

Resoconto sulla “Grand Combin Summer School on Physics and Predictability of Rainfall and Floods” 26/06/2002 ÷ 05/07/2002

Agostino Manzato

ARPA – Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente del FVG,
settore OSMER – Osservatorio Meteorologico Regionale, Cervignano (UD), Italy

1 Introduzione

Dal 1994 ogni anno viene organizzata la Grand Combin Summer School su diversi temi attinenti le scienze della geofisica, oceanografia, meccanica dei fluidi, fisica dell’atmosfera e meteorologia. La scuola viene organizzata dall’Istituto di Scienze dell’Atmosfera e del Clima del CNR, Torino (Italy), assieme al CIMA dell’Università degli Studi di Genova e della Basilicata e al Groupement de Recherche Mécanique Fondamentale des Fluides Géophysiques et Astrophysiques del CNRS, Paris (France), col supporto della Comunità Montana Grand Combin, Gignod, e della Regione Valle d’Aosta.

Il corso di quest’anno aveva come direttori Kerry Emanuel, del MIT (Boston, USA) e Giorgio Roth del CIMA (Università di Genova), mentre il coordinatore locale era Antonello Provenzale dell’Istituto di Scienze dell’Atmosfera e del Clima di Torino. Alla scuola hanno partecipato più di cinquanta studenti provenienti in gran parte dall’Italia, ma anche dal resto d’Europa e dagli Stati Uniti, e una decina di insegnanti.

Tutte le lezioni dovrebbero venir successivamente pubblicate sul sito internet della scuola, all’indirizzo:

<http://corto.icg.to.infn.it/grandcombin/>

2 Parte I: corsi lunghi

2.1 Kerry Emanuel (emanuel@texmex.mit.edu)

Predictability of convective rainfall

Emanuel è uno dei massimi “teorici” della convezione e il suo libro “Atmospheric Convection” (Oxford University Press 1994) era alla base delle lezioni.

La prima parte delle lezioni descriveva la convezione “secca” (senza condensazione del vapore), partendo dalle definizioni della forza di buoyancy e descrivendo i processi adiabatici secchi (isoentropici). Ha illustrato alcune soluzioni analitiche del problema della convezione di un fluido tra due pareti poste a temperature diverse (problema di Rayleigh–Bénard),

nella approssimazione di Boussinesq. Le soluzioni ottenute corrispondono a moti stazionari o periodici (onde) o turbolenti a seconda del numero di Rayleigh che caratterizza il sistema. Già utilizzando l'equazione non-lineare dell'equazione di Boussinesq si trovano soluzioni caotiche tipo gli attrattori del sistema di Lorenz-63 (Saltzman 1962). Questo significa che la stessa convezione secca ha dei limiti di imprevedibilità: il sistema diventa imprevedibile oltre quello che viene definito *tempo di predicibilità*.

L'idea è quella di vedere se la convezione viene "modulata" da sistemi a più larga scala, la cui natura è più prevedibile della convezione. Ad esempio se nel problema di Rayleigh-Bénard si introduce un gradiente di temperatura orizzontale su uno dei due piani si vede l'instaurarsi di una circolazione a larga scala che favorisce i rolls convettivi in una zona e li sfavorisce in un'altra.

Successivamente descrive il problema di Prandtl (fisico tedesco che già nei primi anni del XX secolo riuscì a descrivere il boundary layer): una superficie a temperatura costante sovrastata da un fluido che si raffredda per effetto radiativo (cielo nero). Si vede come il raffreddamento del fluido provochi dei moti discendenti simmetrici ai moti convettivi che nascono in basso, vicino alla superficie calda. Alla fine si instaura una specie di equilibrio "statistico" e simmetrico tra il flusso radiativo verso il basso e quello convettivo verso l'alto. Nel boundary layer reale le cose sono complicate dal fatto che il fluido si muove (vento), e questo implica un trasporto di momento, e dalla rugosità della superficie, che elimina il legame dalla diffusione molecolare vicino alla superficie. Il risultato è che la troposfera si può semplificare in tre strati: uno molto sottile vicino alla superficie (altezza di Monin-Obukov dell'ordine di circa 100 m), che è dominato da turbolenza *meccanica*, uno fino al top del boundary layer, che di solito coincide con l'inizio di uno strato d'inversione (es. a 1000 m), dominato dalla turbolenza *convettiva* e infine la libera atmosfera sopra l'inversione, con circolazione di tipo laminare. Lo strato d'inversione è una zona di ingresso dell'aria – generalmente secca – della libera atmosfera nel boundary layer, la cui altezza si alza per questo motivo durante il giorno.

Da osservazioni (es. il suo allievo Nilton Rennó) si vede che nel surface layer c'è un forte calo di entropia (cioè di temperatura potenziale virtuale) e di mixing ratio salendo con la quota, mentre nel boundary layer queste quantità restano quasi costanti, soprattutto se è ben mescolato, quindi il boundary layer tende a portarsi all'equilibrio lungo un'adiabatica secca.

Passando poi alla convezione "umida" bisogna introdurre una terza variabile (ad es. il mixing ratio) e si rompe la simmetria presente nella convezione secca: ad esempio i downdraft sono più deboli e diffusi degli updraft. Infatti la precipitazione è fondamentale nel creare le zone di buoyancy negativa: zone di aria molto secca in cui la pioggia evapora velocemente assorbendo il calore latente d'evaporazione dall'aria e quindi creando le discese di aria fredda (downdraft). In effetti la convezione umida ma non-precipitabile ha caratteristiche molto diverse da quella umida precipitabile.

Poi discute brevemente i fenomeni formazione della precipitazione secondo la coalescenza stocastica (che necessita una distribuzione molto larga delle velocità terminali delle gocce di nube, tipica delle nubi marittime) ovvero secondo i processi "ghiacciati" tipo Bergeron-Findeisen, in cui il vapore non è saturo per l'acqua liquida ma lo è rispetto a dei piccoli cristalli di ghiaccio su cui il vapore può condensare e successivamente ghiacciare, mentre le particelle di acqua sovrassatura possono a loro volta evaporare per fornire nuovo vapore. L'entropia viene conservata solo nei processi adiabatici umidi *reversibili* (conservando l'ac-

qua condensata dentro la particella) ma non in quelli *irreversibili* in cui il condensato viene considerato precipitare (pseudo-adiabatica).

