



Universidad Nacional de Ingeniería  
Facultad de Ingeniería Civil  
Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno “El Niño”



# Aplicación de modelos climatológicos para la obtención de series hidrometeorológicas

M.A.S. Juan W. Cabrera C.  
Investigador Asociado - IMEFEN  
Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Nacional de Ingeniería

Junio, 2013

# Contenido

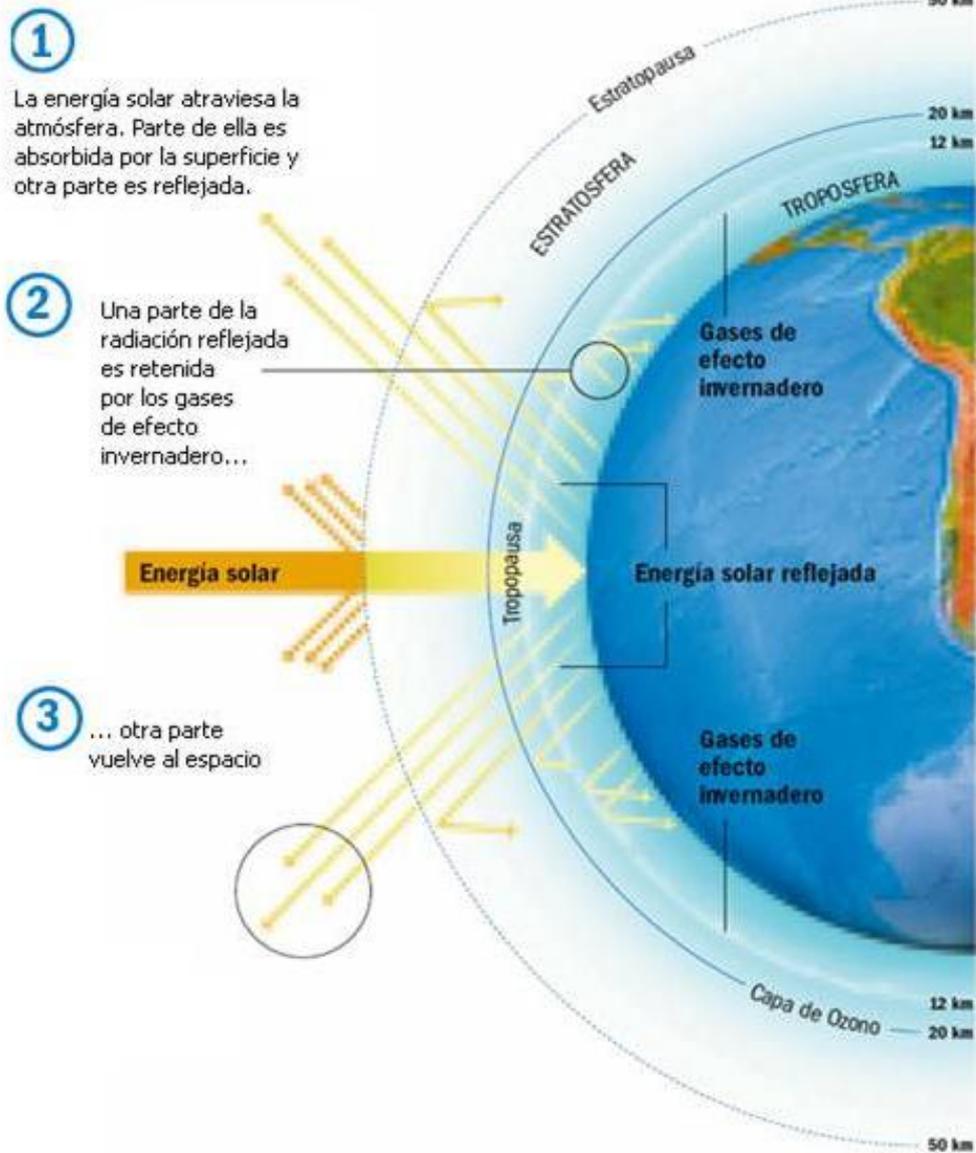
1. Necesidad de buscar nuevas fuentes de información
2. Modelos climáticos
3. Modelos Acoplados (AOGCMs)
4. AOGCMs e IPCC
5. Ejemplo de Aplicación
6. Conclusiones

# Parte I

¿Por qué buscar nuevas fuentes de información?

