



Copertina



Prospettive sulla modellistica atmosferica a medio termine

ARPA FVG

Palmanova
04 dicembre 2014

D. B. Gaiotti
ARPA FVG, Centro Regionale di Modellistica Ambientale



Sommario

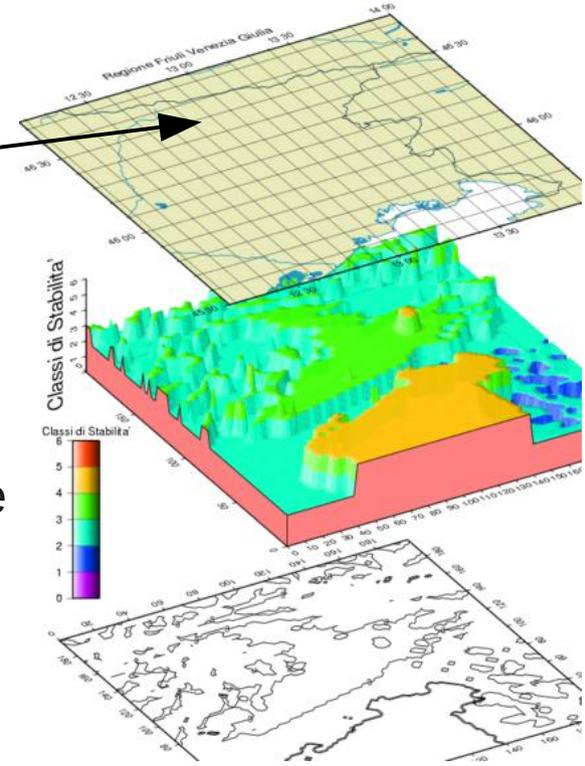


- ★ La risoluzione spaziale (temporale) dei modelli
- ★ Lo stato dell'arte dei modelli globali operativi
- ★ La risoluzione spaziale del WRF al CRMA
- ★ Quali prospettive per i modelli globali?
- ★ Quali prospettive per i modelli ad area limitata?
- ★ Quali strategie per i modelli atmosferici prognostici al CRMA?

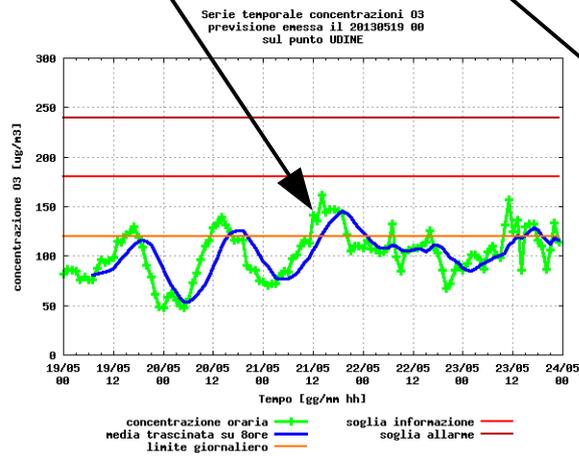
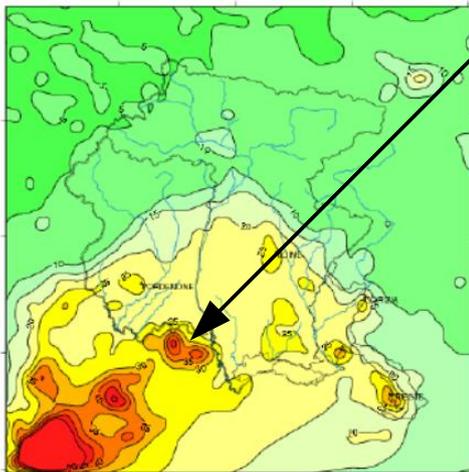
Definizione di risoluzione spaziale effettiva

Qual'è la risoluzione spaziale di un modello numerico che simula un campo? $\phi(x, y, z, t)$

- risoluzione **nominale** (passo di griglia)
- risoluzione **effettiva**



La risoluzione spaziale **effettiva** coincide con le dimensioni tipiche del fenomeno più piccolo che il modello riesce a risolvere.





Attuale configurazione del sistema previsionale ECMWF

Uno tra i migliori modelli di simulazione di campi meteorologici sul dominio globale è:

Integrated Forecast System (IFS)

del

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

IFS integra le equazioni del modello atmosferico usando il **metodo spettrale** + alcune funzioni calcolate sulla **griglia spaziale** del dominio

Aumento della risoluzione ogni 5 anni circa – la risoluzione nominale è la seguente:

operativo
→

| Spectral solution | Grid spacing (km) | Operational at ECMWF | | Notes |
|-------------------|-------------------|--|-----------------|--------------------------|
| | | Start | End | |
| T511 | 39 | 21 November 2000 | 31 January 2006 | High-resolution forecast |
| T799 | 25 | 1 February 2006 | 25 January 2010 | High-resolution forecast |
| T1279 | 15.6 | 26 January 2010 | Current | High-resolution forecast |
| T639 | 31 | 26 January 2010 | Current | Ensemble forecast |
| T255 | 78 | - | - | ERA-Interim |
| T2047 | 10 | Candidate for operational use in ~2015 | - | Research forecast |
| T3999 | 5 | - | - | Research forecast |



Dal continuo al discreto: un passo necessario

Le equazioni differenziali debbo essere **discretizzate** per passare dai metodi di **calcolo simbolico** a quelli di **calcolo numerico**

- Differenze finite (approccio locale)
- Metodo spettrale (approccio globale)

$$\frac{du}{dt} - \frac{uv \tan(\phi)}{R} + \frac{uw}{R} = 2\Omega v \sin(\phi) - 2\Omega w \cos(\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + (\nu \Delta \mathbf{v})_x \quad (2.5)$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan(\phi)}{R} + \frac{vw}{R} = -2\Omega u \sin(\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + (\nu \Delta \mathbf{v})_y \quad (2.6)$$

$$\frac{dw}{dt} - \frac{u^2 + v^2}{R} = 2\Omega u \cos(\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + (\nu \Delta \mathbf{v})_z \quad (2.7)$$

The state equation:

$$p = \rho RT \quad (2.8)$$

The continuity equation:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2.9)$$

The energy conservation:

$$\frac{d\eta}{dt} = C_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} \quad (2.10)$$



Differenze finite e metodo spettrale

Differenze Finite (approccio locale – si converge localmente)

L'idea di base è lo sviluppo in serie di Taylor

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) f(x, y) = g(x, y)$$

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}h + \frac{f^{(2)}(x_0)}{2!}h^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}h^n + R_n(x),$$

Metodo spettrale (approccio globale – si converge su tutto il dominio)

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) f(x, y) = g(x, y)$$

$$f =: \sum a_{j,k} e^{i(jx+ky)}$$

$$g =: \sum b_{j,k} e^{i(jx+ky)}$$

$$\sum_{j,k} -a_{j,k}(j^2 + k^2) e^{i(jx+ky)} = \sum_{j,k} b_{j,k} e^{i(jx+ky)}$$

$$a_{j,k} = -\frac{b_{j,k}}{j^2 + k^2}$$

Il metodo spettrale prevede tre blocchi di calcolo essenziali:

- Calcolare la trasformata di Fourier per i campi noti $g(x, y)$
- Calcolare i coefficienti della trasformata di Fourier della soluzione
- Calcolare l'antitrasformata di Fourier della della trasformata della soluzione $f(x, y)$

■ Si deve troncare le serie



Come valutare la risoluzione effettiva



Un metodo di valutazione, per i modelli meteorologici, si basa sul confronto tra lo spettro dei campi simulati e quello del campo misurato o teoricamente atteso, per il vento al suolo.

