

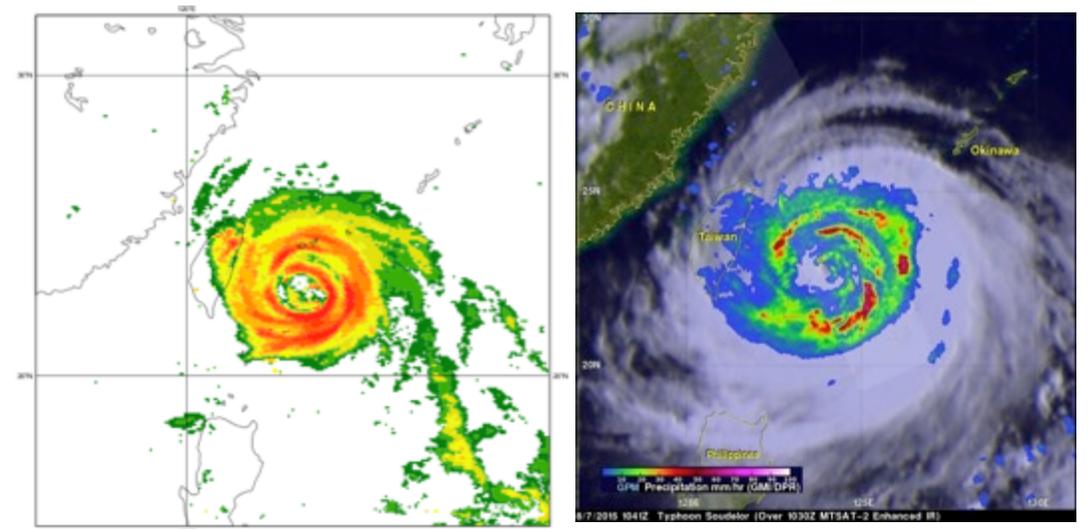
1966-2016

50 anni di progresso in meteorologia, e il contributo di ECMWF

Dr. Roberto Buizza

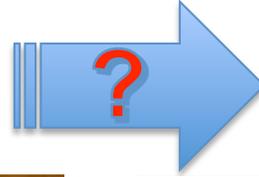
Lead Scientist, ECMWF

Roberto.buizza@ecmwf.int

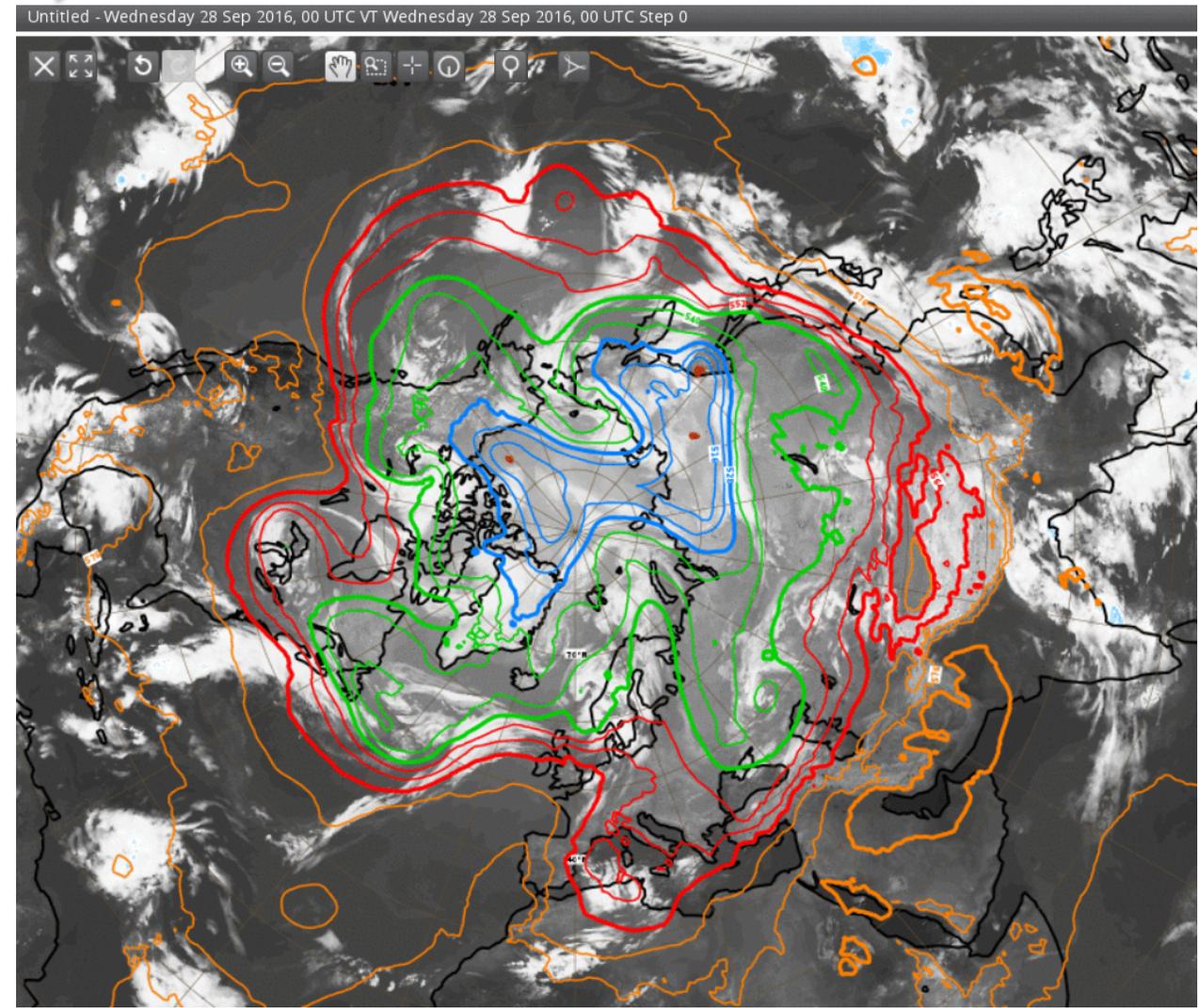
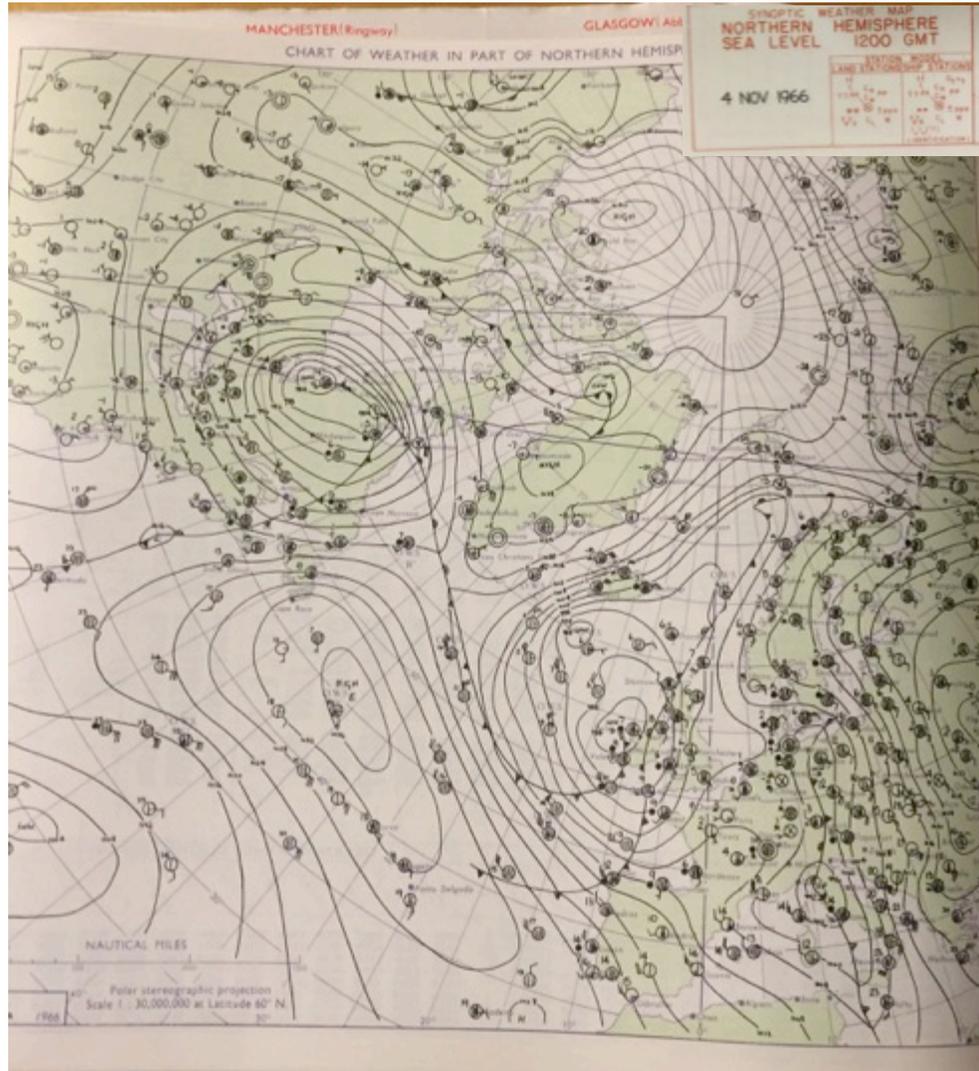


Il ciclone Soudelor (Aug 2015): simulazione (analisi) e realtà'.

4 Novembre 1966



28 Settembre 2016



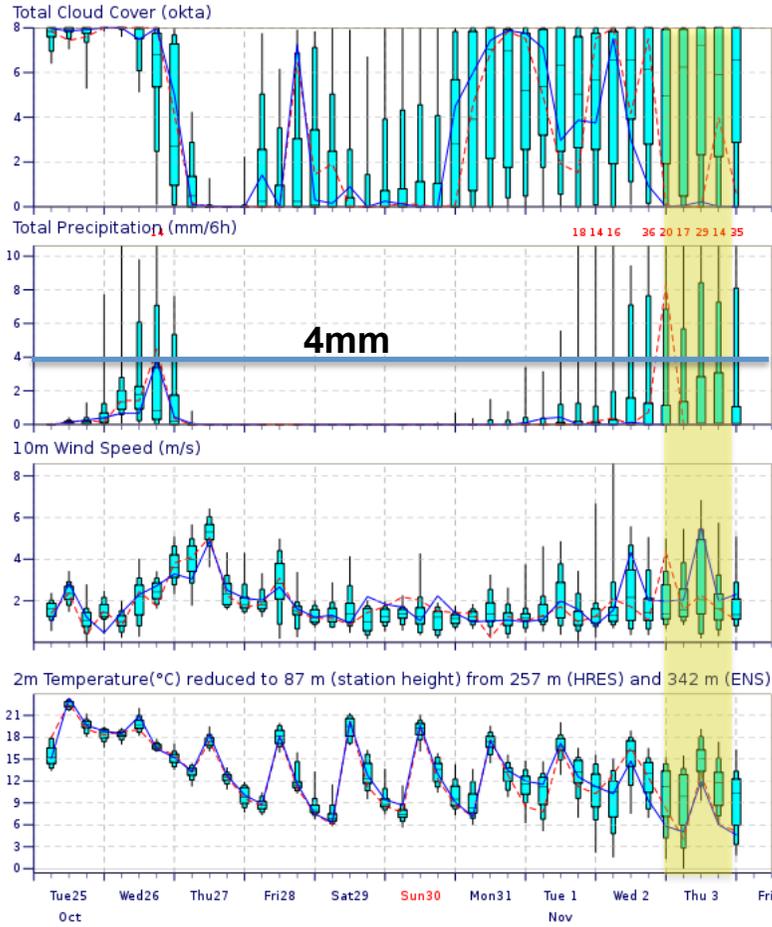
Agenda

- Quali fenomeni e quali scale (temporali e spaziali) riusciamo a prevedere oggi?
- Quanti sono i limiti (giorni) delle previsioni meteo dei vari fenomeni?
- Come siamo riusciti a raggiungere tali limiti?
- Quali sono stati gli ingredienti essenziali che hanno portato a tale progresso?

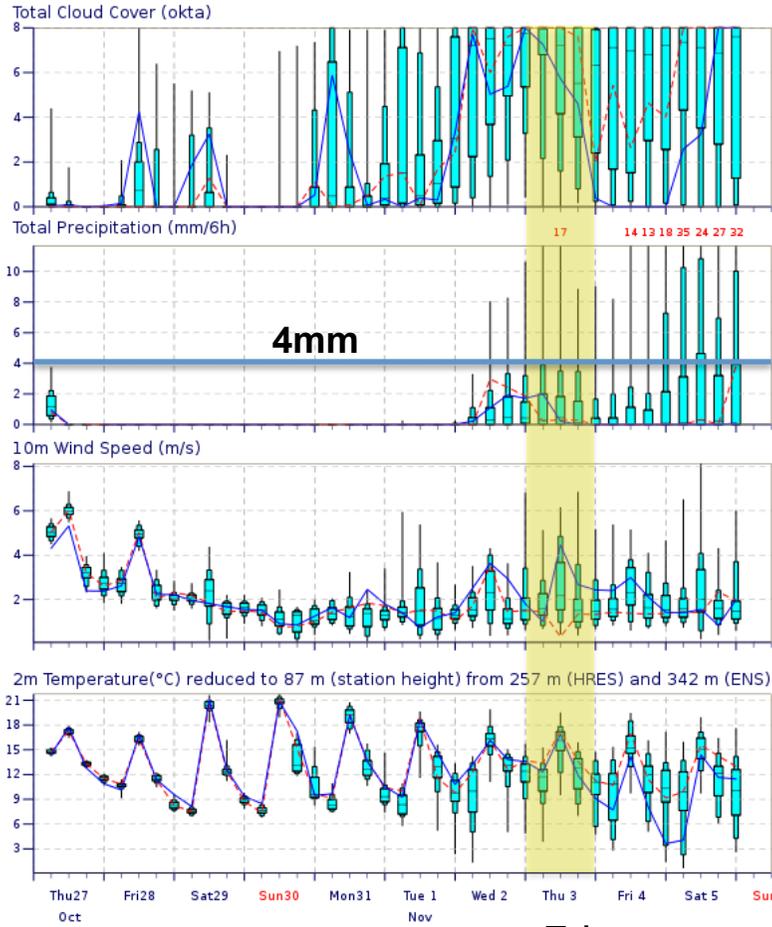
Analizzeremo queste domande analizzando brevemente la storia di ECMWF.

