

Charla 12: Modelos Numéricos para el Pronostico Meteorológico

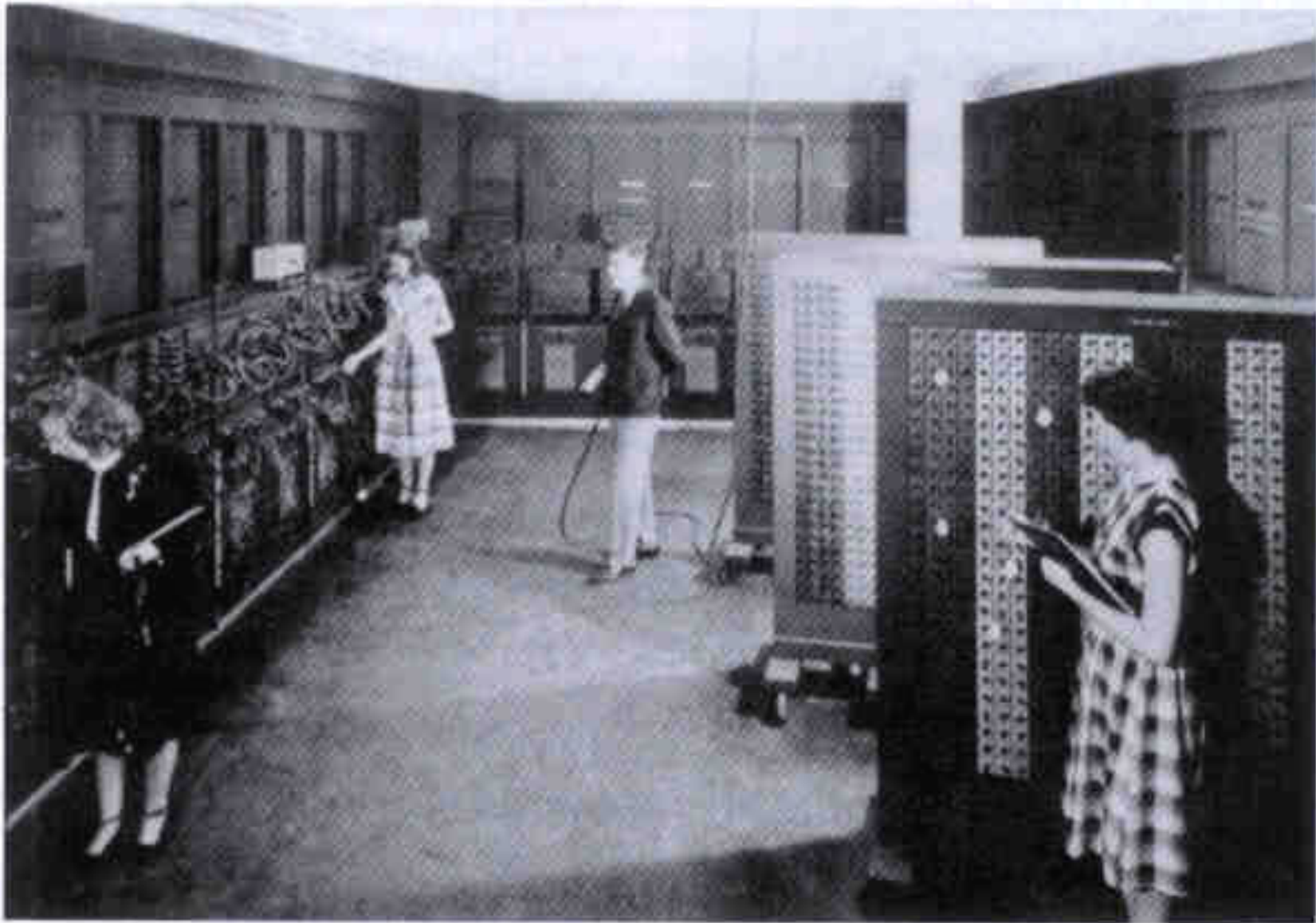
**Taller Centroamericano de
Pronosticado de la Calidad del Aire**
San José, Costa Rica
17-21 de Octubre del 2011

Láminas modificadas de: Tom Warner, ECMWF, Tutorial WRF, Mark S. Antolik



Un Poco de Historia

- El pronóstico meteorológico numérico (*numerical weather predicting – NWP*) nació en los años cuarenta en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Fue para eso que se creó la primera computadora electrónica.
- Desde entonces, el pronóstico meteorológico numérico ha sido una de las actividades más intensivas a que han sido dedicadas las supercomputadoras.



Integradora Numérica y Computadora Electrónica

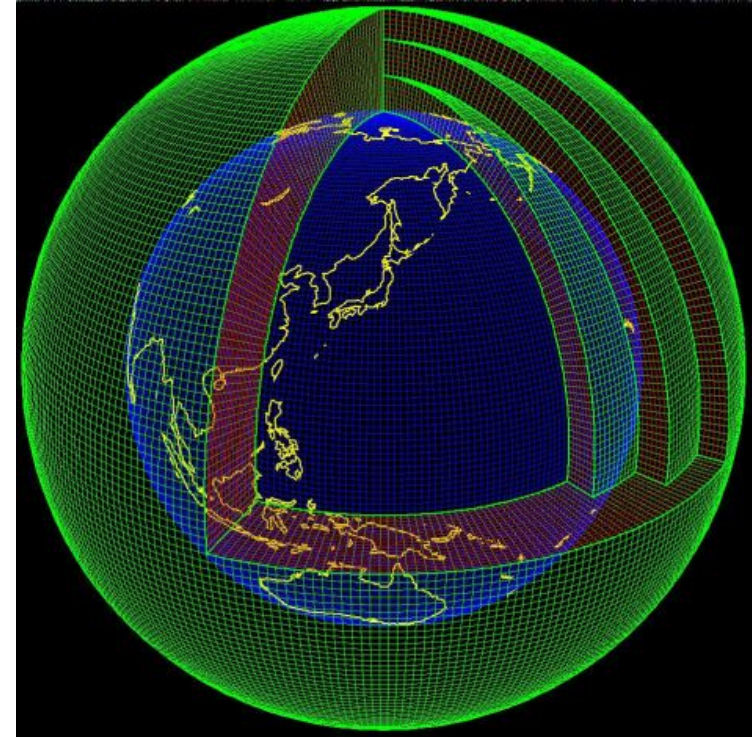
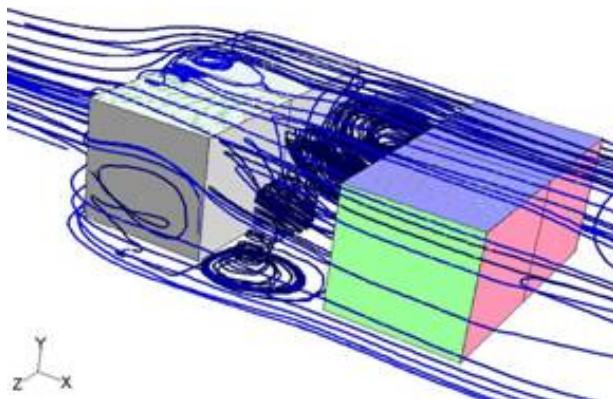
Figure 3: The ENIAC computer in 1948. The operators are changing the plug-in wiring. (PLATZMAN, 1979).

¿Qué Es un Modelo?

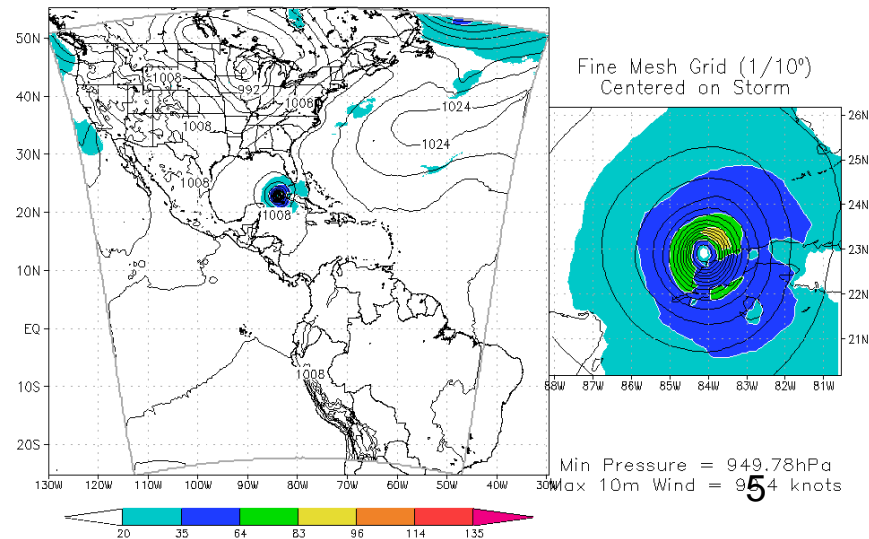
- **Se empieza con las ecuaciones de mecánica de fluidos y termodinámica que describen los procesos atmosféricos.**
- **Se adaptan esas ecuaciones a un formato que permite su programación en una supercomputadora.**
- **Se resuelven las ecuaciones de manera que esta representación virtual de la atmósfera se evoluciona dentro de la computadora.**
- **Así se obtiene un ‘modelo’ de la atmósfera.**

Escalas de los Modelos

- Modelos globales
- Modelos de escala sinóptica y meso-escala: abarcan todo un continente, un estado o un área metropolitana.
- Modelos CFD (dinámica de fluidos computacional): resuelven el flujo alrededor de edificios, cañones viales, aeronaves, etc.



12Z21OCT2010-richard19I HWRf (1/4°)
Wind at 10m (knots) & MSLP (mb)
F=120 h Valid 12Z26OCT2010



The winds shown here are guidance, and NOT official NHC forecasts.

Escalas de los Procesos y Modelos

Global

- Onda larga
- El Niño

Sinóptica

- Corrientes en chorro (*jet streams*)
- Centros de presión alta y baja
- Vaguadas y líneas
- Frentes

Meso-Escala

- Tormentas eléctricas
- Complejos advectivos
- Tormentas tropicales
- Brisas terrestres/marinas
- Brisas de montaña y de valle
- Tormentas de viento descendentes
- Flujos de brecha
- Retención de aire frío
- Chorros nocturnos de altura baja
- Bandas de nieve de efecto laguna

Urbana

- Flujos por cañones viales
- Canalización alrededor de edificios; estelas
- Transporte vertical por las fachadas calientes o viento arriba de los edificios
- Flujo en túneles de los trenes subterráneos

Ecuaciones Básicas

- Se aplican a muchos tipos diferentes de modelos atmosféricos:
 - Modelos operacionales de pronóstico meteorológico
 - Modelos climáticos globales
 - Modelos CFD urbanos a escala de edificio
 - Modelos atmosféricos para la investigación
 - Modelos de flujo sobre perfiles
- Todas son ecuaciones para la dinámica de fluidos aplicadas a la atmósfera.

Ecuaciones Rectoras

- Conservación del impulso (Segunda Ley de Newton)
 - Tres ecuaciones para la aceleración de vientos en 3D ($F = Ma$)
- Conservación de masas
 - Una ecuación para la conservación del aire (continuidad de masa)
 - Una ecuación para la conservación del agua
- Conservación de la energía
 - Una ecuación para la Primera Ley de la Termodinámica
- Relación entre p , V y T
 - Una ecuación de estado (ley de gases ideales)

Ecuaciones (cont.)

- Casi todos los modelos emplean un conjunto de ecuaciones ligeramente diferente.
- ¿Por qué?
 - Aplicación a diferentes regiones del mundo.
 - Enfoque en procesos atmosféricos distintos.
 - Aplicación a escalas temporales y espaciales distintas.
 - Ambigüedad e incertidumbre en las formulaciones.
 - Adaptación a usos específicos.

¿Qué queremos decir con 'resolver las ecuaciones'? Una Metodología Conceptual

- **Las ecuaciones describen cómo la atmósfera cambia con el transcurso del tiempo.**
- **Por ejemplo, una ecuación sería:**

Para un punto único en la atmósfera:

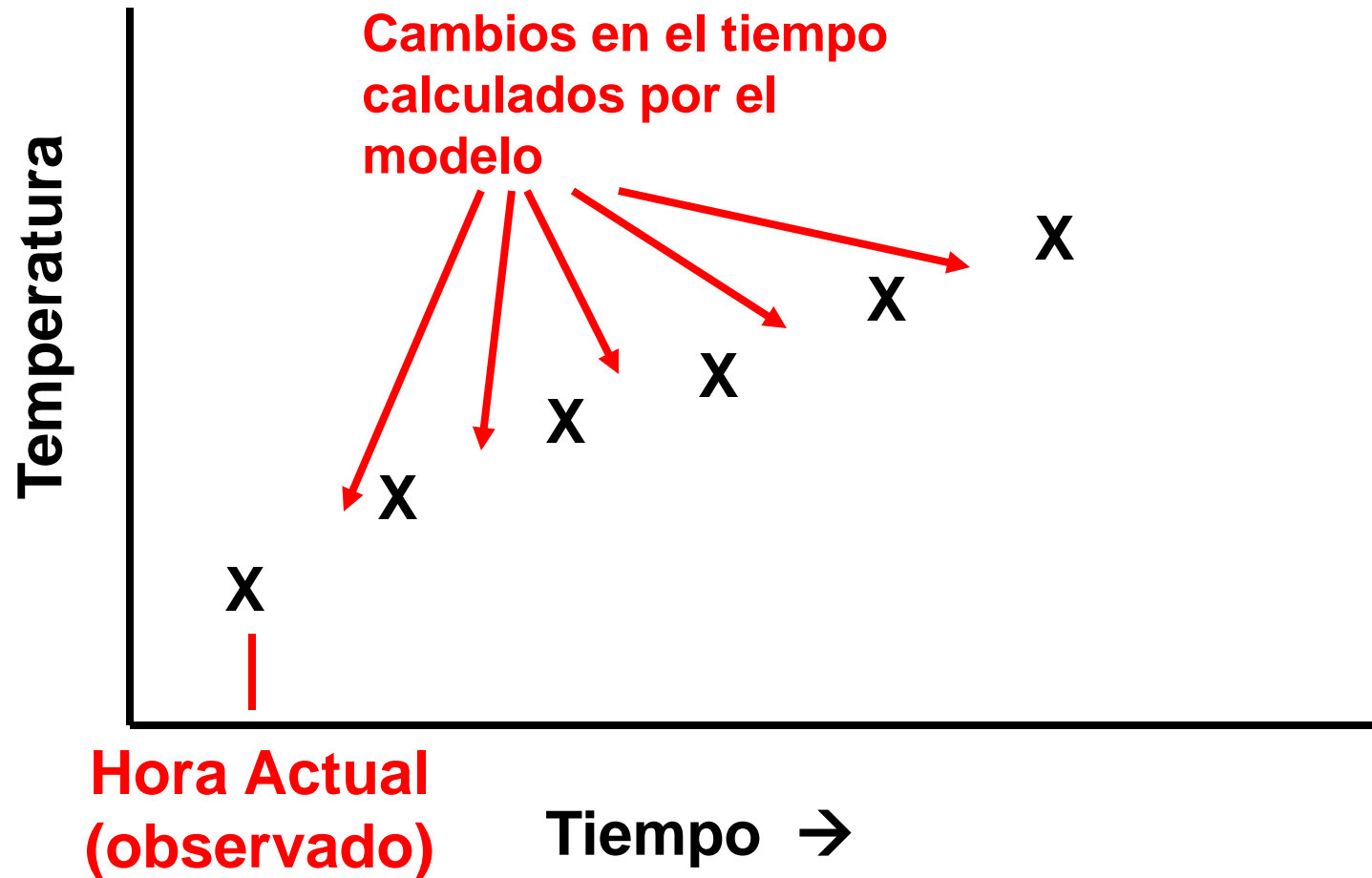
$$\frac{\text{cambio en } T}{\text{tiempo}} = \text{solar} + \text{IR(aumento)} + \text{IR(pérdida)}$$