RA-2 sono misure indirette di vento al suolo eseguite tramite satellite

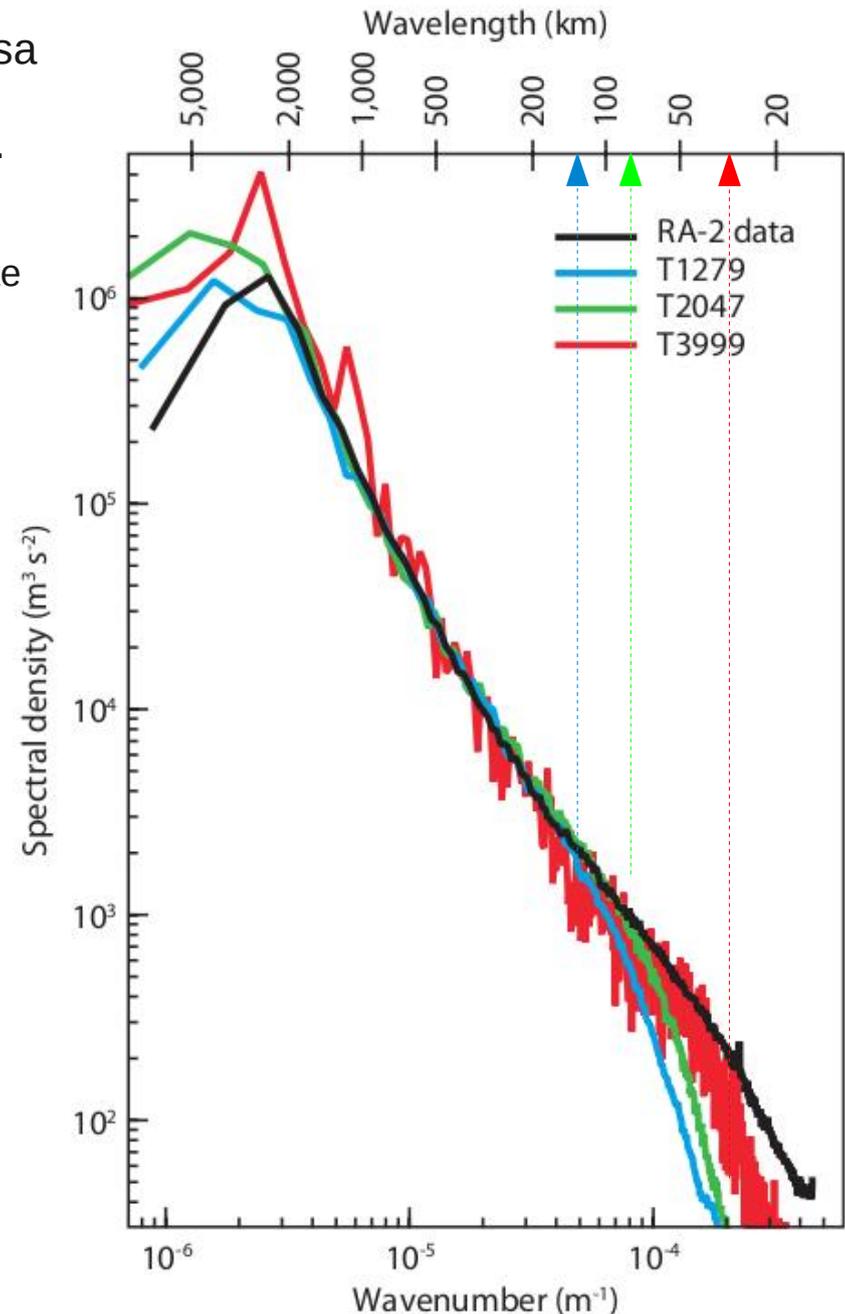
Esempio di ECMWF

T1279 Risolve le strutture dei campi RA-2 al più alla scala di 120 km (ovvero 8 x risoluzione nominale)

T2047 Risolve le strutture dei campi RA-2 al più alla scala di 80 km (ovvero 8 x risoluzione nominale)

T3999 Risolve le strutture dei campi RA-2 al più alla scala di 40 km (ovvero 8 x risoluzione nominale)

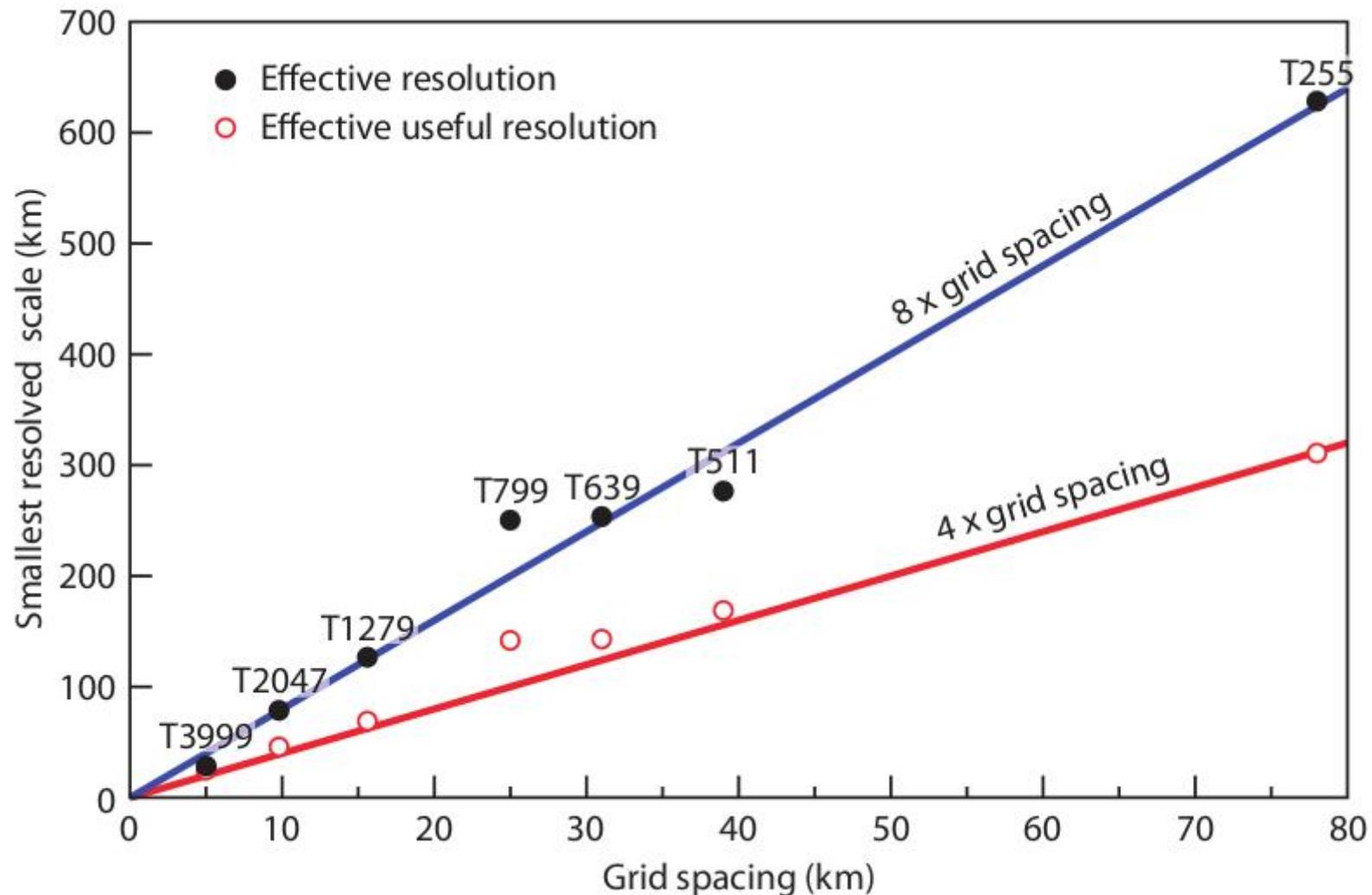
Attualmente le analisi di ECMWF utilizzate dal CRMA hanno risoluzione di 0.5 gradi ovvero 50 km circa estratte dal T =< T1279