2016: previsioni a scala locale di temperatura e pioggia (fino a 3-5 giorni)

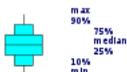
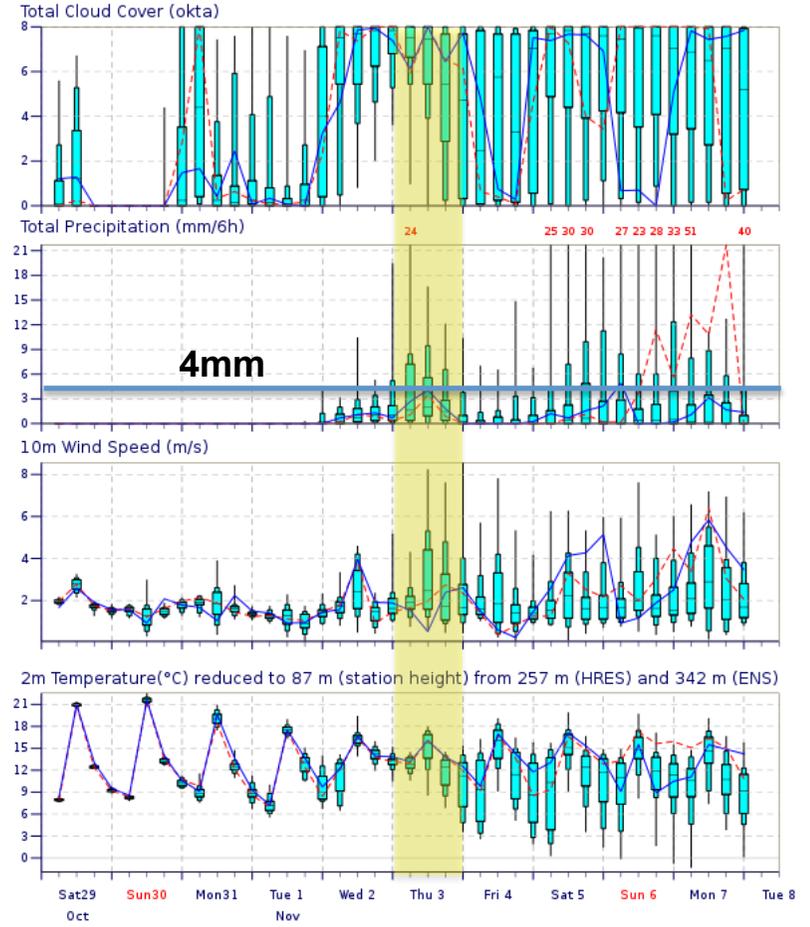
ENS Meteogram
 Florence, Italy 43.79°N 11.35°E (ENS land point) 87 m
 High Resolution Forecast and ENS Distribution Tuesday 25 October 2016 00 UTC



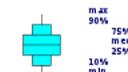
ENS Meteogram
 Florence, Italy 43.79°N 11.35°E (ENS land point) 87 m
 High Resolution Forecast and ENS Distribution Thursday 27 October 2016 00 UTC



ENS Meteogram
 Florence, Italy 43.79°N 11.35°E (ENS land point) 87 m
 High Resolution Forecast and ENS Distribution Saturday 29 October 2016 00 UTC



ENS Control (16 km) High Resolution (8 km)



ENS Control (16 km) High Resolution (8 km)



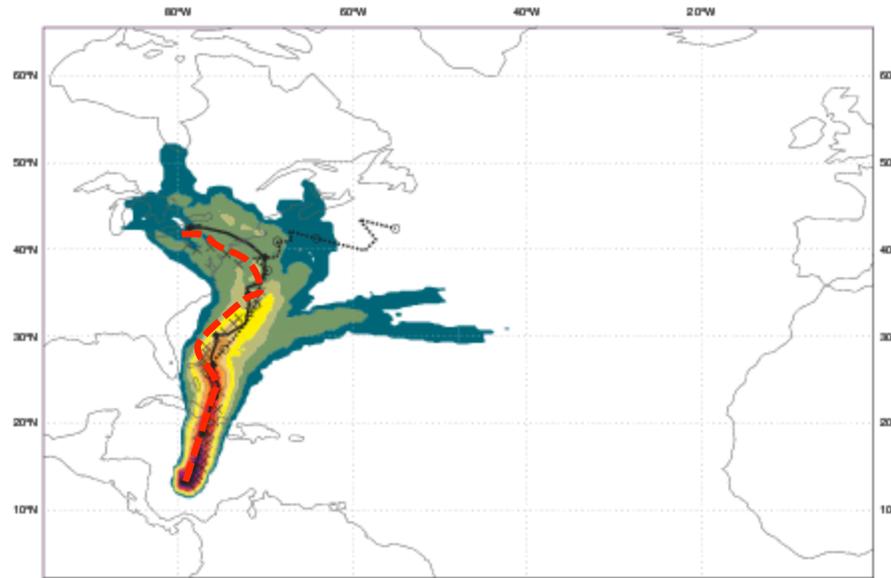
ENS Control (16 km) High Resolution (8 km)

2016: previsioni di cicloni tropicali (fino a 5-10 giorni)

Sandy, 29 ottobre 2012.

Date 20121023 00 UTC @ECMWF
 Probability that **SANDY** will pass within 120 km radius during the next 240 hours
 tracks: **solid=OPER**; **dot=Ens Mean** [reported minimum central pressure (hPa) 998]

5-10 10-20 20-30 30-40 40-50 50-60 60-70 70-80 80-90 >90%

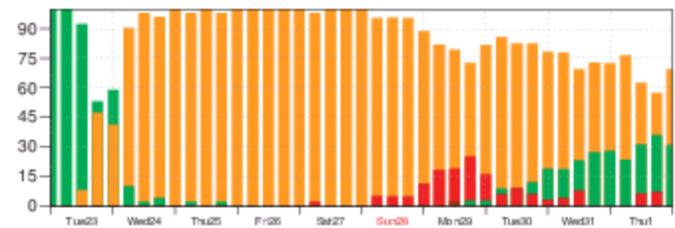


List of ensemble members numbers forecast Tropical Cyclone

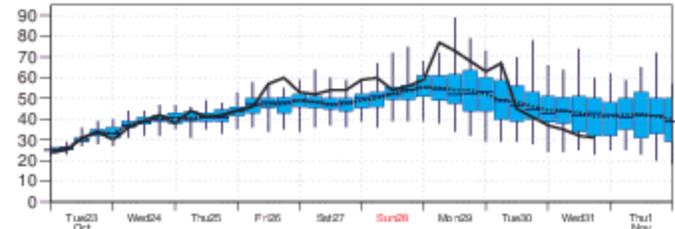
Intensity category in colours: TD[up to 33] TS[34-63] HR1[64-82] HR2[83-95] HR3[>95 kt]

+024 h:lv:cd	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
+048 h:lv:cd	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
+072 h:lv:cd	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
+096 h:lv:cd	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	
+120 h:lv:cd	01	02	03	04	05	06	07	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	35	36	37	38	39	40	41	42	43	45	46	47	48	49	50			
+144 h:lv:cd	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29	30	31	32	33	35	36	37	38	39	40	41	43	45	46	47	48	49	50				
+168 h:lv:cd	01	02	03	04	05	07	08	09	10	11	12	13	14	16	19	22	23	24	25	26	28	29	30	31	33	35	36	37	38	39	40	41	43	45	46	47	48	49	50											
+192 h:lv:cd	01	02	03	04	05	07	08	09	10	11	13	14	16	19	22	24	25	26	28	29	30	31	33	35	36	37	38	39	41	43	45	46	47	48	49	50														
+216 h:lv:cd	05	07	11	14	16	19	22	24	25	26	28	29	30	31	33	35	36	37	38	39	41	43	45	47	48	49	50																							
+240 h:lv:cd	05	07	11	14	16	19	22	24	25	26	28	29	30	31	33	35	36	38	39	40	43	45	47	48	49	50																								

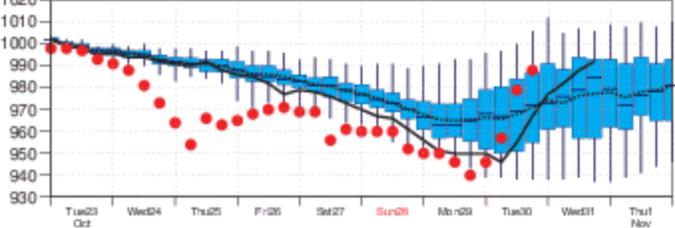
Probability (%) of Tropical Cyclone Intensity falling in each category
 TD[up to 33] TS [34-63] HR1 [64-82] HR2 [83-95] HR3 [> 95 kt]



10m Wind Speed (kt) solid=OPER; dot=Ens Mean



Mean Sea Level Pressure in Tropical Cyclone Centre (hPa) solid=OPER; dot=Ens Mean



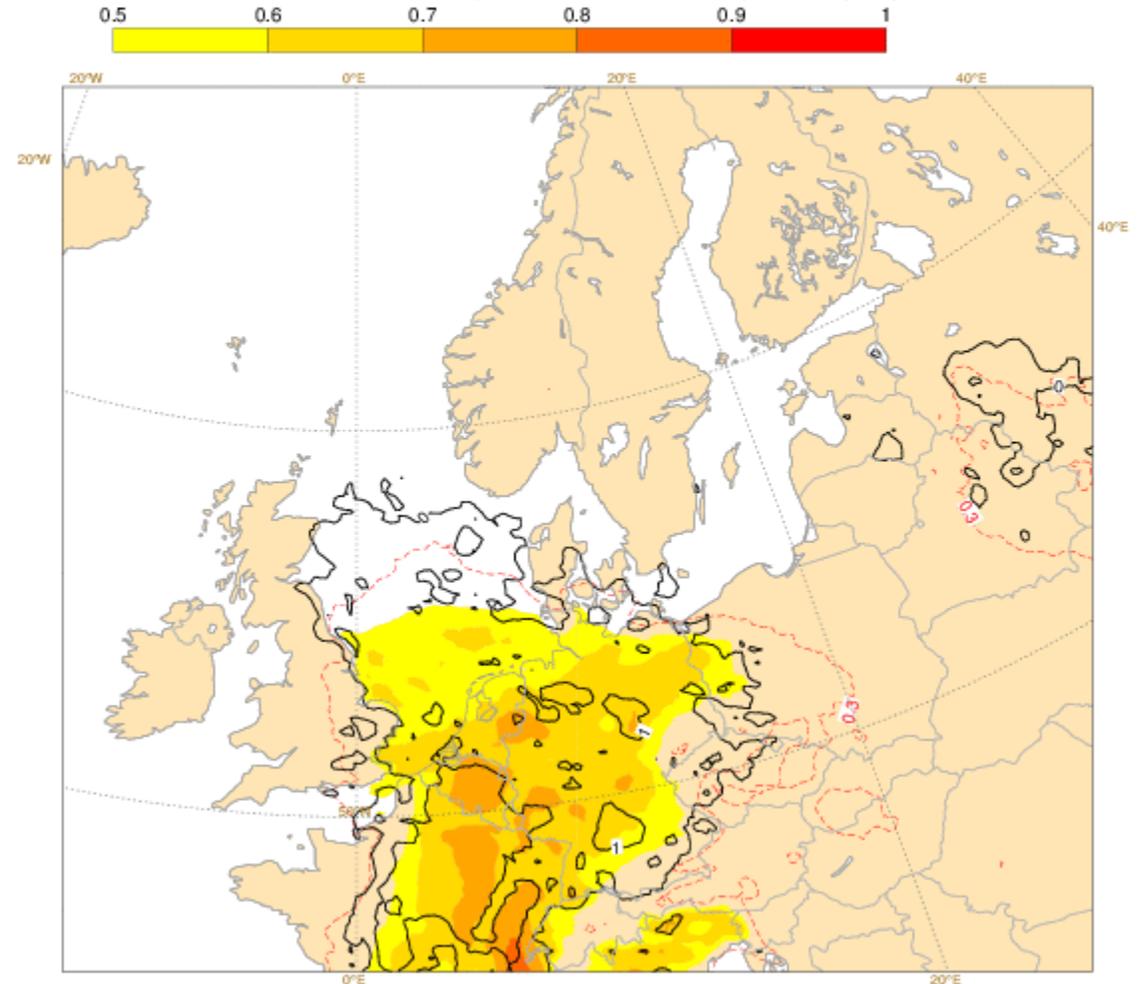
2016: previsione di situazioni estreme a scala regionale (fino a 5-10 giorni)

Previsione dell'alluvione di Parigi, giugno 2016.

ENS-Extreme Forecast Index (ENS-EFI) della pioggia accumulate tra il 29/05 ed il 01/06 (3gg) segnala la possibilita' di condizioni extreme il 26 maggio, 3 giorni prima dell'evento.



Thu 26 May 2016 00UTC @ECMWF VT: Sun 29 May 2016 00UTC - Wed 01 Jun 2016 00UTC 72-144h
Extreme forecast index and Shift of Tails (black contours 0,1,5,10,15) for: total precipitation

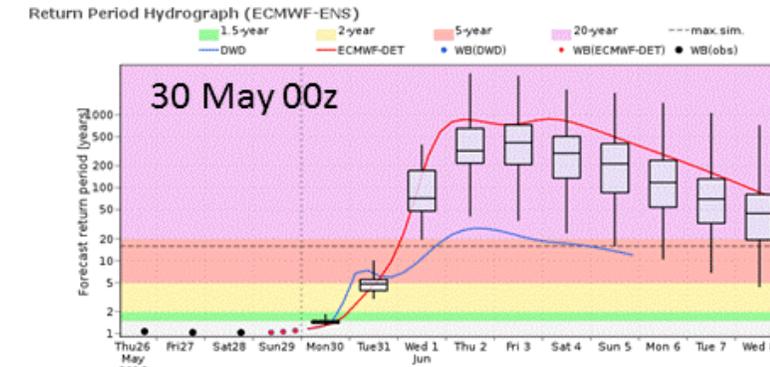
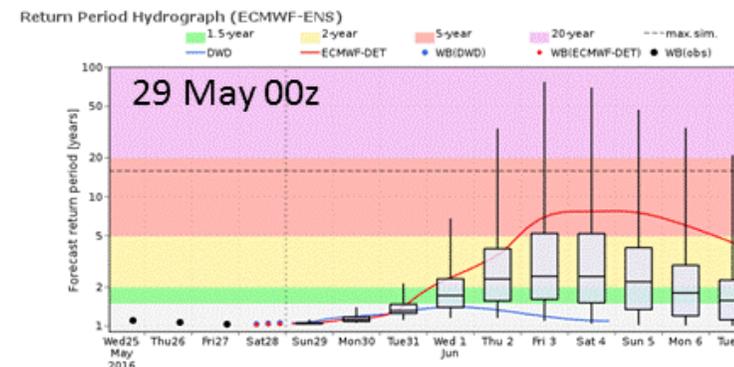
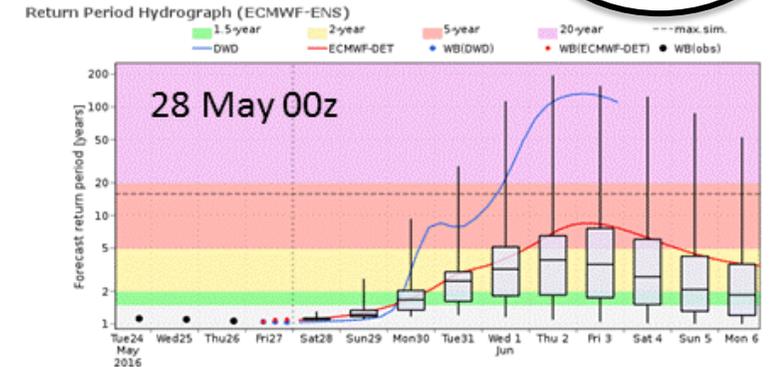
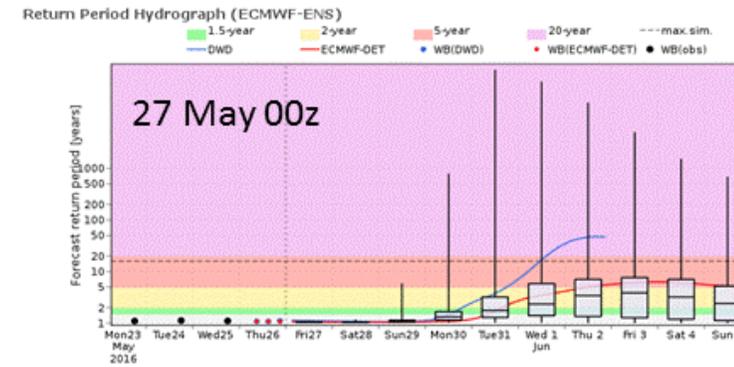
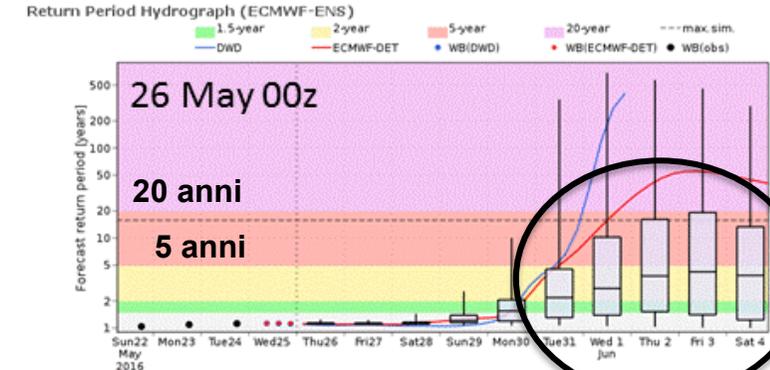
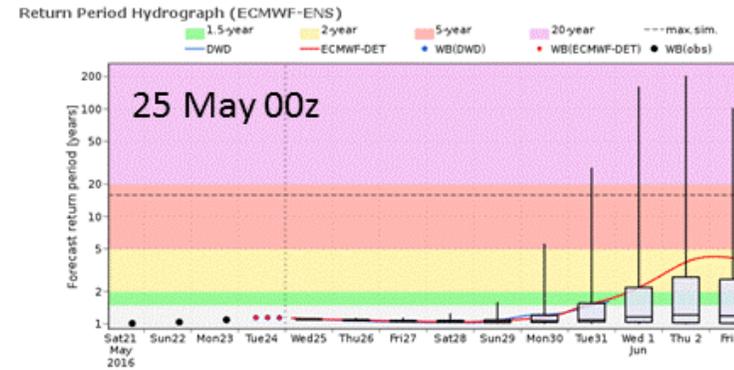


2016: previsione di situazioni estreme a scala regionale (fino a 5-10 giorni)

Previsione dell'alluvione di Parigi, giugno 2016.