+ conducción + convección

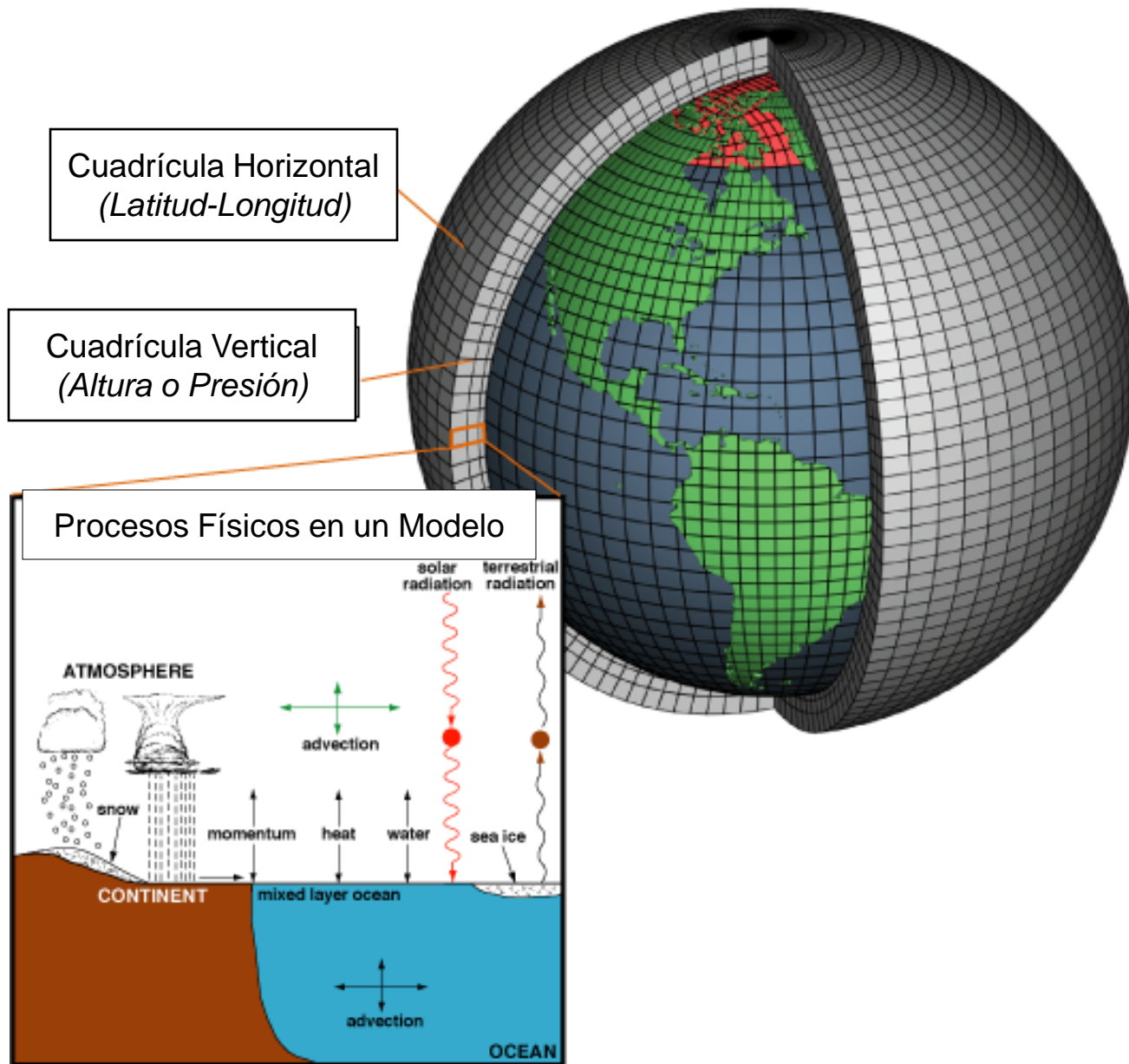
+ evaporación + condensación

+ advección

Cómo Pronostica el Modelo



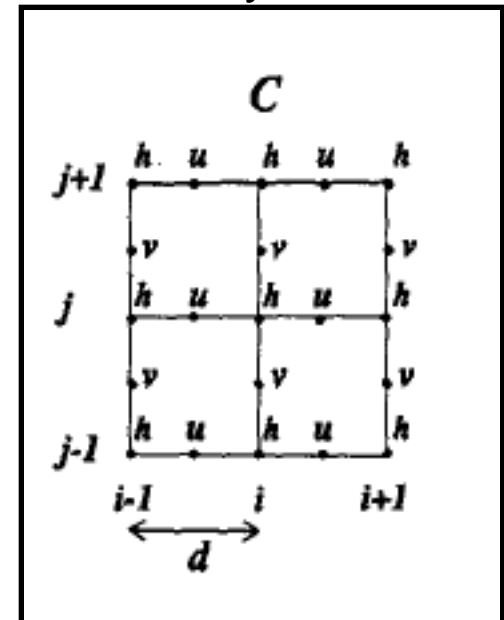
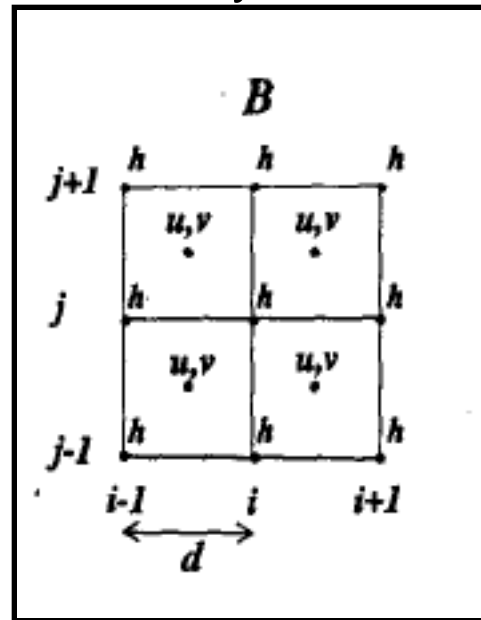
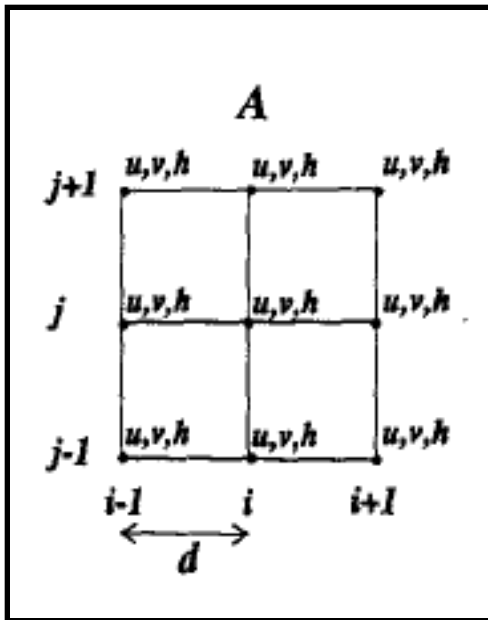
- **Esta ecuación se resuelve para una ‘matriz’ de puntos tridimensional (o bien una cuadrícula) que cubre la atmósfera desde la superficie hasta cierto nivel cerca del límite superior.**



Estructuras Cuadrículaes Horizontales

MM5 y Otros

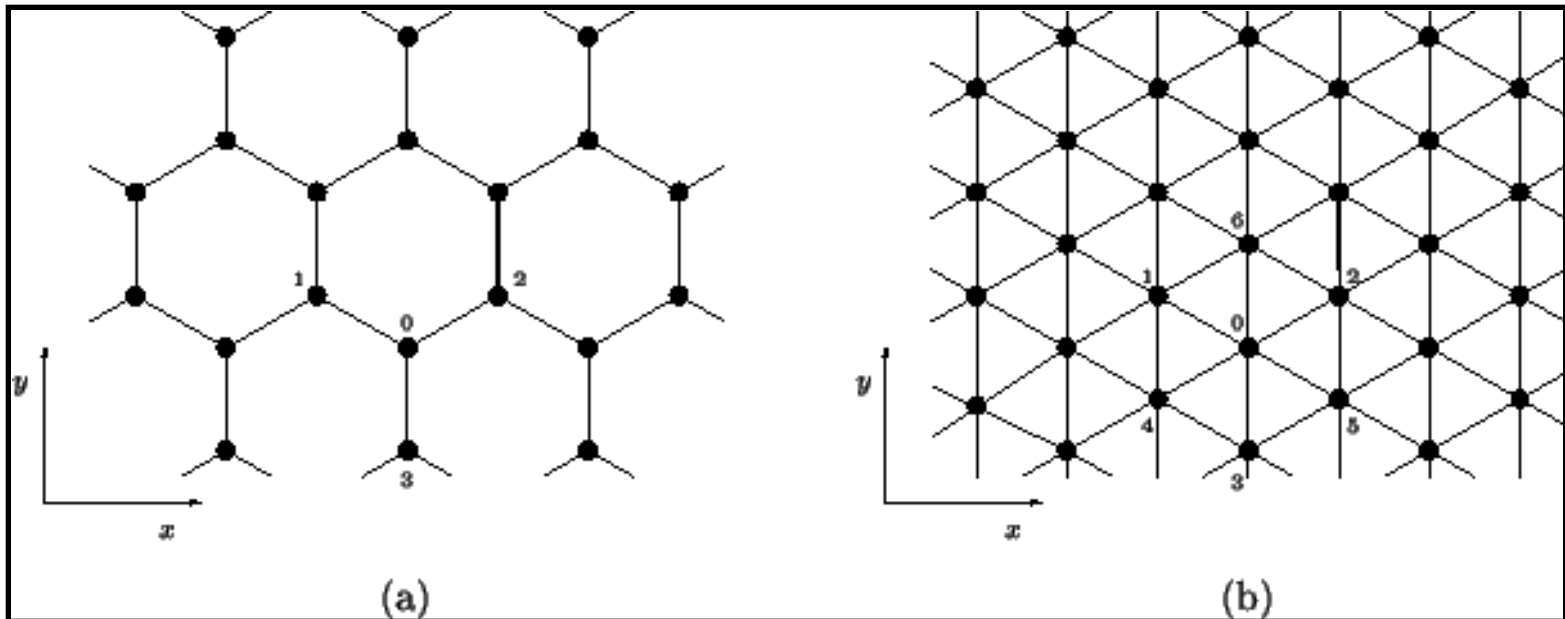
WRF y Otros



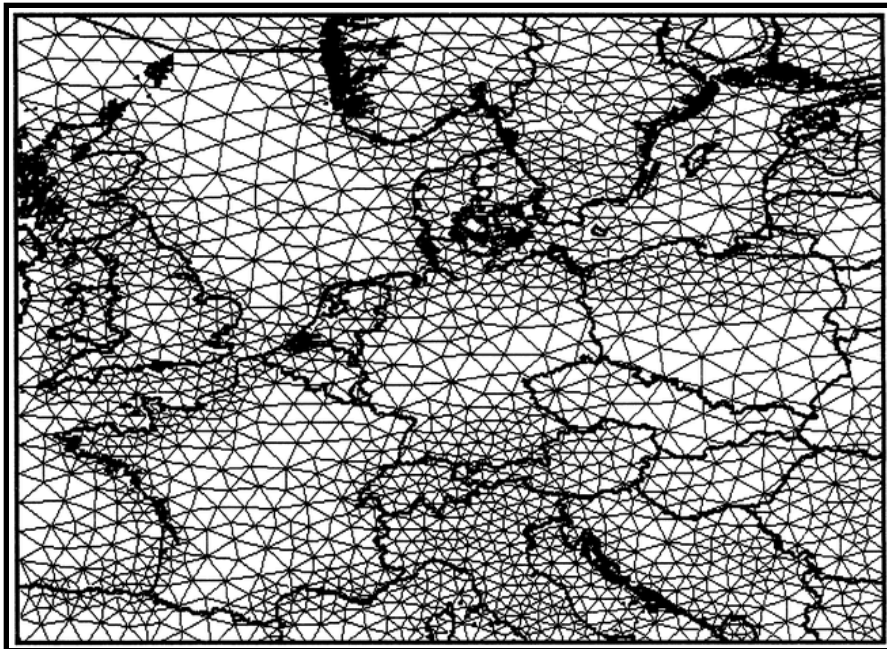
Fuente: Randall (1994)