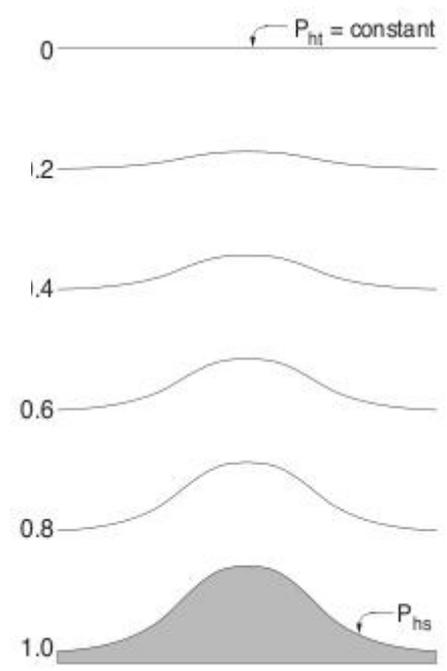
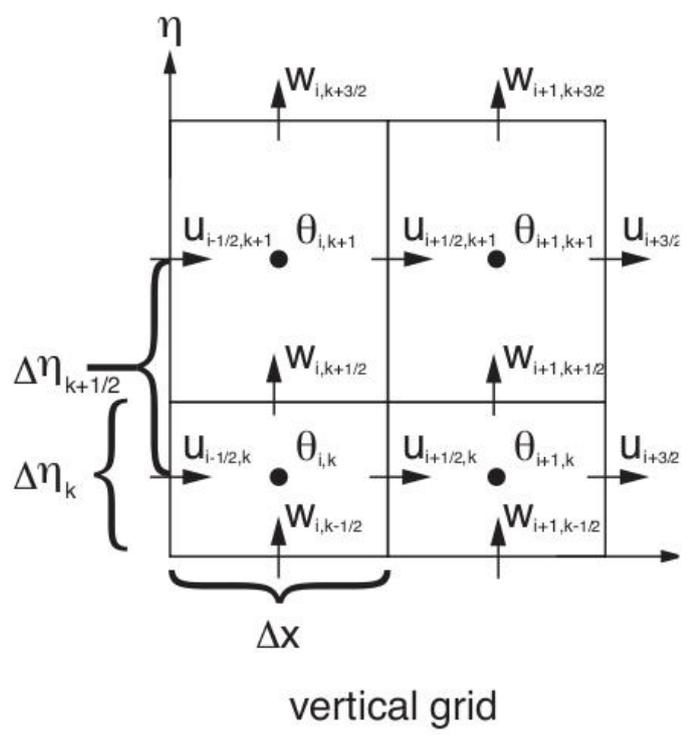
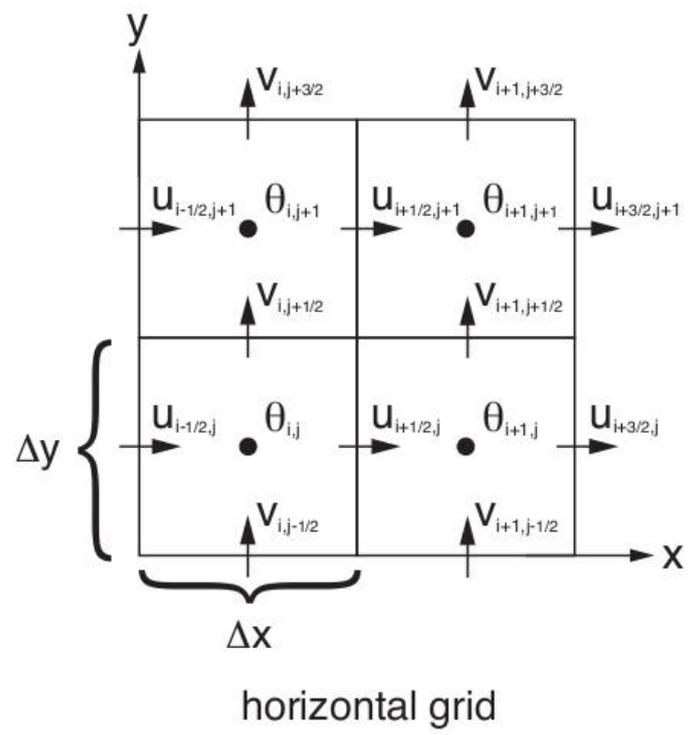
La dipendenza dal campo di riferimento

Visto che la risoluzione effettiva dipende dalle dimensioni del fenomeno più piccolo che il modello riesce a risolvere rispetto a dei campi di riferimento, si può dedurre che ci siano più di un fattore di degrado della risoluzione nominale



Il modello WRF – metodo alle differenze finite

Il modello WRF usa il metodo Runge-Kutta al terzo ordine (RK3) su griglia di Arakawa di tipo C - “staggerata”



Coordinate verticali tipo sigma che seguono il terreno

$$\eta = (p_h - p_{ht}) / \mu \quad \text{where} \quad \mu = p_{hs} - p_{ht}$$

Il campo di riferimento utilizzato per i confronti del modello WRF è teorico ed è stato determinato eseguendo delle regressioni su spettri di potenza dell'energia cinetica del vento

Dipendenza dal numero d'onda k

- a larga scala dipendenza funzionale k^{-3}
- alle scale piccole (turbolenza) dipendenza funzionale $k^{-5/3}$

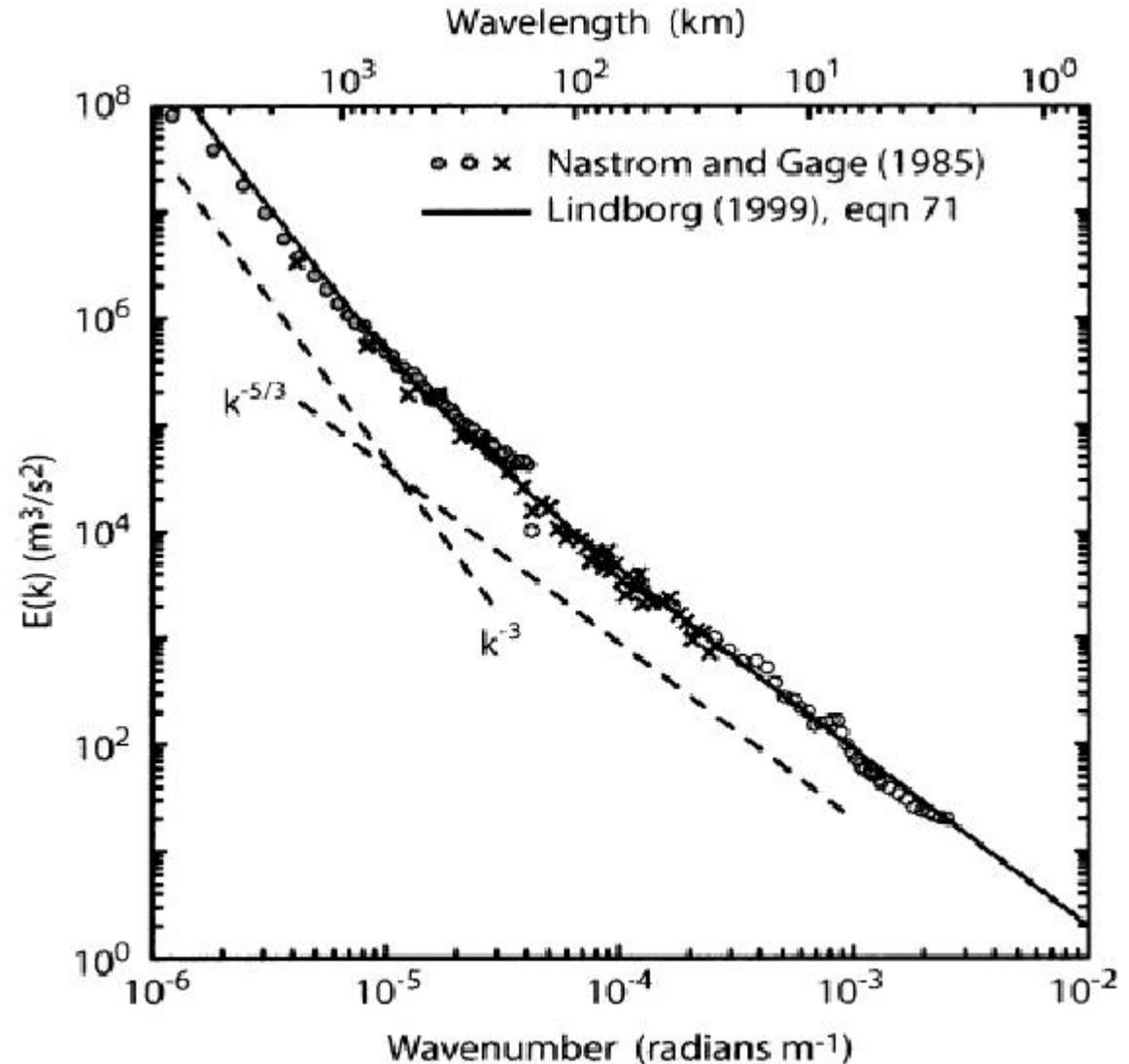


FIG. 1. Nastrom and Gage (1985) spectrum derived from the GASP aircraft observations (symbols) and the Lindborg (1999) functional fit to the MOZAIC aircraft observations.