ENS River Discharge per la Senna indica che la pioggia tra il 29/05 ed i primi di giugno puo' causare inondazioni.

Gia' dal 26 Maggio (+6gg) le previsioni indicano che c'e' una probabilita' del 50% che il 1-4 giugno la Senna superi un livello extremo che accade ogni 5-20 anni.



2016: previsioni di anomalie a grande scala (fino a 2-3 settimane)

Previsione di anomalie di temperature di 3-6 gradi (rispetto alla media stagionale) sull'Europa, per la settimana dal 26/09 al 02/10.

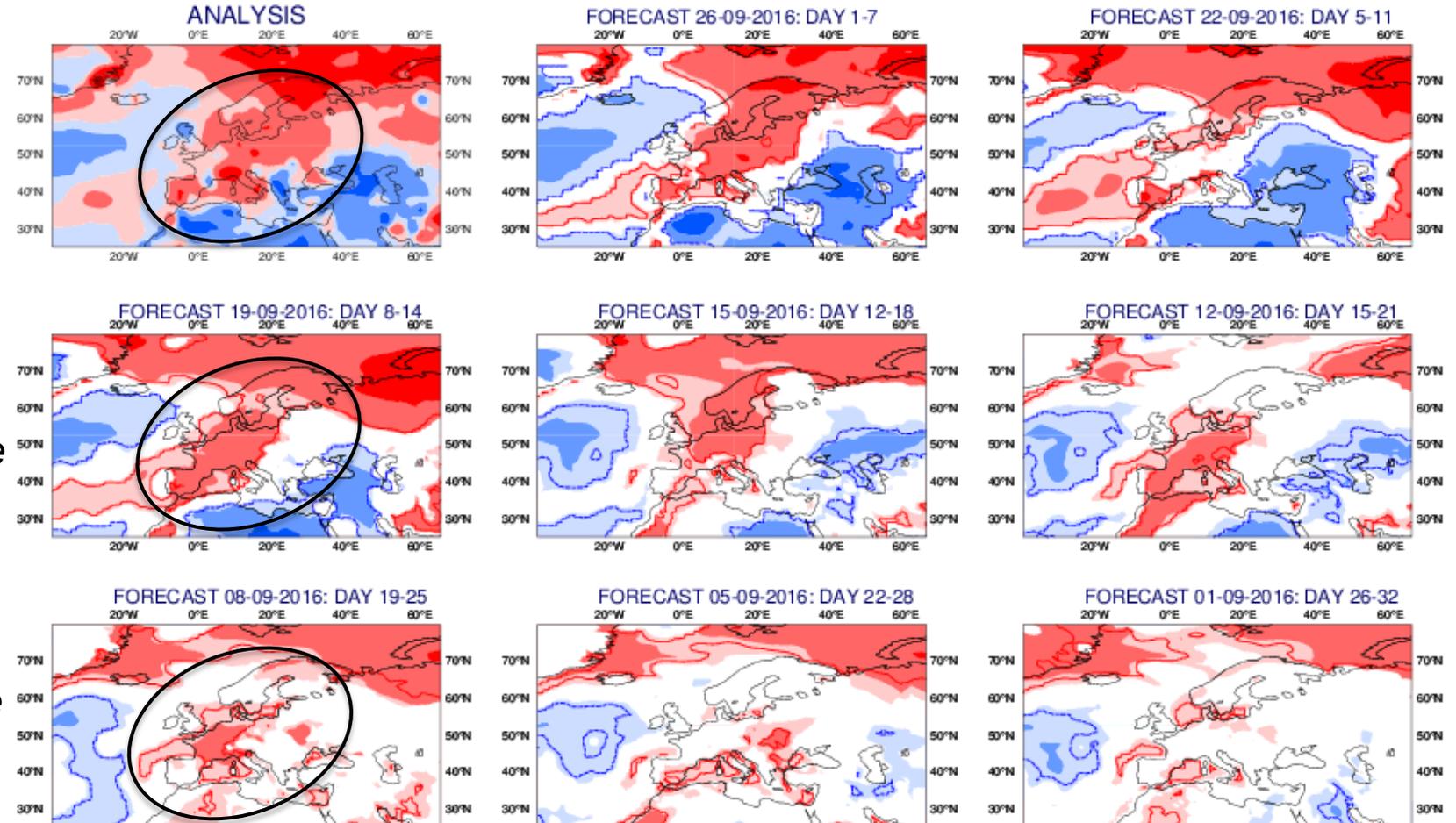
Analysis and ECMWF ENS Forecasting System

2-metre Temperature anomaly

Verification period: 26-09-2016/TO:02-10-2016

ensemble size = 51 , climate size = 660

Shaded areas significant at 10% level, Contours at 1% level

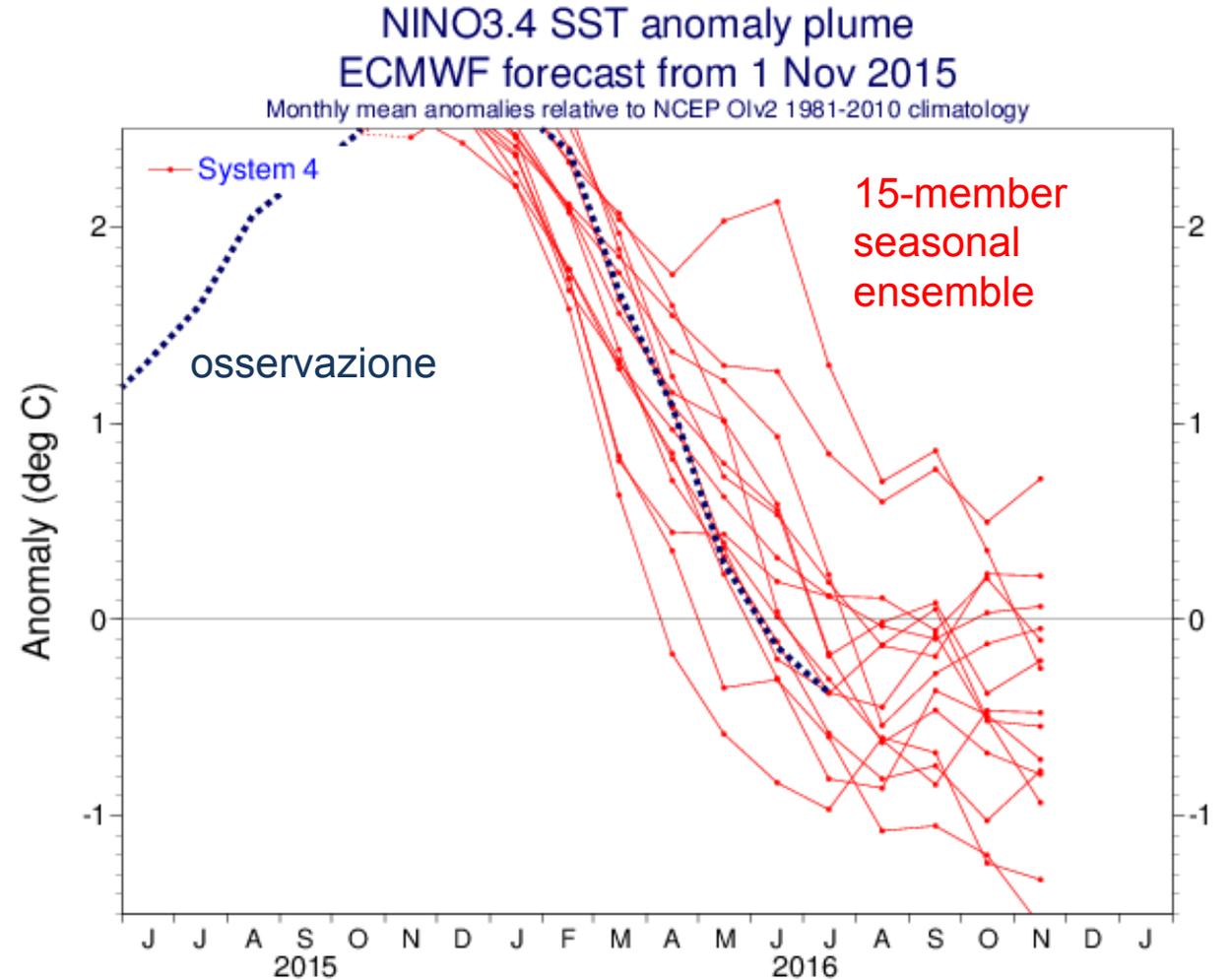
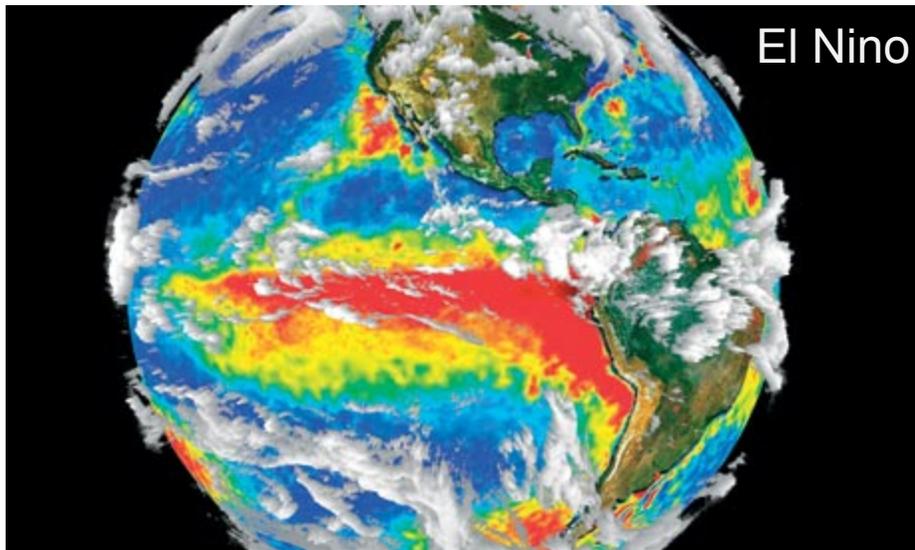


+2 settimane

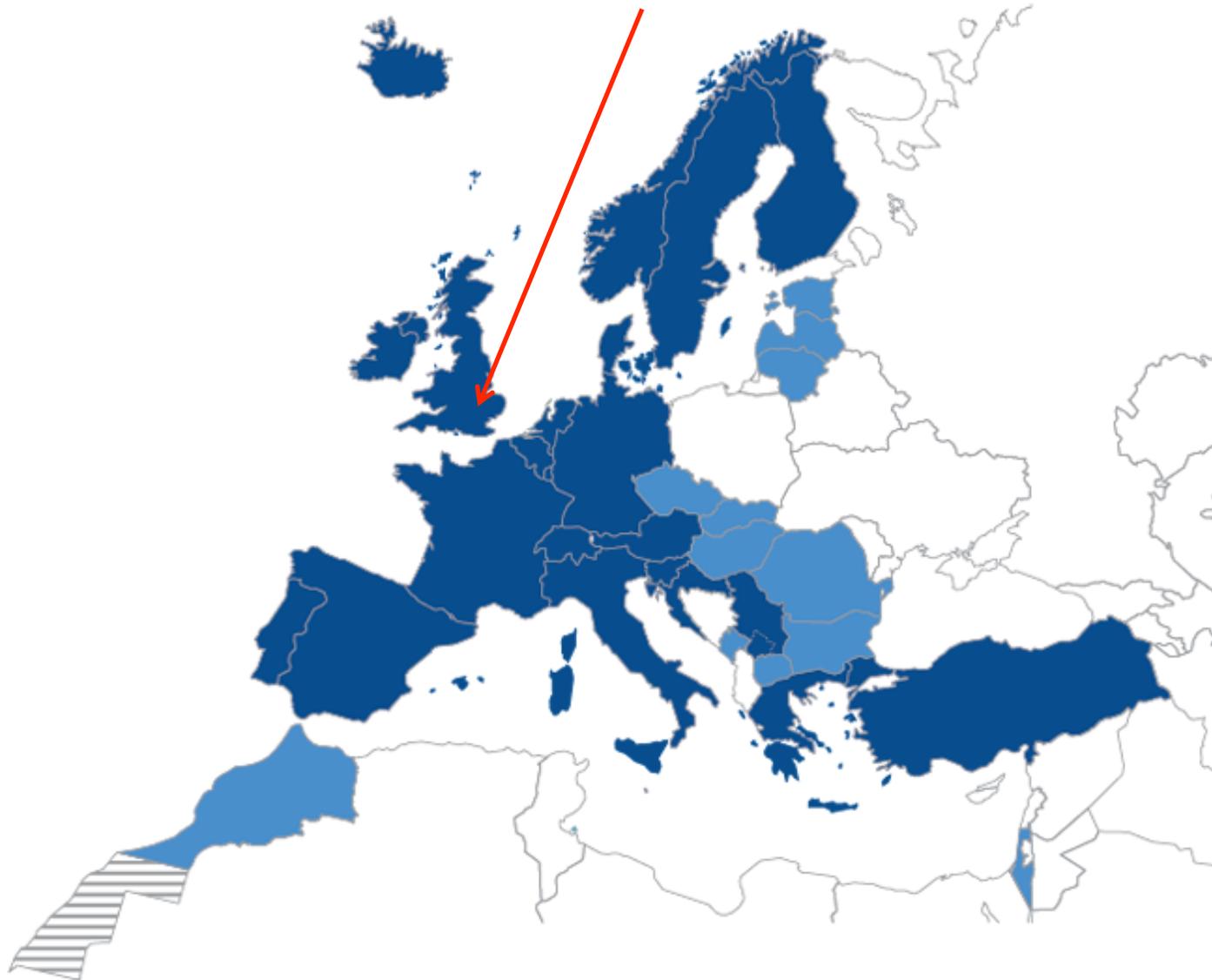
+3 settimane

2016: previsioni di El Nino ai tropici (fino a 1-2 anni prima)

Esempio di previsione ad 1 anno delle anomalie di temperatura dell'oceano Pacifico, nella zona dove El Nino e' piu' evidente (previsione emessa il 1 Nov '15).