Introduce il concetto di energia potenzialmente disponibile (CAPE) e in particolare il suo calcolo sia con adiabatiche reversibili che con pseudo-adiabatiche. Poi rappresenta la buoyancy non con un unico numero ma con un grafico in cui in ordinata viene messa l'altitudine (o pressione) a cui si valuta la buoyancy e in ascissa l'altitudine (o pressione) dei primi 100 hPa di atmosfera considerati come particella iniziale. Nel piano così definito disegna le isolinee di buoyancy per vedere le zone più instabili. Addirittura mostra come la temperatura della particella iniziale a 900 hPa sollevata fino in tropopausa correli bene con la temperatura misurata in tropopausa e questo dovrebbe essere un'indizio che il profilo di temperatura nella libera atmosfera ha come "posizione di equilibrio" proprio l'adiabatica umida. Questo introduce il concetto di *radiative-convective equilibrium*, definito per la prima volta da Arakawa e Schubert nel 1974 ("Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment", J. Atmos. Sci., vol. 31). Se prendiamo una superficie calda a temperatura costante come l'oceano la convezione nasce come risposta al flusso radiativo di raffreddamento dell'atmosfera. Da simulazioni numeriche si vede come un'eventuale perturbazione "fredda" nel flusso radiativo fa "rispondere" la convezione nel giro di 3 o 4 giorni tramite i processi di condensazione dell'acqua, in modo da ritornare all'equilibrio. In questo senso la convezione è parte intrinseca del processo termodinamico e si autoalimenta attraverso la condensazione del vapore, che poi viene scaricato come precipitazione. Questo equilibrio statistico (che ricorda i sistemi organizzati lontani dall'equilibrio termodinamico di Prigogine) può avere secondo Emanuel grande influenza sulla circolazione a larga scala e quindi sulla stessa climatologia, che attualmente viene studiata nell'approccio quasi-geostrofico e idrostatico. In particolare si distinguono due schemi di convezione: quella "classica" in cui sono i processi a larga scala a triggerare la convezione locale di un'area potenzialmente instabile (magari bloccata da una inversione) e quella del "quasi-equilibrio" in cui i tempi di reazione della convezione sono molto più veloci di quelli a cui agisce il forcing su larga scala. In questo caso la convezione "parte" nelle zone del boundary layer che sviluppano più CAPE delle altre. Se si prende una particella d'aria che si muove nel boundary layer la sua variazione di CAPE durante il moto è data da:

$$\frac{\partial \text{CAPE}}{\partial \tau} \cong (T_0 - T_{EL}) \cdot \frac{\partial s}{\partial \tau} - \int_{z_0}^{z_{EL}} \left(\frac{gQ}{c_p T} - \frac{g}{\Theta} \vec{V}_r \cdot \nabla \Theta - N^2 w \right) dz \quad (1)$$

dove τ è il tempo lungo la traiettoria della particella, s è la sua entropia, Q è il flusso radiativo dell'atmosfera, \vec{V}_r è il vento dell'ambiente relativo al moto della particella, Θ è la temperatura potenziale, w è la velocità verticale a quella quota e $N = \frac{g}{\Theta_0} \frac{d\Theta}{dz}$ è la frequenza di Brunt-Väisälä. Il primo termine misura l'aumento di entropia nei bassi strati, il secondo il raffreddamento radiativo dell'ambiente, il terzo l'avvezione orizzontale di temperatura e il quarto il raffreddamento adiabatico durante il sollevamento. Risolvendo questa equazione si dovrebbe poter predire dove lo sviluppo della convezione sarà più probabile.

Per approfondimenti vedi ad esempio Emanuel, Neelin and Bretherton, "On Large-scale circulations in convecting atmospheres", Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1994, vol. 120.

La conclusione è che la convezione è un fenomeno caotico, anche se modulato dai processi a larga scala più prevedibili, che però a loro volta sono influenzati fortemente dalla convezione stessa.

Il sito internet di Emanuel è il seguente:

<http://www-paoc.mit.edu/~emanuel/home.html>

2.2 Richard Rotunno (rotunno@ucar.edu)

On theory of orographically influenced precipitation

Questo ricercatore dell'NCAR (Boulder, Colorado) ha preparato per questo corso una dispensa cartacea contenente un centinaio di pagine a colori, disponibile in biblioteca.

Parte constatando come i massimi di pioggia medi sul pianeta avvengano spesso in vicinanza delle catene montuose. La pioggia orografica va studiata tenendo conto di tre scale: quella sinottica che determina la direzione, intensità e stabilità del flusso, la scala delle montagne che determinano il lifting orografico e infine la scala microfisica che discrimina i vari tipi di precipitazione (neve, pioggia ed eventuale evaporazione). La scala temporale dei processi microfisici è dell'ordine delle decine di minuti e di solito può essere considerata molto inferiore alla scala temporale del flusso della massa d'aria sollevata, che di solito è dell'ordine di L/V , con L lunghezza del "piano inclinato" e V vento orizzontale medio che spinge l'aria contro la montagna.

Considerando costante nel tempo l'acqua condensata in nube, il tasso di precipitazione orografica può essere stimato da:

$$\frac{\partial R}{\partial z} \cong \frac{d\rho_{vs}}{dt} \quad (2)$$

dove ρ_{vs} è la densità del vapore saturo e R è la pioggia per unità di tempo prodotta. Integrando questa equazione lungo la colonna verticale si può ottenere il tasso di precipitazione, che in prima approssimazione è dato da:

$$R = \int_{z_0}^{\infty} -w \frac{\partial \rho_{vs}}{\partial z} dz \quad (3)$$

con w pari alla velocità verticale dentro la nube. In prima approssimazione il tasso di precipitazione dipende solo da quant'è il rapporto di mescolanza dell'aria e dalla stima del *sollevamento verticale* w . Nel semplice caso di un piano inclinato lungo L , alto H su cui viene spinta l'aria con densità di vapore saturo ρ_{vs} ad una velocità V si può approssimare $w = VH/L$ e ottenere tassi di precipitazione consistenti con le osservazioni (es. 4 mm/h). Per approfondimenti vedi Smith "The influence of mountains on the atmosphere", *Advances in Geophysics* vol.21, 1979, ripreso anche in Rotunno e Ferretti "Mechanisms of intense Alpine rainfall", *J. Atmos. Sci.*, vol. 58, 2001 (dove viene studiata l'alluvione del Piemonte del 1994).