Hexagonal

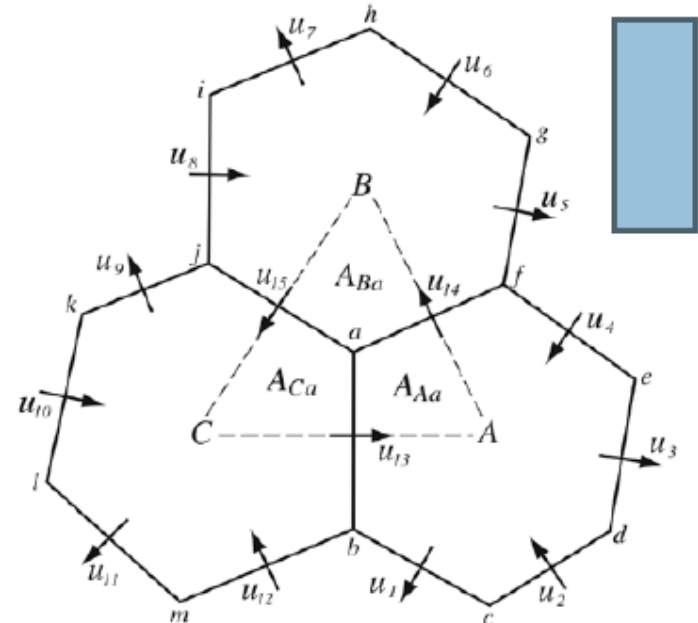
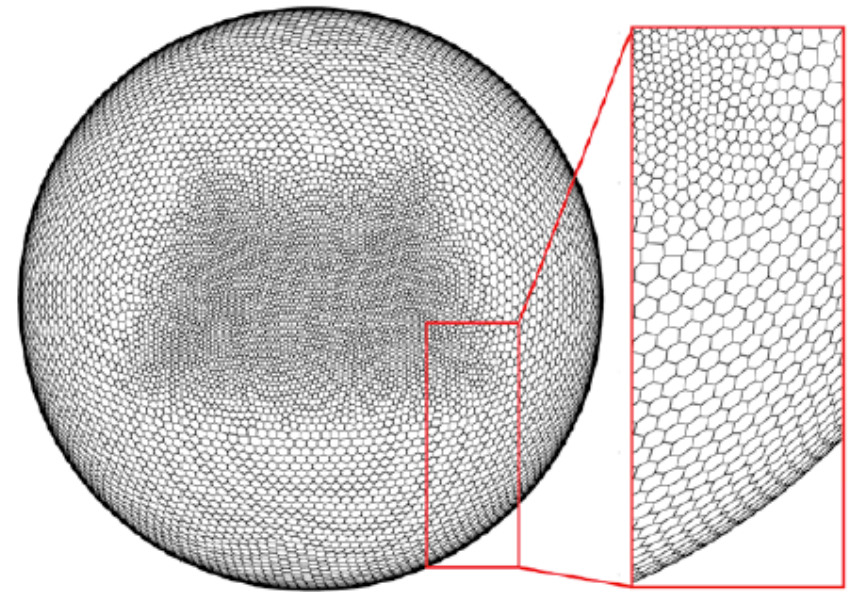
Triangular



No Estructurado: Modelo Omega



Fuente: Boybeyi, et al. (2001)

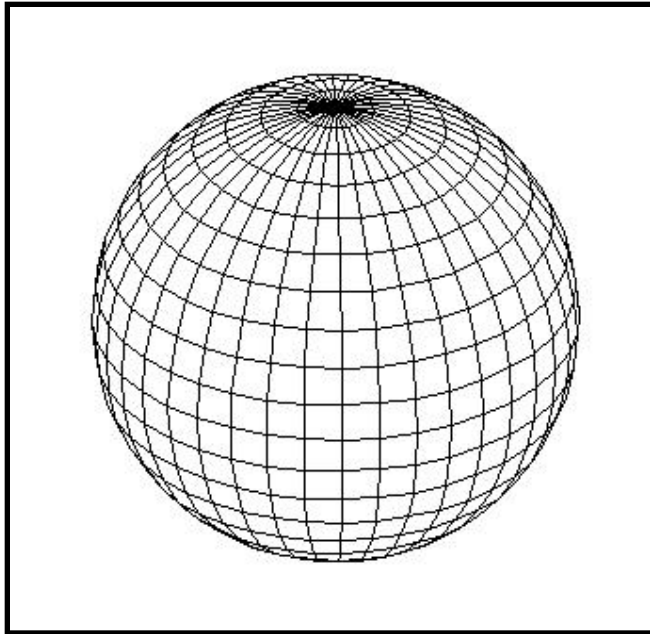


MPAS C-grid. Skamarock, et al., 2011

Dominios

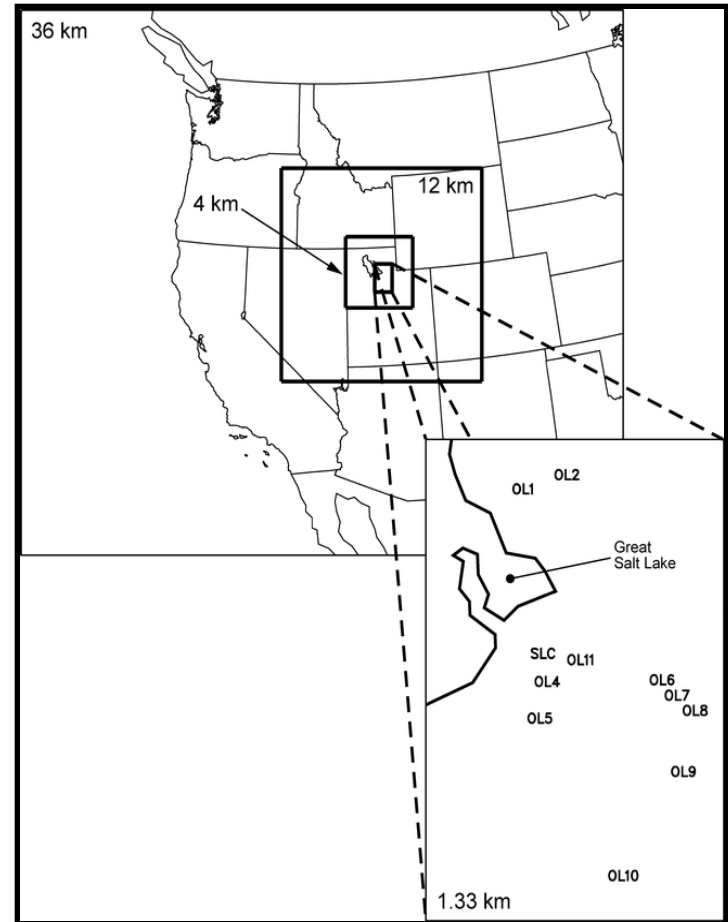
- Forma

Esférica



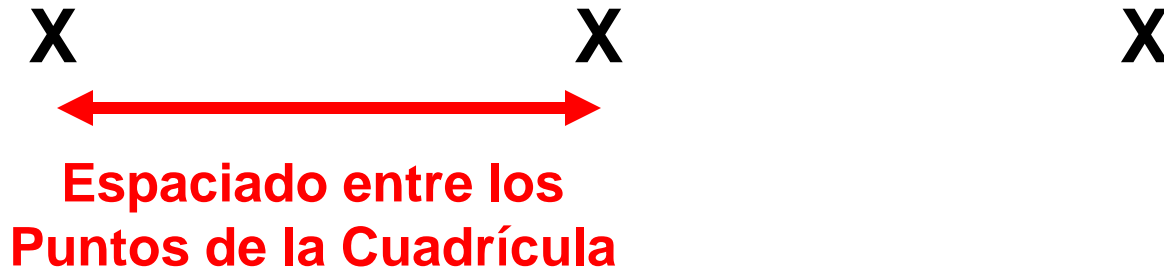
Fuente: mitgcm.org (2006)

Cuadrículas Anidadas



Fuente: Rife, et al. (2004)

Un Concepto Importante



- La resolución se define por la distancia entre los puntos de la cuadrícula (resolución cuadrícula) o por la cantidad máxima de ondas (resolución espectral) que se puede representar en un dominio.
- Los elementos más pequeños que se pueden representar claramente en un modelo son varias veces más grandes que el espaciado de la resolución cuadrícula.
- Los procesos de escala menor requieren una resolución cuadrícula de 5-10 puntos por longitud de onda.

Ejemplo de una Ecuación Diferencial

Tasa de Cambio del Componente Este-Oeste del Viento

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + Fr_x$$

u = componente este-oeste (positivo hacia el este)

v = componente norte-sur (positivo hacia el norte)

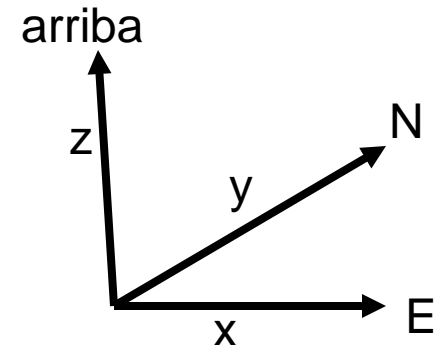
w = componente vertical del viento (positivo hacia arriba)

P = presión

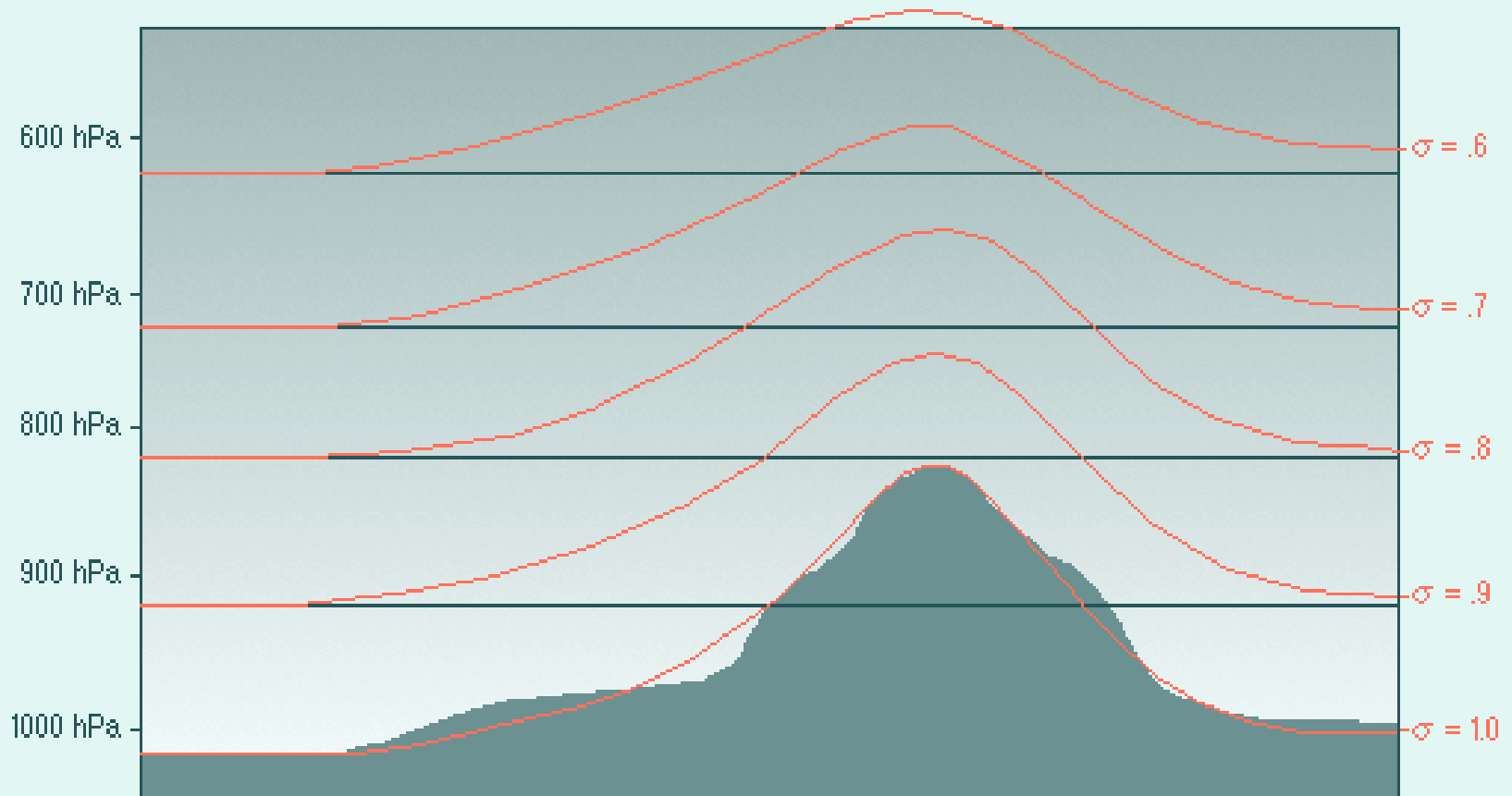
ρ = densidad

f = parámetro de Coriolis (2 x frecuencia rotacional de la Tierra x seno de latitud)

F = fuerza friccional en x dirección



Ejemplo – Coordenada Vertical



Solución Numérica de las Ecuaciones

Ecuaciones Rectoras

Ejemplo de una ecuación de impulso:
Viento 1-d acelerado sólo por la fuerza
de gradiente de presión

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

¡Las computadoras no pueden resolver
analíticamente ni esta sencillísima ecuación!

- El problema: Las computadoras pueden hacer operaciones aritméticas pero no de cálculo.

✓ + − × ÷

✗ $\frac{d(f)}{dx}$ $\int (f)dx$

- La solución: Métodos numéricos.

Integración de las Ecuaciones

Advección No Lineal

$$\frac{\partial U}{\partial t} = U \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)$$

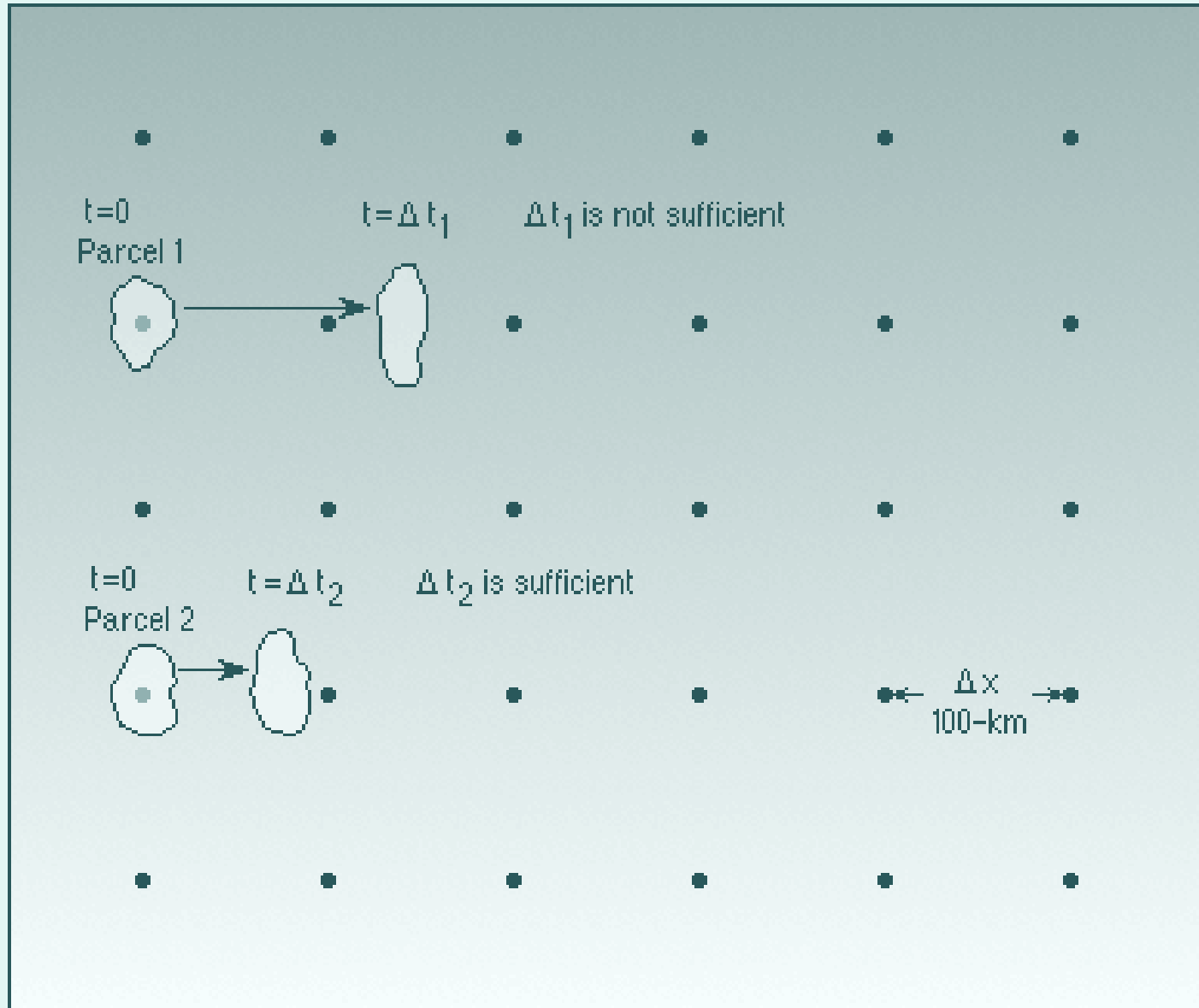
$$\frac{U_i^{k+1} - U_i^k}{\Delta t} = U_i^k \left(\frac{U_{i+1}^k - U_{i-1}^k}{2\Delta x} \right)$$