La risoluzione effettiva del WRF – il fattore di degrado

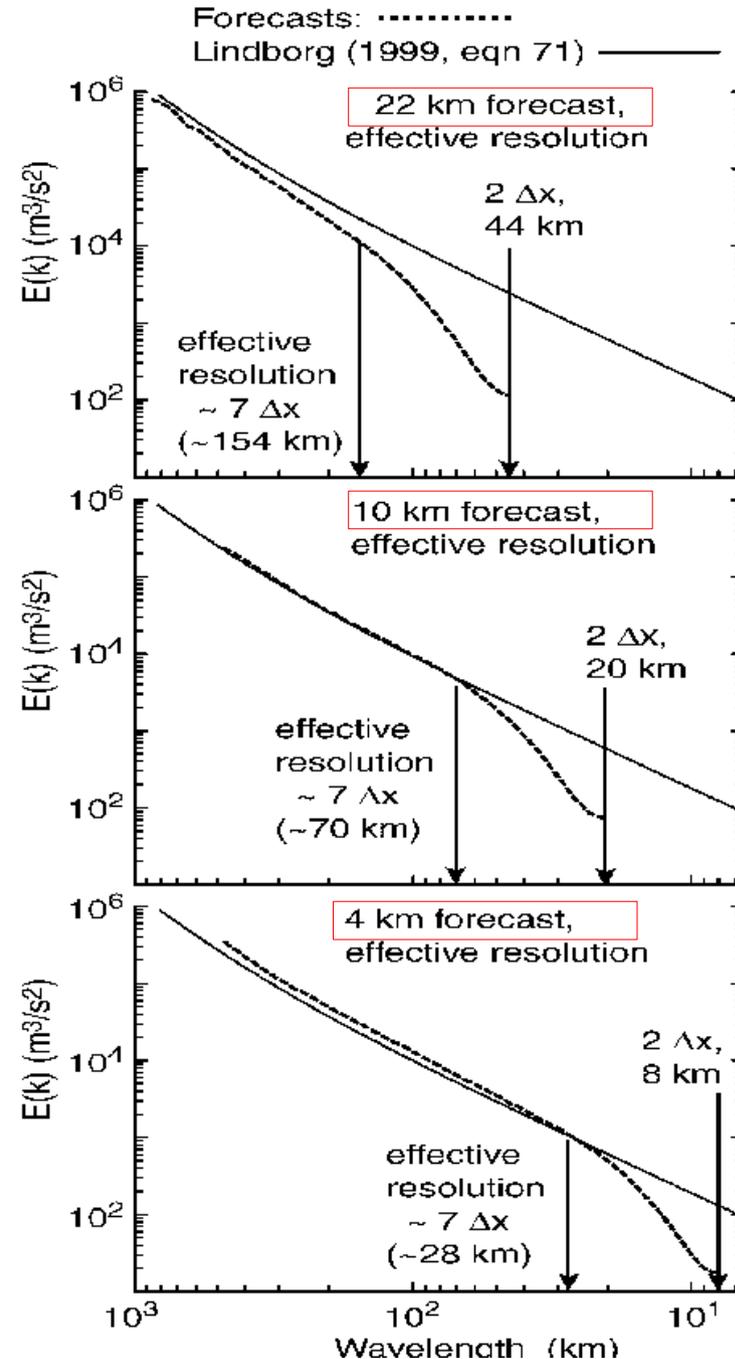
Test eseguiti con run del WRF a diverse risoluzioni spaziali e confrontati con lo spettro di potenza teorico portano alla conclusione che la risoluzione effettiva del modello, per il vento, è sette volte inferiore a quella nominale

Fattore di degrado del WRF per il vento

7X

Per la configurazione operativa del WRF al CRMA

Risoluzione effettiva = **14 km**

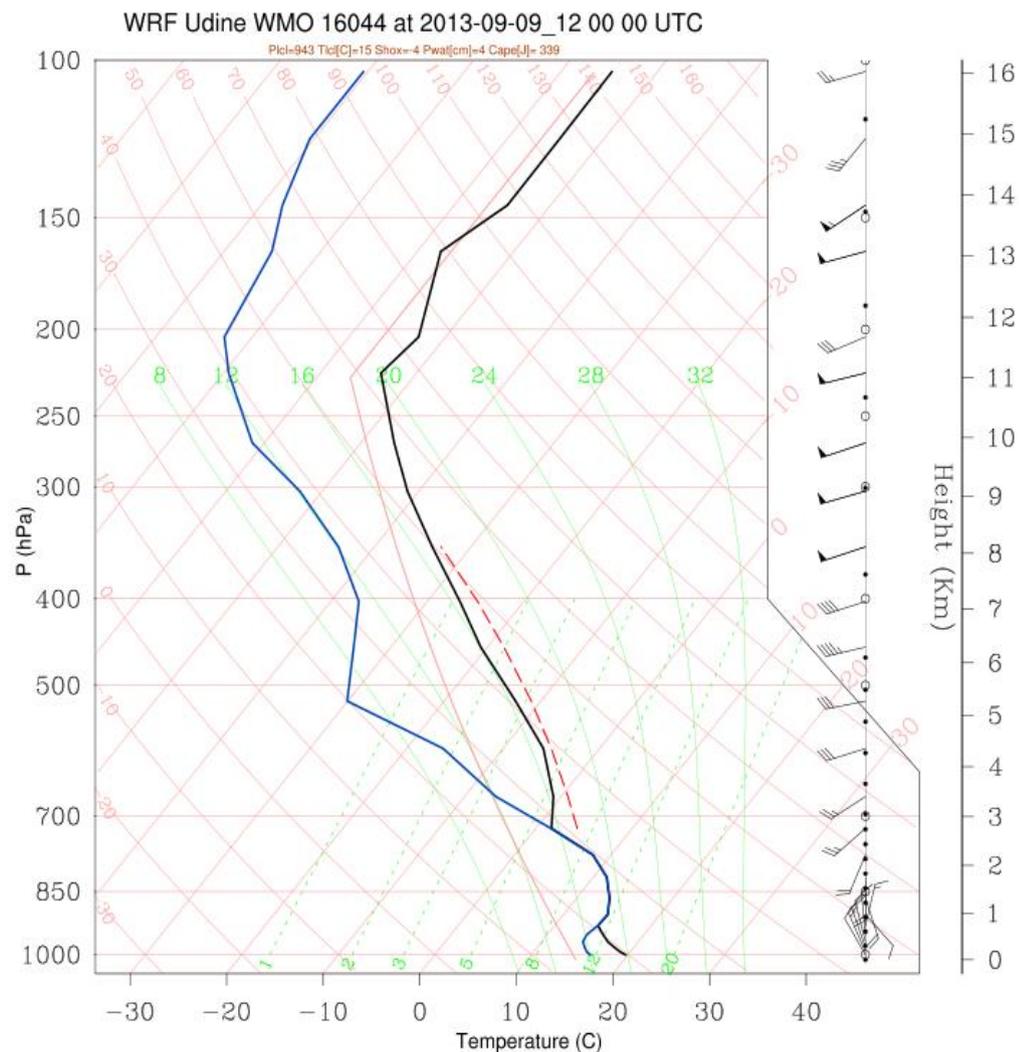
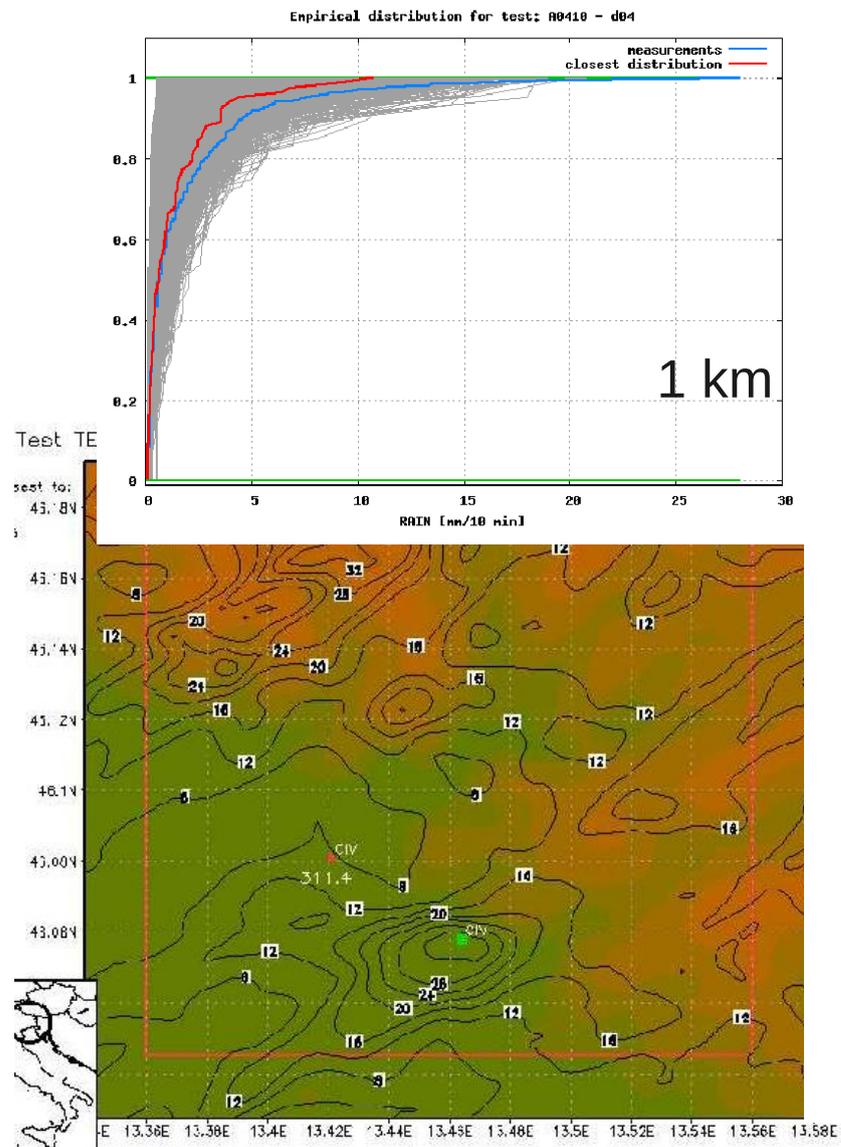


