

MA 56E (2008)⁹: MODELACION INVERSA EN APLICACIONES GEOFISICAS



Laura Gallardo Klenner
Departamento de Geofísica
laura@dgf.uchile.cl

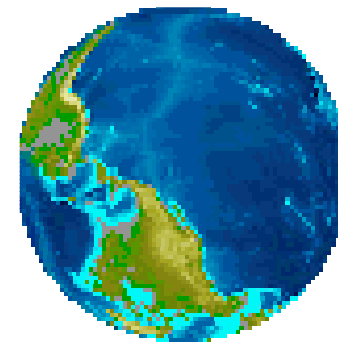
MA 56E...hasta ahora



- Métodos
 - Interpolación optimal. Cálculo adjunto de sensibilidades. 3dvar
 - Filtro de Kalman discreto.
 - Adjunto y 4dvar.
 - Otros métodos o variantes: funciones de Green, métodos de proyección basados en la controlabilidad y en ecuaciones integrales.
- Teoría abstracta de Problemas Inversos (general)
 - Definición de un problema mal puesto.
 - Regularización.
 - Regularización por discretización. Métodos de proyección y de Galerkin.
- Ejemplos
 - El problema de Calderón y la tomografía por impedancia eléctrica EIT.
 - El problema de rayos X y la tomografía computarizada.
 - El problema de la rigidez y la tomografía a partir del tiempo de viaje en sismología.
 - Otros problemas inversos para la ecuación del calor, ondas, Schödinger, Stokes, elasticidad, ondas no lineales y sus aplicaciones.

Hoy

- El sistema a modelar: la atmósfera
- Pronóstico del tiempo atmosférico (físico)...la historia y los problemas
- Observaciones meteorológicas y su asimilación
- Asimilación en meteorología
 - Análisis objetivo
 - Interpolación optimal
 - Asimilación variacional
 - Ensemble
- Asimilación para modelos de química atmosférica
 - Similar pero diferente

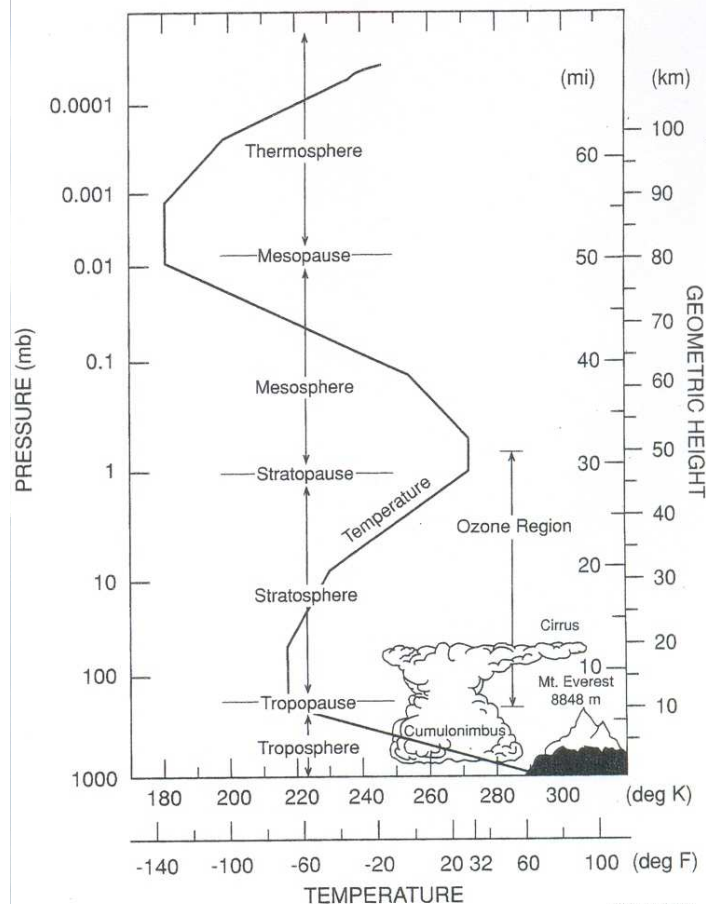


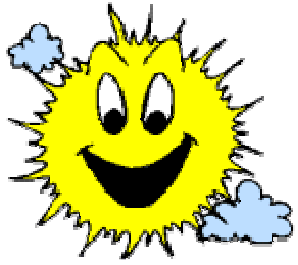
**Composición química del
fluido térmicamente
estratificado en los
primeros 100 km**

**5×10^{21} g
76% N₂
23% O₂
y trazas...
Ar, CO₂, H₂O....**

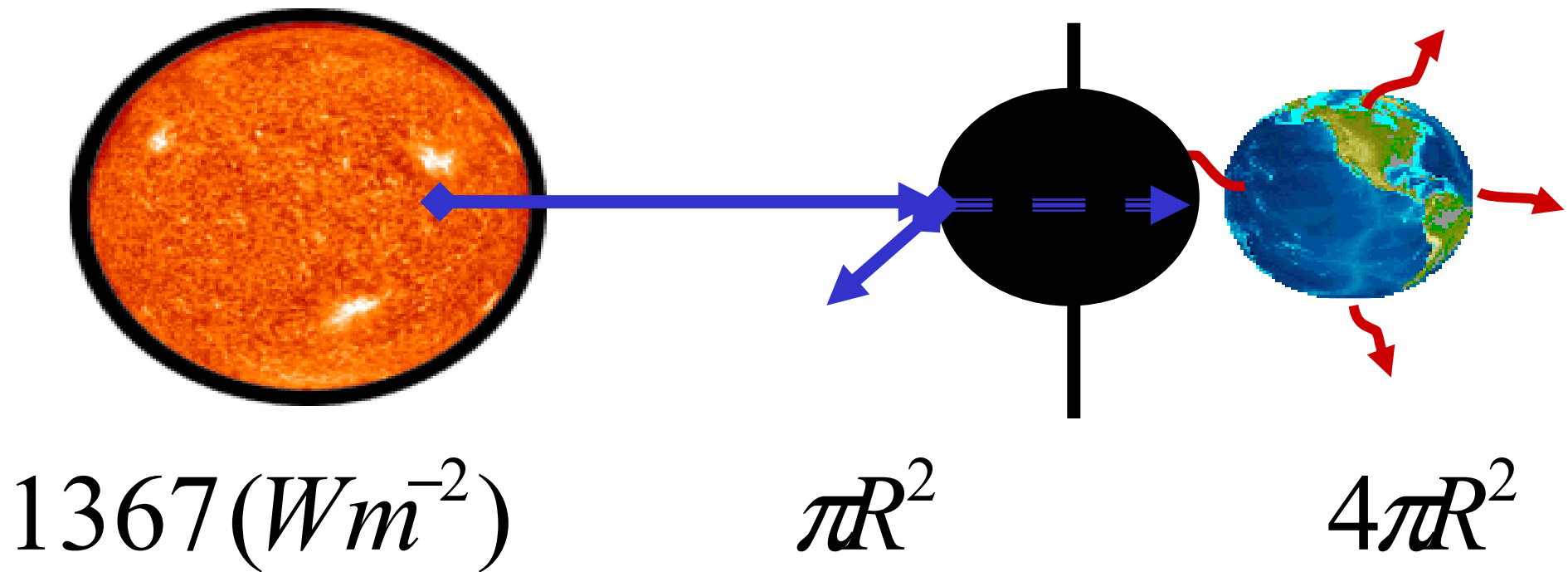
**Envoltorio mayoritariamente
gaseoso muy tenue**

**Un fluido donde prevalecen casi
siempre los movimientos
horizontales**





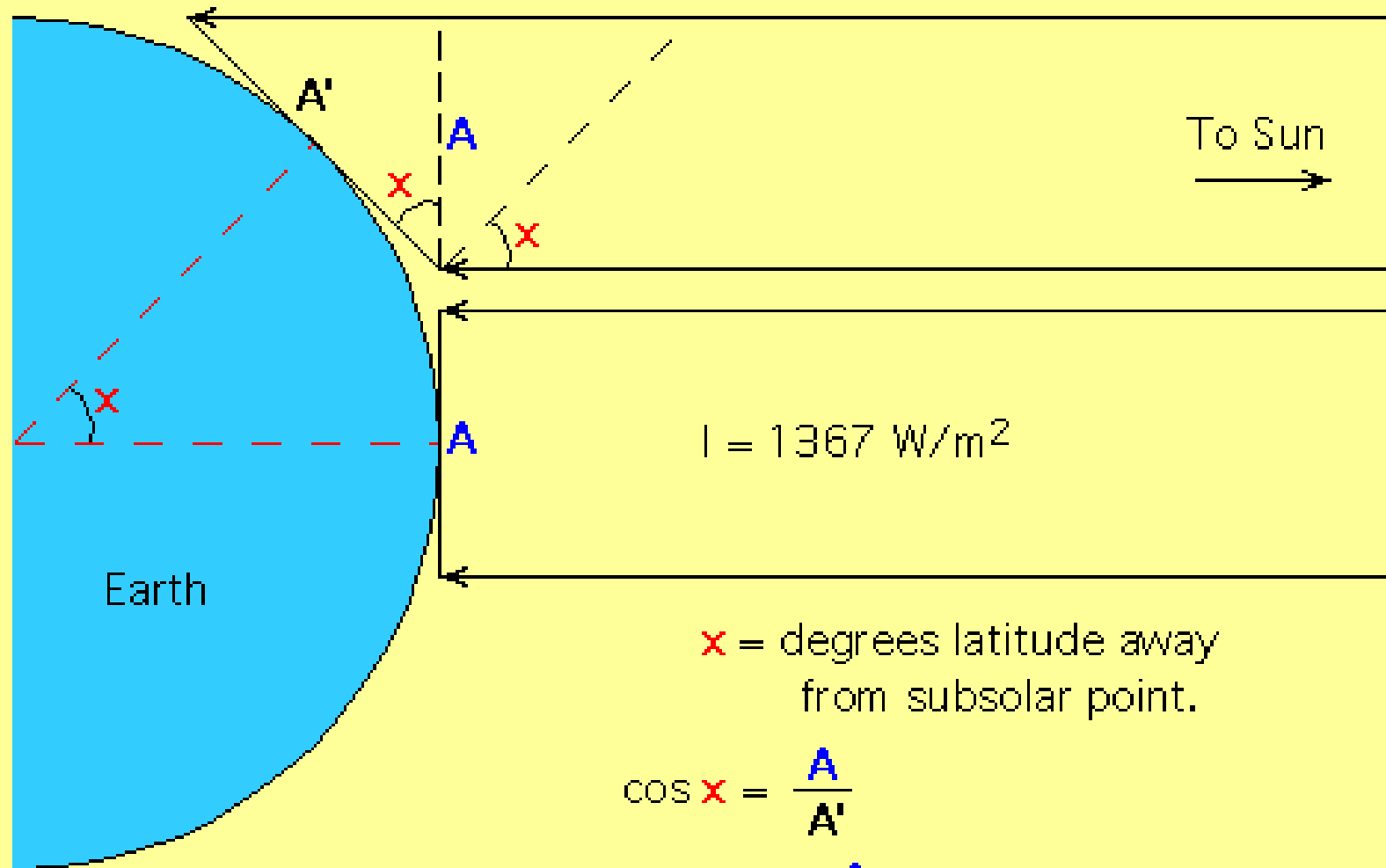
El sol: nuestra fuente de energía ca. 1367 W/m^2



La energía solar (**ondas cortas**) es parcialmente reflejada y absorbida por la atmósfera pero en su mayoría calienta la superficie terrestre dando lugar a emisión térmica (**ondas largas**)

Pero no llega la misma energía a todas partes...

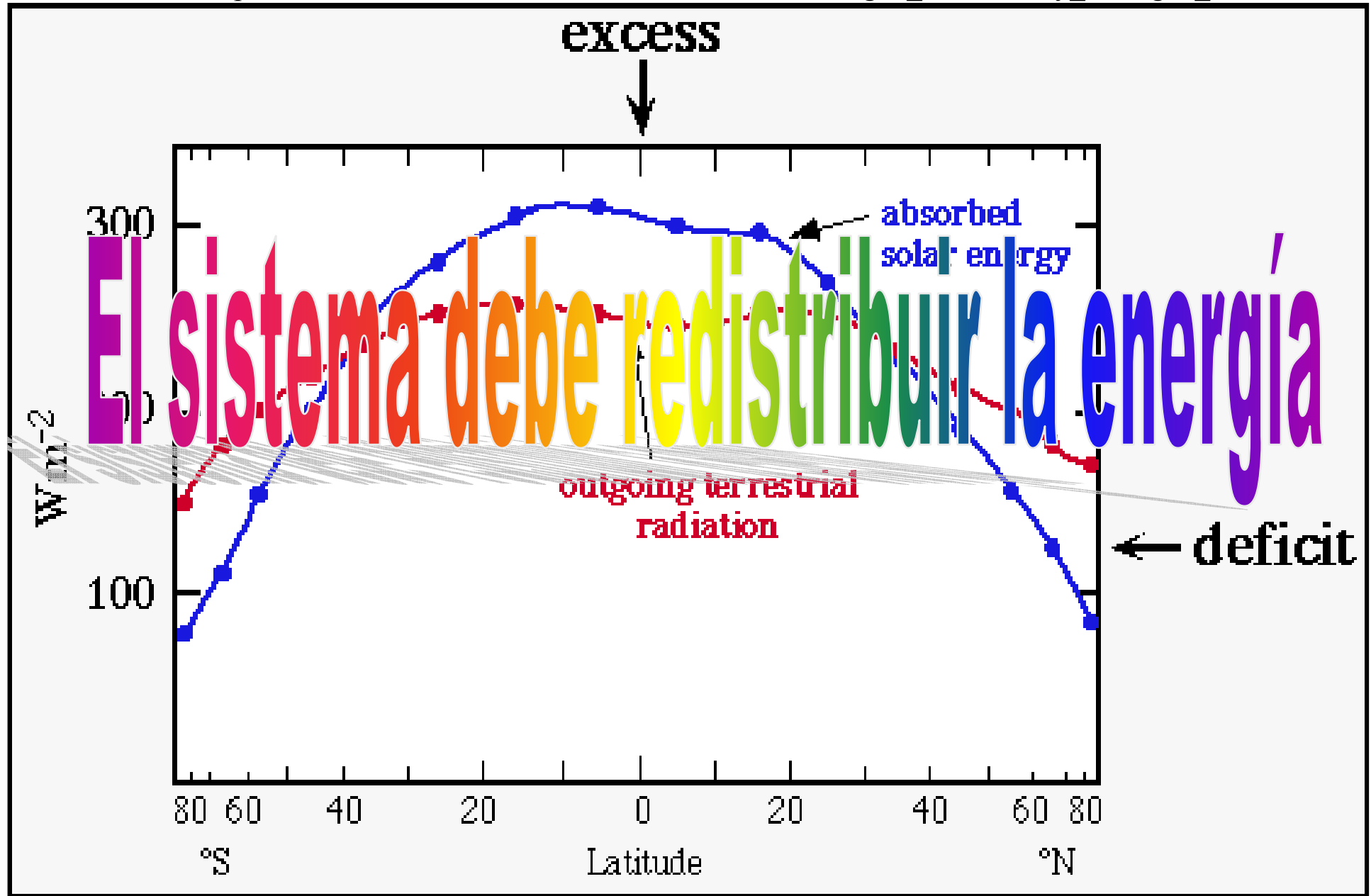
As the angle of incidence (x) increases, insolation decreases.

