono:

```
mindthegap etc # lsmod
Module                Size  Used by
rt73usb                26396  0
crc_itu_t              2040   1 rt73usb
rt2x00usb              10392   1 rt73usb
rt2x00lib              28536   2 rt73usb,rt2x00usb
mac80211              133256  2 rt2x00usb,rt2x00lib
cfg80211              80656   2 rt2x00lib,mac80211
atl2                  27216   0
via_rhine              22704   0
asus_atk0110           7848   0
pcspkr                 2936   0
```

Il demone SSH è in ascolto sulla porta 12022 ed accetta la trasmissione in remoto di X11:

```
mindthegap etc # cat /etc/ssh/ssh_config
ForwardX11 yes
StrictHostKeyChecking no
Port 12022
```

L’autenticazione mediante scambio di chiavi col nodo uno consente il lancio in remoto di comandi e programmi parallelizzati, facendo uso di appositi script “wrapper” scritti ad-hoc per l’esportazione delle variabili di ambiente. I servizi avviati ai vari run level sul nodo zero sono:

```
mindthegap etc # rc-update -s
bootmisc | boot
checkfs | boot
```

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

```

checkroot | boot
clock | boot
consolefont | boot
    gpm | default
    hald | default
hostname | boot
keymaps | boot
    local | default nonetwork
localmount | boot
modules | boot
net.lo | boot
netmount | default
    nfs | default
    ntpd | default
portmap | default
rmnologin | boot
sensord | default
sshd | default
syslog-ng | default
urandom | boot
vixie-cron | default
xinetd | default

```

Il nodo zero accende e configura le schede di rete tramite il file di avvio `/etc/conf.d/local.start`:

```

mindthegap etc # cat /etc/conf.d/local.start
#####
# wired connection #
#####
ifconfig eth0 192.168.0.129 up
route add default gw 192.168.0.1 dev eth0
#####
#/usr/bin/wlan0.up #
#####
echo
echo
echo "Setto eth1 192.168.99.2 up ..."
ifconfig eth1 192.168.99.2 up
echo
echo "Setto eth2 192.168.100.2 up ..."
ifconfig eth2 192.168.100.2 up
echo
echo "Abilito fooldns..."
cp /etc/resolv.conf.fooldns /etc/resolv.conf
echo
echo "Abilito modalita wol su on board eth0"
echo
ethtool -s eth0 wol g
echo
##### Partenza node1 #####
echo "Avvio i nodi..." #

```

4.2. Hardware di calcolo per le simulazioni con risoluzione 1000m

```
echo                                     #
/sbin/node.up                           #
#####
```

e al termine della fase di avvio accende i nodi collegati:

```
mindthegap etc # cat /sbin/node.up
# node1
wol -i 192.168.100.255 00:26:18:d6:88:10
```

Per quanto riguarda la fase di spegnimento lo script local.stop provvede all'arresto dei nodi:

```
pier@mindthegap ~ $ cat /etc/conf.d/local.stop
export FIRST_NODE="node1"
export LAST_NODE="node1"
export nodo=$FIRST_NODE
##### Arresto nodi
echo "Arresto i nodi... attendere..."
#for nodo in $FIRST_NODE $LAST_NODE; do
echo "Arresto i nodi... attendere..."
ssh -p 12022 $nodo halt
while [ 1 ]
do
    if ping -c 1 -q -W 2 -w 2 $nodo >/dev/null
    then
        echo "Attendere..."
        sleep 1
    else
        echo
        echo "Nodo $nodo arrestato"
        break
    fi
done
echo "Abilito modalita wol su on board eth0"
echo
ethtool -s eth0 wol g
echo
echo "See you back soon on MindTheGap"
echo
```

Il nodo uno viene avviato dal nodo zero e, durante questa fase, configura le schede di rete:

eth0 ha indirizzo 192.168.100.3 (node1), è collegata alla sottorete 192.168.100.0 ed è parte della scheda madre. Essendo sempre alimentata è possibile inviare il pacchetto magico tramite WOL per l'accensione in remoto;

eth1 ha indirizzo 192.168.99.3 (node1-gb), è collegata alla sottorete 192.168.99.0.

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

```
node1 ~ # ethtool eth0 | grep Speed
Speed: 100Mb/s

node1 ~ # ethtool eth1 | grep Speed
Speed: 1000Mb/s

pier@node1 ~ $ cat /etc/conf.d/net
config_eth0=("192.168.100.3 netmask 255.255.255.0 brd 192.168.100.255")
config_eth1=("192.168.99.3 netmask 255.255.255.0 brd 192.168.99.255")

pier@node1 ~ $ cat /etc/hosts
127.0.0.1      localhost      localhost.localdomain
::1          localhost
192.168.99.2  mindthegap-gb
192.168.99.3  node1-gb
192.168.99.4  node2-gb

192.168.100.2 mindthegap
192.168.100.3 node1
192.168.100.4 node2
```

e monta le cartelle esportate dal primo:

```
# <fs> <mountpoint><type> <opts> <dump/pass>
/dev/sda1 / ext3 noatime 0 1
/dev/sda2 none swap sw 0 0
/dev/sdb1 /mnt/hd-250GB auto auto,rw,user,exec 0 0
mindthegap:/mnt/HD1T-1 /mnt/HD1T-1 \
autosync,rw,hard,nolock,rsize=8192,wsiz=8192,noauto,user,exec 0 0
mindthegap:/home /home \
nfs sync,rw,hard,nolock,rsize=8192,wsiz=8192 0 0
mindthegap:/mnt/sda4 /mnt/sda4 \
nfs sync,rw,hard,nolock,rsize=8192,wsiz=8192 0 0
mindthegap:/mnt/sda1 /mnt/sda1 \
nfs sync,rw,hard,nolock,rsize=8192,wsiz=8192 0 0
mindthegap:/opt /opt \
nfs sync,rw,hard,nolock,rsize=16384,wsiz=8192 0 0
mindthegap:/usr/portage /usr/portage nfs defaults,rw 0 0
shm /dev/shm tmpfs nodev,nosuid,noexec 0 0
```

Il nodo uno avvia i seguenti servizi:

```
node1 ~ # rc-update -s
bootmisc | boot
checkfs | boot
checkroot | boot
clock | boot
consolefont | boot
gpm | default
hald | default
hostname | boot
keymaps | boot
```

4.2. Hardware di calcolo per le simulazioni con risoluzione 1000m

```

local |      default nonetwork
localmount | boot
modules | boot
net.eth0 |      default
net.eth1 |      default
net.lo | boot
netmount |      default
ntpd |      default
rmnologin | boot
rpc.statd |      default
sensord |      default
sshd |      default
syslog-ng |      default
urandom | boot
vixie-cron |      default
xinetd |      default
    
```

e lo script di avvio local.start configura la scheda di rete per un successivo riavvio tramite pacchetto wol:

```

node1 ~ # cat /etc/conf.d/local.start
ethtool -s eth0 wol g
    
```

Il servizio ntp fa riferimento al nodo zero per l'aggiornamento dell'orario:

```

node1 ~ # cat /etc/conf.d/ntpd
NTPDATE_WARN="n"
NTPDATE_CMD="ntpddate"
NTPDATE_OPTS="-b mindthegap"
    
```

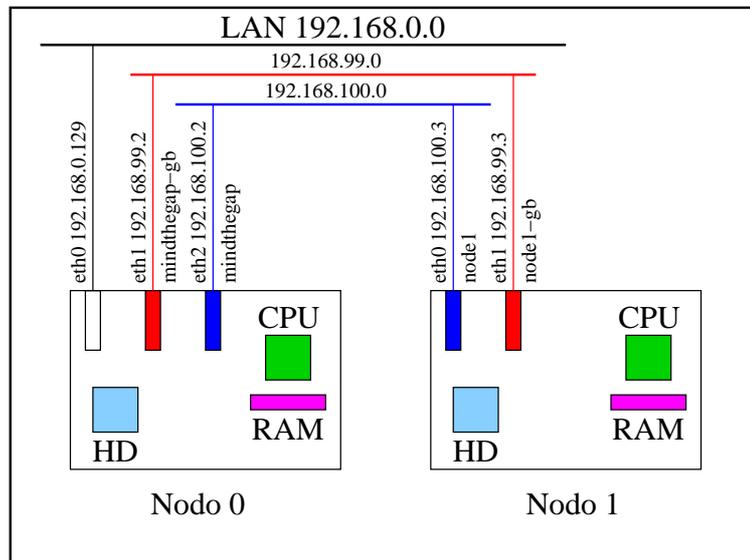


Figura 4.6: Schema di collegamento delle schede di rete.

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

4.2.2 Configurazione del resource manager e dello scheduler

È stato installato il resource manager Torque³. Esso fornisce tramite `pbs_server` tutte quelle funzionalità di basso livello necessarie per la partenza, la messa in attesa, la cancellazione e il monitoraggio dei job e lavora in collaborazione con uno scheduler. Torque stesso è dotato di uno scheduler interno, `pbs_sched`, ma viene sempre utilizzato in coppia con scheduler esterni come ad esempio MAUI. L’interazione di MAUI col resource manager avviene tramite scambio di messaggi secondo un protocollo stabilito su determinate porte. L’utente percepisce lo scheduler ed il resource manager, come un’unica entità logica e può sottomettere job e comandare operazioni, senza curarsi dei meccanismi di interazione tra i due. Il resource manager prevede l’esistenza di un “batch system” la configurazione del quale permette all’utente di disinteressarsi delle macchine e delle risorse sulle quali il suo job viene eseguito. In particolare devono essere definiti:

MARTERNODE il nodo master sul quale gira `pbs_server`;

SUBMIT/INTERACTIVE NODES i nodi dai quali l’utente può sottomettere i suoi job;

COMPUTE NODES i nodi lavorano sui job sottomessi e sui quali deve girare il `pbs_mom`;

RESOURCES le risorse disponibili in termini di dischi, memoria, rete, manager delle licenze software.

Il flusso di elaborazione di un job può essere suddiviso in quattro passi:

1. creazione di uno script apposito in cui, tra l’altro, vengono richieste le risorse per il job ed il tempo previsto di run;
2. sottomissione dello script creato tramite il comando `qsub`;
3. esecuzione del job che, una volta messo in coda e successivamente avviato allorché le risorse richieste diventano disponibili, può essere monitorato con il comando `qstat`;
4. finalizzazione notificata tramite un file di messaggi di output nella cartella da cui è stato lanciato il job.

³Si veda: <http://www.adaptivecomputing.com/resources/docs/torque/2-5-9/index.php>

4.2. Hardware di calcolo per le simulazioni con risoluzione 1000m

```

pier@mindthegap /mnt/sda4/WRF/WRFV3/test/em_real $ cat run.exe
#!/bin/bash
#PBS -l nodes=2:ppn=4
#PBS -q batch
#PBS -V
PBS -l walltime=120:00:00
MPIDIR=/mnt/sda4/WRFiFort/bin
WKDIR=/home/pier/Programmi/WRF/WRFV3/test/em_real
cd $WKDIR
$MPIDIR/mpirun -np 1 -mca btl_tcp_if_include eth1 $WKDIR/wrf.wrap
    
```

Tabella 4.6: Script da sottomettere tramite qsub a pbs_server.

```

pier@mindthegap /mnt/sda4/WRF/WRFV3/test/em_real $ cat wrf.wrap
#!/bin/bash
. /mnt/WRF/WRF/inizia.sh
ulimit -s unlimited
export WKDIR=/mnt/WRF/WRF/WRFV3/test/em_real
export MPIRUN=/mnt/WRF/WRF/bin
cd $WKDIR
$WKDIR/wrf.exe
    
```

Tabella 4.7: Script wrapper per lanciare wrf.exe.

Quando il job viene sottomesso al pbs_server con il comando qsub, Torque comunica con lo scheduler il quale cerca dei nodi disponibili. Trovati dei nodi adatti ad eseguire il job lo scheduler manda la lista di questi al pbs_server il quale invia il job al primo della lista. Questo nodo, designato come nodo di esecuzione e chiamato “*mother superior*”, riceve oltre al job anche le istruzioni di esecuzione. Gli altri nodi di calcolo sono chiamati “*sister moms*”. L’avvio del server pbs Torque avviene tramite il demone /etc/init/pbs_server il quale ha la sua cartella di spool in /var/spool/torque. In questo caso il nodo zero, oltre ad essere il nodo server del resource manager:

```

pier@mindthegap ~ $ cat /var/spool/torque/server_name
mindthegap-gb

mindthegap ~ # hostname
mindthegap
    
```

è esso stesso un nodo di calcolo:

³Immagine tratta da: [http://doc.science.unitn.it/wiki/Il_Cluster_di_Scienze_\(Cisca-Cluster\)](http://doc.science.unitn.it/wiki/Il_Cluster_di_Scienze_(Cisca-Cluster))

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

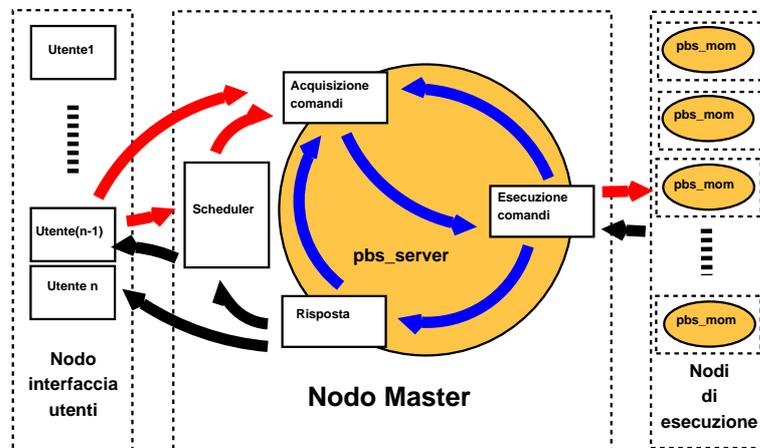


Figura 4.7: Schema di funzionamento del resource manager e dello scheduler³.

```
mindthegap ~ # cat /var/spool/torque/mom_priv/config
arch          x86_64
opsys        Gentoo
$pbsserver   mindthegap-gb #note: hostname running pbs_server
$logevent    255           #bitmap of which events to log
size [fs=/mnt/sda4]

mindthegap ~ # ssh node1 cat /var/spool/torque/mom_priv/config
arch          x86_64
opsys        Gentoo
$pbsserver   mindthegap-gb #note: hostname running pbs_server
$logevent    255           #bitmap of which events to log
size [fs=/mnt/sda4]
```

Una volta avviati Torque e MAUI si è dovuta creare una coda di lavori le cui caratteristiche sono visibili con il comando qmgr:

```
mindthegap ~ # qmgr
Max open servers: 4
Qmgr: p s
#
# Create queues and set their attributes.
#
#
# Create and define queue batch
#
create queue batch
set queue batch queue_type = Execution
```

4.2. Hardware di calcolo per le simulazioni con risoluzione 1000m

```

set queue batch resources_max.nodect = 3
set queue batch resources_default.nodes = 3
set queue batch resources_default.walltime = 120:00:00
set queue batch enabled = True
set queue batch started = True
#
# Set server attributes.
#
set server scheduling = True
set server acl_hosts = mindthegap-gb
set server managers = root@*
set server operators = pier@*
set server default_queue = batch
set server log_events = 511
set server mail_from = adm
set server scheduler_iteration = 600
set server node_check_rate = 150
set server tcp_timeout = 6
set server submit_hosts = mindthegap-gb
set server submit_hosts += node1-gb
set server submit_hosts += node2-gb
set server next_job_number = 289
Qmgr:

```

con il comando `pbs_server -t create`.

Si è scelto MAUI⁴ scheduler per interagire con Torque. Maui è uno job scheduler open source multi-piattaforma per cluster e super-computer. Nato con scopo di massimizzare l'utilizzazione del batch system. Consiste in un articolato insieme di strumenti di scheduling avanzato, basato su esecuzione prioritaria dei job, ripartizione equa delle risorse di calcolo tra gli utenti e meccanismi di ottimizzazione dell'attività del batch system. Oltre alla configurazione IP/nome su `/etc/hosts`, deve anche essere predisposto il file `/etc/hosts.equiv`:

```

mindthegap ~ # cat /etc/hosts.equiv
mindthegap-gb
node1-gb
node2-gb

mindthegap ~ # ssh node1 cat /etc/hosts.equiv
mindthegap-gb
mindthegap
node1-gb
node1

```

Il sistema Torque - MAUI viene avviato dallo script in Tab. 4.8

⁴<http://www.adaptivecomputing.com/resources/docs/maui/mauiadmin.php>

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

```
mindthegap ~ # cat $(which pbs_run)
sudo ssh node1-gb /etc/init.d/pbs_mom start
#sudo ssh node2-gb /etc/init.d/pbs_mom start
sudo /etc/init.d/pbs_mom start
sudo /etc/init.d/pbs_server start
sleep 4
sudo maui
```

Tabella 4.8: Script di avvio della coppia Torque - MAUI.

4.3 Installazione di WRF-ARW sul cluster del DIISM dell'UNIVPM

Il cluster del **DIISM** dell'**UNIVPM** è costituito da una macchina front-end e otto nodi di calcolo.



Figura 4.8: Cluster con otto nodi del DIISM dell'UNIVPM.

Il front-end è una macchina con processore Intel quad-core:

```
pierp@clsdipen:~$ cat /proc/cpuinfo
processor       : 0
vendor_id     : GenuineIntel
cpu family    : 6
model        : 26
model name    : Intel(R) Xeon(R) CPU E5506 @ 2.13GHz
```

4.3. Installazione di WRF-ARW sul cluster del DIISM dell'UNIVPM

```
stepping      : 5
cpu MHz       : 2127.994
cache size    : 4096 KB
physical id   : 0
siblings      : 4
core id       : 0
cpu cores     : 4
apicid        : 0
initial apicid : 0
fpu           : yes
fpu_exception : yes
cpuid level   : 11
wp            : yes
flags         : fpu vme de pse tsc msr pae mce
               cx8 apic sep mtrr pge mca cmov
               pat pse36 clflush dts acpi mmx
               fxsr sse sse2 ss ht tm pbe syscall
               nx rdtscp lm constant_tsc arch_perfmon
               pebs bts rep_good pni monitor ds_cpl
               vmx est tm2 sse3 cx16 xtpr dca
               sse4_1 sse4_2 popcnt lahf_lm
bogomips     : 4259.63
clflush size  : 64
cache_alignment : 64
address sizes : 40 bits physical, 48 bits virtual
power management:
```

con 6Gb di memoria RAM:

```
pierp@clsdipen:~$ cat /proc/meminfo
MemTotal:      6123208 kB
...
```

mentre ciascuno degli otto nodi è equipaggiato con processori AMD otto core:

```
pierp@node2:~$ cat /proc/cpuinfo
processor       : 0
vendor_id     : AuthenticAMD
cpu family    : 16
model         : 4
model name    : Quad-Core AMD Opteron(tm) Processor 2378
stepping      : 2
cpu MHz       : 2412.361
cache size    : 512 KB
physical id   : 0
siblings      : 4
core id       : 0
cpu cores     : 4
```

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

```
apicid      : 0
initial apicid : 0
fpu         : yes
fpu_exception : yes
cpuid level : 5
wp          : yes
flags       : fpu vme de pse tsc msr pae mce
             cx8 apic sep mtrr pge mca cmov
             pat pse36 clflush mmx fxsr sse
             sse ht syscall nx mmxext fxsr_opt
             pdpe1gb rdtscp lm 3dnowext 3dnow
             constant_tsc rep_good pni monitor
             cx16 popcnt lahflm cmp_legacy svm
             extapic cr8_legacy abm sse4a misalignsse
             3dnowprefetch osvw ibs skinit wdt
bogomips    : 4828.96
TLB size    : 1024 4K pages
clflush size : 64
cache_alignment : 64
address sizes : 48 bits physical, 48 bits virtual
power management: ts ttp tm stc 100mhzsteps hwpstate
```

con 16Gb di memoria RAM:

```
pierp@node2:~$ cat /proc/meminfo
MemTotal:      16474332 kB
...
```

Il sistema operativo è Linux Debian ed il kernel è il 2.6.26.

```
pierp@node2:~$ uname -ar
Linux node2 2.6.26-2-amd64 #1
SMP Mon Jun 13 16:29:33 UTC 2011 x86_64 GNU/Linux
```

È stata compilata la versione WRF-3.2.1 e con essa tutti i pacchetti di librerie tali da rendere l’installazione autonoma. Alcuni dei pacchetti richiedono infatti delle specifiche versioni di certe librerie che avrebbero potuto cambiare con l’aggiornamento periodico del cluster stesso. Si è in questo modo resa l’installazione indipendente dalle possibili variazioni future delle librerie residenti sul cluster. Tutti gli script di compilazione sono riportati nell’Appendice B. Si deve osservare che, vista la mole enorme di dati prodotta da una simulazione di un giorno (circa 1.8Gb), si è deciso di ridurre il numero delle variabili di output scritte procedendo alla modifica opportuna del file \$WRFDIR/-WRFV3/Registry/Registry.EM seguendo quanto consigliato nel manuale [Wang 10]. Lo script B.30 compila nel codice il file con il numero ridotto di variabili strettamente necessario.

4.4. Configurazione del modello di mesoscala WRF-ARW

4.4 Configurazione del modello di mesoscala WRF-ARW

Prima di avviare una simulazione con il modello **WRF** occorre predisporre due file di configurazione (cfr. Fig.2.19):

namelist.wps questo file (cfr. List. 4.1) contiene tutti i parametri necessari ai tre moduli di pre processamento: **ungrib.exe** nel campo di valori \mathcal{E}_{ungrib} , **geogrid.exe** nel campo di valori $\mathcal{E}_{geogrid}$ e **metgrid.exe** nel campo di valori $\mathcal{E}_{metgrid}$. Il campo di valori \mathcal{E}_{share} contiene dei parametri utilizzati da tutti i predetti moduli (Si veda per i dettagli completi [Wang 10]). In particolare nel campo \mathcal{E}_{share} :

wrf_core indica quale tra i modelli **ARW** e **NMM** disponibili usare;

max_dom è il numero di domini innestati, che in questo lavoro è stato scelto pari a cinque;

start_date rappresenta la data e ora di inizio simulazione per ciascun dominio. Le cinque date sono ovviamente uguali;

end_date rappresenta la data e ora di fine simulazione per i cinque domini;

interval_seconds rappresenta la lunghezza temporale, in secondi, dei dati meteo in formato GRIB2, di ciascun file di condizioni al contorno. In questo caso 6h;

io_form_geogrid formato dei file di output intermedi prodotti dal modulo geogrid. Il valore 2 indica la richiesta di avere l'output in formato **NetCDF**.

Nel campo $\mathcal{E}_{geogrid}$ vengono indicati i parametri che definiscono la griglia di calcolo e l'estensione del dominio.

ref_lat ref_lon definiscono le coordinate del centro del dominio;

map_proj dichiara il tipo di proiezione cartografica da usare;

truelat truelat2 definiscono le latitudini di intersezione del cono della proiezione di Lambert;

parent_id parent_id_ratio definiscono i gradi di innestamento tra i vari domini ed il rapporto di infittimento del dominio figlio rispetto al padre (cfr. Fig. 4.9). Il rapporto di infittimento è comunemente scelto pari a 3;

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

e_we e_sn definiscono l’estensione da ovest ad est e da sud a nord del dominio in numero di nodi;

dx dy definiscono la dimensione di cella del dominio più grande. Da questa si ottengono le dimensioni di ciascun dominio e delle sue celle: $D1 = 16.200 \cdot 24 = 388.8\text{Km}$, $dx_2 = 16200/3 = 4.5\text{Km}$, $dx_3 = 1.8\text{Km}$, $dx_4 = 600\text{m}$ e $dx_5 = 200\text{m}$. Per le simulazioni condotte adottando l’orografia **SRTM** con risoluzione 90m, si è scelto di adottare, dopo una fase di prove con varie risoluzioni, una griglia con passo 200m. Questa è risultata il miglior compromesso dal punto di vista degli oneri computazionali. Per quanto riguarda le simulazioni condotte ricorrendo alla rappresentazione dell’orografia con dati **GTOPO30**, si è adottata la classica griglia con passo 1000m poiché comunemente ritenuta ad alta risoluzione nella letteratura disponibile;

geog_data_res si indica quali file di orografia usare per discretizzare il terreno in ciascun dominio. In questo caso il terreno nel dominio d1 viene modellizzato con dati **GTOPO30** mentre tutti gli altri con dati **SRTM**;

geog_data_path indica a geogrid.exe in quale cartella si trovano i dati di orografia;

Listing 4.1: File namelist.wps per la simulazione con orografia SRTM

```
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 5,
start_date = '2010-04-25_00:00:00', '2010-04-25_00:00:00', '
    2010-04-25_00:00:00', '2010-04-25_00:00:00', '2010-04-25
    _00:00:00'
end_date   = '2010-05-01_00:00:00', '2010-04-25_00:00:00', '
    2010-04-25_00:00:00', '2010-04-25_00:00:00', '2010-04-25
    _00:00:00'
interval_seconds = 21600
io_form_geogrid = 2,
/
&geogrid
parent_id      = 1, 1, 2, 3, 4,
parent_grid_ratio = 1, 3, 3, 3, 3,
i_parent_start = 1, 9, 9, 9, 9,
j_parent_start = 1, 9, 9, 9, 9,
e_we           = 25, 25, 25, 25, 25,
e_sn           = 25, 25, 25, 25, 25,
geog_data_res  = '30s', 'SRTM', 'SRTM,_SRTM', 'SRTM',
```

4.4. Configurazione del modello di mesoscala WRF-ARW

```
dx = 16200,  
dy = 16200,  
map_proj = 'lambert',  
ref_lat = 43.01000986,  
ref_lon = 12.9595,  
truelat1 = 30.0,  
truelat2 = 60.0,  
stand_lon = 12.9595,  
geog_data_path = '/home/pierp/Programmi/GEOG.WRF'  
/  
&ungrib  
out_format = 'WPS',  
prefix = 'FILE',  
/  
&metgrid  
fg_name = 'FILE'  
io_form_metgrid = 2,  
/
```

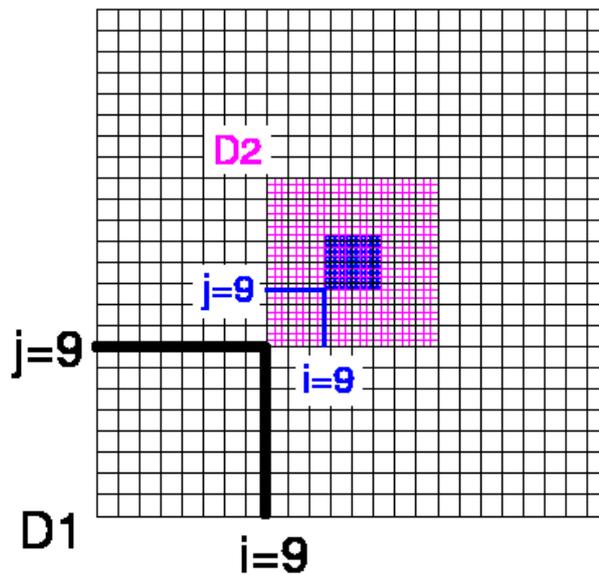
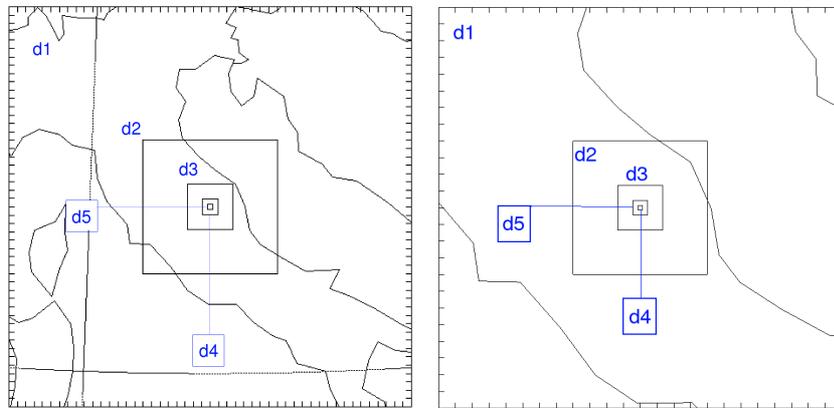


Figura 4.9: Schema di costruzione dei domini innestati.

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico



(a) Cinque domini innestati per la simulazione con orografia GTOPO30. (b) Cinque domini innestati per la simulazione con orografia SRTM.

Figura 4.10: Domini innestati per le simulazioni con risoluzione massima di 1000m e 200m.

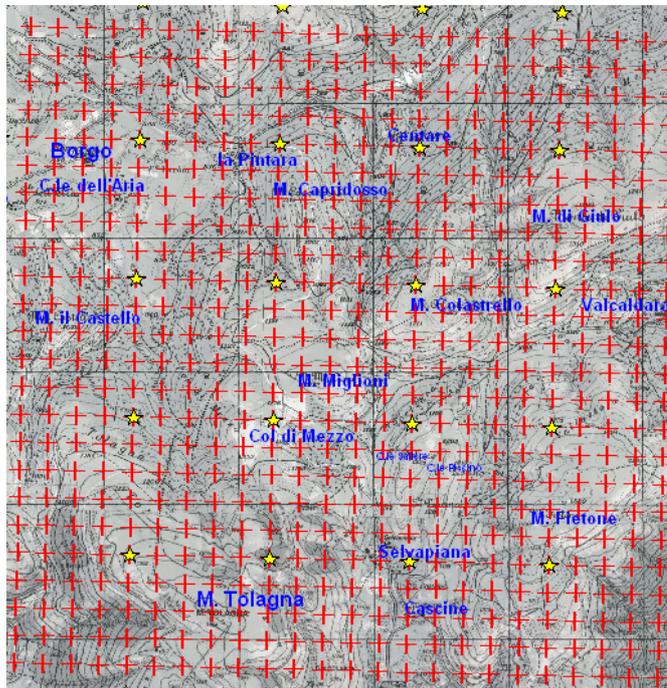
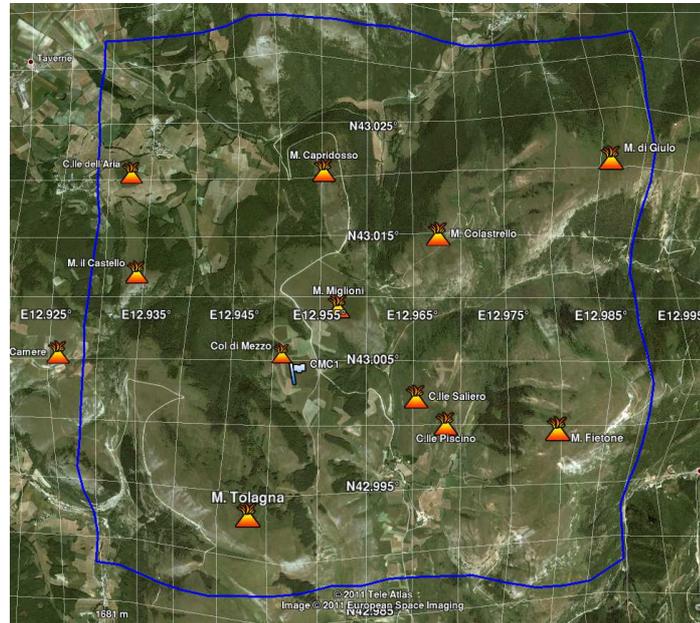
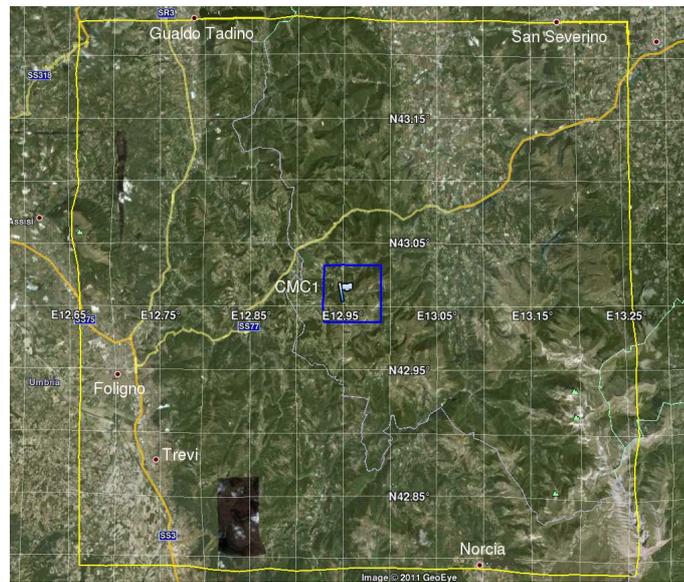


Figura 4.11: Confronto tra le griglie con passo 200m (+) e con passo 1000m (*).

4.4. Configurazione del modello di mesoscala WRF-ARW



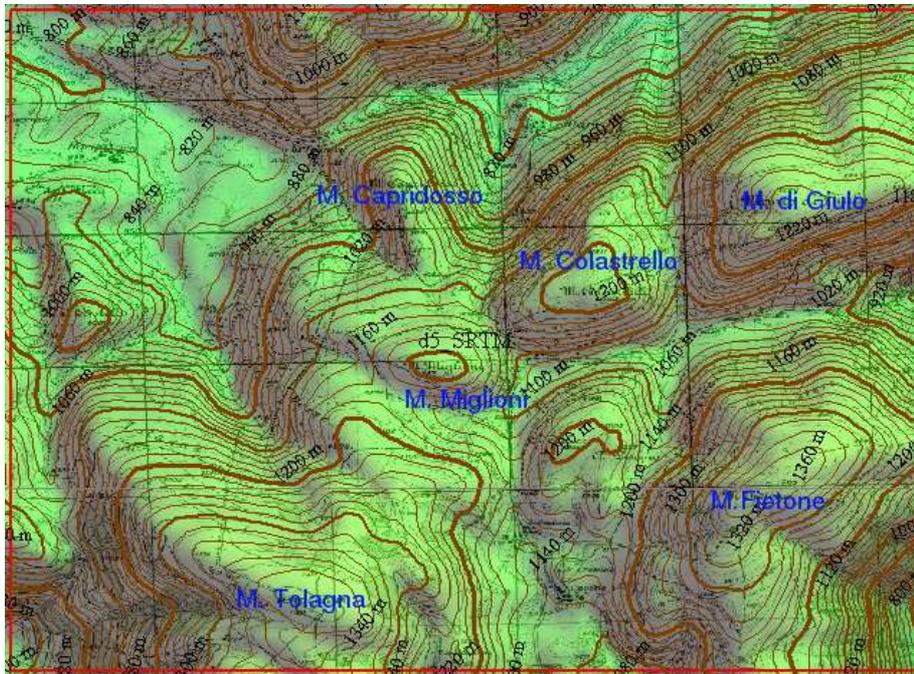
(a) Estensione del dominio di calcolo d5 con risoluzione 200m.



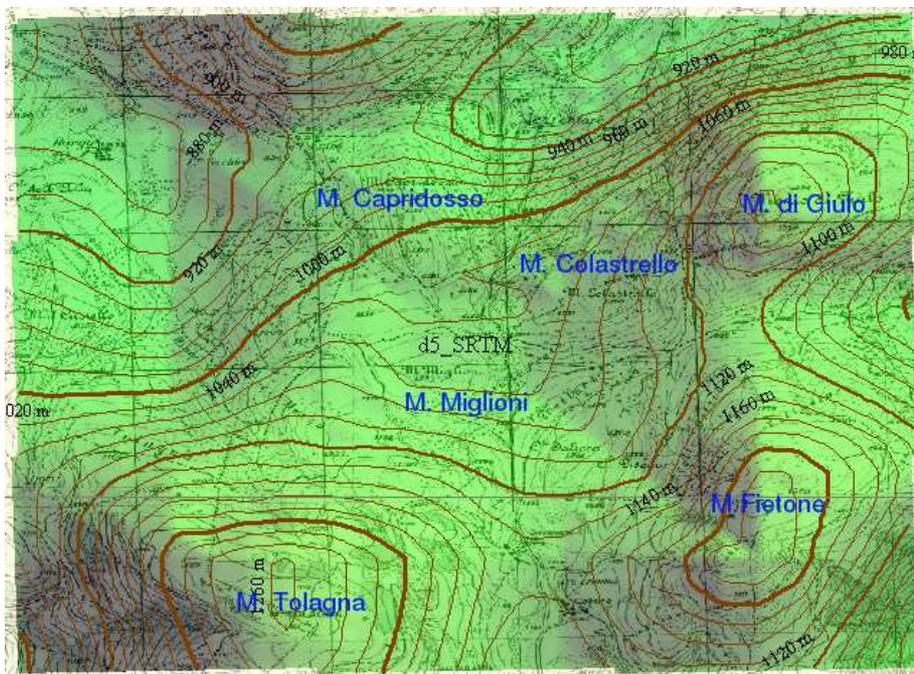
(b) Estensione del dominio di calcolo d5 con risoluzione 1000m.

Figura 4.12: Estensione dei domini interni d5 per le simulazioni con 200m e 1000m di griglia.

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

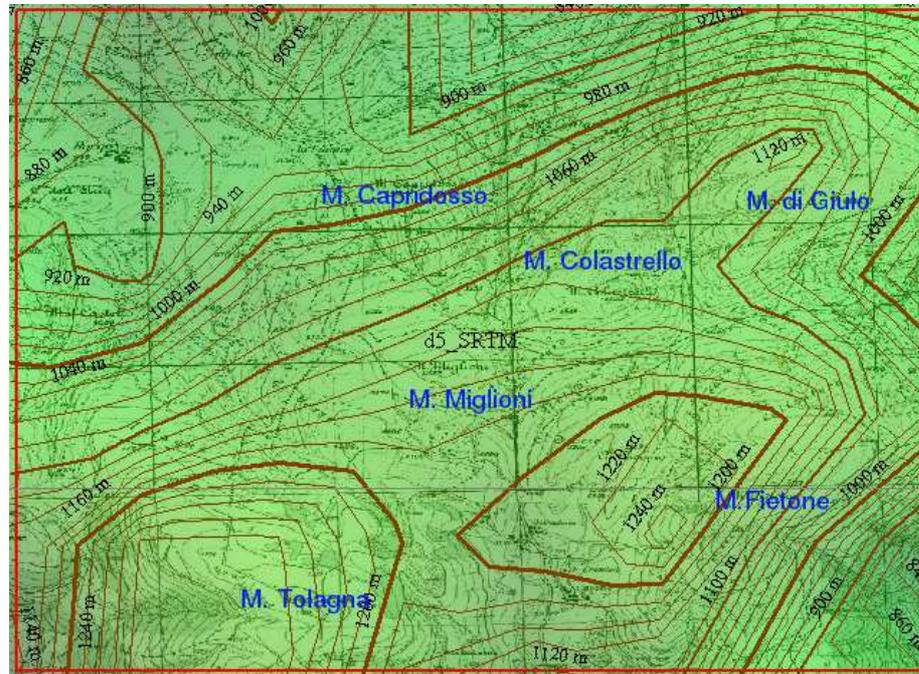


(a) Isolivello a 20m del dominio di calcolo con orografia SRTM 90m.



(b) Isolivello a 20m del dominio di calcolo con orografia SRTM 200m.

4.4. Configurazione del modello di mesoscala WRF-ARW



(c) Isolivello a 20m del dominio di calcolo con orografia GTOPO30.

Figura 4.12: Confronto tra i domini di calcolo rappresentati con diversa risoluzione di orografia attraverso le curve di isolivello. L’orografia a 200m di griglia è quella vista da WRF che ingerisce i dati SRTM 90m rigrigliandoli a 200m con geogrid.exe. Nell’orografia GTOPO30 tutti i monti tranne il Tolagna sono stati spianati.

namelist.input questo file (cfr. List. 4.2) contiene tutti i parametri numerici e fisici necessari al modulo real.exe e al programma wrf.exe. Per la loro descrizione dettagliata si veda [Wang 10]. Di seguito si esamineranno alcuni dei valori più interessanti. Il campo di valori:

time_control contiene le informazioni relative alla data e ora di inizio e fine simulazione, alla lunghezza temporale dei file di input (interval.seconds=21600 sec ossia 6h);

domains contiene i parametri caratteristici er la definizione dei domini ed il loro nesting;

physics contiene i parametri necessari ad impostare i modelli di parametrizzazione richiesti nei sottodomini di calcolo;

dynamics contiene i parametri di calibrazione dei modelli di integrazione numerica delle equazioni (tranne il passo di in-

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

tegrazione temporale principale *time_step* del **RK3** che viene fissato in *Edomains*);

bdy_control contiene i parametri per la definizione dell’origine e le caratteristiche delle condizioni al contorno;

namelist_quilt contiene i parametri relativi alla simulazione in modalità parallela (distributed o shared memory).

Si da di seguito una breve descrizione dei parametri utilizzati nelle simulazioni eseguite nel corso del presente lavoro di ricerca.

input_from_file indica se l’input dei vari sottodomini innestati avviene da file. Il valore booleano è TRUE in quanto l’input dalle condizioni al contorno avviene dai file intermedi precedentemente prodotti in fase di pre-processing in **WPS**;

history_interval indica la richiesta di scrivere i risultati di calcolo ogni cinque minuti per il dominio d5, un’ora per i domini d4 e d3, due ore per il d2 e tre ore per il d1;

frames_per_output_file è il numero di intervalli temporali in ciascun file di risultati prodotto: i file di dati di output sono giornalieri. Infatti per il dominio d5 si hanno 288 frame intervallati da 5 minuti, ovvero 1440 minuti ossia un giorno;

restart valore booleano che attesta se la sessione da lanciare è una di restart, che prevede l’esistenza di file di condizioni iniziali “wfrstxxx”, o no;

restart_interval intervallo di tempo per la scrittura dei file di restart. Nel List. 4.2 vale 6h, questo vuol dire che nel caso si dovesse verificare un crash del codice, la simulazione potrebbe essere fatta ricominciare ripartendo da non più di sei ore prima relativamente al tempo dell’ultimo dato scritto;

time_step è il passo temporale di integrazione dello schema temporale **RK3** (v. 3.54 in [Skam 08a]), scelto in base al valore massimo ammesso dal **CFL** pari a 1.61, avendo scelto uno schema avvertivo spaziale del terzo ordine (v. [Wick 02]). Come suggerito in [Wang 10], il passo temporale viene scelto pari a non più di $6 \cdot \Delta x_{\text{Km}}$ secondi. Il passo temporale che ha dato risultati accettabili in termini di stabilità e velocità di esecuzione del codice è stato di 300sec per le simulazioni con griglia del dominio d5 di 1000m e 30sec per le simulazioni con griglia del dominio d5 di 200m;

4.4. Configurazione del modello di mesoscala WRF-ARW

time_step_sound il passo acustico è scelto sempre in base alle limitazioni imposte dal **CFL** relativo questa volta alla velocità del suono (v. 3.55 in [Skam 08a]). In pratica il codice ammette solo valori pari a 1/4 o 1/6 del passo temporale principale, ovvero `time_step_sound=4,8`. Imponendo il valore zero si lascia al codice il compito di calcolarlo in automatico;

max_dom indica il numero di domini innestati;

num_metgrid_levels indica il numero di nodi relativi alla discretizzazione verticale che è stata fatta nei file prodotti da `metgrid.exe`. Può essere ottenuto con il comando `ncdump`:

```
ncdump met_em.d05.2010-04-25_00\ :00\ :00.nc | \
grep num_metgrid_levels | grep =
      num_metgrid_levels = 27 ;
```

eta_levels rappresenta l’elenco dei valori assunti dalla coordinata η in corrispondenza dei nodi verticali (cfr. Par. 2.5). Le quote dei corrispondenti centri cella sono elencate in Tab. 4.9.

9.9947	29.9940	59.9777	99.9789
149.9560	209.9563	279.9225	359.9221
449.8744	549.8728	659.8209	799.6792
999.2752	1239.2740	1479.2690	1719.2682
1998.6917	2494.0338	3477.1143	4961.8531
6924.2688	8958.3593	10916.6350	12953.6436
14906.0564	17191.9675		

Tabella 4.9: Quote dal suolo dei centri delle celle di calcolo.

dx dy rappresentano le dimensioni orizzontale e verticale delle celle pertinenti ciascun dominio innestato. Partendo dalla dimensione di griglia più fitta, ossia quella del dominio d5, si procede nel calcolare le dimensioni dei domini esterni tenendo conto del rapporto di infittimento, generalmente scelto pari a 3;

feedback imposta la modalità *one-way* o *two-way* (cfr. Par. 2.3.3);

mp_physics opzioni di microfisica (v. pag. 29) per ciascuno dei domini innestati. Nelle simulazioni numeriche condotte nel presente lavoro sono stati usati lo “WRF Single Moment 3 class (WSM3) scheme” (v. [Hong 04]) per i domini più esterni d1 d2 e d3, mentre il “WSM6 scheme” (WSM6) (v. [Hong 06]) per i domini d4 e d5. Il modello WSM3 contempla la presenza di acqua allo stato di vapore, acqua e ghiaccio

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

in nube, pioggia e neve. Al di sopra della temperatura di congelamento si hanno acqua in nube e pioggia mentre al di sotto della temperatura di congelamento il modello prevede la presenza di ghiaccio in nube e neve. È stato scelto perché riconosciuto come uno schema efficiente dal punto di vista computazionale anche se purtroppo non tratta la presenza di acqua sopraffusa e stati di fusione gradualmente. Il modello WSM6 è più raffinato del precedente e contempla la presenza di particelle nevose assegnando una velocità alla miscela formata dalla neve e dalle particelle di quest’ultima in relazione al loro rapporto di mescolanza. Secondo [Skam 08a] questo modello è molto efficiente rispetto agli altri disponibili soprattutto quando si adottano valori fini di griglia.

sf_sfclay_physics imposta lo schema di surface layer (v. pag. 32) nei vari domini di calcolo. Nelle simulazioni è stato impostato lo schema “MM5 similarity” basato sulla teoria di Monin Obukhov e sfrutta delle funzioni di similarità già precalcolate e memorizzate in tabelle di look-up. Lo schema introduce una velocità convettiva (sebbene una corrispondente lunghezza di rugosità convettiva non sia stata introdotta nell’implementazione attuale) che esalta i flussi di calore, umidità e quantità di moto di superficie. L’adozione di questo schema di surface layer vincola la scelta dello schema di PBL a solo alcuni disponibili in WRF. Le prove iniziali condotte, a causa di problemi di stabilità numerica, hanno portato alla scelta dell’accoppiata MM5 similarity con lo Yonsei University scheme del PBL.

cu_physics in ciascuno dei domini di calcolo imposta lo schema di formazione dei cumuli a livello di sotto griglia (v. Pag. 31) nelle simulazioni si è usato lo schema Kain-Fritsch per i domini più esterni d1 e d2 mentre per i domini più fini d3 d4 e d5 con lato minore di 5Km si è impostata la soluzione diretta. Quello di Kain-Fritsch (v. [Kain 04]) è un modello di nube semplice con ascendenze e discendenze di umidità ed include gli effetti di detrainment ed entrainment.

bl_pbl_physics imposta il modello di PBL (v. pag. 32) da adottare. La scelta del modello di PBL è caduta sullo Yonsei University (YSU) PBL. Questo schema tratta esplicitamente lo strato di entrainment al top del PBL che è valutato proporzionalmente ai flussi di galleggiamento di superficie. Il top del

4.4. Configurazione del modello di mesoscala WRF-ARW

PBL viene individuato ricorrendo al numero di Richardson “bulk” posto pari a zero (cfr. Par. A.4.9).

ra_lw_physics ra_sw_physics impostano i modelli di radiazione di onda lunga ed onda corta da adottare nei domini di calcolo (v. pag. 33). Lo schema adottato nelle simulazioni per la radiazione di onda lunga è lo RRTMG. Lo stesso nome prende lo schema adottato per la radiazione di onda corta. Per una descrizione di questi schemi si veda [Sten 09].

sf_surface_physics imposta il modello di parametrizzazione della superficie del suolo (v. pag. 34). Il modello scelto nelle simulazioni è il “thermal diffusion scheme”. È il più semplice tra i modelli disponibili ed è basato su un modello di terreno a cinque strati spessi rispettivamente 1, 2, 4, 8, e 16cm al di sotto dei quali la temperatura è considerata costante (v. pag. 156). Il bilancio energetico del suolo in questo modello include il calore radiante, il calore sensibile ed il flusso latente di calore. L’umidità nel terreno è fissata secondo l’uso del terreno stesso e varia con la stagione. Non prevede in maniera esplicita l’effetto della presenza della vegetazione.

Come già osservato a proposito del modello di superficie del suolo, esiste una complessa interazione tra i vari modelli di parametrizzazione. La Tabella 2.1, tratta da [Skam 08a], riassume con completezza, in termini di variabili di ingresso e di uscita, lo scambio di informazioni tra i vari modelli.

Listing 4.2: File namelist.input

```
&time_control
run_days           = 368,
run_hours          = 0,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2010, 2010, 2010, 2010, 2010,..
start_month        = 04, 04, 04, 04, 04,..
start_day          = 25, 25, 25, 25, 25,..
start_hour         = 00, 00, 00, 00, 00,..
start_minute       = 00, 00, 00, 00, 00,..
start_second       = 00, 00, 00, 00, 00,..
end_year           = 2010, 2010, 2010, 2010, 2010,..
end_month          = 05, 05, 05, 05, 05,..
end_day            = 01, 01, 01, 01, 01,..
end_hour           = 00, 00, 00, 00, 00,..
end_minute         = 00, 00, 00, 00, 00,..
end_second         = 00, 00, 00, 00, 00,..
```

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

```

interval_seconds           = 21600,
input_from_file           = .true., .true., .true
    ., .true., .true.,
history_interval          = 180, 120, 60, 60, 5,
frames_per_outfile        = 8, 12, 24, 24, 288,
restart                   = .false.,
restart_interval          = 360,
io_form_restart           = 2
io_form_history           = 2
io_form_input             = 2
io_form_boundary          = 2
debug_level               = 1
/
&domains
time_step                 = 30
max_dom                   = 5,
s_we                      = 1, 1, 1, 1, 1,
e_we                      = 25, 25, 25, 25, 25,
s_sn                      = 1, 1, 1, 1, 1,
e_sn                      = 25, 25, 25, 25, 25,
s_vert                   = 1, 1, 1, 1, 1,
e_vert                   = 27, 27, 27, 27, 27,
num_metgrid_levels       = 27
eta_levels                = 1.000000, 0.997478,
0.994961, 0.989942, 0.984942, 0.977480, 0.970062, 0.960240,
0.950496, 0.926473, 0.912287, 0.893637,
0.866216, 0.839451, 0.813328, 0.787834,
0.754800, 0.688110, 0.444792, 0.304467,
0.223899, 0.136480, 0.087529, 0.035930,
0.000000
dx                         = 16200, 5400, 1800,
    600, 200,
dy                         = 16200, 5400, 1800,
    600, 200,
grid_id                   = 1, 2, 3, 4, 5,
parent_id                 = 1, 1, 2, 3, 4,
i-parent_start            = 1, 9, 9, 9, 9,
j-parent_start            = 1, 9, 9, 9, 9,
parent_grid_ratio         = 1, 3, 3, 3, 3,
parent_time_step_ratio   = 1, 3, 3, 3, 3,
feedback                  = 1,
/
&physics
mp_physics                = 3, 3, 3, 6, 6,
ra_lw_physics             = 4, 4, 4, 4, 4,
ra_sw_physics             = 4, 4, 4, 4, 4,
radt                      = 10, 10, 10, 10, 10,
sf_sfclay_physics        = 1, 1, 1, 1, 1,
sf_surface_physics       = 1, 1, 1, 1, 1,
num_soil_layers           = 5,
bl_pbl_physics           = 1, 1, 1, 1, 1,

```

4.5. Fase di pre processamento

```

bldt                = 0, 0, 0, 0, 0,
cu_physics          = 1, 1, 1, 0, 0,
cudt                = 0, 0, 0, 0, 0,
/
&fdda
/
&dynamics
rk_ord              = 3,
w_damping           = 1,
diff_opt            = 1,
km_opt              = 4,
diff_6th_opt        = 0,
diff_6th_factor     = 0.12, 0.12, 0.12,
                    0.12, 0.12,
base_temp           = 290.
damp_opt            = 0,
zdamp               = 5000., 5000., 5000.,
                    5000., 5000.,
dampcoef            = 0.01, 0.01, 0.01,
                    0.01, 0.01,
top_lid             = .false., .false., .
                    false., .false., .false.,
non_hydrostatic     = .true., .true., .true
                    ., .true., .true.,
moist_adv_opt        = 1, 1, 1, 1, 1,
scalar_adv_opt       = 1, 1, 1, 1, 1,
time_step_sound      = 0, 0, 0, 0, 0,
/
&bdy_control
spec_bdy_width      = 5,
spec_zone           = 1,
relax_zone          = 4,
specified           = .true., .false., .
                    false., .false., .false.,
nested              = .false., .true., .
                    true., .true., .true.,
/
&grib2
/
&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 1,
nio_groups          = 1,
/

```

4.5 Fase di pre processamento

Una volta messi a punto i parametri di calcolo nel file di configurazione *namelist.wps* la simulazione numerica inizia con la fase di pre processamento. In questa fase devono essere lanciati i programmi:

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

ungrib.exe che estrae i file meteorologici in formato **GRIB**. **WRF** richiede l’uso di file in formato GRIB2, una forma compressa del formato originale GRIB1. Questi file sono disponibili per da: <http://dss.ucar.edu/cgi-bin/dataaccess?dsnum=083.2>, previa registrazione, dall’anno 2007 ad oggi. I file di dati meteo scaricati vanno salvati in una cartella accessibile ad ungrib.exe. Il nome di tali file ha la codifica:

```
fnl_YYYYMMDD_HH_mm -> fnl_20120104_06_00
```

e contengono i dati meteo rielaborati dall’University Corporation for Atmospheric Research (**UCAR**) relativi alle sei ore successive all’ora riportata nel nome del file. Una dettagliata descrizione della codifica **GRIB** è disponibile presso <http://www.wmo.int/pages/prog/www/WDM/Guides/Guide-binary-2.html>. I file meteo devono essere linkati nella cartella in cui verrà eseguito il programma ungrib.exe e assegnato loro un nome tipo:

GRIBFILE.XXX

utilizzando la routine `link_grib.csh` propria dell’installazione di **WPS**. Le caratteristiche dei file in formato **GRIB** possono variare secondo l’ente che li rende pubblici in termini di tipi di variabili contenute. Per avere una corretta estrazione dei dati è quindi necessaria una tabella di traduzione che viene fornita a corredo dell’installazione, per la maggior parte degli enti che forniscono i dati meteo. Nel caso dei file qui utilizzati la tabella è costituita dal file `Vtable.GFS`. I file `Vtable` devono contenere comunque un set minimo di variabili necessarie per il funzionamento di **WRF** (v. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/UNGRIB/ungrib_req_fields.htm). I file spaccettati da ungrib.exe sono riscritti in un formato intermedio compatibile con `metgrig.exe`.

geogrid.exe che definisce il dominio di simulazione ed interpola i vari dati di superficie sui nodi della griglia producendo i file `geo_em*`. Infatti `geogrid`, oltre al calcolo della latitudine e della longitudine dei nodi della griglia, interpola su di questi le categorie del suolo, l’altezza orografica, la temperatura media di profondità del suolo, la frazione mensile di vegetazione, l’albedo medio mensile, il massimo valore dell’albedo in presenza di neve, le categorie di pendenza.

4.6. Fase di processamento

metgrid.exe che interpola orizzontalmente i dati meteo sui nodi del dominio di calcolo e produce i file intermedi `met_em*`. I file di output prodotti da `metgrid.exe` costituiscono l’input di `wrf.exe`.

Tutta la fase di lancio dei tre programmi di pre processamento viene affidata allo script Listato B.32. Questo script, che deve essere presente insieme al file `namelist.wps`, nella sottocartella WPS della cartella principale del mese di simulazione, es `2009-5d-2way-mf_SRTM_Apr`, ricrea la struttura delle directory ed i link simbolici di cui hanno bisogno i programmi sopra descritti al fine di poter eseguire diverse simulazioni in parallelo su nodi differenti del cluster del **DIISM**. La struttura delle cartelle, ciascuna relativa ad un mese dell’anno di simulazione ha la seguente organizzazione:

```
pierp@clsdipen:~/Programmi/WRF2/cases/Montecavallo_24x24_SRTM$
ls -R | grep ":$" | sed -e 's/:$//' -e 's/[^-][^\/*\//--/g' \
-e 's/^/ /' -e 's/-/|/'
.
|-2009-5d-2way-mf_SRTM_Apr
|---WPS
|---em_real
|---meteodata
|-2009-5d-2way-mf_SRTM_May
|---WPS
|---em_real
|---meteodata
|-2009-5d-2way-mf_SRTM_Sep
|---WPS
|---em_real
|-----out
|---meteodata
```

Se l’esecuzione è andata a buon fine si può passare alla fase di simulazione vera e propria.

4.6 Fase di processamento

Prima della fase di simulazione vera e propria, è necessario lanciare il programma `real.exe` e solo successivamente `wrf.exe`.

real.exe questo programma esegue una interpolazione verticale dei valori delle grandezze contenute nei file `met_em*` prodotti dal programma `metgrid.exe`, crea le condizioni al contorno e iniziali ed esegue dei controlli sulla consistenza dei dati.

wrf.exe è il programma principale.

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

Come già fatto in fase di pre processamento, anche ora viene usato un apposito script (v. List [B.33](#)). Questo permette di eseguire in successione i due comandi sopra descritti, dopo la costruzione dei link simbolici e delle cartelle necessari per il funzionamento nella cartella `em_real`. In questa dovranno essere presenti lo script `bash run.case` ed il file di configurazione `namelist.input`.

Durante la fase di simulazione, in fase di test del programma, si è visto che la dimensione dei file di output prodotti era di circa 1.8GB per giorno di simulazione. Questo determinava un rallentamento del codice, una necessità di disporre di enormi risorse di storage e dei tempi di post processamento lunghissimi. Si è deciso di ridurre le dimensioni dei file di output facendo scrivere solo le variabili necessarie alle simulazioni. Per fare ciò è stato necessario alterare il file `/Programmi/WRF2/WRFV3/Registry/Registry.em` secondo quanto indicato in [\[Wang 10\]](#) e ricompilare di nuovo il pacchetto WRF. In questo modo si sono ottenuti dei file di output giornalieri di 167MB. A tale proposito basti pensare che una variabile come ad esempio il disturbo di pressione (memorizzata in valori float a 32bit ogni 5 minuti) ha bisogno di $24 \cdot 24 \cdot 25 \cdot 288 \cdot 4/1024^2 = 15.82\text{MB}$ di memoria nel caso di un dominio di 24×24 celle, con 25 sigma layer, per un giorno di simulazione ($60 \cdot 24/5 = 288$).

Un altro problema riscontrato, soprattutto nella fase di esecuzione del codice WRF con orografia SRTM, è stato l'estrema instabilità numerica che in particolari giorni dell'anno si manifestava producendo la divergenza del calcolo. Si è provveduto all'occorrenza a ridurre opportunamente il time step di calcolo alla metà e a volte ad un terzo del valore originale di 30sec. È stato a tale proposito scritto un apposito programma bash per l'invio di un SMS di avviso in caso di crash del codice (v. List. [B.34](#)) richiamato dal loop a riga di comando:

```
while [ 1 ]; do
    if [ pidof wrf.exe ]; then
        :
    else
        yes | sms pierp 'Errore: wrf.exe in crash'
    fi
    sleep 600
done
```

Al termine delle simulazioni si è potuto procedere alla fase di post processamento. I tempi di simulazione, al netto dei tempi morti necessari per il riavvio in caso di divergenza del codice e delle fasi di pre e post processamento sono quelli riportati in [Tabella 4.10](#).

4.7. Fase di post processamento

Periodo di simulazione: 1 maggio 2009 - 30 aprile 2010						
Dati terreno	Griglia	Estensione d5	CPU		Tempo complessivo	
SRTM	200m	16.2Km	N.8 core Processor 2.4GHz, RAM,N.4 DIISM cluster	AMD 2378, 16Gb nodi	20gg	
GTOPO30	1000m	48Km	N.4 core Q8400, 4Gb RAM,N.2	INTEL 2.66GHz, nodi	13gg	

Tabella 4.10: Tempi di simulazione dei domini d5 con differenti risoluzioni di griglia.

4.7 Fase di post processamento

Al termine della fase di simulazione sono disponibili i file dati in formato **NetCDF** dai quali vanno estratti dati di interesse quali ad esempio le componenti della velocità. L’elaborazione di tali file avviene tramite programmi appositamente scritti che permettono la riorganizzazione dei dati in un formato più facilmente fruibile. Il lancio della fase di post processamento crea automaticamente, nella cartella di lavoro, una struttura di directory nelle quali vengono memorizzati i vari file prodotti.

```
/mnt/HD1T-1/WRF/Montecavallo_SRTM_24x24_200m/5d-2way-mf-Apr-2010
```

```
.
|-anem
|---txt
|-cwd
|---rose
|---txt
|-info
|-init
|-input
|-out
|---UV
|-xyz
```

anem in questa cartella sono memorizzati i file **.AV**. Questi file sono in sostanza degli “anemometri virtuali”. Memorizzati in formato binario, contengono i dati di interesse in relazione all’altezza e al tempo di rilevazione. Il nome dell’anemometro è nel formato **xxx.AV** in cui **xxx** rappresenta il numero d’ordine dell’anemometro centrato sulla cella (i, j) della griglia di calcolo formata da N_c colonne ed N_r righe ($xxx = N_c \cdot (j - 1) + i$). La struttura dei dati è quella riportata in Tabella 4.11.

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

Data ora iniz.					Parm. Superf.				SL1				...	SL_N	
YYYYMM	DD	HH	mm		PBLH	T@0	SW	LW	u	v	U	dir	T@z
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

Data ora fin.					Parm. Superf.				SL1				...	SL_N	
YYYYMM	DD	HH	mm		PBLH	T@0	SW	LW	u	v	U	dir	T@z
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

Tabella 4.11: Struttura dati degli anemometri virtuali.

anem/txt in questa cartella finiscono i file degli anemometri virtuali convertiti in formato ascii e compatibili per la lettura da parte del software di analisi Windographer.

cwd contiene i file di dati in forma binaria, delle tabelle delle occorrenze di vento (frequency table), relativi ciascuno ad una data cella. Da questi file viene determinata la densità di probabilità cumulata dei dati (cumulative wind distribution). La struttura del nome del generico file è:

`yyyy_mmm_AV_xx_level_xxx_BINS_xxx_NOP_xx.cwd`

quindi “2010_Apr_AV_202_level_149_BINS_100_NOP_12.cwd” per esempio, rappresenta la tabella delle frequenze relative all’anemometro 202 nel mese di aprile del 2010 a 149m dal suolo, organizzata in 100 bin di ampiezza 0.5m/s e 12 direzioni del vento. La struttura dei dati nei file binari .cwd è riassunta nella Tabella 4.12.

	N	NNE	...	NNW
$0 \div 0.5\text{m/s}$
:
$49.5 \div 50\text{m/s}$

Tabella 4.12: Struttura dati binari nei file di tabelle di occorrenza .cwd

cwd/txt in questa cartella sono contenuti i file .cwd in formato ascii.

cwd/rose in questa cartella sono contenute le rose dei venti, in formato post script relative alla cella ci calcolo ad una data altezza dal suolo.

4.7. Fase di post processamento

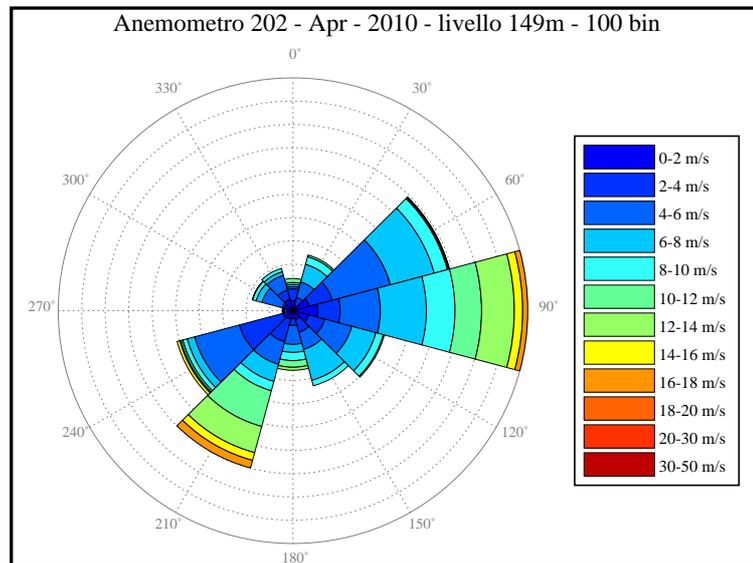


Figura 4.13: Rosa dei venti prodotta in formato post script. In questo caso è relativa all’anemometro 202, all’altezza dal suolo di 149m, nel mese di aprile 2009.

info contiene file con estensione .info in formato ASCII relativi alle coordinate dei centri cella alle varie sigma level. Le coordinate orizzontali dei centri cella sono in Universal Transverse Mercator (UTM) **WGS84** mentre le altezze dal suolo sono espresse in metri.

init questa cartella contiene file con le informazioni relative alla griglia e le sigma level di calcolo prodotti in fase di inizializzazione del post processamento.

out contiene i file di output della simulazione in formato **NetCDF**. Il nome di questi file rispetta il formato:

```
wrfout_dxx_YYYY-MM-DD_hh:mm:ss
```

Il nome “wrfout_d05_2010-04-22_18:00:00” ad esempio, è relativo quindi ai dati di output del dominio d05 a partire dalle 18:00:00 del 22 aprile del 2009. Per poter capire l’estensione temporale dei dati contenuti nel file, si può ricorrere al comando `ncdump`:

```
ncdump -v Times wrfout_d05_2010-04-22_18:00:00
...
```

Capitolo 4. Implementazione del protocollo numerico

i	j	z	zona UTM	T	X	Y	AV
:	:	:	:	:	:	:	:
7	9	29.0..	33	84	332548.063..	4763252.667..	199
8	9	29.0..	33	84	332756.722..	4763247.565..	200
9	9	29.0..	33	84	332962.935..	4763242.529..	201
10	9	29.0..	33	84	333172.410..	4763237.419..	202
11	9	29.0..	33	84	333378.623..	4763232.396..	203
:	:	:	:	:	:	:	:

Tabella 4.13: Struttura di un file .info per la sigma level a 29m dal suolo.

```

dimensions:
    Time = UNLIMITED ; // (288 currently)
...
data:

    Times =
        "2010-04-22_18:00:00",
        "2010-04-22_18:05:00",
        "2010-04-22_18:10:00",
        ...
        "2010-04-23_17:50:00",
        "2010-04-23_17:55:00" ;
}

```

il quale fornisce il numero degli output temporali (288) la data di inizio (2010-04-22_18:00:00) e la data finale (2010-04-23_17:55:00).

out/UV contiene dei file in formato binario relativi alle grandezze fisiche estratte: GLW (radiazione di onda lunga), PBLH (altezza del **PBL**), SWDOWN (radiazione di onda corta), T2 (temperatura a 2m dal suolo), TK (energia cinetica turbolenta), U e V (componenti orizzontali della velocità). Questi file vengono utilizzati in luogo del file principale per un successivo accesso ai dati durante la fase di post processamento. Si evita così di dover accedere al file principale molto più ingombrante e lento da leggere.

xyz contiene il file in formato ASCII di coordinate lat long e **UTM** dell'orografia.