La risoluzione effettiva del WRF – altri riferimenti

Precipitazioni intense – profili termodinamici

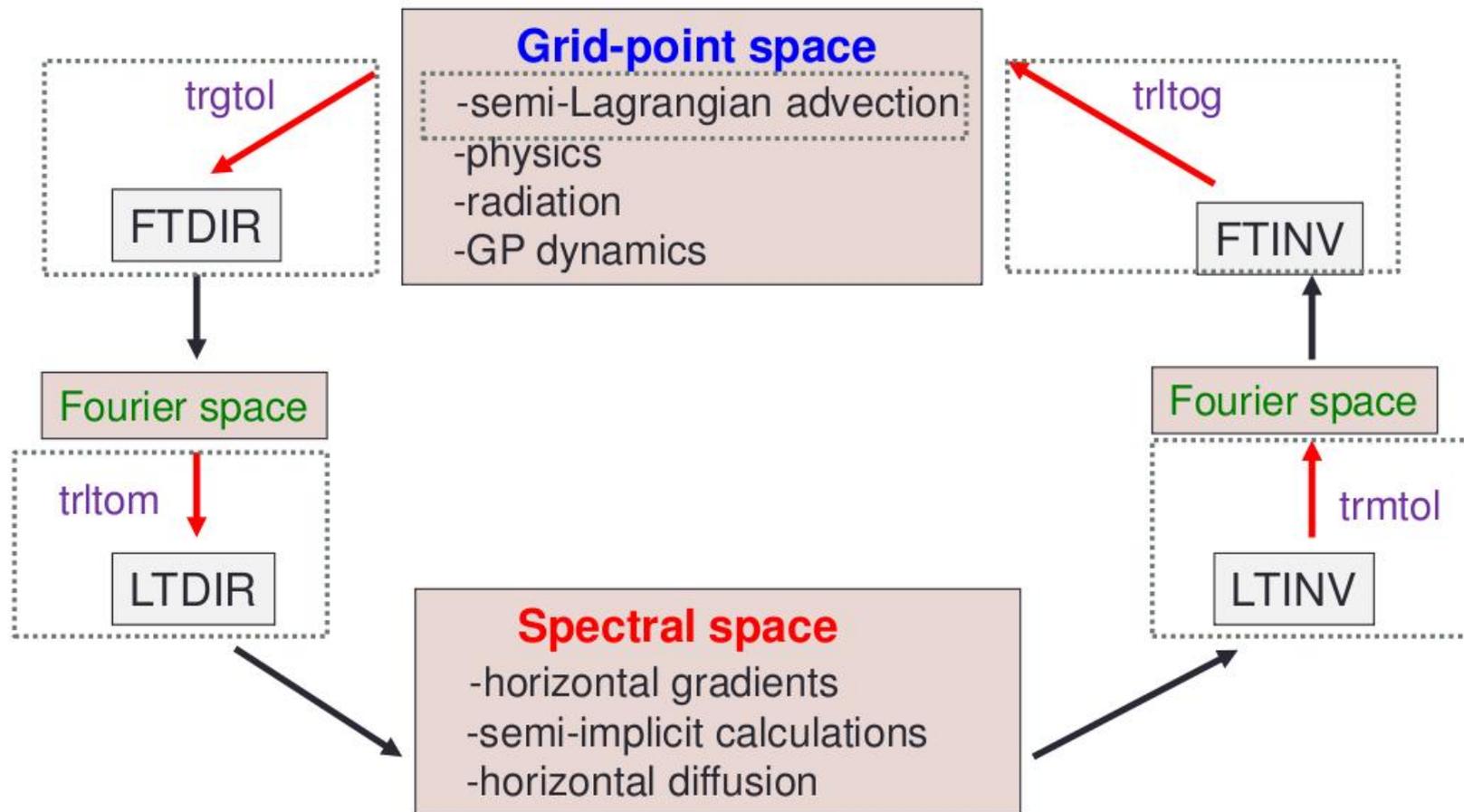
Nested domains feedback OFF

0.6 km NO feedback



Prospettive per i modelli globali – tempi di calcolo

Tempi di calcolo non trascurabili con il metodo spettrale
Trasformate di Fourier e di Legendre con rispettive inverse, oltre al resto



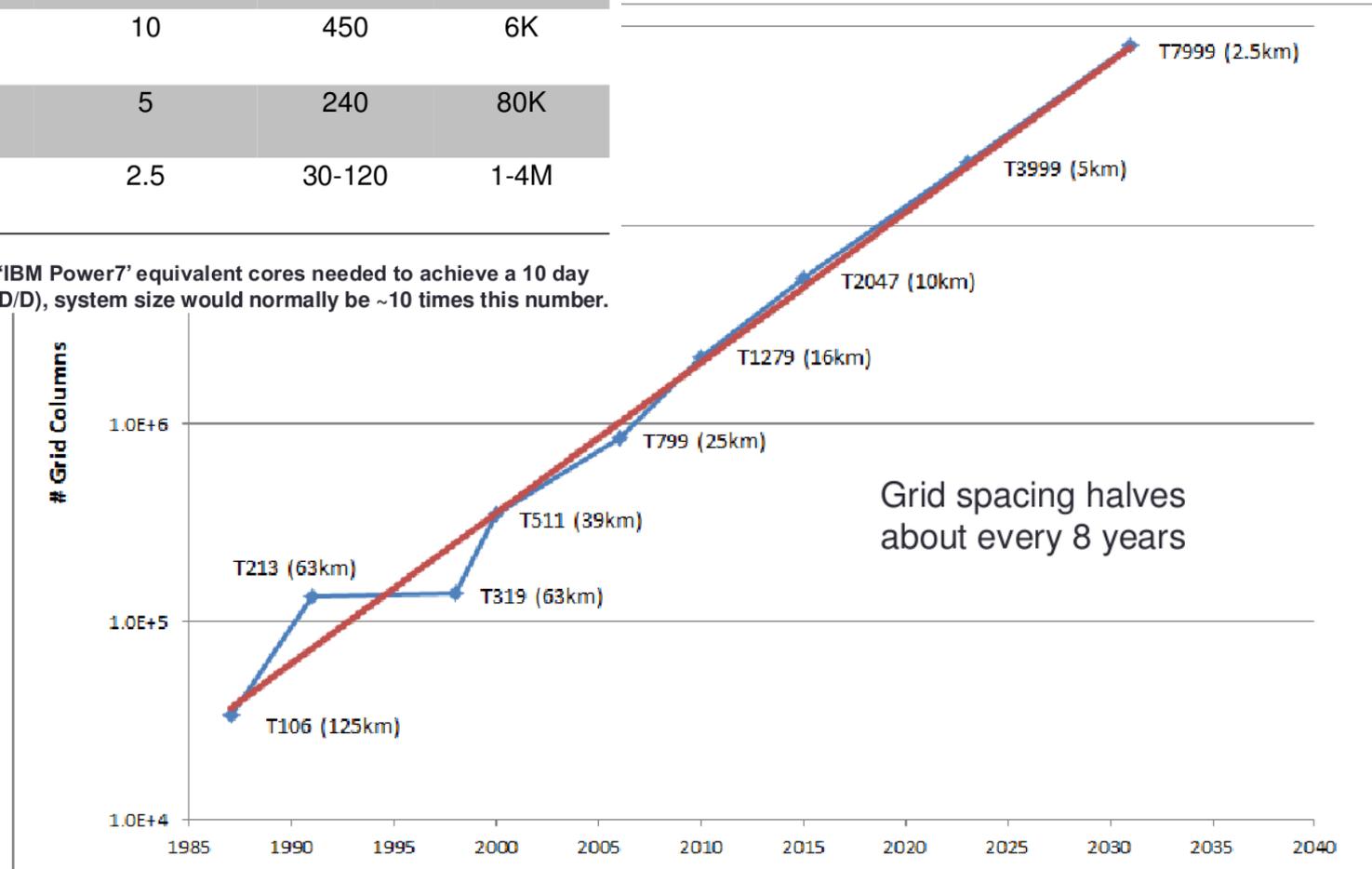


Prospettive per i modelli globali – tempi di calcolo (cont.)