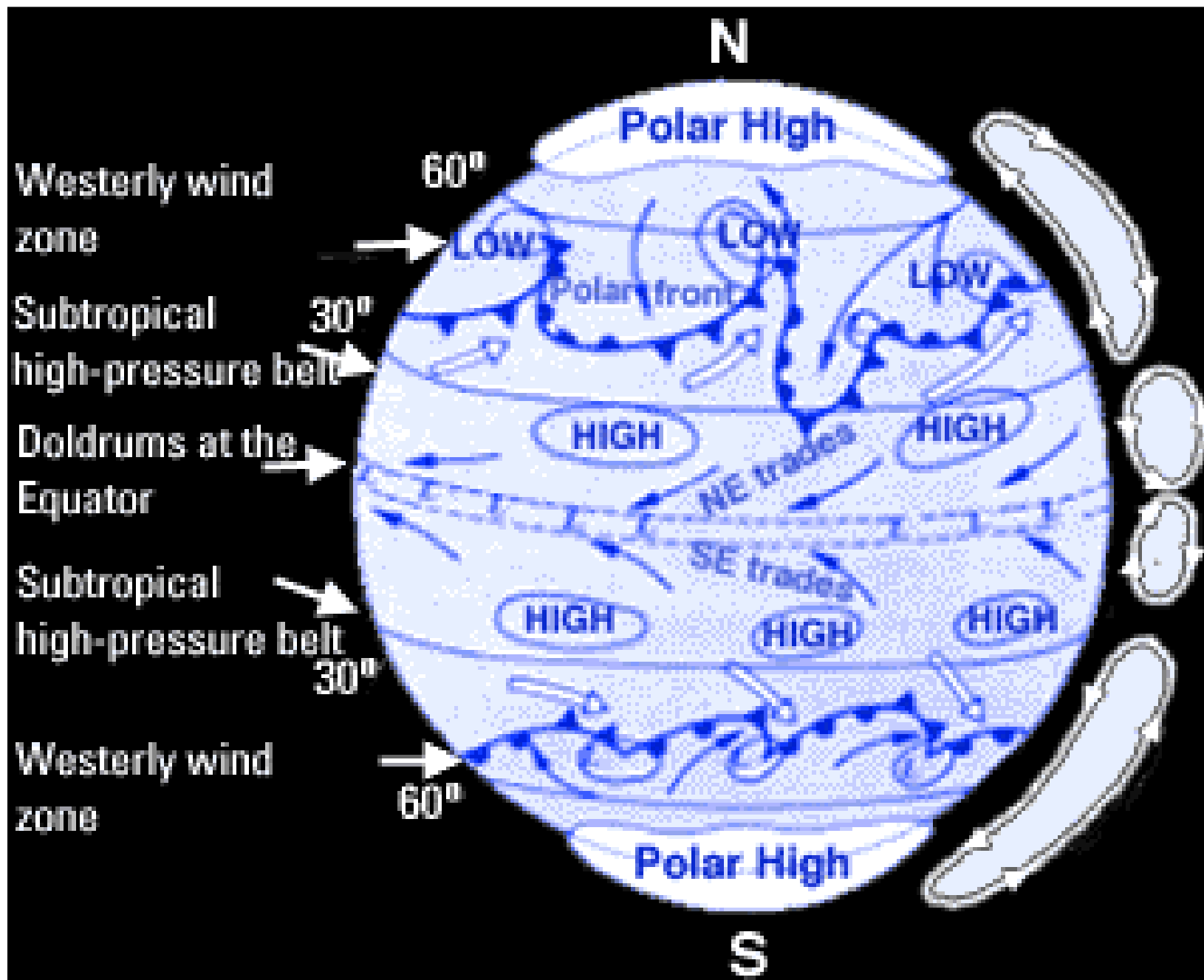


x = degrees latitude away from subsolar point.

$$\cos x = \frac{A}{A'}$$

$$A' = \frac{A}{\cos x}$$





Et pursimuoove....



Rossby, 1956

Medio dispersivo



En la atmósfera rige la segunda ley de Newton

$$\sum \vec{f} = m\vec{a}$$

Pero siendo un sistema en rotación, se corrige por Coriolis y por centrífuga:

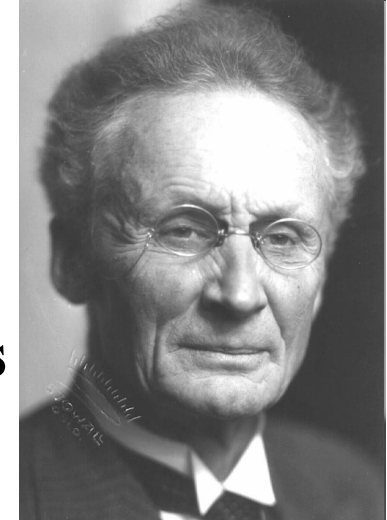
$$\sum \vec{f} = m(\vec{a} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v} - \Omega^2 \vec{r})$$

Y además se conservan la masa y la energía

Y alguien escribió todo esto junto (~
1904)...



Vilhelm Bjerknes (1862-1951)
was a professor of applied mechanics
and mathematical physics at the
University of Stockholm, where his
research revealed the fundamental
interaction between fluid- and
thermodynamics



Later: Professor at:
Oslo 1907
Leipzig 1912



Conservación del momentum

$$\hat{x} : \frac{du}{dt} - \frac{uv \tan \varphi}{a} + \frac{uw}{a} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega v \sin \varphi - 2\Omega w \cos \varphi + F_x$$

$$\hat{y} : \frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan \varphi}{a} + \frac{vw}{a} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + 2u \sin \varphi + F_y$$

$$\hat{z} : \frac{dw}{dt} + \frac{u^2 + v^2}{a} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + 2\Omega u \cos \varphi + F_z$$

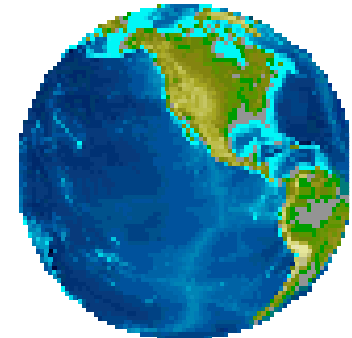
Conservación de la energía

$$C_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = \frac{dQ}{dt}, \alpha = \frac{1}{\rho}$$

Conservación de la masa

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \vec{v}$$

$$\{u, v, w, T, p, \rho\} \quad \forall \quad \{\vec{r}, t\}$$



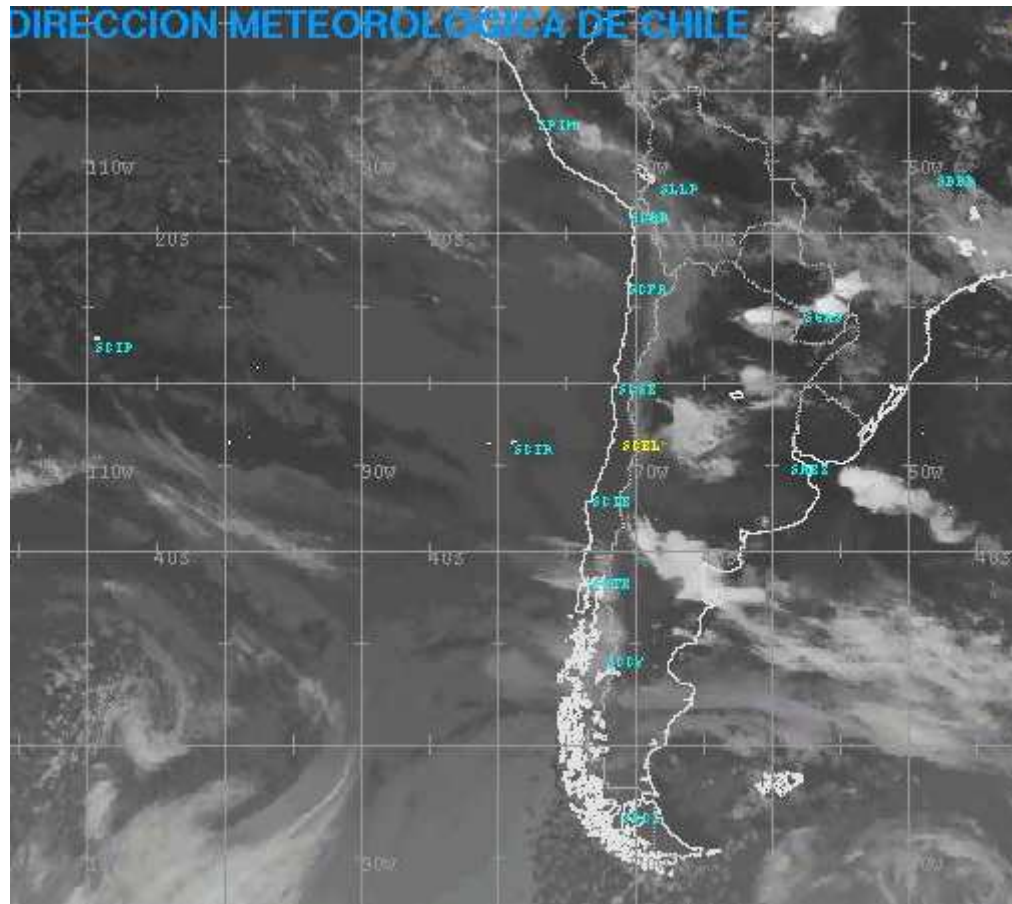
Ecuación de estado para gas ideal

$$p = \rho R T$$

MA 56E LGK

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla$$

Y la gente ya sabía que los grandes cambios ocurrían a escala sinóptica



5/11/ 2008 9 UTC

MA 56E LGK



$U \sim 10 \text{ m/s}$; $W \sim 1 \text{ cm/s}$;

$$L \sim 10^6 \text{ m}; D \sim 10^4 \text{ m};$$

$$\Delta P/\rho \sim 10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

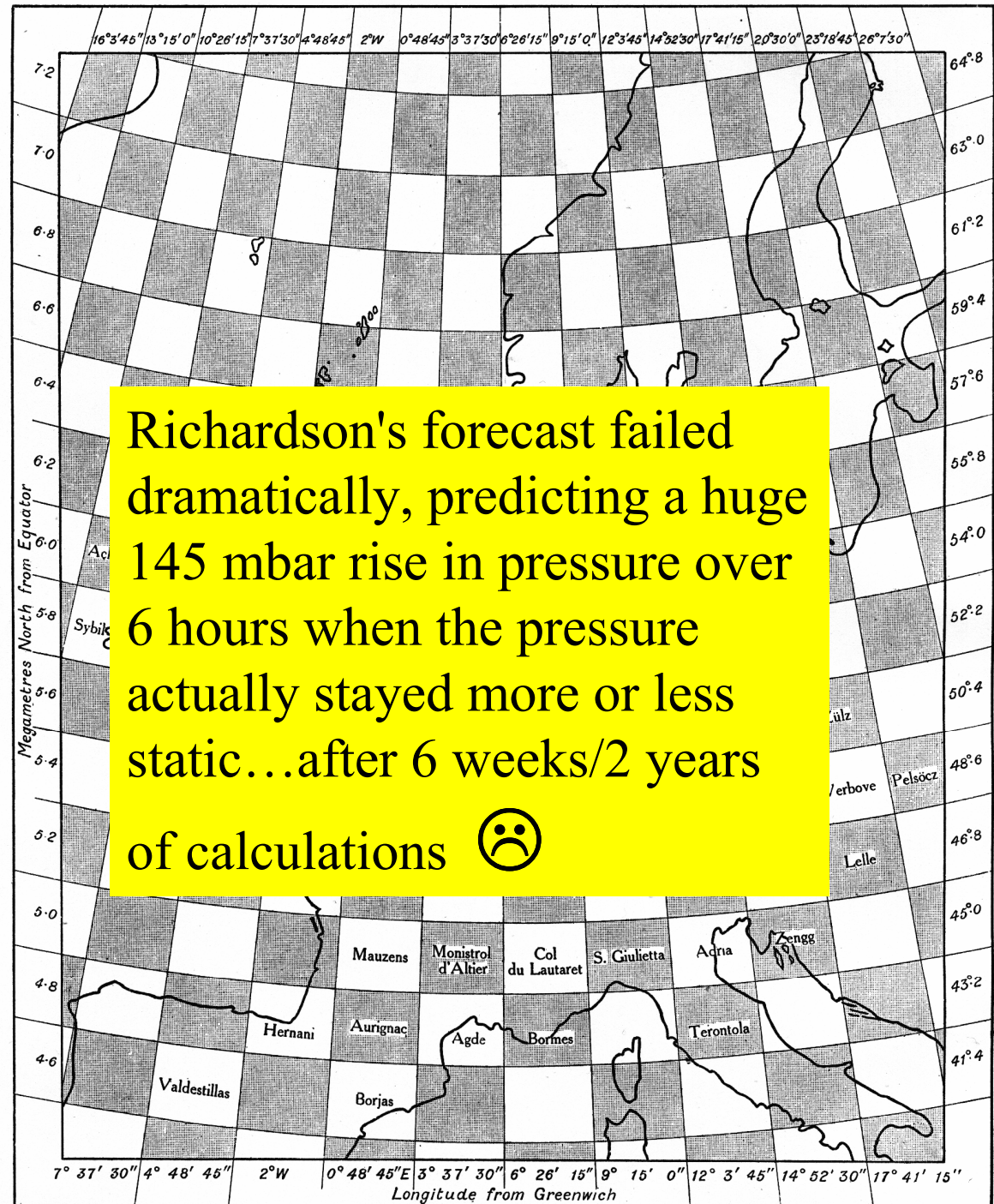
$$\Omega \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