Período Temporal

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{U_i^k}$$

El período temporal se elige con base en las velocidades del viento esperadas y la resolución cuadrangular (criterios CFL).

$$\text{Time Step Criterion } \Delta t < \frac{\Delta x}{c}$$



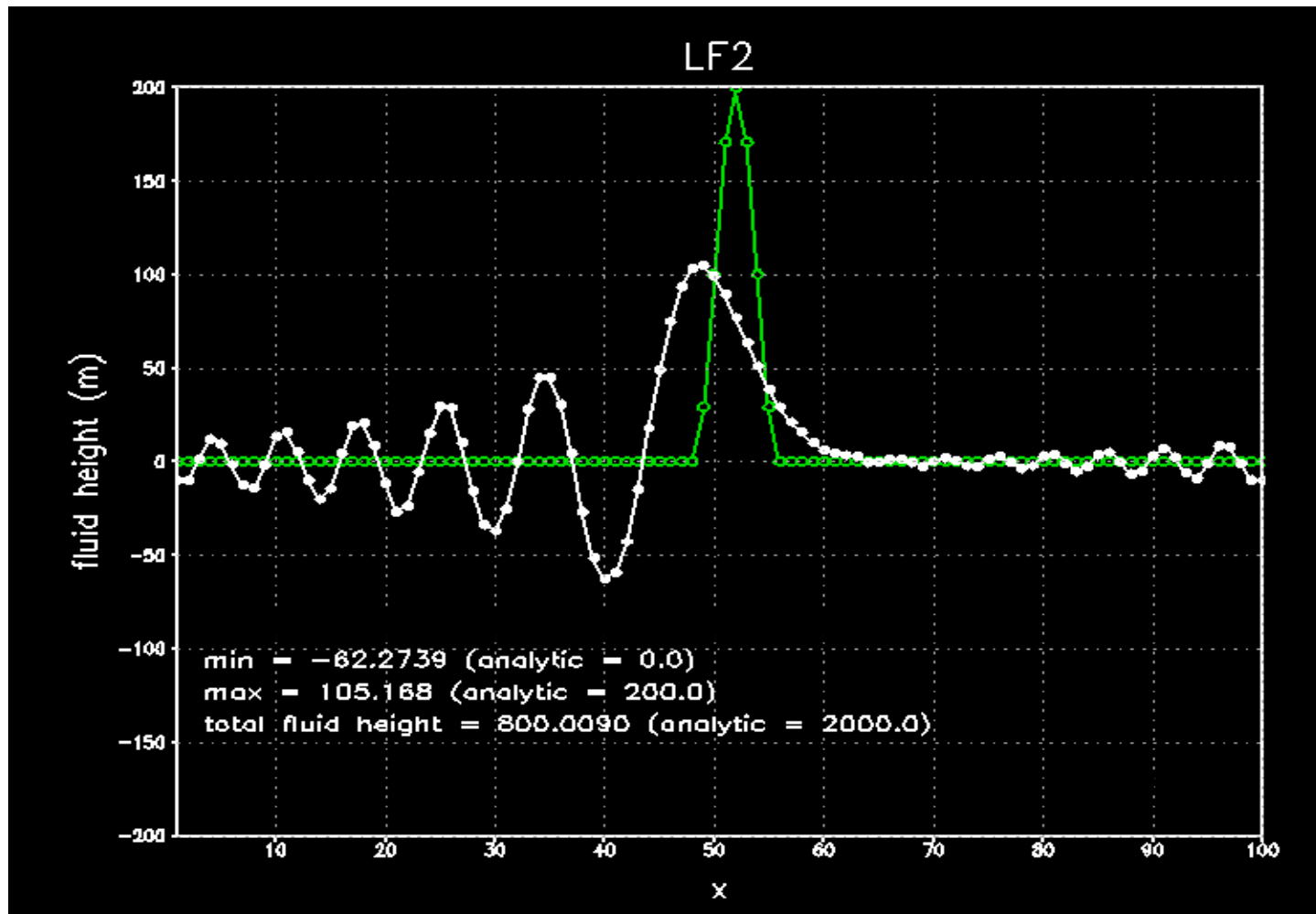
100-km Model Grid

Fuentes de Error en los Modelos

- La numérica.
- La física (radiación, turbulencia, procesos húmedos).
- Condiciones iniciales: Definir el estado actual de la atmósfera (el punto de partida).
- Condiciones de frontera laterales: Definir el estado de la atmósfera en las fronteras del dominio.
- Condiciones del límite inferior: Las condiciones en la superficie terrestre.

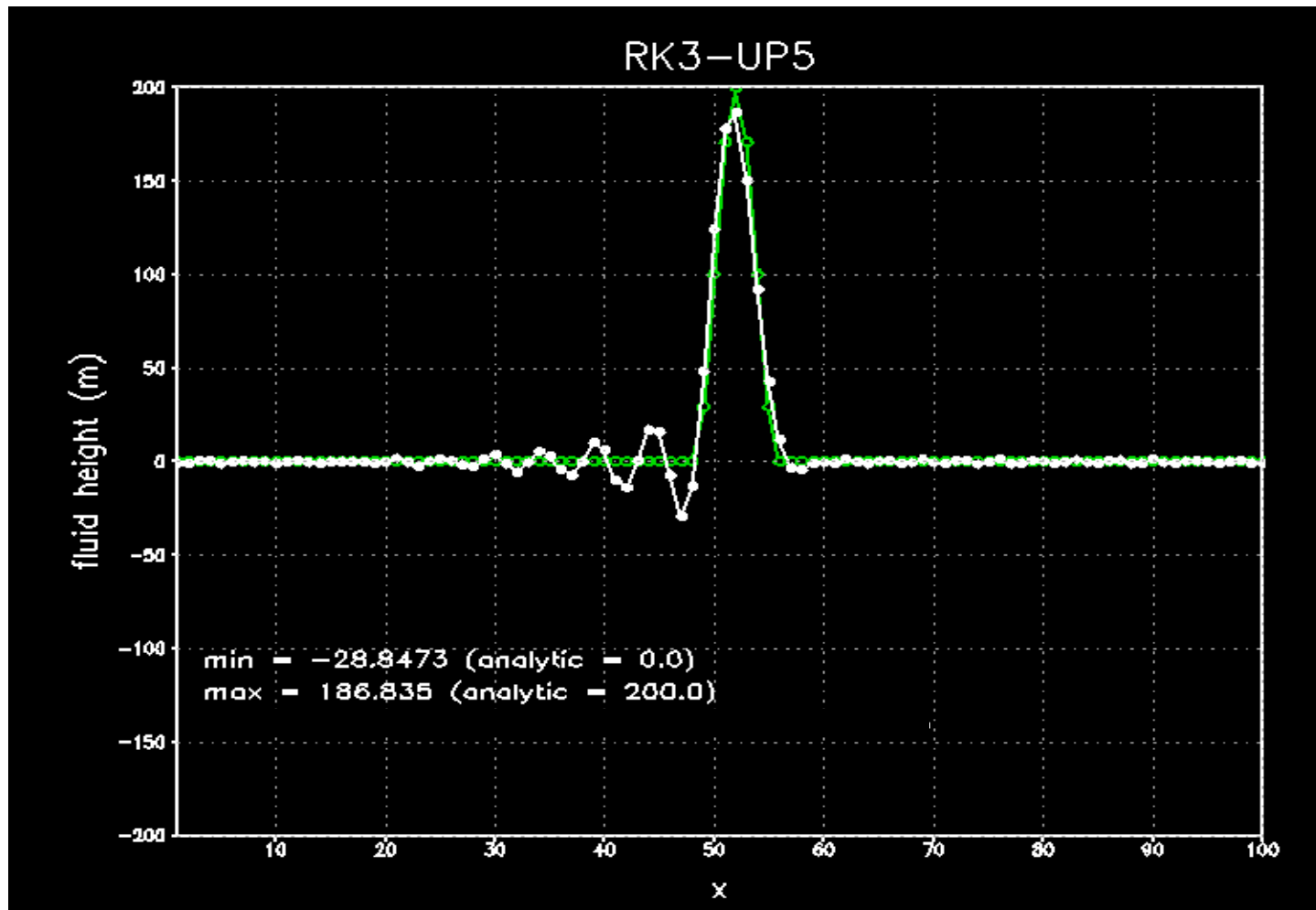
Errores en los Métodos Numéricos

MM5: salto (t) y centrado en el segundo orden (x)



Métodos Numéricos

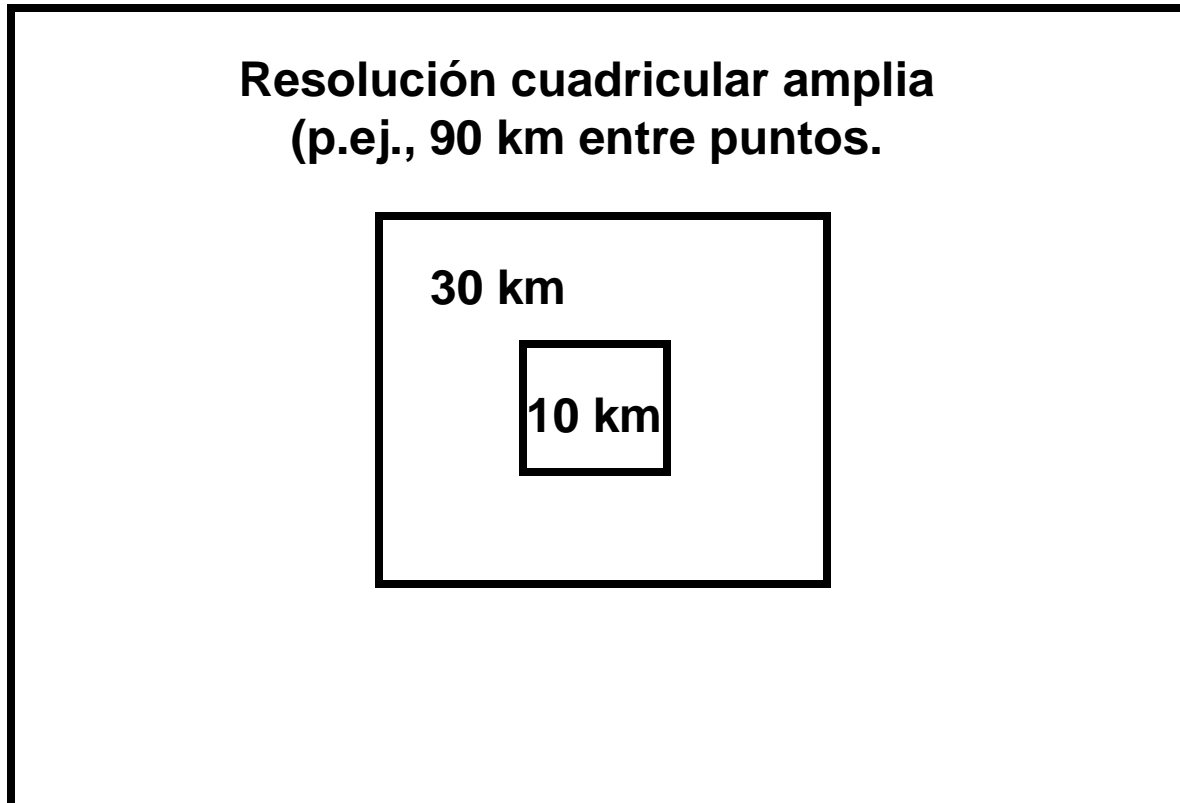
WRF: Runge-Kutta (t) y centrado en el sexto orden (x)



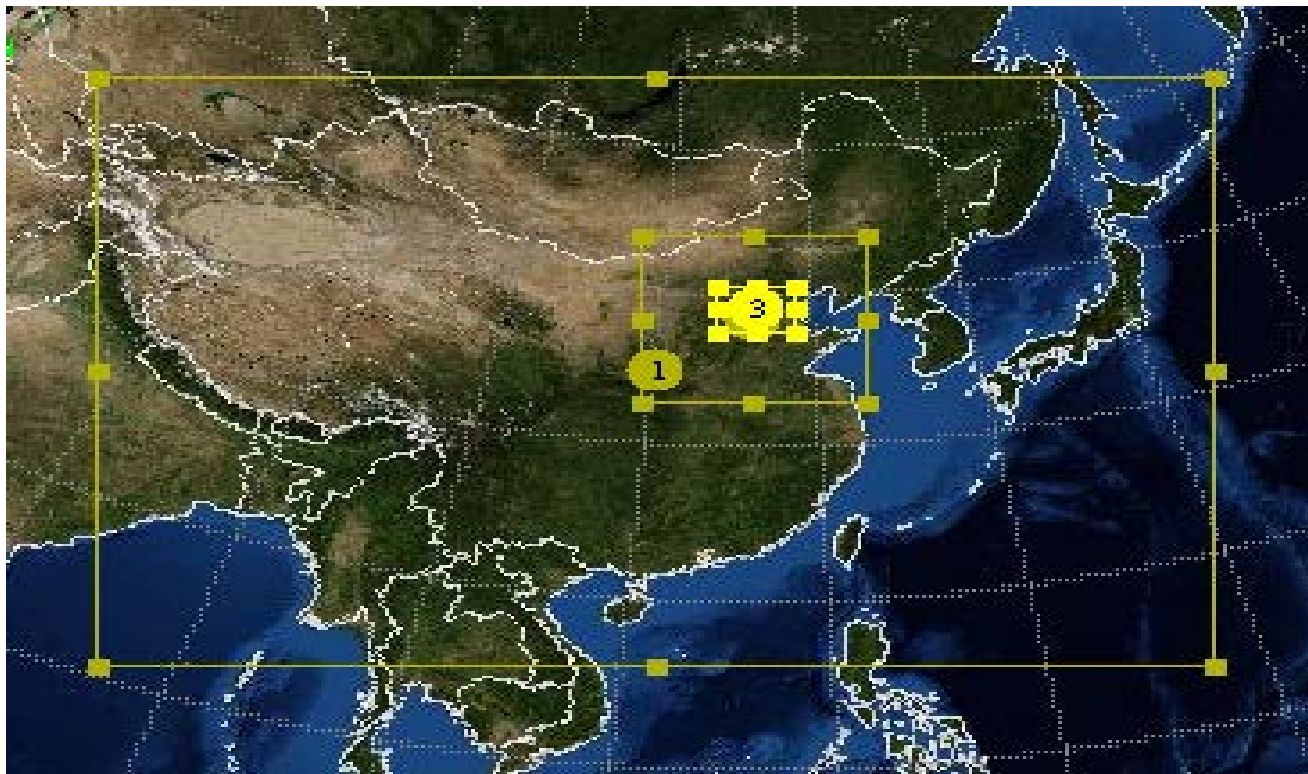
Anidación de Diferentes Modelos para Representar una Gama de Escalas

Cuadrículas 'Anidadas'

Una cuadrícula puede ser acercada (anidada) para enfocar sobre una área reducida.