ECMWF nasce nel 1973



ECMWF

Un'organizzazione Inter-governativa indipendente

- 1973: firma della convenzione (18 stati, tra cui l'Italia)
- 1975: nasce il Centro a Reading
- 1978: CRAY-1A
- 1979: giugno, primo forecast
- 2016: 22 Member States, 12 Co-operating States

ECMWF nasce nel 1973



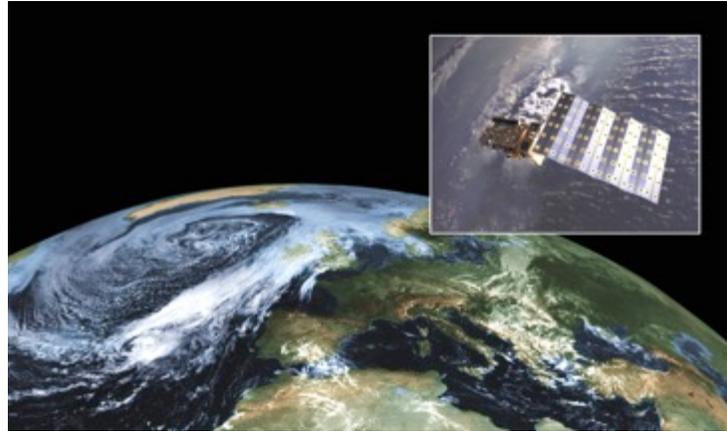
La missione di ECMWF (oggi)

- **Produrre previsioni meteo con validita' da 1 giorno ad 1 anno**
- **Avanzare la ricerca e gli aspetti tecnologici necessari per continuare a migliorare i nostri prodotti**
- **Mantenere un archivio di dati meteorologici e dello stato del sistema 'Terra'**



Ingredienti: osserv., persone, ricerca, computers, investimenti e collaborazioni

Global observations



ECMWF model components

A T M O S P H E R E	STRATOSPHERE	DYNAMICS-RADIATION-SIMPLIFIED CHEMISTRY		
	TROPOSPHERE	DYNAMICS-RADIATION-CLOUDS-ENERGY & WATER CYCLE		
	OCEAN	OCEAN	LAND HYDROSPHERE	LAND BIOSPHERE
	LAND	OCEAN SURFACE WAVES OCEAN CIRCULATION SIMPLIFIED SEA ICE	SNOW ON LAND SOIL MOISTURE FREEZING	LAND SURFACE PROCESSES SOIL MOISTURE PROCESSES SIMPLIFIED VEGETATION

Users



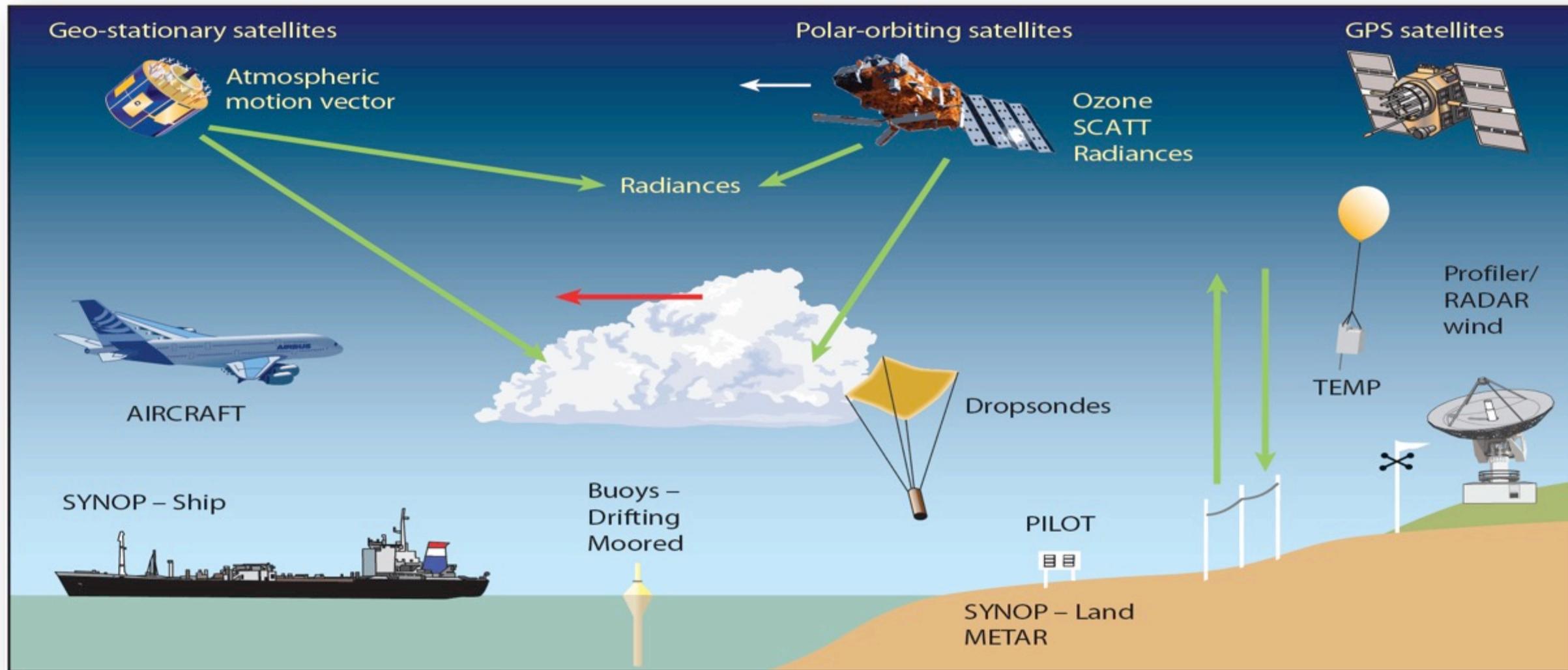
National weather services



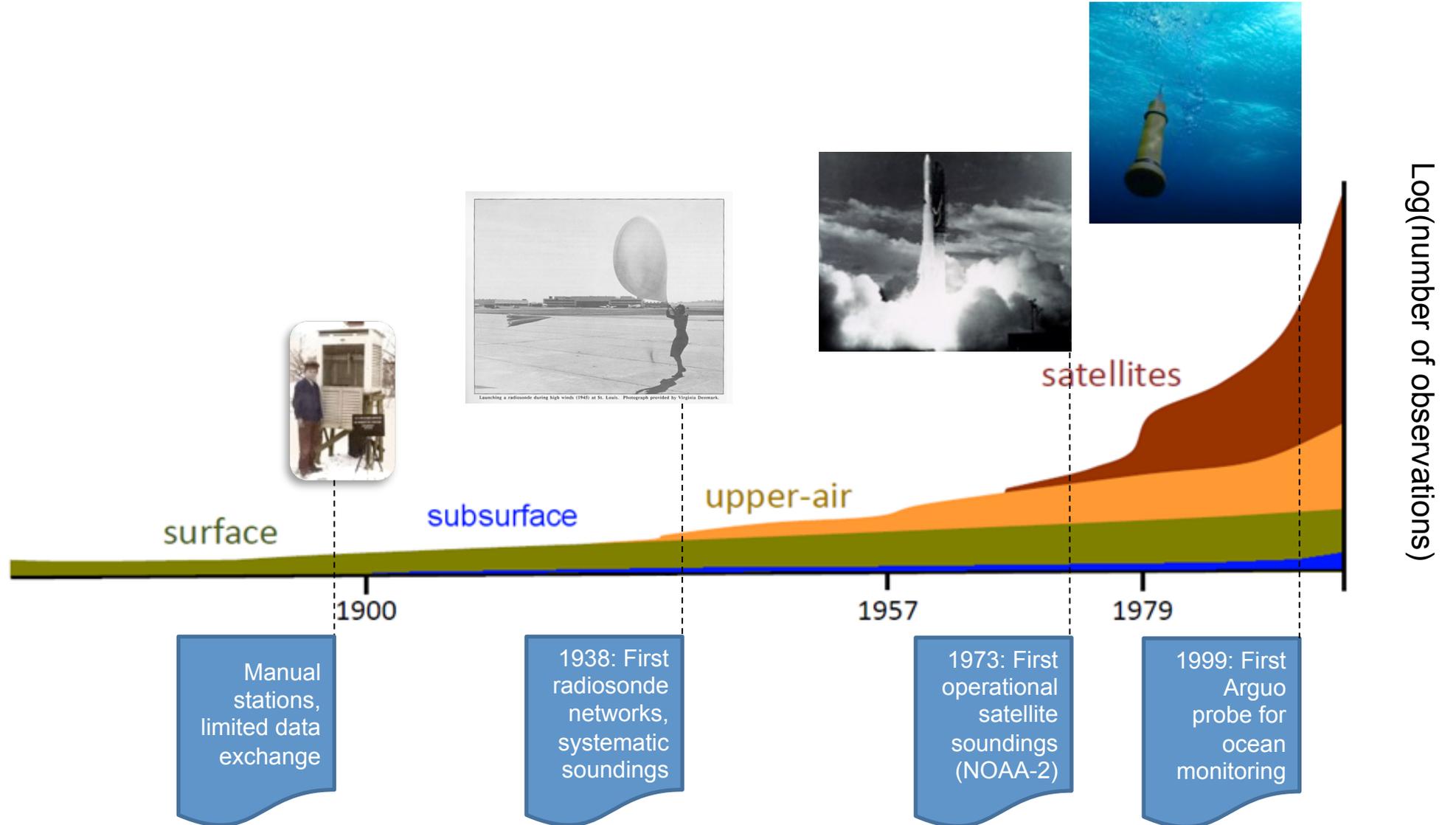
Computing



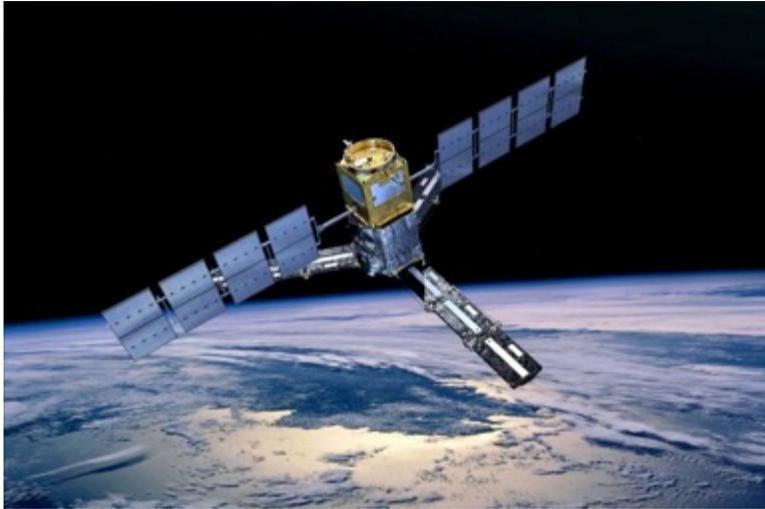
Milioni di osservazioni vengono prese da strumenti diversi



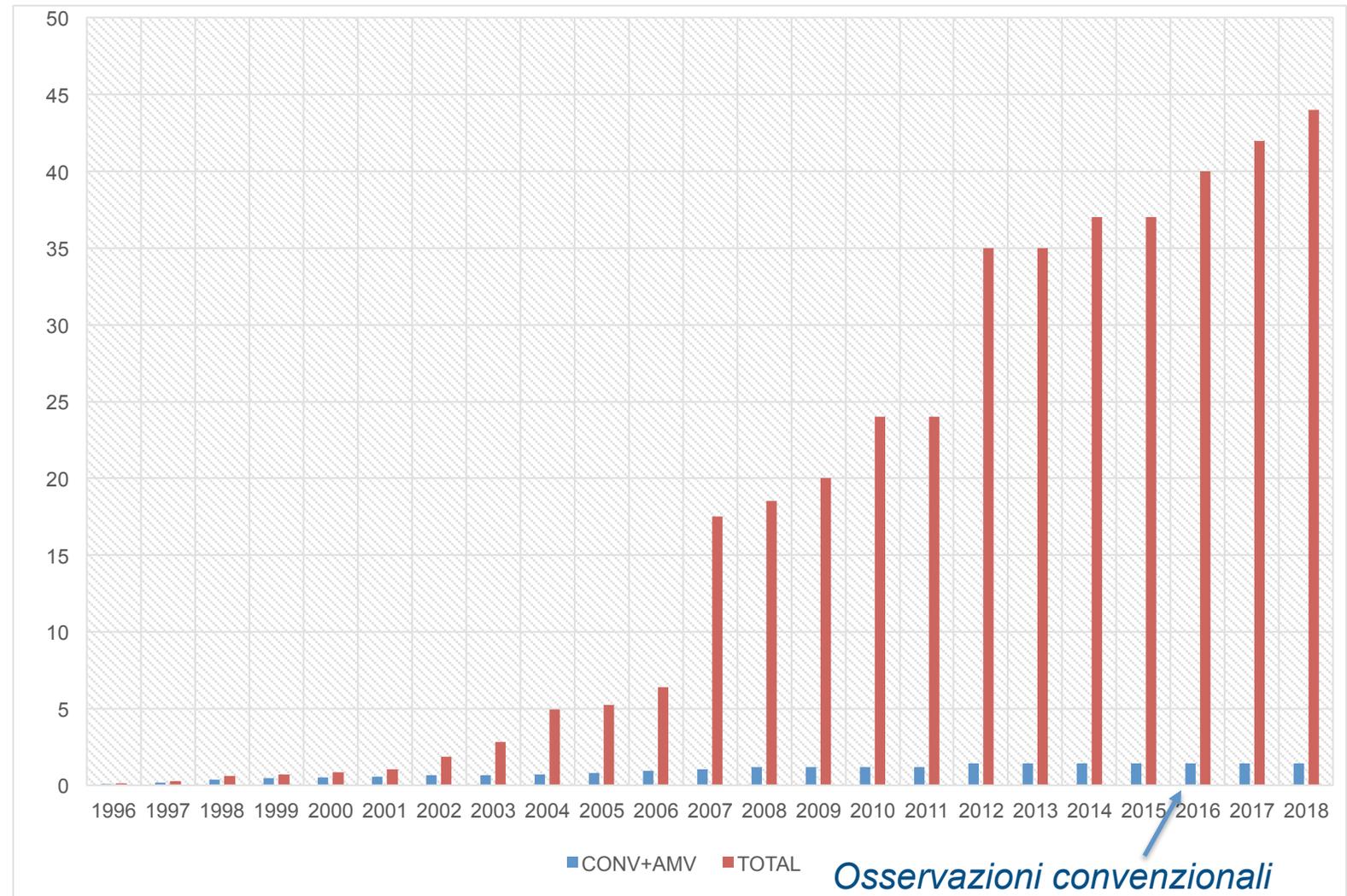
Dagli anni '80 il numero delle osservazioni e' cresciuto enormemente



Oggi, il 95% delle osservazioni vengono da strumenti a bordo di satelliti



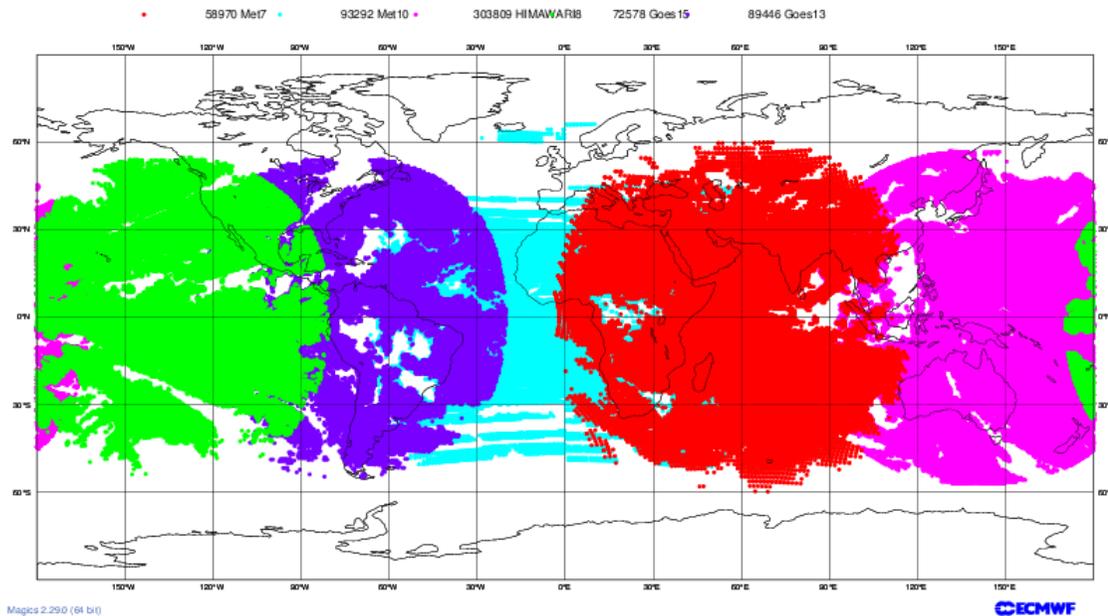
(From AFP)