Ovviamente il meccanismo reale non è così semplice: ad esempio se l'aria è stratificata in modo stabile (pesante sotto e leggera sopra) oppone maggior resistenza al sollevamento orografico, viceversa un'aria potenzialmente instabile durante il sollevamento può raggiungere il suo livello di galleggiamento (LFC) e sviluppare delle velocità verticali molto forti. Per questo motivo piogge "di flusso" accompagnate da aria poco stabile possono produrre altissimi tassi di pioggia.

Quindi presenta una serie di case studies pubblicati dagli anni 60 a oggi di studi di forti precipitazioni orografiche. Particolarmente interessante il caso della costa californiana in cui la presenza di un low-level jet nei primi 1000 m aiuta il flusso più basso a passare le

montagne (“unblocked flow”) e produce forti piogge, ben correlate con l’altitudine. Viceversa nei casi “blocked flow” in cui il flusso nei bassi strati tende a scorrere parallelo alla catena montuosa invece che a superarla il tasso di pioggia è più modesto e non così diverso tra pianura e montagna. Vedi Neiman et al. 2002 “CALJET”.

Successivamente è passato a descrivere brevemente i fenomeni di formazione delle gocce di nube (nucleazione omogenea o eterogenea intorno a nuclei di condensazione) e della gocce di precipitazione (coalescenza nelle nubi calde o processi ghiacciati in quelle fredde). I processi del tipo Bergeron–Findeisen sembrano essere particolarmente efficienti nel caso del sollevamento orografico. Ha mostrato una tabella in cui sono elencate sostanze con proprietà glaciogene in cui, oltre allo ioduro d’argento o di piombo, c’erano anche sostanze organiche come il testosterone o il colesterolo!

Ha accennato al meccanismo seeder–feeder in cui una nube in alto comincia a rilasciare precipitazione e quando questa raggiunge la nube in basso (magari creata da sollevamento orografico, ma non precipitante) raccoglie l’acqua sovrappiù e attiva il meccanismo della precipitazione anche nella nube più bassa (feeder).

Ha quindi affrontato il problema del passaggio di flusso umido contro un ostacolo e delle diverse soluzioni (regimi) che si possono instaurare: lineare o non, rotante o non, quasi–geostrofico o con onde di gravità, ecc. Per comprendere bene questi fenomeni mi ha consigliato la lettura di tre articoli: Buzzi e Tibaldi “Inertial and frictional effects on rotating and stratified flow over topography”, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, vol. 103, 1977, poi Ron Smith “Hydrostatic flow over mountains”, *Advances in Geophysics*, vol. 31, 1989 (tra l’altro questo autore ha fatto articoli specifici sulle Alpi e anche sulla Bora) e infine David Muraki “Revisiting Queney’s Flow Over a Mesoscale Ridge”, submitted *J. Atmos. Sci.*, 2001, di cui trovate una fotocopia in biblioteca.

Ad esempio per il problema bidimensionale del passaggio di un flusso su un ostacolo in approssimazione quasi–geostrofica invece del semplice calcolo del numero di Froude ($F = V/NH$) è più preciso risolvere l’equazione di Scorer:

$$\frac{\partial^2(N^2w)}{\partial y^2} + f^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

dove N è sempre la frequenza di Brunt–Väisälä e f è il parametro di Coriolis.

Queste equazioni secondo lui vanno sempre studiate nel contesto di simulazioni al computer effettuate con modelli non idrostatici in grado di risolvere bene la microfisica delle nubi. Infine conclude presentando due casi di precipitazione intensa studiati durante il recente esperimento MAP, ovvero gli IOP 2 B e 8. Questi lavori saranno pubblicati nella rivista *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2002 numero speciale dedicato al MAP, con il titolo “Comparative analysis of rainfall in MAP Cases IOP2B and IOP8”, Rotunno e Ferretti.

Il dr. Rotunno collabora anche con l’Università di Trento (dipartimento di Ingegneria Ambientale) ed è tra gli organizzatori della Scuola Estiva di Trento sulla Meteorologia Montana (26–30 agosto 2002). Durante il suo prossimo soggiorno a Trento cercheremo di invitarlo da noi per un seminario sulle piogge orografiche (es. caso del 6 giugno 2002) e su IOP MAP che coinvolsero la nostra regione.

Il sito internet di Rotunno è il seguente:

<http://www.mmm.ucar.edu/individual/rotunno/rotunno.html>

2.3 Jacques Testud (testud@cetp.ipst.fr)

Introduction on radar meteorology

Lavora presso il “Centre d’étude des Environnements Terrestre et Planétaires” del CNRS di Parigi, come esperto in radar. Anche per questa presentazione è disponibile in biblioteca una dispensa.

Ha cominciato con una carrellata di formule sulla sezione d’urto nello scattering di Rayleigh per idrometeore sferiche, oblate e di ghiaccio, sia singole che d’insieme. Tutto questo per spiegare l’importanza dell’attenuazione A del segnale e della differenza di fase tra polarizzazione orizzontale e verticale (K_{DP}).

Tutte le osservabili del radar dipendono dalla distribuzione $N(D)$ dei diametri delle idrometeore (Drop Size Distribution) colpite dal segnale. La sua idea è stata quella di introdurre una distribuzione “normalizzata” che abbia sempre la stessa forma intrinseca F , ma cambi solo per un parametro N_0^* , che distingue ogni distribuzione da un’altra. In tale teoria la distribuzione è data da:

$$N(D) = N_0^* \cdot F\left(\frac{D}{D_m}\right), \quad \text{con} \quad D_m = \frac{\int_0^\infty N(D)D^4 dD}{\int_0^\infty N(D)D^3 dD} \quad (5)$$

dove D_m , pari al rapporto tra il quarto e il terzo “momento” della distribuzione, è diametro medio della distribuzione. Da quanto ho capito il parametro N_0^* deve venir calcolato “dinamicamente” per ogni volume acquisito, ma questo permette di ottenere un’ottima correzione dell’attenuazione e quindi una misura più precisa di tutte le osservabili del radar e della stima della precipitazione (anche nei casi convettivi e non solo in quelli stratificati).

In questo modo è possibile ottenere ottimi risultati anche con degli “economici” radar in banda X, limitati finora dall’alta attenuazione del segnale. Attualmente stanno costruendo un prototipo di radar in banda X a doppia polarizzazione, che implementerebbe anche un software di riconoscimento automatico del tipo di idrometeora. Pare che il Piemonte abbia già “prenotato” il prossimo esemplare (costo approssimativo di circa 450.000 Euro).