Tutto il lavoro di post processamento viene svolto semplicemente lanciando in successione i due script riportati nei Listati **B.35** e **B.37**. Il

4.7. Fase di post processamento

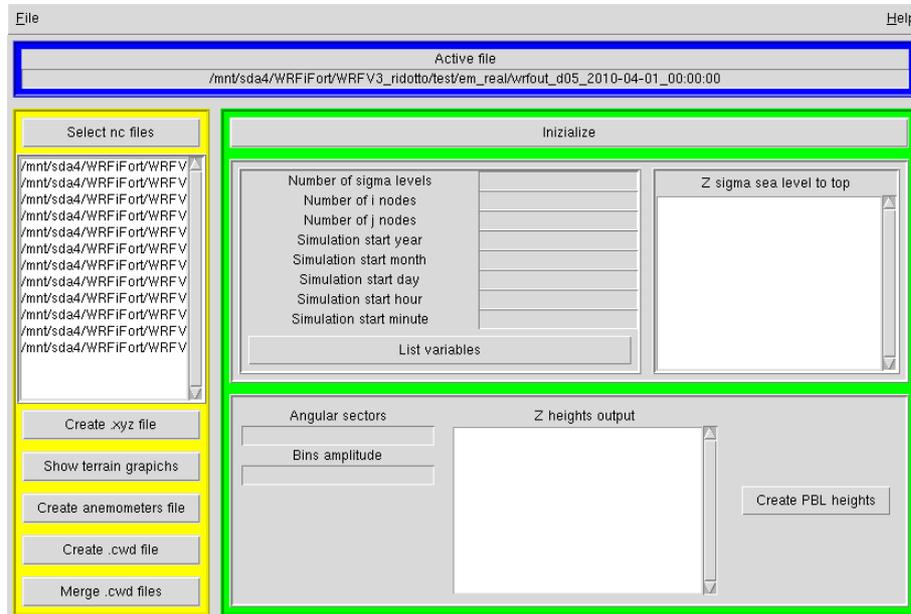


Figura 4.14: Programma WISH Analyzer.

primo in particolare lancia una interfaccia grafica dalla quale è possibile selezionare i file di output da elaborare e da quali quote (sigma level) estrarre i dati. Tutti i sorgenti dei programmi e gli script utilizzati in questa fase, opportunamente commentati, sono riportati in Appendice al Paragrafo [B.5.3](#).

Capitolo 5

Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

Nella prima parte di questo capitolo sono riportati, sotto la forma di grafici e di tabelle, i risultati prodotti dalle simulazioni numeriche ed in particolare i dati relativi al modello:

WRF con simulazioni condotte appoggiandosi a discretizzazioni di orografia a:

- 1000m utilizzando dato in formato **GTOPO30**;
- 200m utilizzando dati in formato **SRTM**;

MM5 con simulazioni condotte appoggiandosi a discretizzazioni di orografia a:

- 1000m utilizzando dato in formato **GTOPO30**;
- 200m utilizzando dati in formato **SRTM**.

Segue un confronto critico dei dati sperimentali con i dati numerici derivanti dalle simulazioni con orografia **SRTM**, ossia quelle che si sono rilevate più accurate. La Figura 5.1 riporta in maniera schematica la mappa secondo la quale sono stati prodotti e confrontati i dati.

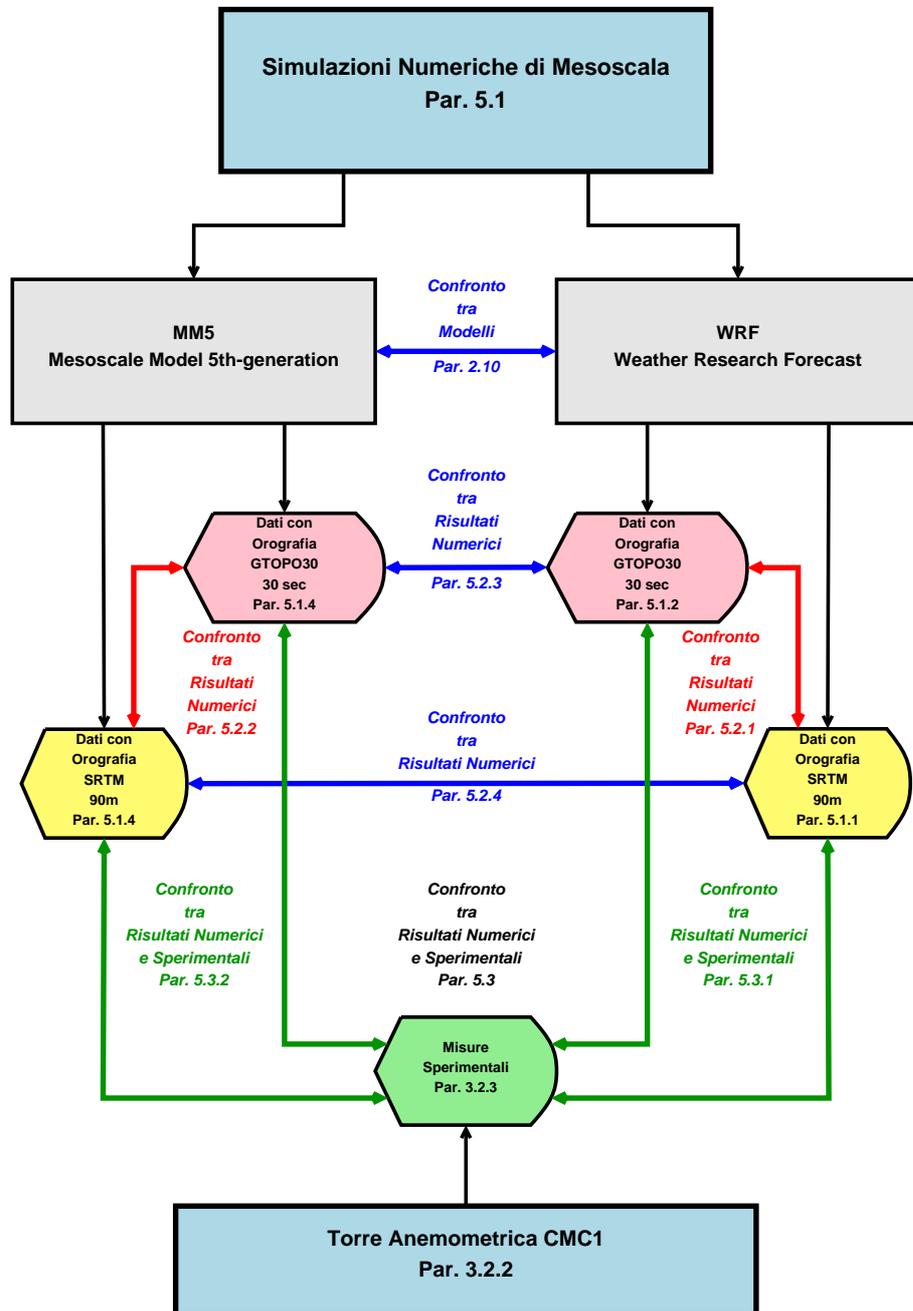


Figura 5.1: Schema riassuntivo del lavoro di confronto tra i dati.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

5.1 Risultati delle simulazioni numeriche

Si riportano di seguito i principali risultati derivanti dalle simulazioni numeriche effettuate utilizzando i modelli di mesoscala **WRF** e **MM5**. I risultati riportati sono relativi ad una altezza dal suolo di 30m. Si è scelta questa altezza poiché in fase di definizione della distribuzione delle sigma layer (cfr. Tab. 4.9), si è fatto in modo che il secondo centro griglia cadesse in corrispondenza di uno degli anemometri della torre CMC1. Si è scelto l’anemometro a 30m perché dall’analisi dei dati sperimentali, è risultato quello che ha funzionato in maniera più affidabile durante l’anno di misurazioni.

5.1.1 WRF con orografia SRTM

In Figura 5.2 è rappresentato l’andamento della velocità media mensile come calcolato da **WRF** a 30m sls, utilizzando il modello di orografia **SRTM**. Per facilità di lettura i dati sono stati anche riportati in forma esplicita nella Tabella 5.1.

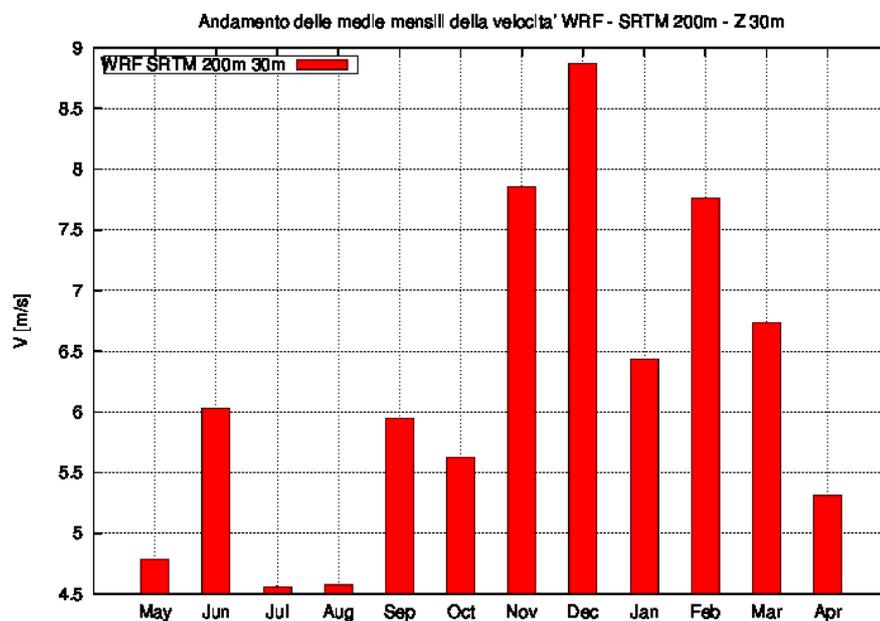


Figura 5.2: Andamento dei valori medi mensili della velocità calcolati con WRF e orografia SRTM a 30m sls.

5.1. Risultati delle simulazioni numeriche

Andamenti medi mensili delle velocità [m/s]												
Z sls [m]	2009						2010					
	Mag	Giù	Lug	Ago	Sett	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr
30m	4.78	6.03	4.56	4.57	5.95	5.63	7.85	8.8680	6.43	7.76	6.74	5.31

Tabella 5.1: Valori tabellati della velocità media mensile calcolati da WRF SRTM a 30m sls.

Per quanto riguarda l’andamento giornaliero dell’intensità del vento, si è preferito riportare gli andamenti medi relativi ai mesi di luglio e ottobre 2009, gennaio e aprile 2010. Tali mesi comprendono la parte centrale di ciascuna delle stagioni. Si è voluto in questo modo avere una idea dell’andamento delle velocità giornaliere per stagione dell’anno (v. Fig. 5.3).

In Figura 5.4 viene riportato l’andamento annuale delle temperature medie mensili, mentre, analogamente a quanto fatto per l’andamento giornaliero delle velocità, in Figura 5.5 sono riportatigli andamenti giornalieri delle temperature nei mesi di riferimento centrali delle stagioni. La temperatura è stata calcolata ad un’altezza di 10m sls poiché questa è l’altezza di installazione del termometro sulla torre CMC1.

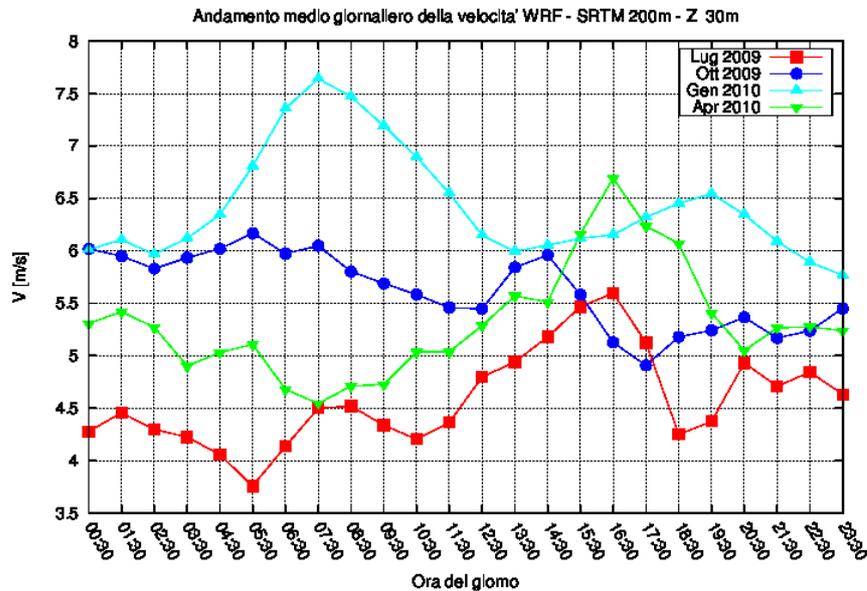


Figura 5.3: Andamenti dei valori medi giornalieri orari della velocità calcolati con WRF e orografia SRTM a 30m sls.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

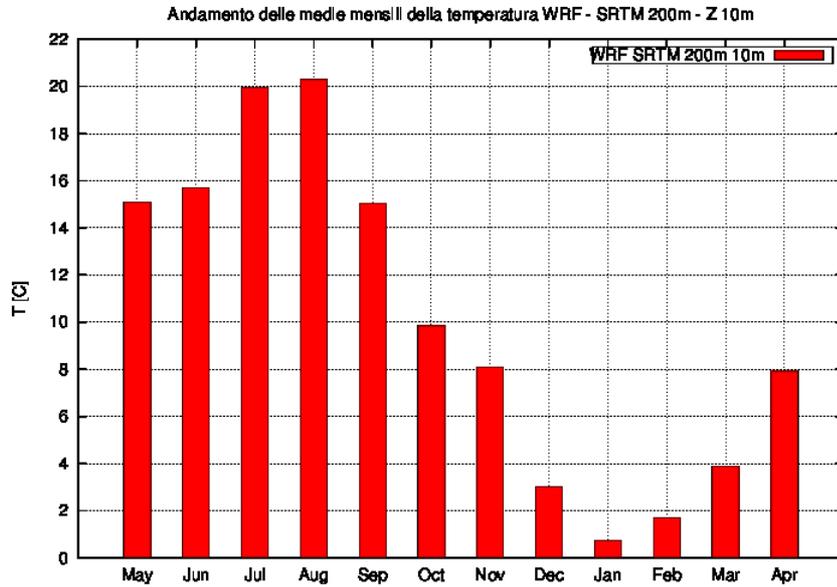


Figura 5.4: Andamento della temperatura media mensile calcolato con WRF e orografia SRTM a 10m sls.

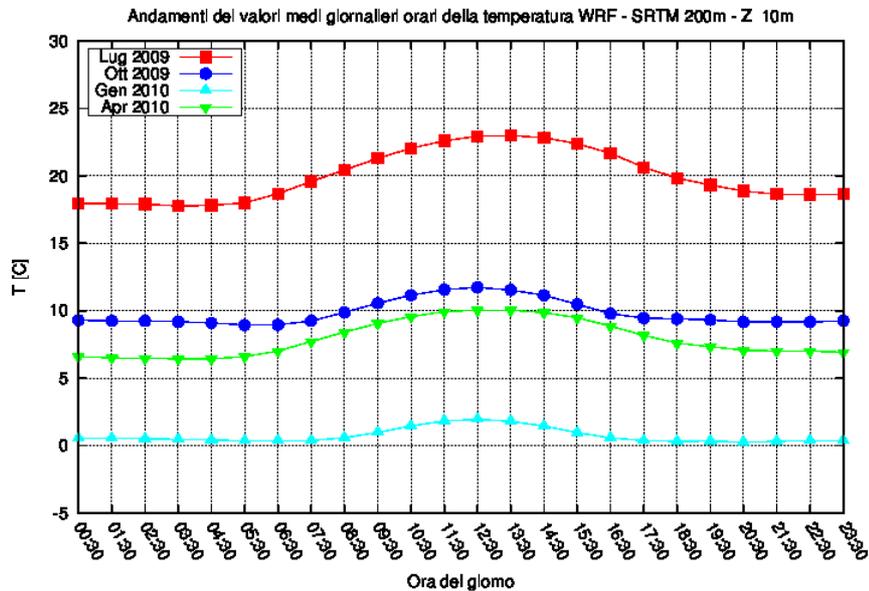
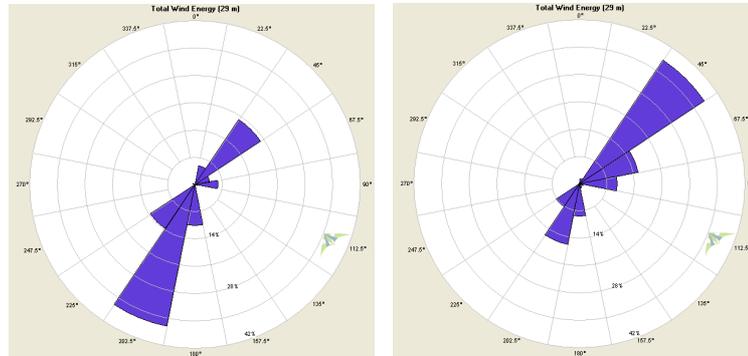


Figura 5.5: Andamenti dei valori medi giornalieri orari della temperatura calcolati con WRF e orografia SRTM a 10m sls.

5.1. Risultati delle simulazioni numeriche



(a) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da maggio a luglio 2009. (b) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da agosto a ottobre 2009.



(c) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da novembre 2009 a gennaio 2010. (d) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da febbraio a aprile 2010.

Figura 5.6: Rose dei venti trimestrali WRF con SRTM a 30m sls: energia per direzione di provenienza.

Per quanto riguarda la direzione di provenienza dei venti, la Figura 5.6 mostra l'andamento medio trimestrale delle direzioni di provenienza dei venti in relazione al contenuto di energia. Si nota come WRF indichi come la disponibilità di energia risulti in prevalenza proveniente dalle direzioni Sud-SudOvest e Nord-Est. In Figura 5.7 si riporta invece la situazione per mese dell'energia per direzione di provenienza.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

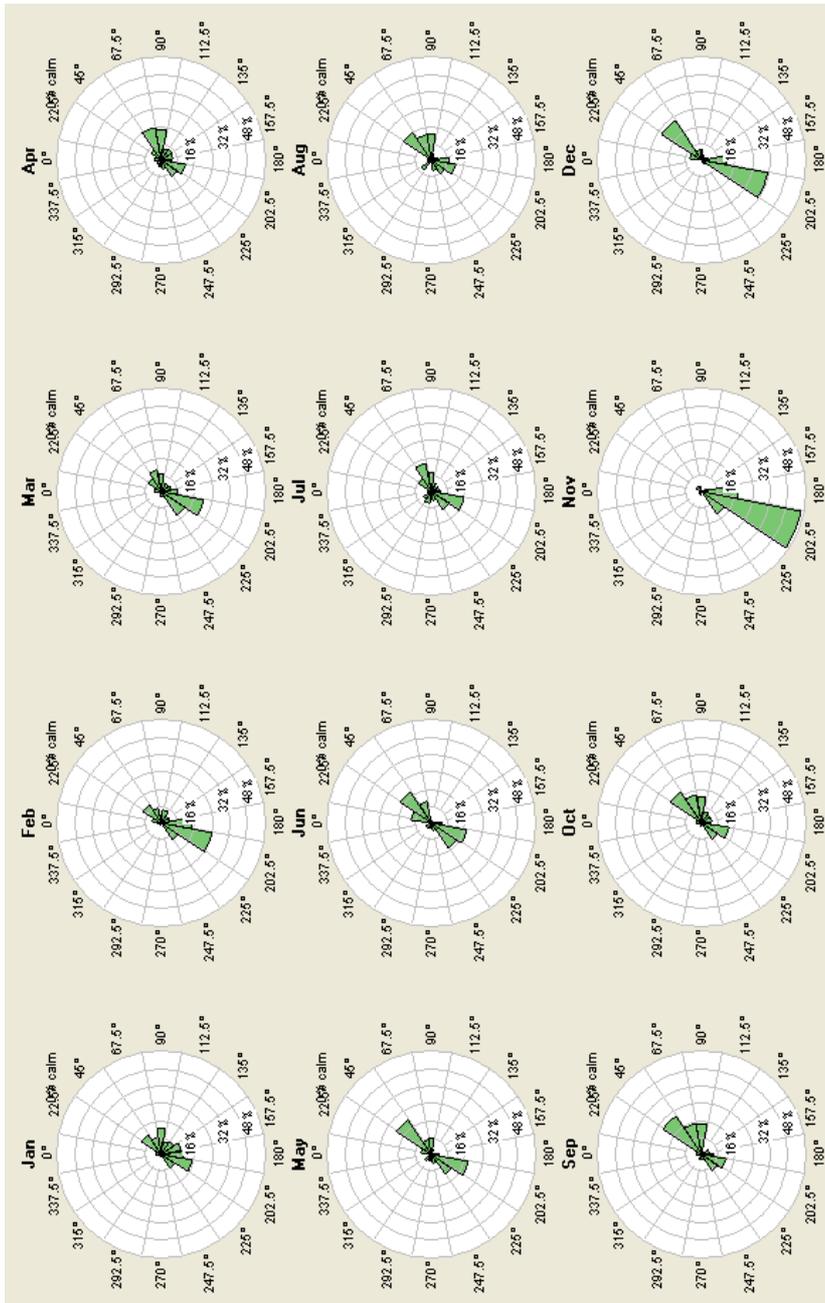


Figura 5.7: Rose dei venti mensili WRF con SRTM: energia per direzione di provenienza.

5.1. Risultati delle simulazioni numeriche

5.1.2 WRF con orografia GTOPO30

In Figura 5.8 è rappresentato l’andamento della velocità media mensile come calcolato da WRF a 30m sls, utilizzando il modello di orografia GTOPO30. Per facilità di lettura i dati sono stati anche riportati in forma esplicita nella Tabella 5.2.

Per quanto riguarda l’andamento giornaliero dell’intensità del vento, si è preferito riportare gli andamenti medi relativi ai mesi di luglio e ottobre 2009, gennaio e aprile 2010. Tali mesi comprendono la parte centrale di ciascuna delle stagioni. Si è voluto in questo modo avere una idea dell’andamento delle velocità giornaliere per stagione dell’anno (v. Fig. 5.9).

In Figura 5.10 viene riportato l’andamento annuale delle temperature medie mensili, mentre, analogamente a quanto fatto per l’andamento giornaliero delle velocità, in Figura 5.11 sono riportatigli andamenti giornalieri delle temperature nei mesi di riferimento centrali delle stagioni. La temperatura è stata calcolata ad un’altezza di 10m sls poiché questa è l’altezza di installazione del termometro sulla torre CMC1.

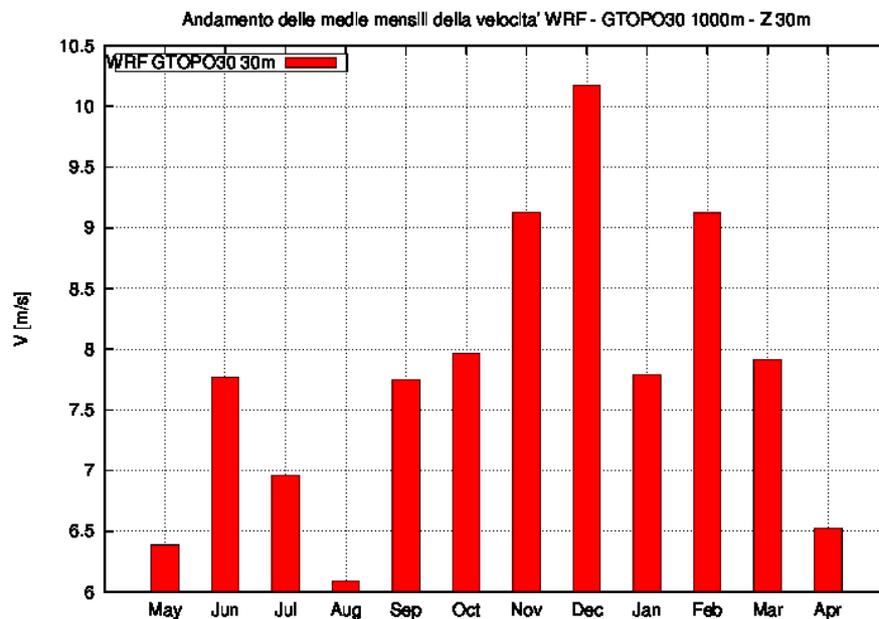


Figura 5.8: Andamento dei valori medi mensili della velocità calcolato con WRF e orografia GTOPO30 a 30m sls.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

Andamenti medi mensili delle velocità [m/s]												
Z sls [m]	2009						2010					
	Mag	Giù	Lug	Ago	Sett	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr
30m	6.38	7.77	6.96	6.09	7.75	7.96	9.12	10.17	7.79	9.12	7.91	6.52

Tabella 5.2: Valori tabellati della velocità media mensile calcolati da WRF con orografia GTOPO30 a 30m sls.

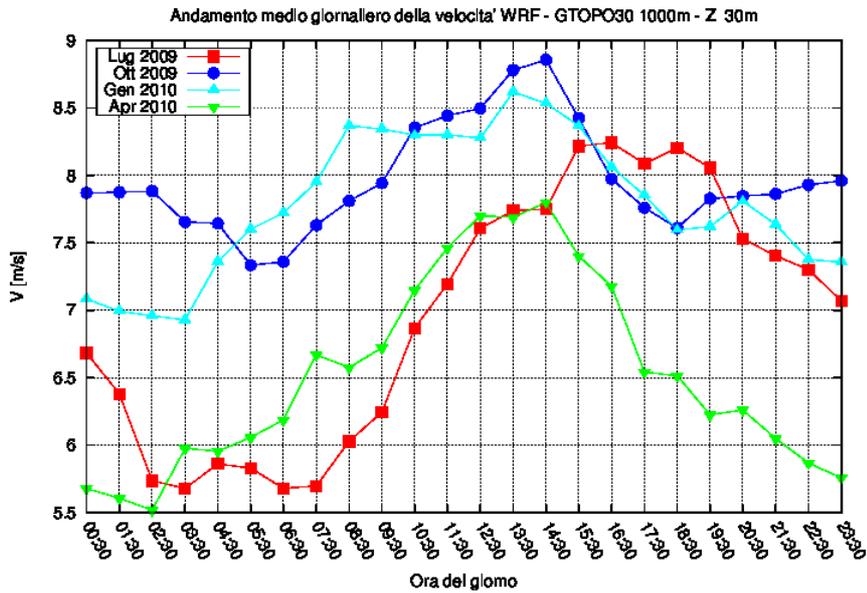


Figura 5.9: Andamento dei valori medi giornalieri della velocità calcolati con WRF e orografia GTOPO30 a 30m sls.

Per quanto riguarda la direzione di provenienza dei venti, la Figura 5.12 mostra l’andamento medio trimestrale delle direzioni di provenienza dei venti in relazione al contenuto di energia. Si nota come WRF indichi come la disponibilità di energia risulti in prevalenza proveniente dalle direzioni Sud-SudOvest e Est-NordEst. In Figura 5.13 si riporta invece la situazione per mese dell’energia per direzione di provenienza.

5.1. Risultati delle simulazioni numeriche

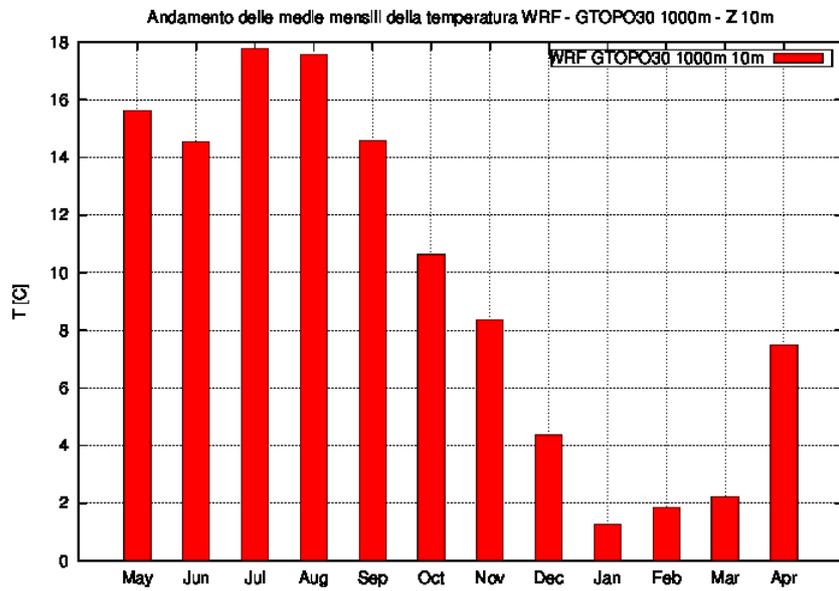


Figura 5.10: Andamento della temperatura media mensile calcolato con WRF e orografia GTOPO30 a 10m sls.

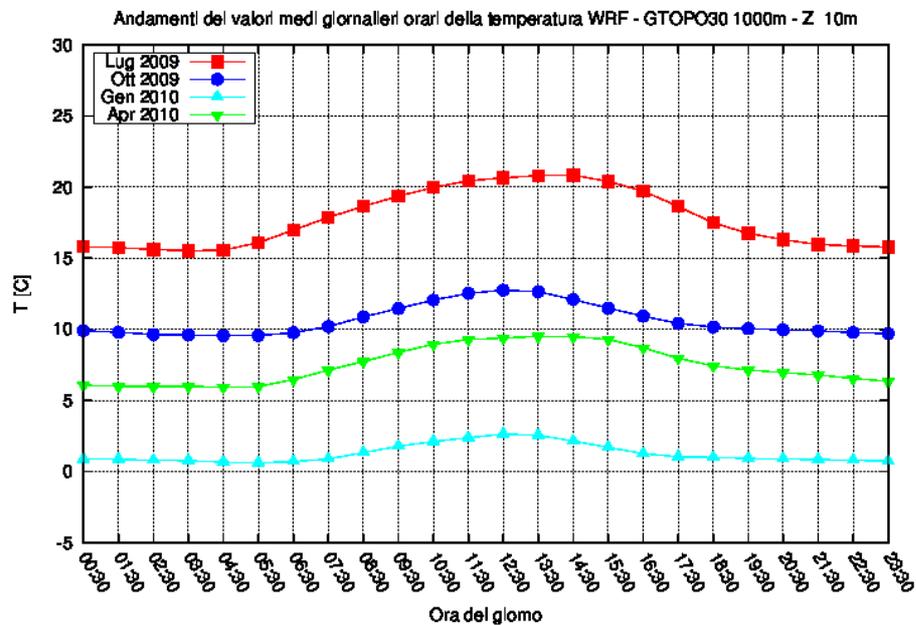
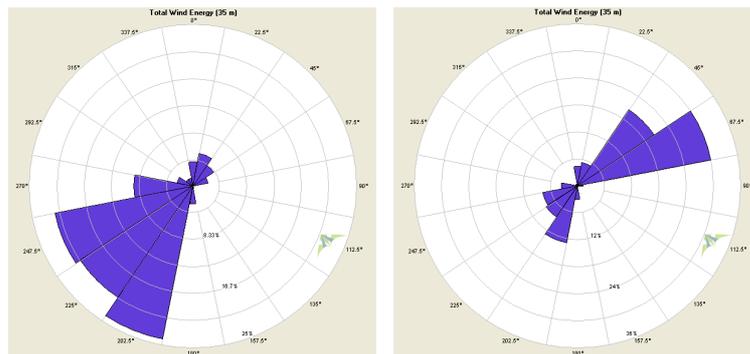
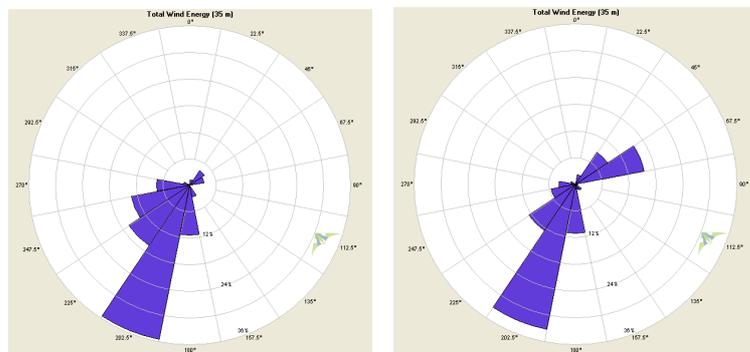


Figura 5.11: Andamenti dei valori medi giornalieri orari della temperatura calcolati con WRF e orografia GTOPO30 a 10m sls.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali



(a) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da maggio a luglio 2009. (b) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da agosto a ottobre 2009.



(c) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da novembre 2009 a gennaio 2010. (d) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da febbraio a aprile 2010.

Figura 5.12: Rose dei venti trimestrali WRF con GTOPO30 a 30m sls.

5.1. Risultati delle simulazioni numeriche

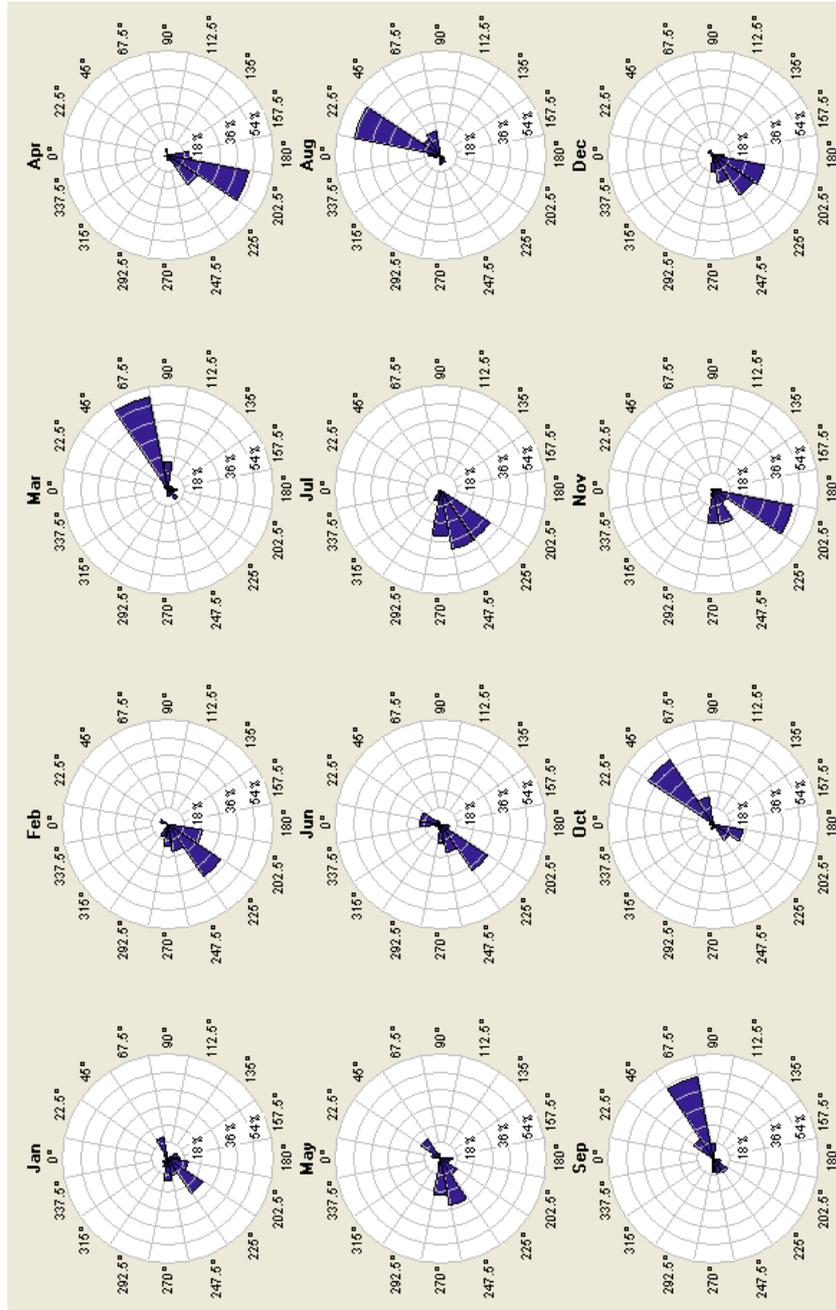


Figura 5.13: Rose dei venti mensili WRF con GTOPO30: energia per direzione di provenienza.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

5.1.3 MM5 con orografia SRTM

In Figura 5.14 è rappresentato l’andamento della velocità media mensile come calcolato da MM5 a 30m sls, utilizzando il modello di orografia SRTM. Per facilità di lettura i dati sono stati anche riportati in forma esplicita nella Tabella 5.3.

Per quanto riguarda l’andamento giornaliero dell’intensità del vento, si è preferito riportare gli andamenti medi relativi ai mesi di luglio e ottobre 2009, gennaio e aprile 2010. Tali mesi comprendono la parte centrale di ciascuna delle stagioni. Si è voluto in questo modo avere una idea dell’andamento delle velocità giornaliere per stagione dell’anno (v. Fig. 5.3).

In Figura 5.16 viene riportato l’andamento annuale delle temperature medie mensili, mentre, analogamente a quanto fatto per l’andamento giornaliero delle velocità, in Figura 5.17 sono riportatigli andamenti giornalieri delle temperature nei mesi di riferimento centrali delle stagioni. La temperatura è stata calcolata ad un’altezza di 10m sls poiché questa è l’altezza di installazione del termometro sulla torre CMC1.

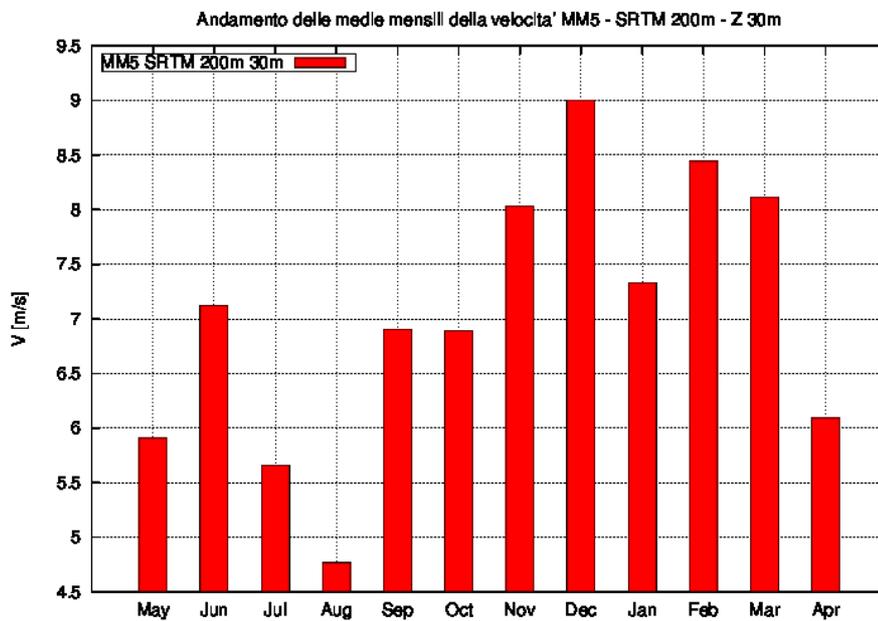


Figura 5.14: Andamento dei valori medi mensili della velocità calcolati con MM5 e orografia SRTM a 30m sls.

5.1. Risultati delle simulazioni numeriche

Andamenti medi mensili delle velocità [m/s]												
Z sls [m]	2009						2010					
	Mag	Giu	Lug	Ago	Sett	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr
30m	5.90	7.12	5.66	4.76	6.91	6.89	8.03	9.00	7.33	8.44	8.11	6.09

Tabella 5.3: Valori tabellati della velocità media mensile calcolata da MM5 con orografia SRTM a 30m sls.

Per quanto riguarda la direzione di provenienza dei venti, la Figura 5.18 mostra l’andamento medio trimestrale delle direzioni di provenienza dei venti in relazione al contenuto di energia. Si nota come MM5 indichi come la disponibilità di energia risulti in prevalenza proveniente dalle direzioni SudOvest e Est-NordEst. In Figura 5.19 si riporta invece la situazione per mese dell’energia per direzione di provenienza.

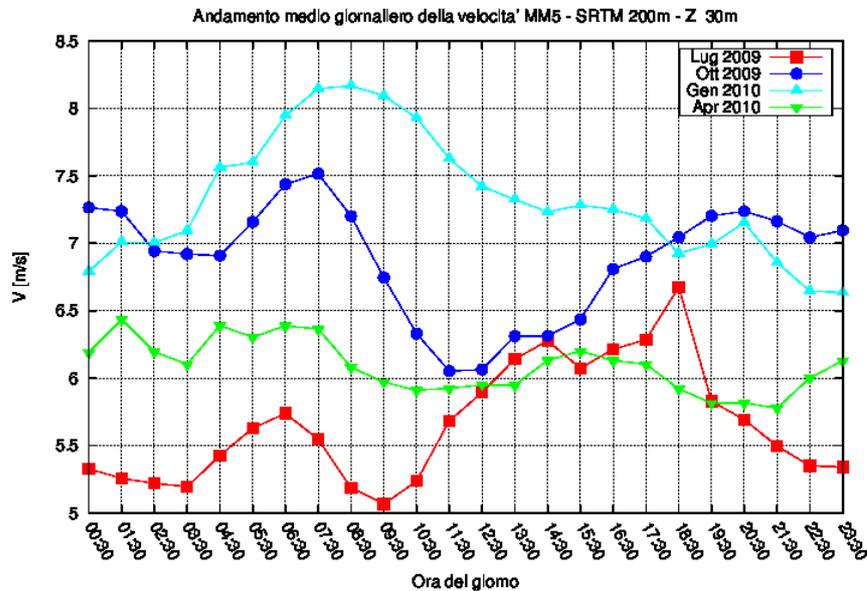


Figura 5.15: Andamento dei valori medi giornalieri della velocità calcolati con MM5 e orografia SRTM a 30m sls.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

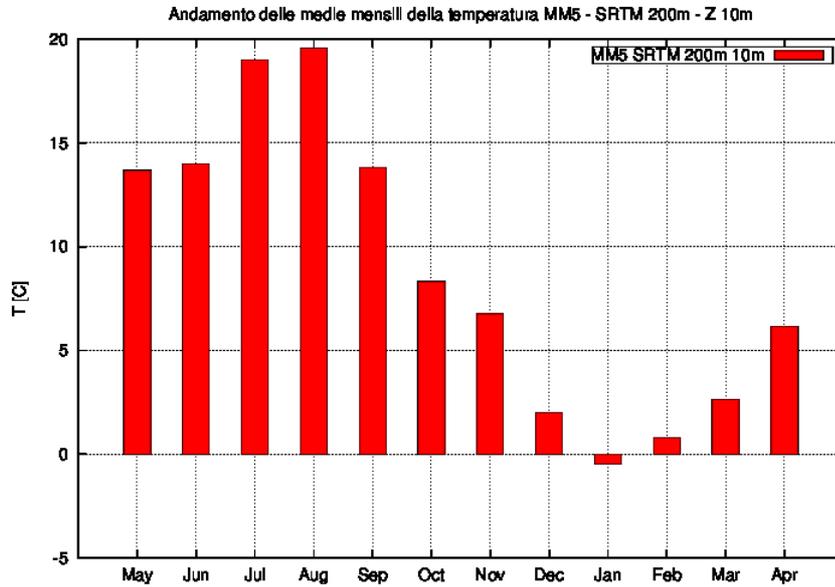


Figura 5.16: Andamento dei valori medi mensili della temperatura calcolati con MM5 e orografia SRTM a 10m sls.

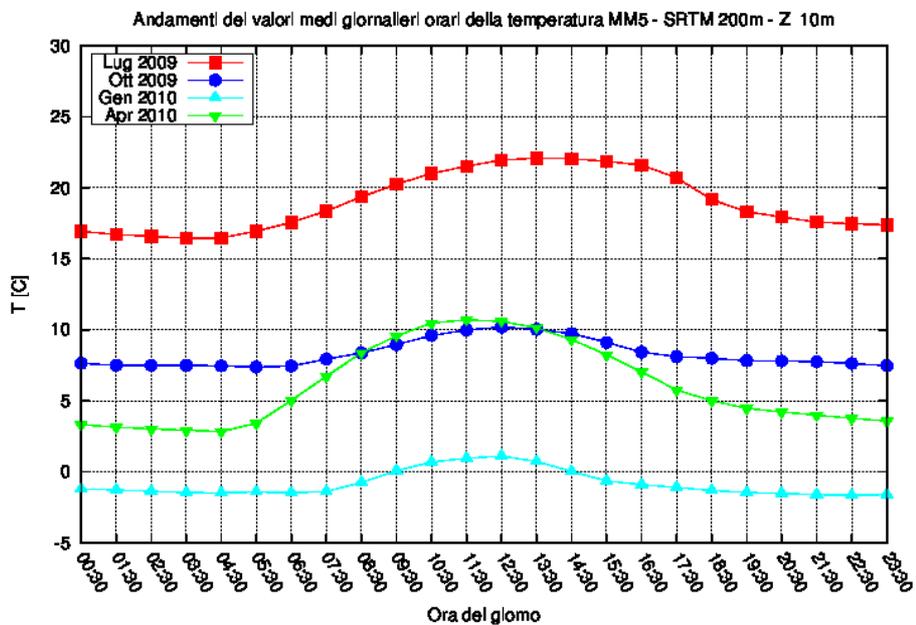
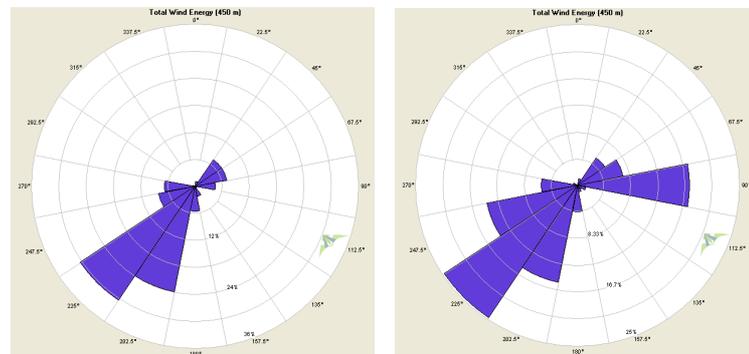


Figura 5.17: Andamenti dei valori medi giornalieri orari della temperatura calcolati con MM5 e orografia SRTM a 10m sls.

5.1. Risultati delle simulazioni numeriche



(a) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da maggio a luglio 2009. (b) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da agosto a ottobre 2009.



(c) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da novembre 2009 a gennaio 2010. (d) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da febbraio a aprile 2010.

Figura 5.18: Rose dei venti trimestrali MM5 con SRTM a 30m sls.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

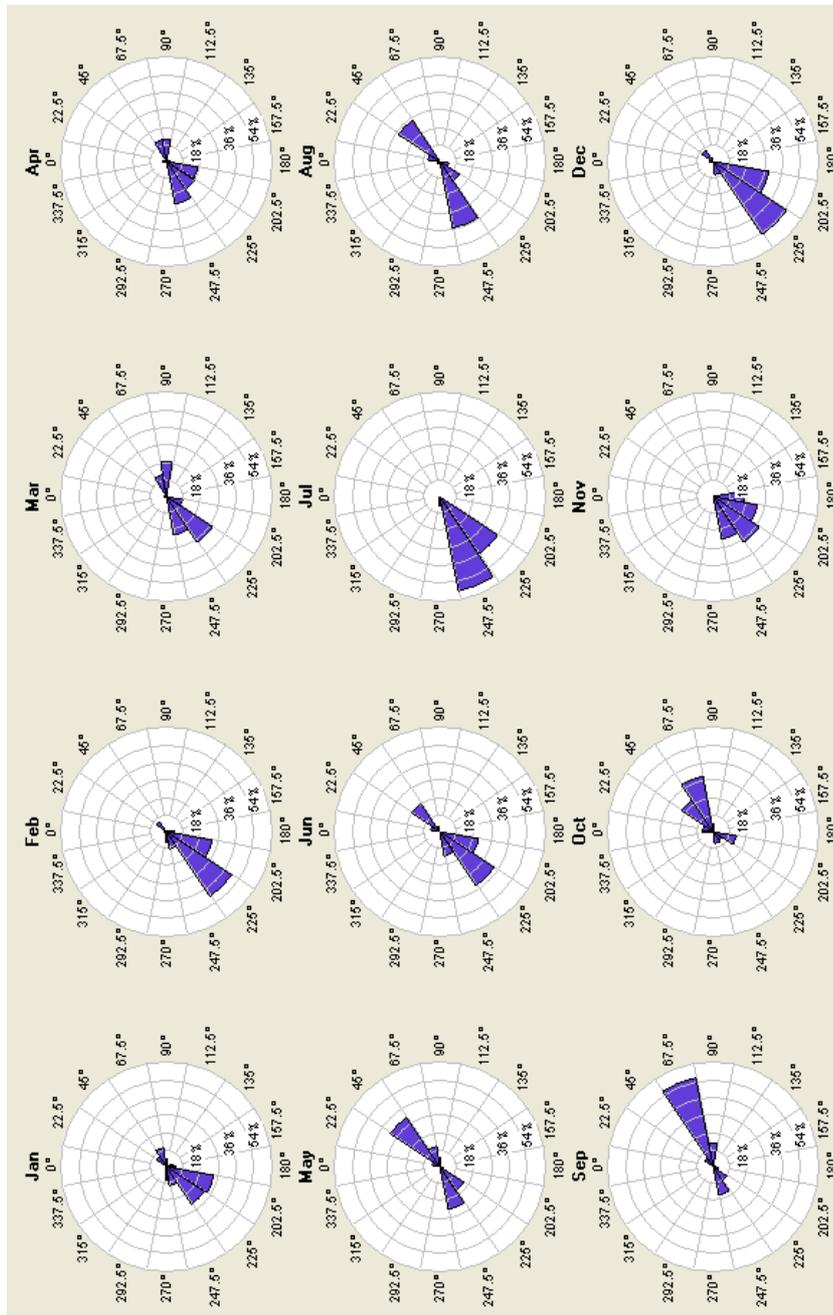


Figura 5.19: Rose dei venti mensili MM5 con SRTM: energia per direzione di provenienza.

5.1. Risultati delle simulazioni numeriche

5.1.4 MM5 con orografia GTOPO30

In Figura 5.20 è rappresentato l’andamento della velocità media mensile come calcolato da MM5 a 30m sls, utilizzando il modello di orografia GTOPO30. Per facilità di lettura i dati sono stati anche riportati in forma esplicita nella Tabella 5.4.

Per quanto riguarda l’andamento giornaliero dell’intensità del vento, si è preferito riportare gli andamenti medi relativi ai mesi di luglio e ottobre 2009, gennaio e aprile 2010. Tali mesi comprendono la parte centrale di ciascuna delle stagioni. Si è voluto in questo modo avere una idea dell’andamento delle velocità giornaliere per stagione dell’anno (v. Fig. 5.21).

In Figura 5.22 viene riportato l’andamento annuale delle temperature medie mensili, mentre, analogamente a quanto fatto per l’andamento giornaliero delle velocità, in Figura 5.23 sono riportatigli andamenti giornalieri delle temperature nei mesi di riferimento centrali delle stagioni. La temperatura è stata calcolata ad un’altezza di 10m sls poiché questa è l’altezza di installazione del termometro sulla torre CMC1.

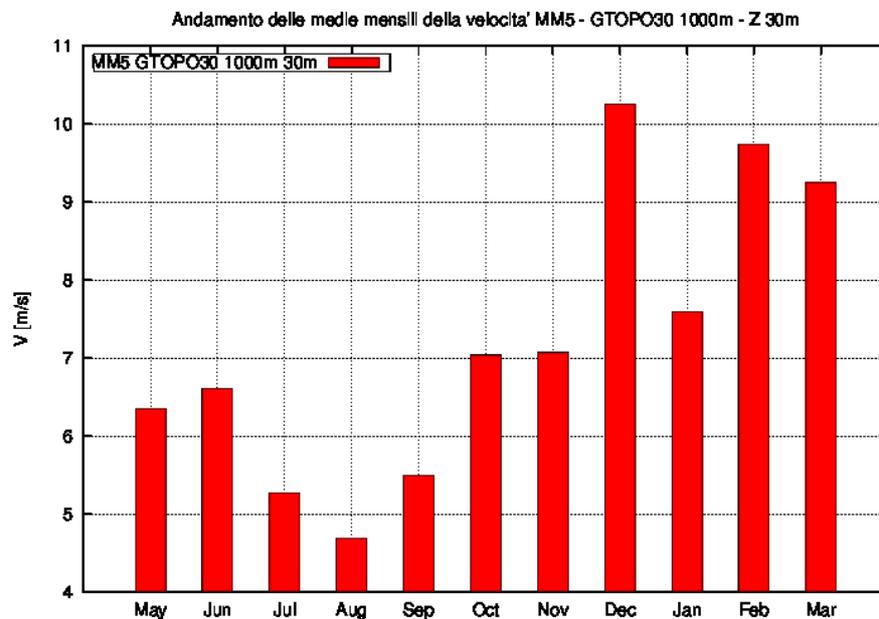


Figura 5.20: Andamento dei valori medi mensili della velocità calcolati con MM5 e orografia GTOPO a 30m sls.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

Andamenti medi mensili delle velocità [m/s]											
Z sls [m]	2009						2010				
30m	Mag	Giu	Lug	Ago	Sett	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar
	6.35	6.60	5.27	4.69	5.49	7.03	7.06	10.25	7.59	9.74	9.24

Tabella 5.4: Valori tabellati della velocità media mensile calcolata da MM5 con orografia GTOPO30 a 30m sls.

Per quanto riguarda la direzione di provenienza dei venti, la Figura 5.24 mostra l’andamento medio trimestrale delle direzioni di provenienza dei venti in relazione al contenuto di energia. Si nota come MM5 indichi come la disponibilità di energia risulti in prevalenza proveniente da Est-NordEst ed in minima parte da Sud-SudOvest. In Figura 5.25 si riporta invece la situazione per mese dell’energia per direzione di provenienza.

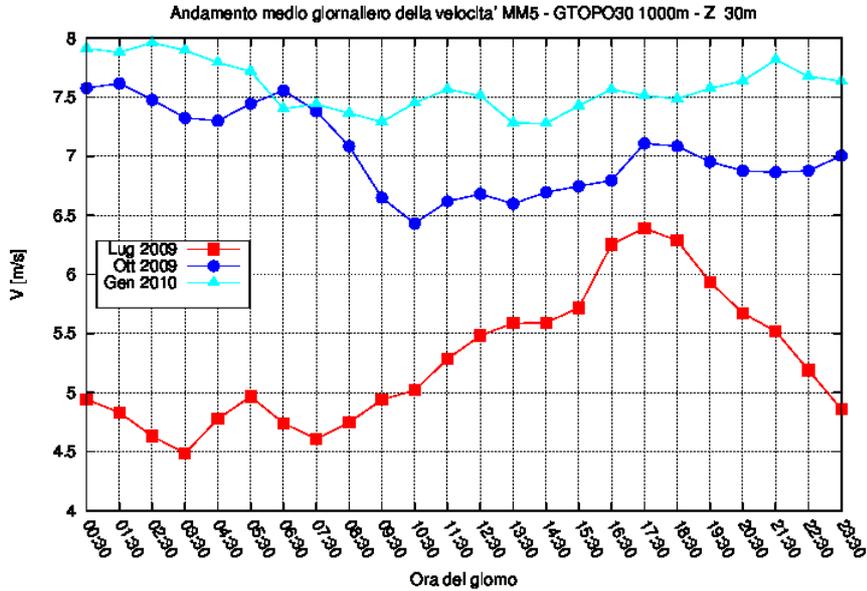


Figura 5.21: Andamento dei valori medi giornalieri della velocità calcolati con MM5 e orografia GTOPO30 a 30m sls.

5.1. Risultati delle simulazioni numeriche

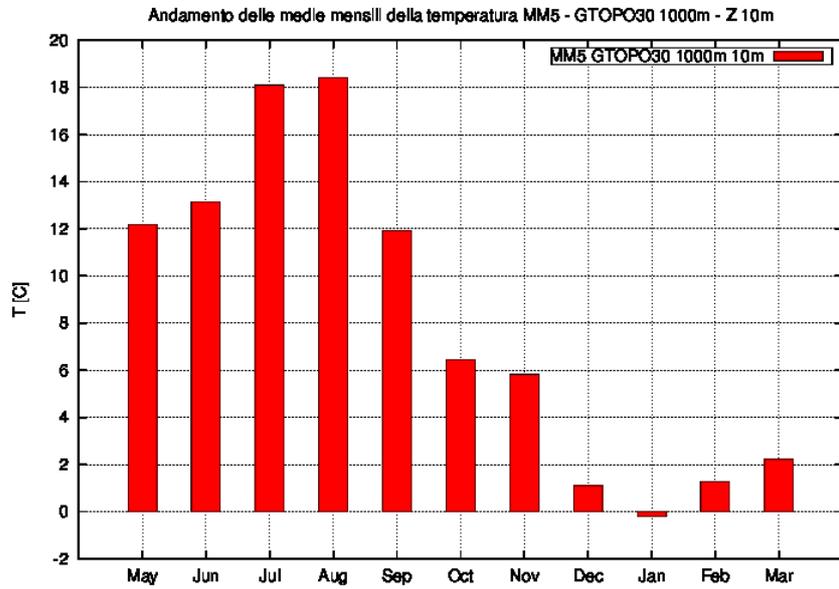


Figura 5.22: Andamento dei valori medi mensili della temperatura calcolati con MM5 e orografia GTOPO30 a 10m sls.

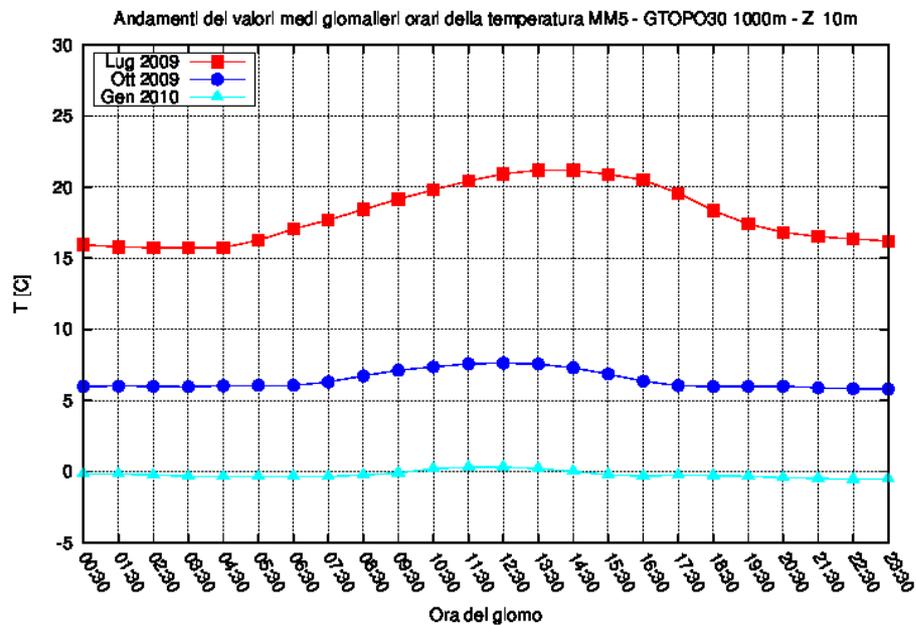
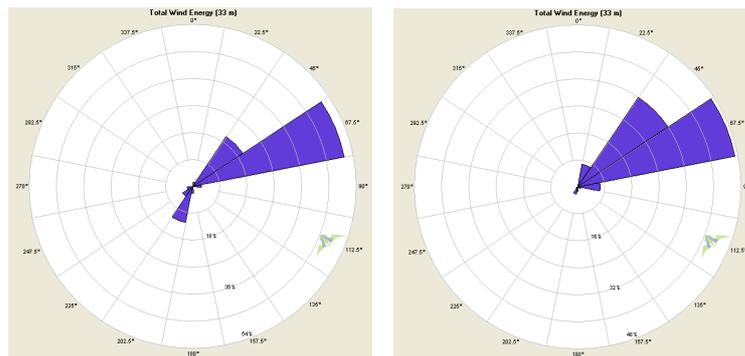


Figura 5.23: Andamenti dei valori medi giornalieri orari della temperatura calcolati con MM5 e orografia GTOPO30 a 10m sls.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali



(a) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da maggio a luglio 2009. (b) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da agosto a ottobre 2009.



(c) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da novembre 2009 a gennaio 2010. (d) Rosa dei venti a 30m sls: energia media per direzione di provenienza da febbraio a aprile 2010.

Figura 5.24: Rose dei venti trimestrali MM5 con GTOPO30 a 30m sls.

5.1. Risultati delle simulazioni numeriche

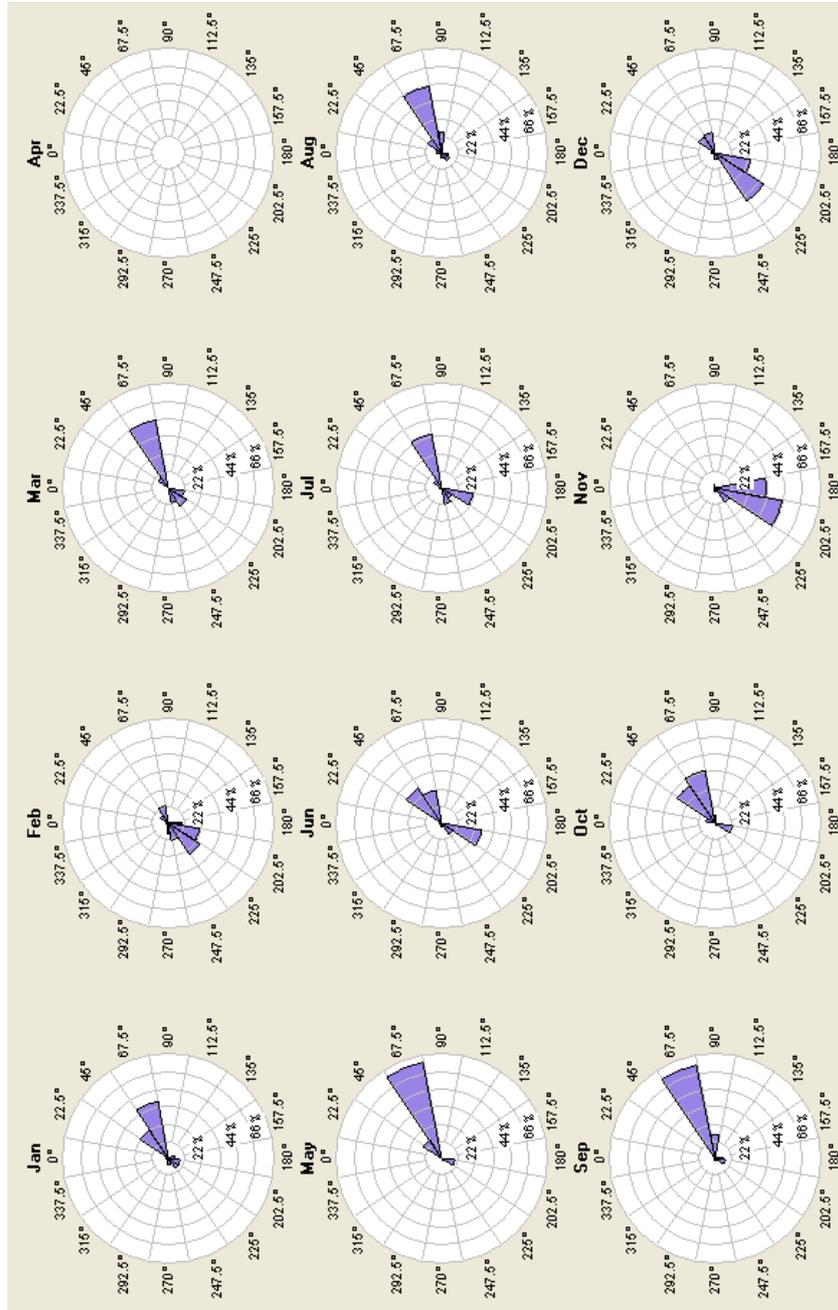


Figura 5.25: Rose dei venti mensili MM5 con GTOPO30: energia di provenienza per direzione.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

5.2 Confronto tra i risultati numerici

Il confronto tra i risultati numerici viene fatto considerando i dati di velocità alla quota di 30m sls, mentre la temperatura viene valutata a 10m sls. Si comparano dapprima i risultati ottenuti con differenti risoluzioni di orografia all’interno di ciascun modello di mesoscala; successivamente si riporta il confronto, a parità di risoluzione orografica, tra i due modelli di calcolo (v. Fig. 5.1).

5.2.1 WRF: confronto tra risultati con orografie SRTM e GTOPO30

Di seguito sono riportati e confrontati gli andamenti della velocità del vento e della temperatura, calcolati con WRF adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30.

Nella Figura 5.26 si vede come i risultati di calcolo ottenuti adottando l’orografia GTOPO30 diano valori medi mensili sempre superiori a quelli che prevedono il modello SRTM. Si ha quindi una sovrastima costante su tutto il periodo, della velocità che WRF calcola adottando il modello di orografia GTOPO30 rispetto al modello SRTM.

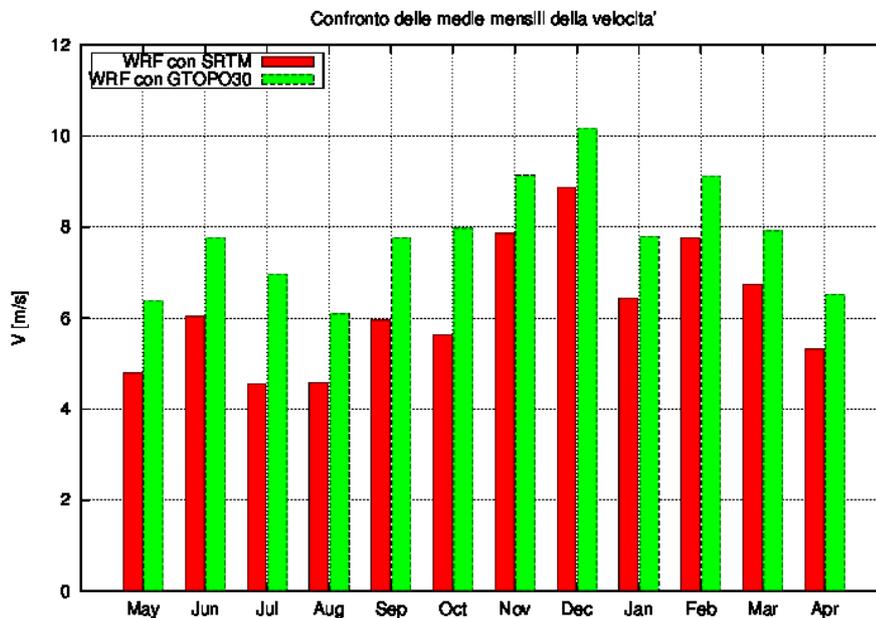


Figura 5.26: Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati a 30m sls con WRF adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30.

5.2. Confronto tra i risultati numerici

L’andamento delle temperature (v. Fig.5.27), invece, non viene influenzato dalla scelta della risoluzione orografica come avviene invece nel caso delle velocità. Si presentano infatti mesi in cui i due modelli predicono valori medi mensili alternativamente più alti e più bassi.

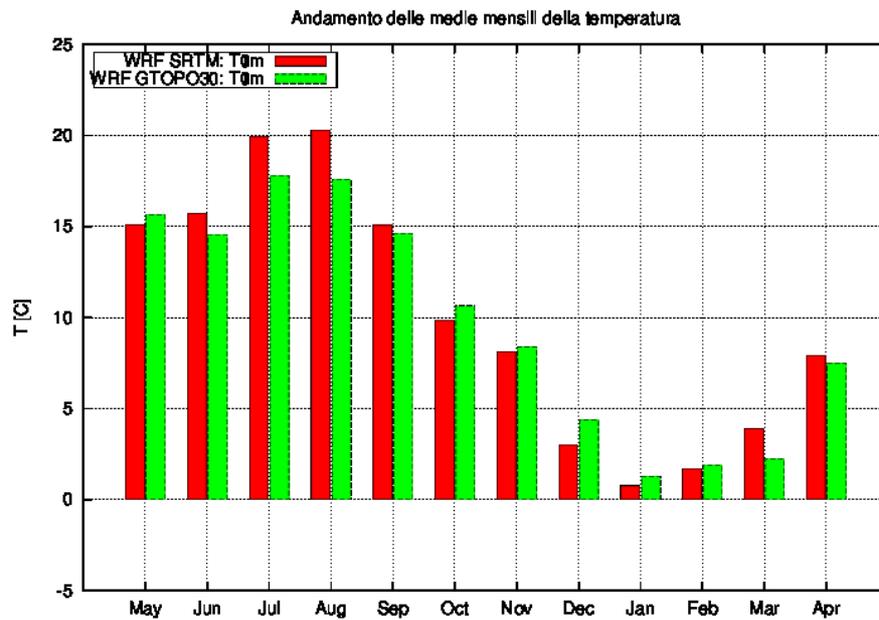


Figura 5.27: Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati a 10m sls con WRF adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30.