Osservazioni: copertura di alcuni strumenti a bordo di satelliti nel 2016

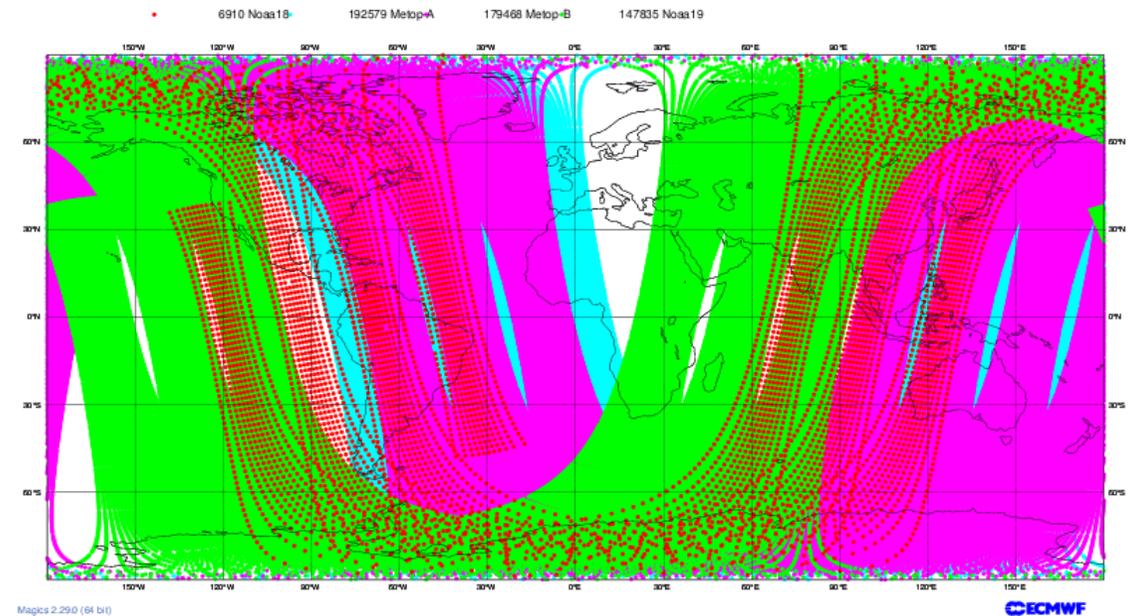
Oggi, riceviamo circa 400 milioni di osservazioni al giorno (il 95% da strumenti a bordo di satelliti). Il 10% di tali osservazioni viene utilizzato per stimare lo stato dell'atmosfera.

ECMWF Data Coverage (All obs DA) - GRAD
21/Oct/2016; 00 UTC
Total number of obs = 618095



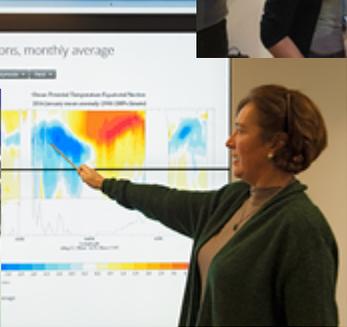
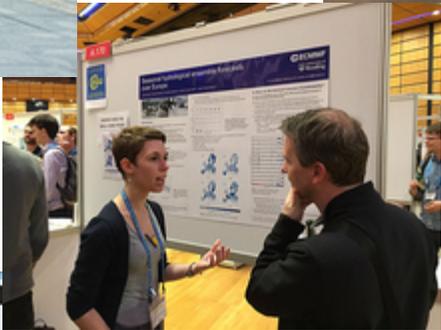
Copertura dei satelliti geostazionari.

ECMWF Data Coverage (All obs DA) - HIRS
21/Oct/2016; 00 UTC
Total number of obs = 526792



Copertura dei 'High-resolution Infrared Radiation Sounders' a bordo di NOAA18/19 e Metop-A/B.

Le persone: il successo di ECMWF dipende dalle capacita' del suo personale



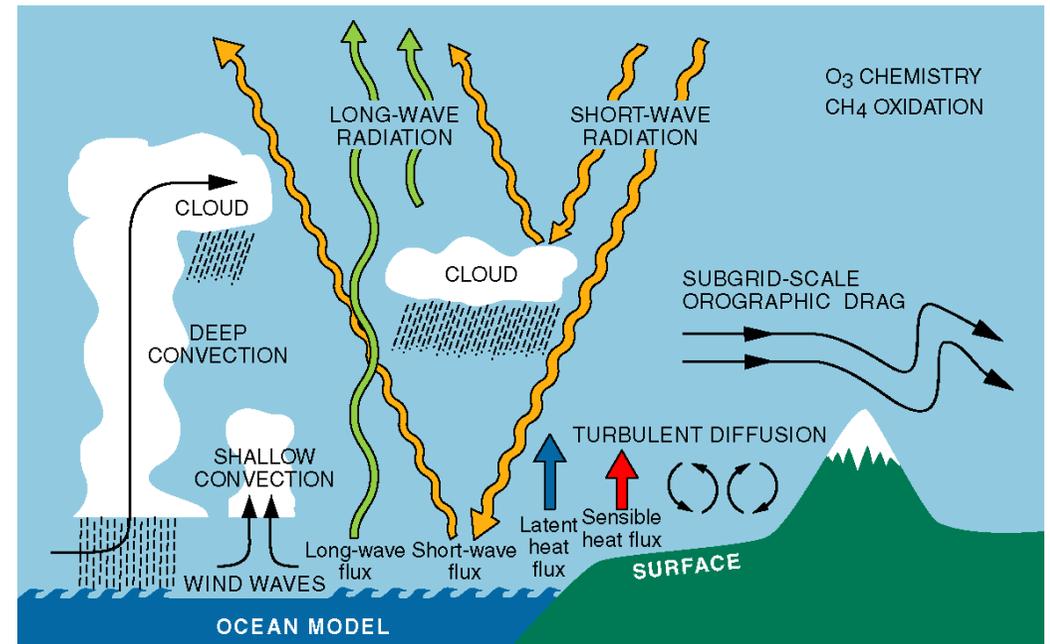
Ricerca - La simulazione dei processi reali e' estremamente complessa

I modelli cercano di simulare i processi piu' importanti (ad esempio il ciclo dell'acqua, l'effetto delle nubi sulla radiazione solare, ..).

Il punto di partenza sono le equazioni della fisica, che descrivono la conservazione della massa e dell'energia, i movimenti delle masse d'aria, il loro riscaldamento e raffreddamento, ...

ECMWF MODEL / ASSIMILATION SYSTEM

A T M O S P H E R E	STRATOSPHERE	DYNAMICS-RADIATION-SIMPLIFIED CHEMISTRY		
	TROPOSPHERE	DYNAMICS-RADIATION-CLOUDS-ENERGY & WATER CYCLE		
O C E A N L A N D	OCEAN	OCEAN	LAND HYDROSPHERE	LAND BIOSPHERE
		OCEAN SURFACE WAVES OCEAN CIRCULATION SIMPLIFIED SEA ICE	SNOW ON LAND SOIL MOISTURE FREEZING	LAND SURFACE PROCESSES SOIL MOISTURE PROCESSES SIMPLIFIED VEGETATION



Ricerca - Il punto di partenza sono le equazioni della fisica

Conservazione del momento

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -2 \cdot \vec{\Omega} \times \vec{v} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \vec{g} + \underline{\vec{P}_v}$$

Conservazione dell'energia

$$\frac{dT}{dt} = \frac{R \cdot T \cdot \omega}{c_p p_s \sigma} + \underline{P_T}$$

Conservazione del vapor d'acqua

$$\frac{dq}{dt} = \underline{P_q}$$

Conservazione della massa

$$\frac{dp_s}{dt} = p_s \cdot \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{v} + \frac{d}{d\sigma} \frac{d\sigma}{dt} \right)$$

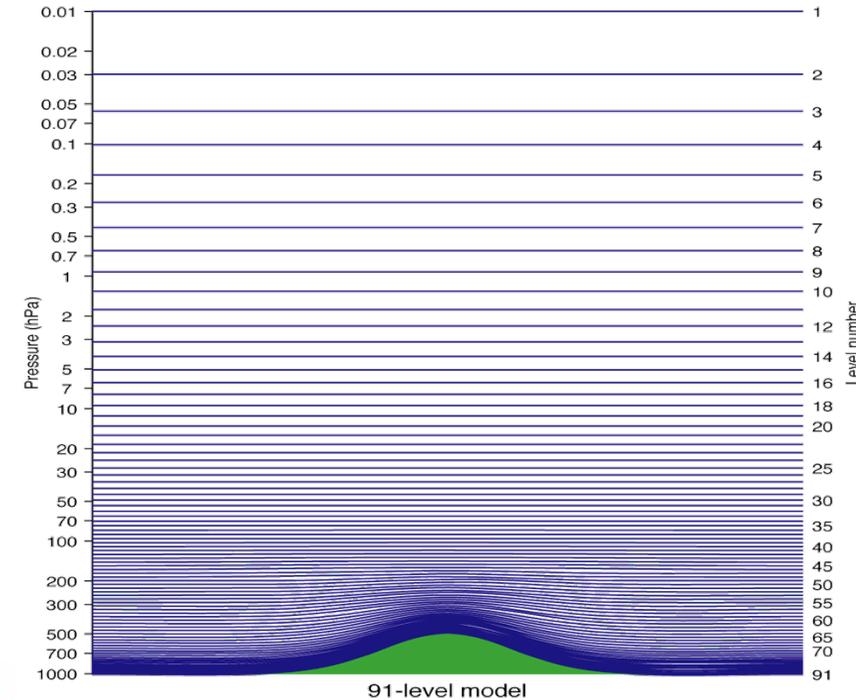
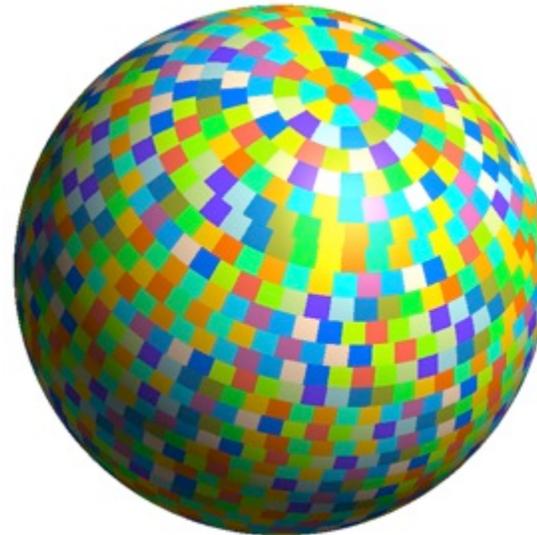
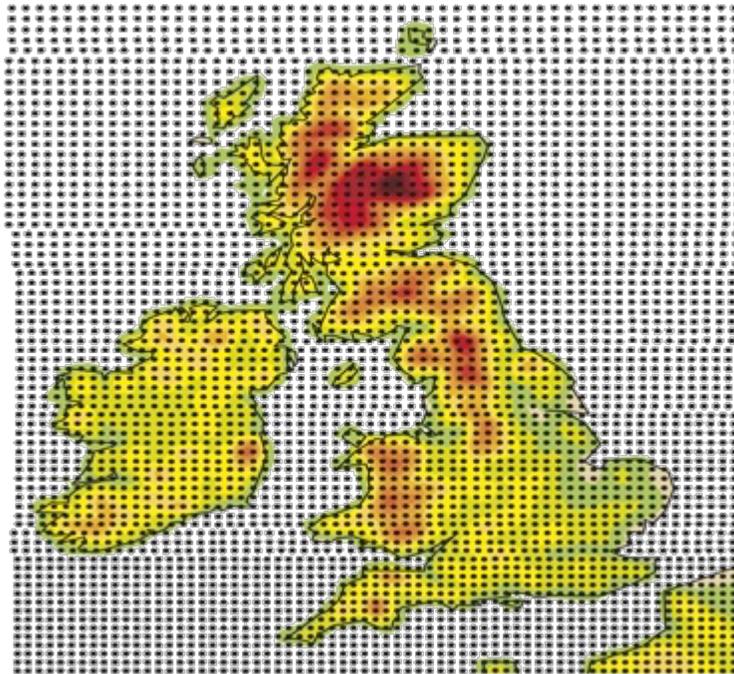
Equilibrio idrostatico

$$\frac{d\Phi}{d\sigma} = - \frac{R \cdot T}{\sigma}$$

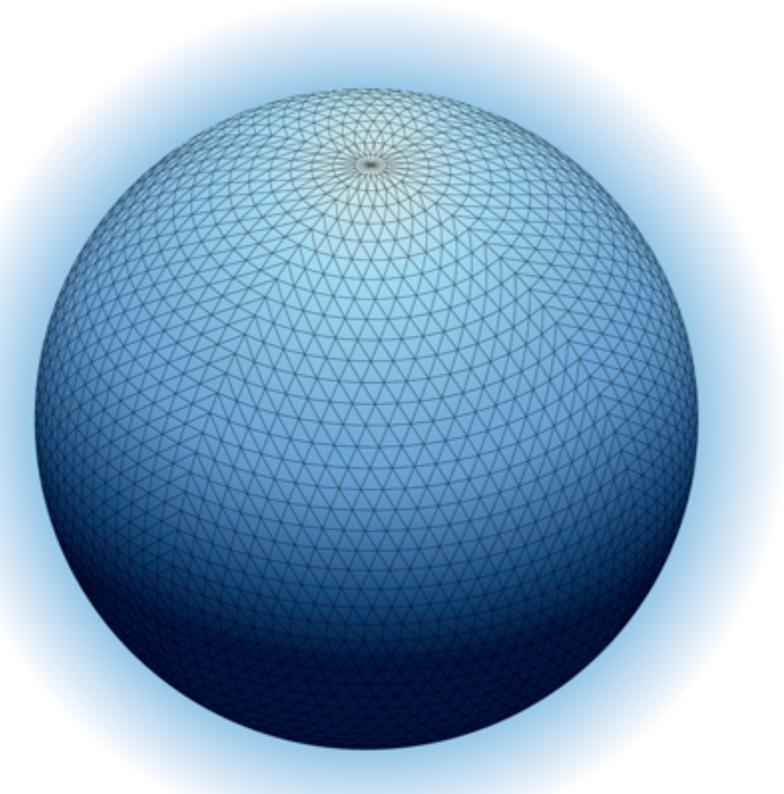
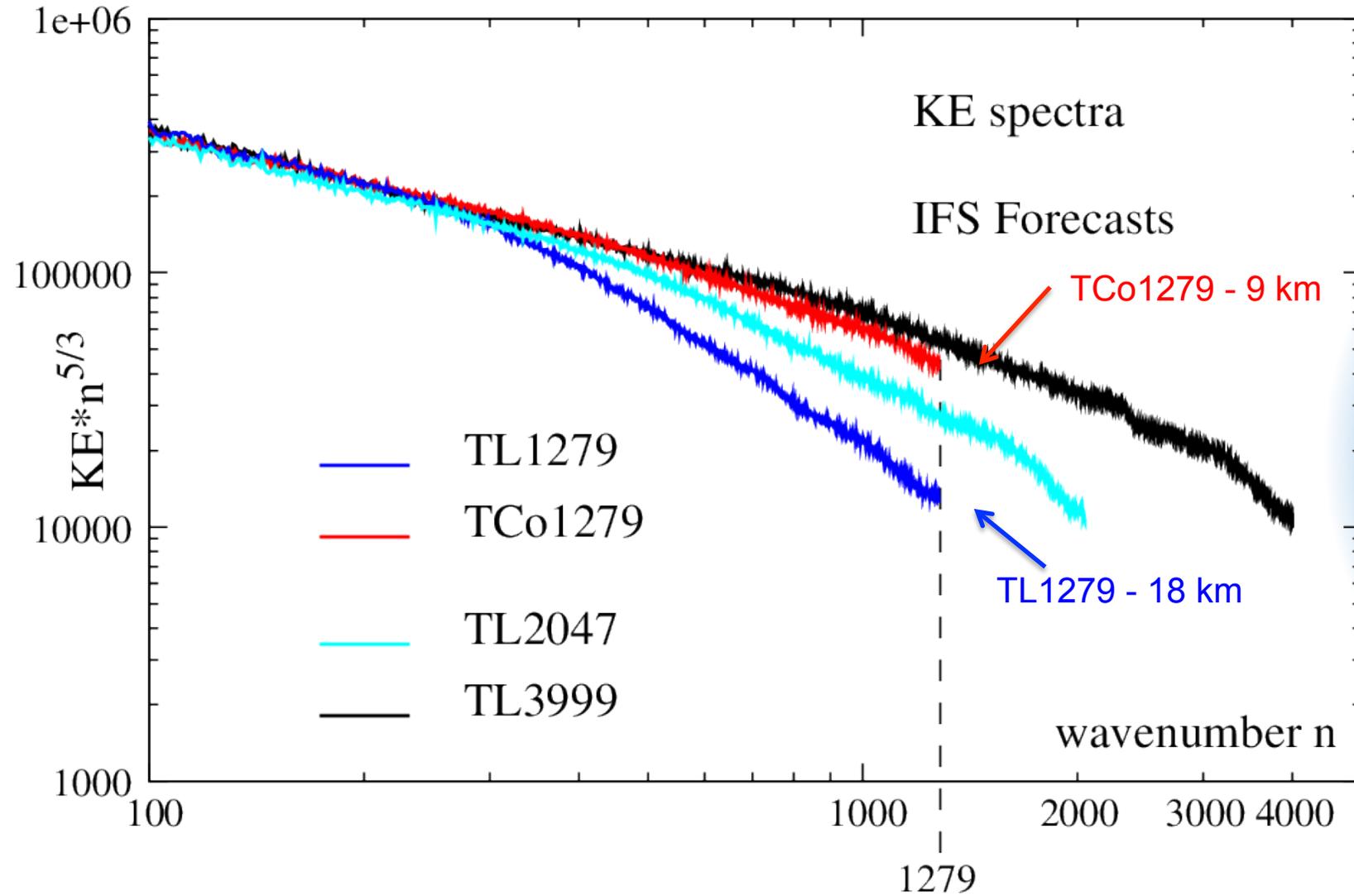
Tali termini rappresentano l'effetto delle nubi, delle montagne, della radiazione, della vegetazione, delle onde del mare,