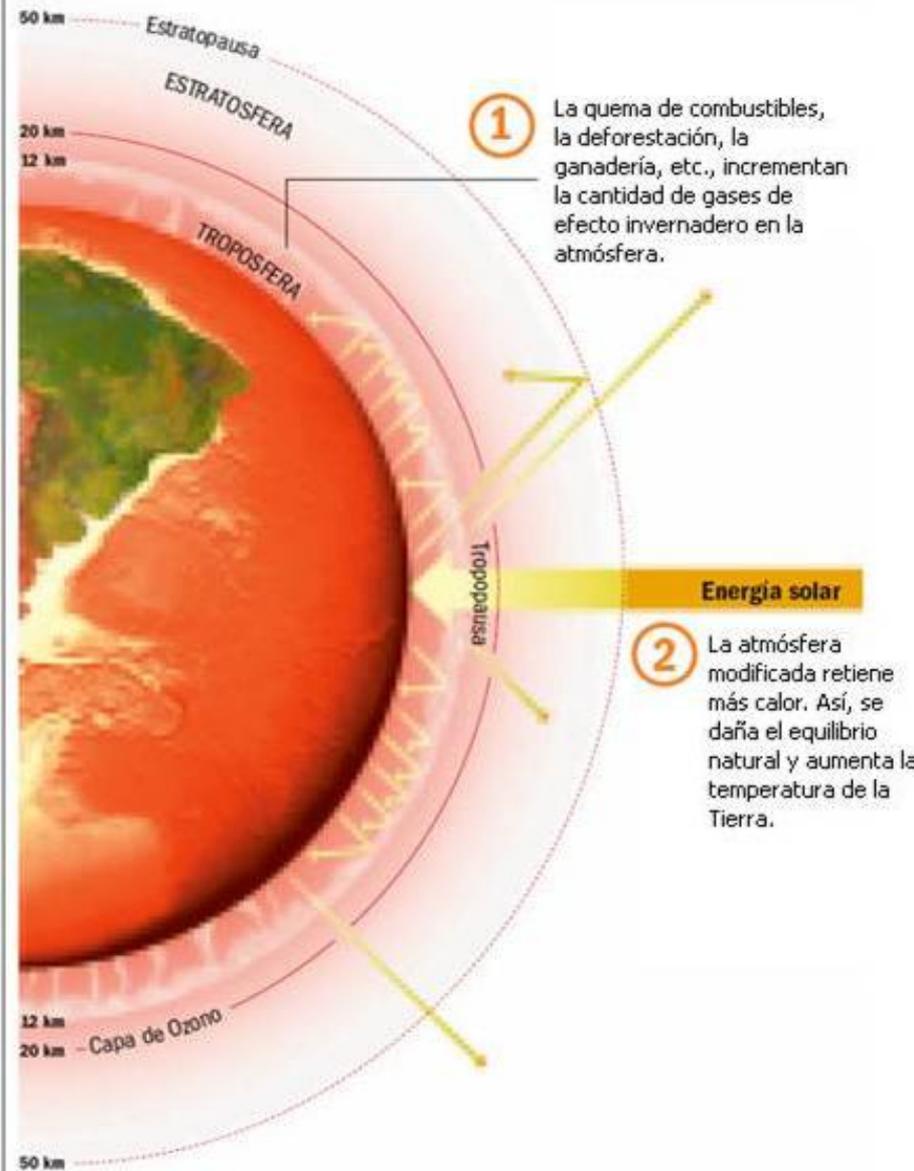
## EL EFECTO INVERNADERO

Es el calentamiento natural de la Tierra. Los gases de efecto invernadero, presentes en la atmósfera, retienen parte del calor del Sol y mantienen una temperatura apta para la vida.



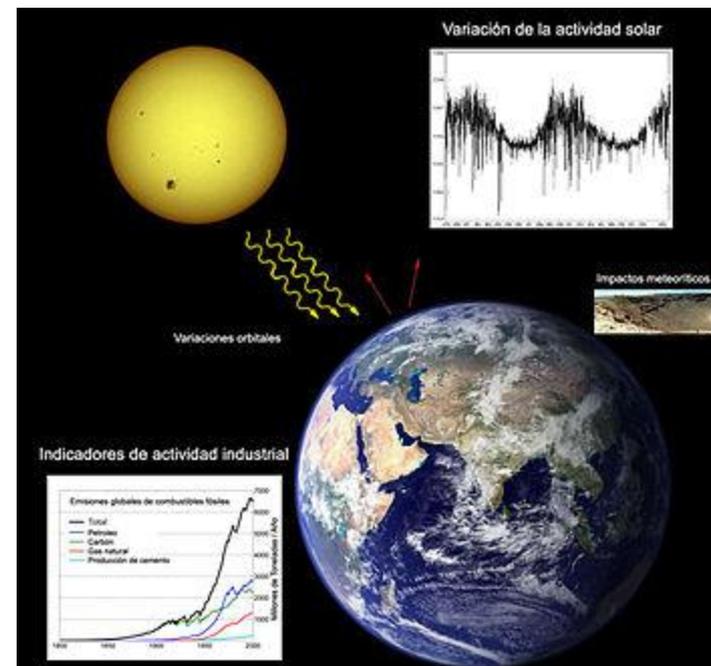
## EL CALENTAMIENTO GLOBAL

Es el incremento a largo plazo en la temperatura promedio de la atmósfera. Se debe a la emisión de gases de efecto invernadero que se desprenden por actividades del hombre.



# ¿Por qué?

- Zonas de difícil acceso
- Insuficientes estaciones meteorológicas.
- Insuficientes recursos.
- Interacción entre el clima de diferentes regiones.
- Proyecciones
- Calentamiento global
- Efectos del Cambio climático



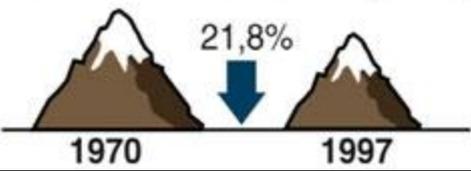
# Desaparece glaciar en

El glaciar Quilca desaparece por efecto del cambio climático ante el calentamiento global a nivel mundial

## Andes peruanos

- Perú tiene el mayor número de glaciares tropicales de América Latina
- Los 3.044 glaciares abastecen de agua a la población urbana
- Es el segundo glaciar que desaparece desde 2005

## Retroceso de los nevados (en km<sup>2</sup>)



## Ante el calentamiento global peruano

## Efectos desencadenantes del cambio climático

- Sequía
- Calor extremo
- Fuertes lluvias, deslizamientos
- Desglaciación
- Heladas y granizadas
- Inundaciones



## Actividades afectadas:

- Industria pesquera y artesanal:** Reducción de recursos hidrobiológicos.
- Ganadería:** Reducción de tierras para pastoreo.
- Turismo:** Pérdida de vías de acceso y comunicaciones.
- Infraestructura:** Pérdida de viviendas y carreteras por desastres naturales extremos.
- Salud:** Aparición de enfermedades relacionadas con el deterioro del agua, alimentos y aire, aumento de mortalidad, inseguridad alimentaria.
- Generación de Electricidad:** disminución en la disponibilidad de recursos agua.



# Parte II

## Modelos climáticos

# Modelos Climáticos (1)

- Los modelos climáticos usan métodos de investigación cuantitativa para simular las interacciones de la atmósfera terrestre, los océanos, el relieve terrestre, y el hielo.
- Se utilizan para el estudio de la dinámica del sistema meteorológico y climático para las proyecciones del clima futuro.
- Todos los modelos climáticos tienen en cuenta la energía entrante como las radiaciones electromagnéticas de onda corta (que en este contexto significa visible y ultravioleta) a la tierra, así como la energía saliente de onda larga (infrarrojo) proveniente de la radiación electromagnética de la tierra.

# Modelos Climáticos (2)

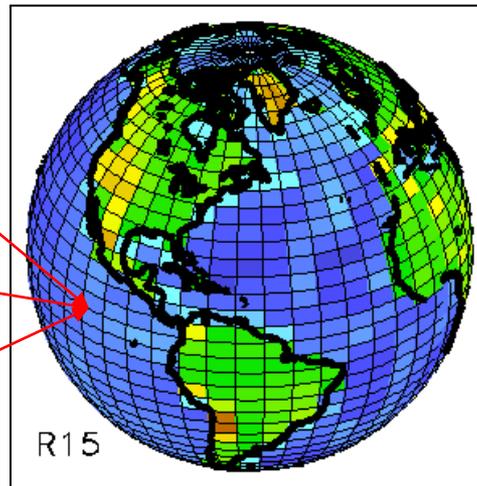
## Las ecuaciones físicas y red celular

### 3-D Grid

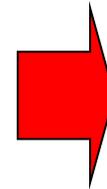
Ecuaciones  
Físicas

Parametrizaciones  
de Procesos

Feedbacks



Resuelto para cada grilla



Estado del clima  
como una función  
del tiempo

# Modelos Climáticos (3)

- Los modelos pueden oscilar desde relativamente simples a muy complejos:
- Simples cálculos de la  $T^{\circ}$  radiativa tratando a la Tierra como un punto más
- Esto puede expandirse verticalmente (modelos radiativo-convectivo), u horizontalmente (modelos de balance de energía)
- Modelos climáticos globales acoplados atmósfera-océano-banquisa (hielo del mar) discretizan, resuelven las ecuaciones para movimiento de fluidos.