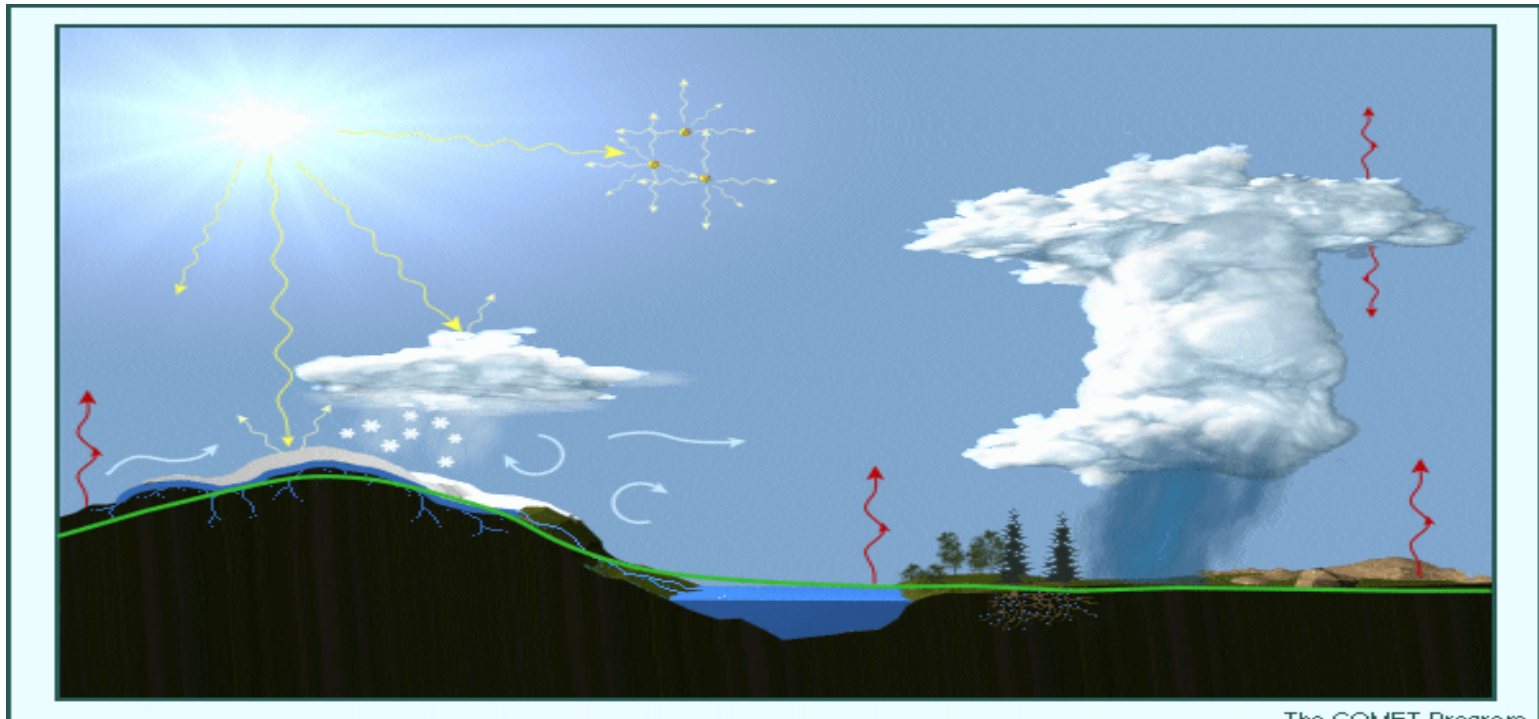
Dominio WRF sobre China durante los Juegos Olímpicos de Beijing



Representación de Procesos Físicos

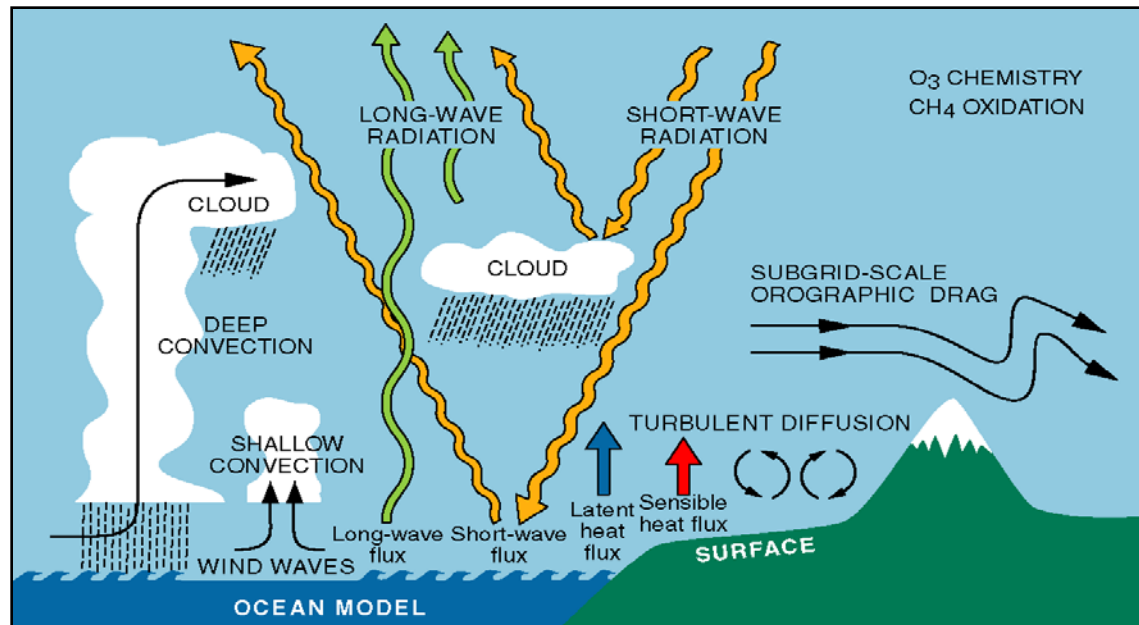
Parametrizaciones

Las parametrizaciones estiman los efectos generales de procesos físicos que son demasiado reducidos en escala, demasiado complejos o bien de naturaleza demasiado desconocida para poder representarlos explícitamente.

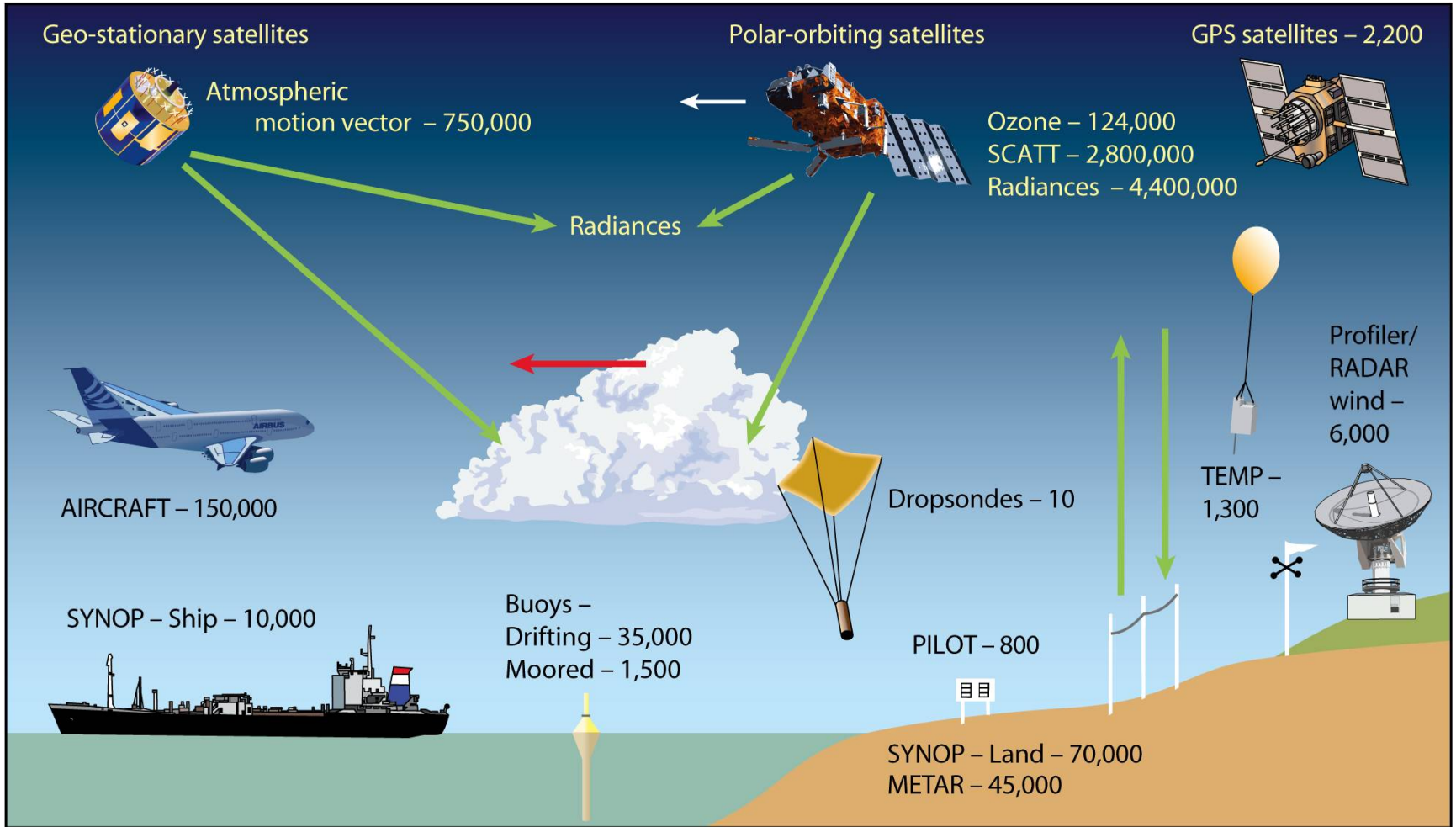


Parametrizaciones

- Modelo WRF
 - Convección tipo cúmulo
 - Microfísica de nubes y precipitación
 - Radiación (onda corta y onda larga)
 - Turbulencia y difusión
 - Capa de fricción y capa superficial
 - Interacción con la superficie terrestre



Condiciones Iniciales

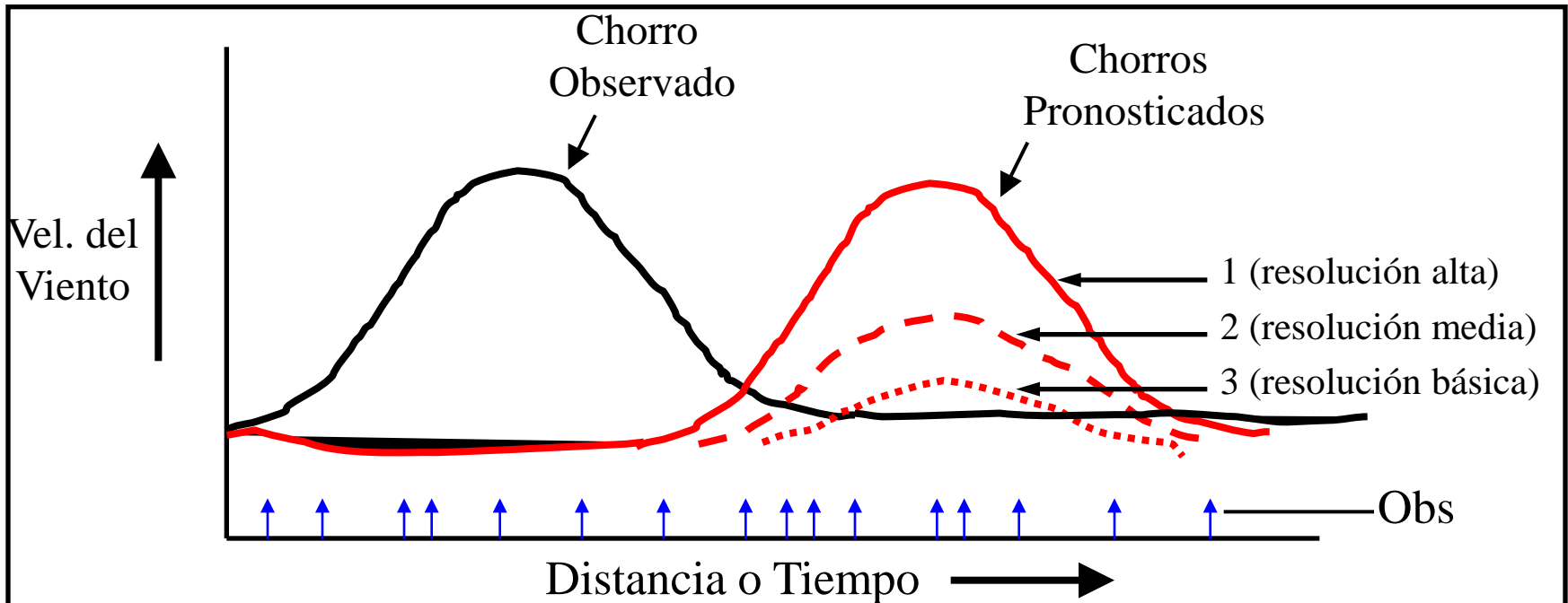


Verificación de las Capacidades **de los Modelos**

Propósitos:

- Comparar las capacidades de diferentes modelos.
- Determinar si las modificaciones hechas a cierto modelo mejoraron su desempeño.
- Evaluar si cierto modelo satisface las necesidades del usuario.