Per approfondimenti vedi ad esempio Testud, Oury, Black, Amayenc and Dou “The concept of “normalized” distribution to describe raindrop spectra: A tool for cloud physics and cloud remote sensing”, Journal of Applied Meteorology, vol. 40, 2001.

Testud è anche uno dei responsabili per quanto riguarda l’Europa del progetto TRMM (leggi “trim”, fatto da NASA americana e NASDA giapponese), che utilizza un radar su satellite per misure dallo spazio. Ad esempio con questo strumento ha effettuato valutazioni statistiche di N_0^* su tutto il globo e ha visto che non varia tanto e che mediamente si trovano valori superiori a 10^7 , che corrisponde alla distribuzione Marshall–Palmer.

Infine, vista l’importanza, emersa durante le altre lezioni, della stima della velocità verticale ha accennato al problema della misura del campo tridimensionale del vento tramite radar doppler e uso delle equazioni di continuità e al calcolo della velocità verticale sopra il radar con tecniche VAD (Velocity Azimuth Display).

Come note di colore segnale che è stato ospite del nostro centro in occasione del convegno COST 75 (ottobre 1996) e che è una persona veramente gentile e disponibile.

2.4 Jean Luc Redelsperger (jean-luc.redelsperger@meteo.fr)

Numerical modelling of precipitation

Lavora al “Centre National de Recherches Météorologiques, Joint Laboratory between

CNRS & Météo-France” a Tolosa.

Si occupa in particolare dello studio di eventi convettivi (in particolare ai Tropici) e dello sviluppo di modelli numerici non idrostatici (in particolare ha sviluppato il LAM francese MESO–NH).

Ha cominciato con una carrellata dei principali tipi di “temporali” a seconda del loro tipo di organizzazione: dalla singola cella, ai multi–cella, alle supercelle, alle Squall Line e ai Mesoscale Convective System. Ha cercato di classificarli a seconda della loro forma e dimensione spaziale, del tempo di vita medio (da meno di 1 ora per la singola cella ai 3 giorni per le Squall Line Tropicali) e del tipo di ambiente in cui si sviluppano, con particolare riferimento allo shear.

Particolarmente interessante lo studio del triggering e delle traiettorie degli MCS in Europa fatto dai dati EUMETSAT, vedi Morel e Snsi “A climatology of Mesoscale Convective Systems over Europe and the western Mediterranean using satellite infrared imagery. Part I : Methodology”, in pubblicazione sul Quart. J. Roy. Meteor. Soc.

In una sezione RHI di riflettività e doppler di una Squall Line ha messo in evidenza un “up-draft secondario” tra la zona convettiva “principale” e la coda stratificata posteriore (zona ghiacciata). Secondo lui questo secondo updraft potrebbe essere dovuto proprio al calore latente di ghiacciamento che crea una seconda zona di buoyancy positiva. Invece secondo Emanuel potrebbe essere generato dalla zona di aggregazione dell’acqua sovrappesa in gocce di precipitazione, che precipitando fuori provocano un calo di densità di quella zona e quindi una buoyancy positiva. Se fosse così si dovrebbe poter osservare questo secondo updraft nelle zone in cui “nasce” la precipitazione (che sono sopra a quelle dove “nasce” il downdraft).

Insiste sul concetto di “density current” come vento freddo prodotto al suolo da una Squall Line (concetto simile al “cold pool” che si trova dietro il gust front).

Quindi passa alla descrizione dei problemi di simulazione numerica della convezione: le scale implicate vanno dalla microfisica alle centinaia di chilometri dei MCS, ci sono processi non–lineari e infine processi “a soglia” (es. la precipitazione). In quest’ordine di scale l’approssimazione idrostatica vale solo sopra i 10 km e non sotto, per cui i modelli idrostatici devono per forza parametrizzare la convezione (intesa come sviluppo delle zone di updraft e downdraft). Invece i modelli non idrostatici riescono a scendere a scale di decine di metri e quindi devono parametrizzare solo i fenomeni microfisici, ottenendo la convezione come risultato delle simulazioni a maggior risoluzione. Il problema è che la parametrizzazione della microfisica è comunque una cosa molto complicata, perché coinvolge centinaia di processi diversi. A questo proposito il prof. Provenzale ha fatto notare come anche la turbolenza sia attualmente parametrizzata nei modelli (anche quelli non idrostatici) e quindi è inutile cercare di descrivere tanto nei dettagli la microfisica se poi questa è fortemente influenzata dalla turbolenza.

Altri problemi sono gli accoppiamenti con il suolo, la vegetazione, le aree urbane, le zone umide e in particolare ci sono problemi per inizializzare questi modelli ad alta risoluzione con analisi a risoluzione adeguata, in particolare per il campo dell’umidità. A questo proposito Emanuel ha sottolineato come la rete di sondaggi globali sia stata progettata per una risoluzione a 200 km ma osservando le strutture del vapor d’acqua da satellite si notano dettagli a scale molto inferiori.

In particolare si sta lavorando molto per assimilare i dati delle reti radar (alta risoluzione) nelle condizioni iniziali (per il satellite sono stati già fatti grandi progressi sull’IR e si sta

lavorando sul WV). Mi par di aver capito che i dati del radar sul satellite TRMM vengono già assimilati da ECMWF.

Infine c'è il problema delle condizioni al contorno ("open lateral boundary condition"), che si cerca di risolvere con la tecnica del nesting interattivo (sviluppata per la prima volta da Terry Clark). Ad esempio il suo modello Meso-NH usa un 2-way nesting in cui i risultati ottenuti sul dominio interno vanno a modificare il campo del dominio esterno che genera le condizioni al contorno per la scadenza successiva.

Altri modelli ad alta risoluzione sono il JMA giapponese, il Lokal-Model tedesco, il NH-Hirlam e il nuovo WRF americano. In particolare il modello WRF <http://www.wrf-model.org>, dovrebbe girare in real-time sull'Italia a cura del sito <http://www.ilmeteo.com>.

2.5 Tim Palmer (tjp@aber.ac.uk)

Predictability in weather and climate

Questo eclettico scienziato è un esperto in quantum gravity, ma lavora all'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). È stato uno dei creatori dell'EPS (Ensemble Prediction System) e attualmente sta sviluppando le previsioni stagionali col metodo Multi Model Ensemble System.