Ricerca - Le equazioni vengono risolte da modelli numerici su un grigliato

Lo stato dell'atmosfera e' simulato su un grigliato 3-dimensionale. Ogni 'cubetto' del grigliato ha una dimensione di circa 10x10x0.5km. Il grigliato che copre il globo e' costituito da circa 1,400 milioni di 'cubetti'.



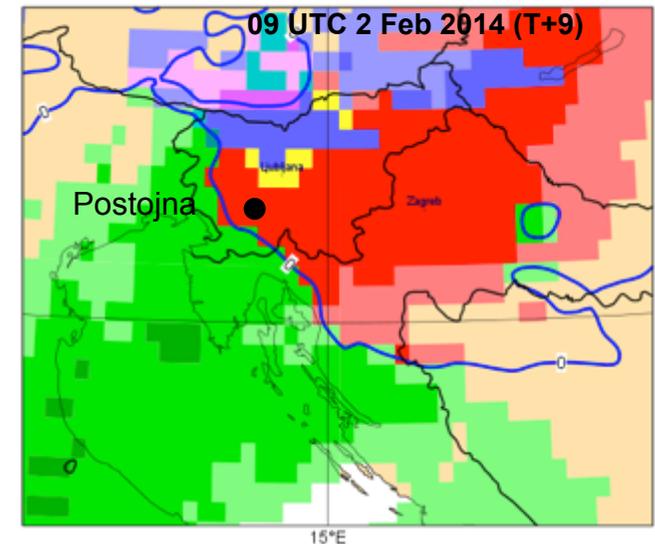
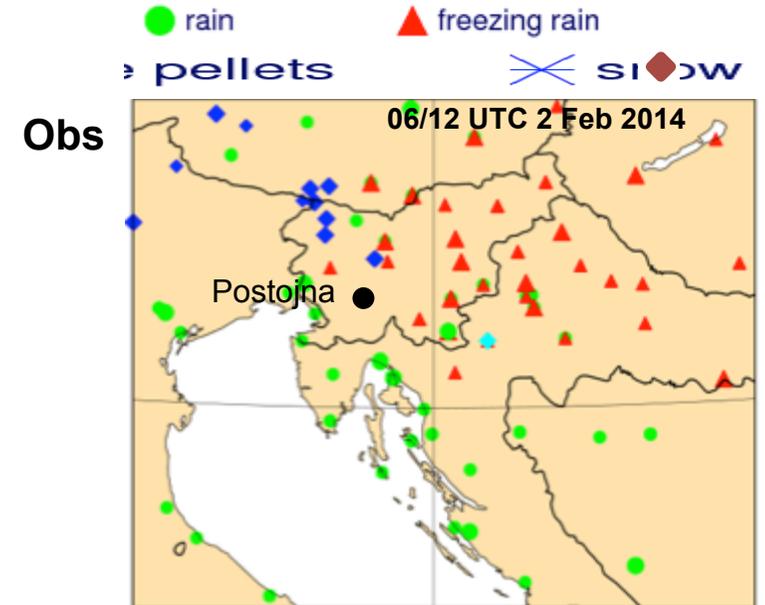
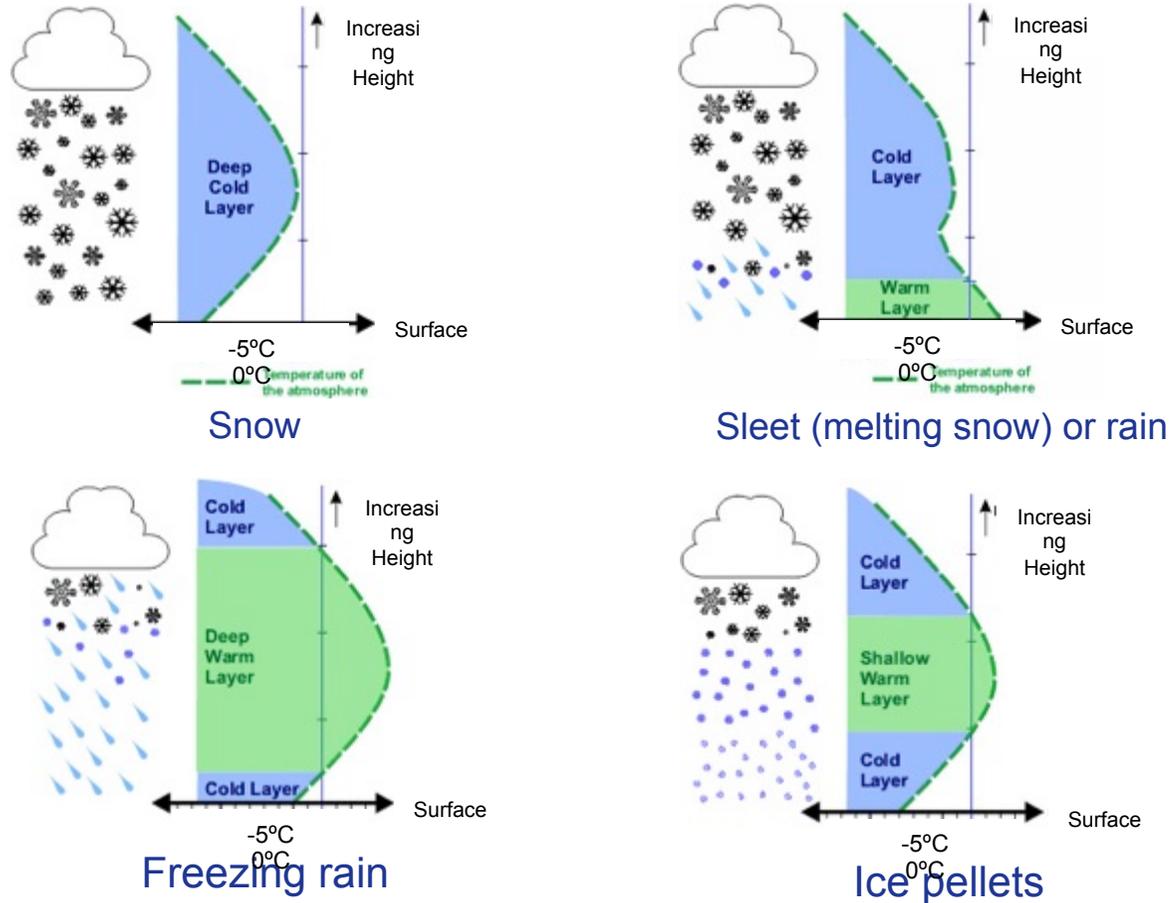
Ricerca - La scelta dei metodi numerici di approssimazione e' fondamentale



TCo1279 - 9 km
(Marzo 2016)

Ricerca - Una simulazione 'realistica' dei processi e' essenziale

Nuovo schema per la microfisica delle nubi, introdotto nel maggio 2015



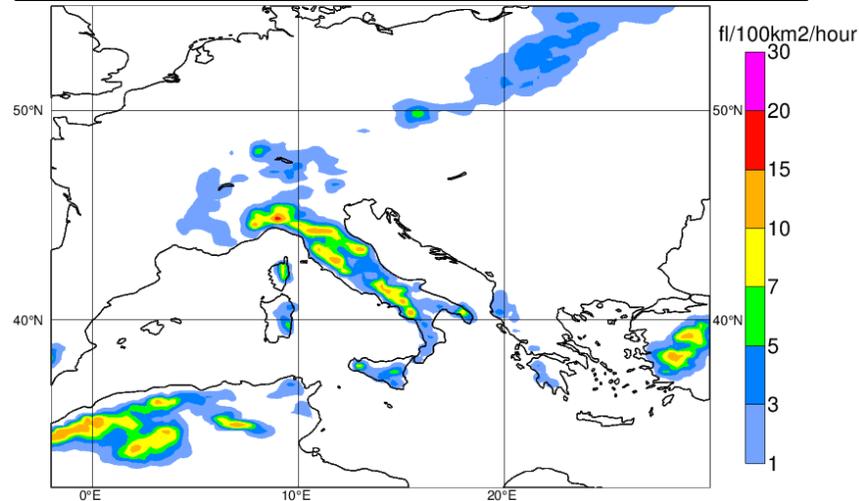
Ricerca - Una simulazione 'realistica' dei processi e' essenziale

Nuovo schema per la previsione dei fulmini.

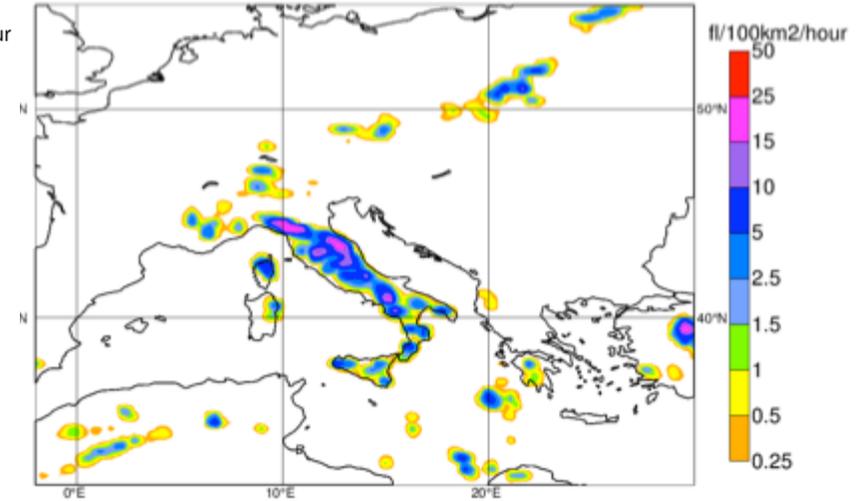
Le immagini a sinistra mostrano le previsioni a +15 ore dal Sistema ENS.

Le immagini a destra mostrano i fulmini osservati da due reti di misura (UK Met Office ADTnet e Vaisala GLD360)

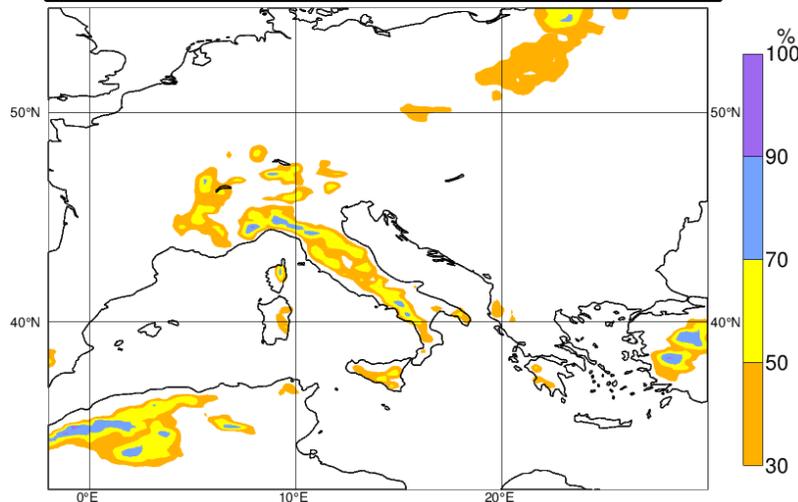
ENS mean f_T (over all members)



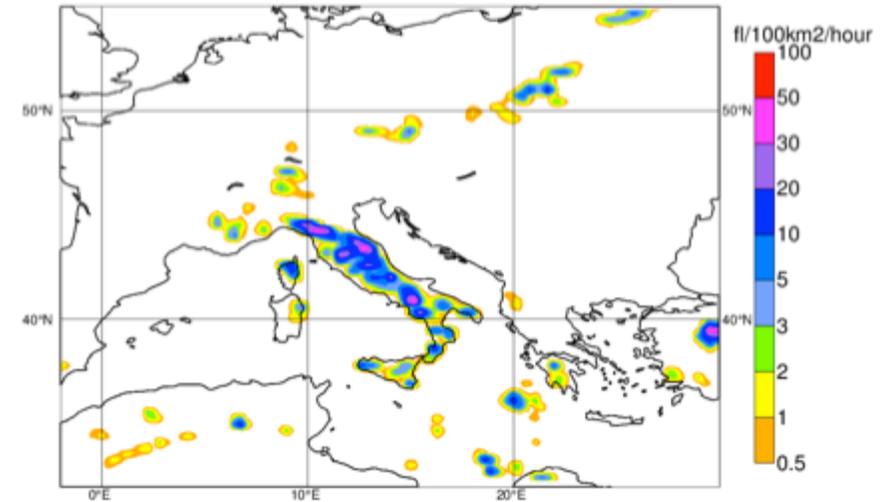
ATDnet obs



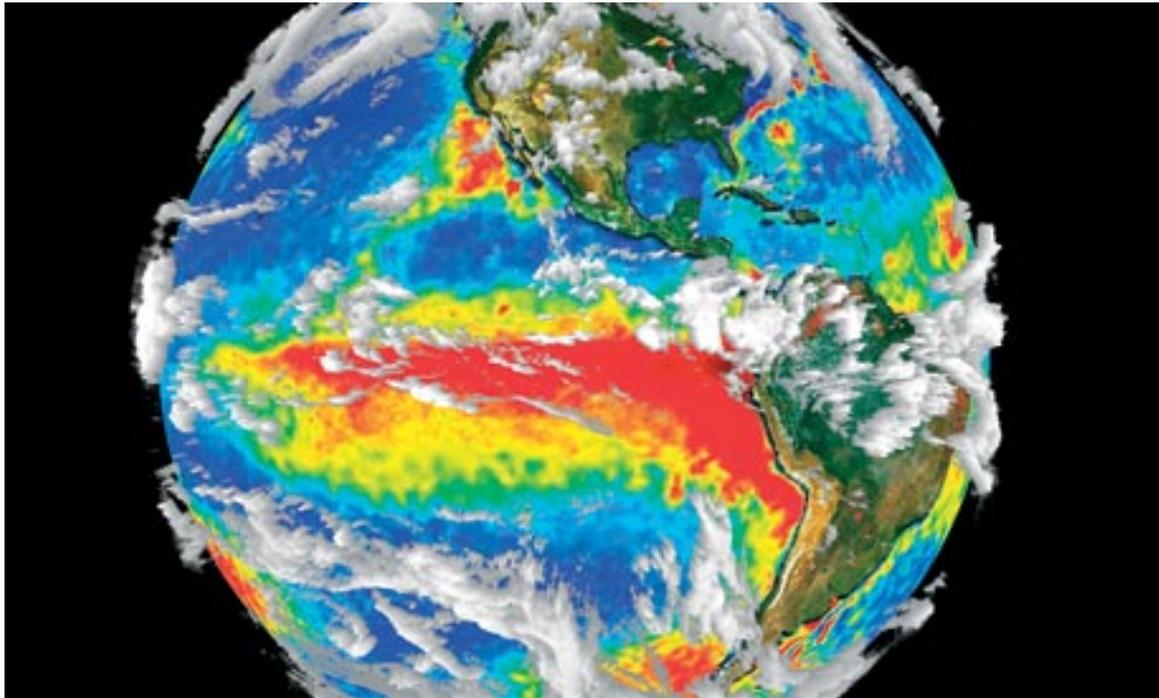
Prob ($f_T > 1$ flash/100 km²/h)