¿Por qué No Utilizar Métrica Estándar de Validación? Ejemplo Donde la Resolución Alta Más Bien Perjudica

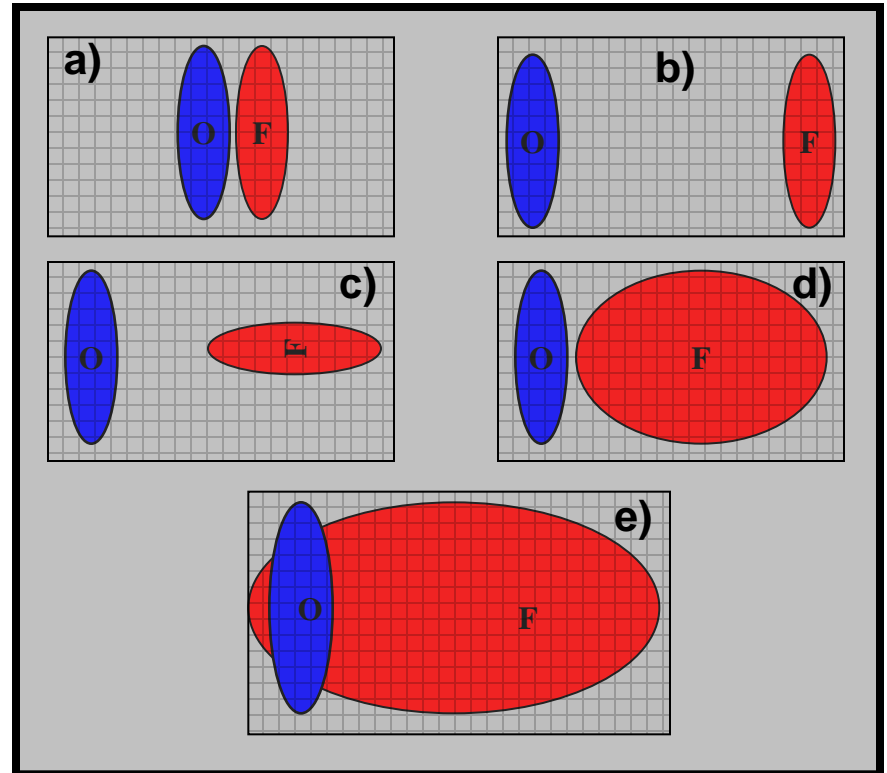


$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (F - O)^2} \quad \text{RMSE 1} > \text{RMSE 2} > \text{RMSE 3}$$

***La resolución básica recibió la mejor calificación,
¡aunque no pronostica ningún fenómeno!***

Otro Ejemplo

Considere los pronósticos y las observaciones de un campo dicotómico sobre una cuadrícula:



Fuente: Davis, et al. (2005)

RMSE (a) = RMSE (b) = RMSE (c)

POD = 0 y FAR = 1 para (a)-(d)

POD > 0 y FAR < 1 para (e) 39

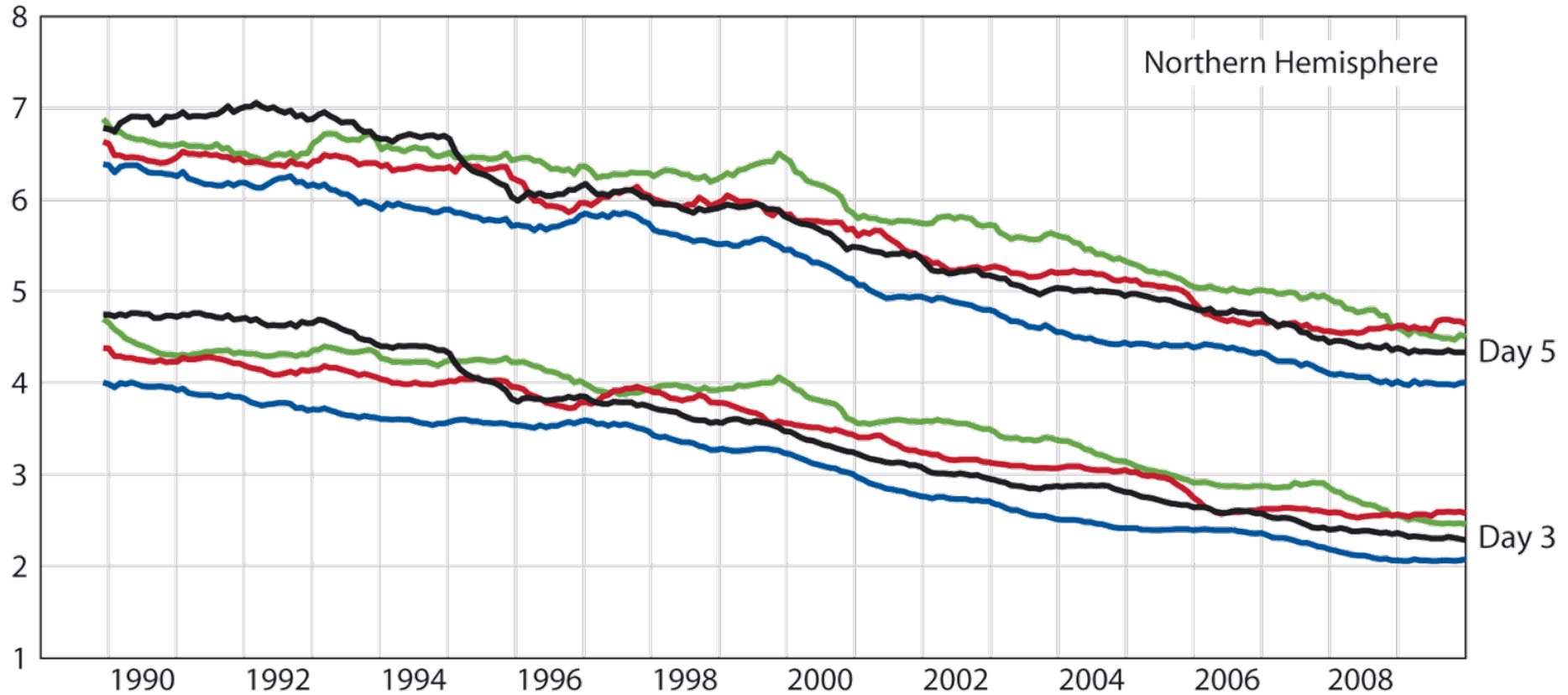
¿Cuáles Son las Alternativas?

- Evaluación de pronósticos meteorológicos basada en objetos:
 - Eventos (serie temporal)
 - Componentes (temporales o espaciales)
 - Anomalías (tiempo o espacio)
- Ejemplos: Herramientas para la Evaluación de Modelos (*Model Evaluation Tools–MET*)
<http://www.dtcenter.org/met/users/index.php>
 - MET fue diseñado como un conjunto altamente configurable de herramientas de verificación de avanzada.

Ejemplo de la Evaluación de Pronósticos Producto de Diferentes Modelos

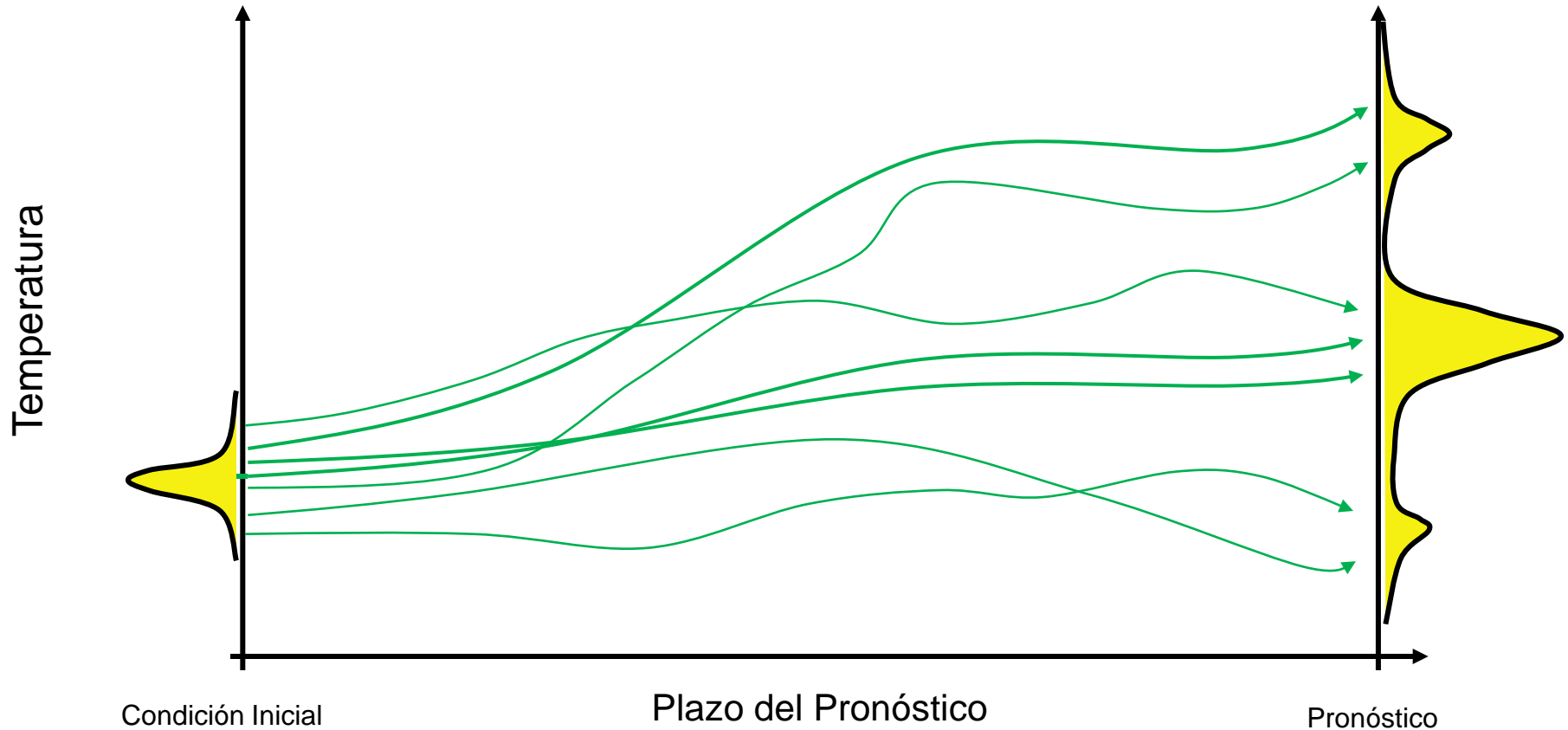
RMS error (hPa) of forecasts of mean sea level pressure

— ECMWF — JAPAN — UK — USA



Múltiples Pronósticos: Objetivos

Pronosticar la incertidumbre y el resultado más probable (es decir, generar un pronóstico probable).



Descripción completa del pronóstico meteorológico en términos de una función de densidad de probabilidades (*probability density function – PDF*).⁴²

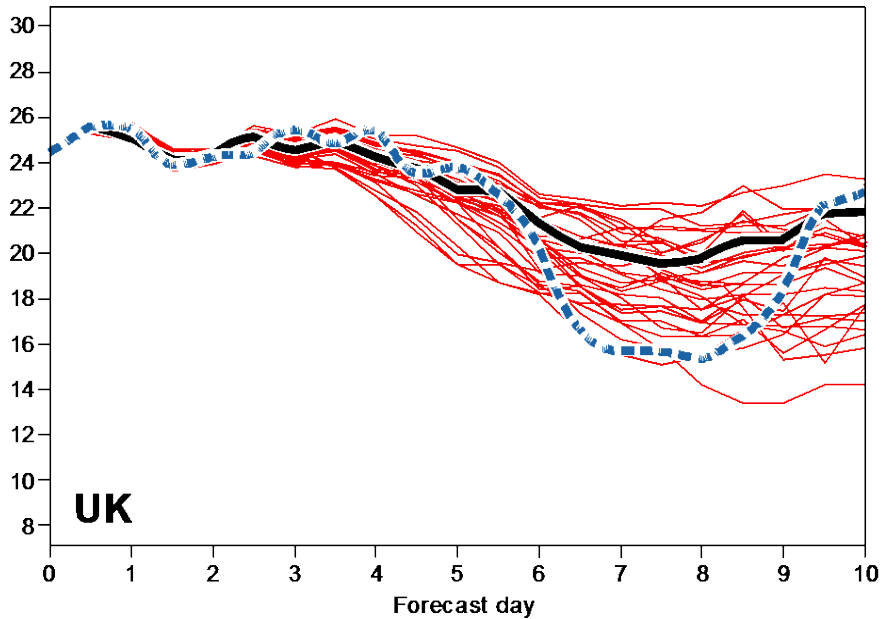
Dependencia de Flujo de Errores en el Pronosticado

26 Junio 1995

ECMWF ensemble forecast - Air temperature

Date: 26/06/1995 London Lat: 51.5 Long: 0

— Control — Analysis — Ensemble

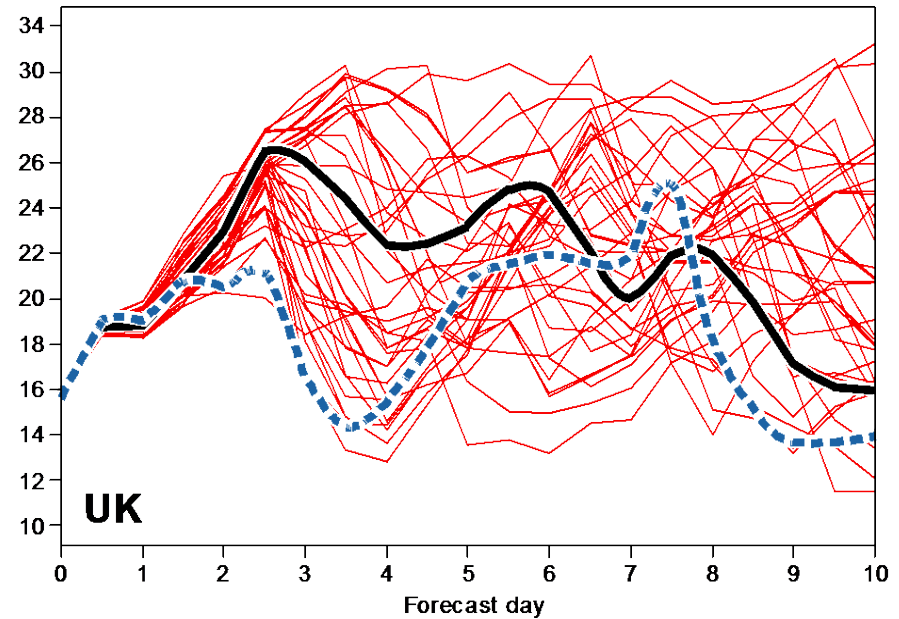


26 Junio 1994

ECMWF ensemble forecast - Air temperature

Date: 26/06/1994 London Lat: 51.5 Long: 0

— Control — Analysis — Ensemble



Si los pronósticos son coherentes (poca divergencia), la atmósfera se encuentra en estado más predecible que cuando los pronósticos muestran mayor divergencia.