Parte con una descrizione dell'importanza delle condizioni iniziali per fare una buona previsione meteo e poi introduce il concetto di imprevedibilità attraverso il modello a 3 componenti di Lorenz, le cui soluzioni possono divergere in due attrattori diversi o meno, a seconda delle condizioni iniziali (comunque tra loro molto vicine). Questa "sensibilità" a piccole variazioni delle condizioni iniziali è quanto si vuole cercare di "misurare" con i 51 membri del modello EPS. Ciò è giustificato anche dalla bassa copertura di osservazioni sul globo (per questo si cerca sempre più di fare osservazioni da satellite) e per gli errori nei processi di assimilazione. Infatti le condizioni iniziali vengono generate partendo dall'ultimo output del modello, che viene poi modificato per "fittare" le osservazioni. Quindi per generare le 51 condizioni iniziali diverse cercano di selezionare le perturbazioni che evolvono con la massima ampiezza. In realtà i 51 membri sono anche troppo pochi per poter cogliere tutta la "variabilità" del sistema. Una cosa importante è che secondo lui i 51 membri andrebbero guardati singolarmente e in particolare va evitata la tentazione di farne la media, che si comporta sempre in modo molto peggiore del modello deterministico "classico".

Successivamente è passato a dare elementi per una valutazione della bontà di una previsione, descrivendo il Brier Score, relativo al verificarsi o meno di una condizione (evento dicotomo), la tabella di contingenza e i vari parametri ad essa associati (Skill Score, False Alarm Rate...).

Poi ha esteso queste tecniche statistiche al caso di modelli probabilistici come gli EPS. Ad esempio valutando la previsione di pioggia del modello EPS con il Brier Score si trova un netto miglioramento delle previsioni negli ultimi anni per le piogge deboli, non così per gli eventi estremi.

Poi ha dedicato un'intera lezione ad applicare i concetti statistici dedotti dalla tabella di contingenza a considerazioni economiche sul valore delle previsioni come metodo per prevenire disastri naturali. L'idea è quella che l'avverarsi di un evento estremo porti ad una perdita economica L , che però può essere evitata attivando un sistema di difesa la cui realizzazione costa C . Con considerazioni sulla tabella di contingenza si arriva a definire il

potenziale economico V e a trovare le soglie ideali in cui conviene maggiormente attivare le difese o meno. Per approfondimenti vedere ad esempio i siti:

<http://www.ecmwf.int/publications/newsletters/Richardson/index.html>

<http://sgi62.wwb.noaa.gov:8080/ens/papers/econval.pdf>

L'ultima lezione riguardava i tipi di errori nei modelli. In generale una variabile è descritta tramite una parte "deterministica" ed un'altra "parametrizzata". L'errore intrinseco del modello si può pensare come un errore nella parte di parametrizzazione, che per natura è solo un'approssimazione. Un altro modo in cui tale errore può essere interpretato è come se fosse dovuto a fenomeni non-lineari che avvenendo a scale inferiori alla risoluzione del modello riescono a cambiarne lo "stato medio" (a scale maggiori). In generale si vede che introdurre un errore "stocastico distribuito" in un modello deterministico può portare a risultati migliori che nelle parametrizzazioni classiche. Per questo motivo gli EPS utilizzano lo schema a "fisica stocastica". A questo punto ha spiccato un volo pindarico parlando dell'applicazione degli automi cellulari di Stephen Wolfram (l'autore di "Mathematica") alla fisica dell'atmosfera e in particolare alle strutture che trasportano la vorticità potenziale. Per approfondimenti vedi il libro di Wolfram uscito in maggio 2002 "A new kind of science". Infine ha concluso accennando alle previsioni stagionali, che adesso vengono elaborate presso ECMWF usando 6 modelli globali (es. ECMWF, ARPEGE, ECHAM, ...), a cui sono applicate le stesse condizioni iniziali perturbate in 9 modi, ottenendo 54 output diversi, chiamati Multi Model Ensemble (o anche DEMETER). Anche se siamo ancora agli inizi delle previsioni stagionali è già stato verificato che si ottengono risultati migliori che non usando 54 output generati da uno stesso modello.

Infine ha concluso con una citazione riferita a Richard Feynman per il quale "il dubbio non è un difetto alla nostra abilità di conoscenza, ma è l'essenza stessa della conoscenza".

Visto che è la prima persona dell'ECMWF che conosco gli ho chiesto perché hanno deciso di non disseminare più i dati del modello deterministico run delle 00. Mi ha risposto che è stata una scelta politica non condivisa dal personale ECMWF, ma imposta dal consiglio (composto dai rappresentanti dei servizi meteo nazionali). Quindi mi ha consigliato di scrivere una lettera ufficiale al nostro rappresentante nazionale (l'A.M. e magari per conoscenza anche a ECMWF) dove si dice che il servizio è peggiorato a causa di questa scelta. Mi ha fatto capire che già altri centri regionali europei hanno "protestato" e quindi la decisione potrebbe venir messa in discussione.

2.6 Dara Entekhabi (darae@mit.edu)

1) Precipitation assimilation and limits to prediction

2) Land data assimilation of remotely sensed data for estimating land surface boundary condition in atmospheric models

Anche il prof. Entekhabi, di origine iraniana, insegna al MIT di Boston, nel dipartimento di ingegneria ambientale e anche per questo corso è disponibile in biblioteca una voluminosa documentazione. Inoltre parte del corso si rifà ad un corso tenutosi a Perugia nel 1998, la cui documentazione, disponibile al sito <http://web.mit.edu/darae/WWW/notetot.PDF>, è stata scritta in collaborazione con Fabio Castelli dell'Università di Perugia.

Scopo del corso era quello di caratterizzare il campo di precipitazione e di introdurre strumenti statistici e matematici adatti allo studio di questa variabile, per la quale la "statistica classica" non funziona. Infatti le caratteristiche di intermittenza temporale, di grande varia-

bilità spaziale e infine la distribuzione non negativa (tipo lognormale) fanno fallire lo studio della pioggia attraverso, ad esempio, semplici correlazioni. È meglio ricorrere a strumenti quali le “funzioni di strutture generalizzate”, o a multiscala (“random cascade”) o a decomposizioni in onde.

Questi modi di trattare la pioggia sono essenziali per quello che riguarda l’assimilazione delle osservazioni di pioggia (spesso di tipo puntuale) nei campi iniziali dei modelli previsionistici, ovvero per la “data assimilation”.