By 1922, Lewis Fry Richardson

Diferencias
finitas

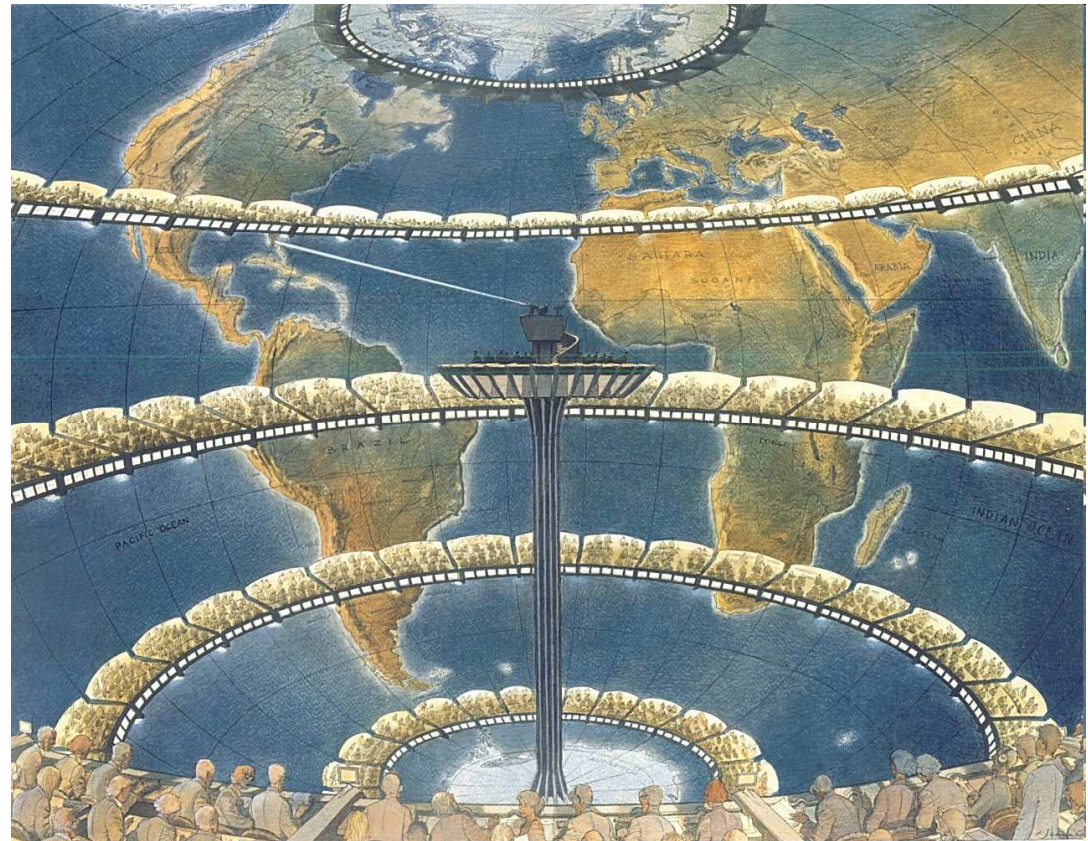


Richardson's forecast failed dramatically, predicting a huge 145 mbar rise in pressure over 6 hours when the pressure actually stayed more or less static...after 6 weeks/2 years of calculations ☹️



Richardson thought he would probably be able to calculate weather (using the **forecast factory**) only about as fast as it actually happens :

*"a large hall like a theatre... the walls of this chamber are painted to form a map of the globe... A myriad computers **[people, not machines in 1911]** are at work upon the weather of the part of the map where each sits... The **man [1911]** in charge of the whole theatre... is like the conductor of an orchestra in which the instruments are slide-rules and calculating machines."*

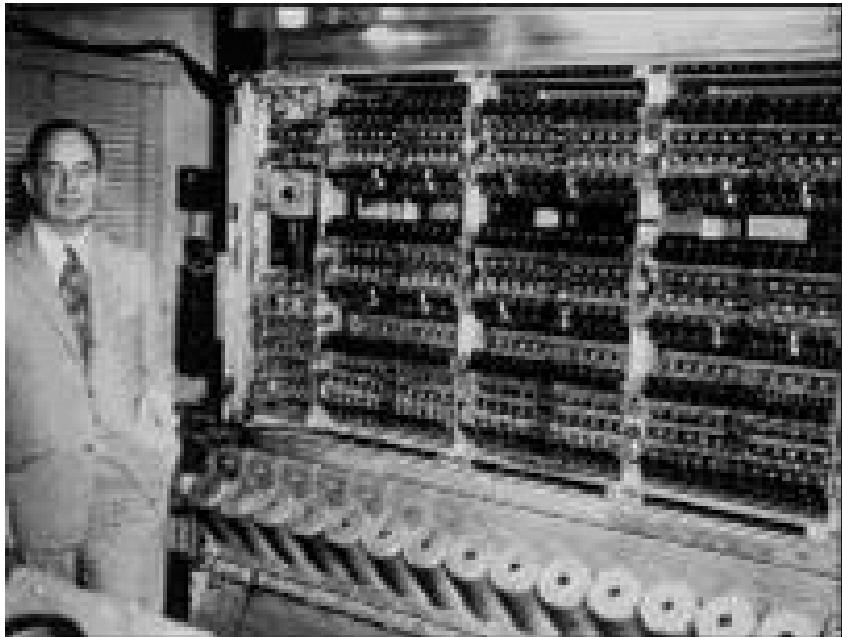


Si las ecuaciones son las correctas, ¿por qué falló Richardson?

- Insuficiente entendimiento de la dinámica atmosférica
- Falta de algoritmos computacionales estables para integrar las ecuaciones
- Ausencia de observaciones regulares en la atmósfera libre
- **Inexistencia de equipos computacionales automáticos**

Y unos 30 años más tarde

Now, those 64,000 human "computers" envisioned by Richardson could be replaced by a single machine, albeit one that filled a 30 x 50 foot room.



John von Neumann
and the Electronic
Numerical Integrator
and Computer
(ENIAC)
(Princeton, USA,
~1948).

<http://celebrating200years.noaa.gov/foundations/welcome.html>

También, Charney & Rossby habían propuesto simplificaciones ...



Jule Charney (1917-1981)



Gustav Rossby (1898-1957)

Generic structure of dynamical systems that model stratified, layerwise-2D vortical motion:

(prognostic:) $\frac{DQ}{Dt} = (\text{small terms}) \quad \left(\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \right)$

Rossby 1936 (ref. [99] in Appendix III)

(diagnostic:) $\mathbf{u} = \mathcal{J}_{\mathbf{u}}(Q)$ (invertibility principle)

Charney 1948; Kleinschmidt 1950

(functional)

Q. J. Roy. Met. Soc. **111**, 877, and **113**, 402.

(Reminder:) Simplest model example is 2D vortex dynamics, called the one-layer barotropic model in the atmosphere–ocean literature. (As earlier.) The inversion operator $\mathcal{J}_{\mathbf{u}}$ is then defined, assuming suitable boundary conditions, by

$$\mathcal{J}_{\mathbf{u}}(Q) : \begin{cases} \nabla^2 \psi = Q - Q_{\text{planetary}} \\ \mathbf{u} = (u, v) = \left(-\frac{\partial \psi}{\partial y}, \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \end{cases}$$

In real atmosphere and oceans: PV is Rossby–Ertel PV

$$\frac{H}{L} \sim \frac{f}{N} \sim 10^{-2} \quad \mathcal{J}_{\mathbf{u}}, \mathcal{J}_T \text{ nonlinear (often only weakly)}$$

(Prandtl's ratio of scales)

but qualitatively like one-layer case.

Geostrophic or higher balance needs to be assumed
(further discussion in Appendix III, pp.19 - 24.)

Almost all the dynamical info (winds, temperatures, adiabatic vertical motion/cooling rate) in one scalar, Q !

non-gravity-wave

Modelo barotrópico
El modelo
correcto...dado el poder
computacional y la
información...y el
objetivo
...todavía la idea de
Richardson

First real-time operational NWP

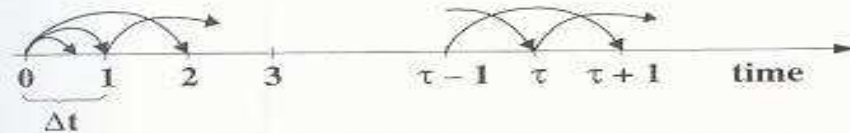
The Barotropic model

$$\frac{D}{Dt} (\zeta + f) = 0 \quad f = 2\Omega \sin \phi$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \phi = J(\zeta + f, \phi)$$

ϕ = geopotential height m = mapfactor

$$\zeta^{\tau+1} = \zeta^{\tau-1} + 2\Delta t J \left(m^2 \zeta^{\tau} + f, \phi^{\tau} \right) \quad \zeta = \frac{1}{f_0} \nabla^2 \phi$$

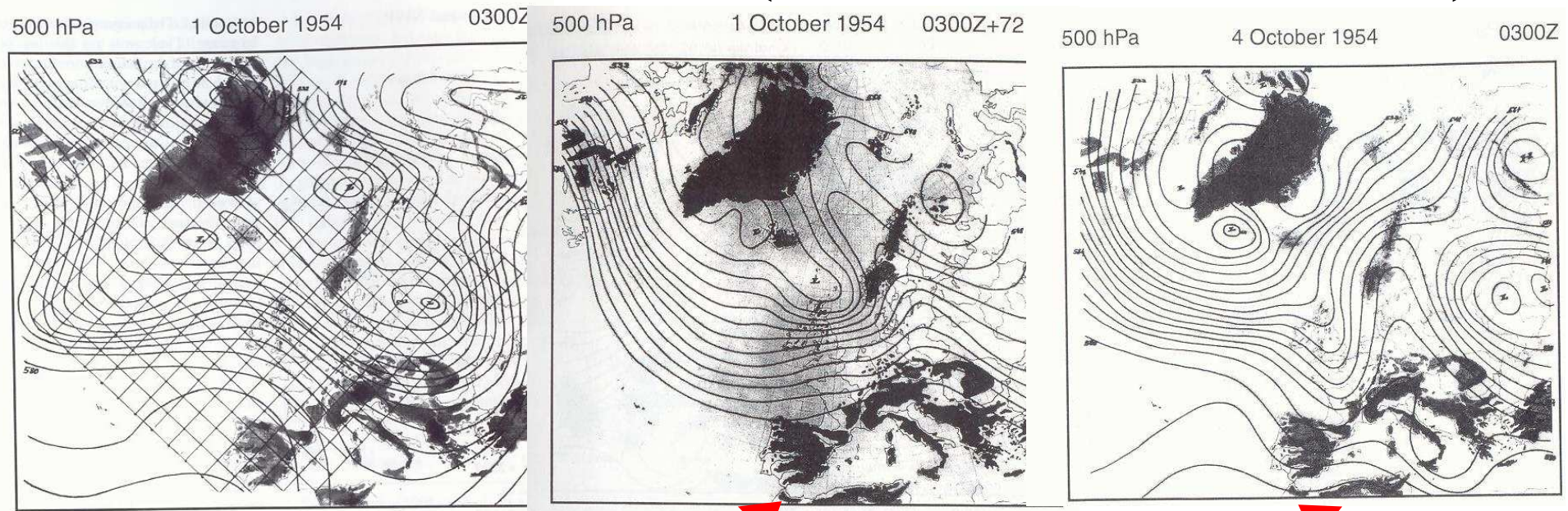


	ϕ^{τ}	$\zeta^{\tau-1}$	
a) Compute $\zeta^{\tau} = \frac{1}{f_0} \nabla^2 \phi^{\tau}$	ϕ^{τ}	$\zeta^{\tau-1}$	ζ^{τ}
b) Compute J^{τ}	J^{τ}	$\zeta^{\tau-1}$	ζ^{τ}
c) Extrapolate $\zeta^{\tau+1} = \zeta^{\tau-1} + 2\Delta t J^{\tau}$	J^{τ}	$\zeta^{\tau+1}$	ζ^{τ}
d) Solve the Poisson eq. $\zeta^{\tau+1} = \frac{1}{f_0} \nabla^2 \phi^{\tau+1}$	$\phi^{\tau+1}$	ζ^{τ}	
	14 bits	13 bits	13 bits

Integration area:
 20 x 20 grid points; $\Delta s = 300$ km; $\Delta t = 1$ hr.

Staff Members of the Institute of Meteorology, University of Stockholm, "Results of Forecasting with the Barotropic Model on an Electronic Computer (BESK)," *Tellus* 6 (1954): 139-149.

El primer pronóstico operacional...modelo barotrópico Stockholm. 1954 (*Tellus* 6, 139-149)



CI-Observada

Pronóstico a 3 días

Observación

Noticeable resemblance!

MA 56E LGK

Table 2. *Supercomputer and NWPP 1954–1998*

Binär Elektronisk SekvensKalkylator (Besk)

Comparison	Besk, Sweden	Fujitsu VPP 700 (16 proc)
model	MISU/MVC (1954) 1 level, regional	ECMWF (1998) 31 level, global
parameter	1	~ 200
no. variables	1200	$3 \cdot 10^7$
calculations/day	$3 \cdot 10^7$ (40 bit fix number)	$5 \cdot 10^{12}$ (64 bit float number)
calculation time	25 min	6 min*
useful forecast	1 day	6–9 days

*With 115 proc. 66 s.

2008??