GLD360 obs

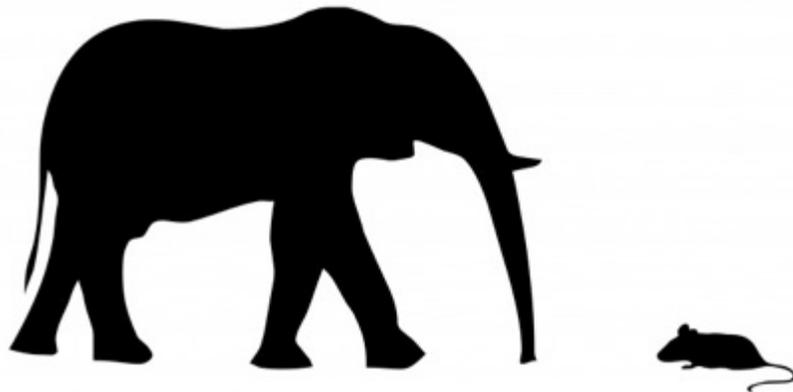


Ricerca – Capire l'interazione tra scale piccole e grandi e' fondamentale



El Nino

Nubi convettive

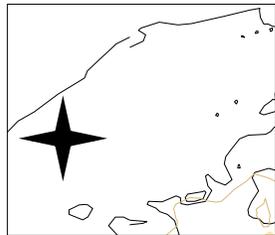


Ricerca - Chaos, 'butterfly effect' e predicibilità

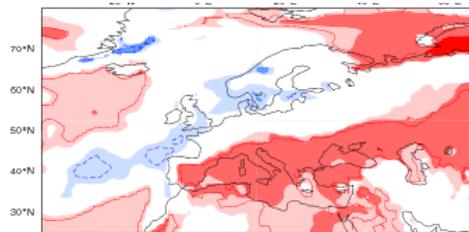
Shukla (1998, JAS): '.. predictability in the midst of chaos ..'

Un concetto fondamentale per capire come sia possibile prevedere fenomeni quale El Nino mesi in anticipo, nonostante non si riesca a prevedere situazioni locali il giorno prima.

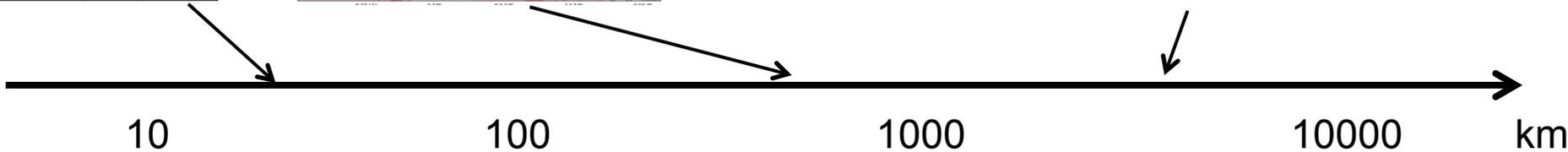
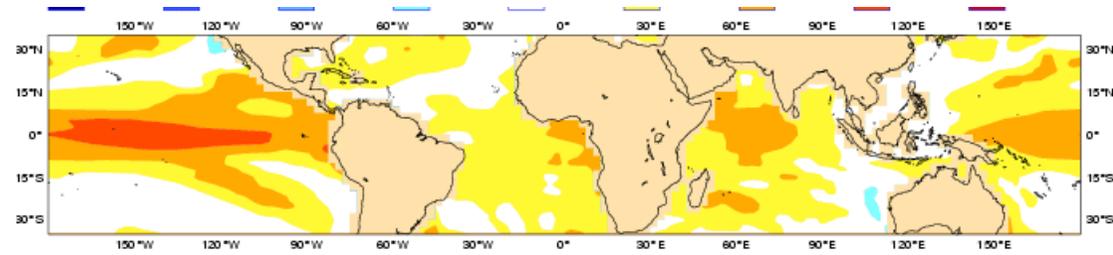
Local,
instantaneous
wind-speed



Weekly-mean,
regional
temperature anomaly

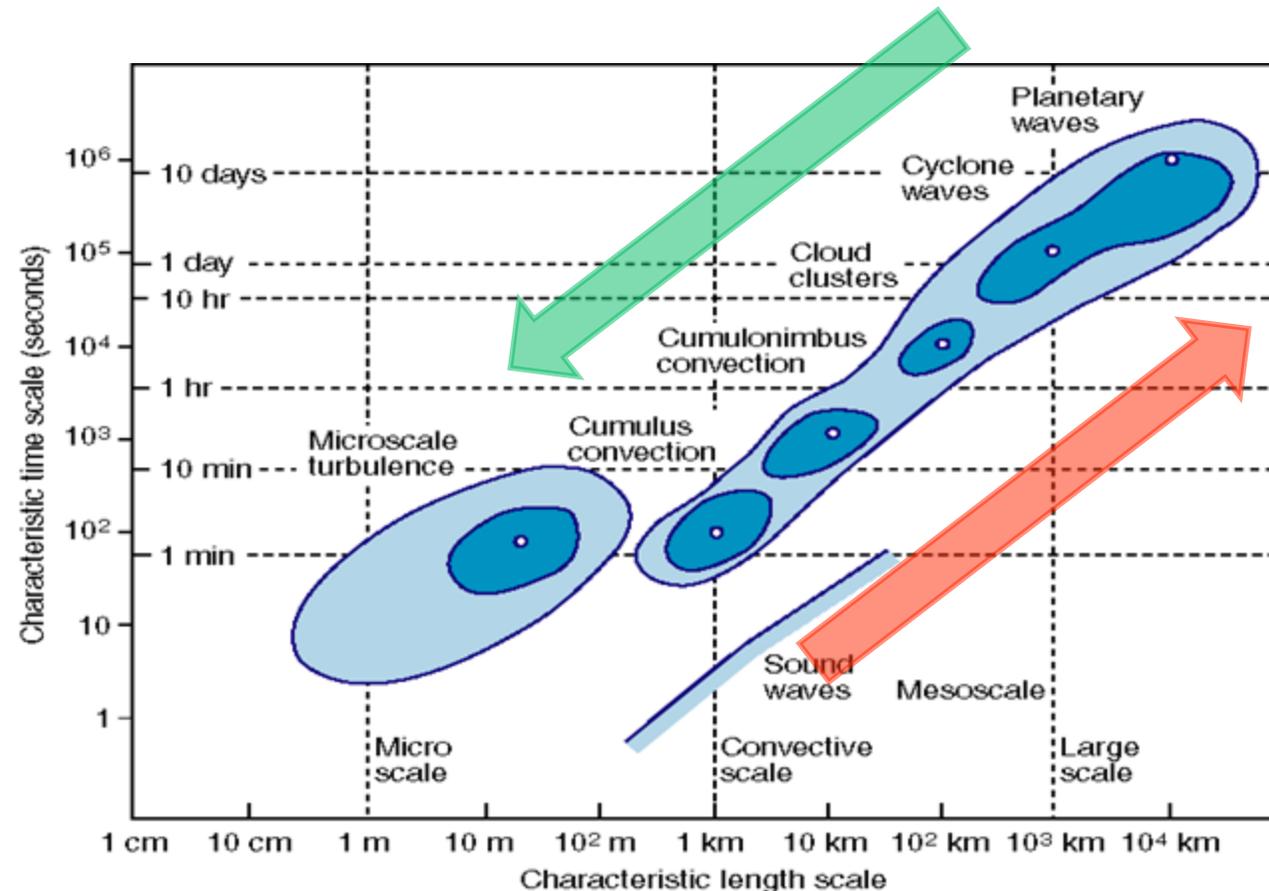


Monthly-mean,
continental-scale
rain anomaly



Ricerca - Cosa determina l'orizzonte temporale di predicibilità?

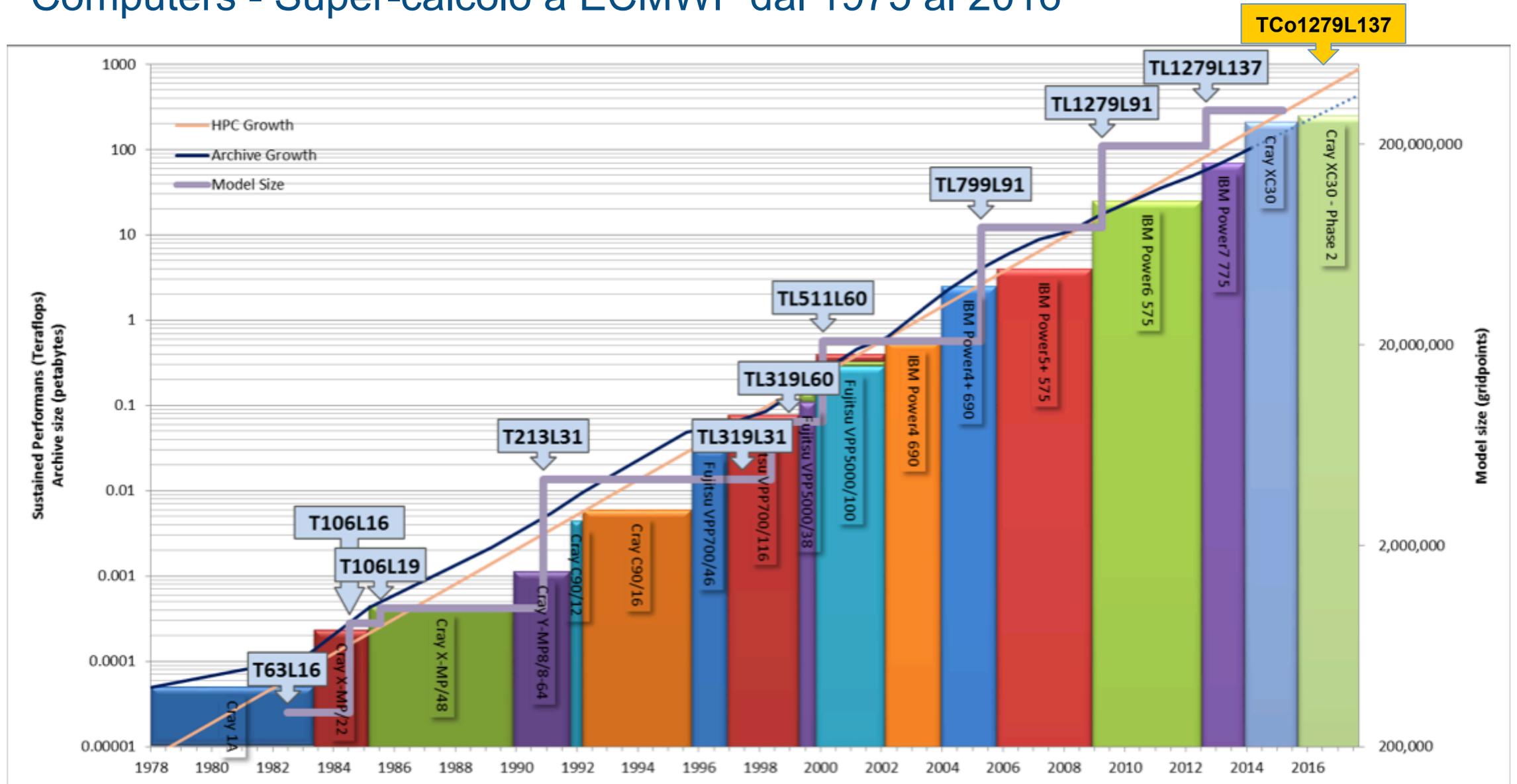
Segnali predicibili propagano dalle scale più prevedibili, grandi e/o caratterizzate da una evoluzione più lenta, e di cui si conosce meglio lo stato iniziale, alle scale meno prevedibili (piccole e/o veloci)



Gli errori propagano dalle scale piccolo e veloci, di cui si conosce lo stato iniziale in modo più approssimato, alle scale grandi e lente, la cui previsione viene quindi contaminata

Buizza & Leutbecher, 2015 (QJ)

Computers - Super-calcolo a ECMWF dal 1975 al 2016



Super-calcolo a ECMWF: da CRAY-1A (1978) a CRAY-XC40 (2016)



	CRAY 1A (1978)	CRAY XC40 (2016)	2016 : 1978	<i>I-Phone 5s</i>
# cores	1	~ 132,000	132,000 : 1	
Sust. Perf.	~ 50 MFLOPS	~ 320 TFLOPS	6,400,000 : 1	~ 80,000 MFLOPS

Investimenti - Quanto costa la meteorologia? Alcune cifre

- ECMWF: ~ € 80M e' il budget nel 2016 (~52M dagli Stati Membri, 6M dall'Italia)
 - ~ € 40M per il personale (~ 330 persone)
 - ~ € 24M per spese di calcolo (~€15 per HPC)

- EUMETSAT: ~ € 450M: budget 2016

- Servizi meteo nazionali ~ 0.02-0.05% delle spese annuali:
 - Meteo France ~ € 300M (3300 p); UK ~ € 300M (2000 p); DWD ~ €280M (2600 p)

- Alcuni dati di riferimento:
 - ~ € 300M - Costo di un Airbus A330 (~300 posti)
 - ~ € 500M - Costo di un satellite Metop (EUMETSAT):
 - ~ € 2,500M - Costo del programma METOP (3 satelliti, EUMETSAT)
 - ~ € 30,000M – Costo di una centrale nucleare

Quale e' il ritorno degli investimenti in meteorologia?