Per raggiungere le risoluzioni spaziali attese secondo i trend fino ad oggi osservati si deve aumentare il numero di cores

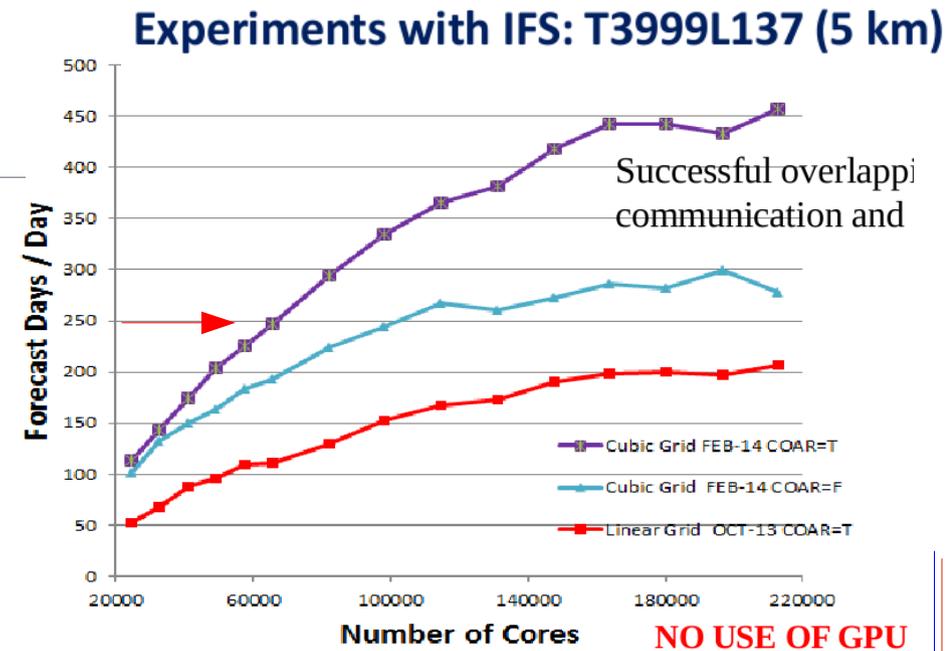
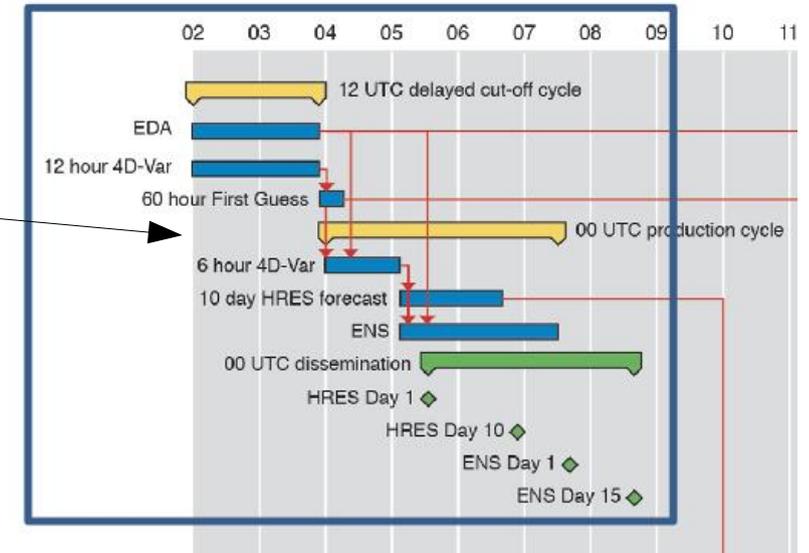
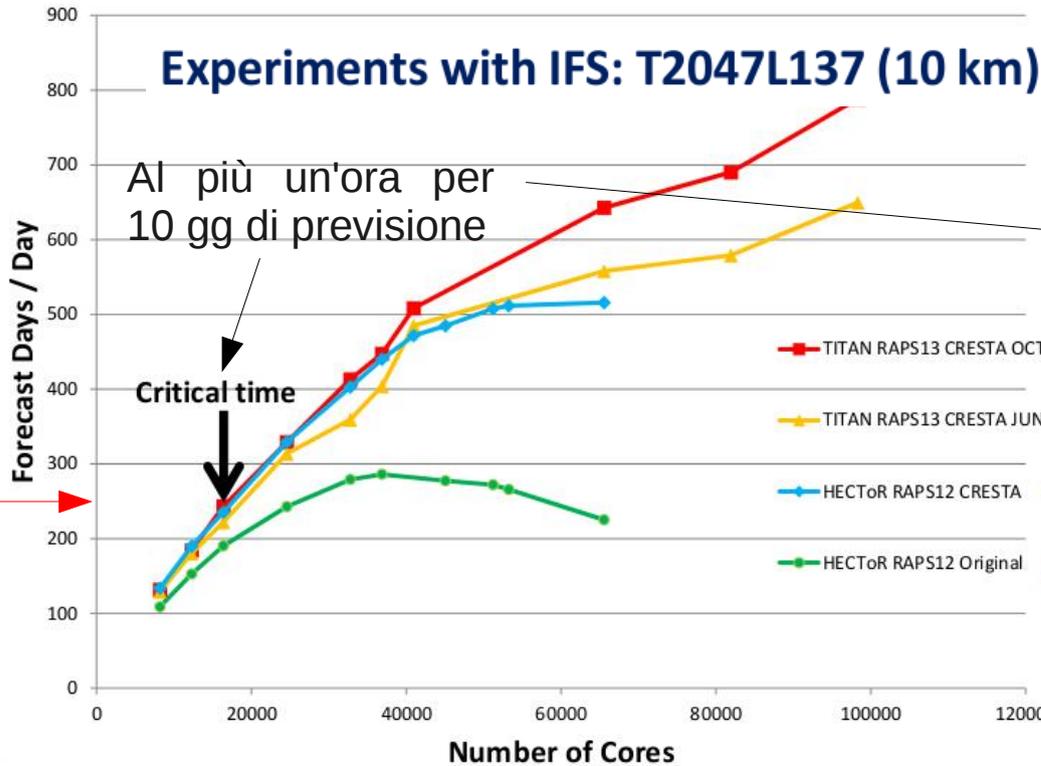
| IFS model resolution | Envisaged Operational Implementation | Grid point spacing (km) | Time-step (seconds) | Estimated number of cores ¹ |
|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------|--|
| T1279 H ² | 2013 (L137) | 16 | 600 | 2K |
| T2047 H | 2014-2015 | 10 | 450 | 6K |
| T3999 NH ³ | 2023-2024 | 5 | 240 | 80K |
| T7999 NH | 2031-2032 | 2.5 | 30-120 | 1-4M |

1 – a gross estimate for the number of 'IBM Power7' equivalent cores needed to achieve a 10 day model forecast in under 1 hour (~240 FD/D), system size would normally be ~10 times this number.



Prospettive per i modelli globali – tempi di calcolo (cont.)