El tiempo pasa...y las tecnologías evolucionan



Binär Elektronisk SekvensKalkylator (Besk)

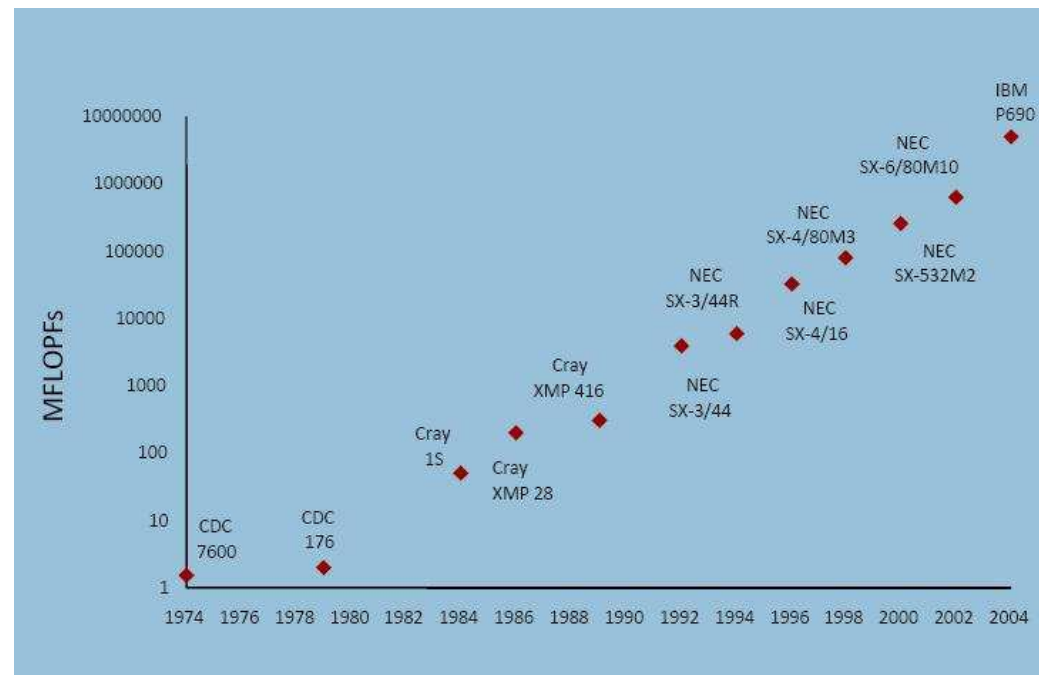


CPTEC Dec 2007

Comparison of ECMWF's latest supercomputer with its first one

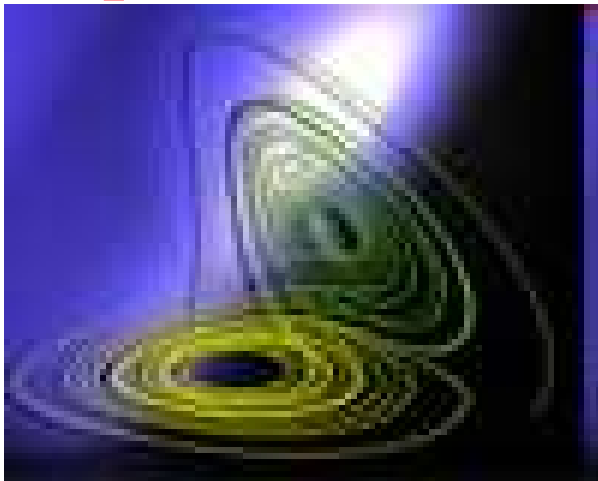
Specification	Cray-1A	IBM POWER6 System	Approx Ratio
Year installed	1978	2009	
Architecture	Vector processor	Dual Cluster of scalar CPUs	
Number of CPUs	1	~9,000	9,000:1
Clock Speed	12.5 nsec (80 MHz)	0.21 nsec (4.7 GHz)	60:1
Peak perf per CPU	160 MFLOPS	18.8 GFLOPS	120:1
Peak perf per system	160 MFLOPS	~320 TFLOPS	2,000,000:1
Sustained performance	~50 MFLOPS	~20 TFLOPS	400,000:1
Memory	8 MBytes	~40 TBytes	5,000,000:1
Disk Space	2.5 GBytes	~1.2 PBytes	500,000:1

http://www.ecmwf.int/services/computing/overview/supercomputer_history.html



Las ecuaciones que describen la evolución del estado atmosférico es integrable en el tiempo si se conocen las CI y CB pero:

- El sistema es caótico y por ello los errores (en las CI) se propagan y crecen limitando la predictabilidad



<http://www.ecmwf.int/research/predictability/>

MA 56E LGK

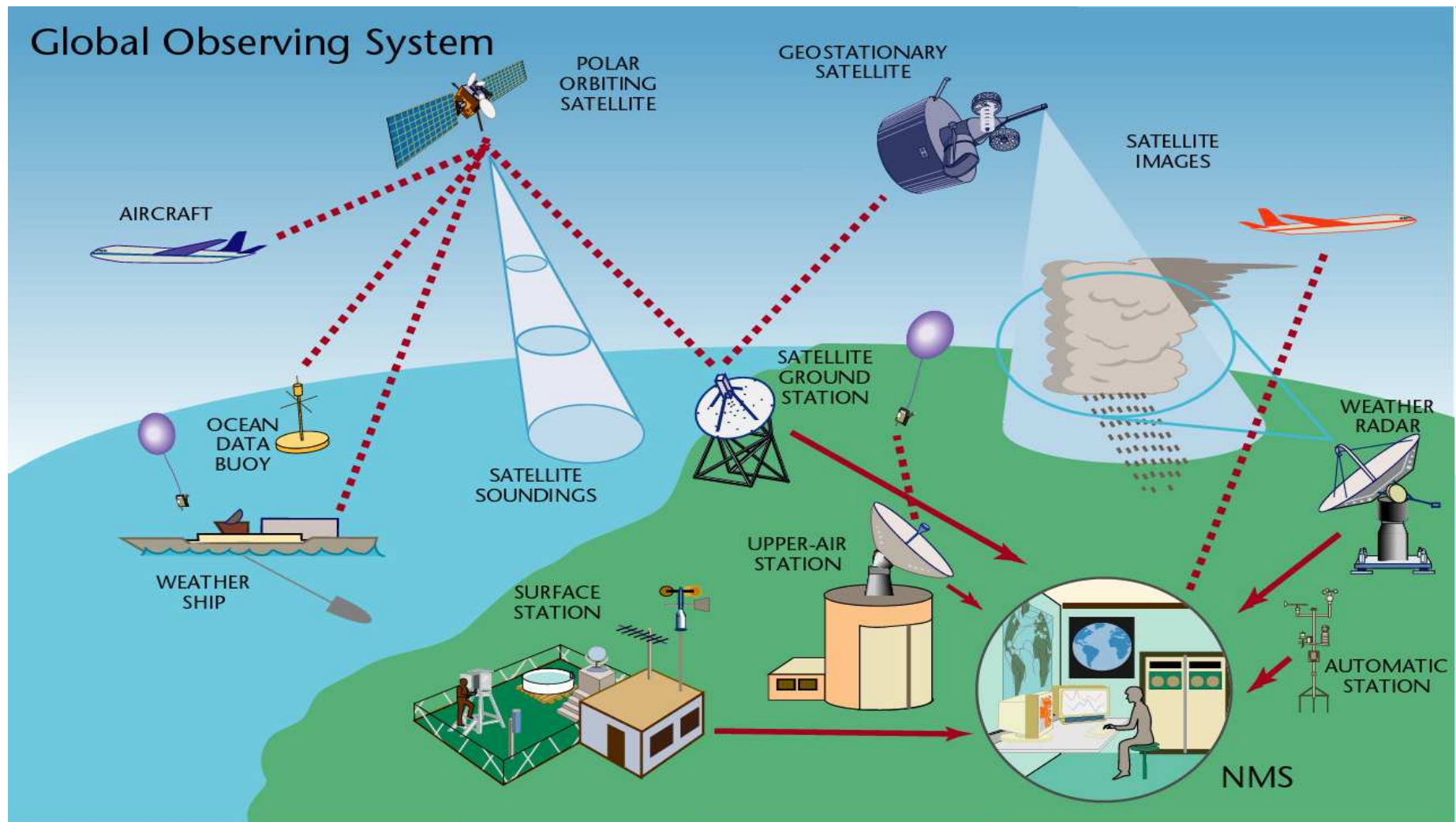
¿Cómo ha mejorado el pronóstico del tiempo?

- Mejores observaciones
- Mejores computadores
- Ecuaciones más generales y completas
- Mejores métodos numéricos
- Mejor resolución
- Mejor física
- Asimilación de datos

¿Cuáles son los datos que se asimilan?

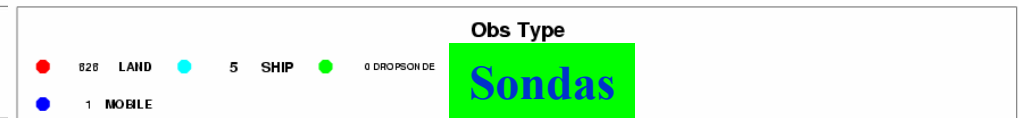
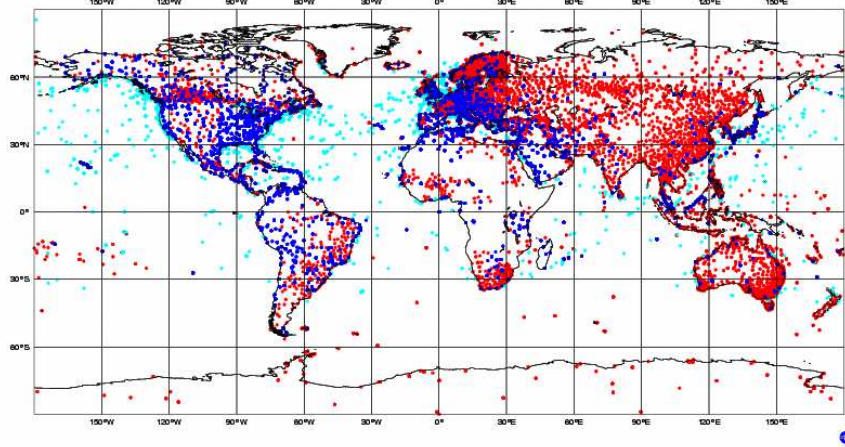
Para determinar las CI se asimilan múltiples y diversas observaciones (106 -108 por ciclo de asimilación)

<http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html>

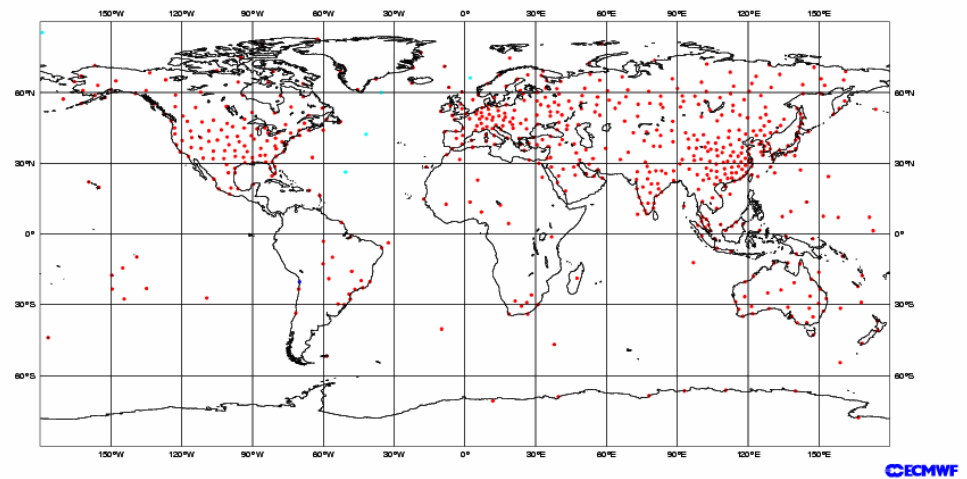




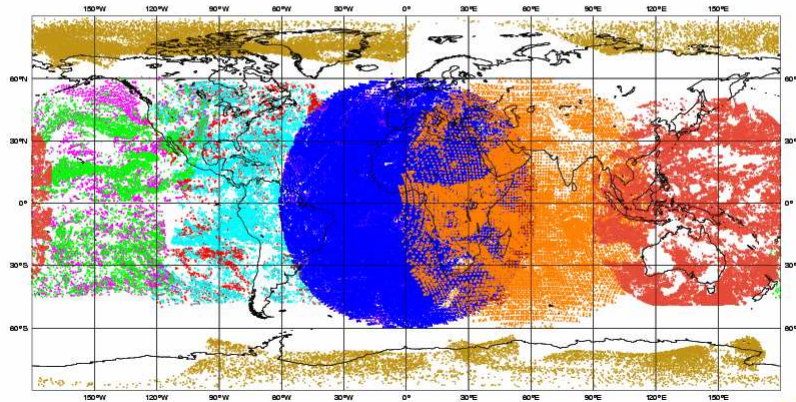
ECMWF Data Coverage (All obs DA) - SYNOP/SHIP
04/NOV/2008; 00 UTC
Total number of obs = 29641



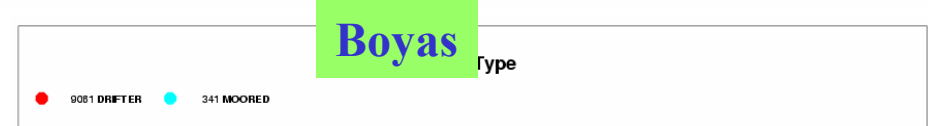
ECMWF Data Coverage (All obs DA) - TEMP
04/NOV/2008; 00 UTC
Total number of obs = 632