Ad esempio lo studio della variazione dei primi momenti (media, varianza, skewness) del campo di pioggia al cambiare della scala spaziale con cui vengono studiati questi campi (es. alta risoluzione da dati radar, o media da reti di pluviometri o bassa da stime da satellite) fornisce delle relazioni generali che possono venir applicate al campo di pioggia assimilato per renderlo consistente con le osservazioni.

Ha fatto esempi concreti degli “estimatori bayesiani” e dei filtri di Kalman a multiscala, nonché delle stime lineari (tipo Kriging) usati per spazializzare e smoothare il campo di pioggia.

In particolare per i dati da satellite ha descritto sia l’uso del campo infrarosso IR per la stima della pioggia, sia di quello a microonde MW (radiometri in banda L a 1.4 GHz). I dati di MW hanno una risoluzione spaziale ancor minore dell’IR, ma comunque aggiungono informazione ad una scala diversa.

2.7 Fabio Castelli (fabio@dicea.unifi.it)

Hydrological processes at basin scale

È professore di idrologia presso l’Università di Firenze e le sue lezioni sono state particolarmente indirizzate al pubblico degli “idrologi”.

Ha descritto un semplice modello di suolo umido accoppiato con l’atmosfera per quanto riguarda la precipitazione e il flusso superficiale. Scopo finale era quello di modellare il processo di run-off (precipitazione che non riesce ad essere assorbita dal terreno o dai corsi d’acqua) per prevedere la possibilità di alluvioni.

Il run-off è particolarmente influenzato dal tipo di suolo (drenaggio, saturazione e tipo di vegetazione), dalla forma e pendenza del bacino della rete fluviale e più in generale dalla topografia. In condizioni di saturazione tutta la precipitazione diventa run-off.

Il “tempo di concentrazione” di un bacino è il tempo che l’acqua impiega per scendere dal punto più lontano alla foce del bacino: per un torrente di montagna è dell’ordine di 30 minuti, mentre per il Po è dell’ordine di 2 o 3 giorni. Il tempo di concentrazione di un bacino deve essere breve se comparato con la durata della pioggia.

2.8 Mauro Fiorentino (fiorentino@unibas.it)

Hydrological modelling of extreme floods

È il direttore del Dipartimento di Ingegneria e Fisica Ambientale (DIFA) dell’Università della Basilicata e collabora col CIMA di Genova.

Ha parlato del rischio idrologico legato alle piene dei fiumi, con particolare riferimento alla geomorfologia della rete fluviale di un bacino.

Ha richiamato i concetti di tempi di ritorno e di distribuzione di Gumbel per gli eventi delle piene. Poi ha illustrato il database del sistema VAPI (Valutazione delle Piene) messo a punto dal CNR di Cosenza, i cui dati dovrebbero essere consultabili on-line. Per approfondimenti vedi il sito del “Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche”:

<http://www.gndci.pg.cnr.it/it/vapi/welcome.it.htm>

Infine ha esposto alcuni nuovi modelli che si basano su un approccio stocastico e in particolare tratta la rete fluviana come un frattale, di dimensione compresa tra 1.6 e 1.8 a seconda della sua morfologia. Trova quindi dei legami tra la dimensione frattale dei fiumi del bacino e la loro risposta idrologica.

3 Parte II: corsi brevi

3.1 Franco Prodi (f.prodi@isac.cnr.it)

Results of MEFPE in flood forecasting

Attualmente è il direttore del ISAC (Istituto di Scienze dell’Atmosfera e del Clima), la nuova struttura del CNR che ha unito l’IASO di Bologna, l’IFA di Roma, l’ISIATA di Lecce e l’ICGF di Torino.

Ha illustrato i risultati del progetto MEFPE per la previsione delle alluvioni utilizzando insieme misure da satellite e da radar al suolo. Il progetto è una cooperazione tra ISAC, lo Joanneum di Vienna (Kubista), DLR e Max Planck della Germania e RAL Inglese.

L’idea è di fondere insieme i dati di stima della precipitazione derivati da satellite (campi VIS e IR di METEOSAT e radiometri SSM/I dei satelliti polari DMSP) e da radar al suolo (dati CERAD).

Del progetto fa anche parte una fase di raccolta di informazioni di tutti i più forti eventi alluvionali in Europa, per la quale lo Joanneum ha sviluppato un motore di ricerca in Internet apposito.

È stato anche fatto uno studio dei cicloni trovando due “conceptual models”: i cicloni atlantici (con pressione al suolo inferiore a 1000 hPa) e quelli mediterranei ($p > 1000$ hPa).

Un primo risultato del confronto tra stime di precipitazione da satellite e da radar dovrebbe essere quello di “calibrare” meglio le stime da satellite per utilizzarle nelle zone non coperte dal radar. Per approfondimenti vedi:

<http://www.isao.bo.cnr.it/meffe/>

3.2 Alberto Mugnai (alberto.mugnai@ifa.rm.cnr.it)

Rainfall monitoring: space borne systems

Lavora all’ISAC di Roma (ex IFA) e si occupa di remote sensing.

Ha accennato ai satelliti geostazionari METEOSAT di seconda generazione (MSG) e alle qualità del loro sensore (SEVIRI), in particolare per quanto riguarda la stima della precipitazione, che non dovrebbe migliorare molto rispetto all’attuale.

Poi descrive i vari satelliti dotati di radiometri: DMSP (radiometri da 19 a 85 GHz), TRMM (da 10 a 85 GHz), EOS Acqua (da 7 a 89 GHz) e satelliti non ancora lanciati. La combinazione di 4 canali diversi permette ai radiometri MW di stimare la pioggia in modo molto migliore al canale IR, grazie ad una migliore distinzione tra i vari tipi di precipitazione.

Per questo motivo c'è chi cerca di calibrare la stima di precipitazione da IR usando i dati del satellite TRMM, che ha sia radiometri che un radar. Per approfondimenti sul TRMM vedi: <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

Nei modelli usati per la stima della pioggia da satellite sono implementati dei modelli di nube, per simulare l'assorbimento del segnale a seconda delle idrometeorie presenti ad ogni quota. Questo porta ad una forte dipendenza della stima dalla microfisica implementata nel modello e ci sono particolari problemi con le zone ghiacciate.