I tempi di calcolo debbo essere accettabili per produrre previsioni in tempi utili



NO USE OF GPU

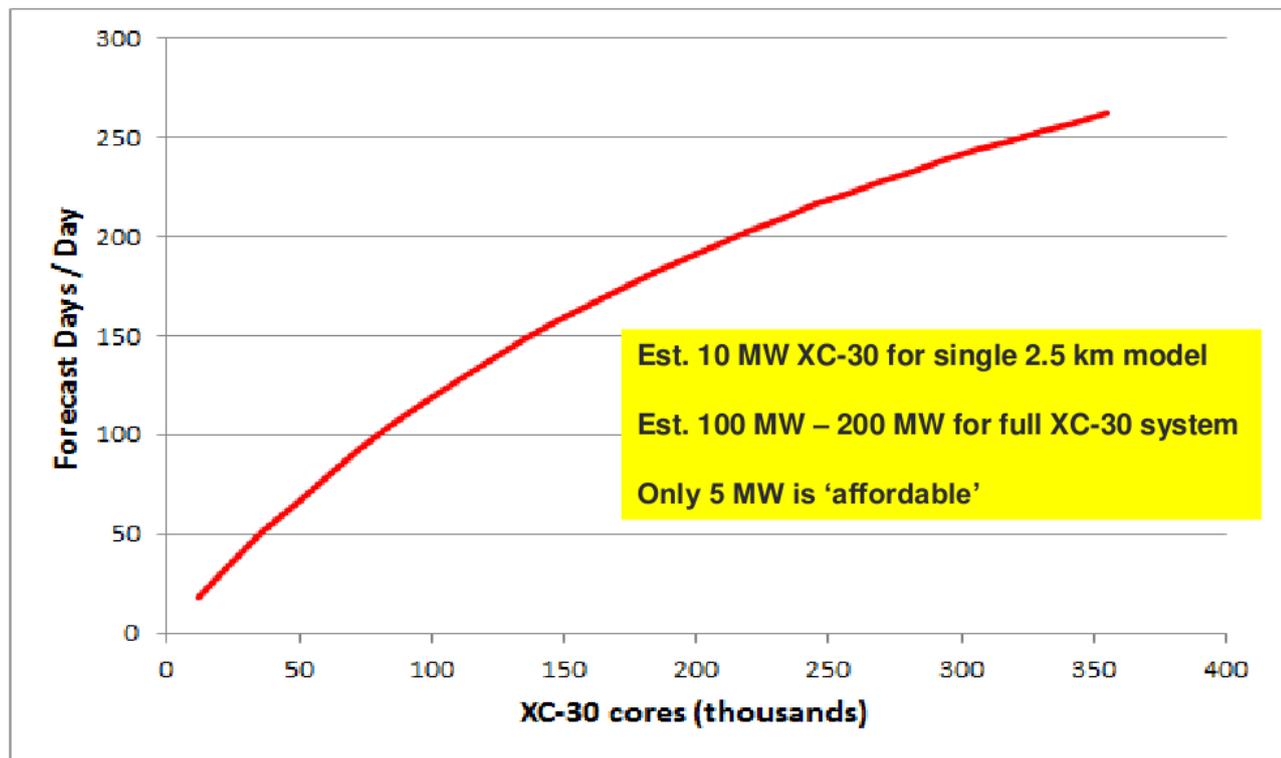


Prospettive per i modelli globali – consumo energetico



Con le attuali tecniche di calcolo ed hardware, ci sono dei limiti imposti dai consumi

2.5 km (~2032) global IFS model EXTRAPOLATION

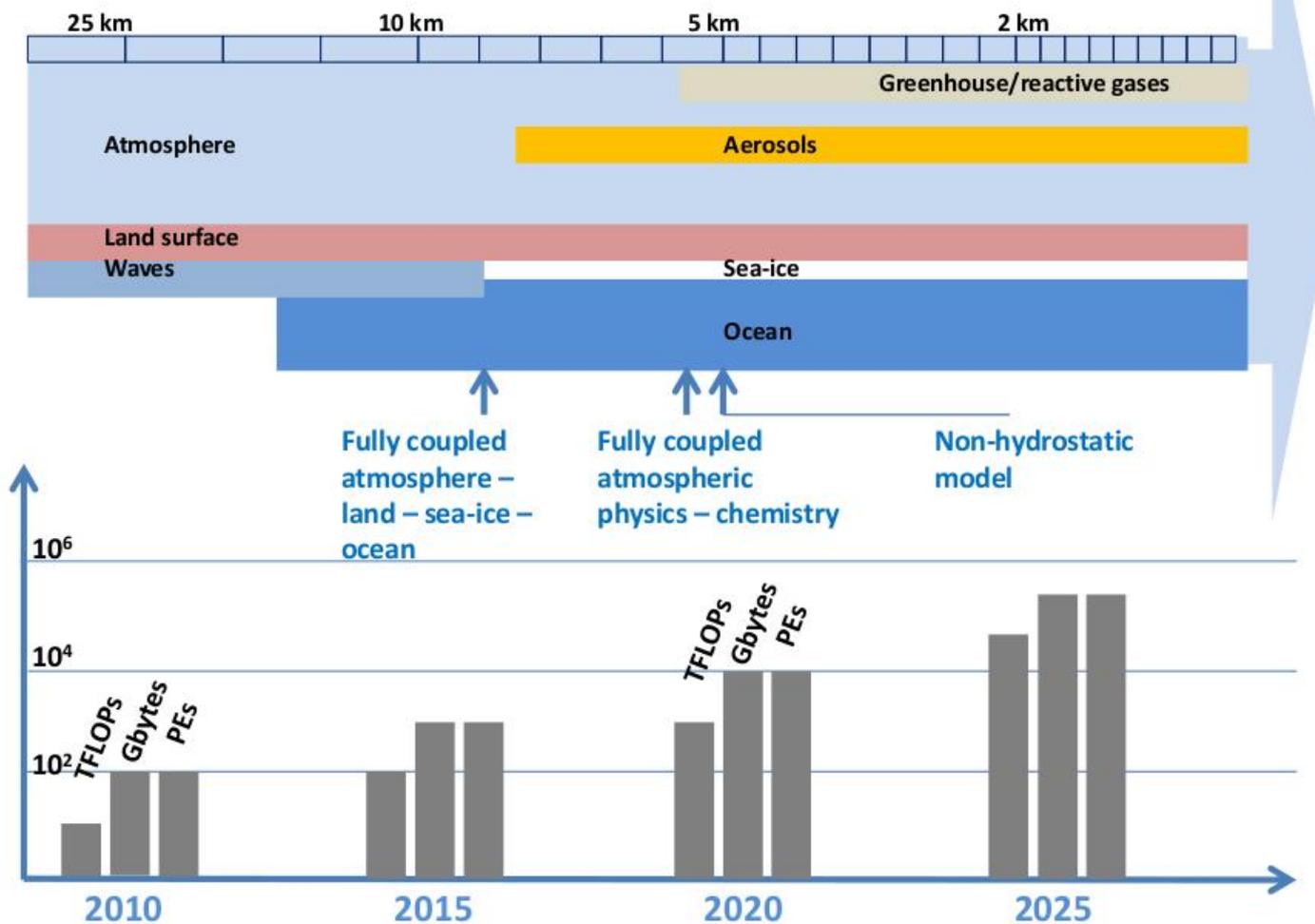


- ◆ ECMWF uses the equivalent energy comparable to the annual consumption of ~8000 4-bedroom houses!
- ◆ 51 ENS members consume about 330KWh, approximately the same as a single (~5km) global 10-day forecast