# Modelos Climáticos (4)

- Los modelos que observan unas cuantas variables del sistema del clima podrían ser suficientemente sencillos para correr en una computadora personal.
- Otros modelos tratan de integrar muchos factores de la atmósfera, biosfera, geosfera, hidrosfera, y criosfera, para modelar todo el sistema de la Tierra, incluyendo las interacciones y retroalimentaciones entre los sistemas. Éstos usualmente requieren supercomputadoras.
- Actualmente se desarrollan proyectos compartidos mediante los cuales todos los participantes conectan sus pc y procesan la información de manera compartida.

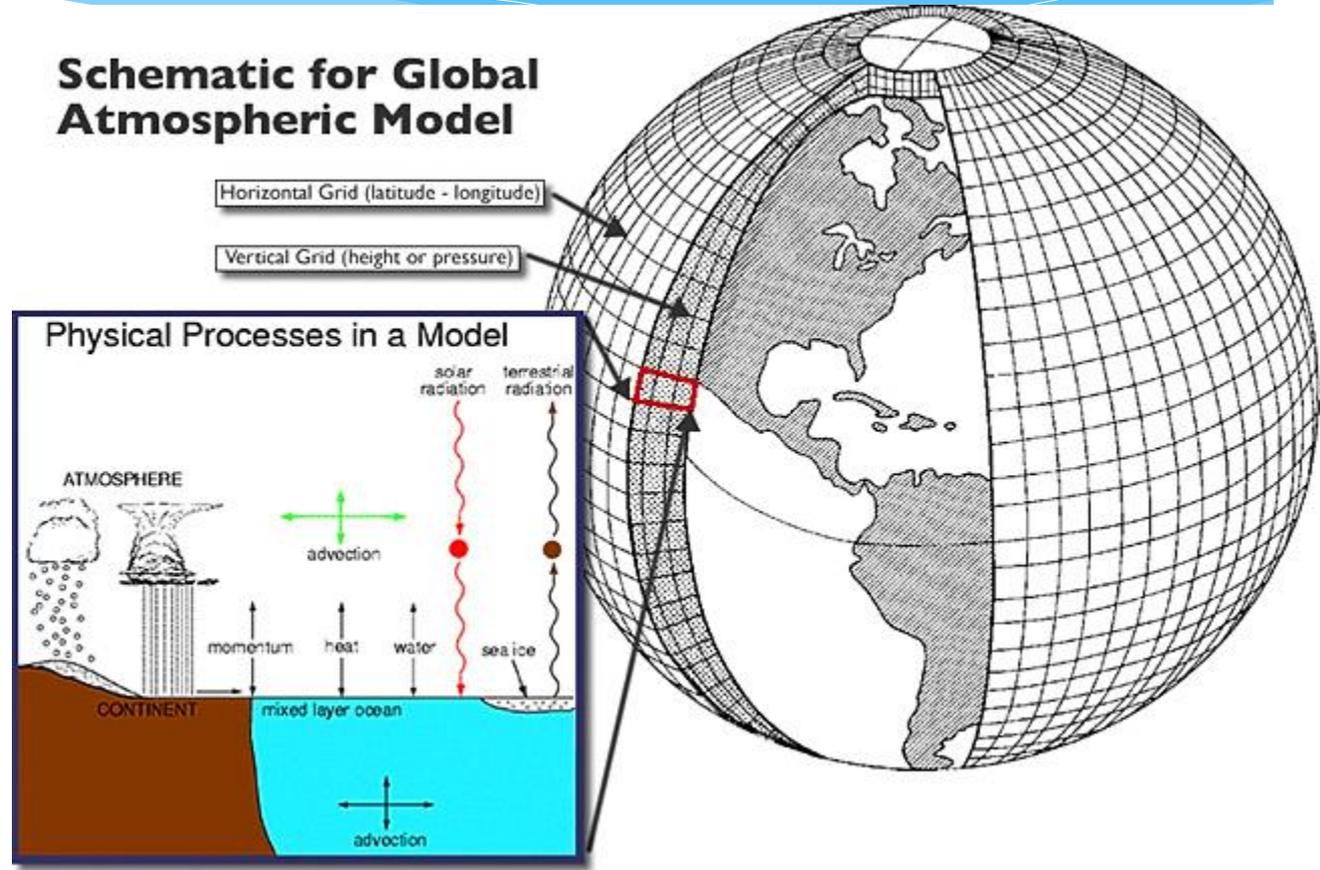
Parte III

Modelos de Circulación General  
Océano-Atmosféricos Acoplados  
(AOGCMs)

# Modelos de Circulación General (1)

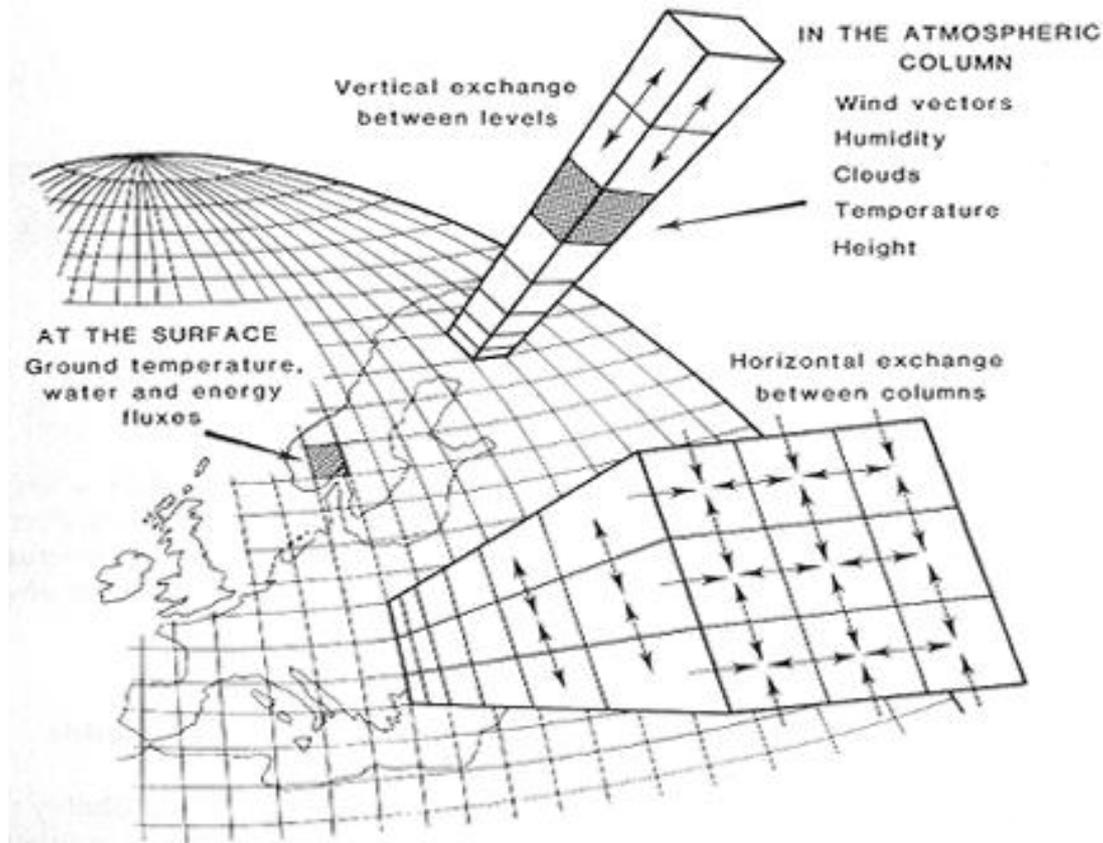
GCM:

son modelos matemáticos de circulación general de una atmósfera (AGCM) planetaria u océano (OGCM).



# Modelos de Circulación General (2)

Los modelos más completos son construidos discretizando y luego resolviendo las ecuaciones que representan las leyes básicas que rigen el comportamiento de la atmósfera, el océano y la superficie terrestre.



# Modelos de Circulación General (3)

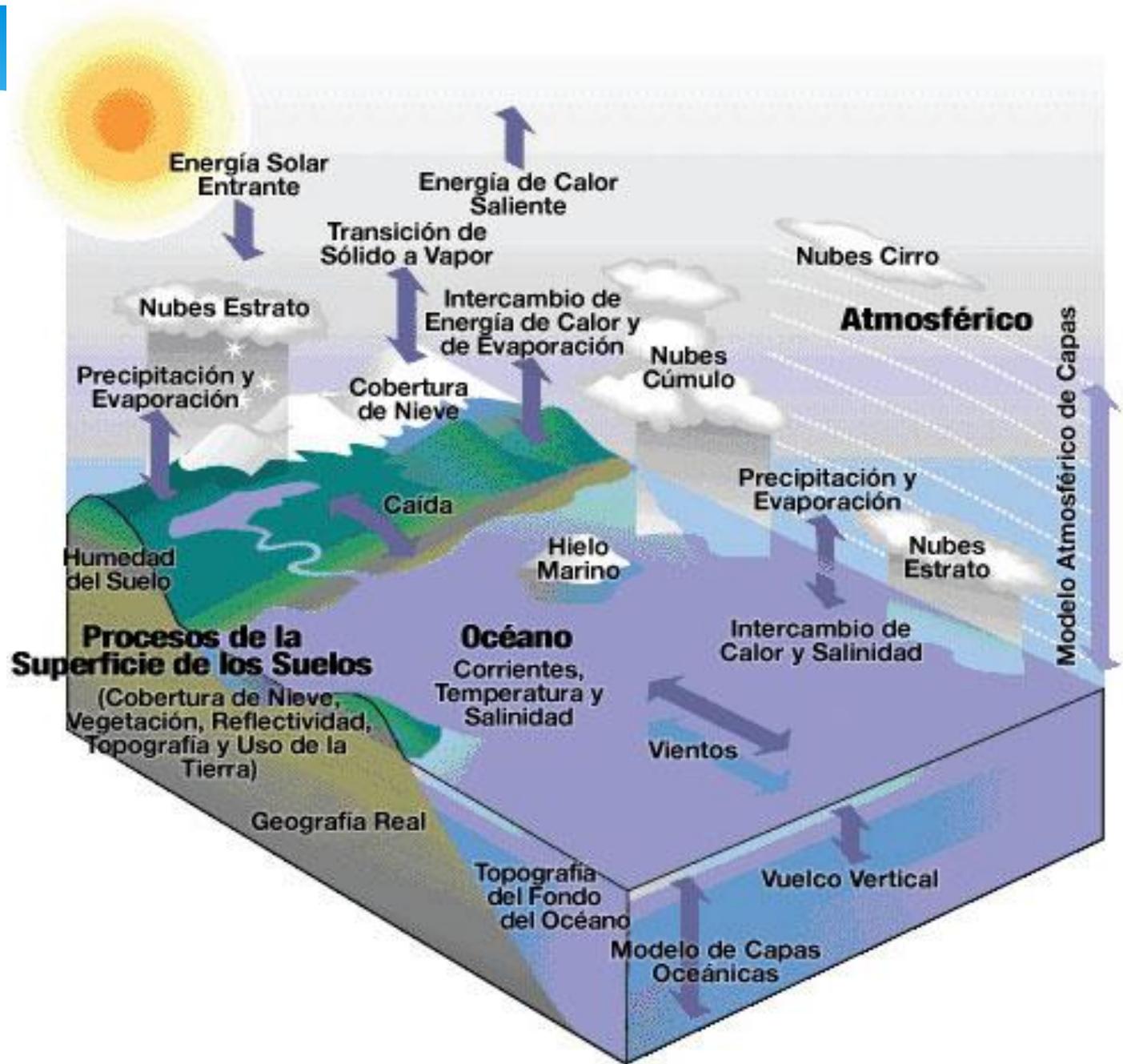
Un GCM es una descripción matemática del sistema climático de la tierra divide en una serie de celdas y varios niveles de la atmósfera, el océano y la tierra.

En cada uno de los puntos de la red se resuelven ecuaciones que describen el equilibrio a gran escala de **movimiento, calor, humedad**.

Un modelo promedio tiene hasta 1 million de puntos en ~ 20 niveles verticales, tanto en la atmósfera y el océano.

Las ecuaciones se resuelven en intervalos que varían entre 20 minutos a 1 hora, y durante períodos de tiempo que dependen de la simulación (~ 10 a 1000 años).