5.2.2 MM5: confronto tra risultati con orografie SRTM e GTOPO30

In questo paragrafo sono riportati gli andamenti delle velocità medie mensili e delle temperature calcolate dal modello **MM5** adottando, come sempre, i due modelli di orografia **SRTM** e **GTOPO30**. La Figura 5.28 mostra questa volta come il modello **MM5** non risenta in modo costante dell’influenza del modello di orografia su tutti i mesi di calcolo (cfr. Fig. 5.26). In particolare con il modello di orografia **SRTM** si osservano valori della velocità media, nei mesi estivi, maggiori di quelli previsti adottando il modello **GTOPO30**. La situazione si ribalta durante i mesi invernali.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

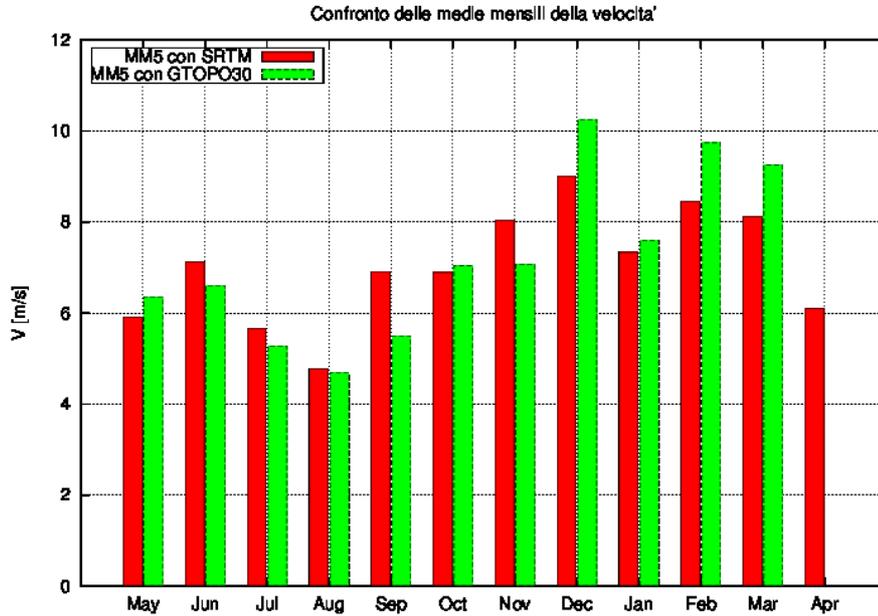


Figura 5.28: Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati a 30m sls con MM5 adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30.

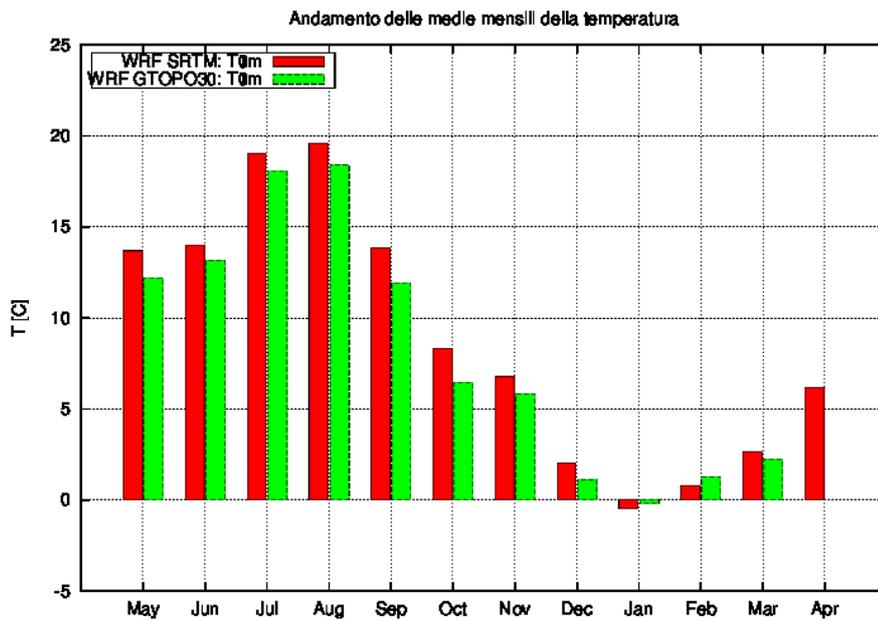


Figura 5.29: Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati a 10m sls con MM5 adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30.

5.2. Confronto tra i risultati numerici

L'andamento delle temperature (v. Fig.5.29), questa volta mostra come con l'orografia **SRTM** il modello **MM5** preveda per la maggior parte dei mesi una temperatura media superiore a quella prevista adottando l'orografia **GTOPO30**.

5.2.3 Confronto tra MM5 e WRF con orografia GTOPO30 a 30m sls

In questo paragrafo sono riportati gli andamenti delle velocità medie mensili e delle temperature calcolate dai modelli **MM5** e **WRF** adottando il modello di orografia **GTOPO30**. La Figura 5.30 mostra come con l'orografia **GTOPO30**, **WRF** preveda una velocità che in quasi tutto l'anno, fatti salvi i mesi di febbraio e marzo, supera quella prevista da **MM5**. Nella Figura 5.31 si nota come la temperatura prevista da **WRF**, tranne che nei mesi di luglio agosto e marzo, sia sempre di diversi gradi superiore a quella prevista da **MM5**.

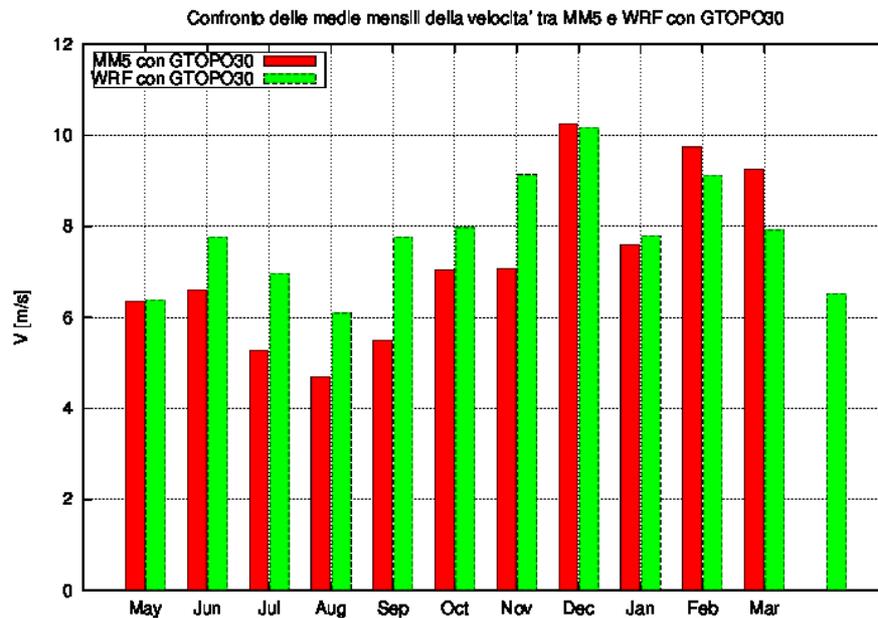


Figura 5.30: Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati a 30m sls con MM5 e WRF adottando il modello di orografia GTOPO30.

Si può quindi affermare che in relazione all'anno simulato, il modello **WRF** fornisce sia valori medi mensili di velocità del vento a 30m sls che

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

valori di temperatura a 10m sls superiori a quelli ottenuti con il modello MM5.

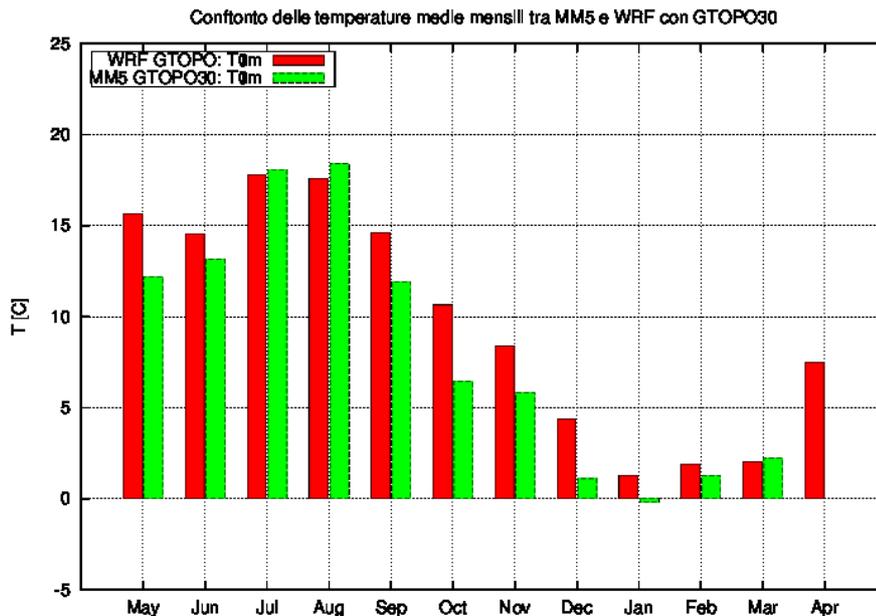


Figura 5.31: Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati a 10m sls con MM5 e WRF adottando il modello di orografia GTOPO30.

5.2.4 Confronto tra MM5 e WRF con orografia SRTM

In questo paragrafo sono riportati gli andamenti delle velocità medie mensili e delle temperature calcolate dai modelli MM5 e WRF adottando il modello di orografia SRTM. La Figura 5.32 mostra come MM5 preveda valori mensili di velocità media sempre superiori a quelli calcolati da MM5. Si verifica quindi, con l’adozione del modello con griglia più fine, un comportamento opposto dei due modelli in relazione al calcolo delle velocità medie mensili (cfr. Par. 5.2.3). Nella Figura 5.33 invece, si nota come la temperatura media mensile prevista da WRF, sia sempre leggermente superiore a quella prevista da MM5.

5.2. Confronto tra i risultati numerici

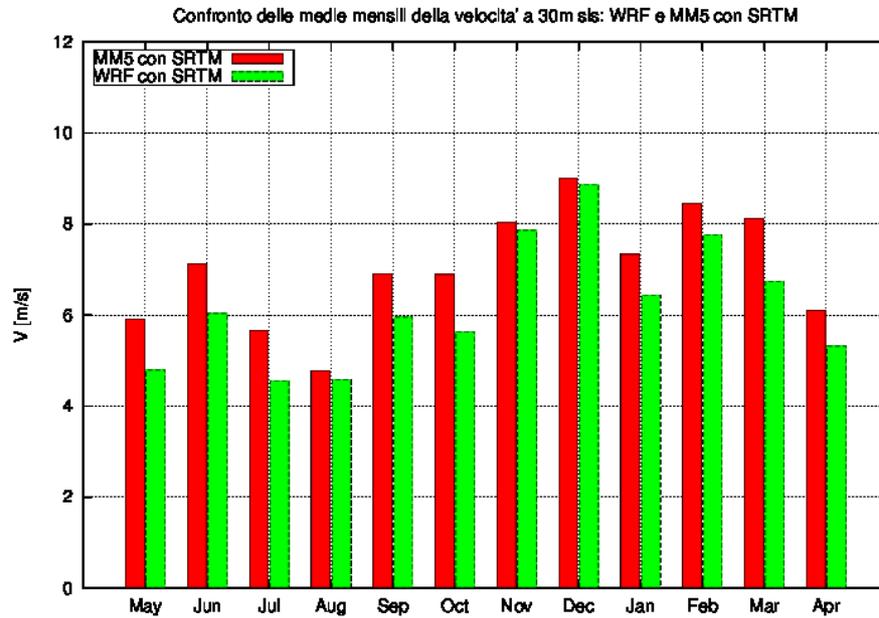


Figura 5.32: Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati a 30m sls con MM5 e WRF adottando il modello di orografia SRTM.

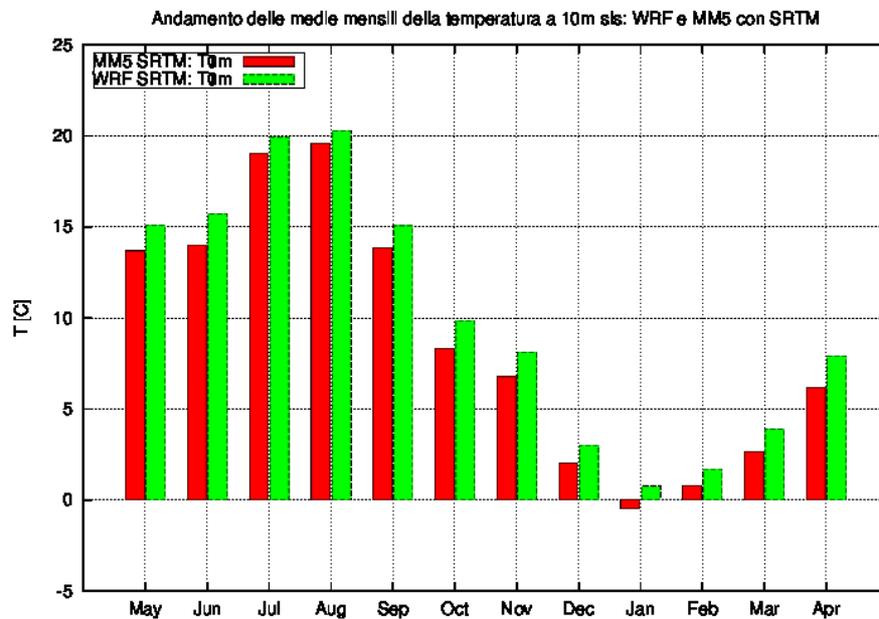


Figura 5.33: Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati a 10m sls con MM5 e WRF adottando il modello di orografia SRTM.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

5.3 Confronto tra risultati numerici e sperimentali

In questo paragrafo i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche con i modelli di mesoscala **WRF** e **MM5** vengono confrontati con i dati misurati sperimentalmente alla quota di 30m sls. In particolare, per ciascun modello sono riportati gli andamenti delle velocità medie mensili e delle temperature medie mensili, calcolate utilizzando i due modelli di orografia **SRTM** e **GTOPO30**, insieme ai dati dell’anemometro a coppette posto a 30m sls e del termometro posizionato a 10m sls. I mesi di dicembre 2009, gennaio e febbraio 2010, dai quali sono stati eliminati circa il 50% dei dati a causa di problemi di blocco dovuto al ghiaccio, sono stati comunque riportati ma con colori attenuati. Al fine di confrontare i dati sperimentali con quelli numerici, da questi ultimi sono stati eliminati i risultati relativi ai passi temporali nei quali le coppette risultavano in uno stato di blocco. Il confronto è stato così eseguito su una base comune dei tempi per cui i dati relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio, pur non avendo alcuna validità dal punto di vista delle informazioni meteorologiche mensili, sono stati ritenuti comunque validi per un confronto dal punto di vista strettamente numerico.

5.3.1 WRF: confronto dei dati sperimentali con quelli numerici ottenuti con orografie SRTM e GTOPO30

Dalla Tabella 5.5 si vede come l’adozione dell’orografia **SRTM** abbia portato ad una riduzione dell’errore annuale dal 31% circa al 4.25%. In alcuni mesi **WRF** fornisce addirittura una sottostima della velocità media mensile. Si può quindi tranquillamente affermare che l’adozione della griglia con passo 200m, resa possibile dall’orografia in formato **SRTM**, ha determinato un miglioramento notevole, come peraltro era lecito aspettarsi, nella valutazione della velocità media annuale rispetto alla griglia con passo 1000m ed orografia **GTOPO30**.

Ad un miglioramento drastico del valore medio annuale della velocità, comunque, non segue un altrettanto buono comportamento delle temperature previste. L’andamento di queste, riportate in Figura 5.35, non fornisce una indicazione altrettanto netta sulla sovrastima o sottostima dei valori di un modello numerico rispetto all’altro, nel confronto con i dati sperimentali. Addirittura, a livello annuale, si nota come il modello con orografia più lasca, fornisca valori della temperatura media più aderenti a quelli registrati dal termometro della stazione CMC1 (v. Tab. 5.6).

5.3. Confronto tra risultati numerici e sperimentali

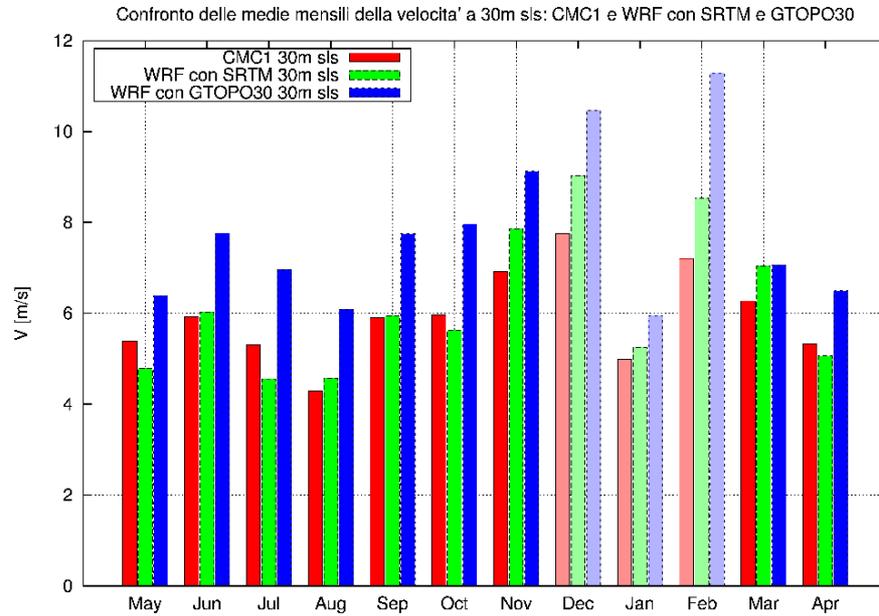


Figura 5.34: Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati con WRF adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30 ed i valori misurati dall’anemometro a coppette a 30m sls.

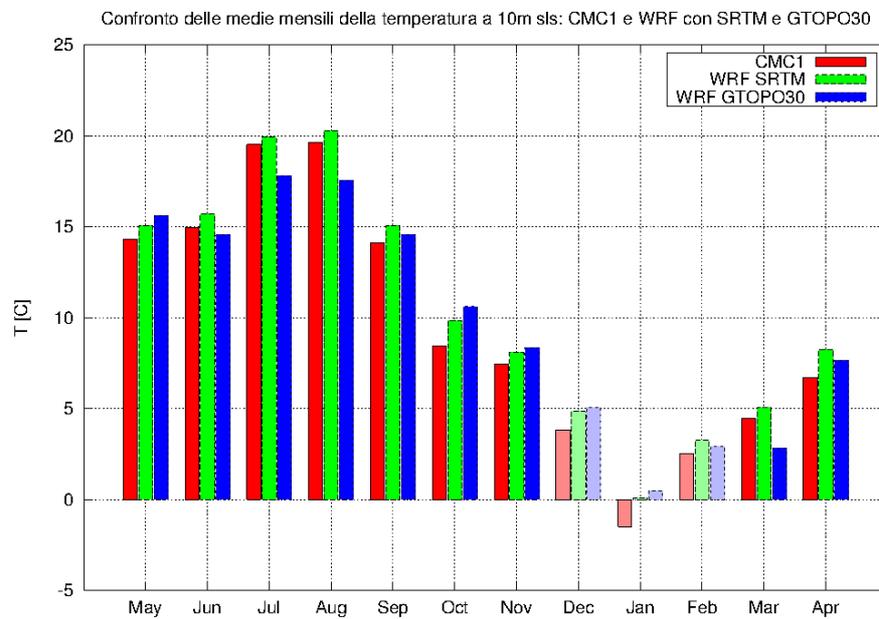


Figura 5.35: Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati con WRF adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30 ed i valori misurati dal termometro a 10m sls.

Andamenti medi mensili delle velocità [m/s]													
WRF	2009							2010					
	Mag	Giu	Lug	Ago	Sett	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	\bar{U}
CMC1	5.39	5.93	5.30	4.30	5.91	5.97	6.92	7.76	4.99	7.21	6.27	5.32	5.94
GTOPO	6.38	7.77	6.96	6.09	7.75	7.96	9.12	10.47	5.95	11.29	7.06	6.50	7.77
Err %	18.4	31.0	31.4	41.6	31.1	33.5	31.8	34.9	19.3	56.6	12.5	22.0	30.9
CMC1	5.39	5.93	5.30	4.30	5.91	5.97	6.92	7.76	4.99	7.21	6.27	5.32	5.94
SRTM	4.79	6.03	4.56	4.57	5.95	5.63	7.85	9.03	5.25	8.53	7.04	5.06	6.19
Err %	-11.2	1.65	-14.0	6.4	0.6	-5.7	13.4	16.4	5.2	18.4	12.3	-4.9	4.2

Tabella 5.5: Valori tabellati della velocità media mensile calcolati da WRF con orografia SRTM e GTOPO30 e misurati dall’anemometro a coppette posto a 30m sls.

	T Media annuale [C]	Err %
CMC1	9.54	-
GTOPO	9.84	3.1
SRTM	10.46	9.6

Tabella 5.6: WRF: confronto tra i valori medi annuali della temperatura.

5.3. Confronto tra risultati numerici e sperimentali

5.3.2 MM5: confronto dei dati sperimentali con quelli numerici ottenuti con orografie SRTM e GTOPO30

Dalla Figura 5.36 e dalla Tabella 5.8 si vede che l’adozione dell’orografia **SRTM**, nel caso del modello di mesoscala **MM5**, non ha portato ad una riduzione sostanziale dell’errore annuale come nel caso di **WRF**. L’adozione di una orografia più fine ha determinato un miglioramento dell’errore sulla media annuale della velocità media a 30m sls dal 21.82% al 19.95%.

Al contrario di **WRF** però, in questo caso la temperatura media annuale (v. Tab. 5.7) risulta in miglior accordo con la media misurata quando **MM5** adotta il modello **SRTM** piuttosto che il **GTOPO30**.

	T Media annuale [C]	Err %
CMC1	9.44	-
GTOPO	8.64	-11.8
SRTM	9.8	-3.65

Tabella 5.7: Valori medi annuali della temperatura.

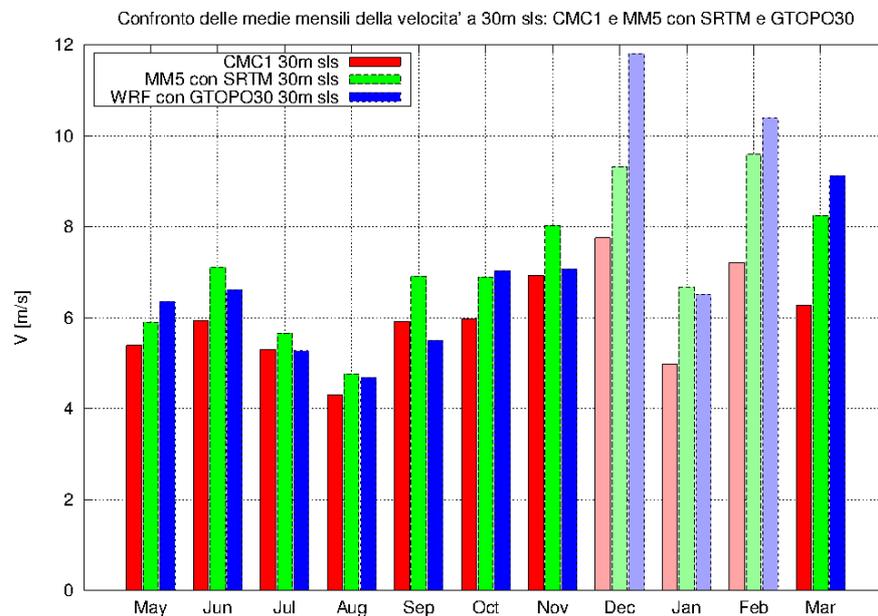


Figura 5.36: Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati con MM5 adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30 ed i valori misurati dall’anemometro a coppette a 30m sls.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

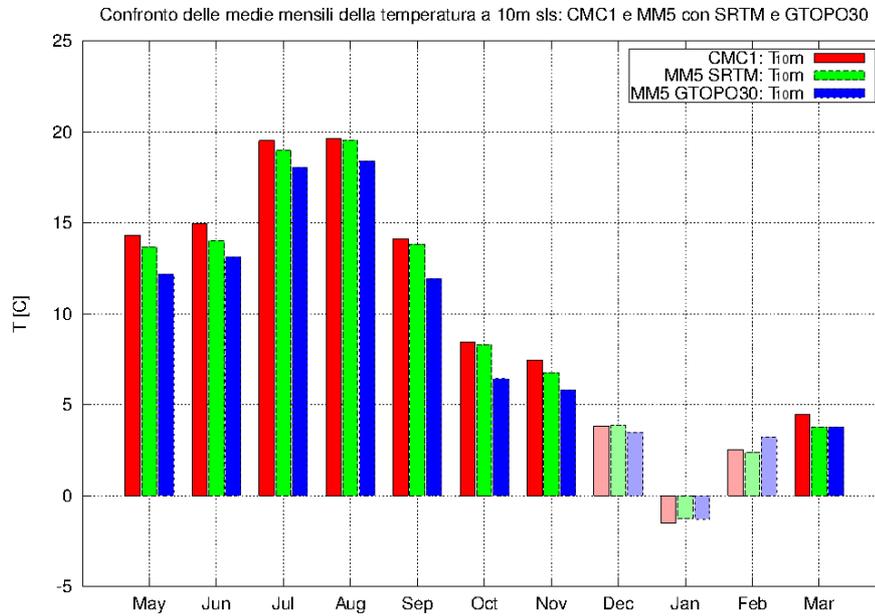


Figura 5.37: Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati con MM5 adottando i modelli di orografia SRTM e GTOPO30 ed i valori misurati dal termometro a 10m sls.

5.3. Confronto tra risultati numerici e sperimentali

Andamenti medi mensili delle velocità [m/s]												
	2009							2010				
MM5	Mag	Giu	Lug	Ago	Sett	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	\bar{U}
CMC1	5.39	5.93	5.23	4.30	5.91	5.97	6.92	7.76	4.99	7.21	6.27	6.00
GTOPO	6.35	6.60	5.27	4.69	5.49	7.03	7.06	11.81	6.51	10.40	9.12	7.30
Err %	17.7	11.34	-0.5	9.0	-7.1	17.8	2.0	52.2	30.6	44.3	45.4	21.82
CMC1	5.39	5.93	5.23	4.30	5.91	5.97	6.92	7.76	4.99	7.21	6.27	6.00
SRTM	5.90	7.12	5.66	4.76	6.91	6.89	8.03	9.33	6.67	9.60	8.25	7.19
Err %	9.6	20.0	6.8	10.8	16.8	15.4	15.9	20.2	33.6	33.0	31.5	19.95

Tabella 5.8: Valori tabellati della velocità media mensile calcolati da MM5 con orografia SRTM e GTOPO30 e misurati dall'anemometro a coppette posto a 30m sls.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

5.4 Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali

Nei paragrafi precedenti sono stati riportati i risultati ottenuti numericamente con i modelli di mesoscala **WRF** e **MM5** adottando come modello numerico dell’orografia del terreno i formati **GTOPO30**, con una risoluzione di griglia di 1000m, e **SRTM**, con una risoluzione di griglia di 200m. Si vede come l’adozione di una griglia più fine porti, soprattutto nel caso di **WRF** al calcolo di un valore medio annuale della velocità molto più vicino al valore medio misurato. In questo paragrafo vengono invece messi a confronto i risultati numerici, ottenuti con orografia **SRTM**, di **WRF** e **MM5** con i dati sperimentali misurati a 30m sls.

Dalla Figura 5.38 e dalla Tabella 5.9 risulta evidente come il comportamento del modello **WRF** sia più accurato sia a livello mensile che annuale del modello **MM5**. Il valore medio annuale della velocità del vento calcolata da **WRF** risulta pari a $\bar{U} = 6.19\text{m/s}$, quello calcolato da **MM5** $\bar{U} = 7.09\text{m/s}$ mentre il valore della velocità media annuale a 30m sls misurata dall’anemometro a coppette risulta essere $\bar{U} = 5.94\text{m/s}$. L’errore relativo del 4.2% che **WRF** compie nella stima della velocità media può essere considerato un risultato notevole di questo nuovo modello rispetto al suo predecessore. In valore assoluto esso è anche molto vicino al limite del 3% al di sotto del quale bisogna scendere per limitare l’errore compiuto sulla stima dell’energia annuale prodotta al di sotto del 10%. Per quanto riguarda gli andamenti della velocità media giornaliera (v. Fig. da 5.40 a 5.43), anche in questo caso si nota che nei mesi presi come riferimento, l’andamento previsto da **WRF** risulta maggiormente in accordo con quello rilevato dall’anemometro a coppette della torre anemometrica. In particolare si nota come **MM5** sovrastimi nella maggior parte dei casi il valore della velocità rispetto a quella misurata.

Quando però si passa alla valutazione dell’andamento delle temperature, è **MM5** ad offrire risultati migliori. Dalla Figura 5.39 e dalla Tabella 5.10 si nota chiaramente infatti come sia **MM5** questa volta ad ottenere valori medi mensili della temperatura maggiormente vicini a quelli misurati dal termometro della torre, posto a 10m sls. Un tale comportamento è confermato dagli andamenti giornalieri della temperatura (v. Figg. da fig:WRFMM5CMC1-SRTM-Tdiur-jul a fig:WRFMM5CMC1-SRTM-Tdiur-apr). Nei mesi di riferimento considerati si vede infatti nettamente come il profilo giornaliero di temperatura fornito da **MM5** sia più aderente a quello misurato.

Per quanto riguarda la direzione del vento, ulteriori conclusioni possono essere tratte dalle Figure 5.48÷5.51. Queste rappresentano le rose

5.4. Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali

dei venti medie trimestrali relative alla frequenza di occorrenza, alla velocità media e all'energia media per direzione di provenienza. Prendendo in considerazione le rose dei venti dell'energia media per direzione di provenienza, per esempio, si nota come entrambi i modelli non forniscano una previsione accurata. In particolare si nota come:

MM5 sia ruotato quasi sempre di circa un settore (22.5°) in senso antiorario;

WRF sia ruotato anch'esso in verso antiorario ma quasi sempre di circa due settori (45°).

Se ne deduce quindi che la rappresentazione della direzione di provenienza dell'energia fornita da **WRF** sia meno accurata di quella del modello **MM5**. Questa osservazione, che discende dall'osservazione di dati trimestrali mediati, trova conferma anche a livello di mese singolo osservando le Figure dalla 5.52 alla 5.60. Queste rappresentano le rose dei venti mensili relative all'intero anno di calcolo e misura. Le rose relative ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio sono rappresentate con colori attenuati per ricordare che esse non vogliono rappresentare un risultato significativo dal punto meteorologico ma numerico.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

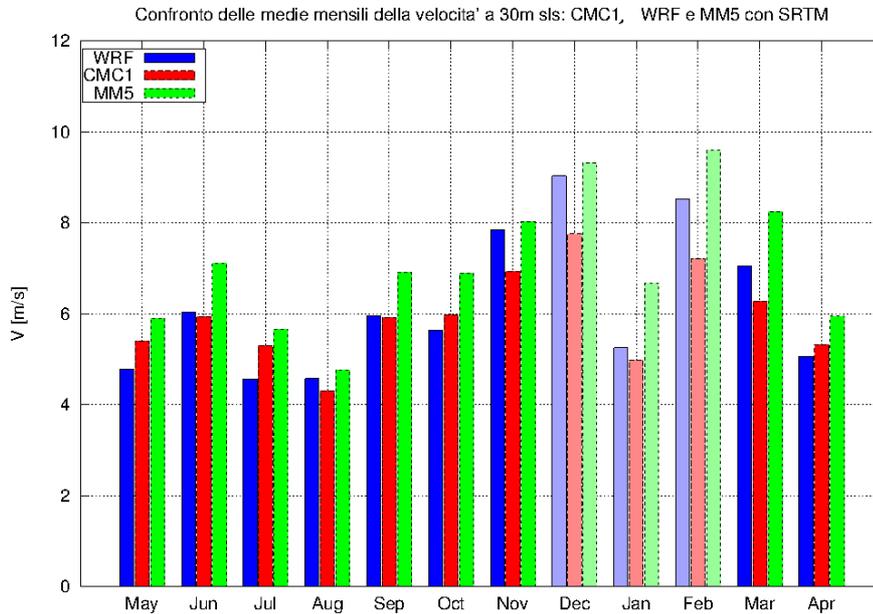


Figura 5.38: Confronto tra gli andamenti della velocità media mensile calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dall’anemometro a coppette a 30m sls.

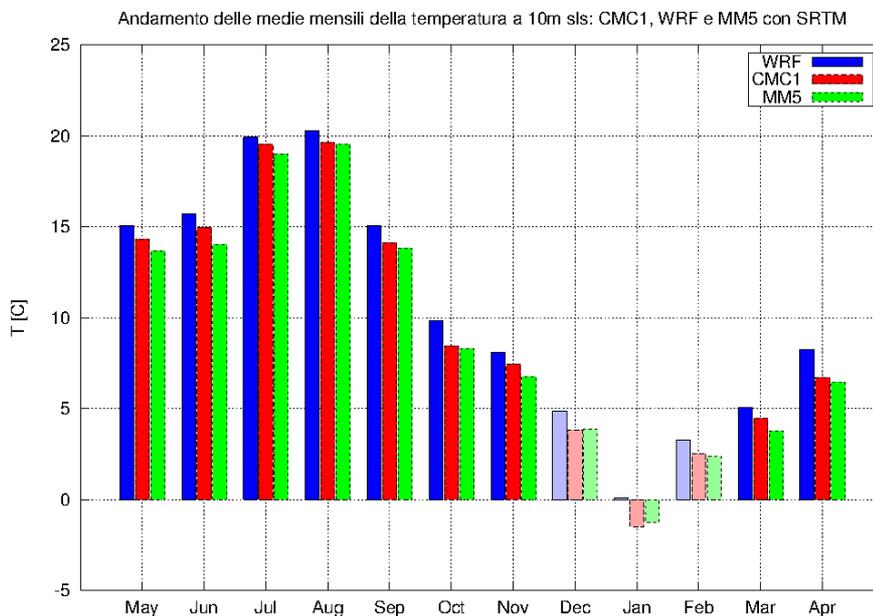


Figura 5.39: Confronto tra gli andamenti della temperatura media mensile calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dal termometro a 10m sls.

5.4. Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali

Andamenti medi mensili delle velocità [m/s]													
	2009							2010				\bar{U}	
	Mag	Giu	Lug	Ago	Sett	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	
CMC1	5.39	5.93	5.23	4.30	5.91	5.97	6.92	7.76	4.99	7.21	6.27	5.32	5.94
WRF	4.79	6.03	4.56	4.58	5.95	5.63	7.85	9.03	5.25	8.53	7.04	5.06	6.19
Err %	-11.29	1.6	-14.0	6.4	0.6	-5.7	13.4	16.4	5.2	18.4	12.3	-4.9	4.2
CMC1	5.39	5.93	5.23	4.30	5.91	5.97	6.92	7.76	4.99	7.21	6.27	5.32	5.94
MM5	5.90	7.12	5.66	4.76	6.91	6.89	8.03	9.33	6.67	9.59	8.24	5.94	7.09
Err %	9.6	20.0	6.8	10.8	16.8	15.4	15.9	20.2	33.6	33.1	31.5	11.6	19.3

Tabella 5.9: Valori tabellati della velocità media mensile calcolati da MM5 e WRF con orografia SRTM e misurati dall’anemometro a coppette posto a 30m sls.

Andamenti medi mensili della temperatura [C]													
	2009							2010					
	Mag	Giu	Lug	Ago	Sett	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	\bar{T}
CMC1	14.31	14.96	19.52	19.63	14.13	8.44	7.45	3.83	-1.49	2.51	4.48	6.72	9.54
WRF	15.07	15.70	19.93	20.28	15.05	9.83	8.10	4.85	0.08	3.29	5.08	8.25	10.46
Err %	5.3	5.0	2.1	3.3	6.5	16.5	8.7	26.6	-105.6	30.9	13.4	22.8	9.63
CMC1	14.31	14.96	19.52	19.63	14.13	8.44	7.45	3.83	-1.49	2.51	4.48	6.72	9.54
MM5	13.66	14.00	19.01	19.56	13.82	8.30	6.76	3.86	-1.28	2.37	3.78	6.48	9.2
Err %	-4.5	-6.4	-2.6	-0.3	-2.2	-1.7	-9.2	0.7	-14.1	-5.7	-15.7	-3.5	-3.6

Tabella 5.10: Valori tabellati della temperatura media mensile calcolati da MM5 e WRF con orografia SRTM e misurati dal termometro posto a 10m sls.

5.4. Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali

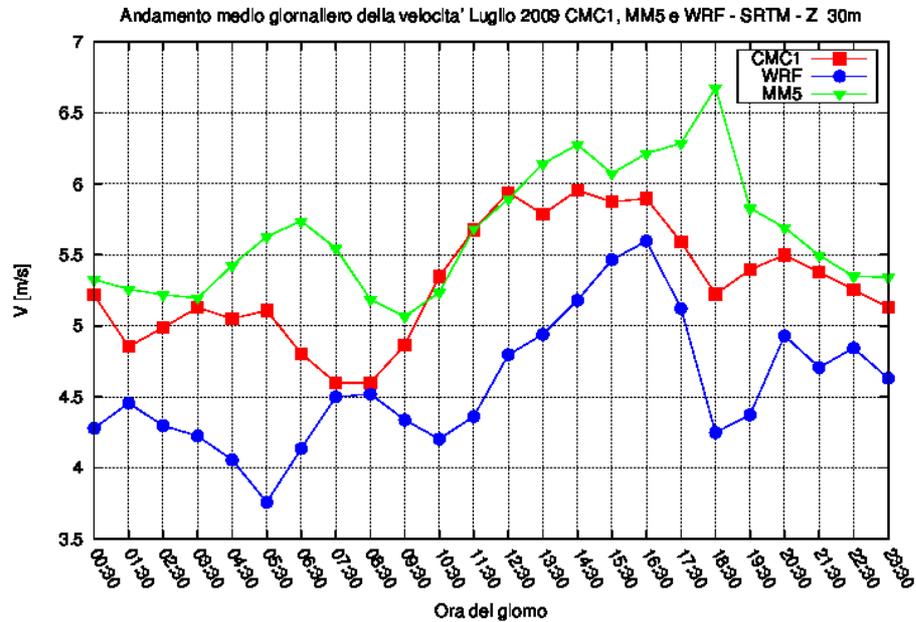


Figura 5.40: Confronto tra gli andamenti giornalieri della velocità calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dall’anemometro a coppette a 30m sls nel mese di luglio 2009.

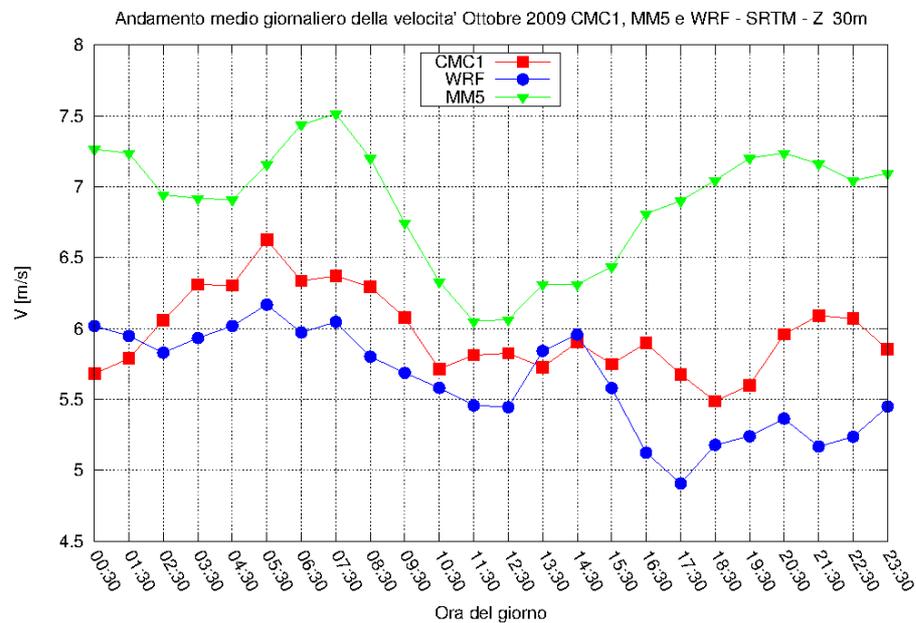


Figura 5.41: Confronto tra gli andamenti giornalieri della velocità calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dall’anemometro a coppette a 30m sls nel mese di ottobre 2009.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

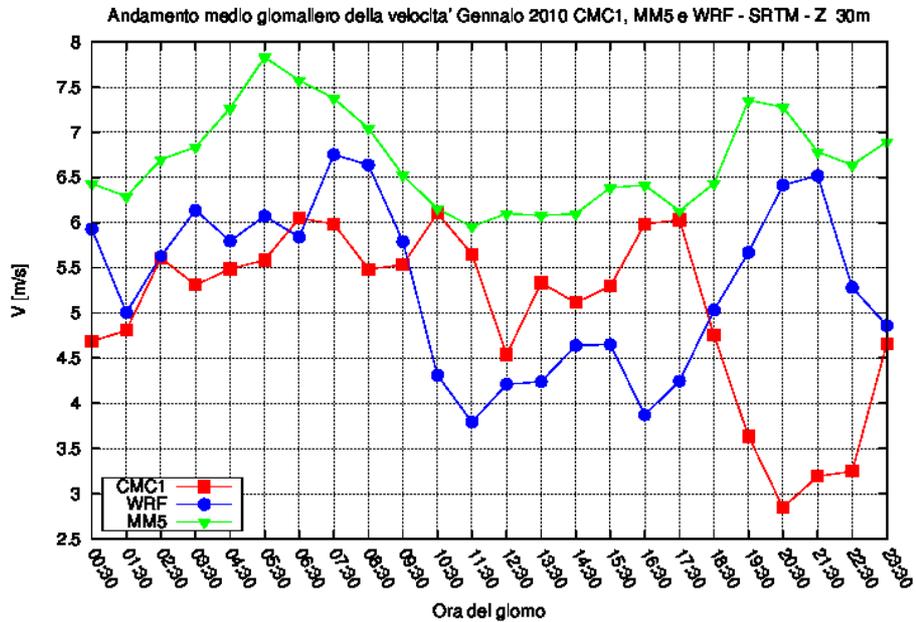


Figura 5.42: Confronto tra gli andamenti giornalieri della velocità calcolati con MM5 e WRF' adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dall'anemometro a coppette a 30m sls nel mese di gennaio 2010.

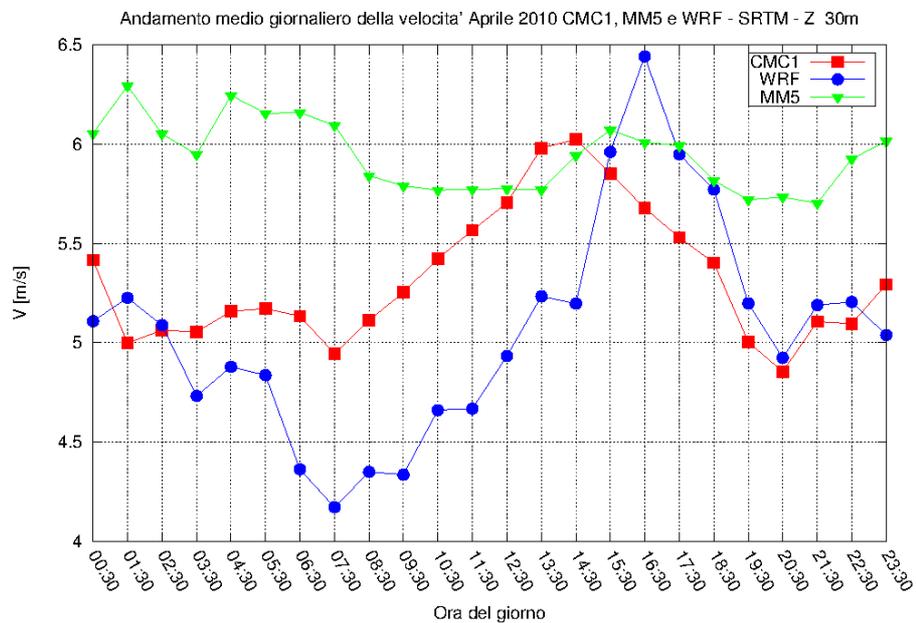


Figura 5.43: Confronto tra gli andamenti giornalieri della velocità calcolati con MM5 e WRF' adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dall'anemometro a coppette a 30m sls nel mese di aprile 2010.

5.4. Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali

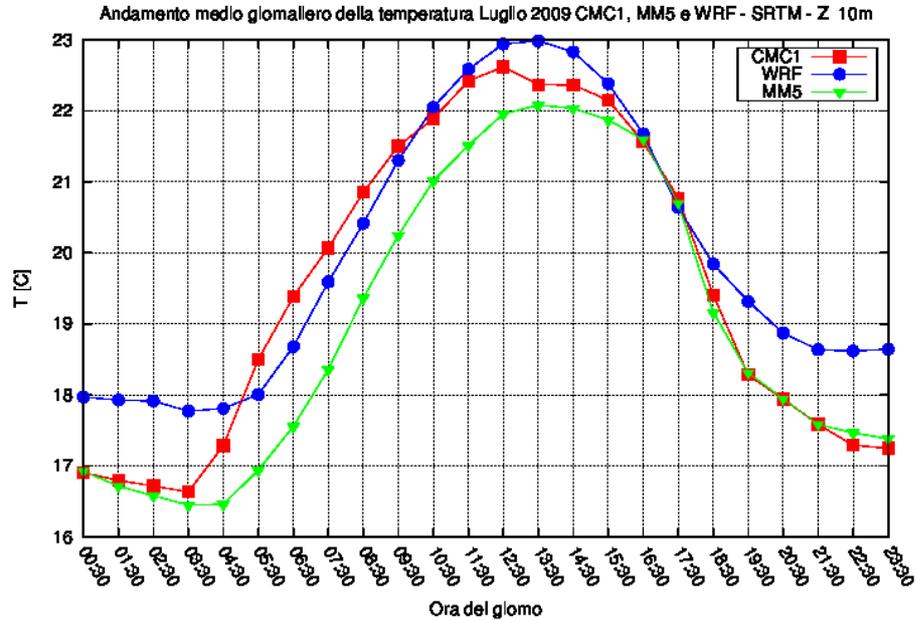


Figura 5.44: Confronto tra gli andamenti giornalieri della temperatura calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dal termometro a 10m sls nel mese di luglio 2009.

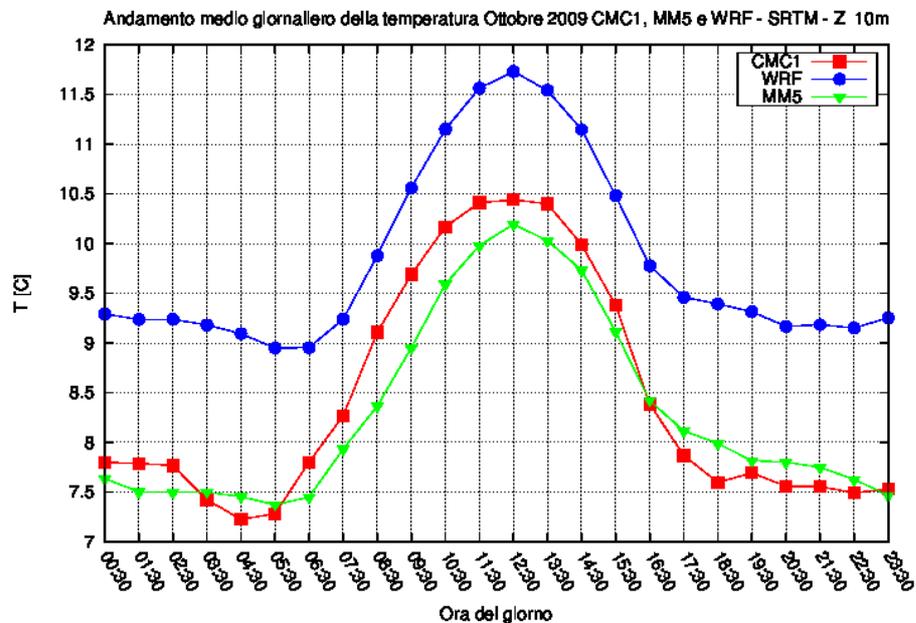


Figura 5.45: Confronto tra gli andamenti giornalieri della temperatura calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dal termometro a 10m sls nel mese di ottobre 2009.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

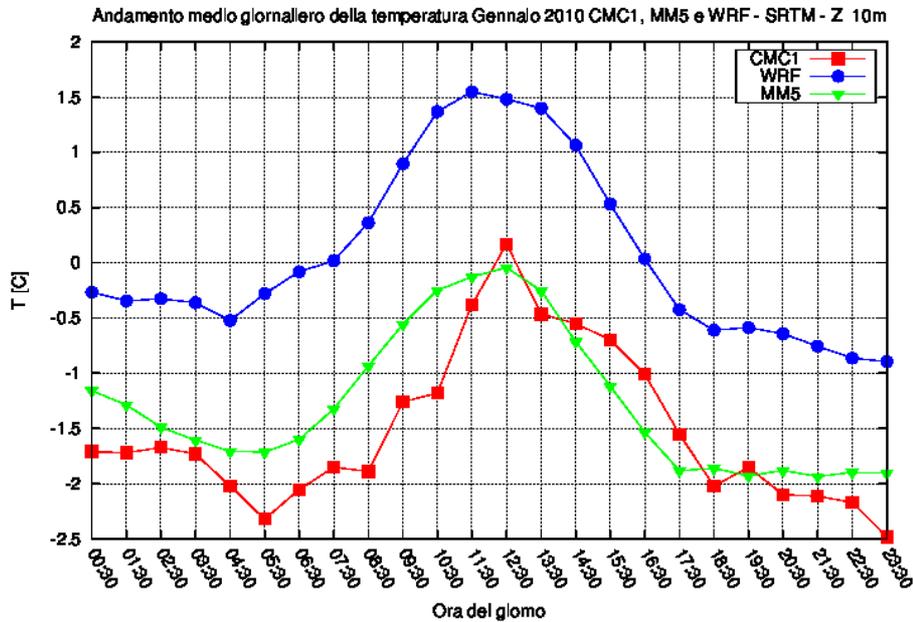


Figura 5.46: Confronto tra gli andamenti giornalieri della temperatura calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dal termometro a 10m sls nel mese di gennaio 2010.

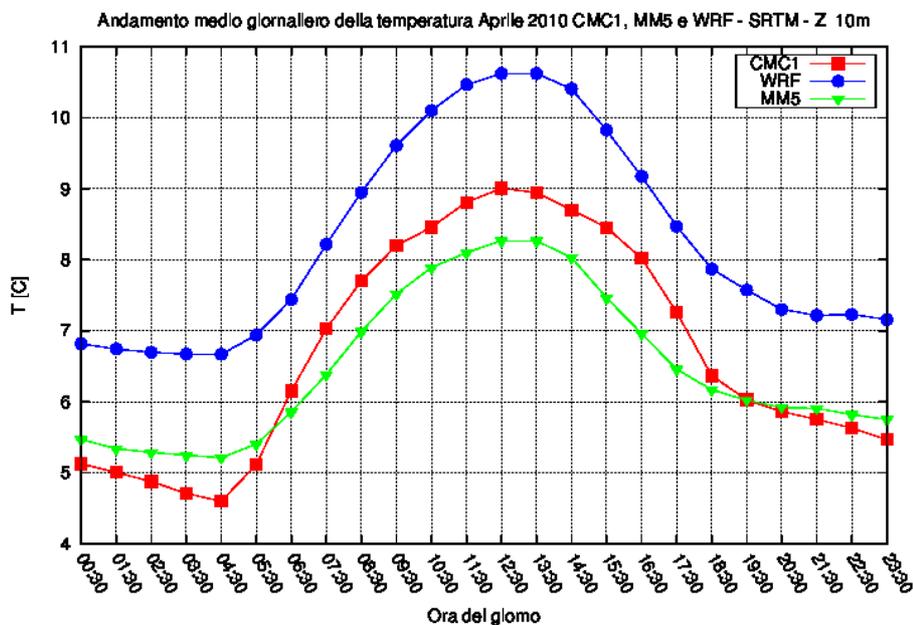
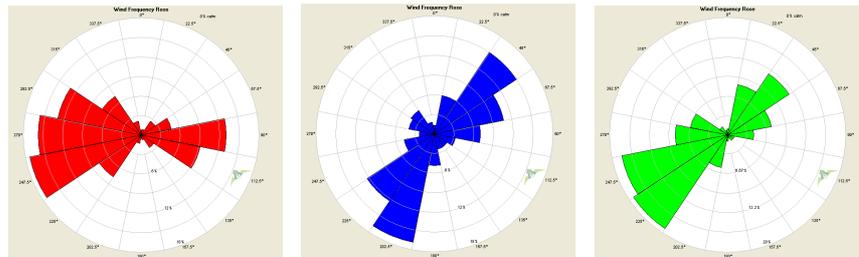
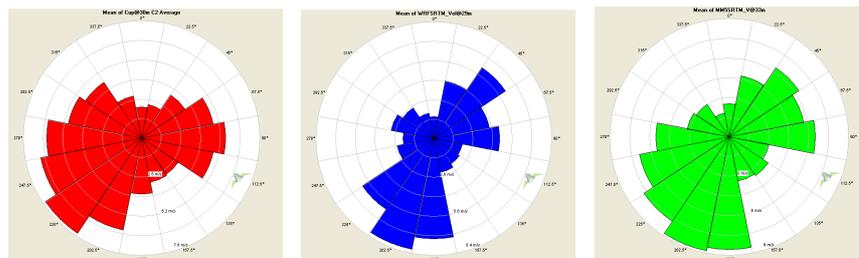


Figura 5.47: Confronto tra gli andamenti giornalieri della temperatura calcolati con MM5 e WRF adottando i modelli di orografia SRTM ed i valori misurati dal termometro a 10m sls nel mese di aprile 2010.

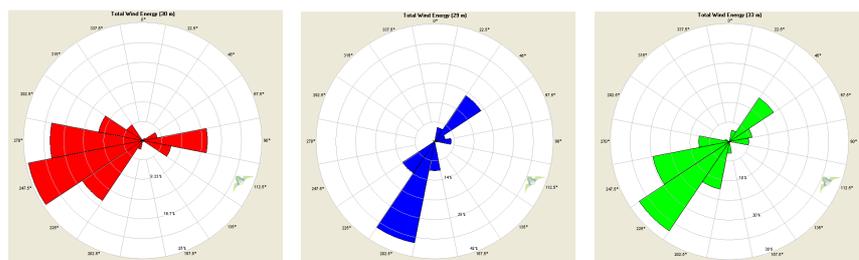
5.4. Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali



(a) Rosa dei venti CMC1: frequenza per direzione di provenienza. (b) Rosa dei venti WRF: frequenza per direzione di provenienza. (c) Rosa dei venti MM5: frequenza per direzione di provenienza.



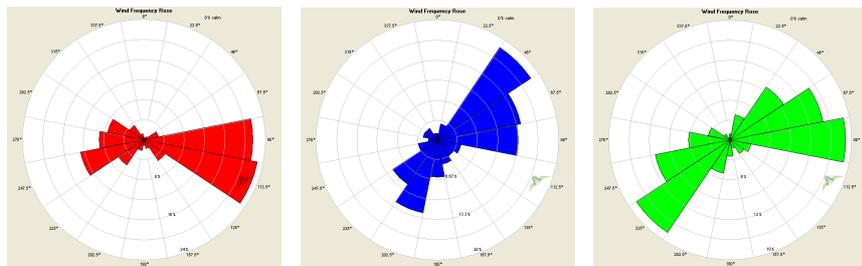
(d) Rosa dei venti CMC1: velocità media per direzione di provenienza. (e) Rosa dei venti WRF: velocità media per direzione di provenienza. (f) Rosa dei venti MM5: velocità media per direzione di provenienza.



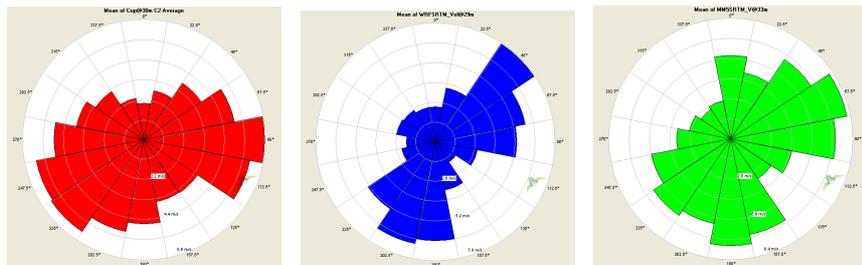
(g) Rosa dei venti CMC1: energia per direzione di provenienza. (h) Rosa dei venti WRF: energia per direzione di provenienza. (i) Rosa dei venti MM5: energia per direzione di provenienza.

Figura 5.48: Rose dei venti: media sul trimestre maggio÷luglio 2009 a 30m sls.

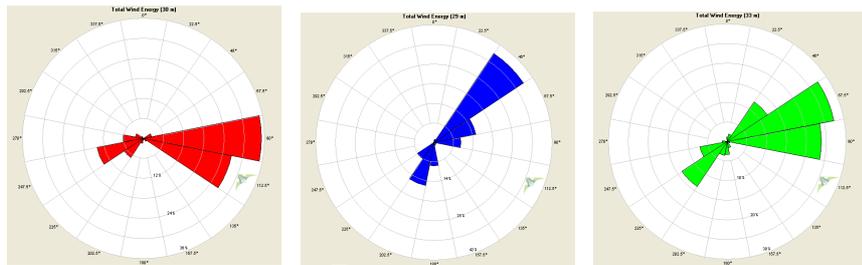
Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali



(a) Rosa dei venti CMC1: frequenza per direzione di provenienza. (b) Rosa dei venti WRF: frequenza per direzione di provenienza. (c) Rosa dei venti MM5: frequenza per direzione di provenienza.



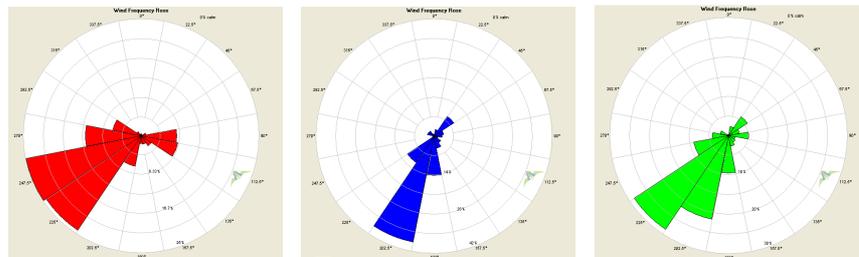
(d) Rosa dei venti CMC1: velocità media per direzione di provenienza. (e) Rosa dei venti WRF: velocità media per direzione di provenienza. (f) Rosa dei venti MM5: velocità media per direzione di provenienza.



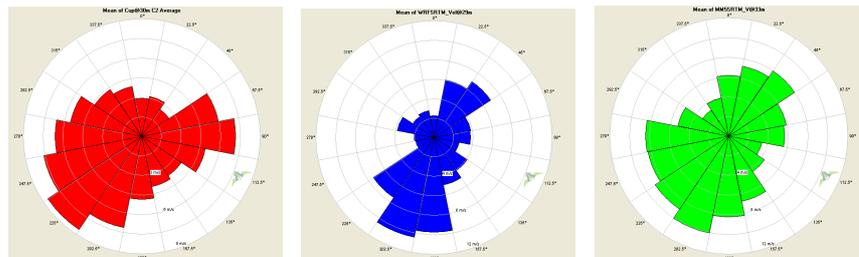
(g) Rosa dei venti CMC1: energia per direzione di provenienza. (h) Rosa dei venti WRF: energia per direzione di provenienza. (i) Rosa dei venti MM5: energia per direzione di provenienza.

Figura 5.49: Rose dei venti: media sul trimestre agosto÷ottobre 2009 a 30m sls.

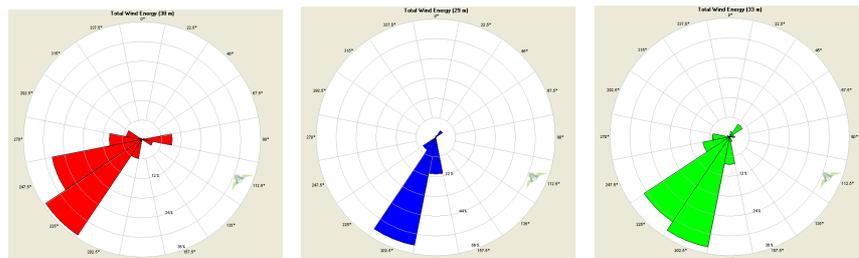
5.4. Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali



(a) Rosa dei venti CMC1: frequenza per direzione di provenienza. (b) Rosa dei venti WRF: frequenza per direzione di provenienza. (c) Rosa dei venti MM5: frequenza per direzione di provenienza.



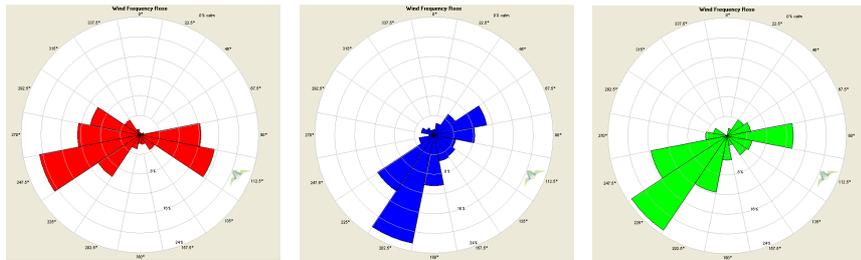
(d) Rosa dei venti CMC1: velocità media per direzione di provenienza. (e) Rosa dei venti WRF: velocità media per direzione di provenienza. (f) Rosa dei venti MM5: velocità media per direzione di provenienza.



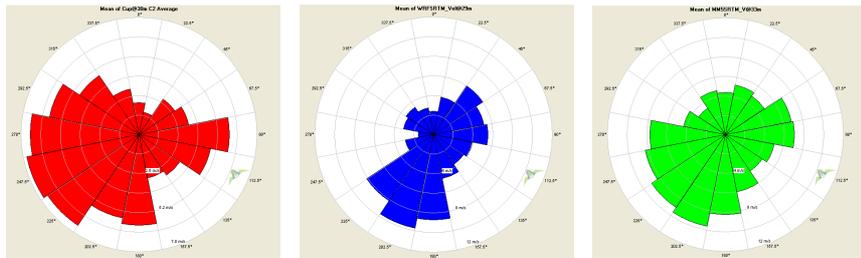
(g) Rosa dei venti CMC1: energia per direzione di provenienza. (h) Rosa dei venti WRF: energia per direzione di provenienza. (i) Rosa dei venti MM5: energia per direzione di provenienza.

Figura 5.50: Rose dei venti: media sul trimestre novembre 2009÷gennaio 2010 a 30m sls.

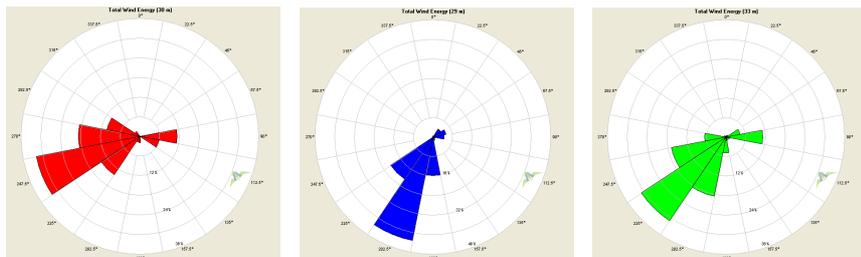
Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali



(a) Rosa dei venti CMC1: frequenza per direzione di provenienza. (b) Rosa dei venti WRF: frequenza per direzione di provenienza. (c) Rosa dei venti MM5: frequenza per direzione di provenienza.



(d) Rosa dei venti CMC1: velocità media per direzione di provenienza. (e) Rosa dei venti WRF: velocità media per direzione di provenienza. (f) Rosa dei venti MM5: velocità media per direzione di provenienza.



(g) Rosa dei venti CMC1: energia per direzione di provenienza. (h) Rosa dei venti WRF: energia per direzione di provenienza. (i) Rosa dei venti MM5: energia per direzione di provenienza.

Figura 5.51: Rose dei venti: media sul trimestre febbraio÷aprile 2010 a 30m sls.