Estadísticas Generadas por Modelos

(Model Output Statistics – MOS)

Relacionan los elementos meteorológicos observados (variables dependientes) con las variables aplicables (predictores) mediante una metodología estadística.

Los predictores se obtienen de:

1. Pronósticos de Modelos NWP (numéricos)
2. Observaciones meteorológicas superficiales previas
3. Información geoclimática

Métodos estadísticos:

REGRESION LINEAL MULTIPLE, regresión polinomial o logística; redes neurales

Estadísticas Generadas por Modelos

(Model Output Statistics – MOS)

Propiedades

- Se requiere un historial de observación en los puntos objeto del pronóstico. (¡Ojalá sea un historial largo y estable!)
- Las ecuaciones se aplican a una ejecución futura de un modelo pronosticador similar.
- La no linealidad puede ser modelada empleando variables y transformaciones NWP.
- Es posible obtener pronósticos de probabilidad con una sola ejecución de un Modelo NWP.

Ecuaciones de Regresión 'Real'

Las ecuaciones de regresión MOS son: MULTIVARIADAS, de forma:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_N X_N$$

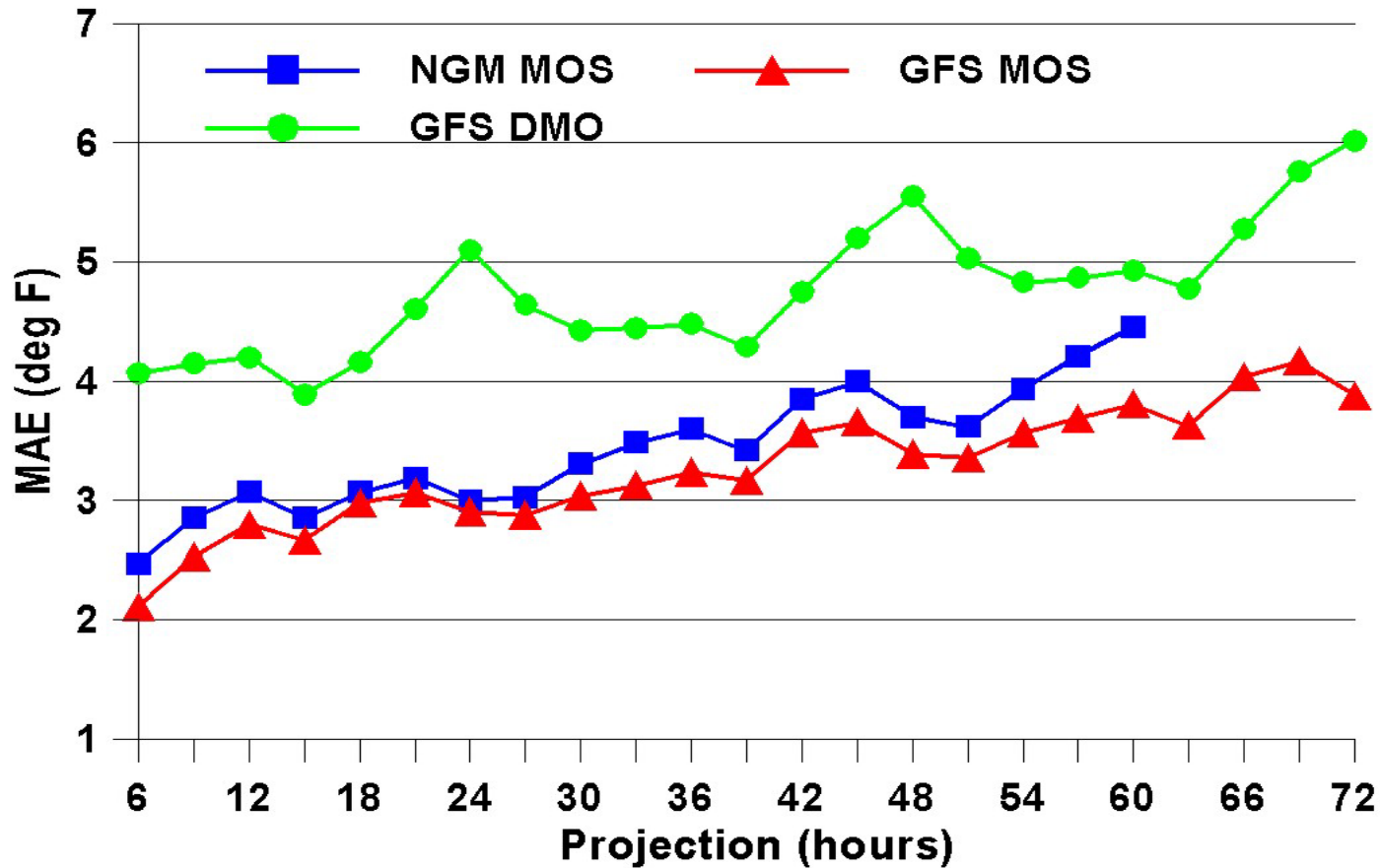
Donde:

- Las 'a' representan a COEFICIENTES
- Las 'x' representan a variables PREDICTORAS (Modelo NWP, observaciones)
- El número máximo de términos, N, puede ser MUY alto.
- Para NGM QPF, N = 15; para NGM VIS, N = 20
- El procedimiento de SELECCION ADELANTADA determina los predictores y el orden en que aparecen.

Ejemplo MOS: Verificación de Temperaturas

0000 Horas UTC

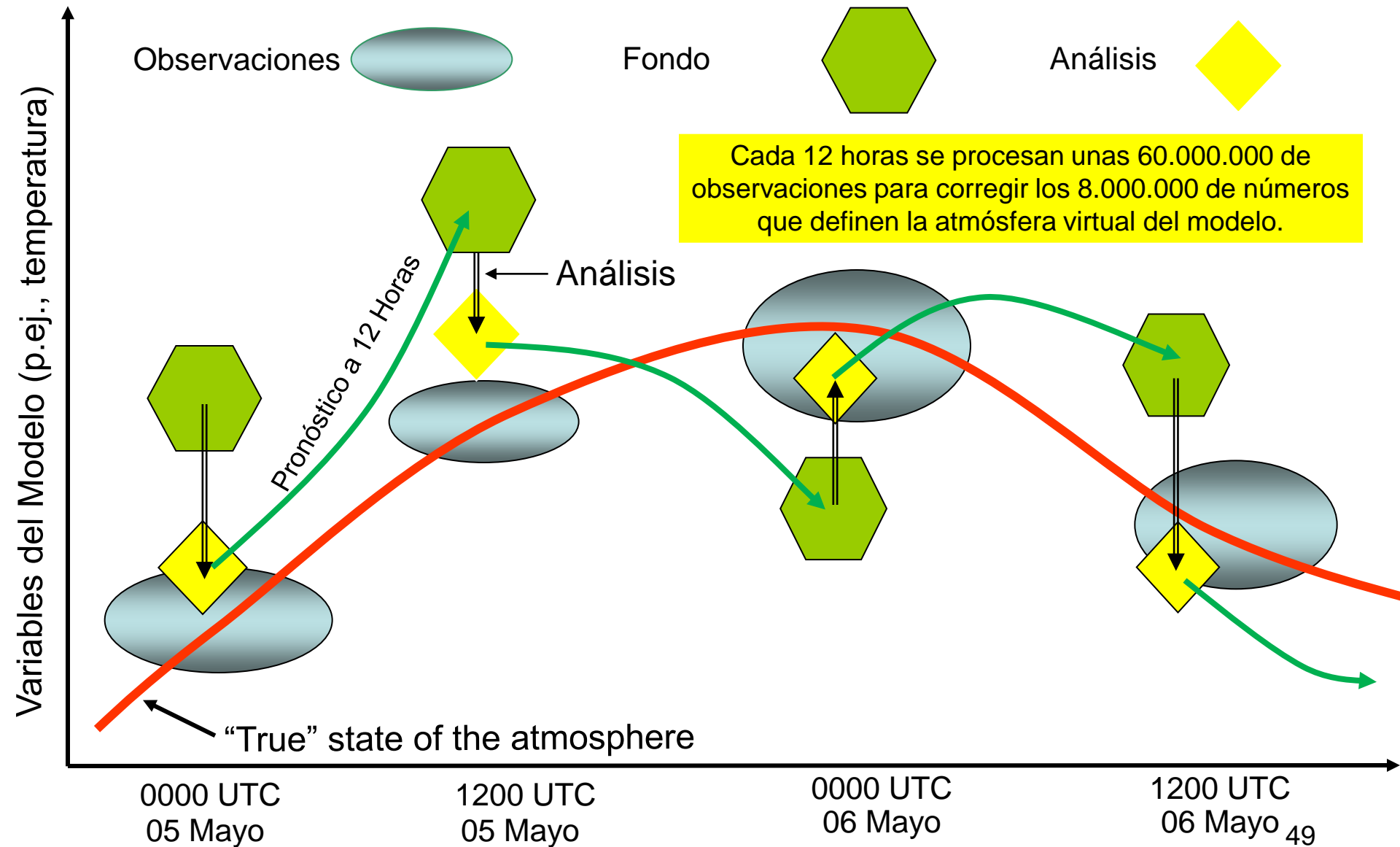
Epoca Fría 2002 -2003



Asimilación de Datos

- Las observaciones miden el estado actual, pero no pintan el cuadro completo.
 - Son observaciones hechas en puntos no equidistantes, muchas veces con brechas intermedias amplias.
 - Son observaciones hechas en horario variado, no todas en el momento objeto del análisis.
 - Son observaciones que a veces son propensas al error.
 - Muchas observaciones no corresponden directamente a las variables que pide el modelo.
- El modelo pronosticador puede emplearse para procesar las observaciones y generar un cuadro más completo (asimilación de datos).
 - Se empieza con un análisis anterior.
 - Se ejecuta el modelo para generar un pronóstico a corto plazo para la hora del análisis actual.
 - Se corrige este estado 'de fondo' con las observaciones nuevas.

Asimilación de Datos



Técnicas y Sistemas de Asimilación

- Asimilación de datos variacional:
3DVAR, 4DVAR; ejemplos:
 - GSI (<http://www.dtcenter.org/com-GSI/users/>)
 - WRFDA
(<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfda/index.html>)
- Filtro Kalman Conjunto; ejemplo:
 - DART
(<http://www.image.ucar.edu/DAReS/DART/>)
- Híbridos: Aprovechan las ventajas de ambos sistemas.

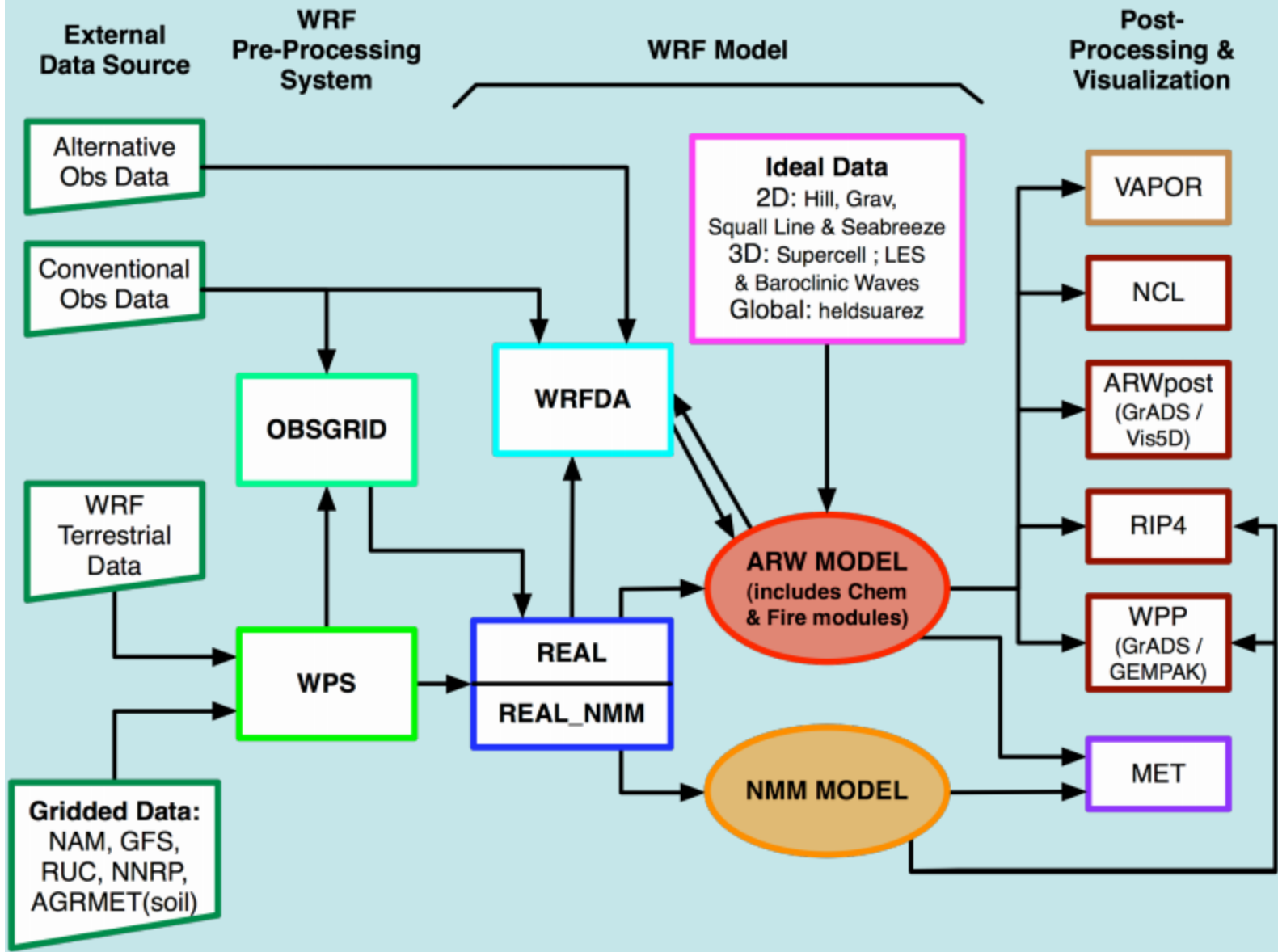
Aplicaciones de Modelos Atmosféricos

- Pronóstico meteorológico diario (permitir que los modelos se proyecten de uno a diez días).
- Pronósticos climáticos (permitir que los modelos se proyecten a varios años plazo).
 - Experimentos hipotéticos (p.ej., ¿qué sucede si duplicamos el nivel de CO₂?).
 - Simplemente permitir que el modelo se siga proyectando.
- Investigación: Estudiar el escenario generado por el modelo cuando no se cuente con observaciones atmosféricas confiables.