Infine ha accennato a nuovi progetti per la stima della pioggia da satellite, in particolare quello diretto da V. Levizzani (ex ISAO) "EURAINSAT: European satellite rainfall analysis and monitoring at the geostationary scale" e il Global Precipitation Measurement (GPM), fatto dalla NASA. In particolare quest'ultimo prevede di mandare in orbita un satellite polare "core" dotato di un potente radar (come un TRMM di seconda generazione) e poi una costellazione di altri 9 satelliti "minori" dotati solo di radiometri calibrati dal satellite principale. In questo modo si ottiene una copertura frequente di tutto il globo con un'alta risoluzione spaziale.

Per il satellite della costellazione di proprietà dell'Europa EGPM è stato scelto il progetto diretto da Testud e Mugnai, che incorpora anche un piccolo radar a 3 fasci fissi (usato solo per calibrare il radiometro). Per approfondimenti su questi progetti vedi i siti:

<http://www.isao.bo.cnr.it/eurainsat/>

<http://gpm.gsfc.nasa.gov/>

<http://members.tripod.com/precipitationorg>

3.3 Paolina Cerlini Bongioannini (cerlini@wind.mit.edu)

Simulating orographic rain in non-hydrostatic model

Questa ricercatrice dell'Università di Bologna sta finendo il post-doctor al MIT, lavorando con Emanuel sull'equilibrio radiativo convettivo.

Partendo dal modello di nube di Clark riescono a simulare lo sviluppo di fenomeni convettivi verosimili solo imponendo un forcing sul flusso di calore superficiale.

Cercano di studiare la scala temporale della predicibilità della pioggia per capire quali sono i limiti di predicibilità tipici della convezione.

In particolare sta cercando di farlo su un terreno complesso (con orografia) invece che sull'oceano.

3.4 Antonello Provenzale (a.provenzale@isac.cnr.it)

Downscaling models

Lavora all'Istituto di Cosmogeofisica di Torino, attualmente ISAC, e collabora col CIMA di Genova. Si occupa in particolare di trasporto nei fluidi e di turbolenza.

Uno dei problemi principali dei modelli idrologici è la necessità di avere risoluzioni spaziali molto elevate del campo di precipitazione dato come input.

Per descrivere in modo accurato la distribuzione spaziale e l'intermittenza temporale di questo fenomeno si usano tecniche statistiche particolari. In particolare ha presentato tre modelli di downscaling stocastico: multifractal cascade, processi lineari autoregressivi filtrati in modo non-lineare e un modello chiamato "centri di precipitazione coerenti".

Tutto sommato i modelli multifrattali a cascata tra i tre sono quelli che ottengono i risultati

peggiori, quando confrontati alle misure ad alta risoluzione fatte dal radar.

Visto che si interessa molto anche dello studio dei ghiacciai alpini ci ha fatto una lezione sul suo sopralluogo al lago “Effimero” del ghiacciaio Belvedere, sulla parete orientale del Monte Rosa. L’acqua che in breve tempo ha formato questo lago viene da un run-off sotto il ghiacciaio e non superficiale.

In particolare ha fatto l’ipotesi che questo fenomeno sia o legato ad un inizio di “surging” (fase d’espansione in avanti del fronte) oppure legato alla dinamica associata alla possibile “morte” di un ghiacciaio alpino.

3.5 Giorgio Boni (boni@cima.unige.it)

Using concepts of hydrometeorology for regional frequency analysis of extreme rainfall

Lavora al CIMA di Genova. Ha presentato un lavoro per la stima della pioggia in terreni complessi, dove ci sono poche misure.

In particolare ha fatto un’analisi spettrale di Fourier del campo dell’orografia, per prendere solo le prime due componenti spettrali e costruire un’orografia smoothata. Da questo campo semplificato ricava due parametri: la pendenza rispetto al flusso principale dell’aria umida e l’altitudine. Infine fa una multiregressione tra questi due parametri e la pioggia misurata, ottenendo alte correlazioni. Quindi utilizza questa relazione per spazializzare la pioggia su tutto il territorio.

3.6 Roberto Rudari (rr@cima.unige.it)

Hydrometeorology of Mediterranean severe precipitation events

Ha presentato la sua tesi di dottorato svolta al CIMA in collaborazione con il MIT (Entekhabi).

Parte analizzando un database di 30 anni di dati di 1563 stazioni al suolo in Toscana, Emilia-Romagna, Lombardia e Piemonte. Dopo un accurato controllo di qualità ne conserva solo 447 e per ognuna fa la distribuzione delle piogge giornaliere. Per selezionare i “casi estremi” utilizza un algoritmo che seleziona una zona quando almeno una stazione supera il suo 92esimo quantile e le altre stazioni della zona almeno il loro 82esimo quantile.

Di tutti i casi estremi seleziona solo quelli avvenuti in settembre, ottobre e novembre (periodi con maggiori casi alluvionali). Poi sceglie tre “target area”: Toscana, Liguria e Piemonte e studia la circolazione sinottica associata ad ogni caso estremo avvenuto in queste 3 zone (rispettivamente 171, 114 e 97 casi). trova che l’86% dei casi erano associati a ciclogenesi e inoltre trova che il flusso nella media troposfera mediamente per i tre gruppi di casi convogliava l’aria umida nella target area.

Davide Sacchetti dell’ARPA Liguria (centro meteo) ha fatto però notare come i modelli previsionistici possano avere errori nella previsione del ciclone mediterraneo tali da sbagliare completamente la direzione esatta del flusso, e quindi la zona più soggetta ad alluvioni.

Io ho anche fatto notare che lo studio andrebbe esteso anche ai casi non estremi per verificare che le situazioni sinottiche associate siano in qualche modo distinte da quelle delle alluvioni.

4 Parte III: presentazioni brevi

4.1 Giannoni Francesca (gianna@cima.unige.it)

Rainfall radar estimates coupled with rainfall runoff

Questa ragazza del CIMA fa parte del gruppo entrato in ARPA Liguria con il primo luglio 2002.

Nel suo lavoro cerca di degradare i dati ad alta risoluzione di piogge stimate dal radar a scale maggiori (upscaling) per vedere fino a che scala può arrivare per dare una descrizione sufficientemente accurata per simulare una risposta idrologica corretta.

Il lavoro è stato fatto su tre bacini di fiumi americani, coperti dalla rete nazionale di radar (risoluzione a 1 km). Le conclusioni sono che la descrizione spaziale si “rovina” con risoluzioni inferiori a 4x4 km, mentre quella temporale deve essere di dati almeno orari.