5.4. Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali

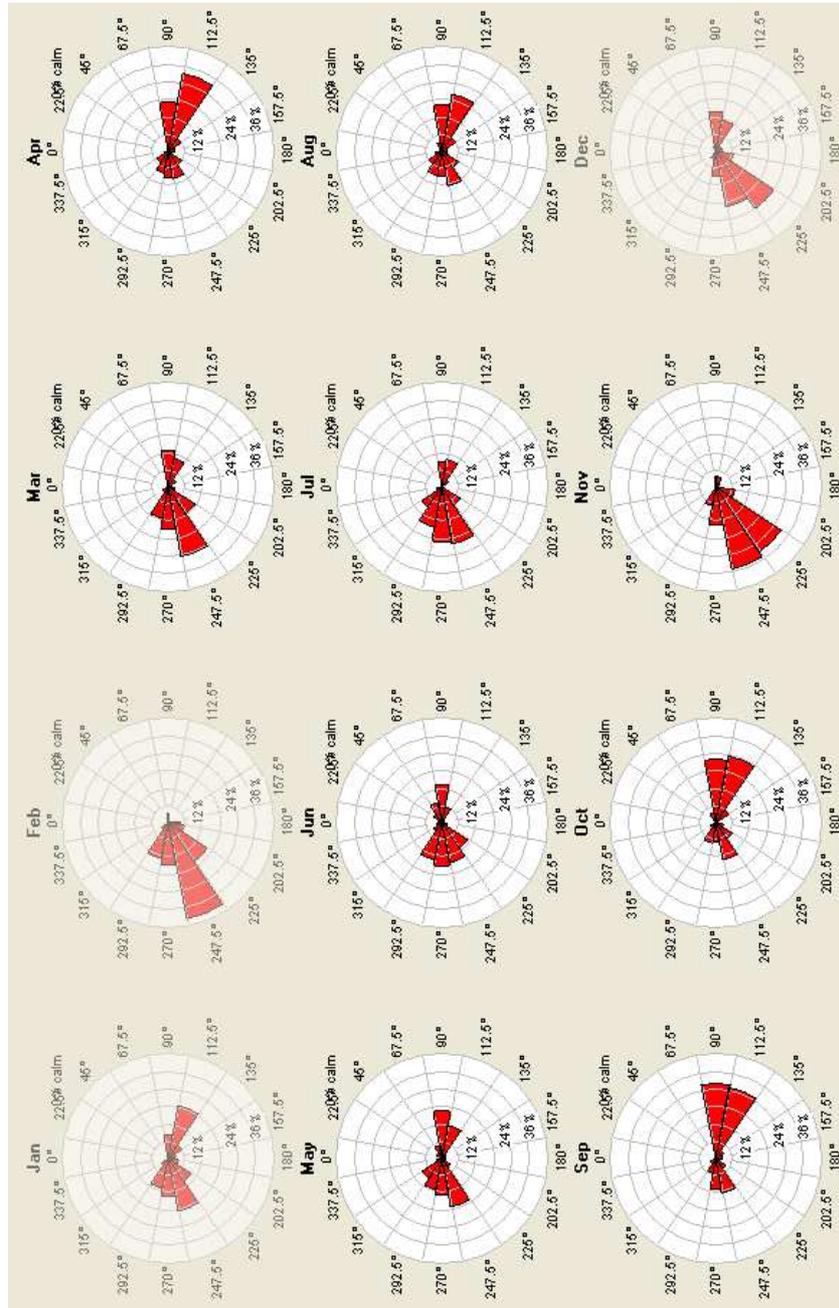


Figura 5.52: Rose dei venti mensili CMC1 a 30m sls: frequenza per direzione di provenienza.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

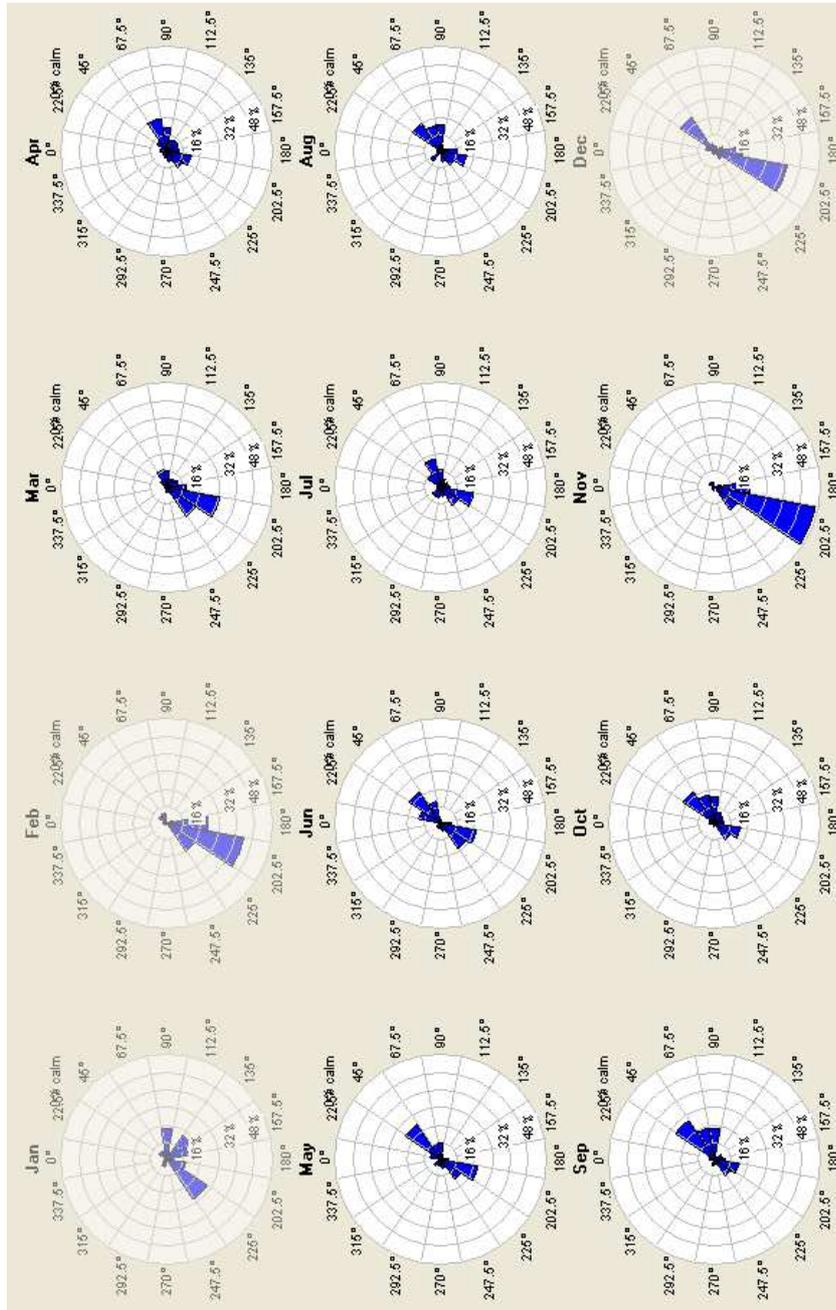


Figura 5.53: Rose dei venti mensili WRF a 30m sls: frequenza per direzione di provenienza.

5.4. Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali

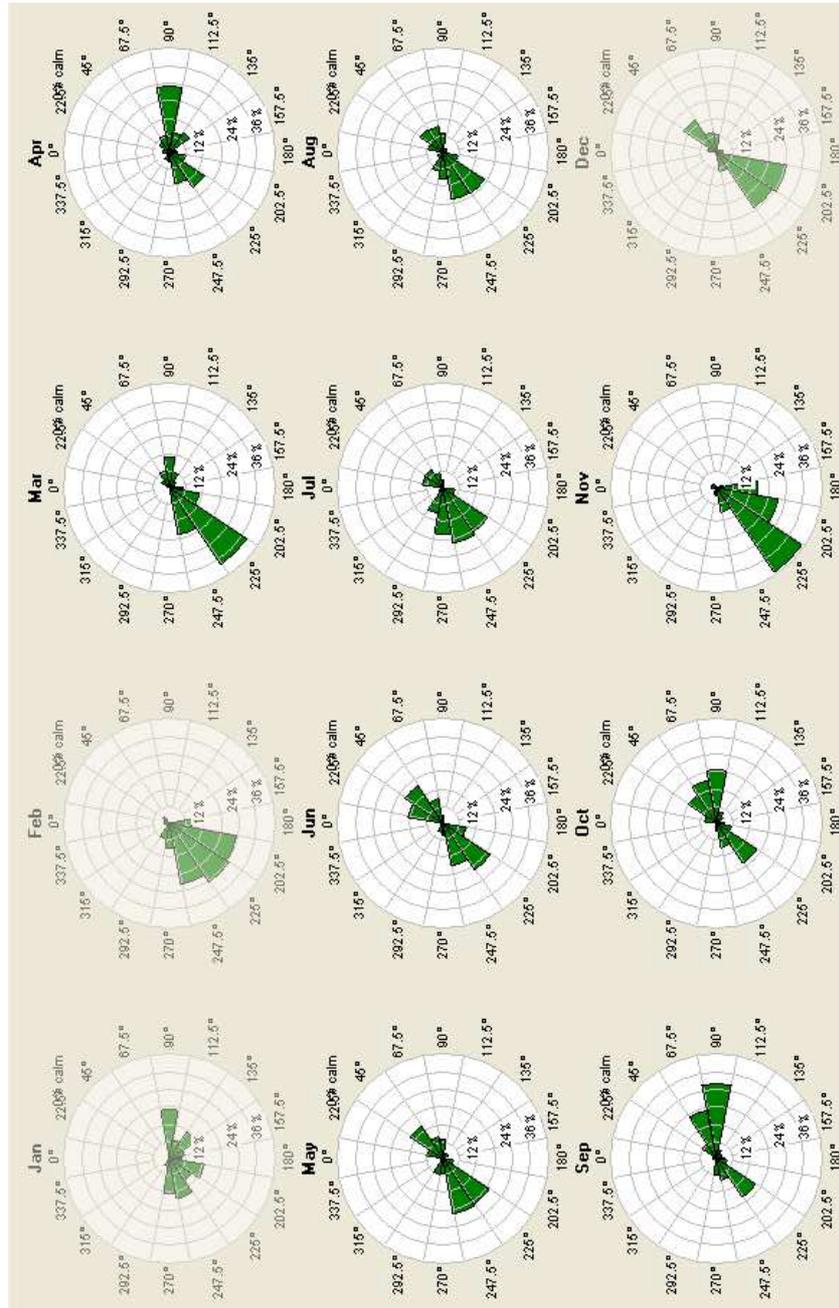


Figura 5.54: Rose dei venti mensili MM5 a 30m sls: frequenza per direzione di provenienza.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

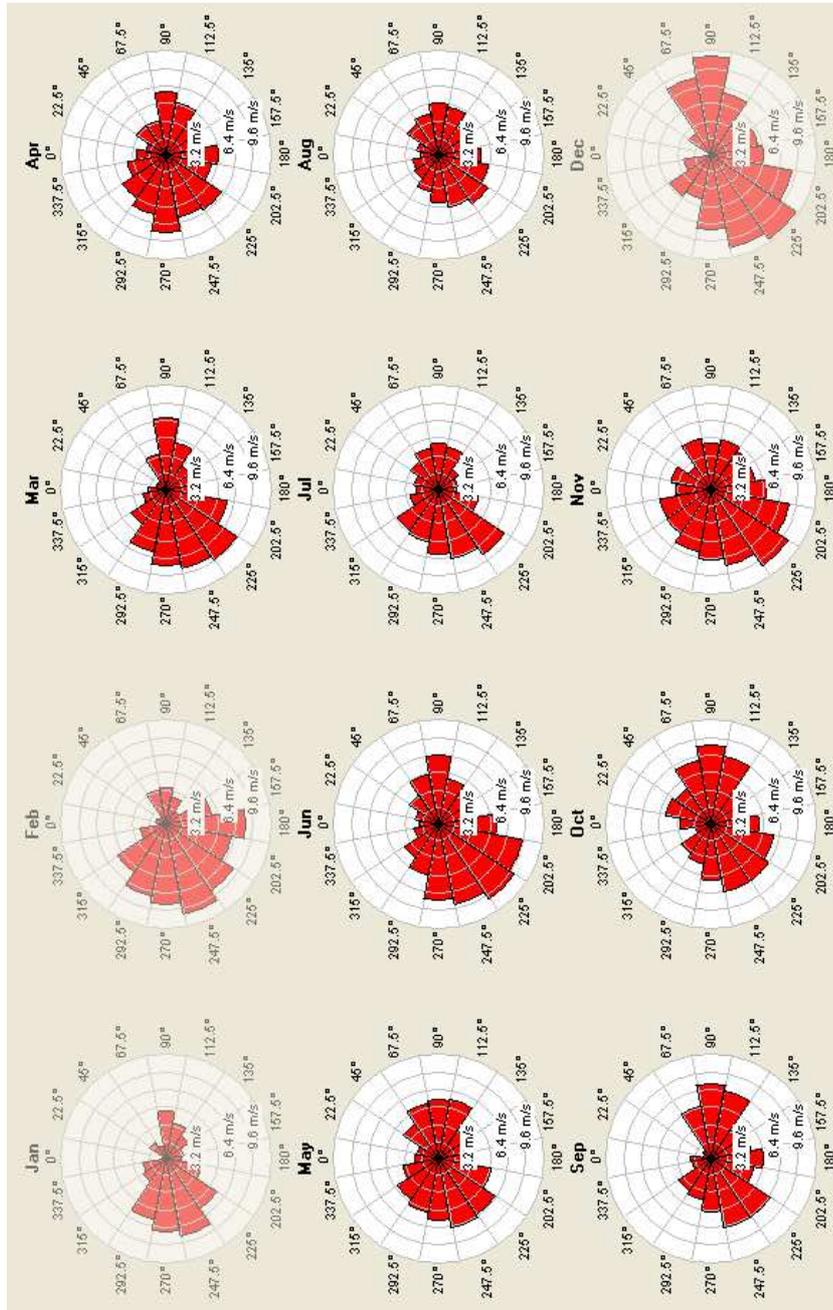


Figura 5.55: Rose dei venti mensili CMC1 a 30m sls: velocità media per direzione di provenienza.

5.4. Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali

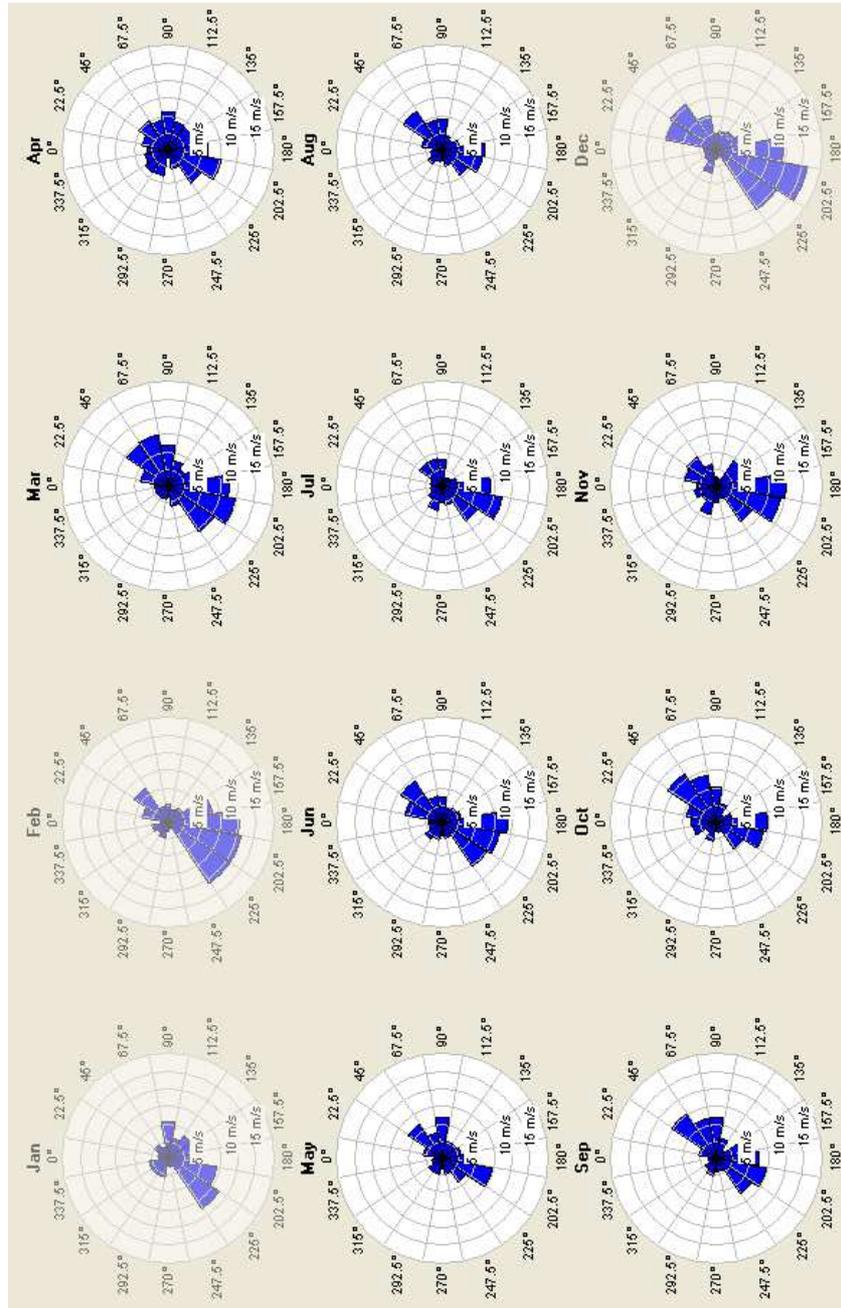


Figura 5.56: Rose dei venti mensili WRF a 30m sls: velocità media per direzione di provenienza.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

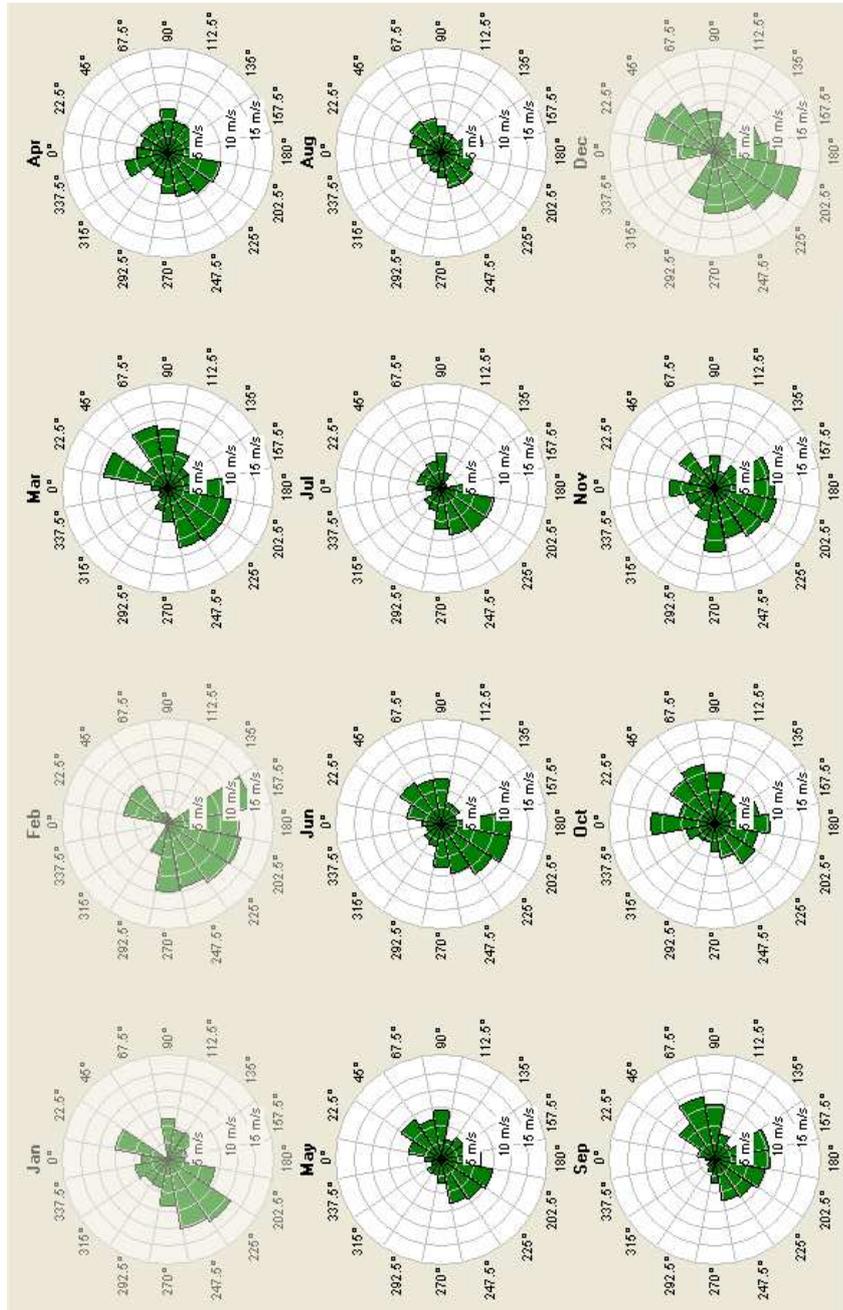


Figura 5.57: Rose dei venti mensili MM5 a 30m sls: velocità media per direzione di provenienza.

5.4. Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali

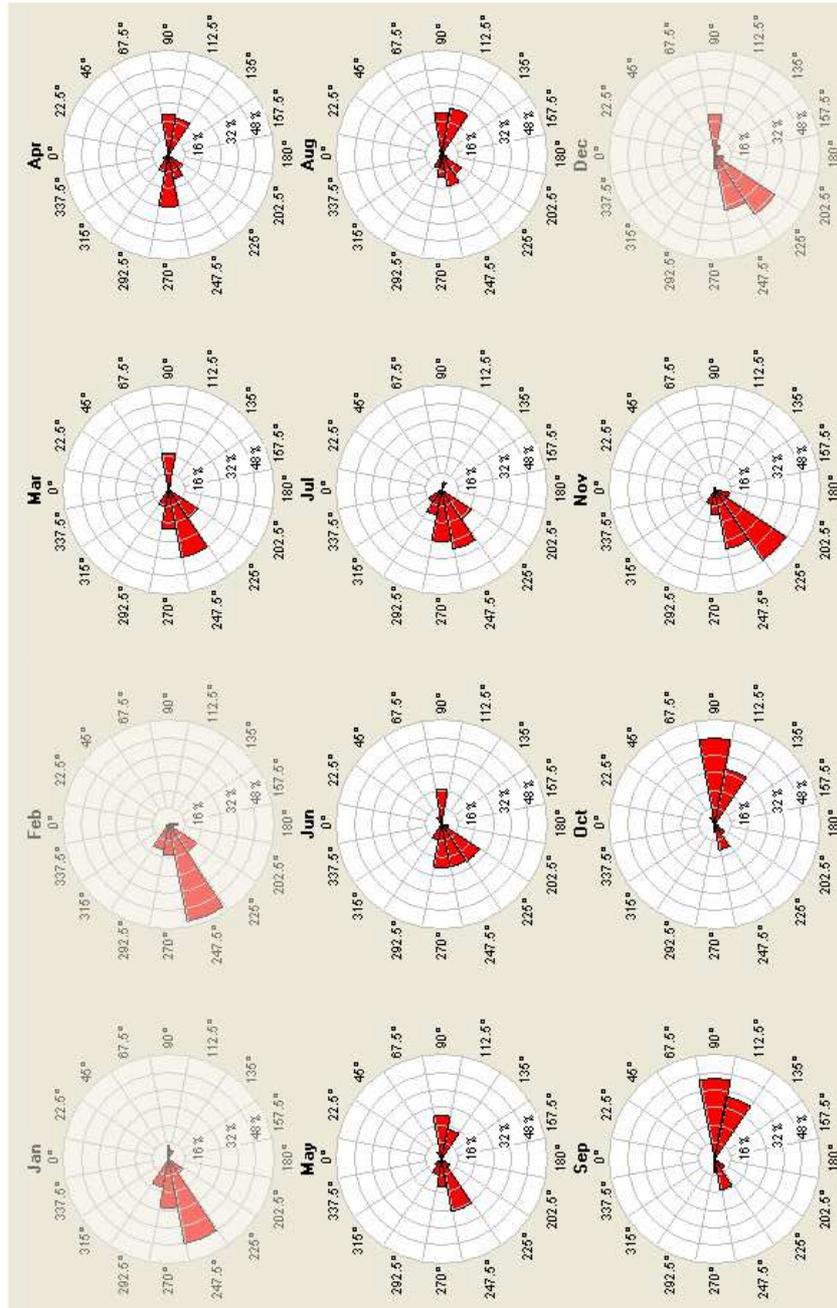


Figura 5.58: Rose dei venti mensili CMC1 a 30m sls: energia per direzione di provenienza.

Capitolo 5. Risultati delle simulazioni numeriche e confronto con i dati sperimentali

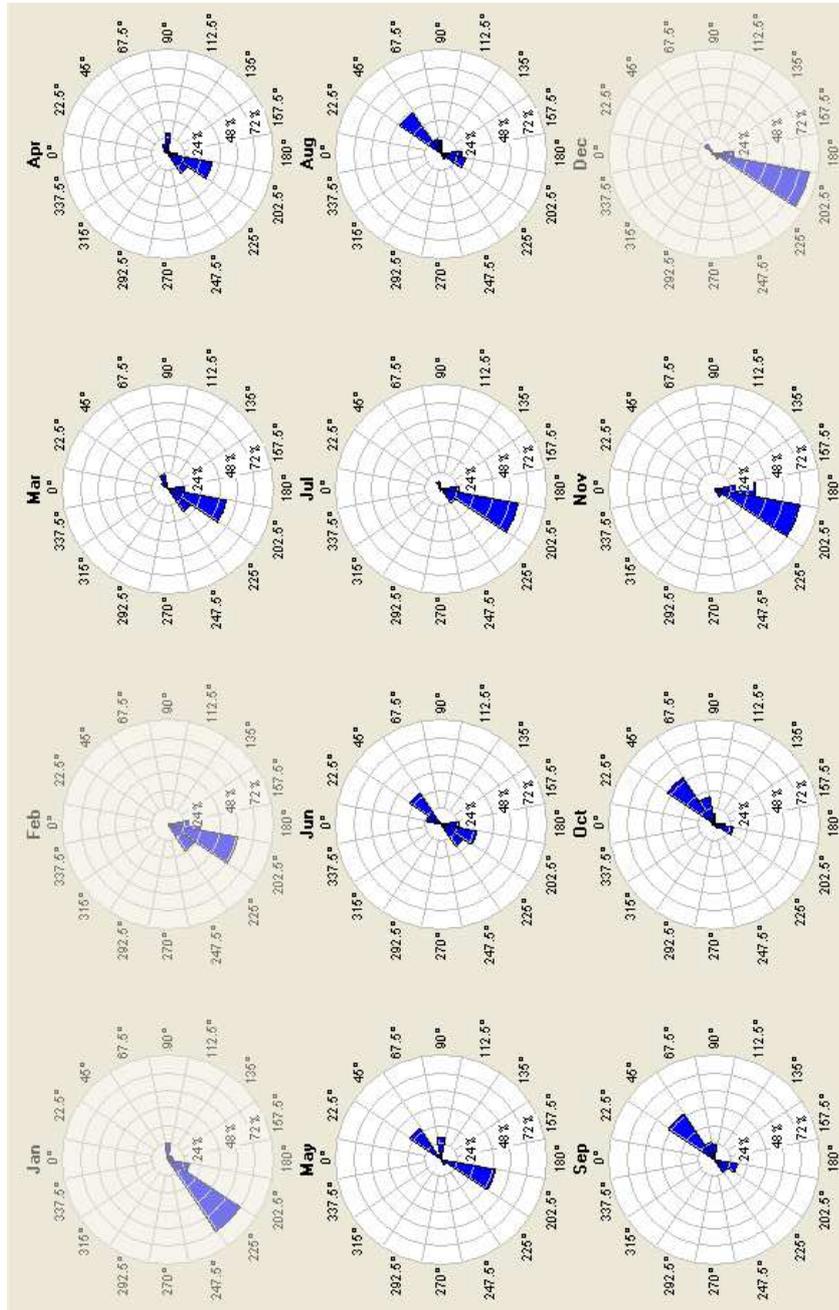


Figura 5.59: Rose dei venti mensili WRF a 30m sls: energia per direzione di provenienza.

5.4. Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali

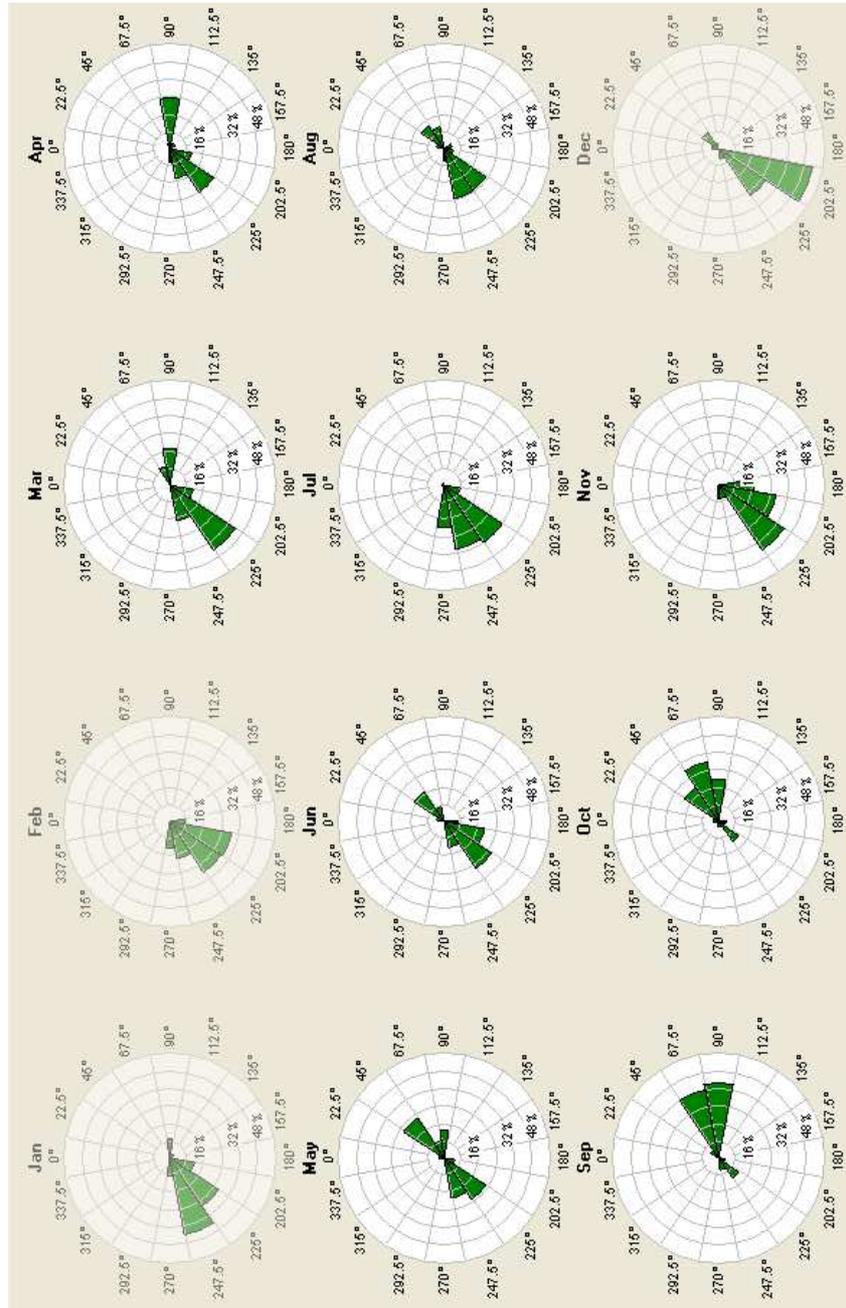


Figura 5.60: Rose dei venti mensili MM5 a 30m sls: energia per direzione di provenienza.

Conclusioni

Con il presente lavoro è stato sviluppato un protocollo numerico, basato sul modello fluidodinamico numerico di mesoscala Weather Research Forecast Mesoscale Model (**WRF**), per lo studio anemologico di aree ad orografia complessa. Il modello di mesoscala **WRF** è il successore del modello Mesoscale Model Fifth Generation (**MM5**) attualmente utilizzato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (**DIISM**) dell’Università Politecnica delle Marche (**UNIVPM**) oltre che presso i maggiori centri di ricerca meteorologica nel mondo. Lo sviluppo del codice di **MM5** è stato infatti abbandonato dalla comunità scientifica che lo ha prodotto in favore del nuovo modello **WRF**. Quest’ultimo è stato concepito sin dall’inizio con una struttura modulare, che ne permette il continuo aggiornamento con nuovi modelli di parametrizzazione. Prima di poter effettuare la sostituzione di **MM5** con **WRF** presso il **DIISM**, con questo lavoro è stata fatta partire una prima fase di “affiancamento” dei due codici che verranno d’ora in poi fatti lavorare in parallelo al fine di valutare le prestazioni e di scoprire le potenzialità offerte dal nuovo modello.

Il lavoro di implementazione del protocollo, che ha previsto lo sviluppo di tutta una serie di codici di pre e post processamento, è stato testato subito per lo studio del vento in aree a orografia complessa adottando delle modifiche che ne permettessero l’utilizzo con i formati di “terrain” ad alta risoluzione Shuttle Radar Topography Mission (**SRTM**). Si è scelto di affrontare lo studio di queste aree perché sono proprio quelle maggiormente disponibili, in termini di contenuto energetico, in Italia.

Sono state condotte diverse simulazioni numeriche annuali su un dominio di calcolo comprendente una torre anemometrica gestita dal **DIISM** dell’**UNIVPM**, posizionata sul Col di Mezzo, una collina tra il monte Tolagna ed il monte Miglioni nell’area del comune di Monte Cavallo (Mc).

I risultati numerici, confrontati con i dati sperimentali forniti dagli strumenti di misura in dotazione alla torre, hanno fornito delle indicazioni riguardo le prestazioni di **WRF** rispetto a **MM5**. In particolare si

5.4. Confronto tra i risultati numerici ottenuti con orografia SRTM e i dati sperimentali

osserva che:

- il valore della velocità media annuale prevista da **WRF**, affetto da uno scostamento del 4.3% rispetto al valore medio misurato dall’anemometro della torre, risulta nettamente migliore di quello previsto da **MM5**, il quale si scosta dal valore di riferimento sperimentale del 19.3%;
- purtroppo si nota un non altrettanto buon comportamento di **WRF**, rispetto a **MM5**, per ciò che riguarda gli andamenti delle temperature a 10m sls. In questo caso **MM5** fornisce dei valori di medie mensili e di andamenti giornalieri molto più aderenti a quelli forniti dal termometro della torre;
- per quanto riguarda le direzioni di provenienza dei venti, si nota che entrambi i modelli forniscono stime di angoli ruotati in verso antiorario. In particolare a 30m sls, **MM5** fornisce dei valori di direzione che si scostano in media di 22.5° mentre **WRF** ha in generale una deviazione di circa 45°.

I risultati forniti da **WRF** sono quindi stati confortanti in relazione alla stima della velocità media annuale, ma richiedono certamente ulteriori indagini al fine di capire i motivi che sono alla base della scarsa efficacia nella determinazione delle temperature e della provenienza dei venti. In ogni caso essi sono tali da incoraggiare sia il prosieguo del lavoro di sviluppo dei codici di pre e post processamento, sia e soprattutto il lavoro di sperimentazione dei nuovi modelli di parametrizzazione. Questi sono infatti continuamente aggiornati e sviluppati dalla comunità scientifica che lavora allo sviluppo di **WRF**, per cui risulta di notevole importanza testarne l’efficacia numerica, e l’individuazione dei più adatti allo studio della ventosità delle aree ad orografia complessa.

Appendice A

Richiami

A.1 Operazione di derivazione

A.1.1 Derivata sostanziale o totale di una funzione vettoriale

Ci si propone di trovare una espressione della derivata totale lagrangiana di una funzione vettoriale.

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \dots$$

Per semplicità si può procedere con una componente:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{dz}{dt} \\ &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v + \frac{\partial u}{\partial z} w \end{aligned}$$

e in definitiva scrivere:

$$\boxed{\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{V} \nabla u} \quad (\text{A.1})$$

In forma vettoriale, considerando analoghe relazioni per le rimanenti componenti:

$$\boxed{\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V}} \quad (\text{A.2})$$

in cui l'operatore:

$$(\vec{V} \nabla) u_i = \frac{\partial u_i}{\partial x} u + \frac{\partial u_i}{\partial y} v + \frac{\partial u_i}{\partial z} w \Big|_{i=1,2,3}$$

A.1. Operazione di derivazione

o anche:

$$(\vec{V}\nabla)(\dots) = \vec{V} \text{ grad } \vec{V}$$

Una ulteriore manipolazione permette di mettere in risalto le componenti di rotazione del moto.

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x}u + \frac{\partial u}{\partial y}v + \frac{\partial u}{\partial z}w \\ &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x}u + \frac{\partial v}{\partial x}v + \frac{\partial w}{\partial x}w + w \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2/2}{\partial x} + \frac{\partial v^2/2}{\partial x} + \frac{\partial w^2/2}{\partial x} + w \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u^2/2 + v^2/2 + w^2/2) + w \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial(u^2 + v^2 + w^2)}{\partial x} + w \overbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right)}^{\omega_2} - v \overbrace{\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)}^{\omega_3}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial(u^2 + v^2 + w^2)}{\partial y} + w \overbrace{\left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right)}^{-\omega_1} + u \overbrace{\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)}^{\omega_3}$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial(u^2 + v^2 + w^2)}{\partial z} + v \overbrace{\left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)}^{\omega_1} + u \overbrace{\left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right)}^{-\omega_2}$$

Al secondo membro delle equazioni di sopra si riconosce la presenza di termini del rotore del vettore \vec{V} :

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} &= \vec{i} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \vec{j} \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \vec{k} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ &= \vec{i} \omega_1 + \vec{j} \omega_2 + \vec{k} \omega_3 \\ &= \nabla \wedge \vec{V} \\ &= \vec{\omega} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial(u^2 + v^2 + w^2)}{\partial x} + w \omega_2 - v \omega_3 \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial(u^2 + v^2 + w^2)}{\partial y} - w \omega_1 + u \omega_3 \\ \frac{dw}{dt} &= \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial(u^2 + v^2 + w^2)}{\partial z} + v \omega_1 - u \omega_2 \end{aligned}$$

Capitolo A. Richiami

A questo punto sono evidenti al secondo membro delle equazioni sopra i termini del prodotto vettoriale $\vec{\omega} \wedge \vec{V}$:

$$\begin{aligned}\vec{\omega} \wedge \vec{V} &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 \\ u & v & w \end{vmatrix} \\ &= \vec{i}(\omega_2 w - \omega_3 v) - \vec{j}(\omega_1 w - \omega_3 u) + \vec{k}(\omega_1 v - \omega_2 u)\end{aligned}$$

Si può riscrivere:

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial(V^2)}{\partial x} + (\vec{\omega} \wedge \vec{V})_x \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial(V^2)}{\partial y} - (\vec{\omega} \wedge \vec{V})_y \\ \frac{dw}{dt} &= \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial(V^2)}{\partial z} + (\vec{\omega} \wedge \vec{V})_z\end{aligned}$$

e in definitiva:

$$\boxed{\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla(\vec{V} \cdot \vec{V}) + \vec{\omega} \wedge \vec{V}} \quad (\text{A.3})$$

A.1.2 Derivata di un vettore in un riferimento rotante

Siano $Oxyz$ un riferimento cartesiano inerziale con origine in O e $Ox'y'z$ un riferimento avente sempre origine in O , asse z in comune con il primo ma rotante intorno a questo con velocità angolare costante $\vec{\Omega}$ (ad esempio la velocità di rotazione della terra intorno al suo asse). Sia \vec{P} il vettore (ad esempio posizione del punto P) del quale si vuole l'espressione della derivata totale:

$$\vec{P} = P_1\vec{i} + P_2\vec{j} + P_3\vec{k} = P'_1\vec{i}' + P'_2\vec{j}' + P'_3\vec{k}'$$

espresso nel riferimento fisso (componenti senza apice) e rotante (componenti con apice). L'operazione di derivazione totale del vettore \vec{P} rispetto al tempo dovrà tener conto della rotazione dei versori \vec{i}' , \vec{j}' e \vec{k}' :

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{P}}{dt} &= \frac{d}{dt} [P_1\vec{i} + P_2\vec{j} + P_3\vec{k}] \\ &= \frac{d}{dt} [P'_1\vec{i}' + P'_2\vec{j}' + P'_3\vec{k}'] \\ &= P'_1 \frac{d\vec{i}'}{dt} + P'_2 \frac{d\vec{j}'}{dt} + P'_3 \frac{d\vec{k}'}{dt} + \vec{i}' \frac{dP'_1}{dt} + \vec{j}' \frac{dP'_2}{dt} + \vec{k}' \frac{dP'_3}{dt} \quad (\text{A.4})\end{aligned}$$

A.1. Operazione di derivazione

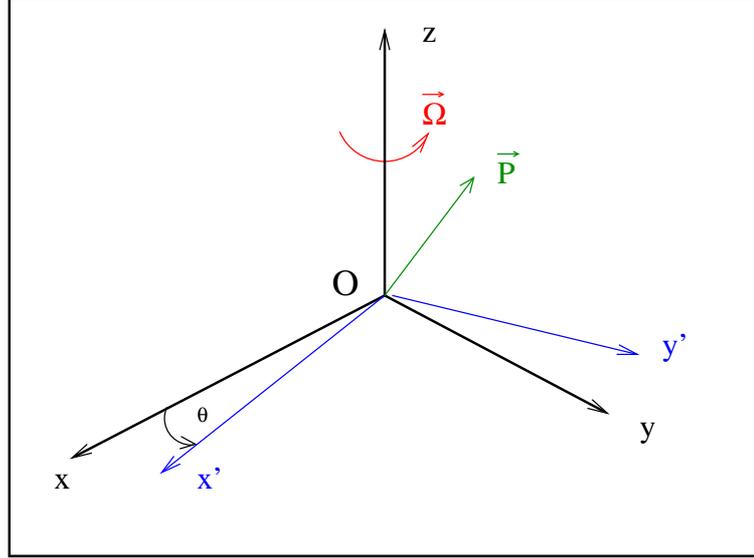


Figura A.1: Riferimenti inerziale e rotante

gli ultimi tre termini della A.4 rappresentano la velocità misurata da un osservatore solidale col sistema rotante, mentre i primi tre vanno esplicitati effettuando la derivazione dei versori del sistema rotante. Si vede subito che \vec{k}' non varia nel tempo e che quindi $dk'/dt = 0$, mentre le derivate di \vec{i}' e \vec{j}' possono essere ottenute considerando che:

$$d\vec{i}' = \vec{j}'\dot{\theta}dt \rightarrow \frac{d\vec{i}'}{dt} = \vec{j}'\dot{\theta} = \vec{\Omega} \wedge \vec{i}' \quad (\text{A.5})$$

Segue allora che la:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{d\vec{P}'}{dt} = \frac{d_r\vec{P}'}{dt} + \vec{\Omega} \wedge \vec{P}'$$

rappresenta la velocità di un punto espressa in termini di coordinate nel riferimento rotante con velocità angolare $\vec{\Omega}$:

$$\boxed{\vec{U} = \vec{U}_r + \vec{\Omega} \wedge \vec{P}'} \quad (\text{A.6})$$

data dalla somma di \vec{U}_r , velocità del punto relativa al sistema di riferimento rotante con la componente di trascinamento. Il passo successivo è quello di esprimere l'accelerazione del punto in termini di coordinate

Capitolo A. Richiami

nel riferimento rotante:

$$\begin{aligned}
 \vec{a} &= \frac{d\vec{U}}{dt} = \frac{d\vec{U}'}{dt} \\
 &= \frac{d_r \vec{U}'}{dt} + \vec{\Omega} \wedge \vec{U}' \\
 &= \frac{d_r}{dt} (\vec{U}_r + \vec{\Omega} \wedge \vec{P}') + \vec{\Omega} \wedge (\vec{U}_r + \vec{\Omega} \wedge \vec{P}') \\
 &= \underbrace{\frac{d_r \vec{U}_r}{dt}}_{\vec{a}_r} + \underbrace{\vec{\Omega} \wedge \frac{d_r \vec{P}'}{dt}}_{2\vec{\Omega} \wedge \vec{U}_r = \vec{a}_{Cor}} + \underbrace{\vec{\Omega} \wedge \vec{U}_r}_{\vec{a}_{Cor}} + \underbrace{\vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{P}')}_{-\Omega^2 \vec{R} = \vec{a}_{cen}}
 \end{aligned}$$

$$\boxed{\frac{d\vec{U}}{dt} = \frac{d_r \vec{U}_r}{dt} + 2\vec{\Omega} \wedge \vec{U}_r - \Omega^2 \vec{R}} \quad (A.7)$$

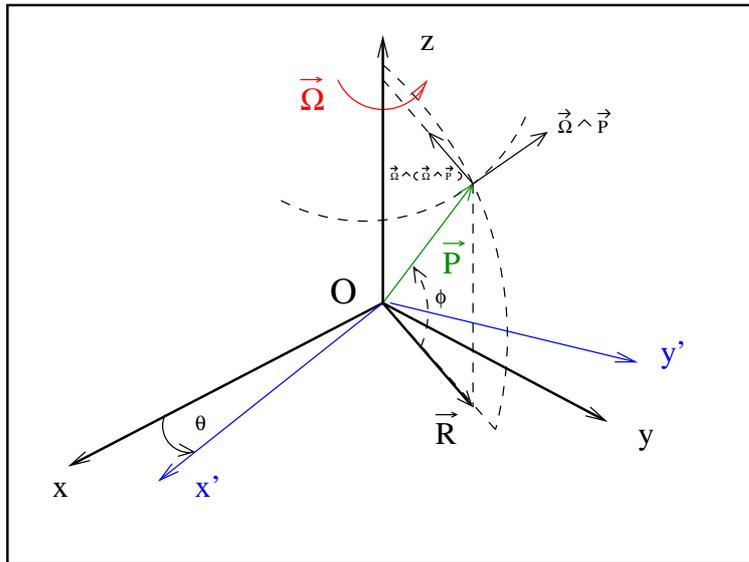


Figura A.2: Componente centripeta dell'accelerazione

$$\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_{cen} + \vec{a}_{Cor} \quad (A.8)$$

L'accelerazione del punto viene vista come somma di tre contributi:

- $\vec{a}_r = \frac{d_r \vec{U}_r}{dt}$: accelerazione del punto relativa al sistema di riferimento rotante;

A.1. Operazione di derivazione

- $\vec{a}_{cen} = -\Omega^2 \vec{R}$: accelerazione centripeta subita dal punto a causa della rotazione del sistema di riferimento mobile;
- $\vec{a}_{Cor} = 2\vec{\Omega} \wedge \vec{U}_r$: accelerazione di Coriolis.

A.1.3 Accelerazione in coordinate sferiche

Si esprimerà di seguito la (A.7) in coordinate sferiche solidali ad un punto P_0 posizionato su di una sfera di raggio r (la sfera terrestre) e individuato dalla latitudine ϕ e dalla longitudine λ :

$$P_0 = (\lambda, \phi, r)$$

Si individuano tre terne di versori:

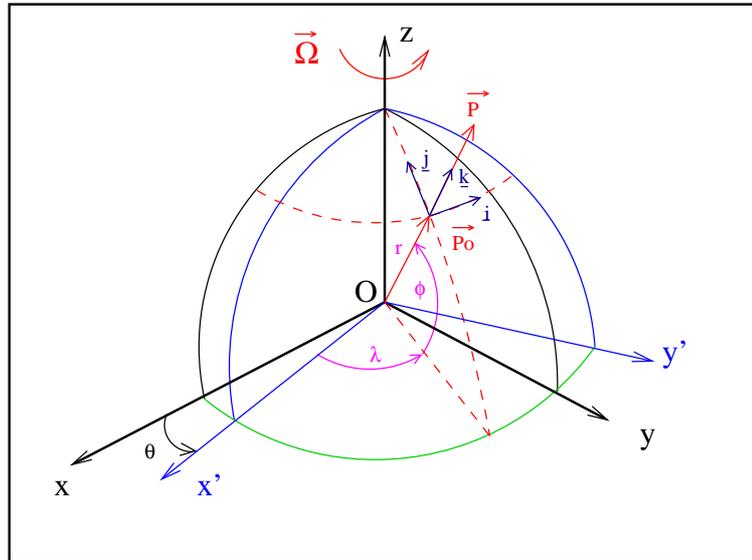


Figura A.3: Coordinate sferiche

- $(\vec{i}_0, \vec{j}_0, \vec{k}_0)$: che individua il riferimento cartesiano inerziale avente origine nel centro della sfera;
- $(\vec{i}', \vec{j}', \vec{k}_0)$: che individua il riferimento cartesiano rotante con velocità angolare $\vec{\Omega}$ avente origine nel centro della sfera;
- $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$: il riferimento cartesiano avente origine nel punto P_0 :
 - il versore \vec{i} tangente al parallelo passante per P_0 avente verso che punta ad est;

Capitolo A. Richiami

- il versore \vec{j} tangente al meridiano passante per P_0 avente verso che punta a nord;
- il versore \vec{k} passante per P_0 avente verso uscente dalla sfera e parallelo al vettore \vec{OP} proiezione sulla sfera del punto P del quale si vuole valutare l’accelerazione.

Si è visto come il passaggio dal riferimento inerziale a quello rotante con velocità angolare $\vec{\Omega}$, abbia determinato la comparsa dei termini di accelerazione centripeta e di Coriolis. Si può immaginare come il passaggio al sistema di riferimento che insegue il punto P con origine in P_0 determini la comparsa di nuovi termini dovuti alla curvatura della superficie sferica sulla quale il riferimento stesso si muove.

In coordinate sferiche (λ, ϕ, z) si avrà sempre:

$$\vec{U}_r = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$$

in cui

$$u = \frac{d\lambda}{dt}; \quad v = \frac{d\phi}{dt}; \quad w = \frac{dz}{dt}$$

L’accelerazione del punto P relativa al sistema di riferimento solidale alla superficie della sfera con origine in P_0 sarà:

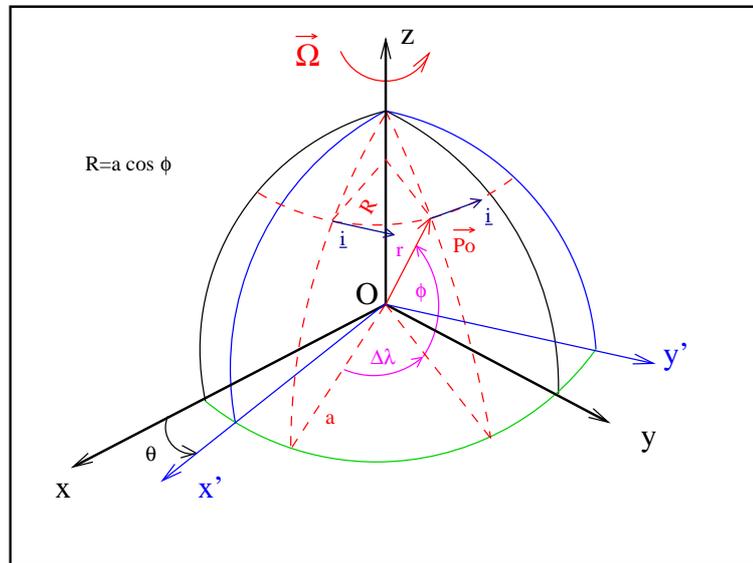
$$\begin{aligned} \frac{d\vec{U}_r}{dt} &= \frac{d}{dt} (u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}) \\ &= \frac{du}{dt}\vec{i} + \frac{dv}{dt}\vec{j} + \frac{dw}{dt}\vec{k} + u\frac{d\vec{i}}{dt} + v\frac{d\vec{j}}{dt} + w\frac{d\vec{k}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

I primi tre termini della (A.9) rappresentano l’accelerazione del punto espressa nelle componenti del sistema di riferimento, mentre gli ultimi tre rappresentano i termini di curvatura dovuti al fatto che la terna $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ si sposta inseguendo il punto P su di una superficie sferica. Sarà quindi necessario valutare le derivate dei versori dovute al movimento del punto P in coordinate sferiche.

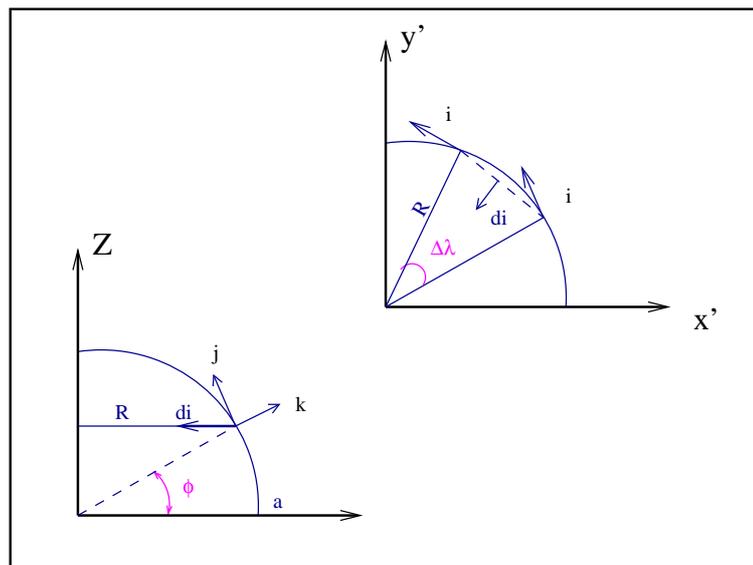
$$\begin{aligned} \frac{d\vec{i}}{dt} &= \frac{\partial \vec{i}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{i}}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial t} + \frac{\partial \vec{i}}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \vec{i}}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \\ &= \frac{\partial \vec{i}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{i}}{\partial \lambda} u + \frac{\partial \vec{i}}{\partial \phi} v + \frac{\partial \vec{i}}{\partial z} w \end{aligned}$$

I versori $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ non dipendono esplicitamente dal tempo per cui i termini $\frac{\partial(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})}{\partial t} = 0$, sarà inoltre $\frac{\partial \vec{i}}{\partial \phi} = 0$ così come $\frac{\partial \vec{i}}{\partial z} = 0$. Rimane solo da valutare $\frac{\partial \vec{i}}{\partial \lambda}$.

A.1. Operazione di derivazione



(a)



(b)

Figura A.4: Variazione di \vec{i} con λ

Dalla Fig. A.4(b) si può vedere come:

$$\delta i : \delta \lambda = a \cos \phi : 1$$

Capitolo A. Richiami

e:

$$\frac{\partial \vec{i}}{\partial \lambda} = \frac{\delta i}{\delta \lambda} (\sin \phi \vec{j} - \cos \phi \vec{k})$$

da cui:

$$\frac{\partial \vec{i}}{\partial t} = \frac{u}{a \cos \phi} (\sin \phi \vec{j} - \cos \phi \vec{k}) \quad (\text{A.10})$$

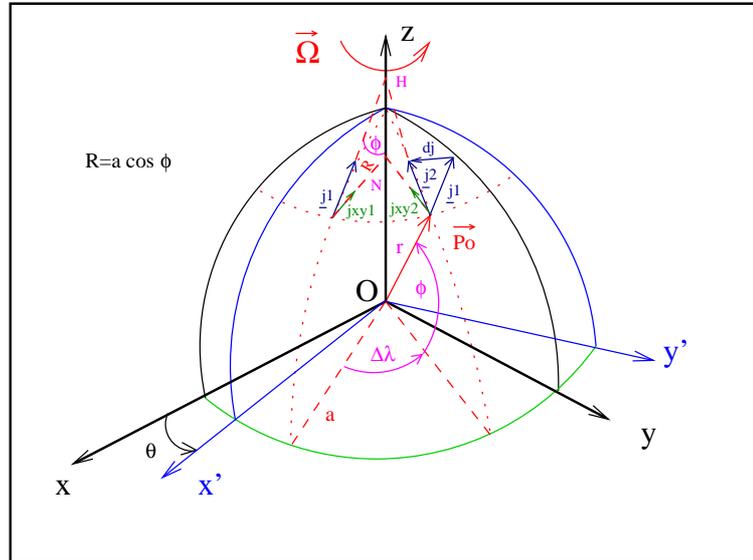
Si passa ora alla valutazione di $\frac{d\vec{j}}{dt}$:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{j}}{dt} &= \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{j}}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial t} + \frac{\partial \vec{j}}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \vec{j}}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \\ &= \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{j}}{\partial \lambda} u + \frac{\partial \vec{j}}{\partial \phi} v + \frac{\partial \vec{j}}{\partial z} w \end{aligned}$$

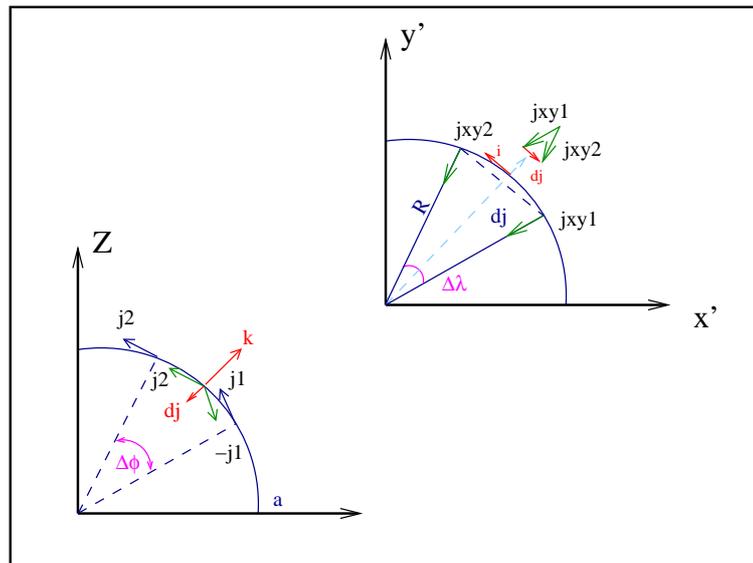
In questo caso sarà $\frac{\partial \vec{j}}{\partial z} = 0$ per cui:

$$\frac{d\vec{j}}{dt} = \frac{\partial \vec{j}}{\partial \lambda} u + \frac{\partial \vec{j}}{\partial \phi} v \quad (\text{A.11})$$

A.1. Operazione di derivazione



(a)



(b)

Figura A.5: Variazione di \vec{j} con λ e ϕ

Per quanto riguarda $\frac{\partial \vec{j}}{\partial \lambda}$ si vede dalla Fig. A.5(a) che:

$$R = a \cos \phi = \overline{HN} \sin \phi$$

Capitolo A. Richiami

e che:

$$\delta j : \delta \lambda = 1 : \bar{H}N$$

da cui:

$$\frac{\delta j}{\delta \lambda} = \frac{\tan \phi}{a}$$

che risulta essere parallela a \vec{i} :

$$\frac{\partial \vec{j}}{\partial \lambda} = -\frac{\tan \phi}{a} \vec{i} \quad (\text{A.12})$$

Dalla Fig. A.5(b) si vede inoltre che:

$$\delta j : \delta \phi = 1 : a$$

da cui:

$$\frac{\delta j}{\delta \phi} = \frac{1}{a}$$

che risulta essere parallela a \vec{k} :

$$\frac{\partial \vec{j}}{\partial \phi} = -\frac{1}{a} \vec{k} \quad (\text{A.13})$$

In definitiva inserendo nella Eq. (A.11) le Eq. (A.12) e (A.13) si ottiene:

$$\frac{\partial \vec{j}}{\partial t} = -u \frac{\tan \phi}{a} \vec{i} - v \frac{1}{a} \vec{k} \quad (\text{A.14})$$

Per finire si passa alla valutazione di $\frac{d\vec{k}}{dt}$:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{k}}{dt} &= \frac{\partial \vec{k}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{k}}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial t} + \frac{\partial \vec{k}}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \vec{k}}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \\ &= \frac{\partial \vec{k}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{k}}{\partial \lambda} u + \frac{\partial \vec{k}}{\partial \phi} v + \frac{\partial \vec{k}}{\partial z} w \end{aligned}$$

Il versore \vec{k} non dipende esplicitamente né dal tempo né dalla z , per cui sarà:

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = \frac{\partial \vec{k}}{\partial \lambda} u + \frac{\partial \vec{k}}{\partial \phi} v \quad (\text{A.15})$$

Capitolo A. Richiami

da cui:

$$\frac{\delta k}{\delta \lambda} = \frac{1}{a}$$

parallela al versore \vec{i} .

$$\frac{\partial \vec{k}}{\partial \lambda} = \frac{1}{a} \vec{i} \quad (\text{A.16})$$

Manca a questo punto solo l'espressione di $\frac{\partial \vec{k}}{\partial \phi}$. Dalla Fig. A.6(b) si ha che:

$$\delta k : \delta \phi = 1 : a$$

parallela al versore \vec{j} per cui:

$$\frac{\partial \vec{k}}{\partial \phi} = \frac{1}{a} \vec{j} \quad (\text{A.17})$$

I definitiva inserendo le Eq. (A.16) e (A.17) nella Eq. (A.15) si ottiene la:

$$\frac{\partial \vec{k}}{\partial t} = \frac{1}{a} u \vec{i} + \frac{1}{a} v \vec{j} \quad (\text{A.18})$$

L'espressione (A.9) sarà:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{U}_r}{td} &= \frac{du}{dt} \vec{i} + \frac{dv}{dt} \vec{j} + \frac{dw}{dt} \vec{k} + \\ &\quad \frac{u^2}{a \cos \phi} (\sin \phi \vec{j} - \cos \phi \vec{k}) - uv \frac{\tan \phi}{a} \vec{i} - v^2 \frac{1}{a} \vec{k} + \\ &\quad \frac{1}{a} uw \vec{i} + \frac{1}{a} vw \vec{j} \end{aligned}$$

e ricordando l'Eq. (A.2):

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{U}_r}{td} &= \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \vec{i} + \\ &\quad \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \vec{j} + \\ &\quad \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \vec{k} + \\ &\quad \frac{u^2}{a \cos \phi} (\sin \phi \vec{j} - \cos \phi \vec{k}) - uv \frac{\tan \phi}{a} \vec{i} - v^2 \frac{1}{a} \vec{k} + \\ &\quad \frac{1}{a} uw \vec{i} + \frac{1}{a} vw \vec{j} \end{aligned}$$

Si potrà ottenere l'espressione finale dell'Eq. (A.7) in coordinate sferiche esprimendo le accelerazioni centripeta e di Coriolis nel medesimo sistema di riferimento:

A.1. Operazione di derivazione

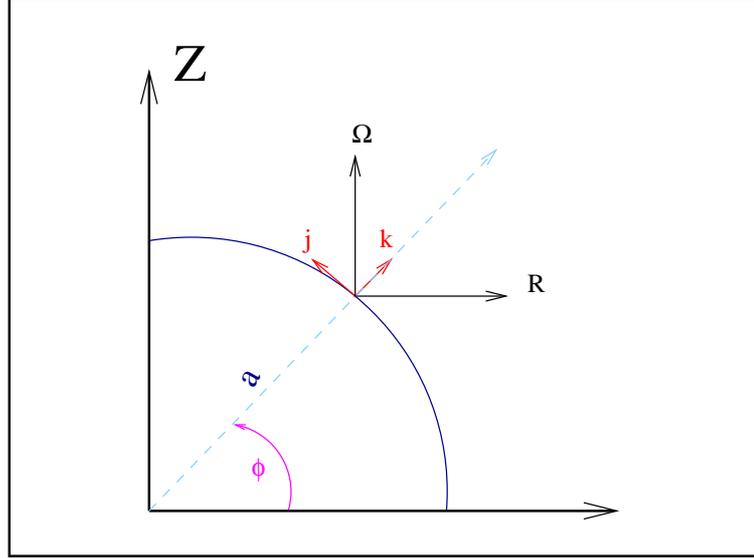


Figura A.7: Accelerazioni: componenti in coordinate sferiche

Accelerazione di Coriolis: $2\vec{\Omega} \wedge \vec{U} = 2 \left(\Omega \cos \phi \vec{j} + \Omega \sin \phi \vec{k} \right) \wedge \left(u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \right)$

$$2\vec{\Omega} \wedge \vec{U} = 2\vec{i}(w\Omega \cos \phi - v\Omega \sin \phi) + 2\vec{j}u\Omega \sin \phi - 2\vec{k}u\Omega \cos \phi \quad (\text{A.19})$$

Accelerazione di centripeta: $-\Omega^2 \vec{R} = -\Omega^2 \left(-\sin \phi \vec{j} + \cos \phi \vec{k} \right) a \cos \phi$ (A.20)

A questo punto le espressioni delle tre componenti dell'accelerazione sono complete:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - 2\Omega v \sin \phi + 2\Omega w \cos \phi - \\ &\quad \frac{uv \tan \phi}{a} + \frac{uw}{a} \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + 2u\Omega \sin \phi + \Omega^2 a \sin \phi \cos \phi + \\ &\quad \frac{u^2 \tan \phi}{a} + \frac{uv}{a} \\ \frac{dw}{dt} &= \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} - 2u\Omega \cos \phi - \Omega^2 a \cos \phi^2 - \\ &\quad \frac{u^2 + v^2}{a} \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

Capitolo A. Richiami

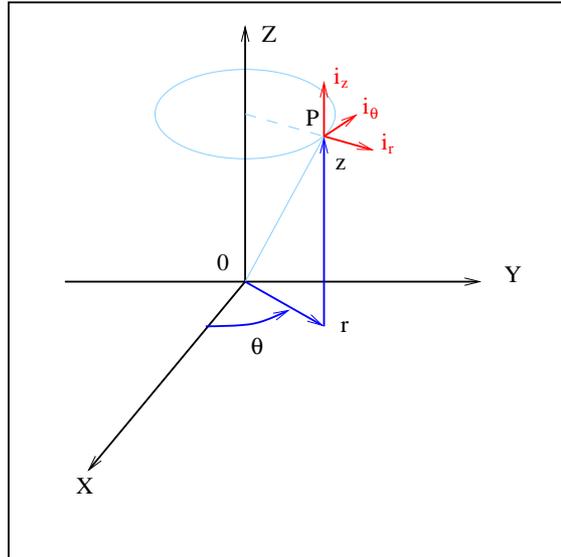


Figura A.8: Coordinate cilindriche.