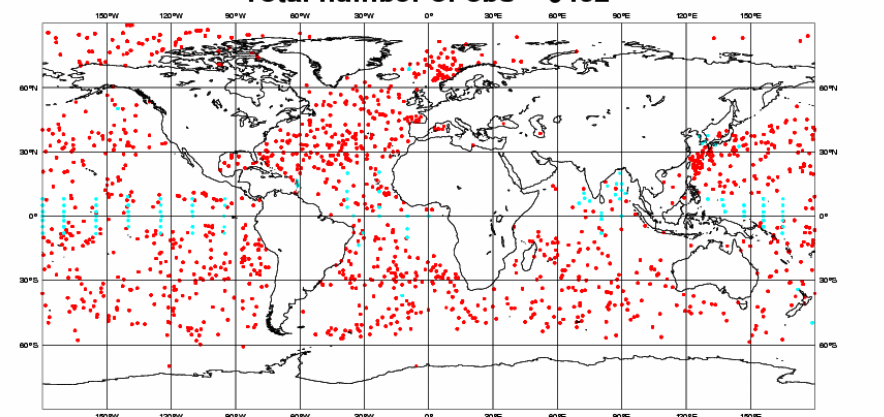
ECMWF Data Coverage (All obs DA) - AMV
04/NOV/2008; 00 UTC
Total number of obs = 290730



CECMWF



ECMWF Data Coverage (All obs DA) - BUOY
04/NOV/2008; 00 UTC
Total number of obs = 9402

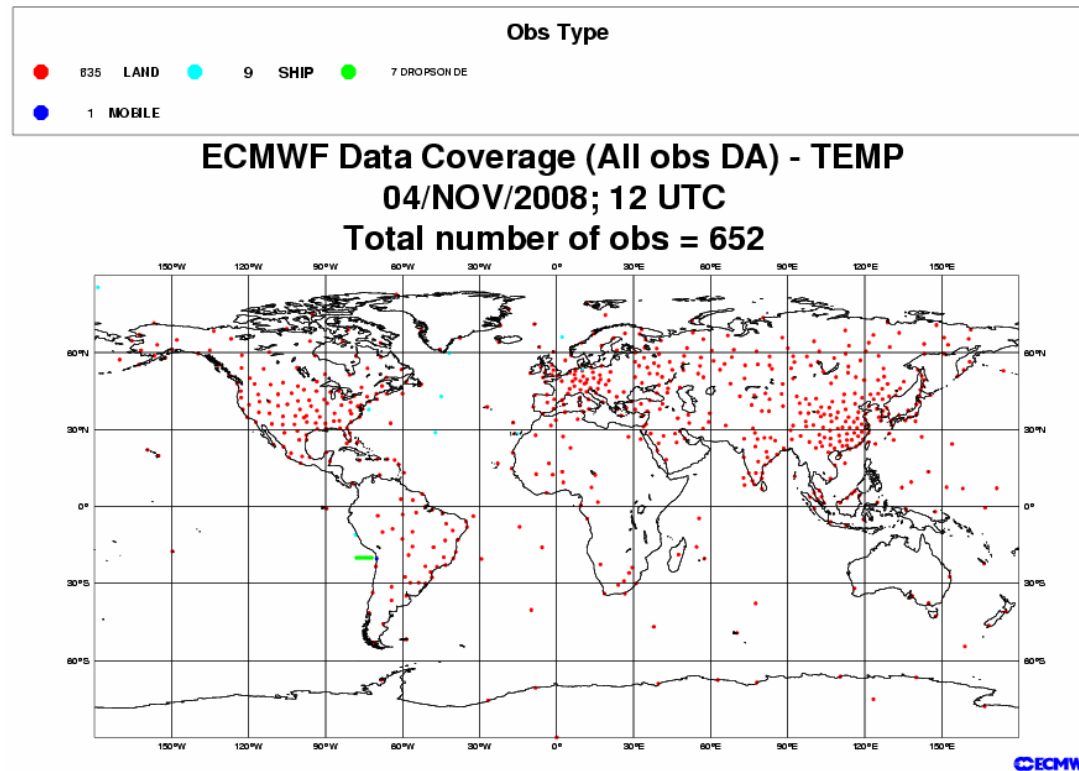


CECMWF

Sondeos meteorológicos en Chile

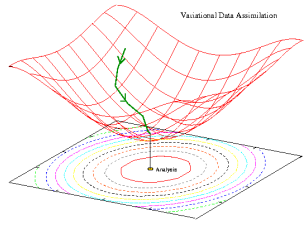
Dirección Meteorológica de Chile

<http://www.meteochile.cl/>



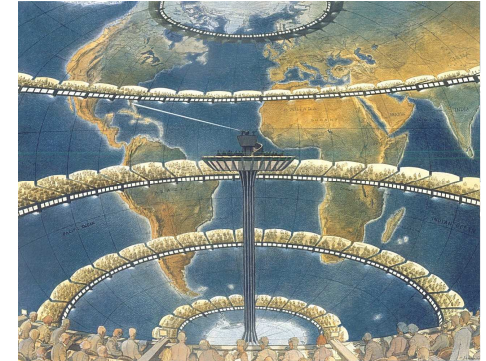
Ver: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Regulares: Antofagasta; Santo Domingo; Puerto Montt; Punta Arenas; Rapa Nui



Historia de la asimilación de datos en Meteorología

- *A Richardson se le ocurre la “locura” de predecir el tiempo*
- A Panofsky le da por hacer “análisis objetivos”
- En los 70, la “locura satelital” induce la “interpolación optimizada”
- En los 80’s...asimilación variacional
- En los 90’s y 00’s...pronóstico de “ensemble”...

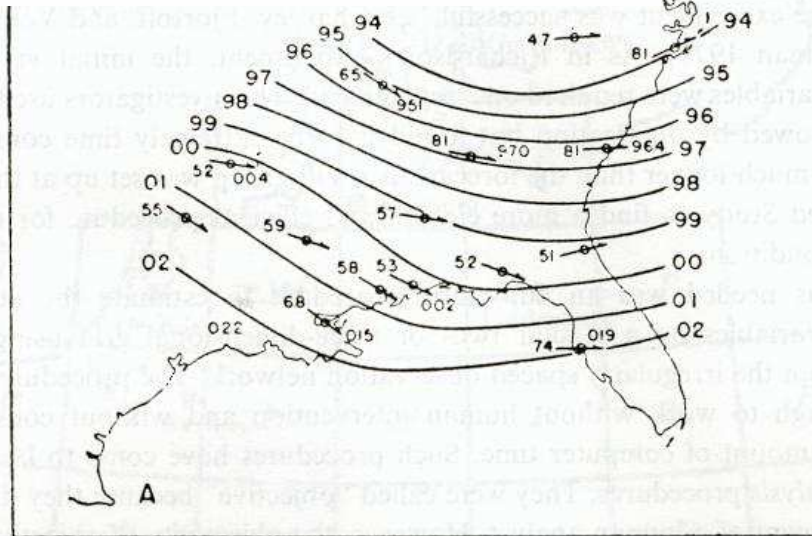


MA 56E LGK

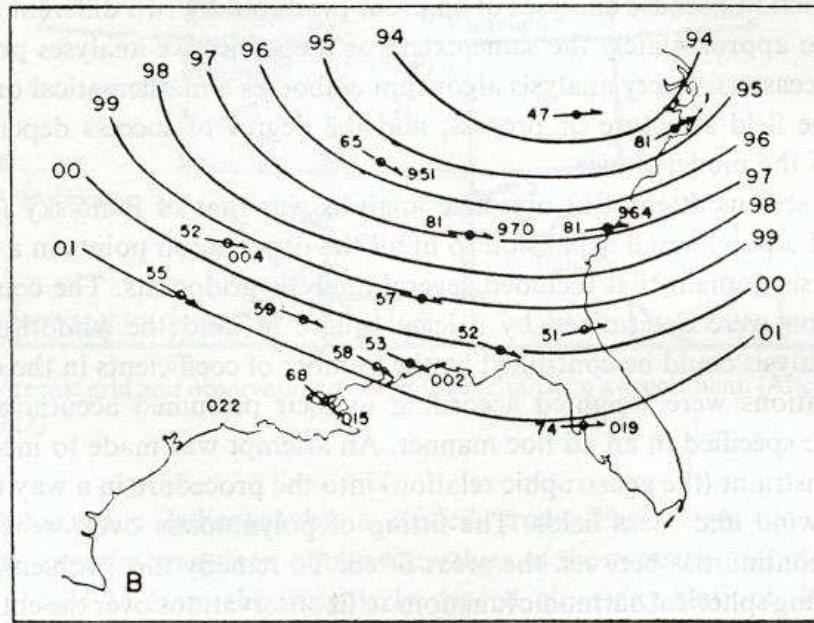
<http://www.met.rdg.ac.uk/~ross/DARC/MileStones/DAhistory.html>

Análisis Objetivo

$$p(x, y) = \sum_{i,j} a_{ij} x^i y^j, \quad (i + j \leq 3)$$



Análisis Subjetivo



Panofsky, 1949

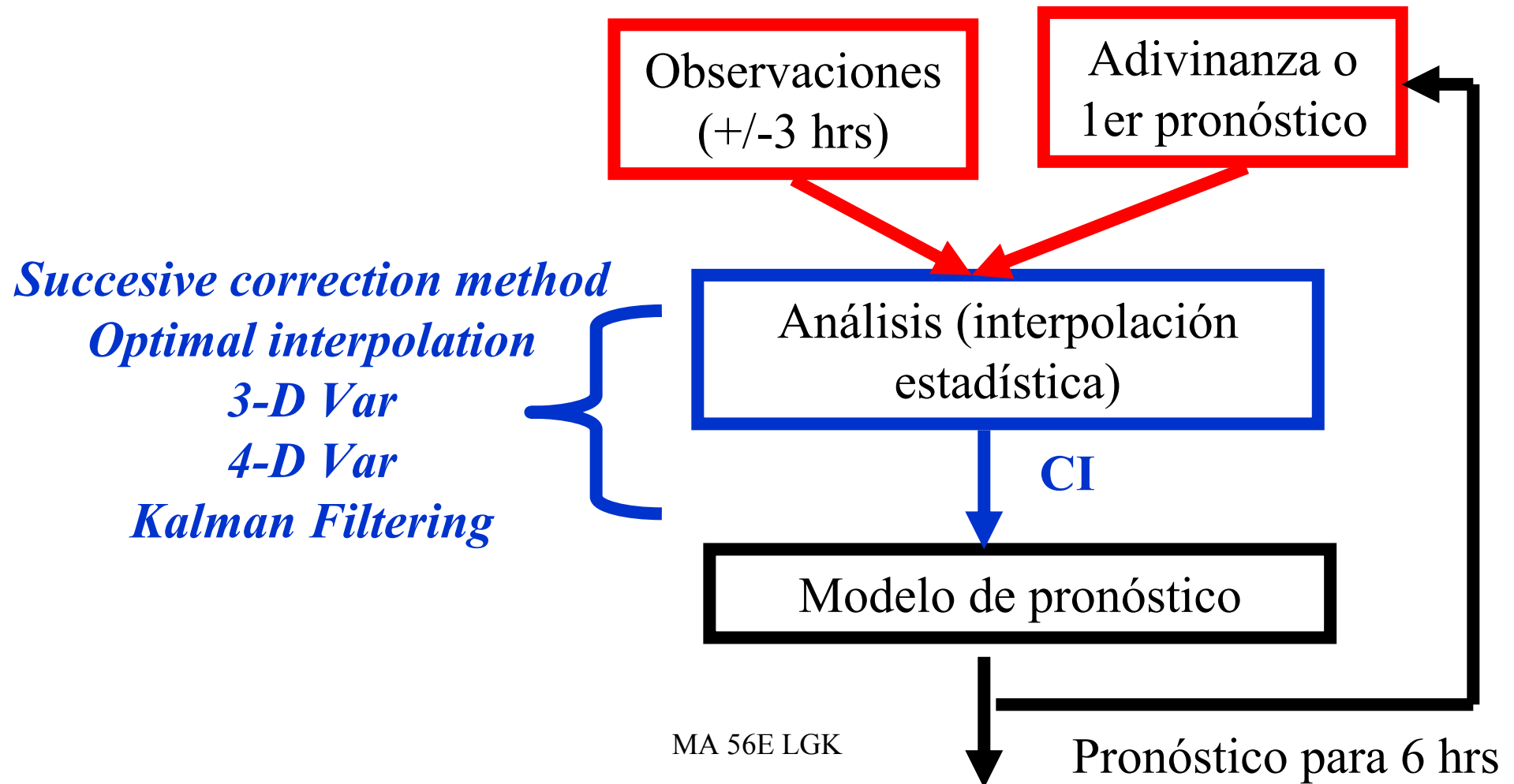
Figure 1.9 (a) Objectively analyzed and (b) subjectively analyzed versions of the 700 mb geopotential field for 25 March 1947. (From Panofsky, *J. Appl. Meteor.* 6: 386, 1949. The American Meteorological Society.)

El primer
problema de
asimilación de
datos: CI
optimizada
(Polinomio de
interpolación de
observaciones)



¿Lloverá mañana?