CCSM3:

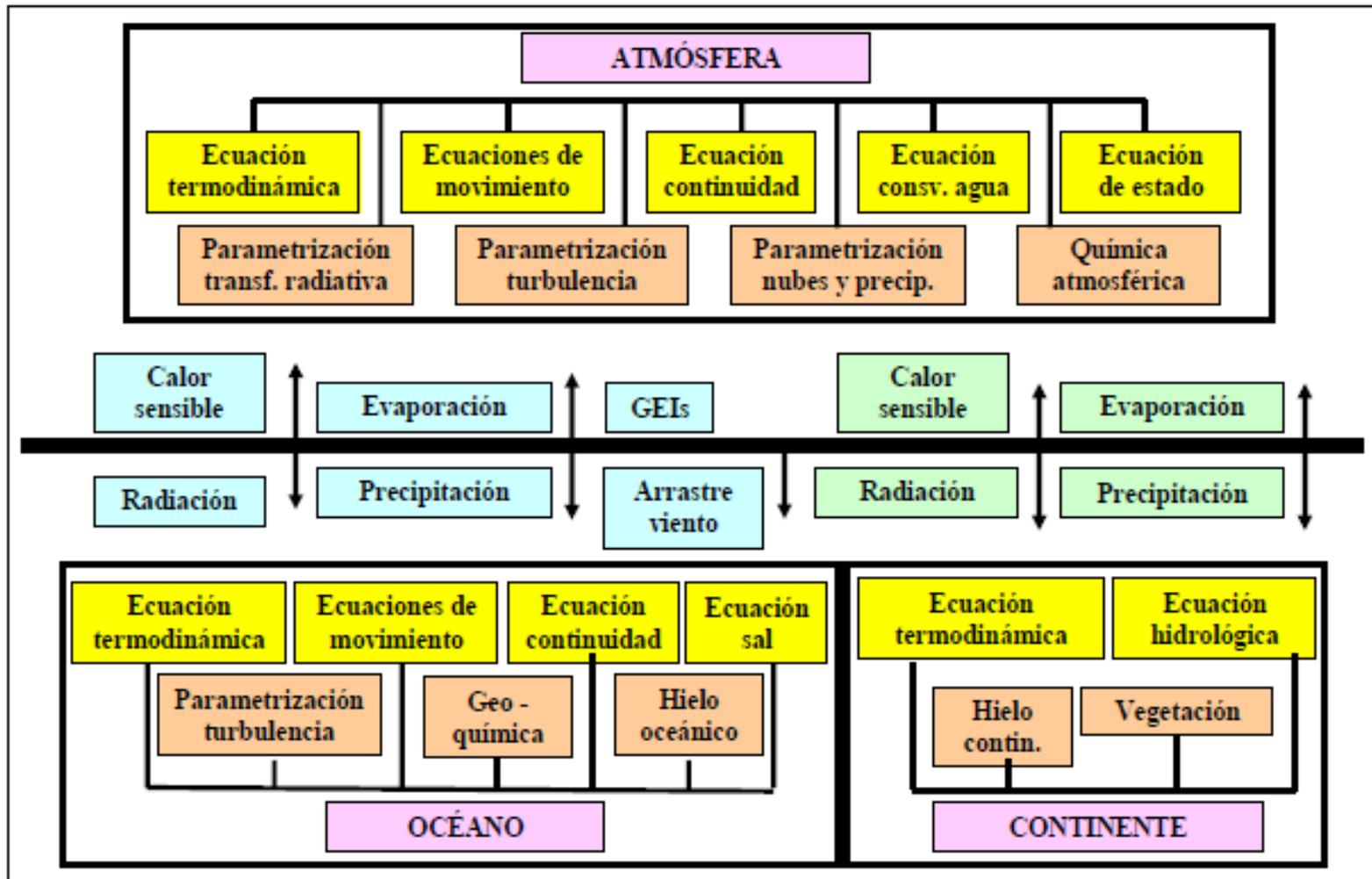


# COMPONENTES

Ecuaciones de evolución de variables de predicción

Ecuaciones para resolver efectos de procesos subrejilla

Ecuaciones para resolver procesos de intercambio



**L**os resultados del primer MCG del mundo de la interacción entre el océano y la atmósfera fueron publicados en 1969 por Syukuro Manabe (fotografía a la izquierda) y Kirk Bryan, dos científicos del Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de la Universidad Princeton.<sup>27</sup> Ambos utilizaron una serie de modelos matemáticos para predecir los patrones climáticos para varios días. Sus “MCG acoplados” (“acoplados” porque el modelo conectaba modelos del océano y modelos atmosféricos de modo que pudieran interactuar como lo hacen estos sistemas en la naturaleza) prepararon el terreno para una forma totalmente nueva de realizar investigaciones y abrieron la puerta a comprender el complejísimo mundo de los procesos climáticos naturales.



Foto: © 2012 Jim Sugar/Corbis

## ECUACIONES ATMOSFÉRICAS

Conservación de la energía :

$$\frac{dT}{dt} = (\nabla \cdot k_h \nabla) T + \frac{1}{c_p} \sum \frac{dQ}{dt}$$

Conservación del momento:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f \vec{k} \times \vec{V} - \nabla \Phi - \vec{F}$$

Conservación de la masa :

$$\nabla(\rho \cdot \vec{V}) = 0$$

Conservación del agua :

$$\frac{d(\rho q_i)}{dt} = (\nabla \cdot k_h \nabla)(\rho q_i) + E - P$$

Ecuación de estado :

$$p = \rho R_d T (1 + 0.61 q_v)$$

## ECUACIONES OCEÁNICAS

Conservación de la energía :

$$\frac{dT}{dt} = k_t \cdot \nabla^2 T$$

Conservación del momento:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = f \vec{k} \times \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \cdot \nabla^2 \vec{V}$$

Conservación de la masa :

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

Conservación de la salinidad :

$$\frac{dS}{dt} = k_s \cdot \nabla^2 S$$

Ecuación de estado :

$$\rho = \rho(T, S, p)$$

T: temperatura Q: flujos de calor V: vector velocidad  
q<sub>i</sub>: fracción de agua en el aire S: salinidad f = 2 Ω sen φ  
p: presión ρ: densidad φ: latitud Φ: geopotencial  
c<sub>p</sub>: calor esp. aire R<sub>d</sub>: cte. del aire k: coef. difusión ν: coef. viscosidad

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

# Modelos de Circulación General (6)

## Limitación

La precisión está limitada por:

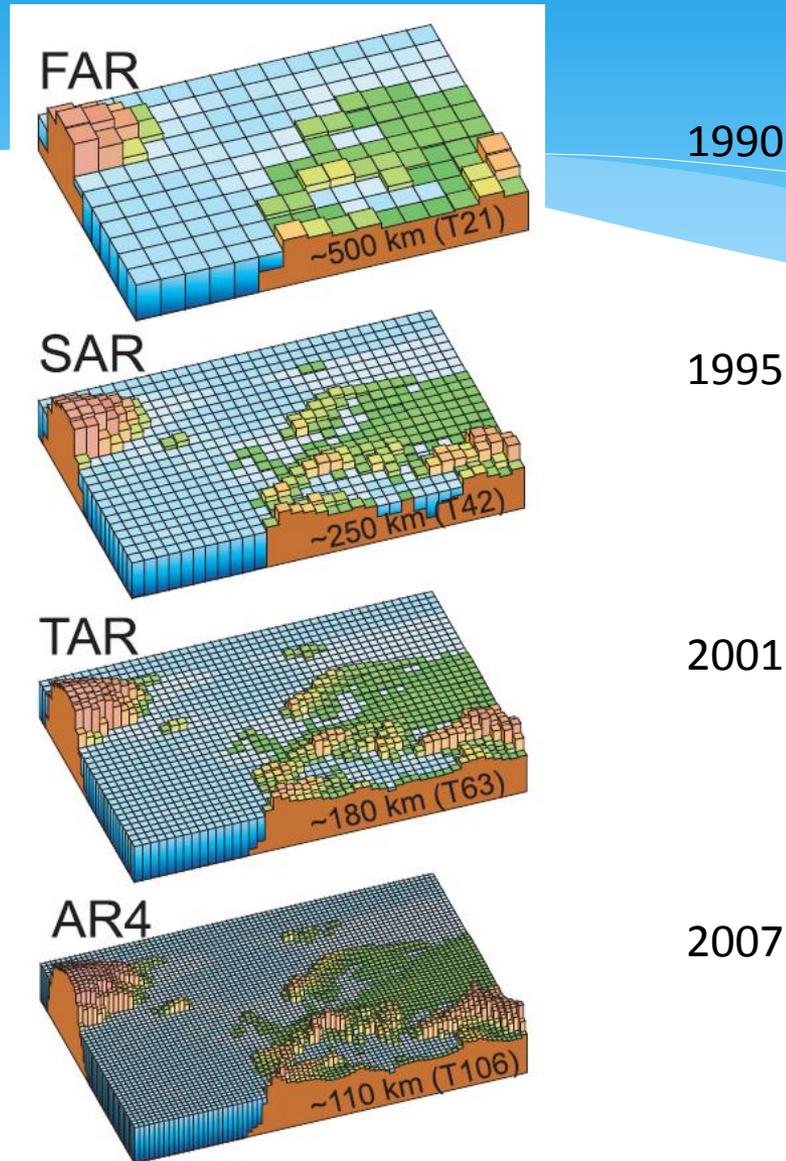
- escala de medida
- nuestra capacidad para describir de forma matemáticamente los complicados procesos atmosféricos, oceánicos, y químicos.
- Ruido en modelos - Las imprecisiones en los cálculos, el redondeo y los errores de truncamiento introducen variabilidad y errores en las simulaciones del modelo.
- Limitaciones computacionales.

# Modelos de Circulación General (7)

¿Cómo se puede hacer que un modelo del clima sea más realista?

- **Aumentar la resolución horizontal y vertical del modelo (más pequeño tamaño de la cuadrícula).**
- **Incorporar más y más de los procesos pertinentes en el modelo.**