A.1.4 Derivata di versori in coordinate cilindriche

$$\frac{\partial \vec{v}_{(r,\theta,z)}}{\partial (r,z)} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{v}_r}{\partial \theta} = \vec{v}_\theta$$

$$\frac{\partial \vec{v}_\theta}{\partial \theta} = -\vec{v}_r$$

$$\frac{\partial \vec{v}_z}{\partial \theta} = 0$$

A.1.5 Gradiente

Coordinate cartesiane ortogonali

$$\nabla(\dots) = \frac{\partial(\dots)}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial(\dots)}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial(\dots)}{\partial z} \vec{k}$$

Coordinate cilindriche

$$\nabla(\dots) = \frac{\partial(\dots)}{\partial r} \vec{v}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial(\dots)}{\partial \theta} \vec{v}_\theta + \frac{\partial(\dots)}{\partial z} \vec{v}_z$$

A.1. Operazione di derivazione

A.1.6 Laplaciano

Laplaciano di uno scalare

Cartesiane ortogonali L’espressione del laplaciano in coordinate ortogonali cartesiane è banale.

$$\nabla^2(\dots) = \frac{\partial^2(\dots)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\dots)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\dots)}{\partial z^2}$$

Coordinate cilindriche Nel ricavare l’espressione del laplaciano in coordinate cilindriche si deve fare qualche passaggio in più dovendo tener conto delle derivate dei versori.

$$\begin{aligned} \nabla^2(\dots) &= \left(\frac{\partial(\dots)}{\partial r} \vec{i}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial(\dots)}{\partial \theta} \vec{i}_\theta + \frac{\partial(\dots)}{\partial z} \vec{i}_z \right) \cdot \left(\frac{\partial(\dots)}{\partial r} \vec{i}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial(\dots)}{\partial \theta} \vec{i}_\theta + \frac{\partial(\dots)}{\partial z} \vec{i}_z \right) \\ &= \frac{\partial^2(\dots)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2(\dots)}{\partial z^2} + \vec{i}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\vec{i}_r \frac{\partial(\dots)}{\partial r} \right) + \vec{i}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\vec{i}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial(\dots)}{\partial \theta} \right) + \\ &\quad + \vec{i}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\vec{i}_z \frac{\partial(\dots)}{\partial z} \right) \\ &= \frac{\partial^2(\dots)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2(\dots)}{\partial z^2} + \vec{i}_\theta \vec{i}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial(\dots)}{\partial r} + \vec{i}_\theta \vec{i}_\theta \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2(\dots)}{\partial \theta^2} \end{aligned}$$

$$\nabla^2(\dots) = \frac{\partial^2(\dots)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\dots)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2(\dots)}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2(\dots)}{\partial z^2}$$

Capitolo A. Richiami

A.1.7 Laplaciano di un vettore

Coordinate cartesiane ortogonali

$$\begin{aligned}
 \nabla^2 \vec{V} &= \left(\frac{\partial^2(\dots)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\dots)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\dots)}{\partial z^2} \right) \cdot \vec{V} \\
 &= \frac{\partial^2(u\vec{i})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(v\vec{j})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(w\vec{k})}{\partial x^2} + \\
 &\quad + \frac{\partial^2(u\vec{i})}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(v\vec{j})}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(w\vec{k})}{\partial y^2} + \\
 &\quad + \frac{\partial^2(u\vec{i})}{\partial z^2} + \frac{\partial^2(v\vec{j})}{\partial z^2} + \frac{\partial^2(w\vec{k})}{\partial z^2} \\
 &= \vec{i} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \\
 &\quad + \vec{j} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \\
 &\quad + \vec{k} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)
 \end{aligned}$$

$$\nabla^2 \vec{V} = \vec{i} \nabla^2(u) + \vec{j} \nabla^2(v) + \vec{k} \nabla^2(w)$$

A.1. Operazione di derivazione

Coordinate cilindriche

$$\begin{aligned}
 \nabla^2 \vec{V} &= \left(\frac{\partial^2(\dots)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\dots)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2(\dots)}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2(\dots)}{\partial z^2} \right) \cdot \vec{V} \\
 &= \frac{\partial^2(u_r \vec{i}_r)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2(u_\theta \vec{i}_\theta)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2(u_z \vec{i}_z)}{\partial r^2} + \\
 &\quad + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(u_r \vec{i}_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_\theta \vec{i}_\theta)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z \vec{i}_z)}{\partial r} \right) + \\
 &\quad + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2(u_r \vec{i}_r)}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2(u_\theta \vec{i}_\theta)}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2(u_z \vec{i}_z)}{\partial \theta^2} \right) + \\
 &\quad + \frac{\partial^2(u_r \vec{i}_r)}{\partial z^2} + \frac{\partial^2(u_\theta \vec{i}_\theta)}{\partial z^2} + \frac{\partial^2(u_z \vec{i}_z)}{\partial z^2} \\
 &= \vec{i}_r \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \vec{i}_\theta \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \vec{i}_z \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \\
 &\quad + \frac{1}{r} \left(\vec{i}_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \vec{i}_\theta \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \vec{i}_z \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \\
 &\quad + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\vec{i}_r \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_r \vec{i}_\theta + \vec{i}_\theta \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - u_\theta \vec{i}_r + \vec{i}_z \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \right) + \\
 &\quad + \vec{i}_r \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} + \vec{i}_\theta \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} + \vec{i}_z \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \\
 &= \vec{i}_r \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \vec{i}_\theta \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \vec{i}_z \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \\
 &\quad + \frac{1}{r} \left(\vec{i}_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \vec{i}_\theta \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \vec{i}_z \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \\
 &\quad + \frac{1}{r^2} \left(\vec{i}_r \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \vec{i}_\theta \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \vec{i}_\theta \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \vec{i}_r u_r + \right. \\
 &\quad \left. + \vec{i}_\theta \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} - \vec{i}_r \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - u_\theta \vec{i}_\theta - \vec{i}_r \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \vec{i}_z \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} \right) + \\
 &\quad \vec{i}_r \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} + \vec{i}_\theta \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} + \vec{i}_z \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \\
 &= \vec{i}_r \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) + \\
 &\quad + \vec{i}_\theta \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) + \\
 &\quad + \vec{i}_z \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right)
 \end{aligned}$$

Capitolo A. Richiami

$$\nabla^2 \vec{V} = \vec{i}_r \left(\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) + \vec{i}_\theta \left(\nabla^2 u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) + \vec{i}_z (\nabla^2 u_z) \quad (\text{A.22})$$

A.1.8 Divergenza

Coordinate cartesiane ortogonali

$$\nabla \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

Coordinate cilindriche

$$\begin{aligned} \nabla \vec{V} &= \left(\frac{\partial(\dots)}{\partial r} \vec{i}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial(\dots)}{\partial \theta} \vec{i}_\theta + \frac{\partial(\dots)}{\partial z} \vec{i}_z \right) \cdot \vec{V} \\ &= \left(\frac{\partial(u_r \vec{i}_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_\theta \vec{i}_\theta)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z \vec{i}_z)}{\partial r} \right) \vec{i}_r + \\ &\quad + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(u_r \vec{i}_r)}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial(u_\theta \vec{i}_\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial(u_z \vec{i}_z)}{\partial \theta} \right) \vec{i}_\theta + \\ &\quad + \left(\frac{\partial(u_r \vec{i}_r)}{\partial z} + \frac{\partial(u_\theta \vec{i}_\theta)}{\partial z} + \frac{\partial(u_z \vec{i}_z)}{\partial z} \right) \vec{i}_z \\ &= \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \nabla \vec{V} &= \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{aligned}$$

A.1.9 Rotore

Coordinate cartesiane ortogonali

$$\begin{aligned} \nabla \wedge \vec{V} &= \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right) \wedge (u \vec{i} + v \vec{j} + w \vec{k}) \\ &= \vec{i} \wedge \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + \vec{j} \wedge \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + \vec{k} \wedge \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \\ &= \frac{\partial v}{\partial x} \vec{k} - \frac{\partial w}{\partial x} \vec{j} - \frac{\partial u}{\partial y} \vec{k} + \frac{\partial w}{\partial y} \vec{i} + \frac{\partial u}{\partial z} \vec{j} - \frac{\partial v}{\partial z} \vec{i} \\ &= \vec{i} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \vec{j} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \vec{k} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \nabla \wedge \vec{V} &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \end{aligned}$$

A.1. Operazione di derivazione

Coordinate cilindriche

$$\begin{aligned}
 \nabla \wedge \vec{V} &= \left(\frac{\partial}{\partial r} \vec{i}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \vec{i}_\theta + \frac{\partial}{\partial z} \vec{i}_z \right) \wedge (u_r \vec{i}_r + u_\theta \vec{i}_\theta + u_z \vec{i}_z) \\
 &= \vec{i}_r \wedge \frac{\partial \vec{V}}{\partial r} + \frac{1}{r} \vec{i}_\theta \wedge \frac{\partial \vec{V}}{\partial \theta} + \vec{i}_z \wedge \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \\
 &= \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \vec{i}_z + \frac{\partial u_z}{\partial r} \vec{i}_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \vec{i}_z + \frac{u_\theta}{r} \vec{i}_z + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \vec{i}_r + \\
 &\quad + \frac{\partial u_r}{\partial z} \vec{i}_\theta - \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \vec{i}_r \\
 &= \vec{i}_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} - \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) + \\
 &\quad + \vec{i}_\theta \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \\
 &\quad + \vec{i}_z \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{u_\theta}{r} \right) \\
 &= \vec{i}_r \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_z}{\partial \theta} - r \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) + \vec{i}_\theta \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \vec{i}_z \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r u_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right)
 \end{aligned}$$

$$\nabla \wedge \vec{V} = \begin{vmatrix} \frac{1}{r} \vec{i}_r & \vec{i}_\theta & \frac{1}{r} \vec{i}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u_r & r u_\theta & u_z \end{vmatrix}$$

$$\vec{\omega} \wedge \vec{V}$$

Ricordando che:

$$\vec{\omega} = \nabla \wedge \vec{V}$$

$$\vec{\omega} \wedge \vec{V} = \begin{vmatrix} \vec{i}_r & \vec{i}_\theta & \vec{i}_z \\ \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_z}{\partial \theta} - r \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) & \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) & \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r u_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \\ u_r & r u_\theta & u_z \end{vmatrix}$$

Capitolo A. Richiami

Svolgendo i calcoli e riorganizzando:

$$\begin{aligned}
 \vec{\omega} \wedge \vec{V} &= \vec{i}_r \left[u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} - u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - u_z \frac{\partial u_z}{\partial r} - u_\theta \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta^2}{r} \right] + \\
 &\quad \vec{i}_\theta \left[u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{u_r u_\theta}{r} - \frac{u_r}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_z}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \right] + \\
 &\quad \vec{i}_z \left[u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} - u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} - u_\theta \frac{\partial u_\theta}{\partial z} - u_r \frac{\partial u_r}{\partial z} \right] \\
 &= \vec{i}_r \left[u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{1}{2} \frac{\partial \vec{V}^2}{\partial r} - \frac{u_\theta^2}{r} \right] + \\
 &\quad \vec{i}_\theta \left[u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} - \frac{1}{2r} \frac{\partial \vec{V}^2}{\partial \theta} + \frac{u_r u_\theta}{r} \right] + \\
 &\quad \vec{i}_z \left[u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{1}{2} \frac{\partial \vec{V}^2}{\partial z} \right]
 \end{aligned}$$

A.2 Teoremi

A.2.1 Teorema di Gauss

Forma vettoriale:

$$\int_S \vec{\phi} \cdot \vec{n} \, dS = \int_V \nabla \cdot \vec{\phi} \, dv \quad (\text{A.23})$$

Forma scalare:

$$\int_S \phi_i n_i \, dS = \int_V \frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} \, dv \Big|_{(i=1,2,3)} \quad (\text{A.24})$$

Corollario

Forma vettoriale:

$$\int_S f \vec{n} \, dS = \int_V \nabla f \, dv \quad (\text{A.25})$$

Forma scalare:

$$\int_S f n_i \, ds = \int_V \frac{\partial f}{\partial x_i} \, dv \Big|_{(i=1,2,3)} \quad (\text{A.26})$$

A.2.2 Teorema del trasporto di Reynolds

Il teorema di trasformazione di Reynolds è di fondamentale importanza. Esso permette di passare facilmente dall'espressione generica del teorema della quantità di moto alla sua versione sotto la forma delle equazioni di *Navier-Stokes*.

La derivata totale, ossia *Lagrangiana* di una grandezza viene in virtù di tale teorema, espressa in termini delle sue componenti parziali.

Teorema 1 *Sia B una grandezza estensiva legata a b intensiva che ne rappresenta il valore per unità di volume di controllo V_c avente superficie di contorno S_c :*

$$B = \int_{V_c} b \rho dv$$

e $\frac{D}{Dt}$ la derivata totale o *Lagrangiana* di B :

$$\frac{DB}{Dt} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{B(t + \delta t) - B(t)}{\delta t}$$

allora:

$$\boxed{\frac{DB}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} b \rho dv + \int_{S_c} b \rho \vec{V} \vec{n} dS} \quad (\text{A.27})$$

Dim: La derivata totale di una grandezza intensiva computata su di un volume di controllo V_c viene vista come somma della variazione della grandezza nel suo volume di controllo nel tempo, e del flusso netto della grandezza stessa attraverso la superficie di controllo che racchiude il volume. In questo modo il punto di osservazione si sgancia dal volume di controllo in moto V_c che racchiude la grandezza estensiva (**punto di vista Lagrangiano**) e passa ad un volume di controllo fisso nello spazio V_o rispetto al quale vengono espresse le componenti di derivazione parziale (**punto di vista Euleriano**). Si segua il volume di controllo V_c tra gli istanti t e $t + \delta t$. Guardando la Fig. A.9 si vede che se si considera lo spostamento infinitesimo subito nella sua evoluzione da V_c , si potrà individuare una zona di sovrapposizione V_o , una zona competente a V_c osservato all'istante t indicata con V_i ed una zona competente a V_c osservato all'istante $t + \delta t$ indicata con V_u . Queste due zone, V_i e V_u possono essere viste rispettivamente come volumi in ingresso e in uscita della grandezza intensiva nel volume V_o visto come fisso nell'intervallo di tempo δt . La grandezza estensiva B espressa nell'istante iniziale sarà:

$$B(t) = \int_{V_o(t)} b \rho dv + \int_{V_i} b \rho dv$$

Capitolo A. Richiami

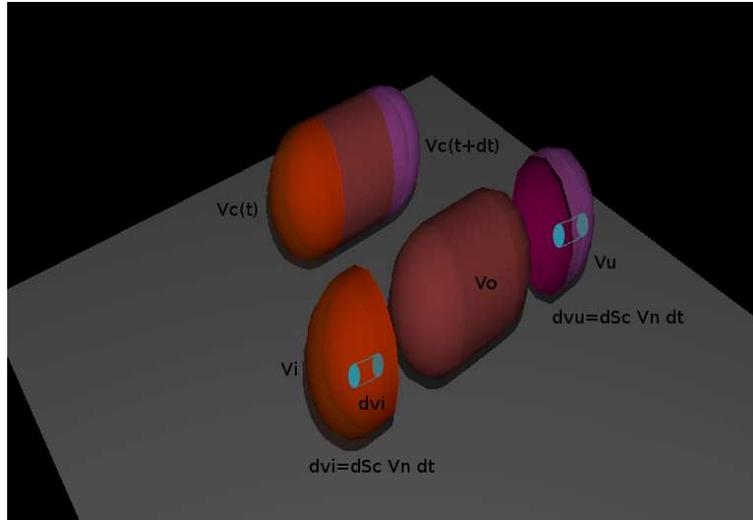


Figura A.9: Volume di controllo V_c tra gli istanti iniziale e finale di osservazione

e nell'istante finale:

$$B(t + \delta t) = \int_{V_o(t+\delta t)} b \rho \, dv + \int_{V_u} b \rho \, dv$$

La derivata totale della grandezza B sarà dunque:

$$\frac{DB}{Dt} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{V_o(t+\delta t)} b \rho \, dv + \int_{V_u} b \rho \, dv - \int_{V_o(t)} b \rho \, dv - \int_{V_i} b \rho \, dv}{\delta t}$$

Se si introduce l'ipotesi di considerare V_o^1 costante nel tempo allora:

$$\begin{aligned} \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{V_o(t+\delta t)} b \rho \, dv - \int_{V_o(t)} b \rho \, dv}{\delta t} &= \\ \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{(\int_{V_o} b \rho \, dv)_{t+\delta t} - (\int_{V_o} b \rho \, dv)_t}{\delta t} &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_o} b \rho \, dv \end{aligned}$$

Per quanto riguarda gli integrali di volume su V_i e V_u , integrando per *fili* su Sc_i ed Sc_u , ossia le porzioni di superficie di controllo Sc del volume fisso V_o attraverso cui entra ed esce il flusso della grandezza $b \rho$:

$$\int_{V_u(t+\delta t)} b \rho \, dv = \int_{Sc_u(t+\delta t)} b \rho \, V_n \, dSc_u \, \delta t$$

¹ $V_o = V_c(t) \cap V_c(t + \delta t)$

A.2. Teoremi

$$\int_{V_i(t)} b \rho \, dv = \int_{Sci(t)} b \rho \, Vn \, dSci \, \delta t$$

si ottiene:

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \left[\frac{\int_{Scu} b \rho \, \vec{n} \vec{V} \, dScu + \int_{Sci} b \rho \, \vec{n} \vec{V} \, dSci}{\delta t} \right] \delta t = \int_{Sc} b \rho \, \vec{n} \vec{V} \, dSc$$

avendo adottato la convenzione secondo la quale il versore normale \vec{n} è positivo se uscente dalla superficie, ossia:

$$Vn = -\vec{V} \vec{n} \quad \text{su } Sci \quad (\text{A.28})$$

$$Vn = \vec{V} \vec{n} \quad \text{su } Scu \quad (\text{A.29})$$

Da quanto sopra risulta quindi dimostrata l’Eq. (A.27).

A.2.3 Teorema di reciprocità di Cauchy

L’equaglianza:

$$\tau_{ij} = \tau_{ji}$$

deriva dalla scrittura delle equazioni di equilibrio alla rotazione del cubetto elementare. Si consideri l’origine delle coordinate centrata nel baricentro².

$$\frac{1}{2} I \dot{\omega}^2 = (\tau_{12} - d\tau_{12}) \varepsilon^2 \frac{\varepsilon}{2} + (\tau_{12} + d\tau_{12}) \varepsilon^2 \frac{\varepsilon}{2} - (\tau_{21} - d\tau_{21}) \varepsilon^2 \frac{\varepsilon}{2} - (\tau_{21} + d\tau_{21}) \varepsilon^2 \frac{\varepsilon}{2}$$

$$\tau_{12} \frac{\varepsilon^3}{2} - \tau_{21} \frac{\varepsilon^3}{2} = \frac{1}{2} \rho \varepsilon^5 \dot{\omega}^2$$

Trascurando gli infinitesimi di ordine superiore a $\circ(\varepsilon^3)$ e semplificando:

$$\tau_{12} - \tau_{21} = 0 \quad (\text{A.30})$$

A.2.4 Considerazioni sul rotore della velocità

$$\begin{vmatrix} \vec{i}_1 & \vec{i}_2 & \vec{i}_3 \\ \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ u_1 & u_2 & u_3 \end{vmatrix} = \quad (\text{A.31})$$

$$\begin{aligned} &= \vec{i}_1 \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} - \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) - \vec{i}_2 \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} - \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \vec{i}_3 \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} - \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) \\ &= \vec{i}_1 \omega_1 + \vec{i}_2 \omega_2 + \vec{i}_3 \omega_3 \\ &= \nabla \wedge \vec{V} \\ &= \vec{\omega} \end{aligned} \quad (\text{A.32})$$

²Le forze di volume avranno così braccio nullo.

Capitolo A. Richiami

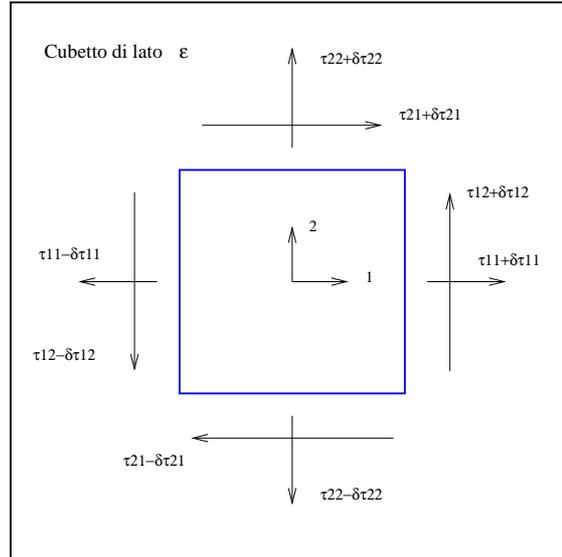


Figura A.10: Cubetto elementare di lato ε

Dalla Fig. A.11 si nota come le componenti del vettore rotore della velocità rappresentino le componenti del vettore rotazione nell'unità di tempo. $\vec{\omega}$ rappresenta quindi la velocità di rotazione di corpo rigido dell'elemento intorno al punto P_0

A.3 Equazioni di bilancio

A.3.1 Equazione del bilancio di massa

L'equazione di continuità esprime la conservazione della massa all'interno di un volume di controllo che non scambia materia con l'esterno. La massa contenuta all'interno di un dato volume V risulta data dalla:

$$M = \int_V \rho \, dv$$

Inseguendo il volume in questione, la **equazione di continuità in forma integrale Lagrangiana** risulta espressa dalla:

$$\frac{DM}{Dt} = 0$$

Applicando il Teorema 1, ovvero l'Eq. (A.27) in cui $b = 1$, si ha:

$$\frac{DM}{Dt} = \frac{D}{Dt} \int_V \rho \, dv = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho \, dv + \int_{S_c} \rho \, \vec{V} \cdot \vec{n} \, dS_c = 0$$

A.3. Equazioni di bilancio

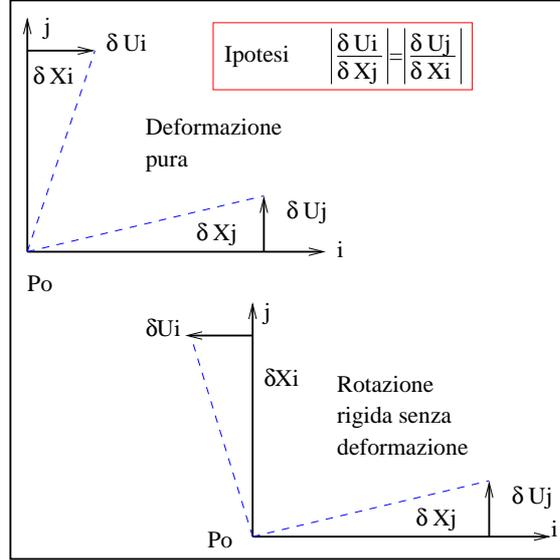


Figura A.11: Stati di deformazione pura e rotazione rigida pura.

ne deriva la **equazione di continuità Euleriana in forma integrale**:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho \, dv = - \int_{S_c} \rho \, \vec{V} \cdot \vec{n} \, dS_c \quad (\text{A.33})$$

La **forma differenziale dell'equazione di continuità Euleriana** si ottiene applicando alla Eq. (A.33) il teorema del flusso di Gauss³:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho \, dv = - \int_{V_c} \nabla(\rho \vec{V}) \, dv$$

Dall'equazione sopra discende la:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla(\rho \vec{V}) \quad (\text{A.34})$$

Manipolando la Eq. (A.34) si ottiene la sua forma Lagrangiana differenziale.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\nabla(\rho \vec{V}) \\ &= -\rho \nabla(\vec{V}) - \vec{V} \nabla(\rho) \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla(\vec{V}) + \vec{V} \nabla(\rho) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.35})$$

³ $\int_S \vec{\phi} \cdot \vec{n} \, dS = \int_V \nabla \vec{\phi} \, dv$

Capitolo A. Richiami

dividendo la Eq. (A.35) per ρ si ottiene la:

$$\boxed{\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = -\nabla \vec{V}} \quad (\text{A.36})$$

dividendo invece la Eq. (A.35) per $-\rho^2$ si ottiene:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{1}{\rho^2} \vec{V} \nabla \rho - \frac{1}{\rho} \nabla \vec{V} &= 0 \\ \left(\frac{\partial \frac{1}{\rho}}{\partial t} + \vec{V} \nabla \frac{1}{\rho} \right)^4 - \frac{1}{\rho} \nabla \vec{V} &= 0 \\ \frac{d \frac{1}{\rho}}{dt} &= \frac{1}{\rho} \nabla \vec{V} \end{aligned} \quad (\text{A.37})$$

$$\boxed{\frac{1}{v} \frac{dv}{dt} = \nabla \vec{V}} \quad (\text{A.38})$$

Le Eq. (A.36) e Eq. (A.38) rappresentano entrambe la **equazione di continuità in forma differenziale Lagrangiana** ed evidenziano rispettivamente che la divergenza con segno del vettore velocità $\nabla \vec{V}$ rappresenta il tasso di compressione o dilatazione nel tempo della particella fluida.

A.3.2 Equazione di bilancio della quantità di moto

Forme integrali lagrangiana ed euleriana

L'equazione di bilancio della quantità di moto relativa ad un fluido confinato all'interno di un volume V si ottiene ricorrendo alla seconda legge di Newton applicata a ciascuna delle particelle costituenti il fluido.

$$\sum F_i = \frac{d(mu)_i}{dt} \Big|_{(i=1,2,3)}$$

Considerando le forze agenti sulla particella fluida come:

- forze di volume, es:
 - forza di gravità
 - forza centrifuga
 - forza di Coriolis

⁴Ricordando che data una funzione $f(x(t), y(t), z(t), t)$ la sua derivata totale risulta: $\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \vec{V} \nabla f$

A.3. Equazioni di bilancio

- forze di superficie
 - forze di pressione
 - forze tangenziali

l'espressione *lagrangiana dell'equazione di bilancio integrale della quantità di moto* assume la forma:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{V} dv = \int_S \vec{f}_S + \int_V \vec{f}_V \quad (\text{A.39})$$

Applicando il teorema di Reynolds al primo membro dell'equazione sopra se ne ottiene la *espressione integrale del bilancio della quantità di moto in forma euleriana*:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{V} dv + \int_S \rho \vec{V} \vec{V} \vec{n} dS = \int_S \vec{f}_S + \int_V \vec{f}_V \quad (\text{A.40})$$

Nell'espressione euleriana compare tra le forze presenti nel secondo membro il contributo dovuto alla quantità di moto del flusso di fluido scambiato dal volume di controllo attraverso la sua superficie con l'esterno⁵. Sfruttando il teorema del flusso di Gauss, trasformando gli integrali di superficie che compaiono nella Eq. (A.40) in integrali di volume, si ottiene la forma differenziale della stessa.

Il flusso della quantità di moto diventa:

$$\begin{aligned} \int_S \rho u_i \vec{V} \vec{n} dS &= \int_V \nabla(\rho u_i \vec{V}) dv \\ &= \int_V \left(\frac{\partial(\rho u_i u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho u_i u_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho u_i u_3)}{\partial x_3} \right) dv \Big|_{(i=1,2,3)} \end{aligned}$$

La risultante delle forze di pressione:

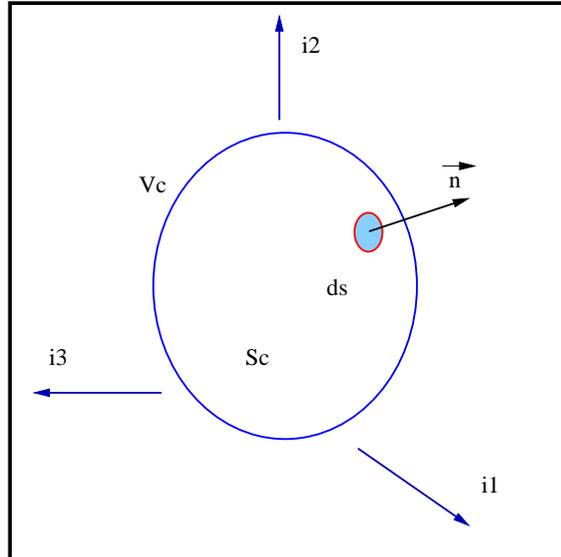
$$\begin{aligned} \int_S P \vec{n} \vec{i}_i dS &= \vec{i}_i \int_S P \vec{n} dS \\ &= \vec{i}_i \int_V \nabla P dv \\ &= \int_V \frac{\partial P}{\partial x_i} dv \Big|_{(i=1,2,3)} \end{aligned} \quad (\text{A.41})$$

L'esplicitazione della risultante delle forze tangenziali richiede degli approfondimenti.

⁴Il segno meno deriva dall'aver considerata come positiva la direzione uscente del versore normale \vec{n} alla superficie di controllo.

⁵ $\rho \vec{V} \vec{n}$ rappresenta la massa di fluido scambiata con l'esterno nell'unità di tempo. Questa, moltiplicata per u_i , fornisce la quantità di moto nella direzione i scambiata con l'esterno

Capitolo A. Richiami



Risultante delle forze tangenziali

Si consideri un elemento di superficie unitaria individuato come in Fig. ?? di normale \vec{n} . Sia \vec{T} il vettore risultante degli sforzi di superficie agenti sulla faccia di normale \vec{n} . Si indichi inoltre con τ_{ij} la componente dello sforzo di superficie agente sulla faccia di normale \vec{i} che spira nella direzione j . L'equilibrio⁶ del tetraedro porta alla:

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{21} & \tau_{31} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} & \tau_{32} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{Bmatrix} \quad (\text{A.42})$$

Il tensore degli sforzi superficiali che compare nella Eq. (A.42) è simmetrico in virtù del teorema di reciprocità di Cauchy Eq. (A.30).

È da osservare che le componenti di sforzo normale σ_{ii} contengono due contributi:

1. Un contributo idrostatico dovuto alla pressione del fluido circostante $-P$, del quale si è già tenuto conto in precedenza nell'Eq. (A.41), negativo in quanto opposto al versore \vec{n} ;
2. Un contributo di sforzo viscoso τ_{ii} dovuto all'espansione o contrazione del volume elementare;

⁶Equilibrio statico in quanto le componenti di accelerazione dipendenti da volumi, e non da superfici, sono di ordine di grandezza trascurabile. Vedere a tale proposito l'App. A.2.3.

A.3. Equazioni di bilancio

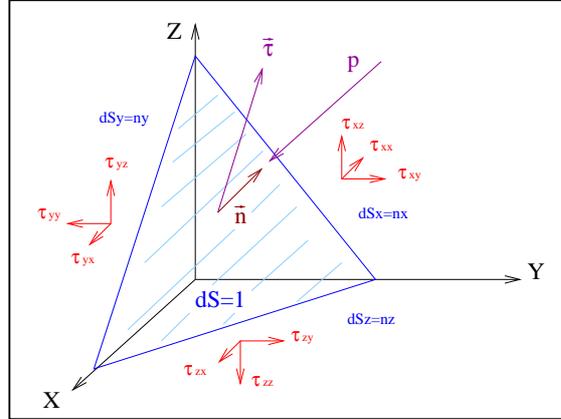


Figura A.12: Tetraedro elementare

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} \tau_{11} - P & \tau_{21} & \tau_{31} \\ \tau_{12} & \tau_{22} - P & \tau_{32} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \tau_{33} - P \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{Bmatrix} \quad (\text{A.43})$$

$$\vec{T} = \left[\begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{21} & \tau_{31} \\ \tau_{12} & \tau_{22} & \tau_{32} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \tau_{33} \end{bmatrix} - P I \right] \begin{Bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{Bmatrix}$$

Si può ora esplicitare l'integrale di superficie relativo alle forze tangenziali nelle tre direzioni:

$$\int_S \tau_i dS \Big|_{(i=1,2,3)} = \int_S (\tau_{1i} n_1 + \tau_{2i} n_2 + \tau_{3i} n_3) dS \Big|_{(i=1,2,3)} \quad (\text{A.44})$$

$$= \int_S \vec{\tau}_i^T \vec{n} dS \Big|_{(i=1,2,3)} \quad (\text{A.45})$$

$$= \int_V \nabla \vec{\tau}_i dv \Big|_{(i=1,2,3)} \quad (\text{A.46})$$

$$= \int_V \left(\frac{\partial \tau_{1i}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{2i}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{3i}}{\partial x_3} \right) dv \Big|_{(i=1,2,3)} \quad (\text{A.47})$$

${}^T \vec{\tau}_i = (\tau_{1i}, \tau_{2i}, \tau_{3i})$

Capitolo A. Richiami

Relazioni tra sforzi tangenziali e velocità

Un fluido si definisce newtoniano quando la sua viscosità non varia con la velocità. Matematicamente questi fluidi presentano un legame di proporzionalità diretta tra il tensore degli sforzi viscosi e il tensore delle velocità di deformazione; la costante di proporzionalità è detta viscosità.

Lo sforzo tangenziale scambiato tra due elementi di area unitaria di normale \vec{n}_i in direzione \vec{n}_j adiacenti è direttamente proporzionale attraverso la *viscosità dinamica* μ al gradiente di velocità tra gli stessi.

$$\tau_{ij} = \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

In genere il campo di velocità in seno ad un fluido può essere espresso in termini di sviluppo in serie nell'intorno del punto e nell'istante considerati:

$$\vec{V}(P) = (u_1(x(t), y(t), z(t), t), u_2(x(t), y(t), z(t), t), u_3(x(t), y(t), z(t), t))$$

Nell'intorno di un dato punto P_0 nell'istante t_0 con $i = 1, \dots, 3$:

$$u_i(P, t_0) = u_i(P_0) + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_1 + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_2} \right)_{P_0} x_2 + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_3} \right)_{P_0} x_3 + o(\dots)$$

o con la notazione degli indici ripetuti:

$$u_i(P, t_0) = u_i(P_0) + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)_{P_0} x_j + o(\dots) \Big|_{(i=1,2,3)}$$

ossia:

$$\vec{V}(P) = \vec{V}(P_0) + \begin{pmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_3}{\partial x_1} & \frac{\partial u_3}{\partial x_2} & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{pmatrix} \vec{P} + o(\dots)$$

Il tensore sopra non è necessariamente simmetrico. Esso può comunque essere visto come somma di due parti, una simmetrica ed una

A.3. Equazioni di bilancio

antisimmetrica.

$$\begin{aligned}
 u_1(P, t_0) &= u_1(P_0) + \\
 &\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_1 + \\
 &\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right)_{P_0} x_2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right)_{P_0} x_2 + \\
 &\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right)_{P_0} x_3 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right)_{P_0} x_3 + \\
 &\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_2 + \\
 &\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_3 - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_3
 \end{aligned}$$

Riordinando:

$$\begin{aligned}
 u_1(P, t_0) &= u_1(P_0) + \\
 &\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_1 + \\
 &\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right)_{P_0} x_2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_2 + \\
 &\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right)_{P_0} x_3 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_3 + \\
 &\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right)_{P_0} x_2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_2 + \\
 &\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right)_{P_0} x_3 - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_3
 \end{aligned}$$

Capitolo A. Richiami

$$\begin{aligned}
 u_1(P, t_0) &= u_1(P_0) + \\
 &\quad \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_1 + \\
 &\quad \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_2 + \\
 &\quad \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)_{P_0} x_3 + \\
 &\quad \frac{1}{2} \overbrace{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} - \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)_{P_0}}^{-\omega_3} x_2 + \\
 &\quad \frac{1}{2} \overbrace{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} - \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)_{P_0}}^{\omega_2} x_3
 \end{aligned}$$

In base alle osservazioni sull’espressione del rotore della velocità e l’Eq. (A.31)

$$\begin{aligned}
 u_1(P, t_0) &= u_1(P_0) + \\
 &\quad \frac{1}{2} \overbrace{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)_{P_0}}^{\varepsilon_{i1}} x_1 + \\
 &\quad \frac{1}{2} \overbrace{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)_{P_0}}^{\gamma_{i2}} x_2 + \\
 &\quad \frac{1}{2} \overbrace{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)_{P_0}}^{\gamma_{i3}} x_3 - \\
 &\quad \frac{1}{2} \omega_3 x_2 + \\
 &\quad \frac{1}{2} \omega_2 x_3
 \end{aligned}$$

Compaiono a questo punto al secondo membro i termini del prodotto vettoriale (Cf.ta Eq. (A.31)):

$$\vec{\omega} \wedge (P - O) = \begin{vmatrix} \vec{i}_1 & \vec{i}_2 & \vec{i}_3 \\ \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 \\ x_1 & x_2 & x_3 \end{vmatrix}$$

che rappresenta la velocità di rotazione rigida del punto in esame intorno al polo O .

A.3. Equazioni di bilancio

Si riconoscono inoltre tra parentesi i termini di velocità di deformazione dell'elemento fluido: allungamento e scorrimento (Cf.ta Fig. A.11). L'espressione definitiva della velocità nell'intorno del punto in esame sarà quindi:

$$\vec{V} = \vec{V}_0 + \frac{1}{2} \vec{\omega} \wedge (P - O) + \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{11} & \dot{\gamma}_{12} & \dot{\gamma}_{13} \\ \dot{\gamma}_{21} & \dot{\varepsilon}_{22} & \dot{\gamma}_{23} \\ \dot{\gamma}_{31} & \dot{\gamma}_{32} & \dot{\varepsilon}_{33} \end{pmatrix} (P - O)$$

ponendo:

$$\vec{\Omega} = \frac{1}{2} \vec{\omega}$$

si ottiene:

$$\vec{V} = \vec{V}_0 + \vec{\Omega} \wedge (P - O) + \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{11} & \dot{\gamma}_{12} & \dot{\gamma}_{13} \\ \dot{\gamma}_{21} & \dot{\varepsilon}_{22} & \dot{\gamma}_{23} \\ \dot{\gamma}_{31} & \dot{\gamma}_{32} & \dot{\varepsilon}_{33} \end{pmatrix} (P - O) \quad (\text{A.48})$$

dalla quale risultano evidenti le componenti di velocità di traslazione rigida, di rotazione rigida e le deformazioni dovute alla dilatazione o contrazione (le $\dot{\varepsilon}$) e le distorsioni (le $\dot{\gamma}$) dell'elemento fluido in considerazione.

Il tensore della velocità di delle deformazioni nella Eq. (A.48) è simmetrico e suscettibile di diagonalizzazione rispetto ad un riferimento principale. La traccia di tale tensore, ossia la somma degli elementi sulla diagonale, è un invariante e rappresenta la divergenza della velocità.

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = Tr = \nabla \vec{V}$$

Questa rappresenta la dilatazione subita dal volumetto di fluido considerato nell'unità di tempo. Se questo volumetto è inizialmente di forma sferica, a causa della caratteristica della deformazione, ossia dal valore assunto dagli autovalori, in generale potrà trasformarsi in un ellissoide. Se il fluido è incomprimibile la $\nabla \vec{V} = 0$, non si avranno variazioni in volume⁸ e le componenti di sforzo viscoso saranno dovute solo alle velocità di scorrimento $\dot{\gamma}_{ij}$.

Gli sforzi viscosi saranno legati ovviamente al tensore delle velocità di deformazione e non al movimento di corpo rigido del fluido.

⁸La traccia del tensore è nulla per un qualunque riferimento scelto il che implica che la somma degli autovalori sia nulla. Una sferetta di fluido si può solo trasformare in un ellissoide di stesso volume.

Capitolo A. Richiami

Fluido incomprimibile

In seno ad un fluido Newtoniano incomprimibile si avranno forze viscosse dovute ai soli scorrimenti:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 2 \mu \dot{\gamma}_{ij}$$

La grandezza μ rappresenta la **viscosità dinamica**⁹ del fluido dovuta allo scorrimento degli strati adiacenti.

Fluido comprimibile

Se il fluido è comprimibile le forze viscosse che nascono al suo interno possono essere imputate non solo alla sua distorsione ma anche alla possibilità di un suo cambiamento di volume. Il volumetto elementare di fluido può subire due tipi di deformazione: la distorsione (variazione di forma) e la variazione di volume. A queste possono essere associate due tipi di viscosità: la viscosità dinamica μ **shear viscosity** e la viscosità di volume ζ **bulk viscosity**. La viscosità di volume è di difficile misurazione e in genere piccola.

Il termine di variazione di volume è rappresentato dalla divergenza della velocità $\nabla \vec{V}$ che rappresenta la traccia del tensore delle velocità di deformazione. Quest’ultimo può essere *spezzato* in due tensori. Il primo a traccia nulla rappresenta la deformazione pura, il secondo la variazione di volume.

$$\begin{aligned} \vec{V} = & \underbrace{\vec{V}_0 + \vec{\Omega} \wedge \vec{V}}_{\text{termini di spostamento rigido}} + \underbrace{\left(\begin{array}{ccc} \left(2 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} - \frac{2}{3} \nabla \vec{V} \right) & \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) & \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) & \left(2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} - \frac{2}{3} \nabla \vec{V} \right) & \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) & \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) & \left(2 \frac{\partial u_3}{\partial x_3} - \frac{2}{3} \nabla \vec{V} \right) \end{array} \right)}_{\text{termini di deformazione pura}} (P - O) + \\ & \underbrace{\left(\begin{array}{ccc} \nabla \vec{V} & 0 & 0 \\ 0 & \nabla \vec{V} & 0 \\ 0 & 0 & \nabla \vec{V} \end{array} \right)}_{\text{termini di dilatazione pura}} (P - O) \end{aligned}$$

⁹Shear viscosity.

A.3. Equazioni di bilancio

L'espressione degli sforzi tangenziali diviene allora:

$$\tau_{ii} = \mu \left(2 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \nabla \vec{V} \right) + \zeta \nabla \vec{V}$$

e:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

L'espressione generale può essere scritta ricorrendo alla notazione δ_{ij} di Kroneker¹⁰:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \nabla \vec{V} \right) + \zeta \delta_{ij} \nabla \vec{V} \quad (\text{A.49})$$

Risultante delle forze di volume

Ipotizzando che sia presente la sola forza di gravità agente sull'unità di volume indicata con $\vec{\gamma}$:

$$\vec{\gamma} = \rho g = -\nabla(\rho g z)$$

Forma differenziale euleriana

L'espressione integrale in termini di integrali di volume:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho u_i dv + \int_V \left(\frac{\partial(\rho u_i u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho u_i u_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho u_i u_3)}{\partial x_3} \right) dv = \int_V \gamma_i dv - \int_V \frac{\partial P}{\partial x_i} dv + \int_V \nabla \vec{\tau}_i dv \Big|_{(i=1,2,3)}$$

Adottando la notazione tensoriale di variazione degli indici:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \gamma_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \Big|_{(i=1,2,3)} \quad (\text{A.50})$$

Si può ottenere la forma compatta vettoriale:

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla P + \vec{\gamma} + \nabla \vec{T} \quad (\text{A.51})$$

in cui il prodotto diatrico:

¹⁰($i = j$)? $\delta_{ij} = 1$: $\delta_{ij} = 0$

Capitolo A. Richiami

$$\begin{aligned} \nabla(\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) &= \left[\frac{\partial(\rho u_1 u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho u_2 u_1)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho u_3 u_1)}{\partial x_3} \right] \vec{v}_1 + \\ &\quad \left[\frac{\partial(\rho u_1 u_2)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho u_2 u_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho u_3 u_2)}{\partial x_3} \right] \vec{v}_2 + \\ &\quad \left[\frac{\partial(\rho u_1 u_3)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho u_2 u_3)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho u_3 u_3)}{\partial x_3} \right] \vec{v}_3 \end{aligned}$$

e:

$$\begin{aligned} \nabla \vec{\mathcal{T}} &= \left[\frac{\partial \tau_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{31}}{\partial x_3} \right] \vec{v}_1 + \\ &\quad \left[\frac{\partial \tau_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{32}}{\partial x_3} \right] \vec{v}_2 + \\ &\quad \left[\frac{\partial \tau_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{23}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{33}}{\partial x_3} \right] \vec{v}_3 \end{aligned}$$

La forza di volume $\vec{\gamma}$ può essere elaborata ulteriormente. Essa è la forza peso agente sul volumetto elementare di fluido e in un’atmosfera in equilibrio tale forza sarà bilanciata dalla forza di Archimede. Nel caso in cui lo stato dell’atmosfera si allontani dalle condizioni standard di riferimento in cui la densità con la quota può essere indicata con $\rho_0(z)$, e la pressione idrostatica con $P_0(z)$ tale che:

$$dP_0 = -g\rho_0 dz$$

si libererà una forza di galleggiamento o di affondamento che spingerà in alto o verso il basso la particella d’aria:

$$\gamma = \rho g = \rho_0 g + (\rho - \rho_0) g$$

Il termine $(\rho - \rho_0)g$ rappresenterà la forza di galleggiamento mentre il termine $\rho_0 g$ moltiplicato per z potrà essere accorpato con la pressione P definendo la grandezza \tilde{P} che rappresenta il disturbo di pressione rispetto alle condizioni di atmosfera standard in equilibrio:

$$\tilde{P} = P - \rho_0 g z$$

Forma differenziale lagrangiana

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla P + \vec{\gamma} + \nabla \vec{\mathcal{T}}$$

A.3. Equazioni di bilancio

Si sviluppa il primo membro:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V} \nabla(\rho \vec{V}) + \rho \vec{V} \nabla(\vec{V}) &= -\nabla P + \vec{\gamma} + \nabla \vec{T} \\ \vec{V} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) \right)^{11} + \rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \nabla(\vec{V}) \right)^{12} &= -\nabla P + \vec{\gamma} + \nabla \vec{T} \end{aligned}$$

$$\boxed{\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\nabla P + \vec{\gamma} + \nabla \vec{T}} \quad (\text{A.52})$$

Una ulteriore manipolazione del primo membro dell’equazione così ottenuta permette di evidenziare le componenti costituenti l’accelerazione. A tale proposito si sfrutta l’Eq. (A.3) che permette la scrittura della Eq. (A.53):

$$\boxed{\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla(\vec{V} \cdot \vec{V}) + \vec{\omega} \wedge \vec{V} \right) = -\nabla P + \vec{\gamma} + \nabla \vec{T}} \quad (\text{A.53})$$

Osservazioni: forma conservativa e non conservativa Le equazioni di bilancio della quantità di moto nella forma euleriana (A.51) e lagrangiana (A.52), sebbene del tutto identiche dal punto di vista matematico, non lo sono dal punto di vista della fluidodinamica computazionale, tanto da prendere rispettivamente il nome di *forma conservativa*, e *forma non conservativa*. La forma euleriana, ovvero conservativa, nasconde dentro di sé l’equazione di continuità ed è espressa unicamente in termini di divergenze delle grandezze in gioco. In particolari problemi ove la comprimibilità del fluido non può essere trascurata (presenza di onde d’urto), la forma conservativa risulta essere quella che si presta meglio alla risoluzione numerica (Cf.ta [Ande 95]).

¹¹Termine nullo per l’equazione di continuità Eq. (A.34)

¹²Derivata totale del vettore velocità \vec{V}

Capitolo A. Richiami

Equazione di bilancio della quantità di moto in coordinate sferiche

L'Eq. (A.52) può essere scritta in coordinate sferiche in virtù delle Eq. (A.21):

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{uv \tan \phi}{a} + \frac{uv}{a} &= \\
 -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + 2\Omega v \sin \phi - 2\Omega w \cos \phi + \nabla \vec{T}_\lambda & \\
 \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u^2 \tan \phi}{a} + \frac{uv}{a} &= \\
 -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \phi} - 2u\Omega \sin \phi - \Omega^2 a \sin \phi \cos \phi + \nabla \vec{T}_\phi & \\
 \\
 \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{u^2+v^2}{a} &= \\
 \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + 2u\Omega \cos \phi + \Omega^2 a \cos \phi^2 + \nabla \vec{T}_z &
 \end{aligned}
 \tag{A.54}$$

Nelle Eq. (A.54) riferite all'ellissoide terrestre, l'accelerazione centrifuga viene accorpata con quella di gravità. Infatti la risultante della forza di gravità, sommata con la forza centrifuga risulta in ogni punto sempre perpendicolare alla superficie dell'ellissoide:

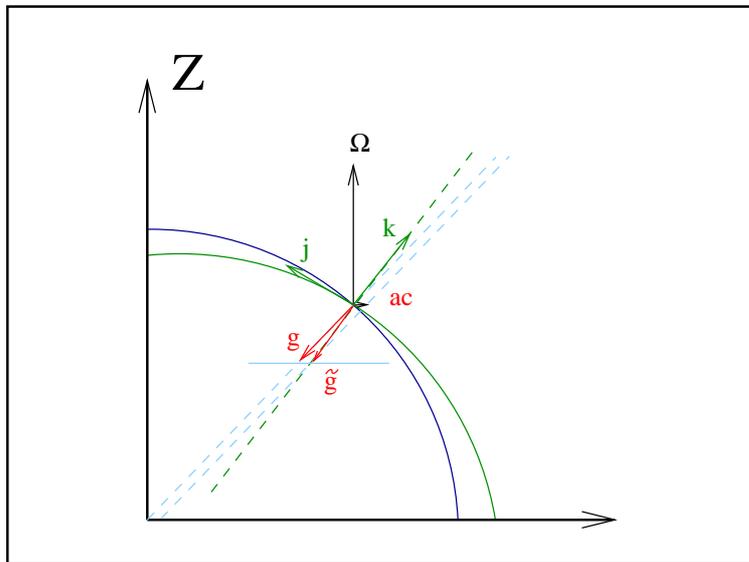


Figura A.13: Accelerazione di gravità \tilde{g}

$$\tilde{g} = \vec{g} + \vec{a}_{cen}$$

A.3. Equazioni di bilancio

In questo modo le Eq. (A.54) possono essere riscritte:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{uv \tan \phi}{a} + \frac{uw}{a} &= \\
 -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + 2\Omega v \sin \phi - 2\Omega w \cos \phi + \nabla \vec{T}_\lambda & \\
 \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u^2 \tan \phi}{a} + \frac{uv}{a} &= \\
 -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \phi} - 2u\Omega \sin \phi + \nabla \vec{T}_\phi & \\
 \\
 \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{u^2+v^2}{a} &= \\
 -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + 2u\Omega \cos \phi + \nabla \vec{T}_z &
 \end{aligned} \tag{A.55}$$

A.3.3 Equazione di bilancio dell'energia

Il bilancio energetico del fluido nel volume di controllo V delimitato dalla superficie S , può essere ottenuto dall'espressione del Primo Principio della Termodinamica:

$$\frac{d}{dt} \int_V e \rho dv = \sum \dot{W}_F + \sum \dot{W}_q \tag{A.56}$$

in cui:

- e rappresenta l'energia totale per unità di massa:

$$e = u + \frac{V^2}{2} \tag{A.57}$$

in cui:

- u rappresenta l'energia interna dell'unità di massa, ovvero l'energia cinetica derivante dall'agitazione termica di atomi e molecole costituenti il fluido e dal moto degli elettroni intorno al loro nucleo;
- $V^2/2$ rappresenta l'energia cinetica dell'unità di massa derivante dal moto del suo baricentro con atomi, molecole ed elettroni congelati.
- \dot{W}_F rappresenta il lavoro fatto dalle forze agenti sul fluido. Queste possono essere suddivise in forze di superficie e forze di volume:

$$\sum \dot{W}_F = \sum \dot{W}_{F_S} + \sum \dot{W}_{F_V}$$

Capitolo A. Richiami

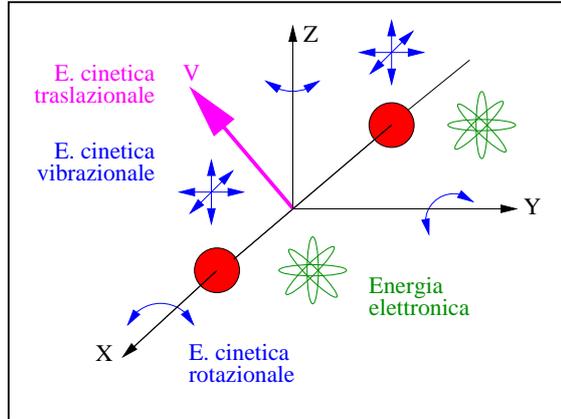


Figura A.14: Moti vibrazionali in una molecola biatomica

Indicando con $\vec{\gamma}$ la generica forza di volume agente sull'unità di massa si ha:

$$\sum \dot{W}_{FV} = \int_V \rho \vec{\gamma} \vec{U} dv$$

mentre a loro volta le forze di superficie possono essere suddivise in forze di pressione idrostatica agenti perpendicolarmente alla superficie e forze di natura viscosa agenti sia normalmente che tangenzialmente alla superficie del volume di controllo:

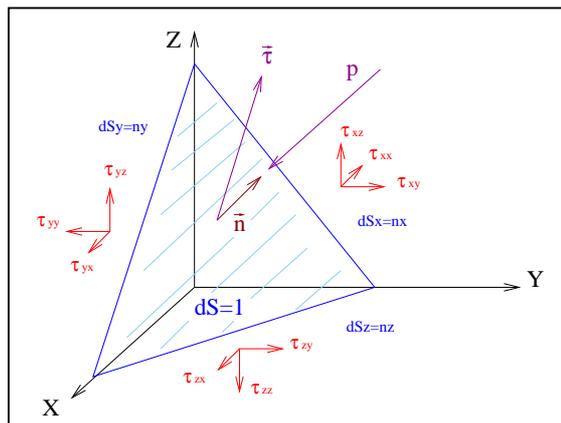


Figura A.15: Forze idrostatiche e viscosse su tetraedro elementare di fluido

$$\sum \dot{W}_{FS} = \sum \dot{W}_{FSh} + \sum \dot{W}_{FSv}$$

A.4. Gruppi adimensionali notevoli

Dato che la risultante delle forze tangenziali agenti sull'elemento di area unitaria con normale \vec{n} si ottiene dal tensore degli sforzi tangenziali:

$$\vec{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \vec{n} = \vec{\vec{T}} \vec{n}$$

le espressioni di $\sum \dot{W}_{F_{Sh}}$ e $\sum \dot{W}_{F_{Sv}}$ saranno:

$$\sum \dot{W}_{F_{Sh}} = - \int_S p \vec{n} dS \vec{U} = - \int_V \nabla(p\vec{U}) dv$$

$$\sum \dot{W}_{F_{Sv}} = \int_S \vec{\tau} dS \vec{U} = \int_S \vec{\vec{T}} \vec{n} dS \vec{U} = \int_V \nabla(\vec{\vec{T}}\vec{U}) dv$$

- $\sum \dot{W}_q$ rappresenta gli apporti di calore. Questi possono essere dovuti a sorgenti o pozzi interni al fluido \dot{q}_i ¹³ e a flussi $\dot{\varphi}$ che attraversano la superficie di controllo:

$$\sum \dot{W}_q = \sum \dot{W}_{q_i} + \sum \dot{W}_{q_s}$$

$$\sum \dot{W}_{q_i} = \int_V \rho \dot{q}_i dv$$

per quanto riguarda i flussi attraverso la superficie di controllo, ricordando il postulato di Fourier e considerando positivi i flussi che entrano nel volume di controllo:

$$\sum \dot{W}_{q_s} = \int_S d\dot{\varphi} = \int_S k \nabla T dS \vec{n} = \int_V \nabla(k \nabla T) dv$$

Tenendo conto delle relazioni sopra riportate, la Eq. (A.56) diventa:

$$\boxed{\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla(\rho e \vec{U}) = -\nabla(p\vec{U}) + \nabla(\vec{\vec{T}} \vec{U}) + \nabla(k \nabla T) + \rho \vec{\gamma} \vec{U} + \rho \dot{q}_i} \quad (\text{A.58})$$

A.4 Gruppi adimensionali notevoli

A.4.1 Numero di Biot

Il numero di Biot (**Bi**), introdotto da Jean-Baptiste Biot (1774 - 1862), rientra tra i gruppi adimensionali usati in fluidodinamica. Il suo valore

¹³Ad esempio dovuti ai cambiamenti di stato subiti dall'acqua presente in atmosfera.

Capitolo A. Richiami

è dato dal rapporto tra la resistenza termica interna del sistema e quella tra la superficie esterna del sistema ed il mezzo circostante.

$$Bi = \frac{(h \cdot L)}{\lambda}$$

dove h è il coefficiente di scambio termico liminare [W/m^2K], L è la lunghezza caratteristica, pari al rapporto tra il volume e la superficie del corpo e λ la conducibilità termica del solido [W/mK]

Seppure la forma è la stessa del numero di Nusselt, in questo caso Biot pone al denominatore la conducibilità termica del corpo e non del fluido, pertanto fornisce informazioni non sul fluido di scambio ma sull’oggetto investito dal flusso. Molti problemi, dal punto di vista dell’analisi del flusso termico, possono essere risolti semplicemente se si ipotizza che la resistenza conduttiva interna sia piccola rispetto allo scambio termico conduttivo. Questa ipotesi, che si traduce dal punto di vista numerico in un $Bi \ll 1$, permette di considerare una distribuzione di temperatura sulla superficie del corpo del tutto uniforme.

A.4.2 Numero di Froude

Il numero di Froude Fr , è un gruppo adimensionale che mette in relazione la forza d’inerzia e la forza peso. Deve il suo nome a quello dell’ingegnere idrodinamico ed architetto navale inglese William Froude (1810 - 1879).

La forza d’inerzia F può essere scritta, in base al secondo principio della dinamica, come prodotto della massa per l’accelerazione. Considerando una lunghezza caratteristica del fenomeno L ed un tempo t si può scrivere:

$$F = m a = \frac{\rho L^4}{t^2}$$

Il peso P risulta essere il prodotto della massa per l’accelerazione di gravità.

$$P = m g = \rho g L^3$$

Il rapporto tra le due forze:

$$\frac{F}{P} = \frac{L}{g t^2}$$

è proporzionale al numero di Froude:

A.4. Gruppi adimensionali notevoli

$$Fr = \sqrt{\frac{V_0^2}{g L_0}}$$

dove:

- ρ è la densità;
- L_0 è una lunghezza di riferimento;
- V_0 è una velocità di riferimento;
- g è l’accelerazione di gravità di riferimento.

Una definizione alternativa equivalente permette di vedere il numero di Froude come il rapporto tra la velocità di traslazione caratteristica e la velocità di oscillazione caratteristica delle onde nel fenomeno osservato. Nei fenomeni atmosferici quali ad esempio l’oltrepassamento di un ostacolo da parte del vento, il numero di Froude può essere espresso:

$$Fr = \frac{U}{NL_0}$$

in cui U è la velocità caratteristica del vento e N rappresenta la frequenza di oscillazione di galleggiamento di Brunt-Väisälä:

$$N = \sqrt{\left(\frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}\right)}$$

Se $Fr \ll 1$ allora il moto è affetto fortemente dalle forze di galleggiamento mentre se $Fr \gg 1$ allora il moto è caratterizzato dal bilanciamento tra le forze di inerzia e viscosità. Nel caso ad esempio di colline ([Kaim 94]) in cui il rapporto U/N uguaglia spesso il chilometro, si può osservare che, nel caso di dimensioni caratteristiche del chilometro o meno, non si hanno fenomeni governati dal galleggiamento, mentre il contrario si verifica nel caso di colline di dimensioni maggiori.

A.4.3 Numero di Knudsen

Il numero di Knudsen Kn è un gruppo adimensionale utilizzato in diversi campi della chimica e della fisica, definito come il rapporto tra il cammino libero medio molecolare λ e una lunghezza caratteristica L del problema fisico.

Può essere definito come:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} = \frac{k_B T}{\sqrt{2\pi} D^2 P L}$$

in cui:

Capitolo A. Richiami

- T è una temperatura;
- k_B è la costante di Boltzmann;
- P è la pressione;
- D è il diametro delle particelle;

Può inoltre essere ricavato come rapporto dei numeri di Mach e di Reynolds.

Il numero di Knudsen viene usato, in particolare in fluidodinamica, per definire il campo di validità dell'ipotesi del continuo nel fluido e quindi l'applicabilità delle equazioni di Navier-Stokes. Problemi per cui tale numero risulta essere di ordine di grandezza unitario o superiore non possono essere studiati con queste leggi.

Il suo nome deriva da quello del fisico danese Martin Knudsen (1871 - 1949).

A.4.4 Numero di Lipschitz

Viene citato come parametro di stabilità degli schemi semi-Lagrangiani ed è definito come:

$$\mathcal{B} = \Delta t \frac{\partial u}{\partial x}$$

In pratica la condizione $\mathcal{B} \leq 1$ equivale ad imporre la non intersezione delle traiettorie delle particelle fluide. Come mostrato in [Smol 92], ciò si può mostrare considerando due particelle che partono da due punti vicini x_0 e x'_0 nello stesso istante t_0 . Dopo un intervallo di tempo Δt queste occuperanno rispettivamente le posizioni:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(\lambda) &= \mathbf{x}_0 + \tilde{\mathbf{v}}(\mathbf{x}_0, t_0) \lambda \Delta t \\ \mathbf{x}'(\lambda) &= \mathbf{x}'_0 + \tilde{\mathbf{v}}(\mathbf{x}'_0, t_0) \lambda \Delta t \end{aligned}$$

in cui $\lambda \in [0, 1]$. Nel caso in cui le traiettorie dovessero incrociarsi si avrebbe l'esistenza di un valore di λ :

$$\exists \lambda \in [0, 1] : \mathbf{x}'_0 - \mathbf{x}_0 = \lambda \Delta t (\tilde{\mathbf{v}}(\mathbf{x}_0, t_0) - \tilde{\mathbf{v}}(\mathbf{x}'_0, t_0))$$

per cui:

$$\mathbf{x}'_0 - \mathbf{x}_0 = \lambda \Delta t \left[\tilde{\mathbf{v}}(\mathbf{x}_0, t_0) - \tilde{\mathbf{v}}(\mathbf{x}'_0, t_0) - \frac{\partial \tilde{\mathbf{v}}}{\partial x} (\mathbf{x}'_0 - \mathbf{x}_0) + o(\Delta x^2) \right]$$

ovvero:

$$\mathbf{x}'_0 - \mathbf{x}_0 = \lambda \Delta t \left[-\frac{\partial \tilde{\mathbf{v}}}{\partial x} (\mathbf{x}'_0 - \mathbf{x}_0) + o(\Delta x^2) \right]$$

A.4. Gruppi adimensionali notevoli

e in definitiva:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}'_0 - \mathbf{x}_0\| &\leq \lambda \Delta t \left\| \frac{\partial \tilde{\mathbf{v}}}{\partial x} \right\| \|\mathbf{x}'_0 - \mathbf{x}_0\| \\ \mathcal{B} &\geq 1 \end{aligned}$$

A.4.5 Numero di Mach

Il numero di Mach Ma è un gruppo adimensionale definito come il rapporto tra una velocità e la velocità del suono, ossia delle piccole perturbazioni di pressione, in seno al fluido considerato:

$$Ma = \frac{v_o}{v_s}$$

in cui:

- v_o è la velocità del corpo;
- v_s è la velocità del suono nel fluido considerato.

Permette di stabilire quanto siano importanti gli effetti di comprimibilità del fluido in esame. Quando infatti il valore del numero di Mach è ridotto al di sotto del valore $Ma = 0.3$ si commette un errore trascurabile considerando il fluido incomprimibile.

A.4.6 Numero di Nusselt

Il numero di Nusselt Nu è un gruppo adimensionale utilizzato nello studio dello scambio termico a parete. Rappresenta il rapporto tra il calore trasferito per convezione e quello trasferito per conduzione del fluido. È definito da:

$$Nu_L = \frac{hL}{k_f}$$

dove:

- L è una dimensione caratteristica;
- k_f è la conducibilità termica del fluido;
- h è il coefficiente di scambio termico convettivo laminare

È di particolare importanza nei problemi di convezione termica, in quanto la sua determinazione permette di conoscere il coefficiente di scambio termico convettivo fra il fluido e la parete.

Generalmente è considerato funzione del numero di Reynolds e del numero di Prandtl, a meno di un coefficiente C e degli esponenti n ed m a cui sono elevati gli altri due gruppi adimensionali.

Capitolo A. Richiami

A.4.7 Numero di Prandtl

Il numero di Prandtl Pr , è un gruppo adimensionale utilizzato nei problemi di fluidodinamica e termodinamica relativi allo scambio termico per convezione ed è definito come segue:

$$Pr = \frac{\mu c}{\lambda}$$

in cui:

- μ è la viscosità dinamica;
- c è il calore specifico;
- λ è la conducibilità termica;

Il numero di Prandtl è perciò una caratteristica del fluido, e non dipende (a differenza di altri gruppi adimensionali) dal campo di moto considerato. Permette di misurare l'importanza relativa degli effetti viscosi rispetto alla diffusività termica. In altre parole, il numero di Prandtl rappresenta il rapporto tra la diffusività della quantità di moto e la diffusività termica.

Valori tipici del numero di Prandtl sono:

- circa 0,7 per l'aria e la maggior parte dei gas;
- tra 100 e 40.000 nel caso degli olii motore;
- circa 0,015 per il mercurio.

Deve il suo nome a quello del fisico tedesco Ludwig Prandtl.

A.4.8 Numero di Reynolds

Il numero di Reynolds Re è un gruppo adimensionale usato in fluidodinamica, proporzionale al rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosi. Nel caso più generale il numero di Reynolds è scritto come:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

oppure:

$$Re = \frac{UL}{\nu}$$

dove:

- U è la velocità media del fluido;

A.4. Gruppi adimensionali notevoli

- μ è la viscosità dinamica;
- $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ è la viscosità cinematica;
- ρ è la densità del fluido;
- L è una lunghezza caratteristica del corpo (per il moto in condotti equivale al diametro $2r$ se la sezione del condotto è circolare, altrimenti è pari al cosiddetto diametro equivalente o diametro idraulico) $D_e = \frac{4S}{P}$ in cui:
 - S è l’area della sezione;
 - P è il perimetro bagnato.

Esso permette di valutare se il flusso di scorrimento di un fluido è in regime laminare o turbolento.

A.4.9 Numero di Richardson

Il numero di Richardson fornisce uno strumento per valutare la stabilità nella *surface layer* del Planetary Boundary Layer (PBL). Esistono differenti modi di esprimere il numero di Richardson:

R_i gradiente

$$R_i = \frac{(g/\bar{\theta})(\partial\bar{\theta}/\partial z)}{(\partial\bar{u}/\partial z)^2}$$

rappresenta il rapporto tra la componente di galleggiamento e quella di viscosità nella produzione della turbolenza. Per valori negativi di R_i si ha una stratificazione instabile dello strato limite dovuta ad effetti sia di turbolenza meccanica che di galleggiamento. Per valori $0 < R_i < 0.25$ si ha un flusso turbolento totalmente dovuto all’effetto meccanico e per valori di $R_i > 0.25$ si ha la transizione da flusso turbolento a laminare ([Kaim 94]).

R_f flusso

$$R_f = \frac{(g/\bar{\theta})\overline{w'\theta'}}{\overline{u'w'}(\partial\bar{u}/\partial z)}$$

in questa forma, nel numero di Richardson compaiono i flussi turbolenti del calore sensibile e della quantità di moto. Il denominatore rappresenta sempre una quantità negativa e nelle situazioni convettive, in cui il flusso turbolento di calore sensibile risulta positivo, risulta $R_f < 0$. Si ha in pratica un elevato flusso turbolento di calore per valori negativi molto elevati di R_f . Quando $R_f = 0$ il

Capitolo A. Richiami

flusso turbolento di calore sensibile si annulla e la turbolenza è di sola origine meccanica. Nei casi stabili, prevalentemente notturni, si ha $R_f > 0$ ([Sozz 02]).

R_b bulk

$$R_b = \frac{(g/\bar{\theta})(\bar{\theta}_z - \bar{\theta}_0)/2}{(\bar{u}_z/z)^2}$$

Rappresenta il rapporto tra il Convective Available Potential Energy (**CAPE**) di una particella d’aria e lo shear verticale nella zona che circonda la particella stessa. Valori bassi del R_b indicano bassa instabilità o comunque un forte shear verticale.

A.4.10 Numero di Rossby

Il numero di Rossby **Ro** rappresenta il rapporto tra le forze di inerzia e quella di Coriolis agenti su una particella fluida in moto:

$$Ro = \frac{U^2}{\frac{L}{f_0 U}} = \frac{U}{f_0 L}$$

- U è la velocità caratteristica nel fluido;
- L è la dimensione caratteristica del fenomeno in considerazione;
- $f_0 = 2\Omega \sin \phi [1/sec]$ è il parametro di Coriolis che alle latitudini medie vale circa $f_0 = 10^{-4} [1/sec]$.

In termini di tempi caratteristici, può essere visto come il rapporto tra il tempo caratteristico di Coriolis ($10^4 \text{ sec} \simeq 2 \text{ h } 45 \text{ min}$) ed il tempo caratteristico di evoluzione del fenomeno:

$$Ro = \frac{T_{Coriolis}}{T_{Caratteristico}}$$

Fenomeni dominati dalla forza di Coriolis sono quindi caratterizzati da valori bassi del numero di Rossby e vice versa.

Appendice B

Codice sviluppato

B.1 Conversione del file di dati Nomad2

Listing B.1: Codice nomad2windog.sh.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
# Script bash.
# Versione 0.0.1
# Anno: 2011
#
# Descrizione:
#
# Trasforma i file in formato csv di Nomad2
# in formato compatibile Windographer
#
# Produce gli output:
#
# nomefileinput.wg
#
# Uso:
#
#          nomad2windog.sh nomefileinput
#
#####
#
if [ $# -lt 1 ]; then
    echo
    echo "Errore:"
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
    echo
    echo "Uso_$0_nomefile.nomad"
    echo
    exit 1
fi
#
if [ -f $1 ]; then
    FILE=$1
else
    echo
    echo "Errore:"
    echo
    echo "File_$1_non_trovato!"
    echo
    exit 1
fi
#
# Numero linee in file di origine: 11 di info
# nomad e 1 di intestazione
#
NL=$(cat $FILE | wc -l)
#
# Numero linee file dati NLD
#
NLD=$((NL-12))
#
# csv.1 file dati senza la riga di intestazione
#
tail -n $NLD $FILE > csv.1
#
# Riga di intestazione
#
head -n 12 $FILE | tail -n 1 > intestazione.txt
#
# Separazione del campo timestamp
# in due campi DATA ORA
#
sed -i 's/TimeStamp/DATA|ORARIO/' intestazione.txt
#
# Sostituzione del carattere | con tab
# nell'intestazione
#
sed -i 's/|/ /g' intestazione.txt
#
# Ricerca dei campi data che mancano di ora:
# quelli delle 00:00:00
#
LN=0
while read -r xx; do
    LN=$((LN+1))
    DATAORA=$(echo $xx | cut -d "|" -f2)
```

B.2. Conversione file binari HGT in formato little endians.

```

##### [_${#DATAORA} -lt 15] && sed -i -e "${LN} \
s%$DATAORA%$ {DATAORA} 00.00.00%" _csv.1 | | :
done < _csv.1
#
#_Sostituzione _spazio _in _campo _data _ora _con _|
#_Sostituzione _con _: _nel _campo _ora
#_Eliminazione _di _tutti _gli _spazi
#_Sostituzione _del _carattere _| _col _tab
#
sed -i -e "s/ /\"|\"/; s/\\.\/\:/g; s/ //g; \
s/|/ /g" _csv.1
#
#_Append _dei _dati _alla _riga _di _intestazione
#
cat _csv.1 >> _intestazione.txt
#
#_Salvataggio _file _con _estensione _wg
#
mv _intestazione.txt _${FILE%.*}.wg

```

B.2 Conversione file binari HGT in formato little endians.

Listing B.2: Codice Octave be2le.m.

```

#!/usr/bin/octave -q
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#
# File: be2le.m
# Script octave che converte i file .hgt da formato
# big endian a formato little endian
# Input: nomefile.HGT
# Output: nomefile_LE.HGT
#####
more off
printf ("%s\n\n", program_name ());
arg_list = argv ();
if nargin != 1
    printf ("\n\nErrore . Uso: %s _nomefile .HGT\n\n", \
    program_name ())
end
if !(exist (arg_list {1}))
    printf ("\n\nErrore: il file %s non esiste\n", \
    arg_list {1});

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

        exit
    else
        nomefile=arg_list {1};
    end
    fid = fopen(nomefile,"rb");
        HGT = fread(fid,[1201,1201],'integer*2',0, \
            "ieee-be");
    fclose(fid);
    lung = size(nomefile)(2);
    newname = strcat(nomefile(1:lung-4),"_LE", \
        nomefile(lung-3:lung));
    save ("-ascii", newname, "HGT")

```

B.3 Conversione file di orografia in formato geogrid.

Listing B.3: Codice C write_geogrid.c.