Predecir el tiempo: un problema de buena estimación de CI



Análisis (interpolación estadística)

Successive correction method; Optimal interpolation; 3-D Var; 4-D Var; Kalman Filtering

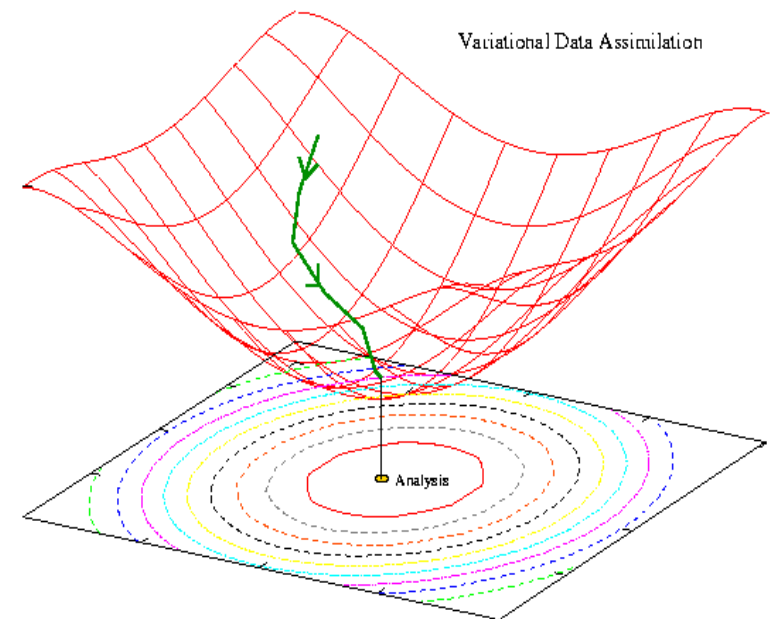
$$x^a = x^b + W[y^{obs} - H(x^b)]$$

$$J = \frac{1}{2} \left\{ [y^{obs} - H(x)]^T R^{-1} [y^{obs} - H(x)] + (x - x^b)^T B^{-1} (x - x^b) \right\}$$

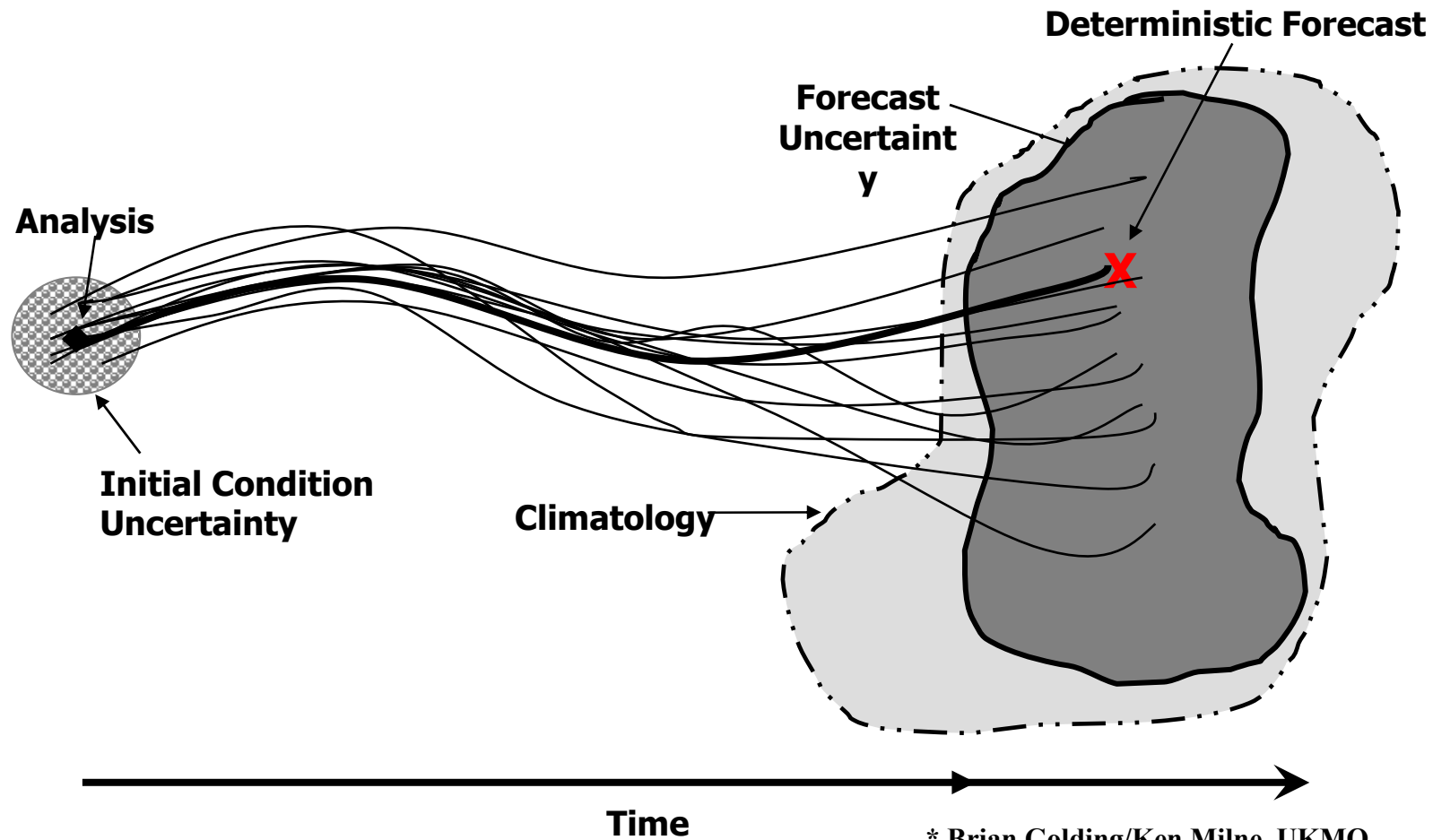
$$W = B H^T (H B H^T + R^{-1})^{-1}$$

Kalnay, 2003

MA 56E LGK



“Ensemble Forecast” (Determinístico----Estocástico)



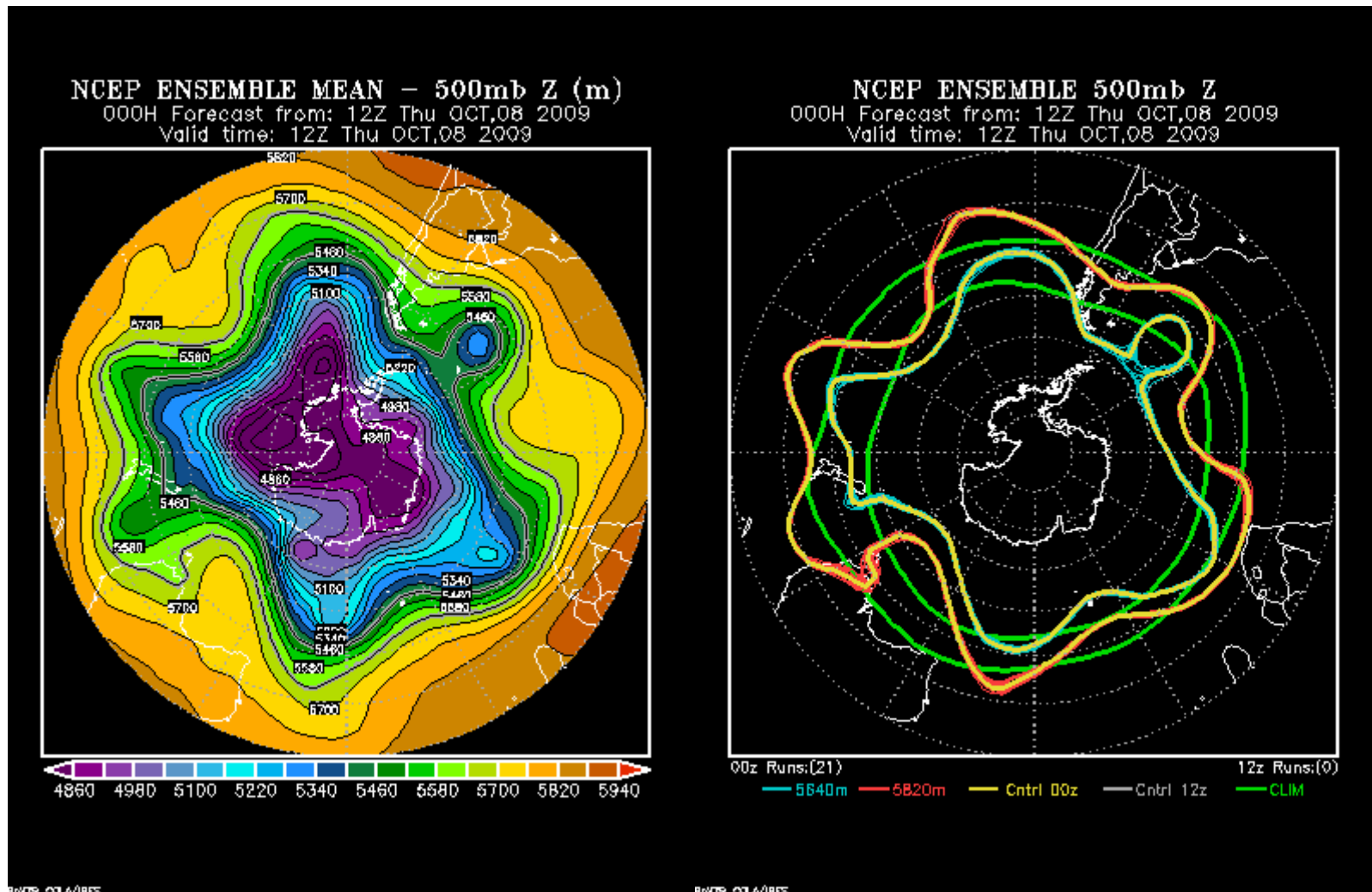
Ej. Ensemble forecast at ECMWF

<http://www.ecmwf.int/research/predictability/>

- Reference run+50 perturbed realizations with perturbed IC
- 51 perturbed IC chosen from singular vector analysis (adjoint model)...the fastest 51 growing errors...
- http://www.ecmwf.int/research/predictability/projects/IC_pert/SV_method/index.html

“Ensemble Forecast”

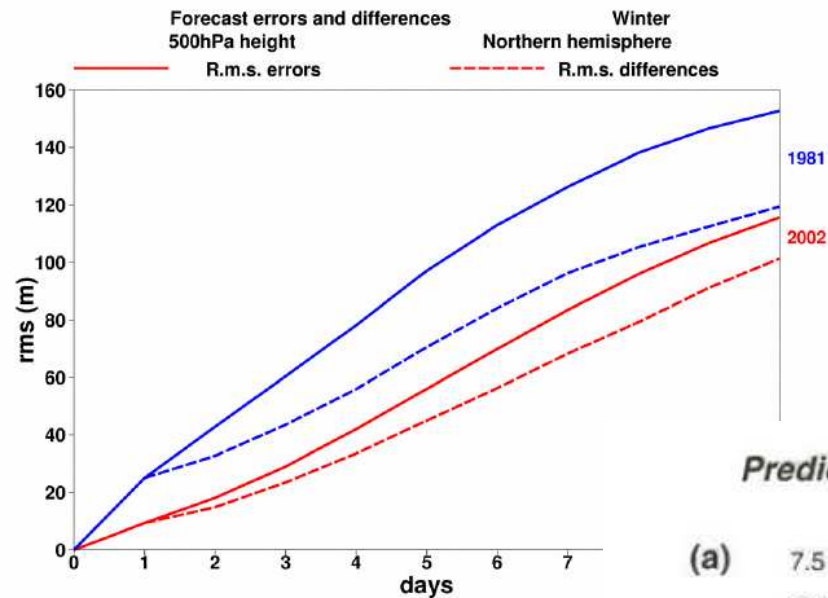
Corriente en chorro 12 Z Oct 8 2009



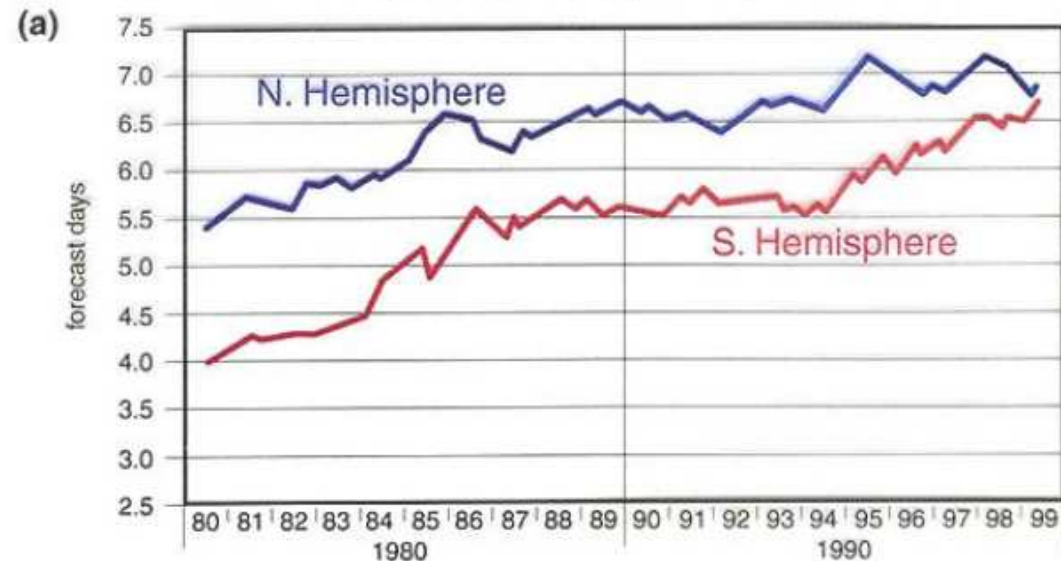
MA 56E LGK

http://www.cdc.noaa.gov/map/images/ens/spag_f000_sh.html

Efectivamente la capacidad de pronóstico ha mejorado



*Predictability in days of the extra-tropical 500 hPa geopotential
(anomaly correlation = 0.6)*



e.g., Bengtsson, 1999

El problema general: Sea un sistema descrito por un modelo M que tiene n ($n \sim 10^6 - 10^8$) variables de entrada y m ($m \sim 10^8 - 10^{10}$) variables de salida.