Prospettive per i globali: il caso ECMWF – scenario migliore

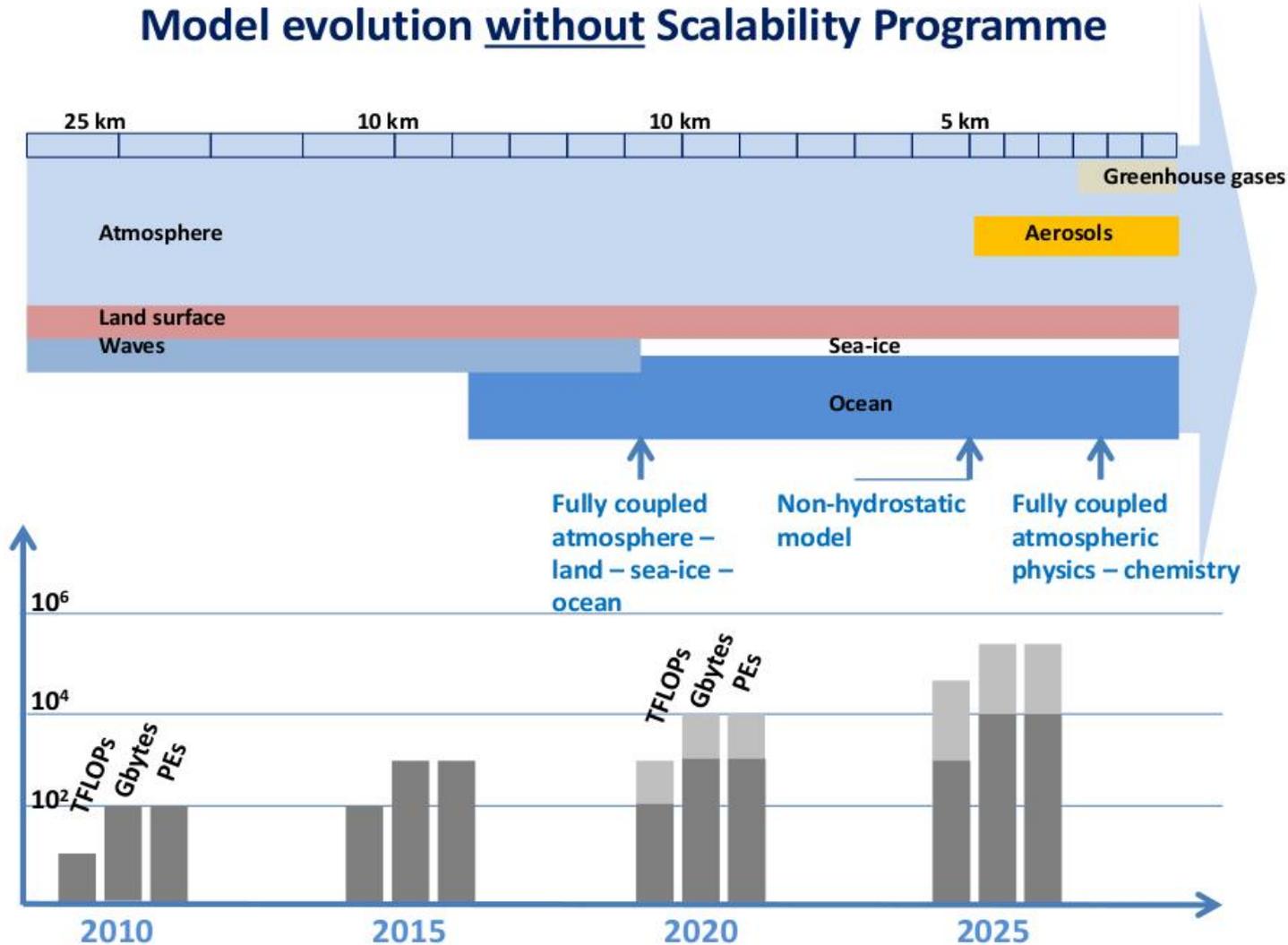
Le richieste per i modelli globali futuri non riguardano solo la risoluzione spaziale, ma anche l'interazione con gli oceani, la chimica ed il trasporto di particolato

Model evolution with Scalability Programme



Prospettive per i globali: il caso ECMWF – scenario base

Le richieste per i modelli globali futuri non riguardano solo la risoluzione spaziale, ma anche l'interazione con gli oceani, la chimica ed il trasporto di particolato



Prospettive per i globali: le strategie per il futuro - ECMWF

Rivoluzione nella risoluzione delle equazioni. Ispirazione al risolutore EULAG

The proposed work will synthesise the complementary skills of two exceptionally successful modelling systems:

- ECMWF's (IFS) is one of the most comprehensive Earth-system models available in the world
- EULAG offers unprecedented expertise in multi-disciplinary computational fluid dynamics (CFD) ranging from simulations of laboratory flows to magneto-hydrodynamics of solar convection.

The key technologies are EULAG's numerical procedures expressed in **time-dependent generalized curvilinear coordinates**, pairing the mathematical apparatus of general relativity with modern CFD

The new model will prepare ECMWF for predicting with greater fidelity extreme weather events that are critical to the protection of society. Moreover, it is envisaged that the next generation forecasting system will be one of the most advanced computing tools available to the European community for operations, research and education.

PantaRhei + CRESTA + Loughborough University

- ◆ Flexible unstructured mesh data structure with options to retain reduced Gaussian grid nodes
- ◆ Change of equations
- ◆ Compact stencil, minimizing communication and data movement
- ◆ Fast route to competitive real weather simulations

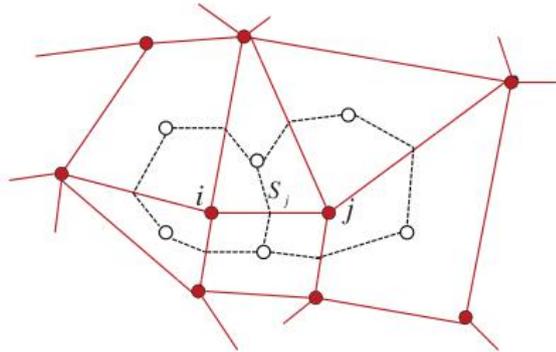
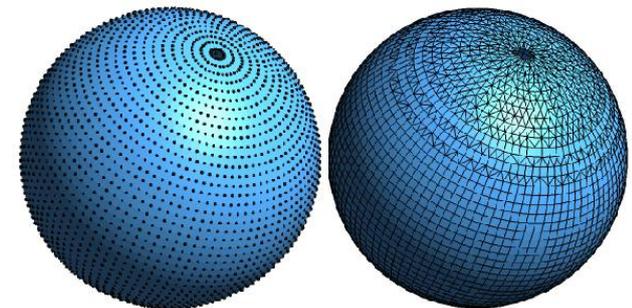


Fig. 1. The edge-based, median-dual approach in 2D. The edge connecting vertices i and j of the primary polygonal mesh pierces, precisely in its middle, the face S_j shared by computational dual cells surrounding vertices i and j ; open circles represent dual cells.

PantaRhei

Ongoing research project | 2013 to 2018

ECMWF hosts the PantaRhei project, the development of an interdisciplinary forecasting system for simulating multi-scale fluid flows (FP7/2012/ERC Advanced Grant agreement no. 320375).





Quali prospettive per i modelli ad area limitata?

WRF

- Proseguirà per almeno ancora un decennio con lo stesso cuore dinamico.
- Miglioramenti nella scalabilità tramite utilizzo di GPU e acceleratori
- Miglioramento delle parametrizzazioni
- Miglioramento degli schemi chimici e di trasporto

COSMO

- Riscrittura del codice per aumentarne la scalabilità
- Riscritture del cuore dinamico come per ISF ECMWF – progetto Panta Rhei

I migliori modelli ad area limitata (WRF COSMO, ecc.) sono non idrostatici, quindi le migliorie saranno concentrate su:

- Parametrizzazioni di processi fisici e chimici non esplicitamente risolti
- Scalabilità del codice



Quali strategie per i modelli atmosferici prognostici al CRMA?



WRF

Aumento performance di calcolo e miglioramento dei workflow per:

- Incremento della risoluzione spaziale fino a 1 km (2015/2016)
- Aggiunta del run 12 UTC e estensione a 10gg (2015)

COSMO

Implementazione operativa con stesse condizioni al contorno del WRF

- Implementazione con risoluzione spaziale 2 km o 4 km (2015)
- Obiettivo risoluzione spaziale 1 km (2016)

EULAG

Esecuzione di alcuni test (2015/2017)

- **Non esiste un utilizzo operativo** dello EULAG. Ci sono esperimenti di portare il cuore dinamico nel COSMO.
- EULAG al CRMA per eseguire simulazioni del flusso attraverso **corpi immersi su domini spaziali piccoli**, e seguendo il fluido tramite **traccianti passivi** per esempio gli odori.
- Simulazioni di dispersioni di inquinanti non reattivi in cui è prevista una estensione in verticale paragonabile con quella in orizzontale, oppure circolazioni in valli o gruppi di valli dove il WRF avrebbe sicuramente problemi con le pendenze a causa della **terrain coordinates vertical dimension**.
- Probabilmente potrebbe andare bene anche per eseguire esperimenti di piogge intense e localizzate o di venti forti come la bora o i salti idraulici nelle valli alpine.
- Potrebbe essere uno di quegli strumenti da utilizzare con un workflow per eseguire serie di simulazioni su problemi appartenenti alla stessa classe per la quale è stato preparato il codice.

Come procedere.

Dedicarci due settimane di lavoro effettivo per eseguire alcuni esperimenti. Poi progettare il workflow che dovrebbe renderlo facilmente applicabile a classi di problemi. Provare a definire dei casi studio, già pronti, per gli studenti.