Algunos Modelos NWP Comunes

- WRF (Meso-Escala): Uno de los pocos modelos que ofrece al usuario acceso al código y la posibilidad de hacer sus propias ejecuciones. <http://www.wrf-model.org>
- MM5: Versión anterior del WRF.
- GFS (global): Utilizado frecuentemente para establecer condiciones de frontera e iniciales para el Modelo WRF.
- Modelo CFD EuLag: <http://www.mmm.ucar.edu/eulag/>
- Varios modelos climáticos: CESM, GISS, HadCM3, EdGCM
- Modelo del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (*European Center for Medium-Range Weather Forecasting – ECMWF*)
- Laboratorio de Investigaciones de la Marina Estadounidense (COAMPS, NOGAPS)
- Modelo de la Oficina Meteorológica Británica
- Modelo Meteorológico SERVIR

WRF Modeling System Flow Chart

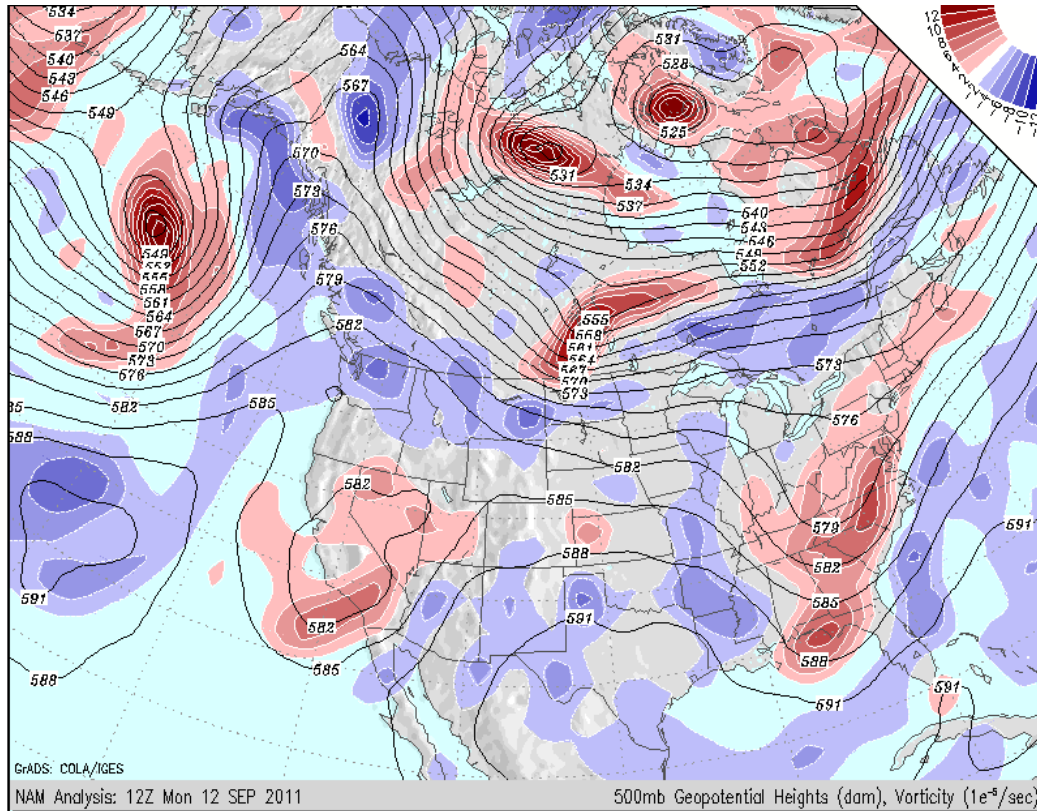


Herramientas de Visualización: GrADS

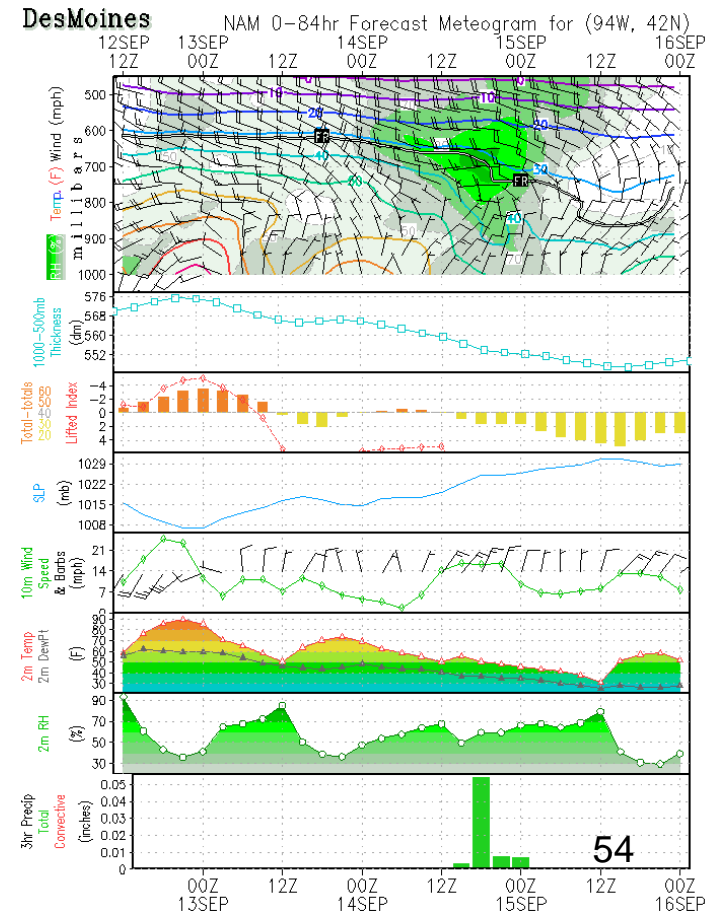
Grid Analysis and Display System
(Sistema de Análisis y Presentación Cuadricular)

<http://www.iges.org/grads/>

Meteograma para Des Moines



500mb Altura y Vorticidad Geopotenciales

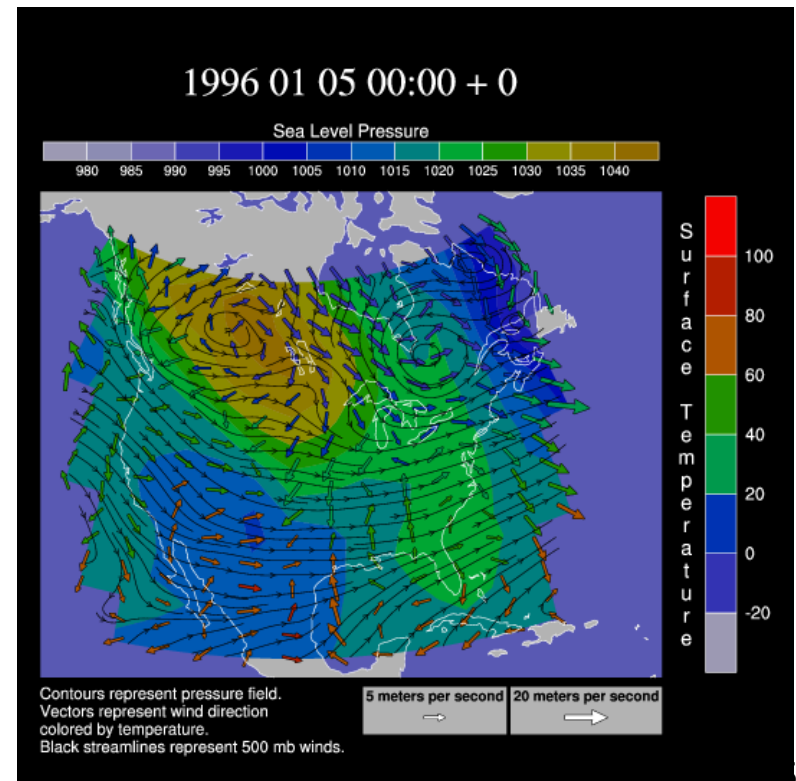
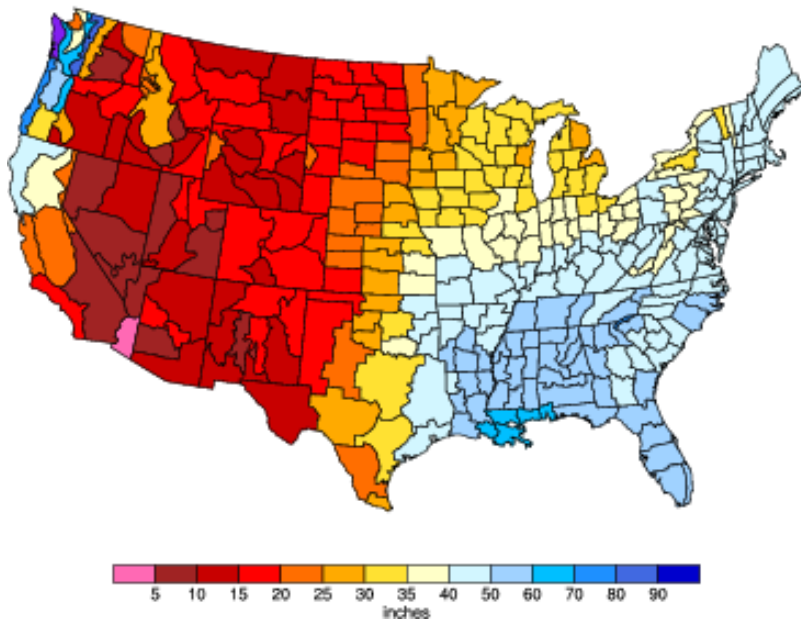


Herramientas de Visualización: NCL

NCAR Command Language (*Lenguaje de Comandos NCAR*)

<http://www.ncl.ucar.edu>

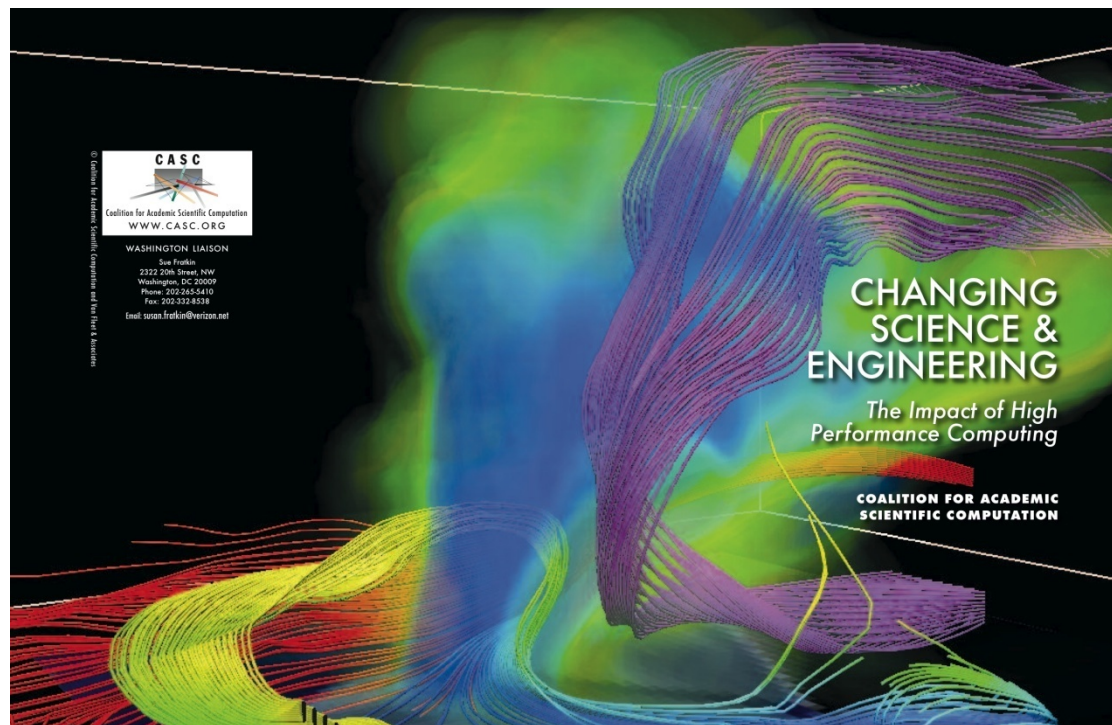
Average Annual Precipitation
Computed for the period 1899-1999
NCDC climate division data



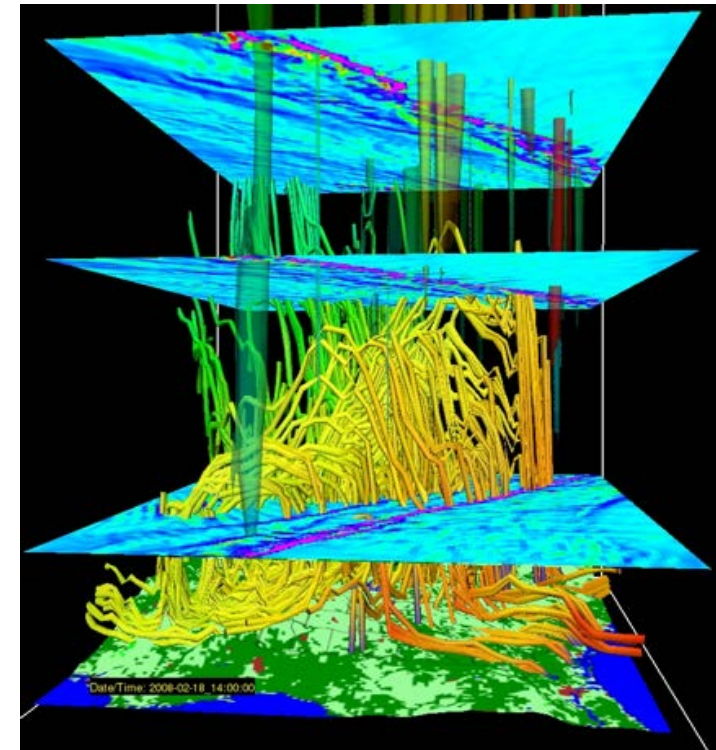
Herramientas de Visualization: VAPOR

Visualization and **A**nalysis **P**latform for **O**cean,
Atmosphere, and Solar **R**esearchers
(*Plataforma de Visualización y Análisis para
Investigadores Marinos, Atmosféricos y Solares*)

<http://www.vapor.ucar.edu/> Visualización en 3D



Precipitación en una tormenta eléctrica supercelda (renderes)
con corrientes ascendentes y descendentes (tubos).



Paso de un frente frío sobre Georgia