```

/* File: write_geogrid.c
   Sample subroutine to write an array
   into the geogrid binary format.
   Side effects: Upon completion, a file named
   00001-<NX>.00001-<NY> is
   created, where <NX> is the argument
   nx and <NY> is the argument ny,
   both in i5.5 format.

   Notes: Depending on the compiler and compiler
   flags, the name of
   the write_geogrid() routine may need to be
   adjusted with respect
   to the number of trailing underscores when
   calling from Fortran.
   Michael G. Duda, NCAR/MMM
   Per compilare compilare con:
   icc -DUNDERSCORE -DBYTESWAP -DLINUX \
   -DIO_NETCDF-DIO_BINARY -DIO_GRIB1 -DBIT32 \
   -D_GEOGRID -O -c write_geogrid.c
*/
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#ifdef UNDERSCORE
#define write_geogrid write_geogrid_
#endif
#ifdef DOUBLEUNDERSCORE
#define write_geogrid write_geogrid__

```

B.3. Conversione file di orografia in formato geogrid.

```

#endif
#define BIG_ENDIAN 0
#define LITTLE_ENDIAN 1
int write_geogrid(
    float * rarray,
    /* The array to be written */
    int * nx,
    /* x-dimension of the array */
    int * ny,
    /* y-dimension of the array */
    int * nz,
    /* z-dimension of the array */
    int * isigned,
    /* 0=unsigned data, 1=signed data */
    int * endian,
    /* 0=big endian, 1=little endian */
    float * scalefactor,
    /* value to divide array elements by before
    truncation to integers */
    int * wordsize )
    /* number of bytes to use for
    each array element */
{
    int i, narray;
    int A2, B2;
    int A3, B3, C3;
    int A4, B4, C4, D4;
    unsigned int * iarray;
    unsigned char * barray;
    char fname[24];
    FILE * bfile;
    narray = (*nx) * (*ny) * (*nz);
    iarray = (unsigned int *)\
    malloc(sizeof(int) * narray);
    barray = (unsigned char *)\
    malloc(sizeof(unsigned char) * \
    narray * (*wordsize));
    /* Scale real-valued array by
    scalefactor and convert to integers */
    for (i=0; i<narray; i++)
        iarray[i] = (unsigned int)(rarray[i]\
        / (*scalefactor));
    /*
    Set up byte offsets for each wordsize
    depending on byte order.
    A, B, C, D give the offsets of the LSB
    through MSB (i.e., for
    word ABCD, A=MSB, D=LSB) in the array from
    the beginning of a word
    */
    if (*endian == BIG_ENDIAN) {

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

A2 = 0; B2 = 1;
A3 = 0; B3 = 1; C3 = 2;
A4 = 0; B4 = 1; C4 = 2; D4 = 3;
}
else {
    B2 = 0; A2 = 1;
    C3 = 0; B3 = 1; A3 = 2;
    D4 = 0; C4 = 1; B4 = 2; A4 = 3;
}
/* Place words into storage byte order */
switch(*wordsize) {
    case 1:
        for(i=0; i<narray; i++) {
            if (iarray[i] < 0 && *isigned)\
                iarray[i] += (1 << 8);
            barray[(*wordsize)*i] = (unsigned char)\
                (iarray[i] & 0xff);
        }
        break;
    case 2:
        for(i=0; i<narray; i++) {
            if (iarray[i] < 0 && *isigned) \
                iarray[i] += (1 << 16);
            barray[(*wordsize)*i+A2] = \
                (unsigned char)((iarray[i] >> 8) \
                & 0xff);
            barray[(*wordsize)*i+B2] = \
                (unsigned char)( iarray[i] \
                & 0xff);
        }
        break;
    case 3:
        for(i=0; i<narray; i++) {
            if (iarray[i] < 0 && *isigned) \
                iarray[i] += (1 << 24);
            barray[(*wordsize)*i+A3] = \
                (unsigned char)((iarray[i] >> 16) \
                & 0xff);
            barray[(*wordsize)*i+B3] = \
                (unsigned char)((iarray[i] >> 8) \
                & 0xff);
            barray[(*wordsize)*i+C3] = \
                (unsigned char)( iarray[i] \
                & 0xff);
        }
        break;
    case 4:
        for(i=0; i<narray; i++) {
            if (iarray[i] < 0 && *isigned) \
                iarray[i] += (1 << 32);
            barray[(*wordsize)*i+A4] = \

```

B.3. Conversione file di orografia in formato geogrid.

```

        (unsigned char)\
        ((iarray[i] >> 24) & 0xff);
        barray[(*wordsize)*i+B4] = \
        (unsigned char)((iarray[i] >> 16)\
        & 0xff);
        barray[(*wordsize)*i+C4] = \
        (unsigned char)((iarray[i] >> 8) \
        & 0xff);
        barray[(*wordsize)*i+D4] = \
        (unsigned char)( iarray[i] \
        & 0xff);
    }
    break;
}
printf(fname, "%5.5i-%5.5i.%5.5i-%5.5i", \
1,*nx,1,*ny);
/* Write array to file */
bfile = fopen(fname,"wb");
fwrite(barray, sizeof(unsigned char), \
narray*(*wordsize), bfile);
fclose(bfile);
free(iarray);
free(barray);
return 0;
}

```

Listing B.4: Codice f90 asc2bin.f90.

```

PROGRAM asc2bin
! Pierpaolo Garofalo
! Universita Politecnica delle Marche
! Programma per la conversione di file terrain
! da formato ASCII file.txt a geogrid
!
! Per compilare
! ifort -o asc2bin.exe asc2bin.f90 write_geogrid.o
IMPLICIT NONE
INTEGER      :: nx, ny, nz, isigned, \
              endian, wordsize, i, j
REAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:, :) :: iarray
REAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:, :) :: rarray
REAL*8       :: missvalue, cellsize, \
              xllcorner, yllcorner
REAL         :: scalefactor
CHARACTER    :: head12
! CHARACTER head12*(10)
! endian = 0 big endian; endian = 1 little endian
isigned = 1
endian = 0
wordsize = 2

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
scalefactor = 1.0

nz = 1
open (10, file = './file.txt')
read(10,*) head12, nx
read(10,*) head12, ny
read(10,*) head12, xllcorner
read(10,*) head12, yllcorner
read(10,*) head12, cellsize
read(10,*) head12, missvalue
!   read(10,*) endian

allocate(rarray(nx,ny))
allocate(iarray(nx,ny))
do j = 1, ny
  read(10,*) iarray(:,j)
end do
! inversione dei dati
! all angolo in basso a sx
do j = 1, ny
  rarray(:,j) = iarray(:,ny-j+1)
end do
! rimozione altitudini negative
do j = 1, ny
  do i = 1, nx
    if ( iarray(i,ny-j+1) < 0 ) then
      rarray(i,j) = 0
! metto a zero il terrain negativo
    end if
  end do
end do
call write_geogrid(rarray, nx, ny, nz, \
  isigned, endian, scalefactor, wordsize)
deallocate(rarray)
END PROGRAM asc2bin
```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

B.4 Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

B.4.1 Compilazione delle librerie

Listing B.5: Compilazione Openmpi.

```
#!/bin/sh
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
#cd $INSTDIR/Sources
#wget http://www.open-mpi.org/software/ompi/v1.2/downloads/
openmpi-1.2.9.tar.bz2
cp $INSTDIR/Sources/openmpi-1.2.9.tar.bz2 $INSTDIR/SW/
cd $INSTDIR/SW
rm -r openmpi-1.2.9 2> /dev/null
tar -xjvf openmpi-1.2.9.tar.bz2 && rm openmpi-1.2.9.tar.bz2
|| exit 1
cd openmpi-1.2.9
echo "Configurazione_in_atto...attendere!_output_in_
configure.log"
./configure --prefix=$INSTDIR CC=icc CXX=icpc F77=ifort FC=
ifort --enable-ipv6 --enable-mpi-threads > configure.log
2>&1 && \
echo "make_in_atto...attendere!_output_in_make.log" && \
make all > make.log 2>&1 && \
echo "Installazione_in_atto...attendere!_output_in_make.
install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Installazione_fallita"; exit 1)
```

Listing B.6: Compilazione libjpeg.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
export CC=icc # -fPIC
export CXX=icpc # -fPIC
# Intel
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

#export CFLAGS='-O3 -xT -ip -no-prec-div -static '
#export CXXFLAGS='-O3 -xT -ip -no-prec-div -static '
# GENERIC
export CFLAGS='-O3 -xW -ip -no-prec-div -static -m64 -fPIC '
export CXXFLAGS='-O2 -xW -ip -no-prec-div -static -m64 -fPIC '
export F77=ifort
export FC=ifort
export F90=ifort
# Intel
#export FFLAGS='-O3 -xT -ip -no-prec-div -static '
# GENERIC
export FFLAGS='-O2 -m64 -xW -ip -no-prec-div -static -fPIC '
export CPP='icc -E'
export CXXCPP='icpc -E'
cd $INSTDIR/SW
# Applico la patch del config senno libtool nn funge con le
# shared
# http://www.linuxfromscratch.org/patches/downloads/jpeg/jpeg
# -6b-config_update-1.patch
cp $INSTDIR/Sources/jpeg-6b-config_update-1.patch .
cp $INSTDIR/Sources/jpegsrc.v6b.tar.gz .
rm -r jpeg-6b 2> /dev/null
tar -xzvf jpegsrc.v6b.tar.gz
rm jpegsrc.v6b.tar.gz
cd jpeg-6b
patch -p1 -i ../jpeg-6b-config_update-1.patch
rm ../jpeg-6b-config_update-1.patch
make clean 2> /dev/null
echo "Configure_in_atto._Output_in_configure.log"
./configure --prefix=$INSTDIR --enable-shared --enable-static
> configure.log 2>&1
mkdir $INSTDIR/man
mkdir $INSTDIR/man/man1
echo "Make_in_atto._Output_in_make.log"
make all > make.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto._Output_in_make_install.log"
make install > make.install.log 2>&1 && \
echo "Make_install_lib_in_atto._Output_in_make_install-lib.
log"
make install-lib > make.install-lib.log 2>&1 && \
echo "Make_install_headers_in_atto._Output_in_make_install-
headers.log"
make install-headers > make.install-headers 2>&1 && \
cat make.install.log || \
( echo "Compilazione fallita"; exit 1)

```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

Listing B.7: Compilazione zlib.

```
#!/bin/sh
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
#INTEL_COMPILER_TOPDIR directory where Intel Compiler has
  been installed
export INTEL_COMPILER_TOPDIR="/opt/intel/Compiler/11.0/081"
#Setting environment variables for the Intel(R) C++ Compiler
  Professional Edition for Linux
. $INTEL_COMPILER_TOPDIR/bin/intel64/iccvars_intel64.sh
#If you want to install ZLIB in the special directory then
  you should specify an installation
#prefix other than '/usr/local' using '--prefix'.
cd $INSTDIR/SW
cp $INSTDIR/Sources/zlib-1.2.3.tar.gz .
rm -r zlib-1.2.3 2> /dev/null
tar -xzvf zlib-1.2.3.tar.gz
rm zlib-1.2.3.tar.gz
cd zlib-1.2.3
./configure --prefix=$INSTDIR --shared > configure.log 2>&1
#echo "Configure protesta che nn compiltera le shared"
#echo "editare Makefile e cambiare:"
#echo "CFLAGS=-O -DUSEMMAP"
#echo "in"
#echo "CFLAGS=-O -DUSEMMAP -shared -fPIC"
#echo "dare make e make install"
#intel
#sed -e 's/CFLAGS=-O -DUSEMMAP/CFLAGS=-O -DUSEMMAP -shared
  -fPIC/g' < Makefile > Makefile.new
#amd
if [ -f Makefile.bkp ]; then
:
else
  cp Makefile Makefile.bkp
fi
sed -e 's/CFLAGS=-O -DUSEMMAP/CFLAGS=-O -DUSEMMAP -shared -
  fPIC -O3 -xW -ip -no-prec-div -static -m64/g' < Makefile.
  bkp > Makefile
echo "Make_in_atto:_output_in_make.log" && \
make > make.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)
```

Capitolo B. Codice sviluppato

Listing B.8: Compilazione udunits.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
cd $INSTDIR/SW
cp $INSTDIR/Sources/udunits-2.1.19.tar.gz .
rm -r udunits-2.1.19 2> /dev/null
tar -xzvf udunits-2.1.19.tar.gz
rm udunits-2.1.19.tar.gz
cd udunits-2.1.19
export PERL=""
echo "Configure_in_atto..Output_in_configure.log" && \
./configure --prefix=$INSTDIR --enable-shared --enable-static
> configure.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto..Output_in_make.log" && \
make > make.log 2>&1 && \
echo "Make_check_in_atto..Output_in_make.check.log" && \
make check > make.check.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto..Output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)
```

Listing B.9: Compilazione szip.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
export CC=icc
export CXX=icpc
export F77=ifort
# -xP non supportato su AMD manca patch al compilatore x
  istruzioni SSE3
#export CFLAGS='-O3 -xP -ip'
#export CXXFLAGS='-O3 -xP -ip'
#export FFLAGS='-O3 -xP -ip'
export CFLAGS='-O2 -ip'
export CXXFLAGS='-O2 -ip'
export FFLAGS='-O2 -ip'
cp $INSTDIR/Sources/szip-2.1.tar.gz $INSTDIR/SW && cd
  $INSTDIR/SW || exit 1
```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

```
tar -xzvf szip-2.1.tar.gz
rm szip-2.1.tar.gz
cd szip-2.1
echo "Make_clean_in_atto"
make clean 2> /dev/null
echo "Configure_in_atto..Output_in_configure.log" && \
./configure --prefix=$INSTDIR --with-pic --enable-shared --
enable-static > configure.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto..Output_in_make.log" && \
make > make.log 2>&1 && \
echo "Make_check_in_atto..Output_in_make.check.log" && \
make check > make.check.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto..Output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)
```

Listing B.10: Compilazione hdf5.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
#export CC=icc -lirc -fPIC
#export F9X=ifort
#export CXX=icpc
export CC='icc -lirc -fPIC -I/home/pierp/Programmi/WRF2/
include -L/home/pierp/Programmi/WRF2/lib '
#home/pierp/Programmi/WRF2/bin/mpicc
export CXX='icpc -lirc -fPIC -I/home/pierp/Programmi/WRF2/
include -L/home/pierp/Programmi/WRF2/lib '
export CFLAGS='-O3 -ip -no-prec-div -lirc -fPIC -m64 -I/
home/pierp/Programmi/WRF2/include -L/home/pierp/Programmi
/WRF2/lib '
export CXXFLAGS='-O3 -ip -no-prec-div -lirc -fPIC -m64 -I/
home/pierp/Programmi/WRF2/include -L/home/pierp/Programmi
/WRF2/lib '
export F77='ifort -lirc -fPIC -I/home/pierp/Programmi/WRF2/
include -L/home/pierp/Programmi/WRF2/lib '
export FC='ifort -lirc -fPIC -I/home/pierp/Programmi/WRF2/
include -L/home/pierp/Programmi/WRF2/lib '
export F90='ifort -lirc -fPIC -I/home/pierp/Programmi/WRF2/
include -L/home/pierp/Programmi/WRF2/lib '
export FFLAGS='-O3 -ip -no-prec-div -lirc -fPIC -m64 -I/home/
pierp/Programmi/WRF2/include -L/home/pierp/Programmi/WRF2
/lib '
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
#export CPP='/home/pierp/Programmi/WRF2/bin/icc -E -lirc -
fPIC -I/home/pierp/Programmi/WRF2/include -L/home/pierp/
Programmi/WRF2/lib '
export CXXCPP='icpc -E -lirc -fPIC -I/home/pierp/Programmi/
WRF2/include -L/home/pierp/Programmi/WRF2/lib '
export LDFLAGS=-L/home/pierp/Programmi/WRF2/lib:/home/pier/
Programmi/WRF2/lib/openmpi
cd $INSTDIR/SW
rm -r $INSTDIR/SW/hdf5-1.8.5-patch1 2> /dev/null
cp $INSTDIR/Sources/hdf5-1.8.5-patch1.tar.gz .
tar -xzvf hdf5-1.8.5-patch1.tar.gz && rm hdf5-1.8.5-patch1.
tar.gz
cd hdf5-1.8.5-patch1
echo "Make_clean_in_atto"
make clean
echo "Configure_in_atto..Output_in_configure.log" && \
./configure --prefix=$INSTDIR --enable-fortran --with-zlib=
$INSTDIR --with-szlib=$INSTDIR --enable-shared --enable-
static --enable-hl > config.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto..Output_in_make.log" && \
make > make.log 2>&1 && \
echo "Make_check_in_atto..Output_in_make.check.log" && \
make check > make.check.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto..Output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)
```

Listing B.11: Compilazione libcurl.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
export CC=icc
export CXX=icpc
export F77=ifort
#export CFLAGS='-O3 -xP -ip '
#export CXXFLAGS='-O3 -xP -ip '
#export FFLAGS='-O3 -xP -ip '
cd $INSTDIR/SW
cp $INSTDIR/Sources/curl-7.19.7.tar.gz .
rm -r curl-7.19.7 2> /dev/null
tar -xzvf $INSTDIR/SW/curl-7.19.7.tar.gz && rm $INSTDIR/SW/
curl-7.19.7.tar.gz
cd curl-7.19.7
make clean 2> /dev/null
```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

```
#!/configure --prefix=$INSTDIR --with-zlib=$INSTDIR --with-pic
--with-ssl=$INSTDIR --with-libssh2=/usr/lib && make
all install
echo "Configure_in_atto:_output_in_configure.log"
./configure --prefix=$INSTDIR --with-zlib=$INSTDIR --with-pic
> configure.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto:_output_in_make.log" && \
make all > make.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || (echo "Compilazione_fallita"; exit 1)
```

Listing B.12: Compilazione netcdf.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
export CC='icc -I/home/pier/Programmi/WRF2/include -I/home/
pier/Programmi/WRF2/include/hdf -L/home/pier/Programmi/
WRF2/lib '
export CXX='icpc -I/home/pier/Programmi/WRF2/include -I/home/
pier/Programmi/WRF2/include/hdf -L/home/pier/Programmi/
WRF2/lib '
export CFLAGS='-O3 -ip -no-prec-div -static -L/home/pier/
Programmi/WRF2/lib -I/home/pier/Programmi/WRF2/include/
hdf -m64'
export CXXFLAGS='-O3 -ip -no-prec-div -static -L/home/pier/
Programmi/WRF2/lib -I/home/pier/Programmi/WRF2/include/
hdf -m64'
export F77='ifort -I/home/pier/Programmi/WRF2/include -I/home
/pier/Programmi/WRF2/include/hdf -L/home/pier/Programmi/
WRF2/lib '
export FC='ifort -I/home/pier/Programmi/WRF2/include -I/home/
pier/Programmi/WRF2/include/hdf -L/home/pier/Programmi/
WRF2/lib '
export F90='ifort -I/home/pier/Programmi/WRF2/include -I/home
/pier/Programmi/WRF2/include/hdf -L/home/pier/Programmi/
WRF2/lib '
export FFLAGS='-O3 -ip -no-prec-div -static -L/home/pier/
Programmi/WRF2/lib -I/home/pier/Programmi/WRF2/include/
hdf -m64'
export CPP='icc -E'
export CXXCPP='icpc -E'
cd $INSTDIR/SW
rm -r $INSTDIR/SW/netcdf-4.1.1 2> /dev/null
cp $INSTDIR/Sources/netcdf-4.1.1.tar.gz .
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
tar -xzvf netcdf-4.1.1.tar.gz && rm netcdf-4.1.1.tar.gz ||
  exit
cd netcdf-4.1.1
# Make clean dopo lo scompattamento cancella la
# documentazione e il make fallisce sulla sezione manuali
# bug di netcdf 4.1.1
# non dare make clean ma riscompattare il tutto se necessario
#make clean
#####
# per compilare ncl deve essere abilitato
# netcdf-4, per compilare wrf deve essere
# ricompilato con netcdf disabilitato
#####
echo "Configure_in_atto:_output_in_configure.log" && \
./configure --with-hdf5=$INSTDIR --with-curl=$INSTDIR --
  with-szlib=$INSTDIR --with-zlib=$INSTDIR --prefix=
  $INSTDIR --disable-f90 --enable-netcdf-4 > configure.log
  2>&1 && \
#./configure --with-hdf5=$INSTDIR --with-curl=$INSTDIR --
  with-szlib=$INSTDIR --with-zlib=$INSTDIR --prefix=
  $INSTDIR --disable-f90 --disable-netcdf-4 > configure.
  log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto:_output_in_make.log" && \
make all > make.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make.install.log" && \
# i nodi del cluster non risolvono quindi il check fallisce
#make check
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)
```

Listing B.13: Compilazione HDF4.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
cp $INSTDIR/Sources/HDF4.2r4.tar.gz $INSTDIR/SW/
cd $INSTDIR/SW
rm -r $INSTDIR/SW/HDF4.2r4 2> /dev/null
tar -xzvf HDF4.2r4.tar.gz && rm HDF4.2r4.tar.gz || exit 1
cd HDF4.2r4
export CC=icc
export CXX=icpc
#export CFLAGS='-O3 -xT -ip -no-prec-div -static '
#export CXXFLAGS='-O3 -xT -ip -no-prec-div -static '
export F77=ifort
```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

```

export FC=ifort
export F90=ifort
#export FFLAGS='-O3 -xT -ip -no-prec-div -static '
export CPP='icc -E'
export CXXCPP='icpc -E'
make distclean
make clean
echo "Configure_in_atto:_output_in_configure.log" && \
./configure --prefix=$INSTDIR --with-zlib=$INSTDIR --with-
  zlib=$INSTDIR --with-jpeg=$INSTDIR --enable-netcdf-4 --
  disable-netcdf --includedir=$INSTDIR/include/hdf >
  configure.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto:_output_in_make.log" && \
make > make.log 2>&1 && \
echo "Make_check_in_atto:_output_in_make.check.log" && \
make check > make.check.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)

```

Listing B.14: Compilazione jasper.

```

#!/bin/sh
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
cd $INSTDIR/Sources
cp jasper-1.900.1.zip $INSTDIR/SW/
rm -r $INSTDIR/SW/jasper-1.900.1 2> /dev/null
cd $INSTDIR/SW
unzip jasper-1.900.1.zip && rm jasper-1.900.1.zip || exit 1
cd jasper-1.900.1
#INTEL_COMPILER_TOPDIR directory where Intel Compiler has
been installed
export INTEL_COMPILER_TOPDIR="/opt/intel/Compiler/11.0/081"
#Setting environment variables for the Intel(R) C++ Compiler
Professional Edition for Linux
. $INTEL_COMPILER_TOPDIR/bin/intel64/iccvars_intel64.sh
#Setting environment variables for the Intel(R) Fortran
Compiler Professional Edition for Linux
. $INTEL_COMPILER_TOPDIR/bin/intel64/fortvars_intel64.sh
#If you want to install Jasper in the special directory then
you should specify an installation
#prefix other than '/usr/local' using '--prefix'.
echo "Configure_in_atto:_output_in_configure.log" && \

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
./configure --prefix=$INSTDIR CC=icc CXX=icpc F77=ifort --
  enable-shared=yes >configure.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto:_output_in_make.log" && \
make > make.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)
```

Listing B.15: Compilazione libpng.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
cd $INSTDIR/Sources
if [ -f libpng-1.2.41.tar.gz ]; then
  cp libpng-1.2.41.tar.gz $INSTDIR/SW/
else
  echo "Il file _${INSTDIR}/Sources/libpng-1.2.41.tar.gz non
    _esiste"
  exit 1
fi
cd $INSTDIR/SW
rm -r $INSTDIR/SW/libpng-1.2.41 2> /dev/null
tar -xzvf libpng-1.2.41.tar.gz && rm libpng-1.2.41.tar.gz ||
  (echo "Impossibile_scompattare"; exit 1)
cd libpng-1.2.41
export CC='icc -lirc '
export CXX='icpc -lirc '
#export CFLAGS='-O3 -xT -ip -no-prec-div -static -lirc '
#export CXXFLAGS='-O3 -xT -ip -no-prec-div -static -lirc '
export F77='ifort -lirc '
export FC='ifort -lirc '
export F90='ifort -lirc '
#export FFLAGS='-O3 -xT -ip -no-prec-div -static -lirc '
export CPP='icc -E -lirc '
export CXXCPP='icpc -E -lirc '
make clean 2> /dev/null
echo "Configure_in_atto:_output_in_configure.log" && \
./configure --prefix=$INSTDIR --disable-shared --with-pic >
  configure.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto:_output_in_makelog" && \
make all > make.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

```
(echo "Compilazione fallita"; exit 1)
```

Listing B.16: Compilazione g2clib.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
cd $INSTDIR/SW
cp $INSTDIR/Sources/g2clib_with_changes-1.1.9.tar.gz .
rm -r g2clib_with_changes-1.1.9 2> /dev/null
tar -xvf g2clib_with_changes-1.1.9.tar.gz && rm
    g2clib_with_changes-1.1.9.tar.gz || exit 1
cd g2clib_with_changes-1.1.9
export CC=icc
export CXX=icpc
#export CFLAGS='-O3 -xT -ip -no-prec-div -static '
#export CXXFLAGS='-O3 -xT -ip -no-prec-div -static '
export F77=ifort
export FC=ifort
export F90=ifort
#export FFLAGS='-O3 -xT -ip -no-prec-div -static '
export CPP='icc -E'
export CXXCPP='icpc -E'
make clean 2> /dev/null
if [ -f makefile.bkp ]; then
:
else
    mv makefile makefile.bkp
fi
sed -e 's:CC=gcc -fPIC:CC=icc -fPIC:g' < makefile.bkp >
    makefile
sed -e '/#DEFS=-DUSE_JPEG2000 -DUSE_PNG -D_64BIT_/d' <
    makefile > makefile.1
sed -e 's/DEFS=-DUSE_JPEG2000 -DUSE_PNG/DEFS=-DUSE_JPEG2000 -
DUSE_PNG -D_64BIT_/g' < makefile.1 > makefile
sed -e 's:INC=-I/usr/include:INC=-I/home/pierp/Programmi/
WRFifort/include -I/home/pierp/Programmi/WRFifort/include
/jasper -I/home/pierp/Programmi/WRFifort/include/libpng12
:g' < makefile > makefile.1
mv makefile.1 makefile
echo "Make_in_atto: output_in_make.log" && \
make all > make.log 2>&1 && \
cp libgrib2c.a $INSTDIR/lib/ && \
cp grib2.h $INSTDIR/include/ && \
echo "Copia_di_libgrib2c.a_in_{$INSTDIR}/lib/_e_di_grib2.h_in
_{$INSTDIR}/include/_fatta"
```

Capitolo B. Codice sviluppato

Listing B.17: Compilazione hdfs2.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
cd $INSTDIR/Sources
#wget ftp://edhs1.gsfc.nasa.gov/edhs/hdfeos/latest_release/
HDF-EOS2.16v1.00.tar.Z
cp HDF-EOS2.16v1.00.tar.Z $INSTDIR/SW
cd $INSTDIR/SW
yes | rm -r $INSTDIR/SW/hdfeos
gunzip HDF-EOS2.16v1.00.tar.Z
tar -xvf HDF-EOS2.16v1.00.tar
rm HDF-EOS2.16v1.00.tar
chmod -R +w ./hdfeos
cd hdfeos
WKDIR=$PWD
export LINUX_BRAND=linux64
# se non disponibile allora installare ksh
#entrare in utils e cambiare gcc in icc nel makefile
cd util
cp makefile makefile.bkp
cat makefile | sed -e 's/gcc/icc/g' > makefile.1
cat makefile.1 | sed -e 's/g77/ifort/g' > makefile
rm makefile.1
cd ..
echo "INSTALL-HDFEOS_in_atto:_output_in_config.log" && \
bin/INSTALL-HDFEOS -cc_path /opt/intel/Compiler/11.0/081/bin/
intel64/icc -szi $INSTDIR/include -szl $INSTDIR/lib -i
$INSTDIR/include/hdf -l $INSTDIR/lib > config.log 2>&1
#tail -f config.log
cd $INSTDIR/lib
ln -sf ../SW/hdfeos/lib/linux64/* .
cd $INSTDIR/include
ln -sf ../SW/hdfeos/include/*.h .
cd $INSTDIR/SW/hdfeos/gctp/src
export BRAND=linux64
cp makelinux64 makelinux64.bkp
cat makelinux64 | sed -e 's/libgctplinux64/libGctp/g' >
makelinux64.1
sed -e "$ (cat makelinux64.1 | grep -n 'LIBDIR_=='| cut -d_ : '
-f1) c\LIBDIR_==\home\pierp\Programmi\WRF2\lib"
makelinux64.1 > makelinux64.2
rm makelinux64.1
mv makelinux64.2 makelinux64
cat makelinux64 | sed -e 's/ cc / icc /g' > makelinux64.1
mv makelinux64.1 makelinux64
```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

```
cd $INSTDIR/SW/hdfeos/gctp/
echo "Make_digctp_in_atto:_output_in_{$INSTDIR}/SW/hdfeos/
gctp/make.log" && \
make > make.log 2>&1
```

Listing B.18: Compilazione hdfeos5.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
cd $INSTDIR/SW
cp $INSTDIR/Sources/HDF-EOS5.1.11.tar.Z .
gunzip HDF-EOS5.1.11.tar.Z
tar -xvf HDF-EOS5.1.11.tar
rm HDF-EOS5.1.11.tar
cd hdfeos5
echo "Configure_in_atto:_output_in_configure.log" && \
./configure CC=$INSTDIR/bin/h5cc CFLAGS=-DH5_USE_16_API --
with-hdf5=$INSTDIR --with-zlib=$INSTDIR --with-szlib=
$INSTDIR --prefix=$INSTDIR > configure.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto:_output_in:_make.log" && \
make all > make.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cd $INSTDIR/include && \
ln -sf $INSTDIR/SW/hdfeos5/include/*.h . && \
cd $INSTDIR/SW/hdfeos5 && \
cat make.install.log || \
( echo "Compilazione fallita"; exit 1)
```

Listing B.19: Compilazione triangle.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
mkdir $INSTDIR/SW/triangle
cp $INSTDIR/Sources/triangle.zip $INSTDIR/SW/triangle/
cd $INSTDIR/SW/triangle/
unzip triangle.zip
rm triangle.zip
#mkdir -p $INSTDIR/SW/ncarg/ni/src/lib/hlu
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
#cp triangle.c $INSTDIR/SW/ncarg/ni/src/lib/hlu
#cp triangle.h $INSTDIR/SW/ncarg/ni/src/lib/hlu
```

Listing B.20: Compilazione ncarg 5.2.1.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
cp $INSTDIR/Sources/ncl_ncarg_src-5.2.1.tar.gz $INSTDIR/SW
cd $INSTDIR/SW
rm -r ncarg
tar -xzvf ncl_ncarg_src-5.2.1.tar.gz
rm ncl_ncarg_src-5.2.1.tar.gz
#mkdir -p $INSTDIR/SW/ncarg/ni/src/lib/hlu
#cp $INSTDIR/SW/triangle/triangle.c $INSTDIR/SW/ncarg/ni/src/
lib/hlu
#cp $INSTDIR/SW/triangle/triangle.h $INSTDIR/SW/ncarg/ni/src/
lib/hlu
#mkdir -p $INSTDIR/SW/ncarg/hlu
cp $INSTDIR/SW/triangle/triangle.c $INSTDIR/SW/ncl_ncarg_src
-5.2.1/ni/src/lib/hlu
cp $INSTDIR/SW/triangle/triangle.h $INSTDIR/SW/ncl_ncarg_src
-5.2.1/ni/src/lib/hlu
```

Listing B.21: Compilazione openssl.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
export CC='icc'
cd $INSTDIR/SW
rm -r openssl-1.0.0
#wget http://www.openssl.org/source/openssl-1.0.0.tar.gz
cp $INSTDIR/Sources/openssl-1.0.0.tar.gz $INSTDIR/SW && tar -
xzvf $INSTDIR/SW/openssl-1.0.0.tar.gz && rm $INSTDIR/SW/
openssl-1.0.0.tar.gz || exit
cd openssl-1.0.0
echo "Config_in_atto:output_in_config.log" && \
./config --prefix=$INSTDIR -fPIC -shared > config.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto:output_in_make.log" && \
```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

```
make > make.log 2>&1 && \
#echo "Make test in atto: output in make.log" && \
#make test > make.test 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)
```

Listing B.22: Compilazione libxml.

```
#!/bin/sh
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
#INTEL_COMPILER_TOPDIR directory where Intel Compiler has
  been installed
export INTEL_COMPILER_TOPDIR="/opt/intel/Compiler/11.0/081/"
#Setting environment variables for the Intel(R) C++ Compiler
  Professional Edition for Linux
. $INTEL_COMPILER_TOPDIR/bin/intel64/iccvars_intel64.sh
#If you want to install ZLIB in the special directory then
  you should specify an installation
#prefix other than '/usr/local' using '--prefix'.
cd $INSTDIR/SW
rm -r libxml2-2.7.6
#wget ftp://xmlsoft.org/libxml2/libxml2-2.7.6.tar.gz
cp $INSTDIR/Sources/libxml2-2.7.6.tar.gz $INSTDIR/SW/ && tar
  -xzf $INSTDIR/SW/libxml2-2.7.6.tar.gz && rm $INSTDIR/SW/
  libxml2-2.7.6.tar.gz || exit
cd libxml2-2.7.6
echo "Configure_in_atto:_output_in_config.log" && \
./configure --prefix=$INSTDIR --with-zlib=$INSTDIR --with-pic
  > config.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto:_output_in_make.log" && \
make all > make.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)
```

Listing B.23: Compilazione libdap.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
export CC=icc
export CXX=icpc
export CFLAGS='-O2 -ip -no-prec-div -static '
export CXXFLAGS='-O2 -ip -no-prec-div -static '
export F77=ifort
export FC=ifort
export F90=ifort
export FFLAGS='-O2 -ip -no-prec-div -static '
export CPP='icc -E'
export CXXCPP='icpc -E'
cd $INSTDIR/SW
rm -r $INSTDIR/SW/libdap-3.9.3
#wget http://www.opendap.org/pub/source/libdap-3.9.3.tar.gz
cp $INSTDIR/Sources/libdap-3.9.3.tar.gz $INSTDIR/SW/ && tar -
  xzvf $INSTDIR/SW/libdap-3.9.3.tar.gz && rm $INSTDIR/SW/
  libdap-3.9.3.tar.gz
cd libdap-3.9.3
make clean 2> /dev/null
echo "Configure_in_atto:_output_in_configure.log" && \
./configure --prefix=$INSTDIR --with-zlib=$INSTDIR --with-pic
  > config.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto:_output_in_make.log" && \
make all > make.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make_install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione fallita"; exit 1)
```

Listing B.24: Compilazione libdapnc.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
export CC=icc
export CXX=icpc
export CFLAGS='-O2 -ip -no-prec-div -static -I/home/pierp/
  Programmi/WRF2/include '
export CXXFLAGS='-O2 -ip -no-prec-div -static -I/home/pierp/
  Programmi/WRF2/include '
export F77=ifort
export FC=ifort
export F90=ifort
export FFLAGS='-O2 -ip -no-prec-div -static '
```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

```

export CPP='icc -E'
export CXXCPP='icpc -E -I/home/pierp/Programmi/WRF2/include '
cd $INSTDIR/SW
rm -r libnc-dap-3.7.4
#wget http://www.opendap.org/pub/source/libnc-dap-3.7.4.tar.gz
cp $INSTDIR/Sources/libnc-dap-3.7.4.tar.gz $INSTDIR/SW/ &&
  tar -xzvf $INSTDIR/SW/libnc-dap-3.7.4.tar.gz && rm
  $INSTDIR/SW/libnc-dap-3.7.4.tar.gz || exit
cd libnc-dap-3.7.4/
make clean 2> /dev/null
echo "Configure_in_atto:_output_in_configure.log" && \
./configure --prefix=$INSTDIR --with-zlib=$INSTDIR --with-
pic > configure.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto:_output_in_make.log" && \
make all > make.log 2>&1
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)

```

Listing B.25: Compilazione udunits1.

```

#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
cd $INSTDIR/SW
rm -r udunits-1.12.9
cp $INSTDIR/Sources/udunits-1.12.9.tar.gz .
tar -xzvf udunits-1.12.9.tar.gz
rm udunits-1.12.9.tar.gz
cd udunits-1.12.9
cd src
cp CUSTOMIZE CUSTOMIZE.bkp
echo "FC=ifort" >> CUSTOMIZE
echo "#_CPPFLAGS=-D2fcFortran_(da_decommentare_dopo_il_
configure_senno_non_passa)" >> CUSTOMIZE
echo "CC=icc" >> CUSTOMIZE
echo "Cxx=icc" >> CUSTOMIZE
echo "LD.MATH=-lm" >> CUSTOMIZE
echo "PERL=\"\" " >> CUSTOMIZE
sed '/lib\/udunits.inc/d' configure.in > configure.new
mv configure.in configure.in.bkp
mv configure.new configure.in
cd lib
cp Makefile.in Makefile.in.bkp

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

sed -e 's/\/usr\/local\/gnu\/bin\/flex\/usr\/bin\/flex/g'
    Makefile.in > Makefile.uno
sed -e 's/udunits.h udunits.inc/udunits.h/g' Makefile.uno >
    Makefile.in
sed -e 's/udunits.dat udunits.h udunits.inc.in utlib.c/
    udunits.dat udunits.h utlib.c/g' Makefile.in > Makefile.
    uno
mv Makefile.uno Makefile.in
cd ../port
mv master.mk.in master.mk.in.bkp
sed -e 's/cp $(ETCFILE) \${@}/cp $(ETCFILE) \${D}\${@}/g'
    master.mk.in.bkp > master.mk.in
cd ../
echo "Configure_in_atto:_output_in_configure.log"
./configure --prefix=$INSTDIR --with-zlib=$INSTDIR --with-pic
    > configure.log 2>&1
cp CUSTOMIZE CUSTOMIZE.uno
sed -e 's/\/# CPPFLAGS=D2fcFortran (da decommentare dopo il
    configure senno non passa)/CPPFLAGS=D2fcFortran/g'
    CUSTOMIZE.uno > CUSTOMIZE
cd lib
mv Makefile Makefile.bkp
sed -e 's/icc/icc -fPIC -Df2cFortran/g' Makefile.bkp >
    Makefile
cd ..
export PERL=""
echo "Make_in_atto:_output_in_make.log" && \
make > make.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make.install.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)

```

Listing B.26: Compilazione proj.

```

#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
cd $INSTDIR/Sources
cp proj-4.7.0.tar.gz $INSTDIR/SW/
cd $INSTDIR/SW
rm -r proj-4.7.0
tar -xzvf proj-4.7.0.tar.gz && rm proj-4.7.0.tar.gz || exit 1
cd proj-4.7.0
export CC='icc -lirc -fPIC'
export CXX='icpc -lirc -fPIC'

```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

```

export CFLAGS='-O2 -ip -no-prec-div -static -lirc -fPIC'
export CXXFLAGS='-O2 -ip -no-prec-div -static -lirc -fPIC'
export F77='ifort -lirc -fPIC'
export FC='ifort -lirc -fPIC'
export F90='ifort -lirc -fPIC'
export FFLAGS='-O3 -ip -no-prec-div -static -lirc -fPIC'
export CPP='icc -E -lirc -fPIC'
export CXXCPP='icpc -E -lirc -fPIC'
make clean 2> /dev/null
echo "Configure_in_atto: output_in_configure.log" && \
./configure --prefix=$INSTDIR --enable-static=yes --enable-
shared=no > config.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto: output_in_make.log" && \
make all > make.log 2>&1
echo "Make_install_in_atto: output_in_make_install.log" && \
make install > make_install.log 2>&1 && \
cat make_install.log || \
( echo "Compilazione fallita"; exit 1)

```

Listing B.27: Compilazione gdal.

```

#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
cd $INSTDIR/Sources
cp gdal-1.7.2.tar.gz $INSTDIR/SW/
cd $INSTDIR/SW
rm -r gdal-1.7.2 2> /dev/null
rm -r gdal-1.6.2 2> /dev/null
tar -xzvf gdal-1.7.2.tar.gz && rm gdal-1.7.2.tar.gz || exit 1
cd gdal-1.7.2
export CC='icc -lirc'
export CXX='icpc -lirc'
export CFLAGS='-O2 -ip -no-prec-div -static -lirc'
export CXXFLAGS='-O2 -ip -no-prec-div -static -lirc'
export F77='ifort -lirc'
export FC='ifort -lirc'
export F90='ifort -lirc'
export FFLAGS='-O2 -ip -no-prec-div -static -lirc'
export CPP='icc -E -lirc'
export CXXCPP='icpc -E -lirc'
#make clean
echo "Configure_in_atto"
./configure --prefix=$INSTDIR --with-static-proj4=$INSTDIR >
config.log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto: output_in_make.log" && \

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
make all > make.log 2>&1
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make_instal.log" && \
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)
```

Listing B.28: Compilazione ncarg.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
export NCARG=$INSTDIR/SW/ncl_ncarg-5.2.1
cd $NCARG/config
make -f Makefile.ini
if [ $(./ymake -config 'pwd') ]; then
    echo "Errore_di_ymake"
    exit 1
fi
if [ -f LINUX.bkp ]; then
    :
else
    mv LINUX LINUX.bkp
fi
echo "/*
*_Description:_This_file_contains_all_the_directives_needed_
to
*_tellymake_how_to_build_NCARG/NCL_on_a_64-bit_
_Linux
*_system_using_the_INTEL_compilers.
*
*_Copy_this_file_to_the_LINUX_file_in_this_
directory
*_before_you_start_the_NCL/NCARG_build.
*/
#define_HdfDefines__DLINUX64
#define_StdDefines__DSYSV_D_POSIX_SOURCE_D_XOPEN_SOURCE_
DByteSwapped
#define_ByteSwapped
#define_Cstatic
#define_Cdynamic
#define_CppCommand_'usr/bin/cpp-traditional'
#define_CCompiler__icc
#define_FCompiler__ifort -fno-underscoring
#define_CtoFLibraries__-lm -lifcore -lifport -lcurl
#define_CcOptions__-ansi
#define_COptimizeFlag__-O2
```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

```

#define _FOptimizeFlag -O2
#define _XToolLibrary -lXt -lSM -lICE
#define _BuildShared _NO
#define _XLibrary -lXpm -lX11 -lXext" > LINUX
cd ..
cd $NCARG
echo "y
y
/home/pierp/Programmi/WRF2/SW/ncarg
/tmp
n
y
y
y
n
n
y
n
n
n
y
/usr/lib/X11/home/pierp/Programmi/WRF2/lib/opt/intel/
  Compiler/11.0/081/lib/intel64
/usr/include/X11/home/pierp/Programmi/WRF2/include/home/
  pierp/Programmi/WRF2/include/hdf/opt/intel/Compiler
  /11.0/081/include/home/pierp/Programmi/WRF2/SW
n
y
" > dummy.txt
./Configure -v < dummy.txt
echo
echo "_____”
make Info
rm dummy.txt
echo
read -p "Premere un tasto per procedere con la compilazione
  ..."
echo
echo "Make in atto: output in make-output"
echo "dare
  _____make Everything >& make-output.log"
#pidomake=$!
#echo
#echo "Pid di make ${pidomake}"
#sleep 5
#while [ $(ps -aux | grep ${pidomake}) ]; do cat make-output.
  log | grep "error\."; cat make-output.log | grep "Error
  "; cat make-output.log | grep lrx; cat make-output.log |
  grep target; sleep 5; date; done

```

Capitolo B. Codice sviluppato

Listing B.29: Compilazione netcdf.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
export CC='icc -I/home/pier/Programmi/WRF2/include -I/home/
  pier/Programmi/WRF2/include/hdf -L/home/pier/Programmi/
  WRF2/lib '
export CXX='icpc -I/home/pier/Programmi/WRF2/include -I/home/
  pier/Programmi/WRF2/include/hdf -L/home/pier/Programmi/
  WRF2/lib '
export CFLAGS='-O3 -ip -no-prec-div -static -L/home/pier/
  Programmi/WRF2/lib -I/home/pier/Programmi/WRF2/include/
  hdf -m64'
export CXXFLAGS='-O3 -ip -no-prec-div -static -L/home/pier/
  Programmi/WRF2/lib -I/home/pier/Programmi/WRF2/include/
  hdf -m64'
export F77='ifort -I/home/pier/Programmi/WRF2/include -I/home
  /pier/Programmi/WRF2/include/hdf -L/home/pier/Programmi/
  WRF2/lib '
export FC='ifort -I/home/pier/Programmi/WRF2/include -I/home/
  pier/Programmi/WRF2/include/hdf -L/home/pier/Programmi/
  WRF2/lib '
export F90='ifort -I/home/pier/Programmi/WRF2/include -I/home
  /pier/Programmi/WRF2/include/hdf -L/home/pier/Programmi/
  WRF2/lib '
export FFLAGS='-O3 -ip -no-prec-div -static -L/home/pier/
  Programmi/WRF2/lib -I/home/pier/Programmi/WRF2/include/
  hdf -m64'
export CPP='icc -E'
export CXXCPP='icpc -E'
cd $INSTDIR/SW
rm -r $INSTDIR/SW/netcdf-4.1.1 2> /dev/null
cp $INSTDIR/Sources/netcdf-4.1.1.tar.gz .
tar -xzvf netcdf-4.1.1.tar.gz && rm netcdf-4.1.1.tar.gz ||
  exit
cd netcdf-4.1.1
# Make clean dopo lo scompattamento cancella la
  documentazione e il make fallisce sulla sezione manuali
# bug di netcdf 4.1.1
# non dare make clean ma riscompattare il tutto se necessario
#make clean
echo "Configure_in_atto:output_in_configure.log" && \
#./configure --with-hdf5=$INSTDIR --with-curl=$INSTDIR --
  with-szlib=$INSTDIR --with-zlib=$INSTDIR --prefix=
  $INSTDIR --disable-f90 --enable-netcdf-4 > configure.log
2>&1 && \
```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

```
./configure --with-hdf5=$INSTDIR --with-curl=$INSTDIR --
with-szlib=$INSTDIR --with-zlib=$INSTDIR --prefix=
$INSTDIR --disable-f90 --disable-netcdf-4 > configure.
log 2>&1 && \
echo "Make_in_atto:_output_in_make.log" && \
make all > make.log 2>&1 && \
echo "Make_install_in_atto:_output_in_make.install.log" && \
# i nodi del cluster non risolvono quindi il check fallisce
#make check
make install > make.install.log 2>&1 && \
cat make.install.log || \
(echo "Compilazione_fallita"; exit 1)
```

B.4.2 Compilazione WRF

Listing B.30: Compilazione WRF.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
export NETCDF=$INSTDIR
export JASPERLIB=$INSTDIR/lib
export JASPERINC=$INSTDIR/include
export LD_LIBRARY_PATH="$INSTDIR/lib : ${LD_LIBRARY_PATH}"
export INCLUDE="$INSTDIR/include : /usr/include : ${INCLUDE}"
export LIB_EXTERNAL="-lnetcdf -lcurl -lhdf5 -hl -lhdf5 -"
# To enable large file
# support in NetCDF, set the environment variable
#WRFIO_NCD_LARGE_FILE_SUPPORT to 1
export WRFIO_NCD_LARGE_FILE_SUPPORT=1
export DMFC=$INSTDIR/bin/mpif90
export DMCC=$INSTDIR/bin/mpicc
cd $INSTDIR
cp $INSTDIR/Sources/WRFV3.2.1.TAR.gz ./
rm -r WRFV3
tar -xzvf WRFV3.2.1.TAR.gz
rm WRFV3.2.1.TAR.gz
cd WRFV3
cd ./phys
if [ -f module_mp_thompson.F.bkp ]; then
:
else
mv module_mp_thompson.F module_mp_thompson.F.bkp
fi
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

cp $INSTDIR/Sources/module_mp_thompson.F.fixed ./
  module_mp_thompson.F
cd ..
./clean -a
# 12. Linux x86_64 i486 i586 i686, ifort compiler with icc
  (dm+sm)
# 1 -> basic
echo "12_\n_1_\n" > dummy.ans
./configure --prefix=$INSTDIR < dummy.ans
mv configure.wrf configure.wrf.bkp
sed -e 's/mpif90 -f90=$(SFC)/\home/\pierp/\Programmi/\WRF2/\
bin/\mpif90 -I\usr\include -I\home/\pier/\Programmi/\
WRF2\include -I\home/\pier/\Programmi/\WRF2\include\
hdf -lnetcdf -lcurl -lhdf5_hl -lhdf5/g' configure.wrf.bkp
  > configure.wrf
sed -e 's/mpicc -cc=$(SCC) -DMPI2_SUPPORT -
DMPI2_THREAD_SUPPORT/\home/\pierp/\Programmi/\WRF2/\bin
/\mpicc -DMPI2_SUPPORT -DMPI2_THREAD_SUPPORT/g' configure
.wrf > configure.wrf.1
sed -e 's/$(WRF_SRC_ROOT_DIR)\external\io_netcdf\
libwrfio_nf.a -L\home/\pierp/\Programmi/\WRF2\lib /$(
WRF_SRC_ROOT_DIR)\external\io_netcdf\libwrfio_nf.a -L
\home/\pierp/\Programmi/\WRF2\lib -lcurl -lnetcdf -
lhdf5_hl -lhdf5 /g' configure.wrf.1 > configure.wrf
sed -e 's/ifort/ifort -lcurl -lhdf5_hl -lhdf5 /g' configure.
wrf > configure.wrf.1
sed -e "$(grep -n ^FCOPTIM configure.wrf | cut -d ':' -f1) c\
FCOPTIM=_O3_-ffast-math_-ftree-vectorize_-ftree-loop-
linear_-funroll-loops" < configure.wrf.1 > configure.wrf
#mv configure.wrf.1 configure.wrf
rm dummy.ans
echo
echo "Alterare il Registry"
echo
if [ -f $WRFDIR/WRFV3/Registry/Registry.EM.bkp ]; then
:
else
mv $WRFDIR/WRFV3/Registry/Registry.EM $WRFDIR/WRFV3/
Registry/Registry.EM.bkp
cp $WRFDIR/Registry.EM.pier $WRFDIR/WRFV3/Registry/
Registry.EM
fi
./compile em_real > compile.log 2>&1
#while [ 1 ]; do cat compile.log | grep "error\:"; cat
compile.log | grep "Error "; cat compile.log | grep
undefined ; cat compile.log | grep target; sleep 5; date;
done

```

B.4. Script di compilazione ed installazione di WRF-ARW 3.2.1

B.4.3 Compilazione WPS

Listing B.31: Compilazione WPS.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
cd $INSTDIR
#wget http://www.mmm.ucar.edu/wrf/src/WPSV3.2.TAR.gz
rm -r ./WPS 2> /dev/null
cp $INSTDIR/Sources/WPSV3.2.1.TAR.gz $INSTDIR && tar -xzf
WPSV3.2.1.TAR.gz && rm WPSV3.2.1.TAR.gz
cd $INSTDIR/WPS
export JASPERLIB=$INSTDIR/lib
export JASPERINC=$INSTDIR/include/jasper
export NETCDF=$INSTDIR
./clean -a
# 4. PC Linux x86_64, Intel compiler DM parallel
echo "4" > dummy.wps
./configure < dummy.wps > configure.log 2>&1
rm dummy.wps
cp configure.wps configure.wps.bkp
sed -e 's:-L/data3a/mp/gill/WPSLIBS/local/lib:-L/data3a/mp/
gill/WPSLIBS/local/lib -L/home/pierp/Programmi/WRF2/lib
-lcurl -lnetcdf:g' < configure.wps > configure.wps.1
sed -e 's:-L/usr/X11R6/lib -lX11:-L/home/pierp/Programmi/WRF2
/lib/X11 -lX11 -lpng -lz -lcurl -lnetcdf:g' < configure.
wps.1 > configure.wps
LN=$(grep -n NCARG_LIBS2 configure.wps | cut -d ':' -f1)
sed -e '$LN's:.*:NCARG_LIBS2 = -L/usr/lib -L/home/pierp/
Programmi/WRF2/lib : ' < configure.wps > configure.wps
.1
sed -e 's:mpif90 -f90=ifort:/home/pierp/Programmi/WRF2/bin/
mpif90 -I/usr/include -I/home/pierp/Programmi/WRF2/
include -I/home/pierp/Programmi/WRF2/include/jasper -
lcurl:g' < configure.wps.1 > configure.wps
sed -e 's:ifort:ifort -lf2c -I/home/pierp/Programmi/WRF2/
include -I/home/pierp/Programmi/WRF2/include/jasper -L/
home/pierp/Programmi/WRF2/lib/X11 -L/usr/lib :g' <
configure.wps > configure.wps.1
sed -e 's:mpicc -cc=icc:/home/pierp/Programmi/WRF2/bin/mpicc
-I/usr/include -I/home/pierp/Programmi/WRF2/include -I/
home/pierp/Programmi/WRF2/include/jasper:g' < configure.
wps.1 > configure.wps
sed -e 's:gcc:icc -I/usr/include -I/home/pierp/Programmi/WRF2
/include -I/home/pierp/Programmi/WRF2/include/jasper:g' <
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

    configure.wps > configure.wps.1
LN=$(grep -n WRF_DIR configure.wps.1 | grep -v "(" | cut -d
':;' -f1)
sed -e '$LN's:.*:WRF_DIR = /home/pierp/Programmi/WRF2/WRFV3
:' < configure.wps.1 > configure.wps
sed -e 's:-L$(NETCDF)/lib -lnetcdf:-L$(NETCDF)/lib -lnetcdf
-lcurl:g' < configure.wps > configure.wps.1
#sed -e 's:-D.UNDERSCORE::g' < configure.wps.1 > configure.
wps
mv configure.wps.1 configure.wps
cd $INSTDIR/lib
ln -sf ../SW/ncarg/lib/* .
cd $INSTDIR/bin
ln -sf ../SW/ncarg/bin/* .
cd $INSTDIR/include
ln -sf ../SW/ncarg/include/* .
cd $INSTDIR/WPS/util/src
if [ -f plotfmt.F.bkp ]; then
:
else
    mv plotfmt.F plotfmt.F.bkp
fi
sed -e 's/integer, external :: signal/! integer, external
:: signal/g' < plotfmt.F.bkp > plotfmt.F
sed -e 's/iii = signal(2, graceful_stop, -1)/! iii = signal
(2, graceful_stop, -1)/g' < plotfmt.F > plotfmt.F.1
mv plotfmt.F.1 plotfmt.F
#diff plotfmt.F.bkp plotfmt.F
cd $INSTDIR/WPS
echo
echo "Output_in_compile.log"
echo
./compile > compile.log 2>&1

```

B.5 Esecuzione di WRF

B.5.1 Fase di pre processamento

Listing B.32: Script di pre processamento.

```

#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
export OMP_NUM_THREADS=8

```

B.5. Esecuzione di WRF

```
#####  
# WRFDIR e' inizializzata in inizia.sh  
#####  
if [ ! $WRFDIR ]; then  
    echo "Inizializzare il file inizia.sh"  
    exit  
fi  
ACTDIR=$PWD  
UTILSDIR=$WRFDIR/ utils  
WPSDIR=$WRFDIR/WPS  
MPI=$WRFDIR/bin  
cd ..  
SUBCASENAME=$(basename $(pwd))  
cd $ACTDIR  
echo "SUBCASENAME=" $SUBCASENAME  
MONTH=$(echo $SUBCASENAME | cut -d '-' -f 1)  
echo "Mese:_" $MONTH  
YYYY=$(echo $SUBCASENAME | cut -d '-' -f 2)  
echo "Anno:_" $YYYY  
METEODATADIR=../meteodata  
ls $METEODATADIR  
#jump=""  
#if [ $jump ]; then  
echo  
echo "Pulisco tutto"  
echo  
$UTILSDIR/pulisci_wps.sh  
#####  
echo  
echo "Creo link a Vtable"  
echo  
#####  
ln -sf $WPSDIR/ungrib/Variable_Tables/Vtable.GFS Vtable  
if [ -e Vtable ]; then  
    echo "Link creato"  
    ls -al Vtable  
else  
    echo "Errore di creazione del link Vtable"  
    exit 1  
fi  
if [ -f namelist.wps ]; then  
:  
else  
    echo "Il file namelist.wps non esiste ... crearlo prima"  
    exit  
fi  
#####  
echo  
echo "Creo link a dati meteo"  
echo  
#####
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
$WPSDIR/link_grib.csh $METEODATADIR/fnl_
if [ "$(ls _GRIBFILE*)" ]; then
    echo "Link_creati"
    ls -al GRIBFILE*
else
    echo "Errore:_link_GRIBFILE_non_creati"
    exit 1
fi
#####
echo
echo "Lancio_ungrib"
echo
#####
rm -f ungrib_data.log
exec $MPI/mpirun $WPSDIR/ungrib.exe >& ungrib_data.log &
sleep 2
tail -f ungrib_data.log &
pidotail=$!
while [ "$(pidof_ungrib.exe)" ]
do
    sleep 5
done
kill -9 $pidotail
if [ "$(ls _FILE:*)" ]; then
    echo "File_FILE:_creati"
    ls -al FILE:*
else
    echo "Errore_in_ungrib"
    echo "File_FILE:_non_creati"
    exit 1
fi
if [ "$(cat_ungrib.log_|grep_ERROR)" ]; then
    echo "Errore_di_ungrib"
    echo "_____”
    cat ungrib.log | grep ERROR
    echo "_____”
fi
#####
echo
echo "Lancio_geogrid"
echo
#####
if [ -d $ACTDIR/geogrid ]; then
    :
else
    ln -s $WPSDIR/geogrid .
    ln -s geogrid/geogrid.exe .
fi
exec $MPI/mpirun ./geogrid.exe >& geogrid.log &
tail -f geogrid.log &
pidotail=$!
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

while [ "$(pidof geogrid.exe)" ]
do
    sleep 5
done
kill -9 $pidotail
#if [ -h geogrid ]; then
#   rm geogrid
#fi
if [ "$(ls geo_em.d0*.nc)" ]; then
:
else
    echo "Errore_in_geogrid"
fi
if [ "$(cat geogrid.log | grep ERROR)" ]; then
    echo "Errore_di_geogrid"
    echo "_____ "
    cat geogrid.log | grep ERROR
    echo "_____ "
fi
#####
echo
echo "Lancio_metgrid"
echo
#####
rm -f metgrid.log
if [ -d $ACTDIR/metgrid ]; then
:
else
    ln -s $WPSDIR/metgrid .
    ln -s metgrid/metgrid.exe .
fi
sleep 5
exec $MPI/mpirun ./metgrid.exe >& metgrid.log &
sleep 2
tail -f metgrid.log &
pidotail=$!
while [ "$(pidof metgrid.exe)" ]
do
    sleep 5
done
kill -9 $pidotail
#if [ -h metgrid ]; then
#   rm metgrid
#fi
if [ "$(ls met*)" ]; then
:
else
    echo "Errore_in_metgrid"
    echo "file_met_non_creati"
    exit 1
fi

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
if [ "$(cat metgrid.log | grep ERROR)" ]; then
    echo "Errore di metgrid"
    echo "_____ "
    cat metgrid.log | grep ERROR
    echo "_____ "
fi
cd $ACTDIR
```

B.5.2 Fase di processamento

Listing B.33: Script di processamento.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
#####
# WRFDIR e' inizializzata in inizia.sh
#####
if [ ! $WRFDIR ]; then
    echo "Inizializzare il file inizia.sh"
    exit
fi
UTILSDIR=$WRFDIR/ utils
ACTDIR=$PWD
WPSDIR=" ../WPS"
MPI=$WRFDIR/bin
EMDIR=$WRFDIR/WRFV3/test/em_real
#####
echo
echo "Pulisco tutto"
echo
#####
$UTILSDIR/pulisci_EM.sh
ln -sf $EMDIR/*.TBL .
ln -sf $EMDIR/*_DATA .
ln -sf $EMDIR/*.tbl .
ln -sf $EMDIR/*.formatted .
ln -sf $EMDIR/wrf.exe .
ln -sf $EMDIR/real.exe .
#####
echo
echo "Creo i link ai file met_"
echo
#####
ln -sf $WPSDIR/met_em.* .
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

sleep 1
if [ "$(ls _met_*)" ]; then
:
else
echo "Errore: _link_ai_file_met_non_creati"
exit 1
fi
echo
ls -al met_*
echo
#####
echo
echo "Lancio_real.exe"
echo
#####
export OMP_NUM_THREADS=8
rm -f rsl_*
exec $MPI/mpirun $EMDIR/real.exe &
sleep 5
tail -f rsl.out.0000 &
pidotail=$!
while [ "$(pidof_real.exe)" ]
do
sleep 5
done
kill -9 $pidotail
if [ "$(ls _wrfinput_*)" ]; then
if [ "$(ls _wrfbdy_*)" ]; then
#if [ "$(ls wrffdda_*)" ]; then
# :
#else
# echo "Errore: file wrffdda non creato"
# exit 1
#fi
:
else
echo "Errore: _file_wrfbdy_non_creato"
cat rsl.error.*
exit 1
fi
else
echo "Errore: _file_input_non_creato"
cat rsl.error.*
exit 1
fi
for f in $(ls -l rsl_*); do
if [ "$(cat_$f_|_grep_error)" ]; then
echo "Errore_in_real.exe..._controllare_rsl.error"
cat $f | grep error
fi

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
done
echo
#ls -al wrffdda_*
ls -al wrfinput_*
ls -al wrfbdy_*
echo
echo
echo "Lancia_wrf.exe"
echo
echo "/usr/bin/mpirun -np 2 -mca_btl_tcp_if_include eth1 -v -
machinefile ./wrf.machine ./wrf.exe > out.log"
echo
echo
```

Listing B.34: Script di invio SMS di allerta.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
# sms e' uno script per l'invio di messaggi di testo tramite
# provider telefonico
# la prima riga sopra definisce l'interprete dei comandi da
# utilizzare. In questo caso sh
MINARGS=2
# Variabile contenente il numero minimo di argomenti passati
# dalla riga di comando. Nome destinatario e testo sms
ELENCO="~/elenco.txt"
# Nome del file contenente i parametri nome voip, password ed
# i nominativi con relativi numeri di telefono
numsms=1
# Inizializzazione variabile contatore del numero di sms da
# inviare secondo la lunghezza del testo
maxtxt=160
# Lunghezza max messaggio su voipstunt compreso l'account
# name
declare -a sms
# Dichiarazione di array di caratteri. Ciascun elemento sara'
# un pezzo di sms lungo massimo
# maxtxt caratteri in cui il messaggio originale verra'
# spezzato
# Funzione per la creazione dei messaggi aventi lunghezza max
# maxcar caratteri
creasms () {
# inizializzazione variabile lunghezza messaggio
unset lenmess
# inizializzazione contatore numero spezzoni messaggi
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

i=1
# inizializzazione variabile temporanea parte di testo sms
unset newsms
# inizializzazione variabile temporanea parte di testo sms
unset oldsms
# inizializzazione variabile temporanea parola di testo sms
unset parola
# valutazione della lunghezza massima di caratteri maxcar
# del messaggio da inviare. Dato da $maxtxt caratteri
# ossia 160 meno la lunghezza del nome di registrazione
# utente voip ${#voipname}
maxcar='expr $maxtxt - ${#voipname}'
# Inizio della scansione del messaggio che Ã stato
# memorizzato nella variabile $testo
# Il ciclo for analizza ciascuna parola nella stringa $( echo
# $testo )
for parola in $( echo $testo );
do
# Memorizzo il messaggio parziale in $oldsms (inizialmente
# vuota)
oldsms=$newsms
# Creo il nuovo messaggio parziale aggiungendo una parola ed
# uno spazio di separazione
newsms=$oldsms$parola"_"
# Valuto la lunghezza del nuovo messaggio ottenuto
lenmess=${#newsms}
# Verifico che la lunghezza del messaggio non superi il
# massimo $maxcar
if [ "$lenmess" -gt "$maxcar" ]; then
# Se si allora newsms Ã troppo lungo. Memorizzo oldsms che
# era ok nel vettore dei messaggi
sms=( "${sms[@]}" "$oldsms" )
# Riaggiorno la lunghezza del messaggio (non necessario)
lenmess=${#oldsms}
# Costruisco il nuovo spezzone di messaggio memorizzando in
# newsms la parola elaborata seguita
# da uno spazio separatore
newsms=$parola"_"
# Incremento il numero di messaggi da inviare
i=$((i+1))
fi
done
# Memorizzo l'ultima parte di messaggio (o l'unico messaggio
# se nn eccede maxcar)
sms=( "${sms[@]}" "$newsms" )
# Il contatore i contiene il numero totale di sms da inviare
numsms=$i
# No comment
if [ "$numsms" -gt 1 ]; then
echo
echo

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

echo "SMS_lungo!_Eccede_il_max_di_$maxcar_caratteri"
echo "L'SMS_verra'_suddiviso_in_$numsms_parti"
echo
echo
fi
# Stampa a schermo dei messaggi da inviare
for (( i=0 ; i<numsms;i++))
do
echo
echo "SMS_n._$(( $i+1)):"
echo "${sms[ $i]}"
echo
done
return 0
}
# Funzione invio del messaggio
inviasms () {
# Inizializzazione contatore messaggi
unset i
# Ciclo for per l'invio dei messaggi
for (( i=1;i<=numsms;i++))
do
echo "Sto_inviando_la_parte_$i"
echo "Testo:"
testosms="${sms[ $i -1]}"
echo "$testosms"
echo "Lunghezza_testo:_${#testosms}"
echo
# Utilizzo del browser links per invio messaggio. In modalita
' dump links spedisce il messaggio ed esce
#links -dump "https://myaccount.voipstunt.com/clx/sendsms.
php?username=$voipname&password=$password&from=
$voipnumber&to=$numero&text=$testosms"
links -dump "https://www.voipstunt.com/myaccount/sendsms.
php?username=$voipname&password=$password&from=
$voipnumber&to=$numero&text=$testosms"
# Attesa report messaggio (variabile a piacere)
sleep 8
done
# Scrittura del messaggio inviato in file di log
if [ -d ~/.sms ]; then
:
#nn fare nulla
else
mkdir ~/.sms
fi
echo "Giorno_e_ora:_$_(date)" >> ~/.sms/log.sms
echo "Nome:_$nome" >> ~/.sms/log.sms
echo "Testo:" >> ~/.sms/log.sms
echo "$testo" >> ~/.sms/log.sms

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

echo "_____ " >> ~/.sms/log.
    sms
return 0
}
# _____ INIZIO PROGRAMMA
# _____
# Controllo esistenza file elenco
if [ -f ~/elenco.txt ]; then
:
else
echo
echo "File_di_elenco_nominativi_${ELENCO_non_trovato}"
echo
echo "Creo_template_file_nominativi"
echo
touch ~/elenco.txt
echo "account_nome_account_voipstunt" >> ~/elenco.txt
echo "password_passord_voipstunt" >> ~/elenco.txt
echo "voip_numero_tel_registrato_voipstunt" >> ~/elenco.txt
echo "pippo_+39328xxxxxxx" >> ~/elenco.txt
echo "pluto_+39340xxxxxxx" >> ~/elenco.txt
exit 1
fi
# Controllo del numero di argomenti passati
if [ $# -lt $MINARGS ]; then
echo
echo "Fornire_Nome_e_Testo_SMS"
echo
exit 1
fi
# Parsing dei primi 2 argomenti passati
# Memorizzazione del testo da inviare ossia del secondo
  parametro passato dalla
# riga di comando nella variabile $testo
testo="$2"
testoorig=$testo
# Memorizzazione del primo parametro passato dalla riga di
  comando, ossia il destinatario
dest="$1"
# Valutazione della lunghezza di caratteri del messaggio
numcar=${#testo}
# Ricerca password, nome e numero di collegamento
if [ "$(_cat ~/elenco.txt | grep "account ")" = "" ]; then
echo "Errore_Account_inesistente"
exit 1
fi
set $( cat ~/elenco.txt | grep "account_" )
# Memorizzazione del nome di account voip
voipname="$2"
if [ "$(_cat ~/elenco.txt | grep "password ")" = "" ]; then
echo "Errore_Passwordvoip_inesistente"

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

    exit 1
fi
set $( cat ~/elenco.txt | grep "password_" )
# Memorizzazione della password di account voip
password="$2"
if [ "$(_cat~/elenco.txt|_grep"voip "_)" = "" ]; then
    echo "Errore_Numerovoip_inesistente"
    exit 1
fi
set $( cat ~/elenco.txt | grep "voip_" )
# Memorizzazione del numero di addebito voip
voipnumber="$2"
# Ricerca nome e numero destinatario nell'elenco
if [ "$(_cat~/elenco.txt|_grep_$dest)" = "" ]; then
    echo "Errore_Destinatarior_$dest_inesistente"
    exit 1
fi
set $( cat ~/elenco.txt | grep $dest )
nome="$1"
if [ "$nome" != "$dest" ]; then
    echo "Errore_Destinatarior_$dest_inesistente_o_ripetuto"
    exit 1
fi
numero="$2"
# Controllo della lunghezza del messaggio e suddivisione in +
# sms
creasms
# Riepilogo parametri ed invio eventuale del messaggio sms
echo
echo "Destinatario_SMS:_____ $nome"
echo "Numero_destinatario:_____ $numero"
echo "Numero_SMS_da_inviare: ____ $numsms"
echo "Testo_messaggio: _ $testo"
echo
echo
echo -e "Invio_sms?\c"
esci=0
while [ "$esci" -lt 1 ]
do
    read x
    case "$x" in
        s | S | Si | SI | si )
            echo
            inviasms
            esci=1
            echo;;
        n | N | No | NO | no )
            echo
            echo "Messaggio annullato"
            esci=1
            echo;;
    esac
done

```

B.5. Esecuzione di WRF

```
*)
  echo
  echo " si_lo_nno_per_favore"
  echo ;;
esac
done
exit 0
```

B.5.3 Fase di post processamento

Listing B.35: Programma prima fase di post processamento.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
#
#export MAXPET=72      # Numero max petali nei CWD
export MINPET=12      # Numero min petali nei CWD
#
#####
export UTILSDIR=/mnt/WRFiFort/utils
if [ "$WORKDIR" == "" ]; then
  echo
  echo " Definire_la_WORKDIR"
  echo
  exit 1
fi
if [ "$CASEDIR" == "" ]; then
  echo
  echo " Definire_la_CASEDIR"
  echo
  exit 1
fi
if [ -d $CASEDIR ]; then
  :
else
  echo
  echo " La_$CASEDIR_non_esiste"
  echo
  exit 1
fi
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
export CASENAME=$(basename ${CASEDIR})
if [ "$SUBCASEDIR" = "" ]; then
    echo
    echo "Definire la SUBCASEDIR"
    echo
    exit 1
fi
export SUBCASENAME=$(basename ${SUBCASEDIR})
if [ -d $SUBCASEDIR ]; then
    echo
    echo "Si eseguirà il post-processing di $CASENAME_
    $SUBCASENAME"
    echo
else
    echo
    echo "La $SUBCASEDIR non esiste"
    echo
    exit 1
fi
if [ -f lista_AV.txt ]; then
    :
else
    echo
    echo "Definire il file lista_AV.txt con l'elenco degli
    anemometri virtuali"
    echo
    exit 1
fi
if [ -f lista_SL.txt ]; then
    :
else
    echo
    echo "Definire il file lista_SL.txt con l'elenco delle
    sigma level"
    echo
    exit 1
fi
export YYYY=$(echo ${SUBCASENAME} | cut -d '-' -f 5 | cut -d
'_' -f1)
export MM=$(echo ${SUBCASENAME} | cut -d '-' -f 4)
export dom=0$(echo ${SUBCASENAME} | cut -d '-' -f 1 | cut -d
'd' -f 1)
echo
echo "#####\A
```

B.5. Esecuzione di WRF

```
#####
echo "Anno_${YYYY}_mese_${MM}_dominio_${dom}_caso_${CASENAME}
_sottocaso_${SUBCASENAME}"
echo "#####\n#####"
echo
clean_post.sh
case $MM in
  Jan)
    export IMM=01;;
  Feb)
    export IMM=02;;
  Mar)
    export IMM=03;;
  Apr)
    export IMM=04;;
  May)
    export IMM=05;;
  Jun)
    export IMM=06;;
  Jul)
    export IMM=07;;
  Aug)
    export IMM=08;;
  Sep)
    export IMM=09;;
  Oct)
    export IMM=10;;
  Nov)
    export IMM=11;;
  Dec)
    export IMM=12;;
  * )
    echo
    echo "Mese_non_individuato"
    echo
    exit 1
    ;;
esac
for f in $(ls $SUBCASEDIR/out/wrfout_d${dom}-${YYYY}-${IMM}*)
do
  ln -s $f .
done
for f in $(ls $UTILSDIR/src/script_ncl/*.ncl)
do
  ln -s $f .
done
#
## Preparazione dei file GLW PBLH SWDOWN T0 TK U V BINARI
#
WISH-WRF-ANAL-0.0.1.wrap $CASENAME $SUBCASENAME
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

echo
echo "ATTENDERE: _Salvataggio_dei_file_binari_in_corso"
echo
if [ -d $SUBCASEDIR/out/UV ]; then
    mv *_bin.* $SUBCASEDIR/out/UV && ln -s $SUBCASEDIR/out/
        UV/*_bin.* .
else
    mkdir $SUBCASEDIR/out/UV
    mv *_bin.* $SUBCASEDIR/out/UV && ln -s $SUBCASEDIR/out/
        UV/*_bin.* .
fi
echo
echo "Fatto!"
echo
echo
echo "Si_puo_lanciare_ppp_2.2.sh"
echo

```

Listing B.36: Script per pulizia risultati di post.