La j -ésima variable de salida será:

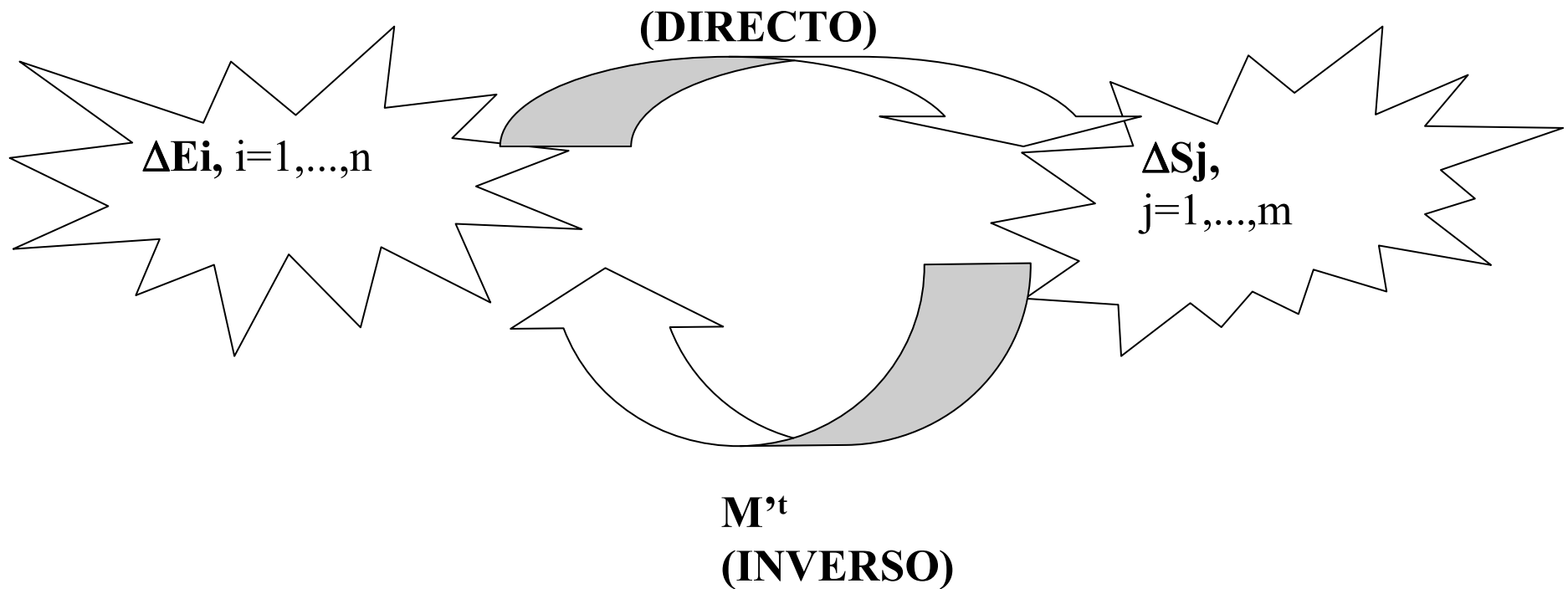
$$S_j = \sum_{i=1}^{i=n} M_{ji} E_i; \quad j = 1, \dots, m; \quad i = 1, \dots, n$$

Y variará cuando cambien las entradas según:

$$dS_j = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\partial S_j}{\partial E_i} dE_i; \quad j = 1, \dots, m$$

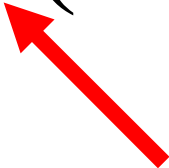
Y para una función arbitraria J de las salidas, por regla de la cadena:

$$\frac{\partial J}{\partial E_i} = \sum_{j=1}^{j=m} \frac{\partial S_j}{\partial E_i} \frac{\partial J}{\partial S_i} = \sum_{i=1}^{j=m} M'_{ij} \frac{\partial J}{\partial S_j}; \quad i = 1, \dots, n$$



Para el caso de funciones y
ecuaciones diferenciales...
RELACIÓN DUAL

$$\langle L(\Delta E), \Delta S \rangle = \langle \Delta E, L^*(\Delta S) \rangle$$



Operador



Operador Adjunto

$\langle, \rangle$: Producto punto generalizado...función de proyección

Para el caso de funciones y
ecuaciones diferenciales...

RELACIÓN DUAL

$$\langle L(\Delta E), \Delta S \rangle = \langle \Delta E, L^*(\Delta S) \rangle$$

Operador

Operador Adjunto

$\langle, \rangle$: Producto punto generalizado...función de proyección

¿Cómo se resuelven los problemas inversos?

Camino 1: Buscar un conjunto óptimo de parámetros de entrada que maximice el acierto del modelo...

La búsqueda se hace por métodos variacionales o secuenciales

Se impone una “**condición de optimalidad**”, es decir, se define un funcional que minimice la distancia entre modelo y observaciones.

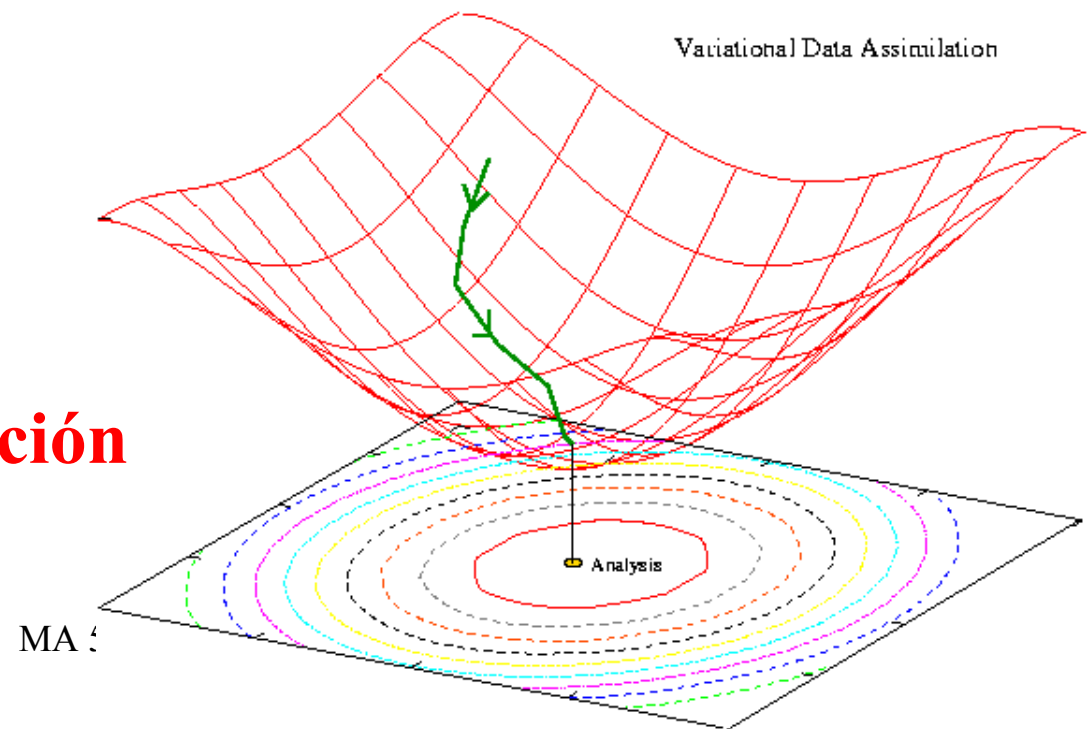
$$J(E_i) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{k=K} \left\| S_k^{\text{mod}}(E_i, i = 1, \dots, n) - S_k^{\text{obs}} \right\|^2$$

Sobre la condición de optimalidad o función de costo

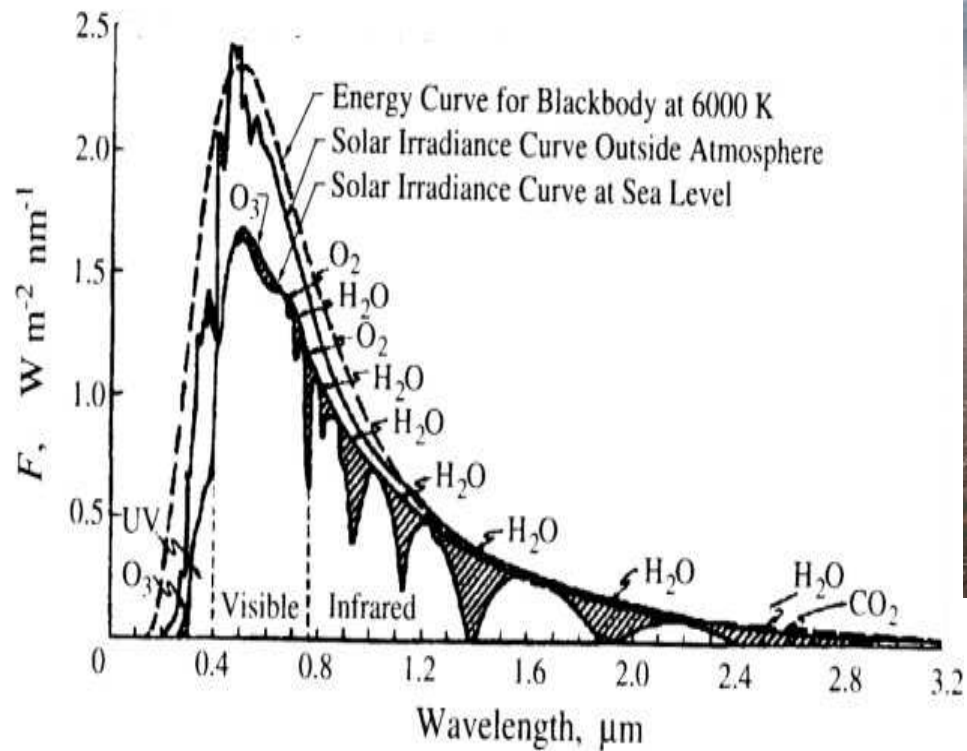
Para que la solución sea única el funcional debe ser convexo, diferenciable y **coercivo**.

$$J(f) = \left\| \vec{\mu}^{\text{mod}}(f) - \vec{\mu}^{\text{obs}} \right\|^2 + \varepsilon \|f\|^2 \quad \text{y} \quad \frac{\partial J}{\partial f} = 0$$

Regularización, penalización



Pero el fluido **NO** es inerte
químicaicamente ni transparente
radiativamente



Conservación de masa para cada traza

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla c - c \nabla \cdot \vec{v} - \nabla \cdot (\langle c' \vec{v}' \rangle) + Q - S$$

Variación por advección
por el flujo promedio

Variación por
flujos turbulentos

Variación por convergencia
o divergencia del aire

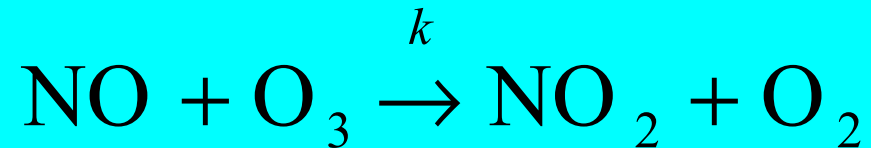
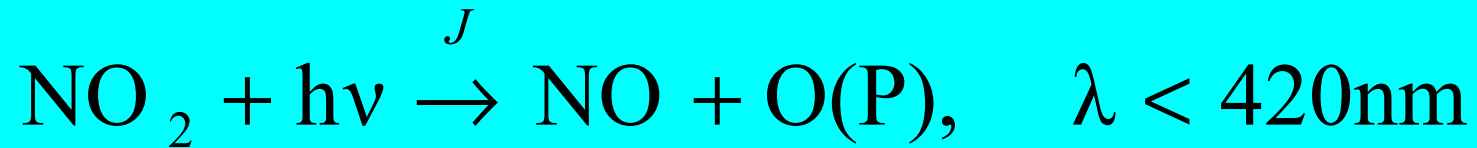
Variación Local
de la concentración

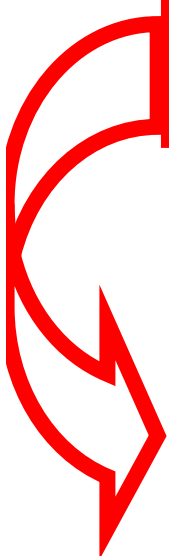
Fuentes y Sumideros

The diagram illustrates the mass conservation equation for a tracer. The equation is: $\frac{\partial c}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla c - c \nabla \cdot \vec{v} - \nabla \cdot (\langle c' \vec{v}' \rangle) + Q - S$. Arrows point from each term to its physical interpretation:

- $\frac{\partial c}{\partial t}$ points to 'Variación Local de la concentración'.
- $-\vec{v} \cdot \nabla c$ points to 'Variación por advección por el flujo promedio'.
- $-c \nabla \cdot \vec{v}$ points to 'Variación por convergencia o divergencia del aire'.
- $-\nabla \cdot (\langle c' \vec{v}' \rangle)$ points to 'Variación por flujos turbulentos'.
- $Q - S$ points to 'Fuentes y Sumideros'.