# Aumento de la resolución en GCM medio utilizado por el IPCC, informes 1-4



1990

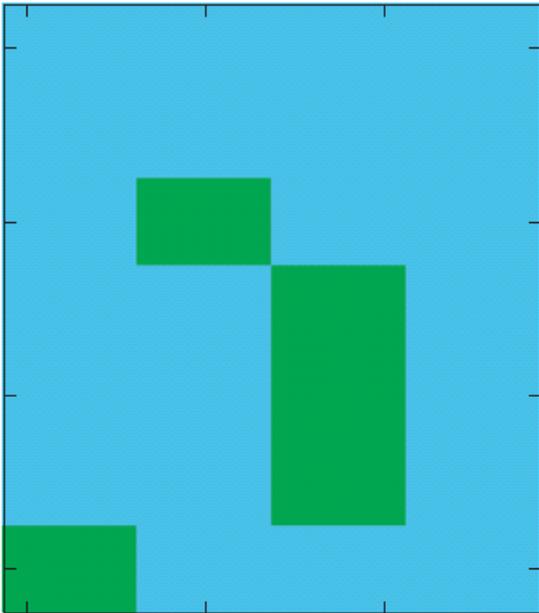
1995

2001

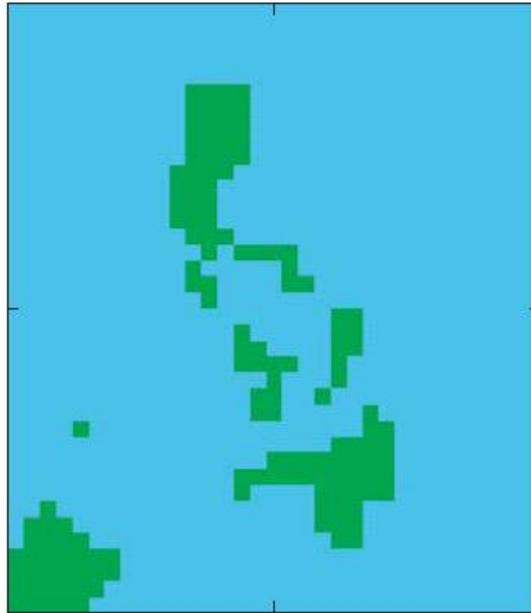
2007

## La representación de las Filipinas en 3 modelos diferentes

**GCM 400 km**



**RCM 50 km**



**RCM 25 km**



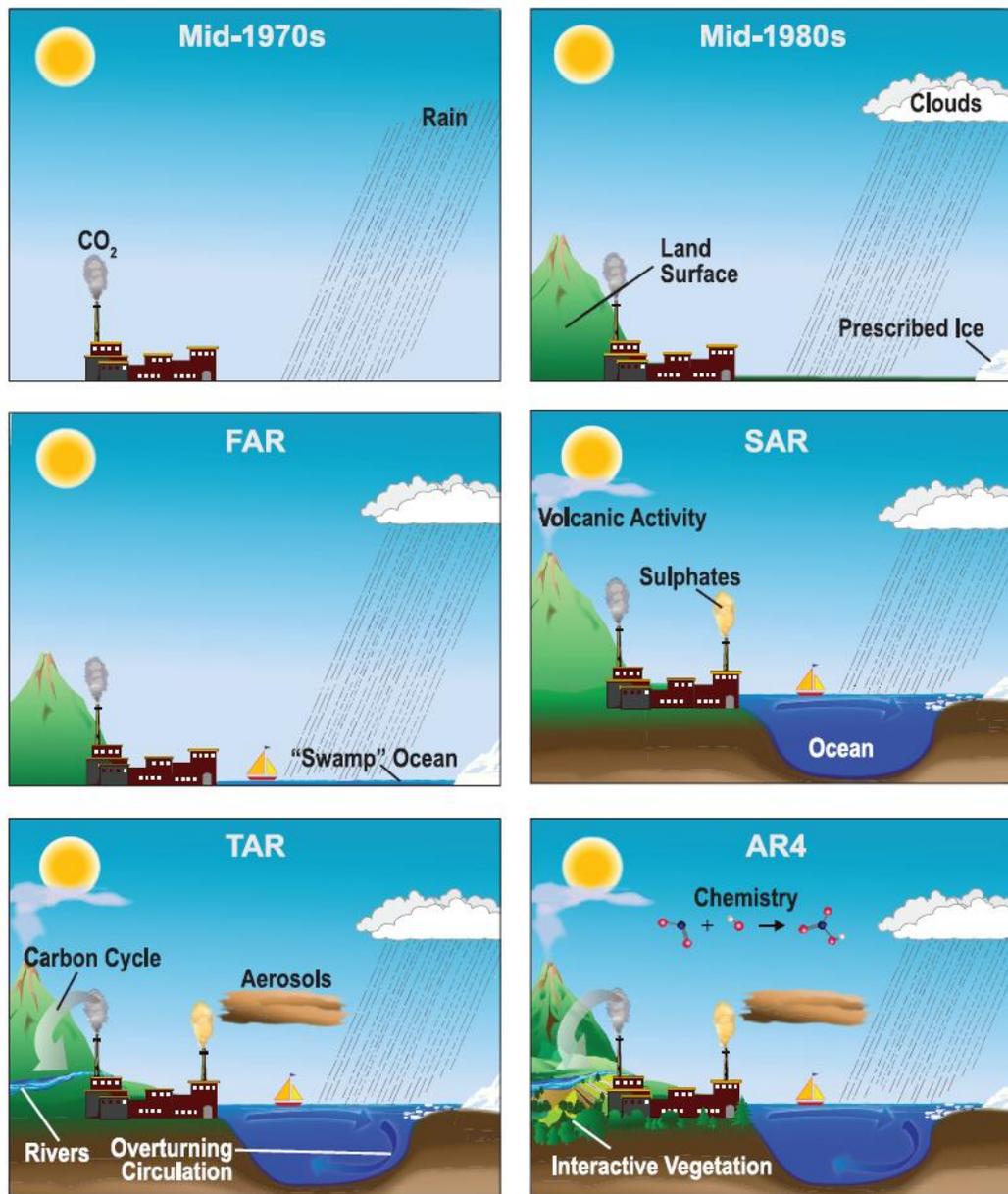


Figure 1.2. The complexity of climate models has increased over the last few decades. The additional physics incorporated in the models are shown pictorially by the different features of the modelled world.

## Validación de un modelo

### lo bien que se simula la realidad ...

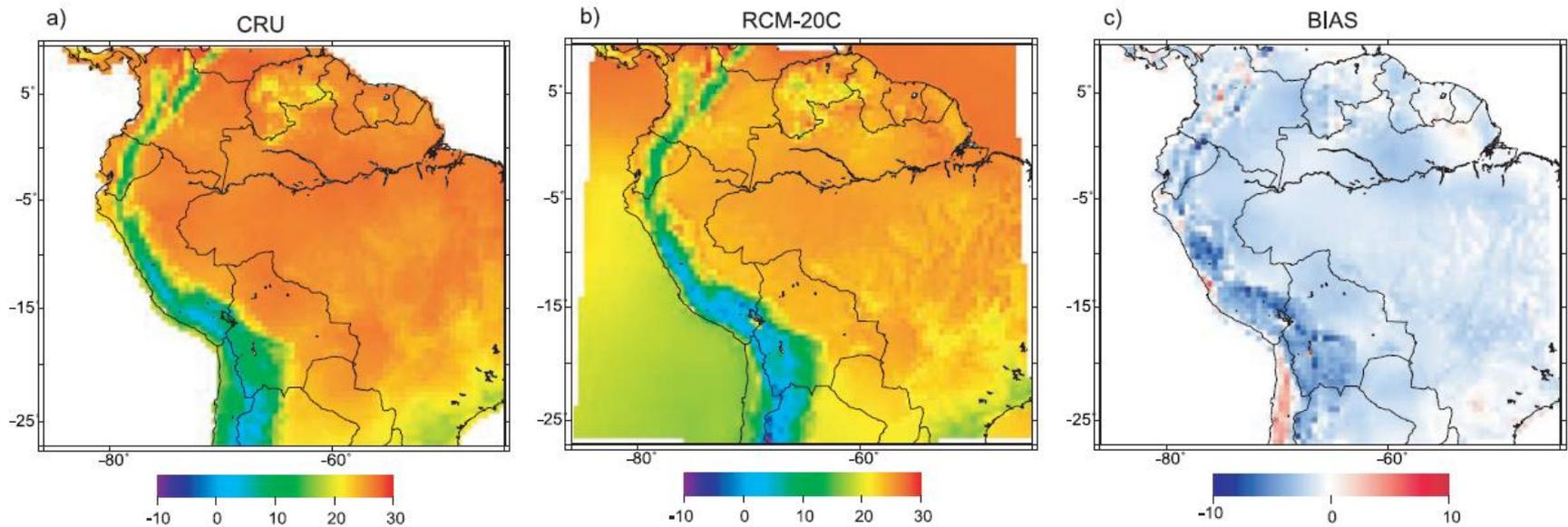
- Capacidad del modelo para simular el clima actual. Comparar los resultados del modelo con las observaciones y los datos de reanálisis.
- Aislamiento de los componentes individuales de física del modelo, como su parametrización, y comprobar las estadísticas del modelo contra la realidad.
- La capacidad del modelo para reproducir la diversidad de climas de la tierra antigua o incluso de otros planetas.
- Una intercomparación entre varios modelos diseñado para descubrir las razones y reducir la actual dispersión entre modelos (“model intercomparison”)

## Comparación con observaciones

D02108

URRUTIA AND VUILLE: CLIMATE CHANGE IN THE TROPICAL ANDES

D02108



**Figure 2.** (a) Observed annual mean surface air temperature (SAT) in °C based on CRU (1961–1990). (b) Same as in Figure 2a but for RCM-20C. (c) Difference between CRU and RCM-20C.