```

#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
# script che pulisce i link di post processing
for f in $(ls *.AV)
do
    if [ -h $f ]; then
        rm -f $f
    fi
done
for f in $(ls *_bin*)
do
    clk=$(echo $f | cut -d '.' -f2)
    if [ -h $clk ]; then
        rm -f $clk
    fi
    if [ -h $f ]; then
        rm -f $f
    fi
done
for f in $(ls wrfout*)
do
    if [ -h $f ]; then
        rm -f $f
    fi
done

```

B.5. Esecuzione di WRF

```
for f in $(ls *.cwg.txt)
do
    if [ -h $f ]; then
        rm -f $f
    fi
done
for f in $(ls *.cwg)
do
    if [ -h $f ]; then
        rm -f $f
    fi
done
```

Listing B.37: Programma seconda fase di post processamento.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
#
#export MAXPET=72      # Numero max petali nei CWD
export MINPET=12      # Numero min petali nei CWD
#
#####
if [ "$WORKDIR" == "" ]; then
    echo
    echo " Definire la WORKDIR"
    echo
    exit 1

fi
if [ "$CASEDIR" == "" ]; then
    echo
    echo " Definire la CASEDIR"
    echo
    exit 1

fi
if [ -d $CASEDIR ]; then
    :

else
    echo
    echo " La $CASEDIR non esiste"
    echo
    exit 1
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
fi
export CASENAME=$(basename ${CASEDIR})
if [ "$SUBCASEDIR" = "" ]; then
    echo
    echo " Definire_la_SUBCASEDIR"
    echo
    exit 1

fi
export SUBCASENAME=$(basename ${SUBCASEDIR})
if [ -d $SUBCASEDIR ]; then
    echo
    echo " Si_eseguirà_il_post_processing_di_${CASENAME}_
    $SUBCASENAME"
    echo

else
    echo
    echo " La_${SUBCASEDIR}_non_esiste"
    echo
    exit 1

fi
if [ -f lista_AV.txt ]; then
    :

else
    echo
    echo " Definire_il_file_lista_AV.txt_con_l'elenco_degli_
    anemometri_virtuali"
    echo
    exit 1

fi
if [ -f lista_SL.txt ]; then
    :

else
    echo
    echo " Definire_il_file_lista_SL.txt_con_l'elenco_delle_
    sigma_level"
    echo
    exit 1

fi
if [ -f lista_AV-txt.txt ]; then
    :

else
    echo
    echo " Definire_il_file_lista_AV-txt.txt_con_l'elenco"
```

B.5. Esecuzione di WRF

```
echo "degli anemometri virtuali da trasformare in txt"
echo "per Windog"
echo
exit 1

fi
export YYYY=$(echo ${SUBCASENAME} | cut -d '-' -f 5 | cut -d
'_' -f 1)
export MM=$(echo ${SUBCASENAME} | cut -d '-' -f 4)
export dom=0$(echo ${SUBCASENAME} | cut -d '-' -f 1 | cut -d
'd' -f 1)
echo
echo "#####"
echo "Anno_${YYYY}_mese_${MM}_dominio_${dom}_caso_${CASENAME}
_sottocaso_${SUBCASENAME}"
echo "#####"
echo
case $MM in
  Jan)
    export iMM=01;;
  Feb)
    export iMM=02;;
  Mar)
    export iMM=03;;
  Apr)
    export iMM=04;;
  May)
    export iMM=05;;
  Jun)
    export iMM=06;;
  Jul)
    export iMM=07;;
  Aug)
    export iMM=08;;
  Sep)
    export iMM=09;;
  Oct)
    export iMM=10;;
  Nov)
    export iMM=11;;
  Dec)
    export iMM=12;;
  * )
    echo
    echo "Mese non individuato"
    echo
    exit 1
    ;;
esac
for f in $(ls $SUBCASEDIR/out/wrfout.d${dom}-${YYYY}-${iMM}*)
do
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

ln -s $f .
done
ln -sf $SUBCASEDIR/init/*.gridinfo.ln ./gridinfo.ln
ln -sf $SUBCASEDIR/init/*.ZISA ./ZISA.tmp
ln -sf $SUBCASEDIR/init/template.time.ln .
ln -sf $SUBCASEDIR/init/*.nomiclock.ln ./files.ln
ln -sf $SUBCASEDIR/info/*.SLS.info ./SLS.tmp
ln -s $SUBCASEDIR/out/UV/*_bin* .
ln -sf $SUBCASEDIR/init/linknomi.tmp .
old_IFS=$IFS
IFS=$'\n'
for f in $(cat linknomi.tmp)
do
    org=$(echo $f | cut -d ' ' -f1)
    clk=$(echo $f | cut -d ' ' -f2)
    ln -sf $SUBCASEDIR/out/$org $clk
done
IFS=$old_IFS
echo
echo "#####"
echo " Estrazione degli anemometri virtuali elencati nel file _"
echo " lista_AV.txt:"
cat lista_AV.txt
echo
echo " con i sigma level elencati in lista_SL.txt:"
cat lista_SL.txt
echo "#####"
sleep 5
setup_single_virtual_anem -0.0.1.exe
rm -f *_bin.*
cp *.AV $SUBCASEDIR/anem/ && rm *.AV && ln -s $SUBCASEDIR/
anem/*.AV .
echo
echo "#####"
echo " Creazione dei file AV_testo da usare con Windowgrapher"
echo "#####"
echo
cd $SUBCASEDIR
if [ -d $CASEDIR ]; then
:
else
    echo "La {$CASEDIR} non esiste"
    echo "Sono in {$PWD}"
    exit 1
fi
cd $WORKDIR
old_IFS=$IFS
IFS=$'\n'
echo
echo "#####"

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

echo " Creazione file AV per Windographer"
echo "#####"
echo
for f in $(cat lista_AV-txt.txt)
do
    echo
    echo " Trasformazione file $f.AV in formato Windographer"
    echo
    AV2ascii.sh $f

done
IFS=$old_IFS
cd $WORKDIR
echo
echo "#####"
echo " Estrazione dei file CWD binari"
echo "#####"
echo
rm -f *.cwd
for f in $(cat lista_AV.txt)
do
    setup_single_cwd -0.0.2.exe $MINPET $f
    #setup_single_cwd -0.0.2.exe $MAXPET $f
done
for f in $(ls *.cwd)
do
    mv $f ${YYYY}-${MM}-${f}

done
mv *.cwd $SUBCASEDIR/cwd
find $SUBCASEDIR/cwd -type f -iname \*.cwd | while read f; do
    ln -s "$f" .; done
# Adeguare la lista dei cwd da trasformare in ascii e le rose
# dei venti
for f in $(ls *.cwd)
do
    CWD2ascii.sh $f

done
mkdir $SUBCASEDIR/cwd/txt 2> /dev/null
mv *.cwd.txt $SUBCASEDIR/cwd/txt/
find $SUBCASEDIR/cwd/txt -type f -iname \*.cwd.txt | while
    read f; do ln -s "$f" .; done
echo
echo "#####"
echo " Estrazione delle rose dei venti dai file cwd in formato
    _testo"
echo "#####"
echo
# Adeguare la lista dei cwd da trasformare in rose dei venti
for f in $(ls *.cwd.txt)

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
do
    draw_rose.sh $f

done
mkdir $SUBCASEDIR/cwd/rose 2> /dev/null
mv rosa_*.eps $SUBCASEDIR/cwd/rose
mv *.rsmp_12 $SUBCASEDIR/cwd/txt
```

Listing B.38: Script wrapper per WISH-WRF-ANAL-0.0.1.tcl.

```
#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo
# A.A.2010 X Ciclo
# Dipartimento di Energetica
# Universita Politecnica delle Marche
#####
export realDIR=$PWD
export NOMEEXEC=$(basename $0)
export NOMEEXEC=${NOMEEXEC%\.*}.tcl
exec $realDIR/Utils/$NOMEEXEC $1 $2
```

Listing B.39: Script tcl-tk di post processamento.

```
#!/usr/bin/wish -f
#####
# Pierpaolo Garofalo #
# X Ciclo #
# Dipartimento di Energetica #
# Universita Politecnica delle Marche #
#####
# Programma tcl-tk di interfaccia a WRF OUTPUT ANALYZER #
# Versione 0.0.0 #
# Data 10.07.2011 #
# #
# Usa gli script: #
# #
# Produce gli output: #
# #
#####
#####
# Variabili d ambiente #
#####
global env
#####
# Input dir case e subcasedir da riga di comando
#####
if { $argc != 2 } {
```

B.5. Esecuzione di WRF

```
puts "\n"
puts "Use es.: $argv0_Montecavallo_4d-2way-Dec-2009"
puts "Try again"
puts "\n"
exit

} else {
  set arg1 [lindex $argv 0]
  set arg2 [lindex $argv 1]

#####
#          realDIR e' nel .bashrc o nel wrap di lancio
#
#####

#set REALDIR $env(realDIR)
set REALDIR $env(WORKDIR)

#####
set UTILSDIR $REALDIR
append UTILSDIR /utils
#set CASESDIR $REALDIR
#append CASESDIR /cases
#set CASEDIR $CASESDIR
#append CASEDIR /$arg1

set CASEDIR $env(CASEDIR)
#set SUBCASEDIR $CASEDIR
#append SUBCASEDIR /$arg2

set SUBCASEDIR $env(SUBCASEDIR)

set INPUTDIR $SUBCASEDIR
append INPUTDIR /input

set CWDDIR $SUBCASEDIR
append CWDDIR /cwd
set TXTCWDDIR $CWDDIR
append TXTCWDDIR /txt

set ROSECWDDIR $CWDDIR
append ROSECWDDIR /rose
set OUTDIR $SUBCASEDIR
append OUTDIR /out
set UOUTDIR $OUTDIR
append UOUTDIR /UV
set INITDIR $SUBCASEDIR
append INITDIR /init
set XYZDIR $SUBCASEDIR
append XYZDIR /xyz
set INFODIR $SUBCASEDIR
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
append INFODIR "/info"
set ANEMDIR $SUBCASEDIR
append ANEMDIR /anem

if {[file isdirectory $CASEDIR]} {
#   puts "Create a new case (y/n)?"
#   flush stdout
#   set yesorno [gets stdin]

set yesorno [tk_messageBox -message "Create_new_case?"
                    -type yesno -icon question]

switch -- $yesorno {
    yes {

        file mkdir $CASEDIR
        file mkdir $SUBCASEDIR
        file mkdir $INPUTDIR
        file mkdir $CWDDIR
        file mkdir $TXTCWDDIR
        file mkdir $ROSECWDDIR
        file mkdir $OUTDIR
        file mkdir $UOUTDIR
        file mkdir $INITDIR
        file mkdir $XYZDIR
        file mkdir $INFODIR
        file mkdir $ANEMDIR
    }
    no {

        #puts "\n"
        #puts "Case_$CASEDIR_neither_exists_nor_you_
            want_to_create_it!_Make_up_your_mind"
        #puts "\n"
        #exit
        set answer [tk_messageBox -message "Case_
            $CASEDIR_neither_exists_nor_you_want_to_
            create_it!_Make_up_your_mind" -type ok
                    -icon error]
        exit
    }
}
} else {

    if {[file isdirectory $SUBCASEDIR]} {

        #puts -nonewline "Create_a_new_subcase_(y/n)?_"
        #flush stdout
        #set yesorno [gets stdin]
```


Capitolo B. Codice sviluppato

```

$m add cascade -label "Manage_cases" -menu $m.casi
set mc [menu $m.casi -tearoff 0]
$mc add command -label "Create_case" -command CreateCase
$mc add command -label "Open_case" -command OpenCase
$mc add command -label "Clear_case" -command ClearCase
$mc add command -label "Destroy_case" -command DestroyCase
$m add separator
$m add command -label "Exit" -accelerator $modifier+x
    -command "exit" -underline 0
bind . <$modifier-x> "exit"
set h .menu.help
menu $h -tearoff 0
.menu add cascade -label "Help" -menu $h -underline 0
$h add command -label "Help" -accelerator $modifier+h
    -command "Help" -underline 0 -command Help
bind . <$modifier-h> "Help"
. configure -menu .menu
##### Pulizia iniziale dei file di output precedenti
#####
if {[file isfile $REALDIR/wrfout.nc] != 0} {
    set codice [file isfile $REALDIR/wrfout.nc]
    file delete -force $REALDIR/wrfout.nc
}
##### Fine Menu #####
##### Oggetti #####
##### Frame top #####
frame .top -bd 3 -relief ridge -bg blue
pack .top -side top -padx 5 -pady 5 -fill x
frame .top.fake
pack .top.fake -fill both -expand true -padx 5 -pady 5
set tff .top.fake
label $tff.lblActFile -text "Active_file" -width 30
pack $tff.lblActFile -side top -fill both -expand true
label $tff.lblActFileRead -textvariable activeFile -relief
    ridge
pack $tff.lblActFileRead -side top -fill both -expand true
##### Frame east #####
frame .east -bd 3 -relief ridge -bg yellow
pack .east -side left -padx 5 -pady 5 -fill y
##### BOTTONI #####
button .east.btnSelectNc -text "Select_nc_files"
    -command cmdSelectNc
pack .east.btnSelectNc -side top -fill x -padx 5
    -pady 5
#####
frame .east.listNc -bd 3 -relief ridge
pack .east.listNc -fill both -expand true
scrollbar .east.listNc.s -command "
    .east.listNc.listSelectedNc_yview" -orient vertical
pack .east.listNc.s -side right -fill y
    
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

listbox .east.listNc.listSelectedNc -yscroll ".east.listNc.s_
set" -selectmode extended -exportselection 0
pack .east.listNc.listSelectedNc -side right -fill both
-expand true
##### BOTTONI #####
button .east.btnXYZCreate -text "Create_xyz_file"
-command cmdXYZCreate
pack .east.btnXYZCreate -side top -fill x -padx 5 -pady 5
#####
##### BOTTONI #####
button .east.btnXYZShow -text "Show_terrain_grapichs"
-command cmdXYZShow
pack .east.btnXYZShow -side top -fill x -padx 5 -pady 5
#####
##### BOTTONI #####
#button .east.btnInfoCreate -text "Create .info file"
-command cmdInfoCreate
#pack .east.btnInfoCreate -side top -fill x -padx 5 -pady 5
#####
##### BOTTONI #####
button .east.btnAnemCreate -text "Create_anemometers_
file" -command cmdAnemCreate
pack .east.btnAnemCreate -side top -fill x -padx 5 -pady 5
#####
##### BOTTONI #####
button .east.btnCwdCreate -text "Create_cwd_file"
-command cmdCwdCreate
pack .east.btnCwdCreate -side top -fill x -padx 5 -pady 5
#####
##### BOTTONI #####
button .east.btnCwdMerge -text "Merge_cwd_files"
-command cmdCwdMerge
pack .east.btnCwdMerge -side top -fill x -padx 5 -pady 5
#####
bind .east.listNc.listSelectedNc <Double-B2-ButtonRelease> {
procDelItemInList
}
#bind .east.listNc.listSelectedNc <Button-1> {
# file delete $REALDIR/tipo_variabili_in_wrfout.nc.txt
# file delete $REALDIR/wrfout.recap.grid
# file delete -force wrfout.nc
# #set success [exec ln -s $activeFile wrfout.nc]
#}
bind .east.listNc.listSelectedNc <B1-ButtonRelease> {
set activeFile [.east.listNc.listSelectedNc get active]
}
##### Frame West #####
frame .west -bd 3 -relief ridge -bg green
pack .west -side right -padx 5 -pady 5 -fill y -fill x
##### BOTTONI #####

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

button .west.btnInit          -text "Initalize"
    -command cmdInit
pack   .west.btnInit          -side top -fill x -padx 5
    -pady 5
#####
##### Frame west central #####
frame  .west.central -bd 3 -relief ridge
pack   .west.central -side top -padx 5 -pady 5 -fill y -fill
    x
##### Frame west central left #####
frame  .west.central.left -bd 3 -relief ridge
pack   .west.central.left -side left -padx 5 -pady 5 -fill y
label  .west.central.left.lblNofSigma -text "Number_of_sigma
    _levels" -width 30
label  .west.central.left.lblNofSigmaRead -relief ridge
    -width 20 -justify right -textvariable NofSigmaRead
grid   .west.central.left.lblNofSigma      -row 0
    -column 0
grid   .west.central.left.lblNofSigmaRead  -row 0
    -column 1
label  .west.central.left.lblNofINodes -text "Number_of_i_
    nodes" -width 30 -justify left
label  .west.central.left.lblNofINodesRead -relief ridge
    -width 20 -justify right -textvariable NofINodesRead
grid   .west.central.left.lblNofINodes     -row 1
    -column 0
grid   .west.central.left.lblNofINodesRead  -row 1
    -column 1
label  .west.central.left.lblNofJNodes -text "Number_of_j_
    nodes" -width 30 -justify left
label  .west.central.left.lblNofJNodesRead -relief ridge
    -width 20 -justify right -textvariable NofJNodesRead
grid   .west.central.left.lblNofJNodes     -row 2
    -column 0
grid   .west.central.left.lblNofJNodesRead  -row 2
    -column 1
label  .west.central.left.lblSSY -text "Simulation_start_
    year" -width 30 -justify left
label  .west.central.left.lblSSYRead -relief ridge -width 20
    -justify right -textvariable SSYRead
grid   .west.central.left.lblSSY           -row 3
    -column 0
grid   .west.central.left.lblSSYRead       -row 3
    -column 1
label  .west.central.left.lblSSM -text "Simulation_start_
    month" -width 30 -justify left
label  .west.central.left.lblSSMRead -relief ridge -width 20
    -justify right -textvariable SSMRead
grid   .west.central.left.lblSSM          -row 4
    -column 0

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

grid      .west.central.left.lblSSMRead          -row 4
        -column 1
label     .west.central.left.lblSSD -text "Simulation_start_day
" -width 30 -justify left
label     .west.central.left.lblSSDRead -relief ridge -width 20
        -justify right -textvariable SSDRead
grid      .west.central.left.lblSSD              -row 5
        -column 0
grid      .west.central.left.lblSSDRead          -row 5
        -column 1
label     .west.central.left.lblSSH -text "Simulation_start_
hour" -width 30 -justify left
label     .west.central.left.lblSSHRead -relief ridge -width 20
        -justify right -textvariable SSHRead
grid      .west.central.left.lblSSH              -row 6
        -column 0
grid      .west.central.left.lblSSHRead          -row 6
        -column 1
label     .west.central.left.lblSSMin -text "Simulation_start_
minute" -width 30 -justify left
label     .west.central.left.lblSSMinRead -relief ridge -width
20 -justify right -textvariable SSMInRead
grid      .west.central.left.lblSSMin            -row 7
        -column 0
grid      .west.central.left.lblSSMinRead        -row 7
        -column 1
##### BOTTONE #####
button    .west.central.left.btnListVar -text "List_variables
" -command cmdListVar
grid      .west.central.left.btnListVar          -row 8
        -column 0 -columnspan 2 -sticky news -padx 5 -pady 5
#####
### Frame west central right #####
frame     .west.central.right -bd 3 -relief ridge
pack      .west.central.right -side right -padx 5 -pady 5 -fill
y
label     .west.central.right.lblZ -text "Z_sigma_sea_level_to_
top" -width 30
pack      .west.central.right.lblZ -side top -padx 2 -pady 2
scrollbar .west.central.right.s -command "
.west.central.right.listSelectedZ_yview" -relief ridge
pack      .west.central.right.s -side right -fill y
listbox   .west.central.right.listSelectedZ -yscroll "
.west.central.right.s._set" -selectmode extended
        -exportselection 0
pack      .west.central.right.listSelectedZ -side left -fill both
        -expand true
### Frame west bottom #####
frame     .west.bottom -bd 3 -relief ridge
pack      .west.bottom -side left -padx 5 -pady 5 -fill both
        -expand true

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
##### Frame west bottom left #####
frame .west.bottom.left -bd 3
pack .west.bottom.left -side left -padx 5 -pady 5 -fill both
    -expand true
label .west.bottom.left.lblAngSet -text "Angular_sectors"
pack .west.bottom.left.lblAngSet -side top -fill x
label .west.bottom.left.lblAngSetRead -relief ridge
pack .west.bottom.left.lblAngSetRead -side top -fill x
label .west.bottom.left.lblBinAmp -text "Bins_amplitude"
pack .west.bottom.left.lblBinAmp -side top -fill x
label .west.bottom.left.lblBinAmpRead -relief ridge
pack .west.bottom.left.lblBinAmpRead -side top -fill x
##### Frame west bottom center #####
frame .west.bottom.center -bd 3
pack .west.bottom.center -side left -padx 5 -pady 5 -fill
    both -expand true
label .west.bottom.center.lblOutZ -text "Z_heights_output"
pack .west.bottom.center.lblOutZ -side top -fill x
scrollbar .west.bottom.center.s -command "
    .west.bottom.listZchecked_yview" -orient vertical
pack .west.bottom.center.s -side right -fill y
listbox .west.bottom.center.listZchecked -yscroll "
    .west.bottom.center.s.get"
pack .west.bottom.center.listZchecked -side right -fill
    both -expand true
##### Frame west bottom right #####
frame .west.bottom.right -bd 3
pack .west.bottom.right -padx 5 -pady 5 -fill both -expand
    true
##### BOTTONI #####
button .west.bottom.right.btnPBL -text "Create_PBL_
    heights" -command cmdPBL
pack .west.bottom.right.btnPBL -side left -fill x
    -padx 5 -pady 5
#####
set aspetta 0
##### Implementazione comandi bottoni #####
proc Help {} {
    global env
    global REALDIR

    set h .helpw
    catch {destroy $h}
    toplevel $h
    wm title $h "WISH-WRF-ANAL_manual_page"
    wm iconname $h "WVA_man"
    frame $h.buttons
    pack $h.buttons -side bottom -fill x -pady 2m
    button $h.buttons.dismiss -text Dismiss -command "
        destroy $h"
    pack $h.buttons.dismiss -side left -expand 1
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

frame $h.f -highlightthickness 2 -borderwidth 2
    -relief sunken
set t $h.f.text
text $t -yscrollcommand "$h.scroll_set" -setgrid true
    -width 100 \
        -height 35 -wrap word -highlightthickness 0
        -borderwidth 0
pack $t -expand yes -fill both
scrollbar $h.scroll -command "$t_yview"
pack $h.scroll -side right -fill y
pack $h.f -expand yes -fill both
set ff [exec cat $REALDIR/ utils/ man/ WISH-WRF-ANAL1]
$t insert end $ff
}
##### Selezione file nc da esaminare #####
proc cmdSelectNc {} {
    global activeFile
    set types {
        {{All Files}          {wrfout.d*} }
        {{Ncarg file}         {.nc}    }
        {{Text Files}         {.txt}   }
    }
    set file [tk_getOpenFile -filetypes $types -multiple
        true -title "Choose one or more nc files"]

    foreach item $file {
        .east.listNc.listSelectedNc insert end $item
    }
    set activeFile [.east.listNc.listSelectedNc get
        active]
}
##### Mostra lista delle variabili con descrizione
#####
proc cmdListVar {} {
    global env
    global REALDIR
    global NofSigmaRead
    global NofINodesRead
    global NofJNodesRead
    global SSYRead
    global SSMRead
    global SSDRead
    global SSHRead
    global SSMInRead
    global INITDIR
    global activeFile
    global baseName

    set fileVariabili $INITDIR
    append fileVariabili "/"
    append fileVariabili $baseName

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

append fileVariabili ".tipo_variabili"

if {[string length $activeFile] == 0} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "Select_an_nc_file_then_initialize
        _it_first"]
    return
}
if {![file exist $fileVariabili]} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "Select_an_nc_file_then_initialize
        _it_first"]
    return
}

set testo [exec cat $fileVariabili]
set titolo "List_of_used_variables"
Messaggio $testo $titolo
}
##### Bottone di inizializzazione #####
proc cmdInit {} {
    global env
    global REALDIR
    global UTILSDIR
    global INITDIR
    global NofSigmaRead
    global NofINodesRead
    global NofJNodesRead
    global SSYRead
    global SSMRead
    global SSDRead
    global SSHRead
    global SSMInRead
    global activeFile
    global activeZ
    global baseName
    global fileTemplateTime
    global fileTemplateTimeLn

    if {[string length $activeFile] == 0} {
        set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
            error -message "Select_an_nc_file_first"]
        return
    }

    set baseName [file tail $activeFile]
    set lbaseName [split $baseName "_"]
    set baseName [lindex $lbaseName 0]
    append baseName "_"
    append baseName [lindex $lbaseName 1]

```

B.5. Esecuzione di WRF

```
set fileVariabili $INITDIR
append fileVariabili "/"
append fileVariabili $baseName
append fileVariabili ".tipo_variabili"

set fileRecap $INITDIR
append fileRecap "/"
append fileRecap $baseName
append fileRecap ".recap.grid"
#set fileTimes $INITDIR
#append fileTimes "/"
#append fileTimes $baseName
#append fileTimes ".times"
set fileGridinfo $INITDIR
append fileGridinfo "/"
append fileGridinfo $baseName
append fileGridinfo ".gridinfo"
set fileGridinfoLn $INITDIR
append fileGridinfoLn "/"
append fileGridinfoLn $baseName
append fileGridinfoLn ".gridinfo.ln"
set fileZNU $INITDIR
append fileZNU "/"
append fileZNU $baseName
append fileZNU ".ZNU"

set fileZISA $INITDIR
append fileZISA "/"
append fileZISA $baseName
append fileZISA ".ZISA"
set fileTemplateTime $INITDIR
append fileTemplateTime "/"
#append fileTemplateTime $baseName
append fileTemplateTime "template.time"
#puts $fileTemplateTime
set fileTemplateTimeLn $INITDIR
append fileTemplateTimeLn "/"
#append fileTemplateTimeLn $baseName
append fileTemplateTimeLn "template.time.ln"
#puts $fileTemplateTimeLn
set fileXLAT $INITDIR
append fileXLAT "/"
append fileXLAT $baseName
append fileXLAT ".XLAT"
set fileXLAT_U $INITDIR
append fileXLAT_U "/"
append fileXLAT_U $baseName
append fileXLAT_U ".XLAT_U"
set fileXLAT_V $INITDIR
append fileXLAT_V "/"
append fileXLAT_V $baseName
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

append fileXLAT_V ".XLAT_V"
set fileXLONG $INITDIR
append fileXLONG "/"
append fileXLONG $baseName
append fileXLONG ".XLONG"
set fileXLONG_U $INITDIR
append fileXLONG_U "/"
append fileXLONG_U $baseName
append fileXLONG_U ".XLONG_U"
set fileXLONG_V $INITDIR
append fileXLONG_V "/"
append fileXLONG_V $baseName
append fileXLONG_V ".XLONG_V"
set filePB $INITDIR
append filePB "/"
append filePB $baseName
append filePB ".PB"

if {[file exists $fileRecap]} {
  if {[file exists $fileZISA]} {
    if {[file exists $fileVariabili]} {
      if {[file exists $fileXLAT] && [file exists
        $fileXLAT_U] && [file exists $fileXLAT_V
      ]} {
        if {[file exists $fileXLONG] && [file
          exists $fileXLONG_U] && [file exists
          $fileXLONG_V]} {
          if {[file exists $filePB]} {
            set scelta [tk.messageBox -icon
              question -type yesno \
              -title Message -parent . \
              -message "Initialization_
                already_performed!_
                Proceed_anyway?" \
              -default no]
            if {[string compare $scelta "no"]
              = 0} {
              set lblTxt [exec
                cat $fileRecap]
              set NofSigmaRead [
                lindex $lblTxt 2]
              set NofINodesRead [
                lindex $lblTxt 0]
              set NofJNodesRead [
                lindex $lblTxt 1]
              set SSYRead [
                lindex $lblTxt 4]
              set SSMRead [
                lindex $lblTxt 5]
              set SSDRead [
                lindex $lblTxt 6]
            }
          }
        }
      }
    }
  }
}

```


Capitolo B. Codice sviluppato

```

set success [exec rm -f wrfout.nc.ZISA]
set success [exec rm -f wrfout.nc.template.time]
set success [exec rm -f wrfout.nc.template.time.ln]
set success [exec rm -f wrfout.nc.XLAT]
set success [exec rm -f wrfout.nc.XLAT_U]
set success [exec rm -f wrfout.nc.XLAT_V]
set success [exec rm -f wrfout.nc.XLONG]
set success [exec rm -f wrfout.nc.XLONG_U]
set success [exec rm -f wrfout.nc.XLONG_V]
set success [exec rm -f wrfout.nc.PB]
set success [exec rm -f wrfout.nc]
set success [exec ln -fs $activeFile wrfout.nc]
if {[catch {exec $UTILSDIR/initialize.sh wrfout.nc}]} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . \
        -icon error -message "Initialization_error!"]
    file delete -force wrfout.nc
    return;
} else {
    set success [exec mv wrfout.nc.tipo_variabili
        $fileVariabili]
    set success [exec mv wrfout.nc.recap.grid $fileRecap]
    set success [exec mv wrfout.nc.gridinfo $fileGridinfo
    ]
    set success [exec mv wrfout.nc.gridinfo.ln
        $fileGridinfoLn]
    set success [exec mv wrfout.nc.ZNU $fileZNU]
    set success [exec mv wrfout.nc.ZISA $fileZISA]
    set success [exec mv wrfout.nc.XLAT $fileXLAT]
    set success [exec mv wrfout.nc.XLAT_U $fileXLAT_U]
    set success [exec mv wrfout.nc.XLAT_V $fileXLAT_V]
    set success [exec mv wrfout.nc.XLONG $fileXLONG]
    set success [exec mv wrfout.nc.XLONG_U $fileXLONG_U]
    set success [exec mv wrfout.nc.XLONG_V $fileXLONG_V]
    set success [exec mv wrfout.nc.PB $filePB]
    set success [exec rm -f wrfout.nc]

    set lblTxt [exec cat $fileRecap]
    set NofSigmaRead [lindex $lblTxt 2]
    set NofINodesRead [lindex $lblTxt 0]
    set NofJNodesRead [lindex $lblTxt 1]
    set SSYRead [lindex $lblTxt 4]
    set SSMRead [lindex $lblTxt 5]
    set SSDRead [lindex $lblTxt 6]
    set SSHRead [lindex $lblTxt 7]
    set SSMInRead [lindex $lblTxt 8]

    set fp [open $fileZISA r]
    set quote [read $fp]
    close $fp

    foreach item $quote {

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

        .west.central.right.listSelectedZ insert end
        $item
    }
    set activeZ [.west.central.right.listSelectedZ get
    active]
}
file delete -force wrfout.nc
}
##### Comando creazione file xyz #####
proc cmdXYZCreate {} {
    global env
    global REALDIR
    global UTILSDIR
    global XYZDIR
    global INITDIR
    global activeFile
    global baseName

    set fileRecap $INITDIR
    append fileRecap "/"
    append fileRecap $baseName
    append fileRecap ".recap.grid"
    set fileZNU $INITDIR
    append fileZNU "/"
    append fileZNU $baseName
    append fileZNU ".ZNU"
    set fileXLAT $INITDIR
    append fileXLAT "/"
    append fileXLAT $baseName
    append fileXLAT ".XLAT"
    set fileXLONG $INITDIR
    append fileXLONG "/"
    append fileXLONG $baseName
    append fileXLONG ".XLONG"
    set filePB $INITDIR
    append filePB "/"
    append filePB $baseName
    append filePB ".PB"
    set fileXYZ $XYZDIR
    append fileXYZ "/"
    append fileXYZ $baseName
    append fileXYZ ".XYZ"

    if {[file exists $fileRecap]!=1} {
        set success [tk.messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "Recap file missing: initialize nc
        file first"]
        return
    }
    set success [exec ln -s $activeFile wrfout.nc]
    set success [exec ln -s $fileRecap wrfout.nc.recap.grid]

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

set success [exec ln -s $fileXLAT wrfout.nc.XLAT]
set success [exec ln -s $fileXLONG wrfout.nc.XLONG]
set success [exec ln -s $filePB wrfout.nc.PB]
set success [exec ln -s $fileZNU wrfout.nc.ZNU]
if {[catch {exec $UTILSDIR/crea_file_xyz.m}]} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "Error_in_script_crea_file_xyz.m"]
    return
}

set success [exec cat wrfout.nc.XYZ | grep -v "\#" >
    temp.pier]
set success [exec mv temp.pier $fileXYZ]
file delete -force wrfout.nc
file delete -force wrfout.nc.recap.grid
file delete -force wrfout.nc.XLAT
file delete -force wrfout.nc.XLONG
file delete -force wrfout.nc.PB
file delete -force wrfout.nc.ZNU
}
##### Bottone Visualizzazione file xyz #####
proc cmdXYZShow {} {
    global REALDIR
    global UTILSDIR
    global XYZDIR
    global activeFile
    global baseName
    set fileXYZ $XYZDIR
    append fileXYZ "/"
    append fileXYZ $baseName
    append fileXYZ ".XYZ"
    if {[file exists $fileXYZ]!=1} {
        set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
            error -message "File_xyz_not_yet_created"]
        return
    }
    set success [exec ln -fs $fileXYZ XYZ.tmp]

    if {[catch {exec $UTILSDIR/show_XYZ.m &}]} {
        set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
            error -message "Error_in_script_show_XYZ.sh"]
        return
    }
}
##### Bottone creazione file info #####
proc cmdInfoCreate {} {
    global REALDIR
    global UTILSDIR
    global INFODIR
    global INITDIR
    global ANEMDIR

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

global XYZDIR
global activeFile
global baseName
set fileSLS $INFODIR
append fileSLS "/"
append fileSLS $baseName
append fileSLS ".SLS.info"
if {[string length $baseName] == 0} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "Select an nc file then initialize
        it first"]
    return
}
set fileXYZ $XYZDIR
append fileXYZ "/"
append fileXYZ $baseName
append fileXYZ ".XYZ"
if {[file exists $fileXYZ] != 1} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "Terrain .XYZ file missing: create
        it first"]
    return
}
set fileXLAT $INITDIR
append fileXLAT "/"
append fileXLAT $baseName
append fileXLAT ".XLAT"
if {[file exists $fileXLAT] != 1} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "XLAT file missing: reinitialize"]
    return
}
set fileXLONG $INITDIR
append fileXLONG "/"
append fileXLONG $baseName
append fileXLONG ".XLONG"
if {[file exists $fileXLONG] != 1} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "XLONG file missing: reinitialize"
    ]
    return
}
set filePB $INITDIR
append filePB "/"
append filePB $baseName
append filePB ".PB"
if {[file exists $filePB] != 1} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "PB file missing: reinitialize"]
    return
}
}

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
set fileRecap $INITDIR
append fileRecap "/"
append fileRecap $baseName
append fileRecap ".recap.grid"
if {[file exists $fileRecap]!=1} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "Recap_file_missing:_initialize_nc
            _file_first"]
    return
}
set selectedZindex [.west.central.right.listSelectedZ
    curselection]
if {[llength $selectedZindex] == 0} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "Select_at_least_one_Z_level"]
    return
}
set fileZNU $INITDIR
append fileZNU "/"
append fileZNU $baseName
append fileZNU ".ZNU"
if {[file exists $fileZNU]!=1} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "ZNU_file_missing:_reinitialize"]
    return
}
#####
# Pulizia della dir con i file info eventualmente presenti #
#####
foreach outFile [glob -nocomplain -type f -dir $INFODIR
    *.info] {
    file delete -force $outFile
}
set fp [open $fileZNU r]
set sigmaLevel [read $fp]
close $fp
file delete -force XYZS.tmp
set fp [open XYZS.tmp w]
foreach indice $selectedZindex {
    set sigma [lindex $sigmaLevel $indice]
    puts $fp "$indice_$sigma"
}
close $fp

#file copy -force XYZS.tmp controllo.sigma

set success [exec mv XYZS.tmp $fileSLS]
set success [exec ln -sf $fileSLS wrfout.nc.SLS]

set success [exec ln -sf $activeFile wrfout.nc]
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

set success [exec ln -sf $fileRecap wrfout.nc.recap.grid]

set success [exec ln -sf $fileXYZ wrfout.nc.XYZ]

set success [exec ln -sf $fileXLAT wrfout.nc.XLAT]
set success [exec ln -sf $fileXLONG wrfout.nc.XLONG]

set success [exec ln -sf $filePB wrfout.nc.PB]

foreach outFile [glob -nocomplain -type f *_XYZS] {
    file delete -force $outFile
}
if {[catch {exec $UTILSDIR/crea_file_xyzs.m}]} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
        error -message "Error in script crea_file_xyzs.m"
    ]
    return
}
foreach outFile [glob -nocomplain -type f *_XYZS] {
    set success [exec cat $outFile | grep -v "\#" >
        temp.pier]

    set fileXYZS $baseName
    set lLivello [split $outFile "_"]
    set iLivello [lindex $lLivello 1]
    append fileXYZS ".$iLivello"
    append fileXYZS ".info"
    set success [exec mv temp.pier $fileXYZS]
    set success [exec mv $fileXYZS $INFODIR]
}

foreach outFile [glob -nocomplain -type f *_XYZS] {
    file delete -force $outFile
}
file delete -force wrfout.nc
file delete -force wrfout.nc.SLS
file delete -force wrfout.nc.recap.grid
file delete -force wrfout.nc.XYZ
file delete -force wrfout.nc.XLAT
file delete -force wrfout.nc.XLONG
file delete -force wrfout.nc.PB
file delete -force XYZS.tmp
}
##### Bottone creazione anemometri #####
proc cmdAnemCreate {} {
    . configure -cursor watch

    update
#####

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

# Crea txixj file nella dir cases/casename/subcasename/anem
#
# ciascun file e una matrice di mxn righe x colonne
#
# m = 5 (yy mm dd hh min) + 4 (u v |U| dir) x n-sigma (numero
#   livelli selezionati)
# n = numero dei frame di output (es 1 ogni 5min)
#
#####
global REALDIR
global UTILSDIR
global INFODIR
global INITDIR
global XYZDIR
global OUTDIR
global ANEMDIR
global activeFile
global baseName
global fileTemplateTime
global fileTemplateTimeLn
global fileLinkNomi
#####
# Chiamata alla procedura di creazione dei file info, ossia
# delle z delle superfici isosigmalevel selezionate #
#####
cmdInfoCreate
#####
# Recupero dei file nc selezionati
#
#####
set indexSelectedFiles [.east.listNc.listSelectedNc
  curselection]

if {[llength $indexSelectedFiles] == 0} {
    set success [tk_messageBox -type ok -parent . -icon
      error -message "Select_at_least_one_nc_file"]
    return
}
foreach index $indexSelectedFiles {
    lappend selectedFiles [.east.listNc.listSelectedNc
      get $index]
}
#####

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

# Riordino in maniera cronologica i file selezionati
#
# Nome del file deve essere in formato wrf, es:
wrfout_d04_2009-12-01_00:00:00
#
#####
append fileLinkNomi $INITDIR
append fileLinkNomi "/"
append fileLinkNomi "linknomi.tmp"
file delete -force linknomi.tmp
file delete -force $fileLinkNomi
foreach sf $selectedFiles {

    set f [file tail $sf]
    #puts "f_=$f"
    set data [lindex [split $f "_"] 2]
    #puts "data_=$data"
    set data [split $data "-"]
    #puts "data_=$data"
    set oraclk [lindex [split $f "_"] 3]
    #puts "oraclk_=$oraclk"
    set ora [split $oraclk ":"]
    #puts "ora_=$ora"
    set anno [lindex $data 0]
    #puts "anno_=$anno"
    set mese [lindex $data 1]
    #puts "mese_=$mese"
    set giorno [lindex $data 2]
    #puts "giorno_=$giorno"
    set ore [lindex $ora 0]
    #puts "ore_=$ore"
    set minuti [lindex $ora 1]
    #puts "minuti_=$minuti"
    set secondi [lindex $ora 2]
    #puts "secondi_=$secondi"

    set namelink [clock scan "$oraclk_.$anno_.$mese_.$giorno"
        " -format "%T_%Y_%m_%d"]
    set success [exec ln -fs $f $namelink]
    set success [exec echo -e -n "$f_.$namelink_\n" >>
        linknomi.tmp]
    lappend nomi $namelink

}
set success [exec mv linknomi.tmp $fileLinkNomi]
set nomiClock [lsort -integer $nomi]

#####
# Creo un template con i timestamp comuni a tutti gli
anemometri 9(YY MM GG HH mm pblh T@0 SWl LWl)xNT
#

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
#####
file delete -force template.time
file delete -force template.time.ln
file delete -force temp.pier

foreach f $nomiClock {

    set success [exec $UTILSDIR/get_times.sh $f]

}

set success [exec $UTILSDIR/trasponi.m temp.pier]
set success [exec cat temp.pier | grep -v # >
template.time]
#puts "riga_1145_$fileTemplateTime"
set success [exec cp template.time $fileTemplateTime]
set success [exec $UTILSDIR/linearize.sh template.time
template.time.ln]
#puts "riga_1148_$fileTemplateTimeLn"
set success [exec cp template.time.ln $fileTemplateTimeLn
]
file delete -force temp.pier
#####
# Ricavo gli indici dei sigma level nei quali si vuole
# piazzare un anemometro
#
# li ricavo dal campo n.2 con separatore '.' dai nomei dei
# file info creati e se la INFODIR e vuota avviso #
# Da rivedere visto che estraggo tutti i sigma level
#####
set infoFiles [exec ls -l $INFODIR]

unset index

foreach f $infoFiles {
    set lev [lindex [split $f "."] 1]

    if {[string compare $lev "SLS"] != 0} {
        lappend index $lev
    }
}

set indexLevel [lsort -integer $index]
#####
# Per ciascuno dei file nc costruisco una matrice U e V di
#
# m = (i*j = cav)*s righe #
# n = ts colonne #
#
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

# cav = celle totali pari al numero degli anemometri virtuali
#
# s = sigma level
#
# ts = time stamp del file
#
#
# a partire da matrici di file velocita staggerate Us e Vs di
#
# m = ((i+1)*j)*s righe (Us)
#
# m = (i*(j+1))*s righe (Vs)
#
# n = ts colonne
#
#####
#####
# Preparazione link ai file contenenti i parametri di griglia
time independent per script octave
#####
set fileXLAT $INITDIR
set fileSLS $INFODIR

append fileXLAT "/"
append fileXLAT $baseName

append fileSLS "/"
append fileSLS $baseName
set fileTemplateTimeLn $INITDIR
append fileTemplateTimeLn "/"
set fileTemplateTime $INITDIR
append fileTemplateTime "/"
append fileTemplateTimeLn "template.time.ln"
append fileTemplateTime "template.time"

set fileXLAT_U $fileXLAT
set fileXLAT_V $fileXLAT
set fileXLONG $fileXLAT
set fileXLONG_U $fileXLAT
set fileXLONG_V $fileXLAT

set fileZNU $fileXLAT
set fileZISA $fileXLAT

set fileGridinfo $fileXLAT

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
set fileGridinfoLn $fileXLAT
set fileNomiClock $fileXLAT
append fileXLAT ".XLAT"
append fileXLAT_U ".XLAT_U"
append fileXLAT_V ".XLAT_V"
append fileXLONG ".XLONG"
append fileXLONG_U ".XLONG_U"
append fileXLONG_V ".XLONG_V"
append fileZNU ".ZNU"
append fileZISA ".ZISA"

append fileGridinfo ".gridinfo"
append fileGridinfoLn ".gridinfo.ln"
append fileNomiClock ".nomiclock.ln"
append fileSLS ".SLS.info"

set success [exec ln -fs $fileXLAT XLAT.tmp]
set success [exec ln -fs $fileXLAT_U XLAT_U.tmp]
set success [exec ln -fs $fileXLAT_V XLAT_V.tmp]
set success [exec ln -fs $fileXLONG XLONG.tmp]
set success [exec ln -fs $fileXLONG_U XLONG_U.tmp]
set success [exec ln -fs $fileXLONG_V XLONG_V.tmp]
set success [exec ln -fs $fileZNU ZNU.tmp]
set success [exec ln -fs $fileZISA ZISA.tmp]

set success [exec ln -fs $fileTemplateTimeLn
template.time.ln]

set success [exec ln -fs $fileTemplateTime template.time]

set success [exec ln -fs $fileGridinfo gridinfo.tmp]
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

set success [exec ln -fs $fileGridinfoLn gridinfo.ln]
set success [exec ln -fs $fileSLS SLS.tmp]
file delete -force UCVC.tmp
file delete -force U.tmp
file delete -force V.tmp
file delete -force PBLH.tmp
file delete -force T2.tmp
file delete -force SWDOWN.tmp
file delete -force GLW.tmp
file delete -force TK.tmp
#####
# Creazione di un file con elenco nomi clock dei file da
# elaborare
#####
set fileId [open files.tmp w]
foreach f $nomiClock {
    puts $fileId $f
}
close $fileId

set success [exec mv files.tmp $fileNomiClock]
set success [exec ln -fs $fileNomiClock files.ln]
#####
# Creazione dei file di velocita centrate, TK, PBLH, T2,
# SWDOWN, GLW
#####
foreach f $nomiClock {

    set success [exec rm -f *.$f]

    file delete -force wrfout.nc
    set success [exec ln -fs $f wrfout.nc]
    set success [exec ncl get_UV.ncl >& /dev/null]
    set success [exec ncl get_TK.ncl >& /dev/null]

    set success [exec ncl get_PBLH.ncl >& /dev/null]
    set success [exec ncl get_T2.ncl >& /dev/null]
    set success [exec ncl get_GLW.ncl >& /dev/null]
    set success [exec ncl get_SWDOWN.ncl >& /dev/null]

#####
# Ora sono disponibili i vettori di componenti centrate [(n x
# m) x s] x ts) x 1
# salvati in U.$f, V.$f, TK.$f, PBLH.$f, T2.$f, SWDOWN.$f,
# GLW.$f
#####

set success [exec mv U_bin.tmp U_bin.$f]

set success [exec mv V_bin.tmp V_bin.$f]

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

    set success [exec mv TK_bin.tmp TK_bin.$f]

    set success [exec mv PBLH_bin.tmp PBLH_bin.$f]

    set success [exec mv T2_bin.tmp T2_bin.$f]

    set success [exec mv SWDOWN_bin.tmp SWDOWN_bin.$f]

    set success [exec mv GLW_bin.tmp GLW_bin.$f]
}

#####
# Ora si lancia il comando setup_virtual_anem.exe che estrae
# gli anemometri virtuali Questi sono MxN file #
# ciascuno contenente indexLevel valori di velocita ai vari
# sigma level scelti per tutti i timestamp di simul. #
# La struttura del file anemometro e [(5 + 4 + (5 x SLS)) x
# TTS]x1 dove: #
# 5 -----> YY MM DD HH mm #
# 4 -----> PBLH T@2 SW LW #
# 5 -----> u v |U| dir T@Z #
# SLS -----> sigma level scelti #
#
# TTS -----> numero totale di time stamp di simulazione #
#####
foreach outFile [glob -nocomplain -type f -dir $ANEMDIR
*.AV] {

    file delete -force $outFile

}
puts "Dare il comando ./utils/
setup_single_virtual_anem-0.0.1.exe"
puts "_"
puts "Assicurarsi dell'esistenza dei file lista_AV.txt e
lista_SL.txt"
puts "_"

# set success [exec $UTILSDIR/setup_virtual_anem-0.0.1.exe
$indexLevel > setup_virtual_anem.log 2>&1]

# foreach outFile [glob -nocomplain -type f *.AV] {

# file rename $outFile $ANEMDIR/$outFile

# }

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

. config -cursor {} ;

update
}
##### Implementazione procedure #####
proc Messaggio { testo {titolo "Message"}} {
    set m .msgw
    catch {destroy $m}
    toplevel $m
    wm title $m $titolo

    set f $m.f
    frame $f -highlightthickness 2 -borderwidth 2
        -relief sunken
    pack $f -side top -fill both -pady 2m -expand true

    set b $m.b
    frame $b
    pack $b -side top -fill x -pady 2m -expand true

    set f $m.f
    set t $m.f.text
    set s $m.f.scroll

    text $t -yscrollcommand "$s_set" -setgrid true \
        -height 35 -wrap word -highlightthickness 0
        -borderwidth 0
    pack $t -side left -expand true -fill both
    scrollbar $s -command "$t_yview"
    pack $s -side left -fill y

    button $b.dismiss -text Dismiss -command "destroy_$m"
    pack $b.dismiss -expand true
    $t insert end $testo
    delay 2000
    return;
}
##### Doppio click sul centrale rimuove file nc
#####
proc procDelItemInList {} {
    set i [.east.listNc.listSelectedNc curselection]
    .east.listNc.listSelectedNc delete $i
    return
}
##### Procedura di attesa #####
proc delay {pause} {
    update idletasks
    after $pause
    update idletasks
}
##### Pulizia file del caso in studio #####

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

proc ClearCase {} {
    global activeFile

}
##### Sleep N secondi #####
proc sleep {N} {

    after [expr {int($N * 1000)}]

}
    
```

Listing B.40: Script di inizializzazione post.

```

#!/bin/bash
#####
# Pierpaolo Garofalo<—×———×———×———×———>#
# X Ciclo<———×———×———×———×———>#
# Dipartimento di Energetica<—×———×———×———>#
# Universita Politecnica delle Marche<—×———×———>#
##### Script di estrazione dati ###
# Lavora estraendo i dati wrf dal file nc fornito
# produce dei file con la lista delle variabili
# Input:          WRFOUT
#
# Output:         WRFOUT.tipo_variabili
#                WRFOUT.times
#                WRFOUT.recap.grid
#                WRFOUT.gridinfo
#                WRFOUT.ZNU
#                WRFOUT.ZISA
#                WRFOUT.XLAT
#                WRFOUT.XLONG
#                WRFOUT.PB
#####
#REALDIR="$HOME/Programmi/WRF/WRFV3/test/em_real"
echo "REALDIR=" $realDIR
export REALDIR=$realDIR
NOFTIMES=""
NOFVARIABLES=""
WRFOU=""
cd $REALDIR
# —— Verifica dell'esistenza del file wrfout.nc e che
# questo sia un link
echo "Run:_$(date)" > initialize.log
if [ $# -lt 1 ]; then
    echo "Errore:_fornire_il_file_da_elaborare" >> initialize
    .log
    echo "Errore:_fornire_il_file_da_elaborare"
    exit 1
fi
    
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

WRFOUT="$1"
COMANDO="read_wrf_nc"
if [ -f "$WRFOUT" ]; then
    echo "check_1_OK" >> initialize.log
    echo "$WRFOUT" >> initialize.log
else
    echo "Errore: il file $WRFOUT non esiste" >> initialize
    .log
    exit 1
fi
# —— Estrazione tipo e descrizione variabili di output con
# —— script separato cui passare il nome in cui salvare le
# —— info. Opera sul file wrfout.nc
# —— OK ifort gfortran
./utils/$COMANDO -s -t 1 $WRFOUT > temp.pier
cat temp.pier | grep --text -v 'End of input file' | grep --
    text -v 'INPUT FILE IS\:' | grep --text -v 'TIME\:' |
    grep --text -v '^$' | awk '{print $1}' > temp.elenco
NofVAR=$(cat temp.elenco | wc | awk '{print $1}')
echo "Numero di variabili:" $NofVAR > temp.tipo.variabili
echo "Numero di variabili:" $NofVAR
for var in $(cat temp.elenco); do
    ./utils/$COMANDO -v $var $WRFOUT | grep --text -A 8 "
        Field:" >> temp.tipo.variabili
    echo "-----" >> temp.tipo.variabili
done
##### OUTPUT tipo variabili ###
sed -e 's:\x00:g' temp.tipo.variabili > "$WRFOUT".
    tipo_variabili
#####
rm -f temp.*
# —— Recupero il numero di punti griglia del dominio di
    calcolo
./utils/$COMANDO -s -t 1 "$WRFOUT" | grep --text -v "End_of_
    input_file" > temp.pier
sed -e 's:\x00:g' temp.pier > temp.pier1
cat temp.pier1 | grep --text XLAT_U | awk '{print $1 " "
    $4 " " $5}' > temp.pier
cat temp.pier1 | grep --text XLONG_U | awk '{print $1 " "
    $4 " " $5}' >> temp.pier
cat temp.pier1 | grep --text XLAT_V | awk '{print $1 " "
    $4 " " $5}' >> temp.pier
cat temp.pier1 | grep --text XLONG_V | awk '{print $1 " "
    $4 " " $5}' >> temp.pier
cat temp.pier1 | grep --text "XLAT_" | grep -v XLAT_U |
    grep -v XLONG_U | awk '{print $1 " " $4 " " $5}' >> temp
    .pier
cat temp.pier1 | grep --text "XLONG_" | grep -v XLONG_U |
    grep -v XLONG_V | awk '{print $1 " " $4 " " $5}' >> temp
    .pier

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

cat temp.pier1 | grep --text ZNU          | awk '{print $1 "_"
$4      }' >> temp.pier
cat temp.pier1 | grep --text ZNW          | awk '{print $1 "_"
$4      }' >> temp.pier
##### OUTPUT gridinfo #####
cp temp.pier "$WRFOUT".gridinfo
cat "$WRFOUT".gridinfo | sed -e 's/ /\n/g' | grep -v ^$ >
$WRFOUT".gridinfo.ln
rm temp.pier
#####
n=$(cat "$WRFOUT".gridinfo | grep "XLAT_" | awk '{print $2}')
m=$(cat "$WRFOUT".gridinfo | grep "XLAT_" | awk '{print $3}')
s=$(cat "$WRFOUT".gridinfo | grep "ZNU_" | awk '{print $2}')
rm -f temp.pier*
##### OUTPUT times #####
./utils/$COMANDO -times $WRFOUT | sed -e 's:\x00::g' | awk '/
TIMES/,0' | grep -v "TIMES" | grep -v "End" | sed -e 's:
:\n:g' | grep -v "^$" > "$WRFOUT".times
#####
nt=$(cat "$WRFOUT".times | wc | awk '{print $1}')
ssy=$(cat "$WRFOUT".times | head -n 1 | cut -d "_" -f 1 | cut
-d "_" -f 1 | tr -d ' ')
ssm=$(cat "$WRFOUT".times | head -n 1 | cut -d "_" -f 1 | cut
-d "-" -f 2 | tr -d ' ')
ssd=$(cat "$WRFOUT".times | head -n 1 | cut -d "_" -f 1 | cut
-d "-" -f 3 | tr -d ' ')
ssh=$(cat "$WRFOUT".times | head -n 1 | cut -d "_" -f 2 | cut
-d ":" -f 1 | tr -d ' ')
ssp=$(cat "$WRFOUT".times | head -n 1 | cut -d "_" -f 2 | cut
-d ":" -f 2 | tr -d ' ')
sss=$(cat "$WRFOUT".times | head -n 1 | cut -d "_" -f 2 | cut
-d ":" -f 3 | tr -d ' ')
#echo
#echo "Nx grid = " $n
#echo "Ny grid = " $m
#echo "S      = " $s
#echo
#echo "Nt time = " $nt
#echo
#echo "Start year  = " $ssy
#echo "Start month = " $ssm
#echo "Start day   = " $ssd
#echo "Start hour  = " $ssh
#echo "Start minute = " $ssp
#echo "Start second = " $sss
##### OUTPUT recap.grid #####
echo "elaboro_$WRFOUT_per_recap.grid" >> initialize.log
echo $n > "$WRFOUT".recap.grid
echo $m >> "$WRFOUT".recap.grid
echo $s >> "$WRFOUT".recap.grid
echo $nt >> "$WRFOUT".recap.grid

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

echo $ssy >> "$WRFOUT".recap.grid
echo $ssm >> "$WRFOUT".recap.grid
echo $ssd >> "$WRFOUT".recap.grid
echo $ssh >> "$WRFOUT".recap.grid
echo $ssp >> "$WRFOUT".recap.grid
echo $sss >> "$WRFOUT".recap.grid
#####
$REALDIR/utills/$COMANDO -V "ZNU" -t 1 $WRFOUT | awk '/TIME
/,0' > temp.pier
echo "elaboro $WRFOUT_per_ZNU" >> initialize.log
cat temp.pier | grep -v "TIME\:" | tr ' ' '\n' | grep -v '^$'
| head -n $s > temp.pier2
##### OUTPUT ZNU sigma level #
mv temp.pier2 "$WRFOUT".ZNU
##### OUTPUT Z ISA #####
cp "$WRFOUT".ZNU sigma
#####
# lo script octave si aspetta di trovare il file sigma con le
sigma level
# e produce in output il file ZISA con le quote
corrispondenti
#####
$REALDIR/utills/calcolo_Z.isa.m
rm sigma
cat ZISA | grep -v "#" > $WRFOUT.ZISA
rm ZISA
#### XLAT XLONG PB XLAT.U XLONG.U XLAT.V XLONG.V ##
for i in XLAT XLONG PB XLAT.U XLONG.U XLAT.V XLONG.V; do
$REALDIR/utills/$COMANDO -t 1 -V $i $WRFOUT | grep -v --
text "End" | awk '/TIME/,0' | sed -e 's/ /\n/g' | grep
-v --text '^$' | sed '1,2d' > temp.pier
#$REALDIR/utills/$2 -V $i -t 1 $WRFOUT | grep -A 20 --text
"TIME\:" > temp.pier
echo "elaboro $WRFOUT_per_$i" >> initialize.log
cat temp.pier | sed -e 's:\x00::g' > temp.pier2
##### OUTPUT #####
mv temp.pier2 "$WRFOUT".$i
done
#####
rm -f temp.pier*

echo
exit 0

```

Listing B.41: Header di setup_single_virtual_anem.c.

```
extern float myatan2(float u, float v);
```

Capitolo B. Codice sviluppato

Listing B.42: Ridefinizione della funzione atan2.c.

```

/*****/
/* Pierpaolo Garofalo
   */
/* X ciclo
   */
/* Dipartimento di Energetica
   */
/* Universita Politecnica delle Marche
   */
/*****/
/* myatan2.c
   */
/* Versione 0.0.1
   */
/* Uso: myatan2.exe u v
   */
/* Restituisce il valore di PROVENIENZA del vento nel sistema
   di */
/* rosa dei venti ossia con Nord=0 Est=90 Sud=180 Ovest=270
   */
/*
   */
/*****/
/* Impostazioni mcredit:
   */
/*      tab = 8spc
   */
/*      fake half tab enabled
   */
/*      line length 112
   */
/*****/
/* Change log:
   */
/*      01.10.2010
   */
/*      Versione 0.0.1
   */
/*****/
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <unistd.h>
#include <math.h>
// float myatan2(float u, float v);
static const char cvsid [] = "$Header: _myatan2.c, _v. _0.0.1, _
01.10.2010_$";
float myatan2(float u, float v)
{

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

/*****/
/* Variabili in input:
   */
/*      u
   */
/*      v
   */
/* Uscita:
   */
/*      angolo provenienza vento in coor rosa dei
   venti
   */
/*****/
/*****/
/*****/
/* Ruota il vettore velocita di 180 gradi: provenienza del
   vento
   */
/*****/
   u *= -1;
   v *= -1;
/*****/
/* Calcolo approssimato dell atan2 con err < 0.005 rad (
   Hastings)
   */
/*****/
   float dir=0, z=0;

   if(u == 0){

       if ( v < 0 )
           dir = 180.0;
       else
           dir = 0.0;

   }
   else{

       float z = fabsf(v/u);

       if ( z < 1.0 )
           dir = z/(1.0 + 0.28*z*z)*180/M_PI;
       else
           dir = (M_PI_2 - z/(z*z + 0.28))*180/M_PI;

       if(u > 0){

           if(v > 0)
               dir = 90 - dir;
           else
               dir = 90 + dir;

       }

   }

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

        if(u < 0){
            if(v > 0)
                dir = 270 + dir;
            else
                dir = 270 - dir;
        }
    }
}
/*****/
/* Calcolo approssimato dell atan2 con err < 0.005 rad (
   Hastings) */
/*****/
    return dir;
}

```

Listing B.43: Programma di creazione degli anemometri virtuali.

```

/*****/
/* Pierpaolo Garofalo
   */
/* X ciclo
   */
/* Dipartimento di Energetica
   */
/* Universita Politecnica delle Marche
   */
/*****/
/* setup_virtual_anem.c
   */
/* Uso: setup_virtual_anem.exe
   */
/* Costruisce un set di anemometri virtuali in base a:
   */
/* Input:
   */
/* due file di input:
   */
/* lista_AV.txt contenente l'elenco degli AV da interrogare
   */
/* lista_SL.txt contenente l'elenco di SL da estrarre
   */
/* lista di file output wrf in formato nc, preventivamente
   */
/* rinominati in formato ora unix ed elencati in ordine
   cronologico */
/* nel file di elenco files.tmp. Es:
   */
/* cat files.tmp
   */