Un rapporto dell'Organizzazione Mondiale della Meteorologia (WMO, Report # 1153) riporta il valore aggiunto dei **servizi meteorologici e idrologici nazionali** in termine di 'benefit/cost ratio' (BCR):

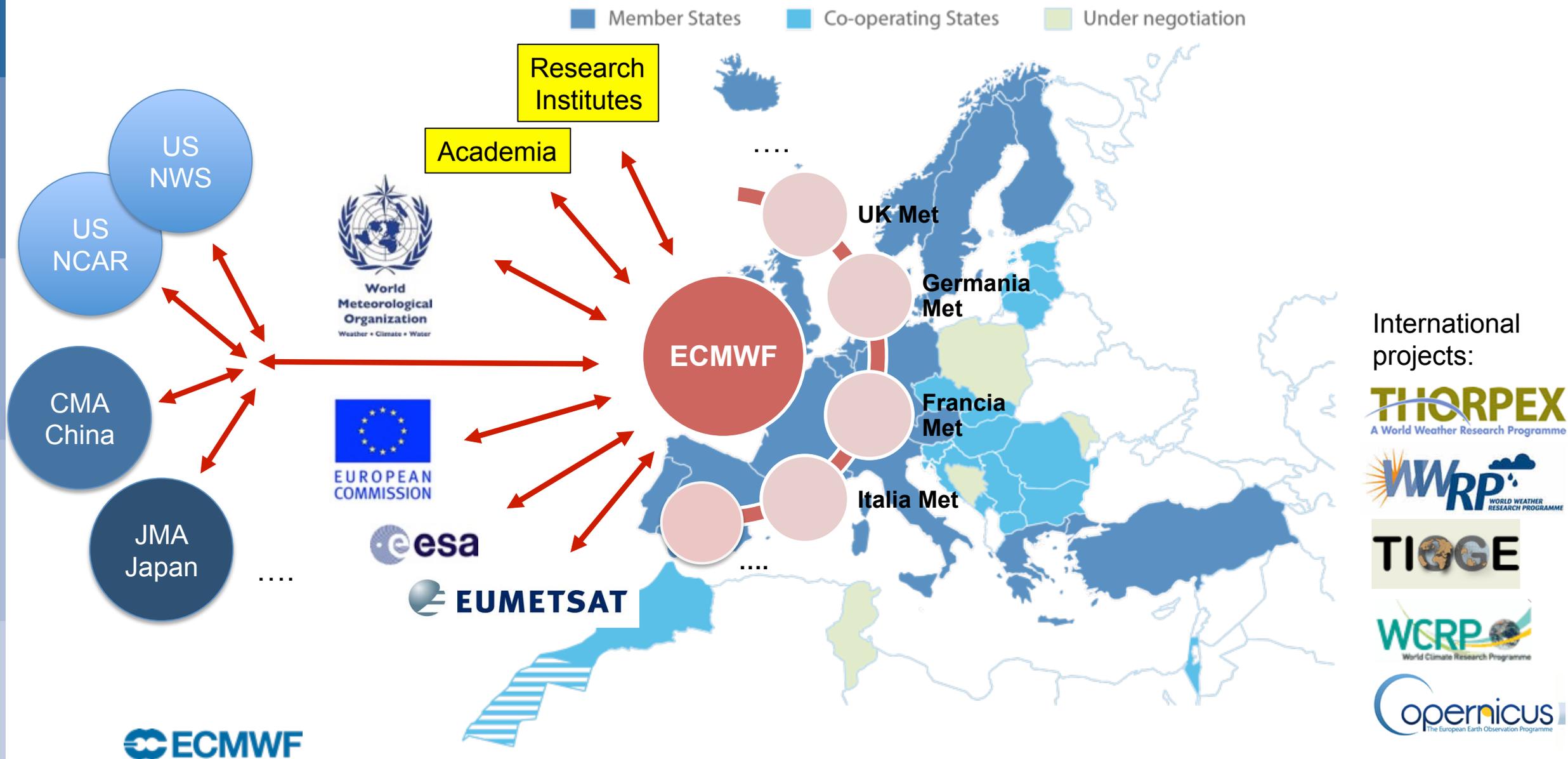
- **Da 4:1 a 36:1**, se misurato in termini dell'impatto (costo) di eventi estremi;
- Da 2:1 a 14:1, se misurato in termini dell'impatto sui piani di investimenti strategici;
- Di almeno 4:1, se misurato in termini dell'impatto su cittadini in Nord America;
- Da 3:1 a 6:1, se misurato in termini dell'impatto di periodi di siccita' in Etiopia;
- Da 2:1 a 9:1, se misurato in termini dell'impatto sull'agricoltura in Messico;
- Da 2:1 a 3:1, se misurato in termini dell'impatto di uragani sul settore petrolifero;

Un rapporto del servizio meteorologico UK (M Gray, 2015) parla di ritorni di almeno **10:1** degli investimenti pubblici nel servizio meteo UK:

- 120M di investimenti nel 2014/15 (di cui 98M dal governo e 18M dal trasporto aereo),
- 1,500M di ritorno degli investimenti.



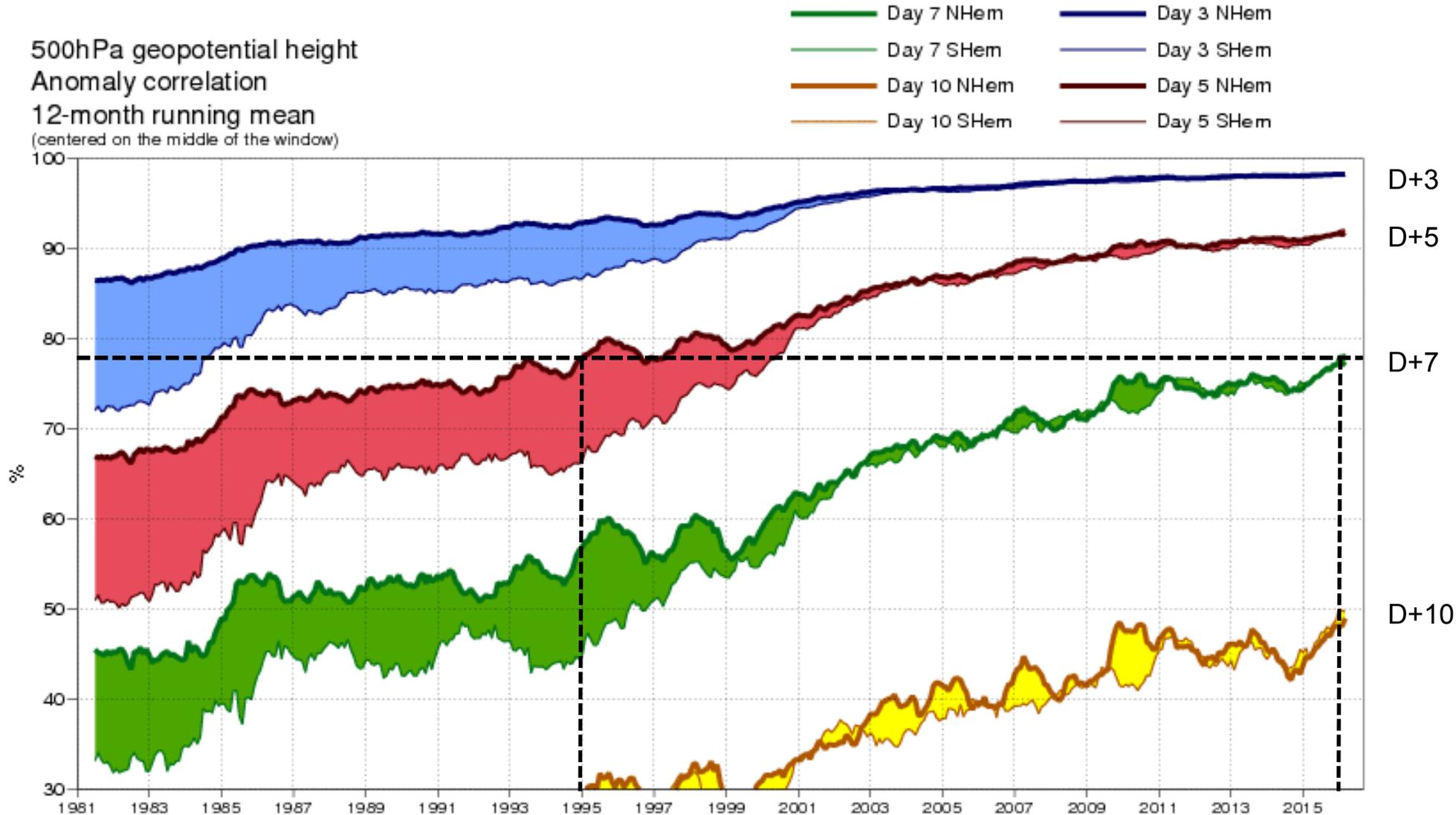
Collaborazioni sono fondamentali per continuare a migliorare le previsioni



Osserv.+Persone+Ricerca+Computers+Investim.+Collaborazioni=progresso

In media le previsioni migliorano di 1 giorno ogni 10 anni.

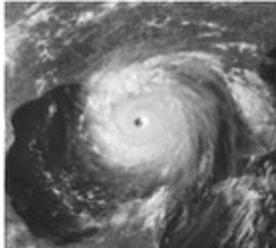
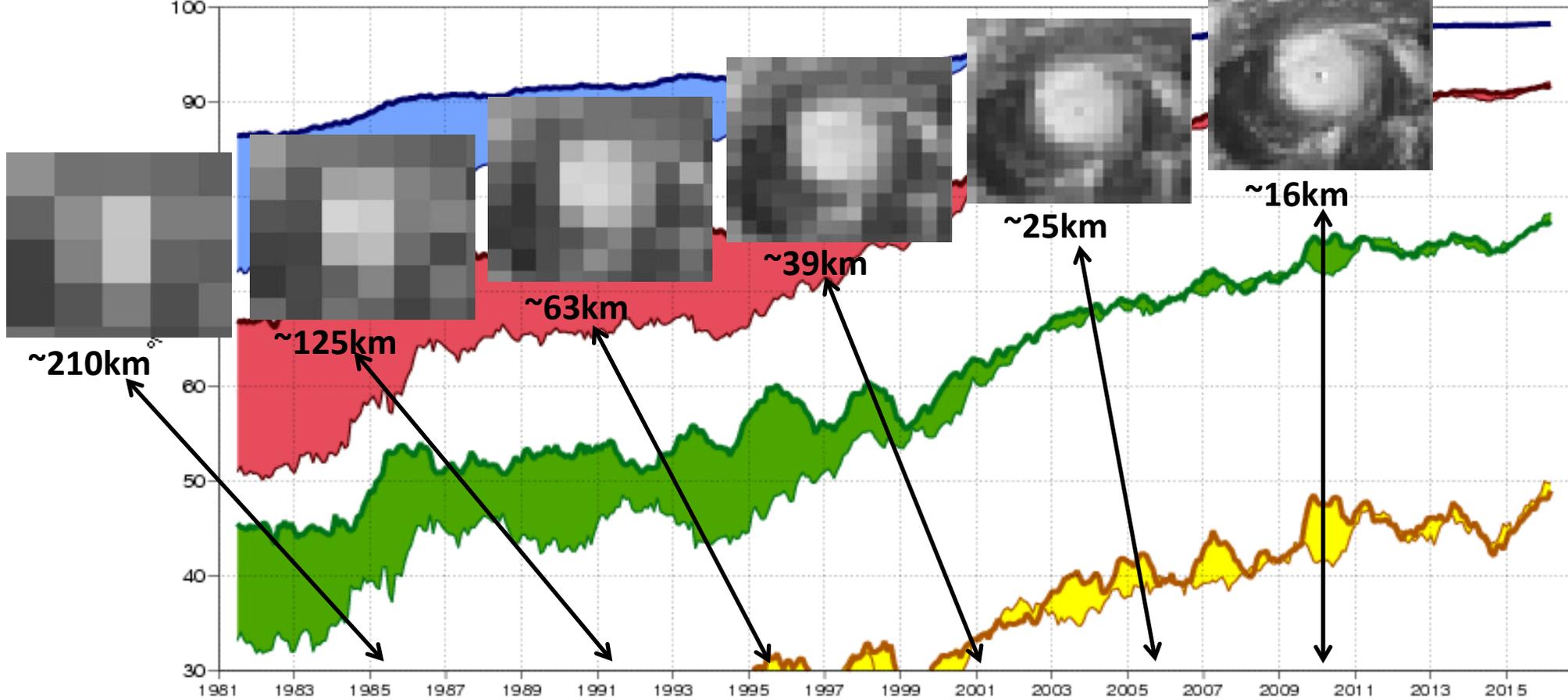
Oggi le previsioni a 7 giorni sono accurate quanto le previsioni a 5 giorni 20 anni fa'.



O + P + R + C + I + C = progresso

500hPa geopotential height
Anomaly correlation
12-month running mean
(centered on the middle of the window)

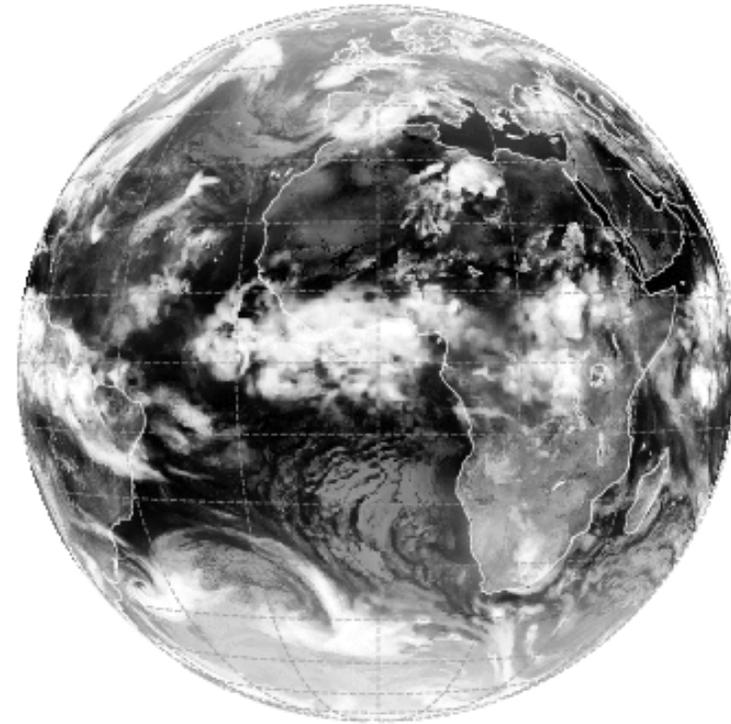
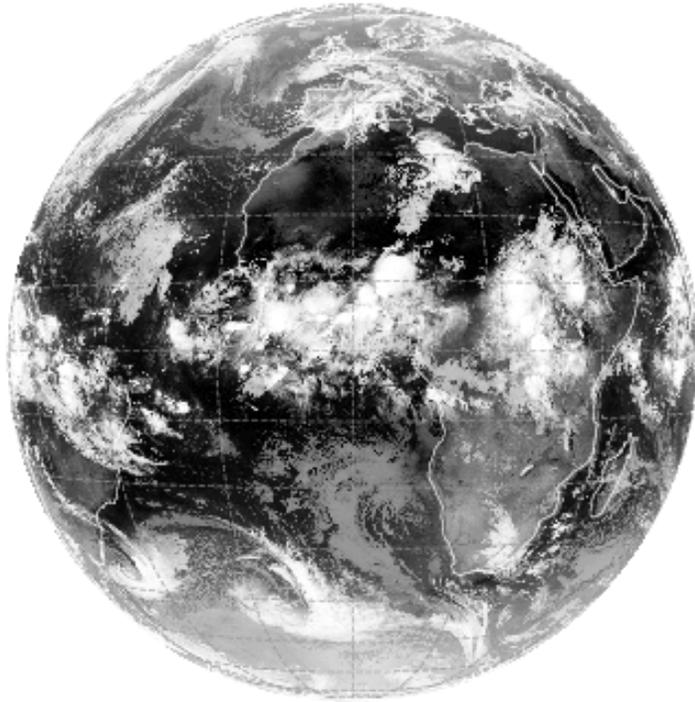
- Day 7 NHem
- Day 7 SHem
- Day 10 NHem
- Day 10 SHem
- Day 3 NHem
- Day 3 SHem
- Day 5 NHem
- Day 5 SHem



Since March 2016: ~9km

O + P + R + C + I + C = progresso

Realtà o simulazione?



Il futuro

The new ECMWF strategy for 2016-2025 has the following targets for 2025:

- **Ensemble-based, seamless predictions** of
 - high impact weather up to two weeks ahead
 - large scale patterns and regime transitions up to four weeks ahead,
 - global-scale anomalies up to a year ahead
- Research at frontiers of knowledge in **Earth-system modelling and data assimilation**
- **Ensemble-based analyses and predictions** that raise the international bar for quality and operational reliability reaching a **5 km horizontal resolution**