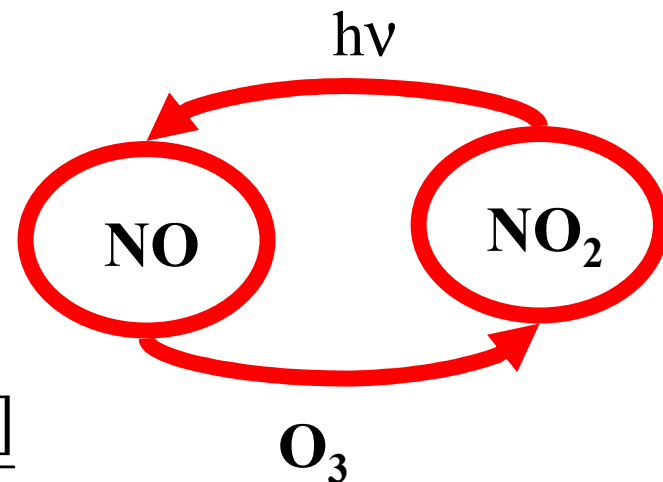
Los “inocentes” Q y S



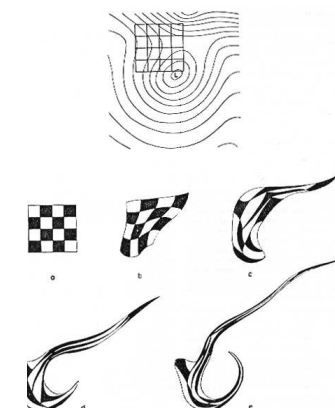
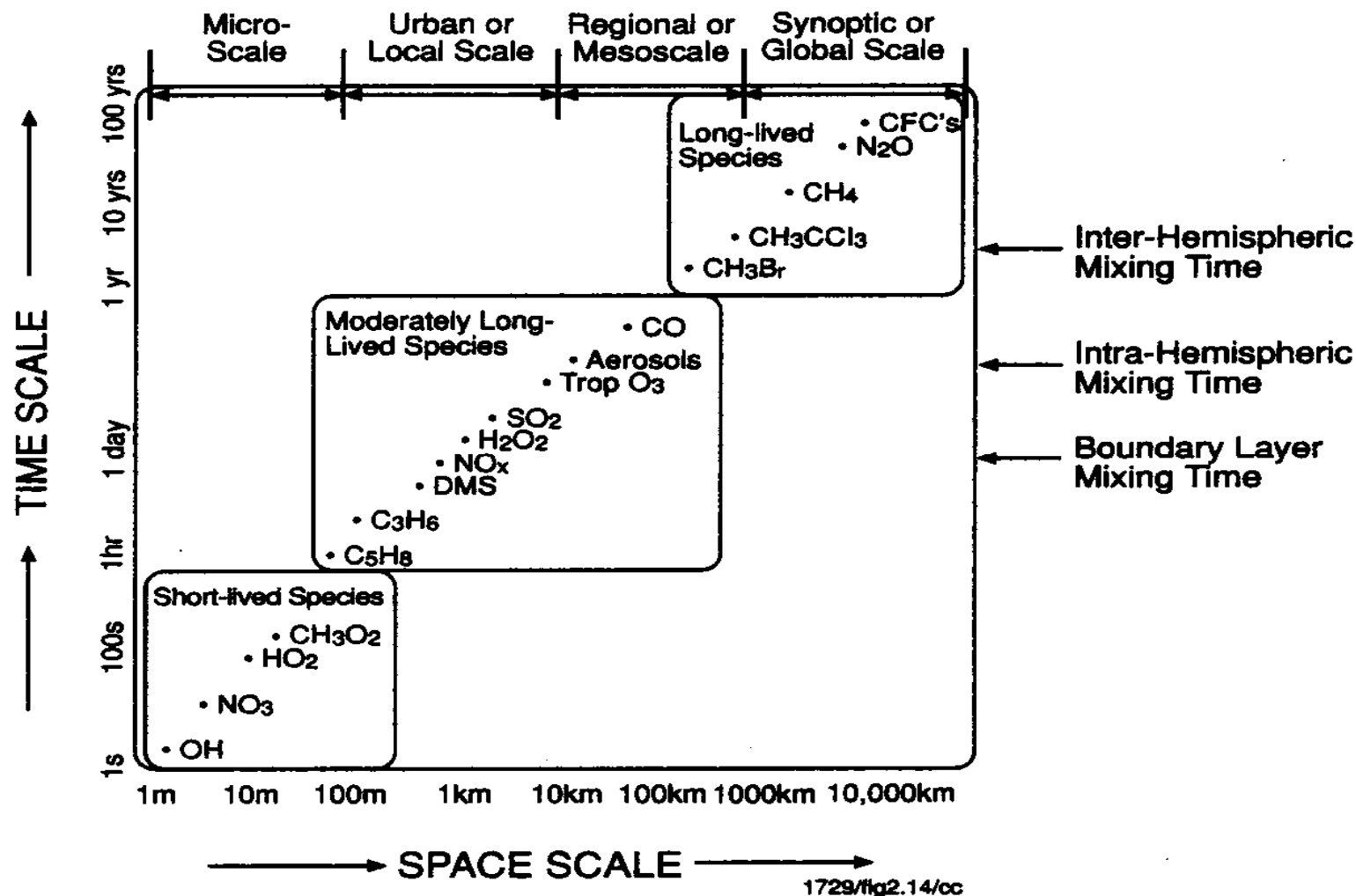

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = J[\text{NO}_2] - k[\text{O}_3]$$

$$\frac{d[\text{NO}_2]}{dt} = k[\text{O}_3] - J[\text{NO}_2]$$

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} + \frac{d[\text{NO}_2]}{dt} \approx 0 \Rightarrow [\text{O}_3] \approx \frac{J[\text{NO}_2]}{k[\text{NO}]}$$

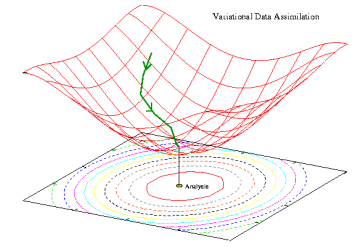


Desde interacciones moleculares hasta sistemas de tiempo de miles de kilómetros...¡todo a la vez!



¿Y por qué ahora en química atmosférica?

- Antes no había muchas observaciones...esa situación está cambiando aceleradamente (redes in situ, percepción remota, etc..)
- La complejidad de los modelos (y los problemas) requiere que estimemos errores y sensibilidades de modo sistemático
- Es útil para diseñar redes de monitoreo y mejor entender los procesos.



Determinación de fuentes

Directo

$$L\mu = \frac{\partial \mu}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \mu - \nabla \cdot (\vec{K} \cdot \nabla \mu) + \lambda \mu = \frac{d\mu}{dt} - \nabla \cdot (\vec{K} \cdot \nabla \mu) + \lambda \mu = f; \quad + \text{CB}; \text{CI}$$

Inverso/Adjunto

$$L^* \mu^* = -\frac{\partial \mu}{\partial t} - \vec{v} \cdot \nabla \mu - \nabla \cdot (\vec{K}^T \cdot \nabla \mu) + \lambda \mu = -\frac{d\mu}{dt} - \nabla \cdot (\vec{K}^T \cdot \nabla \mu) + \lambda \mu = g; \quad + \text{CB}^*; \text{CI}^*$$

Optimalidad

$$J(f) = \left\| \vec{\mu}^{\text{mod}}(f) - \vec{\mu}^{\text{obs}} \right\|^2 + \varepsilon \|f\|^2 \quad y \quad \frac{\partial J}{\partial f} = 0$$



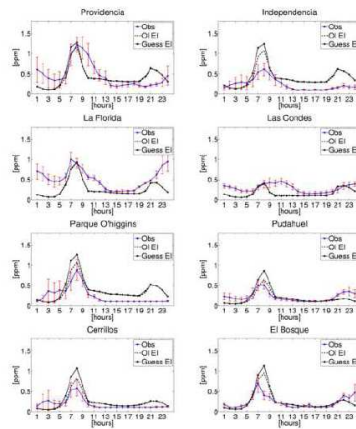
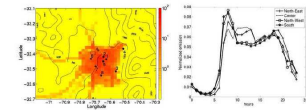
MA 56E LGK

Regularización, penalización

Modelación **directa** e inversa de CO

Inventario de Emisiones

Campos de viento, temperatura, etc.



Modelo de dispersión

Datos de entrada → modelo → salida → evaluación de salidas
(comparación con observaciones)

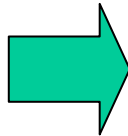
A 56E LGK

Modelación directa e **inversa** de CO

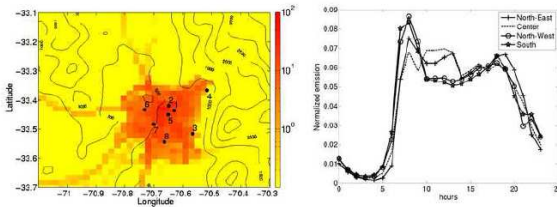
Campos de viento, temperatura, etc.



Inventario de Emisiones



Modelo de dispersión



Observaciones → modelo → Selección de parámetros de entrada que optimizan el modelo (evaluación del modelo)

Determinación de “parámetros”
e.g., radical hidroxilo (OH) determinado a
través de MCF, ^{14}CO

$$\frac{\delta MCF}{\delta t} = E_{MCF} - k.OH.MCF$$

$$k.OH = (E_{MCF} - \frac{\delta MCF}{\delta t}) / MCF$$



<http://www.atmosphere.mpg.de/enid/24y.html>

MA 56E LGK

<http://www.phys.uu.nl/~krol/>

Diseño óptimo de redes

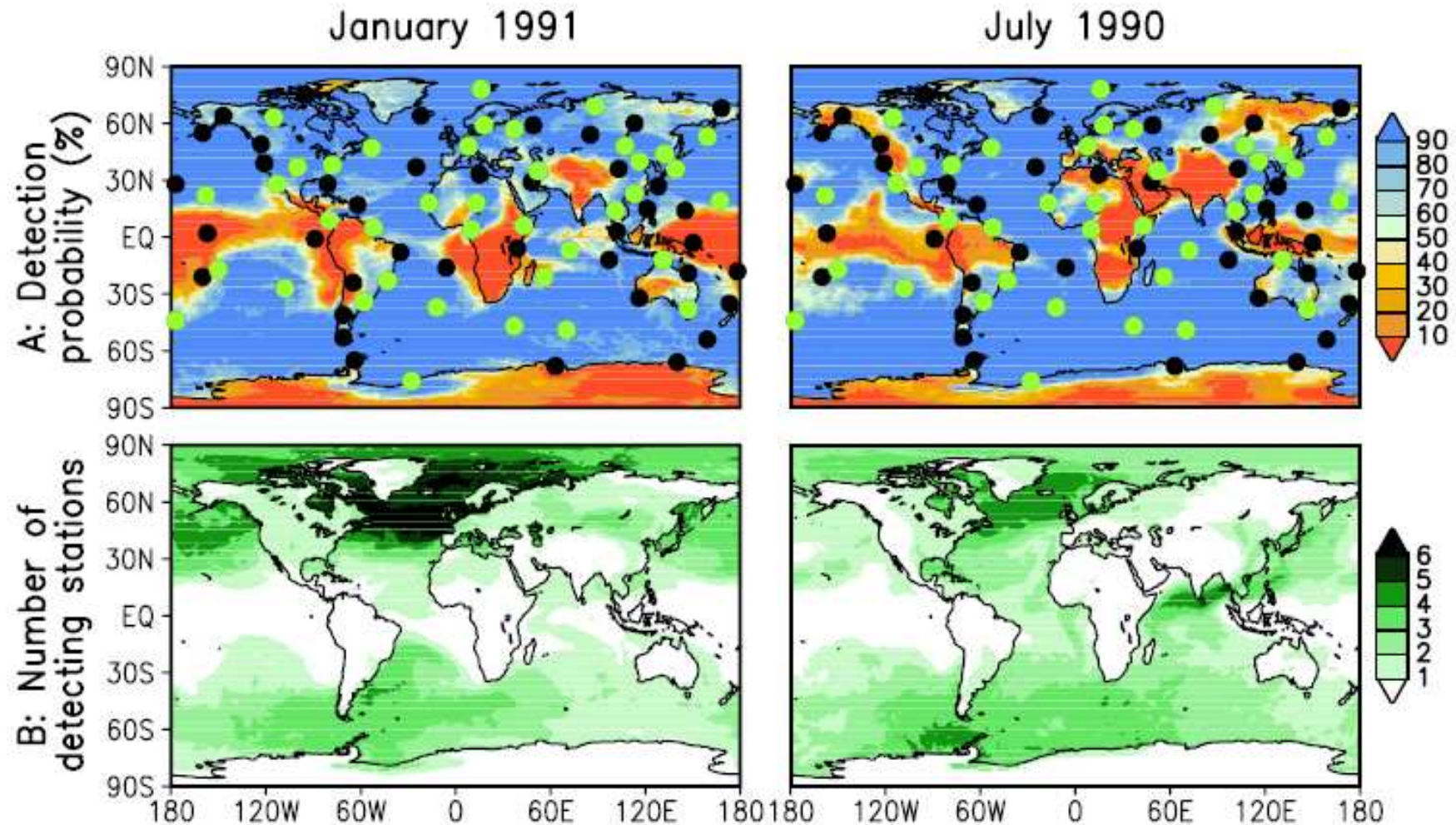
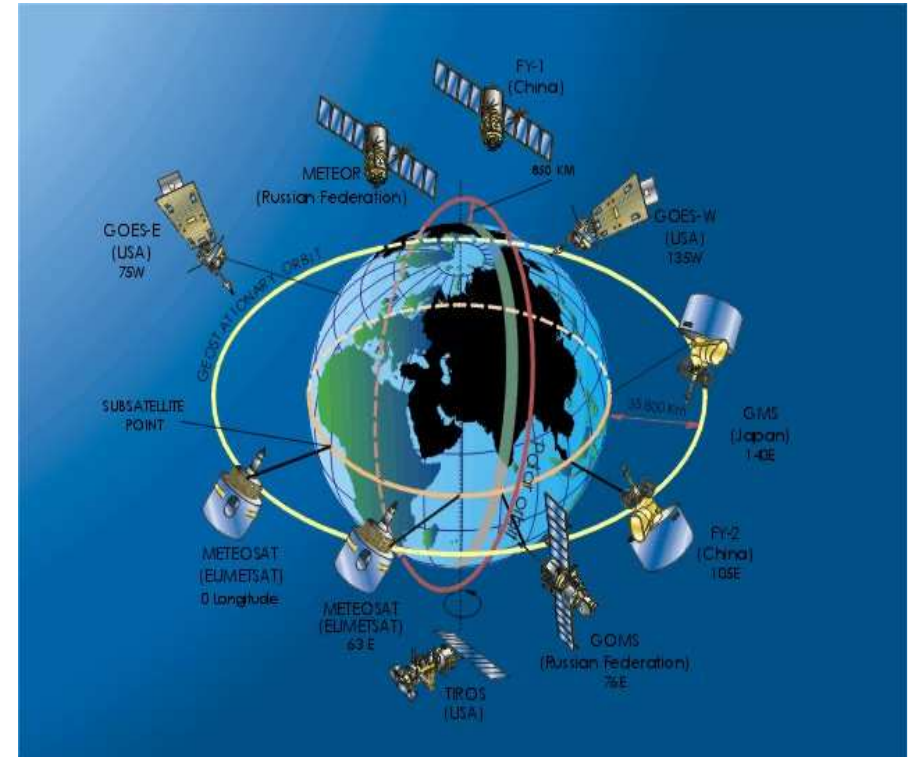


Figure 4. Efficiency of the xenon sub-network for 1 kt sub-surface tests. (A) : detection probability (%). (B) : average number of independent stations detecting a test.

Hourdin & Issartel, 2000

Observaciones adaptativas

- Elegir el lugar y tipo de observaciones de acuerdo a la sensibilidad del modelo (adjunto, Jacobiano)



http://www.ecmwf.int/research/predictability/adaptive_obs/

http://orca.rsmas.miami.edu/~majumdar/adaptive_obs/index2.html

<http://map.nasa.gov/abstracts/daescu.html>

Conclusiones y perspectivas

- El pronóstico del tiempo ha mejorado sustantivamente gracias a la **asimilación de datos**
- Más y mejores redes de observación química (**satélites**) hacen posible ahora el pronóstico operacional del **tiempo químico**
- El diseño de redes deberá optimizarse
- **Se requerirá de más y mejores técnicas de asimilación (matemática/os)**