```

B.5. Esecuzione di WRF

```
/* 1259622000
*/
/* 1259708400
*/
/* 1259794800
*/
/* 1259881200
*/
/* Recupera i dati di griglia dal file gridinfo.ln
*/
/* Recupera i timestamp dell'intera simulazione dal file
*/
/* template.time.ln. Si appoggia allo script get_time.sh che
*/
/* recupera il numero di time stamp nel file wrf in
elaborazione */
/* Necessita dei file:
*/
/* di velocita U_bin.1259622000 ecc in forma
*/
/* binaria da cui estrae preventivamente i file ridotti
*/
/* Ur_bin.1259622000 molto piu veloci da interrogare
ripetitivamente */
/* Output: MxN file xxx.AV
*/
/* nel formato: (YMDHm + PTSL (u v |U| d) * SLS) righe * TTS
colonne */
/*
*/
/* Compilazione:
*/
/* gcc -O3 -lm setup_virtual_anem.c -o setup_virtual_anem.
exe */
/* gcc -g -O3 -lm setup_virtual_anem.c -o setup_virtual_anem
.exe */
/*
*/
/* icc -g -O3 setup_virtual_anem.c -o setup_virtual_anem_icc
.exe */
/*****/
/* Impostazioni mcedit:
*/
/* tab = 8spc
*/
/* fake half tab enabled
*/
/* line length 112
*/
/*****/
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

/* Change log :
/*      16.05.2010      */
/*      */
/*      aggiunta delle informazioni di: pblh, T@0,
/*      SWlength,      */
/*      LWlength, T@Z
/*      */
/*      formato:      */
/* [Y M D H m pblh T@0 SWl LWl + (u v |U| d T@Z) * SLS] row x
/*      TTS col      */
/*      modifica del nome di salvataggio:
/*      */
/*      datanum_rows_M-Y-AV-cav.txt
/*      */
/*      30.09.2010      */
/*      modifica direzione del vento da direzione a
/*      provenienza */
/*      */
/*      */
/*****/
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <unistd.h>
#include <math.h>
#include "setup_single_virtual_anem.h"
static const char cvsid [] = "$Header: _
    setup_single_virtual_anem.c, _v._0.0.1, _01.10.2010_$";
int main(int argc, char *argv [])
{
/*****/
/* Stampa versione      */
/*****/
    printf("\n%s\n\n", cvsid);
/*****/
/* stinp:      variabile stringa di utilita generica
/*      */
/* sigmaIndex: vettore con gli indici delle sigma level da
/*      filtrare */
/*      */
/*      passato da riga di comando
/*      */
/* s:      contatore generico usato per puntare le sigma
/*      level */
/* SLS:      numero delle sigma level scelte e passate da
/*      rdc */
/* AVS:      av scelto passato come ultimo argomento
/*      */
/*****/
    unsigned int AVS;
    char strinp[255], comando[255];
    unsigned int sigmaIndex[255], ckfc;

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

    unsigned int s, SLS;
    FILE *pipe_comando;
    /******
    /* Elaborazione dei parametri passati da lista_SL
        */
    /******
    FILE *input_file_list_SL = fopen(" lista_SL.txt", "r");
    if (input_file_list_SL == NULL){

        printf("Errore_nell_apertura_di_lista_SL.txt\n");
        return -1;

    }
    SLS = 0;
    while(fgets(strinp, sizeof(strinp),
        input_file_list_SL)){

        SLS++;

    }

    rewind(input_file_list_SL);

    printf("Numero_dei_sigma_level_da_estrarre:_%d\n",SLS
        );

    if (SLS>255){

        printf("Errore,_SLS_maggiore_di_255\n");
        return -1;

    }

    for (s=0;s<SLS;s++){

        fscanf(input_file_list_SL,"%u\n",&sigmaIndex[s])
            ;
        printf("Livello_=%u\n",sigmaIndex[s]);

    }

    fclose(input_file_list_SL);
    /******
    /* Elaborazione dei parametri passati da lista_AV
        */
    /******
    FILE *input_file_list_AV = fopen(" lista_AV.txt", "r");
    if (input_file_list_AV == NULL){

        printf("Errore_nell_apertura_di_lista_AV.txt\n");
        return -1;
    }

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

    }
    AVS = 0;
    while(fgets(strinp, sizeof(strinp),
        input_file_list_AV)){

        if(*strinp!=" /0")
            AVS++;

    }

    rewind(input_file_list_AV);

    printf("Numero degli AV da analizzare: %d\n", AVS);
    unsigned int *pav = malloc(AVS*sizeof(unsigned int));

    for(s=0; s<AVS; s++){

        fscanf(input_file_list_AV, "%u\n", &pav[s]);
        printf("Anemometro %u\n", pav[s]);

    }

    fclose(input_file_list_AV);
    /*****
    /* Recupero delle caratteristiche della griglia
    /*
    /* M: numero delle righe
    /*
    /* N: numero delle colonne
    /*
    /* SL: sigma level del modello (es. 27)
    /*
    /* AV: numero delle celle ossia degli anemometri virtuali
    /*
    /*****/

    unsigned int N, M, SL, AV;

    FILE *gridinfo_file = fopen("gridinfo.ln", "r");
    if(gridinfo_file == NULL){

        printf("\nImpossibile aprire il file gridinfo.ln\n");
        return -1;

    }
    else{

        while(fgets(strinp, sizeof(strinp), gridinfo_file))
    }

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

        if (strncmp (strinp , "XLAT" , 4) == 0) {
            fscanf (gridinfo_file , "%s" , strinp);
            M = atoi (strinp);
            fscanf (gridinfo_file , "%s" , strinp);
            N = atoi (strinp);
        }

        if (strncmp (strinp , "ZNU" , 3) == 0) {
            fscanf (gridinfo_file , "%s" , strinp);
            SL = atoi (strinp);
        }
    }

    if (SLS > SL) {
        printf ("Errore : _SLS_ sigma_ level_ scelti _>_SL_
                sigma_ level_ del_ modello\n");
        fclose (gridinfo_file);
        return -1;
    }
}

fclose (gridinfo_file);

AV = M * N;

printf ("\nM_=%d_\nN_=%d_\nSL_=%d_\nAV_=%d_\n" , M, N,
        SL, AV);
/*****
/* Recupero delle caratteristiche temporali della simulazione
*/
/* Il file files.tmp contiene l'elenco dei file wrf da
elaborare */
/* ordinati cronologicamente e rinominati nel formato ora
unix */
/*****/
FILE *input_file = fopen ("files.ln" , "r");
if (input_file == NULL) {
    printf ("Errore_nell_apertura_del_files.ln\n");
    return -1;
}
/*****/

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

/* FC: numero dei file da elaborare
   */
/*****/
unsigned int FC = 0;
while(fgets(strinp, sizeof(strinp), input_file)){

    FC++;

}

rewind(input_file);

    printf("Numero file da elaborare: %d\n",FC);
/*****/
/* pnemoniclock: vettore di puntatori a stringa dei nomi dei
   file
   */
/* da elaborare.
   */
/*
   */
/*****/
char **pnemoniclock=malloc(FC * sizeof(char *));
if(pnemoniclock==NULL){

    printf("Errore: la memoria per pnemoniclock non puo
           _essere allocata\n");
    return -1;

}

unsigned int i, j;
for(i=0;i<FC;i++){

    fgets(strinp,80,input_file);
    pnemoniclock[i]=(char *)malloc(strlen(strinp) *
        sizeof(char));

    if(pnemoniclock==NULL){

        printf("La memoria non puo essere allocata
               per pnemoniclock[%d]\n",i);
        return -1;

    }

    memset(pnemoniclock[i], 0, strlen(strinp));
    strcat(pnemoniclock[i],strinp,strlen(strinp)-1);

}

fclose(input_file);
/*****/

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

/* Recupero dei TT time stamp dei file da analizzare
   */
/*****/
unsigned int *TT = malloc(FC * sizeof(unsigned int));
int status;

if(TT==NULL){

    printf("Errore: la memoria per TT non puo essere
           allocata\n");
    return -1;

}

for (ckfc=0;ckfc<FC; ckfc++){

    memset(comando, 0, 255);
    strncpy(comando, "./utils/get_time.sh",21);
    strncat(comando, pnomiclock[ckfc],strlen(pnomiclock[
        ckfc]));

    pipe_comando = popen(comando, "r");

    if(pipe_comando == NULL){

        printf("Impossibile eseguire il comando: %s\n
               ",comando);
        return -1;

    }

    fscanf(pipe_comando, "%u\n",&TT[ckfc]);

    printf("File %s\t%u\n", pnomiclock[ckfc], TT[ckfc
    ]);

    status = pclose(pipe_comando);

    if(status == -1){

        printf("Errore pclose\n");
        return -1;

    }

}

/*****/
/* Calcolo il TTmax per allocare la memoria necessaria solo
   una volta */
/*****/
unsigned int TTmax=0;

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

    for (ckfc=0;ckfc<FC;ckfc++){

        if (TT[ckfc]>TTmax)
            TTmax=TT[ckfc];

    }

    printf("TTmax_=%d\n",TTmax);

    /******
    /* Recupero del template dei time stamp di calcolo
    /* prevetivamente */
    /* salvati in template.time.ln Questo file contiene una
    /* colonna di */
    /* valori YMDHm x TTS = 9 x numero totale dei time stamp di
    /* simulazione */
    /* esso costituisce le prime 9 righe di tutti i file
    /* anemometro da */
    /* produrre
    /*
    /******
    FILE *template_time_file = fopen("template.time.ln", "r")
    ;
    if (template_time_file == NULL) {

        printf("Errore_nell_apertura_di_template.time.ln\
n");
        return -1; // -1 means file opening fail

    }
    i = 0;
    while(fgets(strinp, sizeof(strinp),
template_time_file)){
        ++i;
    }

    rewind(template_time_file);

    /******
    /* YMDHm = Y M D H m
    /*
    /* PTSL = pblh T@0 SWl LWl
    /*
    /* FLD = u v |U| dir T@Z
    /*
    /******
    unsigned int YMDHm = 5;
    unsigned int PTSL = 4;
    unsigned int FLD = 5;
    unsigned int TTS = i/YMDHm;

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

        unsigned int val_in_template = YMDHm*TTS;

        printf("Valori_in_template:_%d\n", val_in_template);
    /******
    /* E possibile ora sapere la dimensione dell'anemometro
    /* virtuale della */
    /* generica cella. Avra TTS colonne ciascuna delle quali e
    /* costituita */
    /* dai primi 9 elementi del time stamp YMDHM e PTSL poi SLS
    /* cinque */
    /* u v |U| dir T@Z per ciascun sigmalevel osservato
    /*
    /******
        unsigned int size_anemometro = TTS * (YMDHm + PTSL +
        SLS * FLD);

        float *panemometro = malloc(size_anemometro*sizeof(
        float));

        if(panemometro==NULL){

            printf("Errore: _la _memoria _per _panemometro _non _
            puo _essere _allocata\n");
            return -1;

        }
    /******
    /* Le prime 5 righe del generico anemometro virtuale vengono
    /* riempite */
    /* con i valori dei timestamp di simulazione. Queste 9 righe
    /* sono le */
    /* stesse in tutti i MxN=AV anemometri virtuali.
    /*
    /* Il file template.time.ln ha la struttura:
    /*
    /* TTSxY TTSxM TTSxD TTSxH TTSxm
    /*
    /* Il file anemometro virtuale ha la struttura:
    /*
    /* [ Y M D H m pblh T@0 SWl LWl ( u v |U| d T@Z) x SLS ] x
    /* TTS
    /*
    /******
        for (i=0; i<YMDHm; i++){

            for (j=0; j<TTS; j++){

                fscanf(template_time_file, "%f\n", &panemometro
                [i+j*(YMDHm+PTSL+SLS*FLD)]);

            }

        }
    
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

    }

    fclose(template_time_file);

/*****/
/* Inizio del ciclo sui file di output di wrf per l
   estrazione dei */
/* valori delle componenti di velocita destaggerate nei
   centri di */
/* massa delle celle di calcolo
   */
/* TTP: contatore di riporto dei time stamp fatti dopo ciascun
   file wrf */
/* elaborato. Somma dei TT dei file gia elaborati
   */
/* TT: time stamp totali nel singolo file wrf elaborato
   */
/* cav: contatore dell anemometro virtuale in elaborazione
   */
/* ckfc: contatore del file wrf in elaborazione col nome in
   formato */
/* unix clock
   */
/* t: contatore del time stamp sul file in elaborazione
   */
/* tt: contatore del time stamp cumulativo sul file in
   elaborazione */
/* Uinf: indice dell inizio di memoria dei valori di U da
   copiare */
/* Urinf: indice dell inizio memoria destinazione di copia per
   Ur idotto */
/*****/
unsigned int TTP, cav, t, tt, Urinf, Uinf;
unsigned int size_U, size_Ur, size_PBLH;

char est[255], file_AV[255], file_U[258], file_U_bin
[262], file_Ur_bin[262], file_V_bin[262], file_Vr_bin
[262], file_TK_bin[262], file_TKr_bin[262];
char file_PBLH[262], file_T2[262], file_SWDOWN[262],
file_GLW[262];
FILE *U_file, *Ur_file, *V_file, *Vr_file, *TK_file, *
TKr_file, *PBLH_file, *T2_file, *SWDOWN_file, *
GLW_file, *AV_file;
float *pU, *pV, *pTK, *pUr, *pVr, *pTKr, *pPBLH, *pT2, *
pSWDOWN, *pGLW;

/*****/
/* Fase di estrazione dei valori U e TK relativi ai sl scelti
dai file */
/* binari precedentemente estratti con uno script ncl. I file
completida*/

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

/* elaborare hanno nomi tipo U_bin.1259622000 in cui l
   estensione rapp */
/* il nome del file wrf cui si riferisce in formato ora unix.
   Questi */
/* contengono MxNxSLxTT float
   */
/* Si ottengono dei file ridotti Ur_bin.1259622000 che sono
   di piu */
/* rapida lettura ed elaborazione nei cicli successivi.
   Contengono */
/* MxNxSLxTT float
   */
/*****/
/*****/
/* Inizio della riduzione dei file binari da U, V, TK a Ur,
   Vr, TKr */
/* per ciascun file di output di wrf da elaborare
   */
/*****/
unsigned int size_max_Ur = AV * TTmax * SLS;

unsigned int size_max_U = AV * TTmax * SL;

pUr = (float *)malloc((size_max_Ur+1)*sizeof(float));

if (pUr==NULL){

    printf("Errore ,_la _memoria _per _pUr _non _puo _essere _
           allocata\n");
    return -1;

}

pU = (float *)malloc((size_max_U+1)*sizeof(float));

if (pU == NULL) {

    printf("Errore ,_la _memoria _per _pU _non _puo _essere _
           allocata\n");
    return -1;

}

for (ckfc=0;ckfc<FC;ckfc++){

    size_Ur = AV * TT[ckfc] * SLS;

    size_U = AV * TT[ckfc] * SL;
    memset(file_U_bin , 0, 258);
    strncpy(file_U_bin , "U_bin." , 6);

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

strncat ( file_U_bin , pnomiclock [ ckfc ] , strlen ( pnomiclock
[ ckfc ] ) );
memset ( file_Ur_bin , 0 , 258 );
strncpy ( file_Ur_bin , "Ur_bin." , 7 );
strncat ( file_Ur_bin , pnomiclock [ ckfc ] , strlen (
pnomiclock [ ckfc ] ) );
memset ( file_V_bin , 0 , 258 );
strncpy ( file_V_bin , "V_bin." , 6 );
strncat ( file_V_bin , pnomiclock [ ckfc ] , strlen ( pnomiclock
[ ckfc ] ) );
memset ( file_Vr_bin , 0 , 258 );
strncpy ( file_Vr_bin , "Vr_bin." , 7 );
strncat ( file_Vr_bin , pnomiclock [ ckfc ] , strlen (
pnomiclock [ ckfc ] ) );
memset ( file_TK_bin , 0 , 258 );
strncpy ( file_TK_bin , "TK_bin." , 7 );
strncat ( file_TK_bin , pnomiclock [ ckfc ] , strlen (
pnomiclock [ ckfc ] ) );
memset ( file_TKr_bin , 0 , 258 );
strncpy ( file_TKr_bin , "TKr_bin." , 8 );
strncat ( file_TKr_bin , pnomiclock [ ckfc ] , strlen (
pnomiclock [ ckfc ] ) );
size_t c_fread;

U_file = fopen ( file_U_bin , "rb" );

if ( U_file == NULL ) {

printf ( "Apertura_file_%s_fallita\n" ,
file_U_bin );
return -1;
}

c_fread = fread ( pU , sizeof ( float ) , size_U , U_file
);

fclose ( U_file );
for ( t=0; t<IT[ ckfc ]; t++){

for ( s=0; s<SLS; s++){

Urinf = t * AV * SLS + s * AV;
Uinf = t * AV * SL + ( sigmaIndex [ s ] - 1 ) * AV
;

memcpy ( &pUr [ Urinf ] , &pU [ Uinf ] , AV * sizeof (
float ) );

}

}

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

Ur_file = fopen(file_Ur_bin , "wb");
if (Ur_file == NULL) {

    printf("Apertura_in_scrittura_file_%s_fallita
    \n",file_Ur_bin);
    return -1;
}

c_fread = fwrite(pUr, sizeof(float), size_Ur ,
Ur_file);

fclose(Ur_file);
V_file = fopen(file_V_bin , "rb");

if (V_file == NULL) {

    printf("Apertura_file_%s_fallita\n",
    file_V_bin);
    return -1; // -1 means file opening fail
}

c_fread = fread(pU, sizeof(float), size_U , V_file
);

fclose(V_file);
for (t=0;t<TT[ckfc];t++){

    for (s=0;s<SLS;s++){

        Urinf = t * AV * SLS + s * AV;
        Uinf = t * AV * SL + (sigmaIndex[s]-1) * AV
        ;

        memcpy(&pUr[Urinf], &pU[Uinf], AV * sizeof(
        float));

    }

}

Vr_file = fopen(file_Vr_bin , "wb");
if (Vr_file == NULL) {

    printf("Apertura_in_scrittura_file_%s_fallita
    \n",file_Vr_bin);
    return -1;
}
c_fread = fwrite(pUr, sizeof(float), size_Ur ,
Vr_file);

fclose(Vr_file);

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

TK_file = fopen(file_TK_bin , "rb");

    if (TK_file == NULL) {

        printf("Apertura_file_%s_fallita\n",
            file_TK_bin);
        return -1; // -1 means file opening fail
    }

    c_fread = fread(pU, sizeof(float), size_U,
        TK_file);

fclose(TK_file);
for (t=0;t<IT[ckfc];t++){

    for (s=0;s<SLS;s++){

        Urinf = t * AV * SLS + s * AV;
        Uinf = t * AV * SL + (sigmaIndex[s]-1) * AV
            ;

        memcpy(&pUr[Urinf], &pU[Uinf], AV * sizeof(
            float));

    }

}

TKr_file = fopen(file_TKr_bin , "wb");
    if (TKr_file == NULL) {

        printf("Apertura_in_scrittura_file_%s_fallita
            \n", file_TKr_bin);
        return -1;

    }

    c_fread = fwrite(pUr, sizeof(float), size_Ur,
        TKr_file);

fclose(TKr_file);

}
free(pU);
pU = NULL;
/*****/
/* Fine della riduzione dei file binari da U, V, TK a Ur, Vr,
TKr */
/* per ciascun file di output di wrf da elaborare
*/
/*****/

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

/*****/
/*****/
/* Inizio del ciclo vero di estrazione degli anemometri
   virtuali */
/* Ciclo su ciascuna cella/anemometro virtuale
   */
/*****/
/*****/

pVr = (float *)malloc((size_max_Ur+1)*sizeof(float));

    if (pVr == NULL) {

        printf("Errore , la memoria per pVr non puo essere
               _allocata\n");
        return -1;

    }

pTKr = (float *)malloc((size_max_Ur+1)*sizeof(float));

    if (pTKr == NULL) {

        printf("Errore , la memoria per pTKr non puo
               essere _allocata\n");
        return -1;

    }

unsigned int size_max_PBLH = AV * TTmax;
pPBLH = (float *)malloc((size_max_PBLH+1)*sizeof(float));

    if (pPBLH == NULL) {

        printf("Errore , la memoria per pPBLH non puo
               essere _allocata\n");
        return -1;

    }

pT2 = (float *)malloc((size_max_PBLH+1)*sizeof(float));

    if (pT2 == NULL) {

        printf("Errore , la memoria per pT2 non puo
               essere _allocata\n");
        return -1;

    }

pSWDOWN = (float *)malloc((size_max_PBLH+1)*sizeof(float)
);

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

        if (pSWDOWN == NULL) {

            printf(" Errore ,_la _memoria _per _pSWDOWN _non _
                puo _essere _allocata \n");
            return -1;

        }
pGLW = (float *) malloc ((size_max_PBLH+1)*sizeof(float));

        if (pGLW == NULL) {

            printf(" Errore ,_la _memoria _per _pGLW _non _puo _
                essere _allocata \n");
            return -1;

        }

        float a;
/*****
/* Inizio ciclo sugli anemometri virtuali scelti AVS
*/
/*****
        for (cav=0;cav<AVS;cav++){

            TTP = 0;
            memset(file_AV , 0, 255);
            sprintf(file_AV , "%d%s" , pav[cav] , ".AV");

            printf("Elaborazione _anemometro _virtuale _%s\n" ,
                file_AV);
/*****
/* Ciclo sui file di output di wrf rinominati in ora unix per
   il
*/
/* riordino cronologico
*/
/*****

            for (ckfc=0;ckfc<FC;ckfc++){

                memset(file_Ur_bin , 0, 258);
                strncpy(file_Ur_bin , "Ur_bin." ,7);
                strcat(file_Ur_bin , pnomicklock[ckfc] , strlen(
                    pnomicklock[ckfc]));

                memset(file_Vr_bin , 0, 258);
                strncpy(file_Vr_bin , "Vr_bin." ,7);
                strcat(file_Vr_bin , pnomicklock[ckfc] , strlen(
                    pnomicklock[ckfc]));

                memset(file_TKr_bin , 0, 258);
                strncpy(file_TKr_bin , "TKr_bin." ,8);

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

strncat ( file_TKr_bin , pnomicklock [ ckfc ] , strlen (
    pnomicklock [ ckfc ] ) );
memset ( file_PBLH , 0 , 258 );
strncpy ( file_PBLH , "PBLH.bin." , 9 );
strncat ( file_PBLH , pnomicklock [ ckfc ] , strlen (
    pnomicklock [ ckfc ] ) );

memset ( file_T2 , 0 , 258 );
strncpy ( file_T2 , "T2.bin." , 7 );
strncat ( file_T2 , pnomicklock [ ckfc ] , strlen (
    pnomicklock [ ckfc ] ) );

memset ( file_SWDOWN , 0 , 258 );
strncpy ( file_SWDOWN , "SWDOWN.bin." , 11 );
strncat ( file_SWDOWN , pnomicklock [ ckfc ] , strlen (
    pnomicklock [ ckfc ] ) );
memset ( file_GLW , 0 , 258 );
strncpy ( file_GLW , "GLW.bin." , 8 );
strncat ( file_GLW , pnomicklock [ ckfc ] , strlen (
    pnomicklock [ ckfc ] ) );
/*****
/* Determinazione della dimensione del nuovo file U ridotto
   binario */
/* contenente i soli sigma level richiesti precedentemente
   creato */
*****/
size_Ur = AV * TT [ ckfc ] * SLS;

size_PBLH = AV * TT [ ckfc ];

size_t c_fread;

Ur_file = fopen ( file_Ur_bin , "rb" );

    if ( Ur_file == NULL ) {

        printf ( "Apertura file %s fallita\n" ,
            file_Ur_bin );
        return -1;
    }

    c_fread = fread ( pUr , sizeof ( float ) , size_Ur ,
        Ur_file );

fclose ( Ur_file );

Vr_file = fopen ( file_Vr_bin , "rb" );

    if ( Vr_file == NULL ) {

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
        printf("Apertura_file_%s_fallita\n",
              file_Vr_bin);
        return -1;
    }

    c_fread = fread(pVr, sizeof(float), size_Ur,
                   Vr_file);

fclose(Vr_file);

TKr_file = fopen(file_TKr_bin, "rb");

if (TKr_file == NULL) {

    printf("Apertura_file_%s_fallita\n",
          file_TKr_bin);
    return -1;
}

c_fread = fread(pTKr, sizeof(float), size_Ur,
               TKr_file);

fclose(TKr_file);

PBLH_file = fopen(file_PBLH, "rb");

if (PBLH_file == NULL) {

    printf("Apertura_file_%s_fallita\n",
          file_PBLH);
    return -1;
}

c_fread = fread(pPBLH, sizeof(float),
               size_PBLH, PBLH_file);

fclose(PBLH_file);
T2_file = fopen(file_T2, "rb");

if (T2_file == NULL) {

    printf("Apertura_file_%s_fallita\n",
          file_T2);
    return -1;
}

c_fread = fread(pT2, sizeof(float), size_PBLH,
               T2_file);
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

fclose(T2_file);

SWDOWN_file = fopen(file_SWDOWN, "r");

    if (SWDOWN_file == NULL) {

        printf("Apertura_file %s fallita\n",
            file_SWDOWN);
        return -1;
    }

    c_fread = fread(pSWDOWN, sizeof(float),
        size_PBLH, SWDOWN_file);

fclose(SWDOWN_file);

GLW_file = fopen(file_GLW, "r");

    if (GLW_file == NULL) {

        printf("Apertura_file %s fallita\n",
            file_GLW);
        return -1;
    }

    c_fread = fread(pGLW, sizeof(float),
        size_PBLH, GLW_file);

fclose(GLW_file);

/*****
/* Ciclo sul time stamp t e sigma level per la costruzione
   dell av */
*****/
for (t=0;t<TT[ckfc];t++){

    tt = t + TTP;
    i = YMDHm+tt*(YMDHm+PTSL+FLD*SLS);
    j = pav[cav]+t*AV;
    panemometro[i] = pPBLH[j];

    panemometro[i+1] = pT2[j];

    panemometro[i+2] = pSWDOWN[j];

    panemometro[i+3] = pGLW[j];

    for (s=0;s<SLS;s++){

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

        i = YMDHm+PTSL+FLD*s+tt*(YMDHm+PTSL+FLD*
            SLS);
        j = pav[cav]+s*AV+t*(AV*SLS);
        panemometro[i] = pUr[j];

        panemometro[i+1] = pVr[j];

        panemometro[i+4] = pTKr[j];

        panemometro[i+2] = sqrt(pUr[j]*pUr[j]+pVr
            [j]*pVr[j]);

    /******
    /* Calcolo approssimato dell atan2 con err < 0.005 rad (
    /* Hastings) */
    /* L'angolo viene trasformato in angolo di provenienza del
    /* vento */
    /******
        panemometro[i+3] = myatan2(pUr[j],pVr[j])
            ;
    /******
    /* Calcolo approssimato dell atan2 con err < 0.005 rad (
    /* Hastings) */
    /******

    }
    }
    TTP += TT[ckfc];

}

printf("Salvo il file anemometro:_%s\n\n\n",file_AV
);

AV_file = fopen(file_AV,"wb");

size_t c_fwrite;

c_fwrite = fwrite(panemometro, sizeof(float),
size_anemometro, AV_file);

fclose(AV_file);
}
/******
/* Fine ciclo sugli anemometri virtuali scelti AVS
/*
/******

free(pUr);
pUr = NULL;

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

    free (pVr);
    pVr = NULL;

    free (pTKr);
    pTKr = NULL;
    free (pPBLH);
    pPBLH = NULL;

    free (pT2);
    pT2 = NULL;

    free (pSWDOWN);
    pSWDOWN = NULL;

    free (pGLW);
    pGLW = NULL;
    free (panemometro);
    panemometro = NULL;
    /***/
    return 0;
}

```

Listing B.44: Programma di creazione delle tabelle di occorrenza.

```

    /***/
    /* Pierpaolo Garofalo */
    /* 11.07.2011 */
    /* Dipartimento di Energetica */
    /* Universita Politecnica delle Marche */
    /***/
    * setup_cwd.c
    */
    /* Uso: setup_single_cwd.exe
    */
    /* Costruisce un file con le occorrenze ventose per petalo
    */
    /* Il file e' una colonna [pet x (100 bins)]
    */
    /*
    */
    /* AV1
    */
    /* pet1
    */
    /* bin1 ... bin100
    */
    /*
    */
    /* Vengono usati 100 bin ampi 0.5m/sec per campionare le
    velocità */

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

/* da 0m/s a 50m/s max
*/
/*
*/
/* Input: file .AV calcolato in precedenza nel formato con le
tk */
/* file SLS.tmp con i sigma level scelti
*/
/* file gridinfo.ln con le info di griglia
*/
/* file template.time.ln per ricavare i TTS
*/
/* Output: SLS file xxx.cwd binario e ascii
*/
/* nel formato: (BINS x NOP)
*/
/*
*/
/* Compilazione:
*/
/* gcc -O3 -lm setup_cwd.c -o setup_cwd.exe
*/
/* gcc -g -O3 -lm setup_cwd.c -o setup_cwd.exe
*/
/*****/
/* Impostazioni mcedit:
*/
/* tab = 8spc
*/
/* fake half tab enabled
*/
/* line length 112
*/
/*
*/
/*****/
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <unistd.h>
#include <math.h>
static const char cvsid [] = "$Header: _setup_single_cwd.c, _v. _
0.0.3, _11.07.2011_$";
void uso(char *s)
{
printf("Uso:\n");
printf(" _%s _12_1128\n", s);
printf(" _12_ _=numero_petali\n");
printf(" _1128_ _=anemometro_da_interrogare\n\n");
exit (8);
}

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

int main(int argc, char *argv [])
{
  /******
  /* Stampa versione
      */
  /******
  printf("\n%s\n\n",cvsid);

  /******
  /* Parsing riga di comando
      */
  /******
  unsigned int lenname=strnlen(argv[0],255)+1;
  if(lenname>255){
    printf("\nErrore: _nome_file _troppo_lungo\n");
    return -1;
  }
  char nomeexe[lenname];
  strcpy(nomeexe,argv[0]);
  if(argc != 3){
    uso(nomeexe);
    exit(1);
  }

  unsigned int NOP = atoi(argv[1]);
  unsigned int AVS = atoi(argv[2]);
  unsigned int BINS = 100;
  if(NOP>360)
    NOP=360;
  printf(" bins _=%u\npetali _=%u\nanemometro _=%u\n\n",
    BINS, NOP,AVS);
  /******
  /* strup:      variabile stringa di utilita generica
      */
  /* sigmaIndex: vettore con gli indici delle sigma level da
     filtrare */
  /* passato da riga di comando
      */
  /* s:          contatore generico usato per puntare le sigma
     level */
  /* SLS:        numero delle sigma level scelte e passate da
     rdc */
  /* VMAX:       massima velocita considerata
      */
  /******
  float VMAX = 50;
  char strinp[255];
  unsigned int sigmaIndex[255];
  float sigmaZeta[255];
  unsigned int s=0, SLS=0;

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
float ss;

/*****
/* Recupero il numero dei sigma leve scelti
*/
/*****/
unsigned int i;
FILE *SLS_file = fopen("SLS.tmp", "r");

if(SLS_file == NULL){

    printf("\nImpossibile aprire il file SLS.tmp\n");
    return -1;

}

while(fgets(strinp, sizeof(strinp), SLS_file)){

    SLS++;

}

printf("SLS=%u\n", SLS);
rewind(SLS_file);

for(i=0; i<SLS; i++){

    fscanf(SLS_file, "%u%f", &sigmaIndex[i], &ss);
    printf("s[%u]=%f\n", sigmaIndex[i], ss);

}

fclose(SLS_file);

unsigned int SLT=0;

FILE *ZISA_file = fopen("ZISA.tmp", "r");

if(ZISA_file == NULL){

    printf("\nImpossibile aprire il file ZISA.tmp\n");
    ;
    return -1;

}

while(fgets(strinp, sizeof(strinp), ZISA_file)){

    SLT++;

}
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

    }

    printf("SLT_sigma_level_totali_nel_modello=%u\n",SLT
    );

    rewind(ZISA_file);

    for(i=0;i<SLT;i++){

        fscanf(ZISA_file,"%f",&sigmaZeta[i]);

    }

    fclose(ZISA_file);

    /*****/
    /* Recupero delle caratteristiche della griglia
        */
    /* M: numero delle righe
        */
    /* N: numero delle colonne
        */
    /* SL: sigma level del modello (es. 27)
        */
    /* AV: numero delle celle ossia degli anemometri virtuali
        */
    /*****/
    unsigned int N, M, SL, AV;
    FILE *gridinfo_file = fopen("gridinfo.ln","r");
    if(gridinfo_file == NULL){

        printf("\nImpossibile aprire il file gridinfo.ln\n
        n");
        return -1;

    }
    else{

        while(fgets(strinp, sizeof(strinp), gridinfo_file
        )){

            if(strncmp(strinp,"XLAT",4)==0){

                fscanf(gridinfo_file,"%s",strinp);
                M=atoi(strinp);
                fscanf(gridinfo_file,"%s",strinp);
                N=atoi(strinp);

            }

        }
    }

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

        if(strncmp(strinp,"ZNU",3)==0){
            fscanf(gridinfo_file,"%s",strinp);
            SL = atoi(strinp);
        }
    }

    if(SLS>SL){

        printf("Errore: SLS sigma_level sceleti > SL
        sigma_level del modello\n");
        fclose(gridinfo_file);
        return -1;
    }

}

fclose(gridinfo_file);

AV = M * N;
AV = 1;

printf("\nM=%d\nN=%d\nSL=%d\nAV=%d\n", M, N,
        SL, AV);
/*****/
/* Recupero del template dei time stamp di calcolo
   prevetivamente */
/* salvati in template.time.ln Questo file contiene una
   colonna di */
/* valori YMDHm x TTS = 5 x numero totale dei time stamp di
   simulazione */
/* esso costituisce le prime 5 righe di tutti i file
   anemometro da */
/* leggere in memoria
   */
/*****/
FILE *template_time_file = fopen("template.time.ln", "r")
;
if (template_time_file == NULL) {

    printf("Errore nell'apertura di template.time.ln\
    n");
    return -1; // -1 means file opening fail

}
i = 0;
while(fgets(strinp, sizeof(strinp),
template_time_file)){
    ++i;

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

    }
    unsigned int YMDHm = 5;
    unsigned int PTSL = 4;
    unsigned int FLD = 5;
    unsigned int TTS = i/YMDHm;
    unsigned int val_in_template = YMDHm*TTS;
    printf("Valori_in_template: %d\n", val_in_template);
    /*****/
    /* E possibile ora sapere la dimensione dell'anemometro
       virtuale della */
    /* generica cella. Avra TTS colonne ciascuna delle quali e
       costituita */
    /* dai primi 5 elementi del time stamp YMDHM
       */
    /* poi 4 termini PTSL e poi SLS cinque FLD
       */
    /* u v |U| dir tk per ciascun sigmalevel osservato
       */
    /*****/
    unsigned int size_anemometro = TTS * (YMDHm + PTSL +
        SLS * FLD);
    float *panemometro = malloc(size_anemometro*sizeof(
        float));
    if(panemometro==NULL){
        printf("Errore: la memoria per panemometro non
            puo_essere allocata\n");
        return -1;
    }
    fclose(template_time_file);
    /*****/
    /* E possibile ora sapere la dimensione della memoria da
       allocare per */
    /* costruire una matrice cwd da salvare poi in SLS file
       */
    /* separati. SLSx[NOPxBINS]
       */
    /* NOP = numero petali: N ecc
       */
    /* BINS = numero delle classi di campionamento della velocita
       */
    /* SLS = sigma level scelti per l analisi
       */
    /*****/
    unsigned int pet;
    unsigned int bin;
    unsigned int size_cwd_globale = SLS*(NOP*BINS);
    float *pcwdg = calloc(size_cwd_globale, sizeof(unsigned
        int));
    printf("size_cwd_global_=%u\n", size_cwd_globale);
    if(pcwdg==NULL){

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

        printf("Errore: la memoria per pcwdg non puo essere
              allocata\n");
        return -1;
    }
    /*****/
    /* Inizio del ciclo di lettura del file anemometro virtuali
       */
    /* Il file AV con nome i.AV
       */
    /* I campi che interessano nel file sono:
       */
    /* YMDHm + PTSL + s x FLD + 2 + t x (YMDHm + PTSL + SLS x FLD
       ); ( Modulo U )
       */
    /* YMDHm + PTSL + s x FLD + 3 + t x (YMDHm + PTSL + SLS x FLD
       ); ( dir )
       */
    /* ...
       */
    /* YMDHm + PTSL + (SLS-1) x FLD + 2 + (TTS-1) x (YMDHm + PTSL
       + SLS x FLD);
       */
    /* YMDHm + PTSL + (SLS-1) x FLD + 3 + (TTS-1) x (YMDHm + PTSL
       + SLS x FLD);
       */
    /* cav: anemometro virtuale in elaborazione (AV)
       */
    /* s : contatore del sigma level nella lettura dell av (SLS)
       */
    /* t : contatore del timestep nella lettura dell av (TTS)
       */
    /* dbin: ampiezza bin
       */
    /* dpet: ampiezza petalo
       */
    /*****/
    unsigned int cav, t, pu;
    int status;
    float dbin = VMAX/BINS;
    float dpet = 360/NOP;
    float U, dir;
    char file_AV[255];

    FILE *AV_file;
    /*****/
    /* Interrogazione dell'anemometro virtuale
       */
    /*****/
    memset(file_AV, 0, 255);
    sprintf(file_AV, "%d%s", AVS, ".AV");
    printf("Elaborazione anemometro virtuale %s\n",
          file_AV);
    size_t c_fread;
    AV_file = fopen(file_AV, "rb");
    if (AV_file == NULL) {

```

B.5. Esecuzione di WRF

```

        printf(" Apertura file _%s_ fallita \n", file_AV);
        return -1;
    }
    c_fread = fread(panemometro, sizeof(float),
        size_anemometro, AV_file);
    fclose(AV_file);
    for(t=0;t<TTS;t++){
        for(s=0;s<SLS;s++){
            pu = YMDHm + PTSL + s * FLD + 2 + t * (YMDHm
                + PTSL + SLS * FLD);
            U = panemometro[pu];
            /*
                La direzione del vento nei file anemometri
                è quella di provenienza
                nel sistema rosa dei venti:
                N -> 0
                E -> 90
                S -> 180
                W -> 270
                e i valori vanno da 0 a 360.
                Nei file cwd i petali sono centrati nella
                direzione principale
                N ed anche E-S-W se 90/dpet è un intero.
                Il campionamento andrà fatto riposizionando
                l'origine 0 di dpet/2 a sinistra. In
                questo modo il petalo
                n.1 sarà quello centrato a nord. Dato che
                così gli angoli andranno
                da dpet/2 a 360+dpet/2 si fa l'operazione
                di modulo (resto)
                a 360 per rimediare con gli angoli > di
                360. Dato che l'operatore
                % ossia modulo in C opera solo tra interi
                si usa allora la formuletta
                alfa = alfa - floor(alfa/360)*360
                per poter operare su alfa che è un float
            */
            dir = (panemometro[pu + 1] + (dpet / 2));
            dir = dir - floor(dir / 360)*360;
            bin = floor((U / dbin) + 1);
            pet = floor((dir / dpet) + 1);

            pu = (bin - 1) + (pet - 1) * BINS + s * BINS *
                NOP;

            pcwdg[pu]++;
        }
    }
}
/*****
/* Salvataggio file cwd in formato binario e ascii
*/

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

/*****/
FILE *cwd_file;
FILE *cwd_file_txt;

char file_cwd [255];
char file_cwd_txt [255];

for (s=0;s<SLS;s++){

    memset(file_cwd , 0, 255);
    memset(file_cwd_txt , 0, 255);

    sprintf(file_cwd , "AV%d_level_%u_BINS%d_NOP%d%s" ,
        AVS, (unsigned int) sigmaZeta[sigmaIndex[s]] ,
        BINS, NOP, ".cwd");

    printf("Salvataggio_file_cwd_%s\n" ,file_cwd);
    cwd_file = fopen(file_cwd , "wb");
    if (cwd_file == NULL) {
        printf("Apertura_in_scrittura_file_%s_fallita\n" ,file_cwd);
        return -1;
    }
    c_fread = fwrite(&pcwdg[s * BINS * NOP] , sizeof(
        unsigned int) , NOP * BINS, cwd_file);
    fclose(cwd_file);

    sprintf(file_cwd_txt , "AV%d_level_%u_BINS%d_NOP%d%
        s" , AVS, (unsigned int) sigmaZeta[sigmaIndex[s]] ,
        BINS, NOP, ".cwd.txt");

    fclose(cwd_file);

    printf("Salvataggio_file_cwd.txt_%s\n" ,file_cwd_txt);
    cwd_file_txt = fopen(file_cwd_txt , "w");
    if (cwd_file_txt == NULL) {
        printf("Apertura_in_scrittura_file_%s_fallita\n" ,file_cwd_txt);
        return -1;
    }
    int j=0;
    //c_fread = fwrite(&pcwdg[s * BINS * NOP] , sizeof
        (unsigned int) , NOP * BINS, cwd_file_txt);
    for (j=0;j<NOP;j++){
        for (i=0;i<BINS;i++){
            fprintf(cwd_file_txt , "%f_" ,pcwdg[(s *
                BINS * NOP) + (j * NOP) + i]);
        }
        fprintf(cwd_file_txt , "\n");
    }
    fclose(cwd_file_txt);

```

B.5. Esecuzione di WRF

```
}  
    return 0;  
}
```

Listing B.45: Programma di creazione delle rose dei venti.

```
#!/bin/bash  
#####  
# Pierpaolo Garofalo  
# X Ciclo  
# Dipartimento di Energetica  
# Universita Politecnica delle Marche  
#####  
# Script bash: draw_rose.sh  
# Versione: 0.0.0  
# Data: 03.10.2010  
#  
# Descrizione:  
#  
# Ricampiona i file cwd di un dato livello per un dato  
# anemometro  
#  
# Es: 2009_May_AV_1128_level_63_BINS_100_NOP_12.cwd.txt  
#  
# in bin ampi 2m/s fino a 20m/s 10m/s tra 20 e 30m/s 20m/s  
# tra 30 e 50m/s  
# in formato txt:  
#  
# Usa:  
#  
# octave  
#  
# Produce gli output:  
#  
# 2009_May_AV_1128_level_63_BINS_100_NOP_12.cwd.txt.  
# rsmp_12  
#  
# e la rosa dei venti in formato eps  
#  
# rosa_2009_May_AV_1128_level_63_BINS_100_NOP_12.cwd.  
# txt.rsmp_12.eps  
#  
# Uso:  
# draw_rose.sh nomefile_da_ricampionare  
#  
# nome del file nel formato:  
#  
# YYYY_MMM_AV_xxx_level_xx_BINS_xxx_NOP_xx...  
#
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
#####  
#  
#####  
if [ "$#" != "1" ]; then  
    echo  
    echo "Passare il nome del file cwd in formato txt da  
        ricampionare"  
    echo  
    echo "Verra prodotto un file cwd testuale ricampionato in  
        "  
    echo "in bin ampi 2m/s fino a 20m/s 10m/s tra 20 e 30m/s  
        20m/s tra 30 e 50m/s"  
    echo "e una rosa dei venti in formato eps"  
    echo  
    exit 1  
  
fi  
if [ -f ${1} ]; then  
    export NOMEFILE=${1}  
  
else  
    echo  
    echo "Il ${1} file non esiste"  
    echo  
    exit 1  
  
fi  
NEWBINS=12  
GRPBINS="4 4 4 4 4 4 4 4 4 20 40"  
# -  
# --- Calcolo ampiezza bin con 50 m/sec max  
# -  
echo  
echo "Ricampionamento ${NOMEFILE} con ${NEWBINS} bins di  
    ampiezza 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 10 20m/s"  
echo  
# -  
# --- Estrazione delle righe del cwd da ricampionare  
# -  
# -  
# --- 2009_May-AV-1128_level-63_BINS_100-rsmp-12-NOP-12.cwd.  
    txt  
# -  
export NOP=$(echo ${NOMEFILE%.*} | sed -e 's/_/\n/g' | tr -d  
    ' ' | grep -A 1 NOP | tail -n 1)  
echo "NOP = " $NOP  
DPET=$(echo -e "DPET=360/${NOP}" | octave -q | grep "DPET ="  
    | cut -d "=" -f2 | tr -d ' ' )  
echo "NOMEFILE = " $NOMEFILE  
export NOMEFILER=${NOMEFILE}.rsmp-12  
# -
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

# — Avvio script octave per il resampling
# —
echo -e "\
cwr=load(\"${NOMEFILE}\"); \n\
cwr=zeros(${NOP},12); \n\
for i=1:10 \n\
    for j=1:4 \n\
        cwr(:,i) = cwr(:,i) + cwr(:,(i-1)*4+j); \n\
    endfor \n\
endfor \n\

for j=1:20 \n\
    cwr(:,11) = cwr(:,11) + cwr(:,40+j); \n\
endfor \n\

for j=1:40 \n\
    cwr(:,12) = cwr(:,12) + cwr(:,60+j); \n\
endfor \n\

S = sum(sum(cwr)); \n\
P = cwr ./ S; \n\
P = P .* 100; \n\
save(\"-ascii\", \"${NOMEFILE}\", \"P\");" | octave -q
# —
# — Ricavo il valore massimo di ciascun petalo nella matrice
# —
MAX=$(echo -e "\
a=load(\"${NOMEFILE}\"); \n\
M=max(sum(a,2)" | octave -q | grep "M =" | cut -d "="
-f 2)

#####
# Esportazione della rosa dei venti in formato eps
#####
export FILEPS="rosa_${NOMEFILE}.eps"
#cp rosa_common.eps $FILEPS
#####
#####
echo -e "\
%!PS-Adobe-3.0          EPSF-3.0
%%BoundingBox:         0 0 459 346
%%Creator:              Pierpaolo Garofalo
%%Title:                RosaDeiVenti
%%CreationDate:         Oct.04,2010
/Times-Roman findfont 15 scalefont setfont
/mm {2.8346 mul} def
/shx 1 def
/shy 1 def
/nstr 7 string def
/char 1 string def " > $FILEPS
echo -e "\
/color12 {0.748 0 0} def

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
/color11 {1 0.196 0} def
/color10 {1 0.392 0} def
/color9 {1 0.588 0} def
/color8 {1 1 0} def
/color7 {0.588 1 0.392} def
/color6 {0.392 1 0.588} def
/color5 {0.196 1 0.98} def
/color4 {0 0.784 1} def
/color3 {0 0.392 1} def
/color2 {0 0.196 1} def
/color1 {0 0 1} def
/centerhshow {
  dup stringwidth pop 2 div neg 0 rmoveto
  show
} def
/centercshow {
  dup stringwidth 2 div neg exch 2 div neg exch rmoveto
  %dup stringwidth 2 div neg 0 rmoveto
  show
} def
/prt-n { nstr cvs centerhshow } def
/prtchar %stack: code
{ char 0
  3 -1 roll put
  char show } def
/b 160 def
/h 120 def " >> $FILEPS
echo -e " \
shx mm shy mm translate
/frame {
  newpath
  0 mm 0 mm moveto
  b mm 0 mm rlineto
  0 mm h mm rlineto
  b mm neg 0 mm rlineto
  %h mm neg 0 mm rlineto
  closepath
  2 setlinewidth
  stroke
} def
frame
/drawbox {
  newpath
  0 0 moveto
  15 mm 0 mm rlineto
  0 mm 5 mm rlineto
  -15 mm 0 mm rlineto
  closepath
  gsave
  setrgbcolor
  fill
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

    grestore
    gsave
        0.5 setlinewidth
        stroke
    grestore
} def
/labelframe {
    newpath
    b mm 2 div 40 mm add
    /ox exch def
    55 mm 37.5 mm sub
    /oy exch def
    ox oy moveto
    currentpoint translate
    0 0 moveto
    0 mm 75 mm rlineto
    35 mm 0 mm rlineto
    0 mm -75 mm rlineto
    closepath
    gsave
        1 setlinewidth
        stroke
    grestore
    /dy 6 mm def
    /oy oy 2 mm add def
    /ox ox 2 mm add def
    2 mm 2 mm moveto
    currentpoint translate
    color12 drawbox
    gsave
        /Times-Roman findfont 10 scalefont setfont
        16 mm 1 mm moveto
        (30-50 m/s) show
        -16 -1 moveto
    grestore " >> $FILEPS
echo -e "\
0 dy moveto
currentpoint translate
/oy oy dy add def

color11 drawbox
gsave
    /Times-Roman findfont 10 scalefont setfont
    16 mm 1 mm moveto
    (20-30 m/s) show
    -16 -1 moveto
grestore
0 dy moveto
currentpoint translate
/oy oy dy add def

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
color10 drawbox
gsave
  /Times-Roman findfont 10 scalefont setfont
  16 mm 1 mm moveto
  (18–20 m/s) show
  -16 -1 moveto
grestore
0 dy moveto
currentpoint translate
/oy oy dy add def

color9 drawbox
gsave
  /Times-Roman findfont 10 scalefont setfont
  16 mm 1 mm moveto
  (16–18 m/s) show
  -16 -1 moveto
grestore
0 dy moveto
currentpoint translate
/oy oy dy add def

color8 drawbox
gsave
  /Times-Roman findfont 10 scalefont setfont
  16 mm 1 mm moveto
  (14–16 m/s) show
  -16 -1 moveto
grestore
0 mm dy moveto
currentpoint translate
/oy oy dy add def

color7 drawbox
gsave
  /Times-Roman findfont 10 scalefont setfont
  16 mm 1 mm moveto
  (12–14 m/s) show
  -16 -1 moveto
grestore
0 dy moveto
currentpoint translate
/oy oy dy add def

color6 drawbox
gsave
  /Times-Roman findfont 10 scalefont setfont
  16 mm 1 mm moveto
  (10–12 m/s) show
  -16 -1 moveto
grestore
```

B.5. Esecuzione di WRF

```
0 dy moveto
currentpoint translate
/oy oy dy add def

color5 drawbox
gsave
  /Times-Roman findfont 10 scalefont setfont
  16 mm 1 mm moveto
  (8-10 m/s) show
  -16 -1 moveto
grestore " >> $FILEPS

echo -e "\
0 dy moveto
currentpoint translate
/oy oy dy add def

color4 drawbox
gsave
  /Times-Roman findfont 10 scalefont setfont
  16 mm 1 mm moveto
  (6-8 m/s) show
  -16 -1 moveto
grestore
0 dy moveto
currentpoint translate
/oy oy dy add def

color3 drawbox
gsave
  /Times-Roman findfont 10 scalefont setfont
  16 mm 1 mm moveto
  (4-6 m/s) show
  -16 -1 moveto
grestore
0 dy moveto
currentpoint translate
/oy oy dy add def

color2 drawbox
gsave
  /Times-Roman findfont 10 scalefont setfont
  16 mm 1 mm moveto
  (2-4 m/s) show
  -16 -1 moveto
grestore
0 dy moveto
currentpoint translate
/oy oy dy add def

color1 drawbox
```

Capitolo B. Codice sviluppato

```
gsave
  /Times-Roman findfont 10 scalefont setfont
  16 mm 1 mm moveto
  (0-2 m/s) show
  -16 -1 moveto
grestore
ox neg
oy neg
translate
} def
labelframe
/xc 60 def
/yc 55 def
gsave
xc mm yc mm translate
newpath
0 mm 0 mm 50 mm 0 360 arc
0.2 setlinewidth
0.5 setgray
stroke
/r 50 def
/dr 5 def
9 {
  r dr sub
  /r exch def
  0 mm 0 mm r mm 0 360 arc
  0.1 setlinewidth
  [1 2 1 2] 0 setdash
  0.5 setgray
  stroke
} repeat
0 0 moveto
/r 50 def
12 {
  r mm 0 mm lineto
  0 0 moveto
  30 rotate
} repeat
stroke
/Times-Roman findfont 9 scalefont setfont
/gr 0 def
/dgr 30 def
/txt gr def
newpath
0 0 moveto
12 {
  gr rotate
  54 mm 0 mm moveto
  /txt gr 90 le {90 gr sub}{450 gr sub}ifelse def
  gr neg rotate
  txt prt-n
```

B.5. Esecuzione di WRF

```

        202 prtchar
        0 0 moveto
        /gr gr dgr add def
        } repeat
grestore
%----- programma di disegno -----
%----- da appendere -----
" >> $FILEPS
#####
#####
AV=$(echo ${NOMEFILER} | sed -e 's/_/\n/g' | grep -A 1 AV |
tail -n 1)
YEAR=$(echo ${NOMEFILER} | sed -e 's/_/\n/g' | head -n 1)
MONTH=$(echo ${NOMEFILER} | sed -e 's/_/\n/g' | head -n 2 |
tail -n 1)
Z=$(echo ${NOMEFILER} | sed -e 's/_/\n/g' | grep -A 1 level |
tail -n 1)"
NB=$(echo ${NOMEFILER} | sed -e 's/_/\n/g' | grep -A 1 BINS |
tail -n 1)
TITOLO="Anemometro ${AV} - ${MONTH} - ${YEAR} - livello ${Z}m
- ${NB} bin"
echo -e "\
80 mm 115 mm moveto \n\
(${TITOLO}) centerhshow \n\
xc mm yc mm moveto \n\
/rd1 0 def \n\
/max ${MAX} def \n\
/k 50 max div def \n\
%/k 10 def
/dpet ${DPET} def \n\
/dpm dpet 2 div def \n\
/nop ${NOP} def \n\
/nbin ${NEWBINS} def \n\
/alfa1 90 dpm sub def \n\
/alfa2 alfa1 dpet add def \n\
0.1 setlinewidth \n\
currentpoint translate \n " >> $FILEPS
#NOP=1
for ((p = 1 ; p<=${NOP} ; p++)); do
    PETAL=$(cat ${NOMEFILER} | head -n ${p} | tail -n 1)"

    export color=0

    for c in $(echo ${PETAL}); do

        color=$((color+1))

        if [ "$c" != "0.00000000e+00" ]; then

            echo -e "\
%trapezio

```

Capitolo B. Codice sviluppato

```

    /x1 rd1 alfa1 cos mul def \n\
    /y1 rd1 alfa1 sin mul def \n\
    /rd2 rd1 ${c} add def \n\
    /x2 rd2 alfa1 cos mul def \n\
    /y2 rd2 alfa1 sin mul def \n\
    /x3 x2 neg def \n\
    /y3 y2 def \n\
    /x4 x1 neg def \n\
    /y4 y1 def \n\
    0 0 rd1 mm k mul alfa1 alfa2 arc \n\
    0 0 rd2 mm k mul alfa2 alfa1 arcn \n\
    closepath \n\
    gsave
    color${color} setrgbcolor \n\
    fill \n\
    grestore \n\
    stroke \n\
    /rd1 rd2 def \n\
    newpath \n " >> $FILEEPS

fi

done

echo -e "\
    newpath \n\
    0 0 moveto \n\
    /rd1 0 def \n\
    dpet neg rotate \n " >> $FILEEPS

done
echo "showpage" >> $FILEEPS
```

Bibliografia

- [Abbe 01] C. Abbe. “The Physical Basis of Long-Range Weather Forecasts”. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 29, No. , pp. 551–561, 1901.
- [Ande 74] D. Anderson and B. Fattahi. “A comparison of numerical solutions of the advective equations”. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 31, pp. 1500–1506, 1974.
- [Ande 95] J. D. Anderson, Jr. *Computational Fluid Dynamics - The Basics with Applications*. McGraw-Hill International Edition, 1995.
- [Arak 77] A. Arakawa and V. Lamb. “Computational design and the basic dynamical processes of the UCLA general circulation Model.”. *Methods in Computational Physics*, Vol. 17, p. 173, 1977.
- [Arti 08] G. Artipoli. *Sviluppo di un metodo per la stima delle risorse eoliche in territori ad orografia complessa: risultati numerici e verifica sperimentale*. PhD thesis, Università Politecnica delle Marche, 2008.
- [Bjer 04] V. Bjerknes. “Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet von Standpunkt der Mechanik und Physik”. *Meteorol. Zeit.*, Vol. 21, pp. 1–7, 1904.
- [Borr 06] C. Borri and S. Pastò. *Lezioni di Ingegneria del Vento*. Firenze University Press, 2006.
- [Brad 08] S. Bradley. *Atmospheric Acoustic Remote Sensing*. CRC Press, Taylor and Francys Group, 2008.
- [CGui 09] O. C.Guilherme, R. A. Guedes, and M. D. O. Manso. “Estimating wind resource using mesoscale modeling”. 2009. European Wind Energy Conferen-

BIBLIOGRAFIA

- ce EWEC 2009 http://www.ewec2009proceedings.info/allfiles2/638_EWEC2009pre-sentation.pdf.
- [Char 47] J. D. Charney. “The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current”. *J. Meteor.*, Vol. 4, pp. 135–162, 1947.
- [Comi 08] G. Comini, G. Croce, and E. Nobile. *Fondamenti di Termodinamica Computazionale*. SGEEditoriali, Padova, 2008.
- [Cour 67] R. Courant, K. Friedrichs, and H. Lewy. “On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics”. *IBM*, Vol. 11, pp. 215–234, 1967.
- [Dale 91] R. Daley. *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge University Press., 1991.
- [Davi 83] H. C. Davies. “Limitations of some common lateral boundary schemes used in regional NWP models.”. *Monthly Weather Review*, No. 111, pp. 1002–1012, 1983.
- [Dudh 05] J. Dudhia, D. Gill, K. Manning, W. Wang, and C. Bruyere. *PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User’s Guide: MM5 Modeling System Version 3*. Mesoscale and Microscale Meteorology Division National Center for Atmospheric Research, January 2005.
- [Durr 83] R. D. Durrant and J. B. Klemp. “A compressible model for the simulation of moist mountain waves”. *Monthly Weather Review*, No. 111, pp. 2341–2361, 1983.
- [Farr] T. G. Farr, P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, and D. Alsdorf. “The Shuttle Radar Topography Mission”. Tech. Rep., Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.
- [Gerr 73] J. P. Gerrity. “On Map Projections for Numerical Weather Prediction”. Tech. Rep. Office Note 87, U.S. Department of Commerce, NOAA, National Weather Service, National Meteorological Center, July 1973. Scaricabile da: <http://www.ncep.noaa.gov/officenotes/NOAA-NPM-NCEPON-0001/013FD8E4.pdf>.

BIBLIOGRAFIA

- [Gill 82] A. E. Gill. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, 1982.
- [Hiro 06] S. Hiroyuki, I. Takeshi, Y. Atsushi, and F. Yukinari. “An Assessment of Offshore Wind Energy Potential Using Mesoscale Model”. 2006. European Wind Energy Conference EWEC 2006 http://www.ewec2006proceedings.info/allfiles2/0704_Ewec2006fullpaper.pdf.
- [Holt 04] J. H. Holton. *An Introduction To Dynamic Meteorology*. Elsevier Academic Press, iv Ed., 2004.
- [Hong 04] S. Y. Hong, J. Dudhia, and S. Chen. “A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation”. *Monthly Weather Review*, Vol. 132, No. 1, pp. 103–120, January 2004.
- [Hong 06] S. Y. Hong and J. O. J. Lim. “The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6)”. *J. Korean Meteor. Soc.*, No. 42, pp. 129–151, 2006.
- [Hund 95] W. Hundsdorfer, B. Koren, M. vanLoon, and J. G. Verwer. “A Positive Finite-Difference Advection Scheme”. *Journal of Computational Physics*, Vol. 117, No. 1, pp. 35 – 46, 1995. Scaricabile da: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002199918571042X>.
- [IEC 08] IEC. “Wind Turbines - Part 1: Design requirements”. Tech. Rep., IEC, 2005-08. Reference Number: 61400-1:2005(E).
- [Jime 07] B. Jimenez, F. Durante, B. Lange, T. Kreutzer, and J. Tambe. “Offshore wind resource assessment with WApS and MM5: comparative study for the German Bight”. *Wind Energy*, Vol. 10, No. 212, pp. 121–134, 2007.
- [Kaim 94] J. C. Kaimal and J. J. Finnigan. *Atmospheric Boundary Layer Flows - Their Structure and Measurements*. Oxford University Press, 1994.
- [Kain 04] J. S. Kain. “The Kain-Fritsch convective parameterization: An update.”. *J. Appl. Meteor.*, No. 43, pp. 170–181, 2004.
- [Kasa 67] A. Kasahara and W. M. Washington. “NCAR global general circulation model of the atmosphere”. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 95, pp. 389–402, 1967.

BIBLIOGRAFIA

- [Kasa 74] A. Kasahara. “Various Vertical Coordinate Systems Used for NWP”. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 102, pp. 509–522, 1974.
- [Keys 77] D. Keyser and R. A. Anthes. “The applicability of a mixed-layer model of the planetary boundary layer to real-data forecasting.”. *Monthly Weather Review*, Vol. 105, No. 11, pp. 1351–1371, November 1977.
- [Klem 07] J. B. Klemp, W. C. Skamarock, and J. Dudhia. “Conservative Split-Explicit Time Integration Methods for the Compressible Nonhydrostatic Equations”. *Monthly Weather Review*, Vol. 135, No. 8, pp. 2897–2913, 2007. Scaricabile da: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/MWR3440.1>.
- [Klem 78a] J. B. Klemp and D. K. Lilly. “Numerical Simulation of Hydrostatic Mountain Waves”. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 35, No. 1, pp. 78–107, 1978. Scaricabile da: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%281978%29035%3C0078%3ANSOHW%3E2.0.CO%3B2>.
- [Klem 78b] J. B. Klemp and R. B. Wilhelmson. “The Simulation of Three-Dimensional Convective Storm Dynamics”. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 35, No. 6, pp. 1070–1096, 1978. Scaricabile da: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%281978%29035%3C1070%3ATSOTDC%3E2.0.CO%3B2>.
- [Lapr 92] R. Laprise. “The Euler Equations of Motion with Hydrostatic Pressure as an Independent Variable”. *Monthly Weather Review*, Vol. 120, No. 1, pp. 197–207, 1992. Scaricabile da: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281992%29120%3C0197%3ATEEOMW%3E2.0.CO%3B2>.
- [Lars 82] S. E. Larsen, J. Hojstrup, and C. H. Gibson. *Fast-response temperature sensors*. Plenum Press, New York, 1982. Air-Sea interaction: instruments and methods.
- [Lync 08] P. Lynch. “The Origins of Computer Weather Prediction and Climate Modeling”. *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. , pp. 3431–3444, 2008.

BIBLIOGRAFIA

- [Marc 67] Marchuk. *Numerical methods in weather prediction*. Academic Press, 1967.
- [Mazz 09] M. Mazzieri. *Analisi del campo di vento in sistemi orografici complessi: utilizzo di tecniche di remote sensing per fini eolici*. PhD thesis, Università Politecnica delle Marche, 2009.
- [Mort 06] N. G. Mortensen, J. C. Hansen, J. Badger, B. H. Jorgensen, C. B. Hasager, U. S. P. US, O. F. Hansen, K. Enevoldsen, and L. G. Youssef. “Wind atlas for Egypt: measurements micro and mesoscale modelling.”. 2006. European Wind Energy Conference EWEC 2006 http://www.ewec2006proceedings.info/allfiles2/104_Ewec2006-fullpaper.pdf.
- [Ooya 90] K. V. Ooyama. “A Thermodynamic Foundation for Modeling the Moist Atmosphere”. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 47, pp. 2580–2593, 1990.
- [Phil 56] N. A. Phillips. “The General Circulation of the Atmosphere: A Numerical Experiment”. *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, Vol. 82, pp. 64–123, 1956.
- [Rabu 03] B. Rabus, M. Eineder, A. Roth, and R. Bamler. “The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar”. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, No. 57, pp. 241–262, 2003.
- [Rich 04] L. F. Richardson. *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge Mathematical Library, ii Ed., 2004.
- [Rodr 05] E. Rodriguez, C. Morris, J. Belz, E. Chapin, J. Martin, W. Daffer, and S. Hensley. “An assessment of the SRTM topographic products”. Tech. Rep., Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 2005. Technical Report JPL D-31639.
- [Shim 09] S. Shimada, T. Ohsawa, and K. Yatsu. “A study on the ability of mesoscale model MM5 for offshore wind resource assessment in Japanese coastal waters”. 2009. European Wind Energy Conference EWEC 2009 http://www.e-wec2009proceedings.info/allfiles2/460_EWEC2009presentation.pdf.

BIBLIOGRAFIA

- [Skam 06] W. C. Skamarock. “Positive-Definite and Monotonic Limiters for Unrestricted- Time-Step Transport Schemes”. *Monthly Weather Review*, Vol. 134, pp. 2241–2250, 2006.
- [Skam 08a] W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Huang, W. Wang, and J. G. Powers. *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, June 2008. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR.
- [Skam 08b] W. C. Skamarock and M. L. Weisman. “The impact of positive-definite moisture transport on NWP precipitation forecasts”. *Monthly Weather Review*, Vol. 137, pp. 488–494, 2008.
- [Skam 08c] W. C. Skamarock and J. B. Klemp. “A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications”. *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. 7, pp. 3465 – 3485, 2008. Predicting weather, climate and extreme events <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999107000459>.
- [Skam 09] B. Skamarock. “Time Integration Schemes”. May 2009. SNU Lecture.
- [Skam 92] W. C. Skamarock and J. B. Klemp. “The Stability of Time-Split Numerical Methods for the Hydrostatic and the Nonhydrostatic Elastic Equations”. *Monthly Weather Review*, Vol. 120, pp. 2109–2127, 1992.
- [Smit 07] R. K. Smith. *Lectures on Dynamical Meteorology*. December 2007.
- [Smol 92] P. K. Smolarkiewicz and J. A. Pudykiewicz. “A Class of Semi-Lagrangian Approximations for Fluids”. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 49, pp. 2082–2096, November 1992.
- [Sozz 02] R. Sozzi, T. Georgiadis, and M. Valentini. *Introduzione alla Turbolenza Atmosferica - Concetti Stime Misure*. Pitagora Editrice Bologna, 2002.
- [Stan 91] A. Staniforth and J. Côté. “Semi-Lagrangian integration schemes for atmospheric models”. *Monthly Weather Review*, Vol. 119, pp. 2206–2223, 1991.

BIBLIOGRAFIA

- [Stau 90] D. R. Stauffer and N. Seaman. “Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. I - Experiments with synoptic-scale data”. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 118, pp. 1250–1277, 1990.
- [Stau 91] D. R. Stauffer, N. Seaman, and F. Binowski. “Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. II - Effects of data assimilation within the planetary boundary layer”. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 119, pp. 734–754, 1991.
- [Sten 09] D. J. Stensrud. *Parameterization Schemes - Keys to Understanding Numerical Weather Prediction Models*. Cambridge University Press, i Ed., 2009.
- [Ster 11] A. Stermasi. *Stima della risorsa energetica da fonte eolica offshore nel bacino Adriatico. Implementazione di modelli numerici meteorologici*. Master’s thesis, Università Politecnica delle Marche, 2011.
- [Vren 01] A. Vrenios. *Linux Cluster Architecture*. SAMS, 2001.
- [Wang 10] W. Wang, C. Bruyère, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, H.-C. Lin, J. Michalakes, S. Rizvi, X. Zhang, J. D. Beezley, J. L. Coen, , and J. Mandel. *ARW Modeling System Version 3.3*. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, July 2010.
- [Warn 11] T. T. Warner. *Numerical Weather and Climate Prediction*. Cambridge University Press, iv Ed., 2011.
- [Wick 02] Wicker, J. Louis, and W. C. Skamarock. “Time-Splitting Methods for Elastic Models Using Forward Time Schemes”. *Monthly Weather Review*, Vol. 130, No. 8, pp. 2088–2097, 2002. Scaricabile da: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%282002%29130%3C2088%3ATSMFEM%3E2.O.CO%3B2>.
- [Wick 98] Wicker, J. Louis, and W. C. Skamarock. “A Time-Splitting Scheme for the Elastic Equations Incorporating Second-Order Runge-Kutta Time Differencing”. *Monthly Weather Review*, Vol. 126, pp. 1992–1999, 1998.

Indice analitico

A		L	
Anemometro virtuale	159	Lambert	39
ARW	37	Laprise	42
Asse terrestre	3	Linux Gentoo	127
B		M	
Batch system	136	MAUI scheduler	139
Bjerknes	20	Mercatore	39
Bora	17	Mesoscala	10
Brunt-Väisälä	5	Microscala	11
C		MM5	
Charney	21	INTERPF	72
Cicloni extra tropicali	16	mm5	72
Cicloni tropicali	15	REGRID	71
Cluster Linux	127	TERRAIN	71
Condizioni al contorno	36	Modelli	
Coordinata terrain following ..	38,	Eulariani	55
71		Lagrangiani	55
Coriolis	7, 47	Semi-Lagrangiani	56
E		Modelli DEM	26
Ekman spirale di	9	Modelli GCM	21, 24
F		Modelli LAM	36, 40
Fohen	17	Monsoni	15
G		N	
Gap spettrale	14	ncl	73
GEOGRID.TBL	126	Nesting	27
Geostrofico vento	9	NMM	36
GRIB	156	Nomad2 Desktop	101
GTOPO30	117	O	
K		one-way	27, 151
Kasahara	42	Ooyama	42
P		P	
		Parametrizzazione	

INDICE ANALITICO

surface layer	32	Staggering	57
cumuli	31	Arakawa B	58, 72
microfisica	29, 151	Arakawa C	58, 72
PBL	32	T	
radiazione	33	Torque resource manager	136
suolo	34	two-way	27, 151
Phillips	21	V	
Polare stereografica	40	Van der Hoven	12
Proiezione cartografica	38	Von Neumann	20
Q		W	
qmgr	138	Wind Turbine Class	113
qstat	136	Windographer	103
qsub	136	WPS	67
R		geogrid.exe	67, 143, 156
Richardson	20	metgrid.exe	67, 143, 157
Richardson numero di	153	ungrib.exe	67, 143, 156
Risoluzione verticale	26	WRF	
Rossby numero di	9	ideal.exe	73
S		real.exe	67, 149, 157
Schemi		wrf.exe	67, 149, 157
Espliciti	49		
Predictor corrector	50		
Runge Kutta 3	51		
Semi-impliciti	49		
Time splitting	50		
Sensori			
a distanza	75, 91		
anemometro a coppette ...	78		
anemometro ad elica	78		
anemometro sonico	88		
banderuola	78		
filo caldo	88		
in situ	75, 77		
RASS	93		
SoDAR	92		
termistore	87		
termocoppia	80		
termoresistenza	84		
Sinottica scala	10		
SRTM	122		