4.2 Marco Casaioli (marco.casaioli@dstn.it)

Application of a statistical methodolgy for LAM intercomparaison using a Bootstrap technique

Lavora all’ISAC (ex IFA) di Roma assieme al prof. Lavagnini.

In questo lavoro (pubblicato sul Nuovo Cimento e la cui copia è disponibile in biblioteca) vengono comparati i modelli operativi a scala locale MM5 (regione Abruzzo, Ferretti), LAMBO (ARPA Emilia–Romagna) e QBOLAM (versione del BOLAM per supercomputer parallelo QUADRICS), tutti a risoluzione di 10 km e quindi in modalità idrostatica (in realtà MM5 girava in modo non–idrostatico ma con convezione parametrizzata).

Per ogni punto di griglia studiano la precipitazione giornaliera superiore o meno a certe soglie fissate, creando degli eventi dicotomici. Confrontando con le reanalisi possono costruire tante tabelle di contingenza e quindi calcolare lo skill score di Hanssen–Kuipers, il bias, . . . Attraverso una tecnica di bootstrap creano degli insiemi casuali di KSS e ne studiano la distribuzione per valutare se le differenze tra gli skill score dei modelli siano statisticamente significative. Dopo aver aggiustato i dati per ottenere bias uguali (LAMBO ha più pioggia) i risultati finali tra i tre modelli sono comparabili.

4.3 Basu Sukanta (basu0009@tc.umn.edu)

Non–linearity and chaoticity in time series using the transportation distance function

Questo simpatico ragazzo indiano sta facendo il PhD presso il St. Anthony Falls Laboratory dell’Università del Minnesota. Si occupa in particolare di processi non–lineari e stocastici nei fluidi, con attenzione alla presicibilità dell’atmosfera, e in particolare del boundary layer.

Ha accennato al metodo degli esponenti di Lyapunov per stimare la non–linearità di una serie temporale (se almeno un esponente è positivo il sistema è caotico). Ha citato il lavoro di Edward Lorenz “Predictability: A problem partly solved”, proceedings del ECMWF Seminar on Predictability, 1996, Reading, England, Vol. 1 1-18.

4.4 Magg. Vinicio Pelino (pelino@meteoam.it)

The North Atlantic Oscillation

Questo personaggio non ha presentato il suo lavoro, ma ne ha lasciato copia cartacea. Il maggiore Pelino lavora all'Aeronautica Militare e precisamente alla sede di Pratica di Mare (Roma). Si è laureato in matematica con una tesi di cosmologia sugli spazi di Kaluza-Klein. Dopo un breve periodo di lavoro come informatico è entrato nel servizio meteorologico dell'Aeronautica e ha fatto carriera.

Nel suo attuale campo di ricerca cerca di creare una descrizione della circolazione su grande scala basata sul formalismo della geometria differenziale, per vedere se si trovano grandezze invarianti da poter studiare a livello climatologico. Ha pubblicato alcuni lavori molto teorici sul caos, sul modello climatico Lorenz-84, ma anche "pratici" sull'uso delle reti neurali per derivare la presenza di nebbia dai dati di visibilità (Pasini, Pelino e Potestà "A neural network model for visibility nowcasting from surface observation: Results and sensitivity to physical input variables", Journal of Geophysical Research, vol.106, 2001).

Sta cercando di far pubblicare on-line i dati climatici delle stazioni meteo sul sito dell'Aeronautica <http://www.meteoam.it/>, in particolare confrontandoli con i dati del "clino" (1960-1990).

Riporto infine l'invito che ci ha rivolto a pubblicare sulla loro "Rivista di Meteorologia Aeronautica": mi ha detto che sono interessati a qualsiasi studio di evento severo in Friuli Venezia Giulia o anche lavori climatici su piogge o temperature.

Con questa forte spinta teorica e di "apertura" sta cercando di rinnovare l'Aeronautica Militare "dal di dentro". È stato l'unico partecipante al corso a cui Emanuel -per tre volte- ha chiesto di andare al MIT a fare un post-doctor con lui (notare che non ha fatto il dottorato)!

5 Conclusioni

La scuola estiva Grand Combin 2002 è stata per me un'esperienza formativa importante.

A parte il fatto sempre vero che in occasioni del genere si conoscono persone molto esperte e si possono instaurare dei rapporti di collaborazione con le stesse, anche la qualità intrinseca dei corsi era molto elevata. In particolare le lezioni di Emanuel sulla convezione e di Rotunno sull'influenza dell'orografia nelle piogge sono state molto interessanti.

Un taglio particolare a questo corso è stato dato sulla predicibilità della precipitazione, sottolineando ancora una volta come la precipitazione in contesto convettivo sia molto più difficile non solo da prevedere ma anche da stimare col radar e poi spazializzare statisticamente, rispetto a quella stratificata.

In particolare mi ha colpito l'enfasi posta sull'importanza della velocità verticale nel boundary layer e quindi sulla necessità di provare a misurarla (tramite radar doppler o altri strumenti quali "wind profiler" o "sodar").

È stata anche un'occasione per conoscere colleghi meteo di altre regioni italiane (in particolare Liguria, Trentino, Emilia-Romagna e Lazio) e altri della Protezione Civile di Roma (es. Luca Rossi) o dei "centri funzionali" della Protezione Civile regionale, che stanno assumendo sempre più le competenze meteo, in particolare nelle regioni in cui non esiste un centro meteo regionale.

Voglio anche segnalare che durante il corso una delle riviste scientifiche più citate è stata sicuramente “Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society”, alla quale sarebbe auspicabile abbonarsi. Infine riporto un elenco di testi che più persone mi hanno consigliato come letture “fondamentali”, in particolare i primi tre:

autore	titolo	casa editrice	anno
Kerry A. Emanuel	Atmospheric Convection	Oxford University Press	1994
Robert A. Houze	Cloud Dynamics	Academic Press	1993
Roland B. Stull	An Introduction to Boundary Layer Meteorology	Kluwer Academic Publishers	1988
William Cotton, Richard A. Anthes	Storm and Cloud Dynamics	Academic Press	1989
John A. Dutton	The Ceaseless Wind: An Introduction to the Theory of Atmospheric Motion	McGraw Hill	1976
J. P. Peixoto, A. H. Oort	Physics of Climate	American Institute of Physics	1992

Cervignano del Friuli, 22 luglio 2002.