→ **persisten muchas incertidumbres, no obstante, el realismo de los modelos del clima ha mejorado:**

- \* mayor resolución
- \* parametrizaciones más basados en la física
- \* acoplamiento de procesos más completa

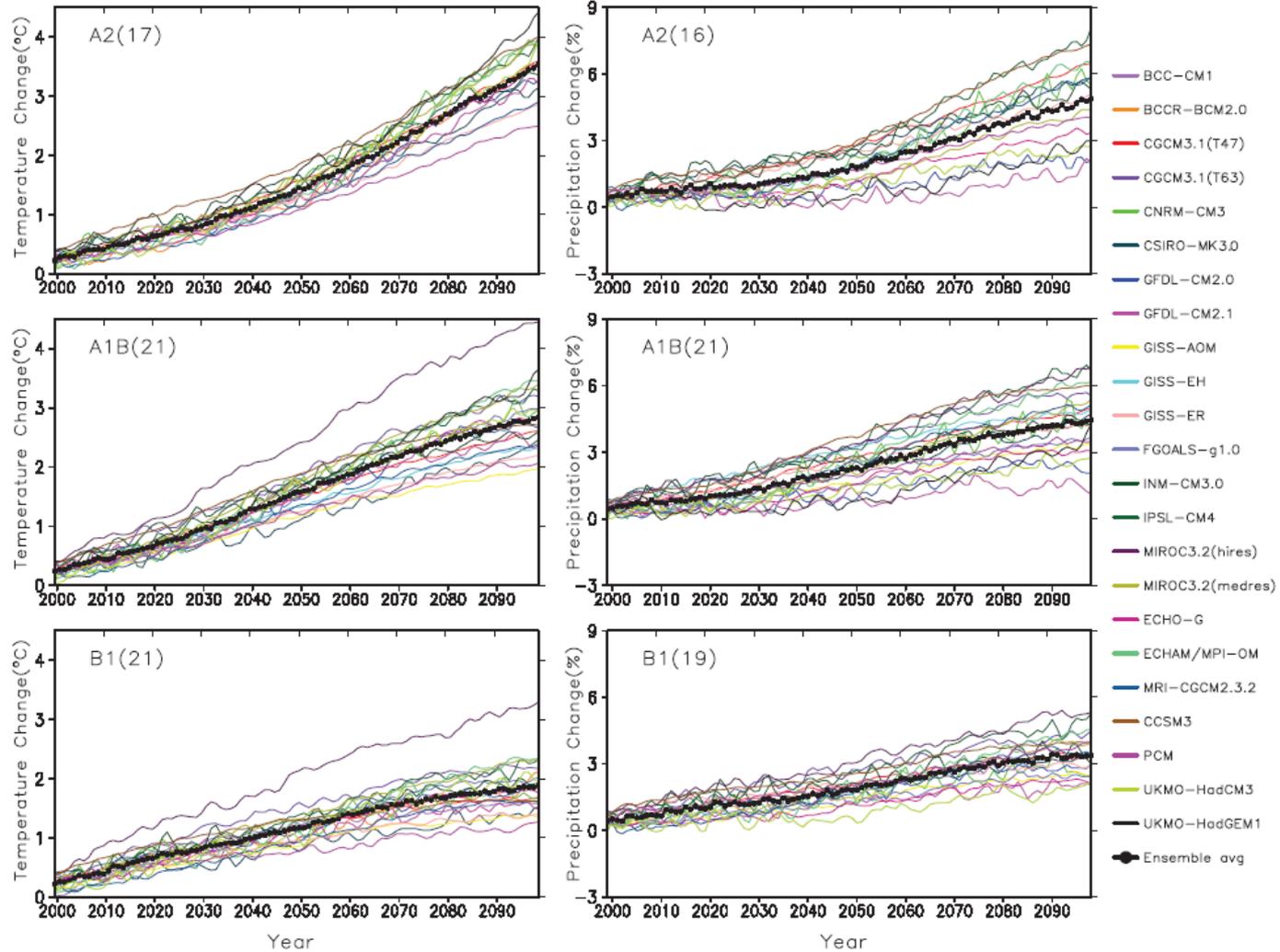
**Recuerde,**

todos los modelos climáticos representan una simplificación del sistema climático y por lo tanto deben utilizarse con cuidado y sus resultados ser interpretados con precaución debido.

**Los márgenes de incertidumbre deben estar conectado a cualquier proyección del modelo.**

***LOS MODELOS NO SON PERFECTOS!***

# La incertidumbre y niveles de confianza en los modelos acoplados



**Figure 10.5.** Time series of globally averaged (left) surface warming (surface air temperature change, °C) and (right) precipitation change (%) from the various global coupled models for the scenarios A2 (top), A1B (middle) and B1 (bottom). Numbers in parentheses following the scenario name represent the number of simulations shown. Values are annual means, relative to the 1980 to 1999 average from the corresponding 20th-century simulations, with any linear trends in the corresponding control run simulations removed. A three-point smoothing was applied. Multi-model (ensemble) mean series are marked with black dots. See Table 8.1 for model details.

## Modelos climaticos

- Incertidumbres en modelos
- Procesos desconocidos
- Problemas de Escala
- Parametrizaciones
- Retroefectos en el sistema climatico

## Escenarios de Emisiones

- ¿Cómo vamos a seguir viviendo?
- La conversión de las emisiones a las concentraciones atmosféricas.
- La conversión de las concentraciones a un forzamiento radiativo.

**Las proyecciones del cambio climático**

# Parte IV

## AOGCMs y el IPCC



*Kimmo Ruosteenoja, Timothy R. Carter,  
Kirsti Jylhä and Heikki Tuomenvirta*

**Future climate in world regions:  
an intercomparison of model-based  
projections for the new IPCC  
emissions scenarios**

# AOGCMs incluidos en reportes IPCC

AOGCMs analizados por Ruostenoja et al. (2003)

MODEL	COUNTRY	GRID	N	L	DT <sub>glob</sub> (°C)
CCSR/NIES	Japan	5.6x5.6°	2048	20	4.4
CGCM2	Canada	3.8x3.8°	4608	10	3.5
CSIRO Mk2	Australia	3.2x5.6°	3584	9	3.4
ECHAM4/OPYC3	Germany	2.8x2,8°	8192	19	3.3
GFDL R30	U.S.A.	2.2x3.8°	7680	14	3.1
<b>HadCM3</b>	United Kingdom	2.5x3.8°	7008	19	3.2
NCAR DOE PCM	U.S.A.	2.8x2.8°	8192	18	2.4

# Echam4 (1)



Max-Planck-Institut  
für Meteorologie

- \* El modelo se basa en el modelo de pronóstico meteorológico del Centro Europeo para la predicción meteorológica (ECMWF).
- \* Numerosas modificaciones se han aplicado a este modelo en el Instituto de Meteorología Max Planck y el Centro Alemán de Cómputo del Clima (DKRZ) para su uso en pronósticos del clima, y ahora es un modelo de la cuarta generación.

# Echam4 (2)



Max-Planck-Institut  
für Meteorologie

- \* Es un modelo de transformación espectral.
- \* Considera la atmósfera dividida en 19 capas.
- \* La rejilla (grid) utilizada es del tipo T42, con una resolución o cuadrícula de  $2.8^\circ$
- \* La cuadrícula tiene 128 x 64 celdas (grid points), 128 en longitud y 64 en latitud.
- \* Los datos disponibles en el IPCC permiten visualizar solo comparaciones con clima observado.

# Echam4 (3)



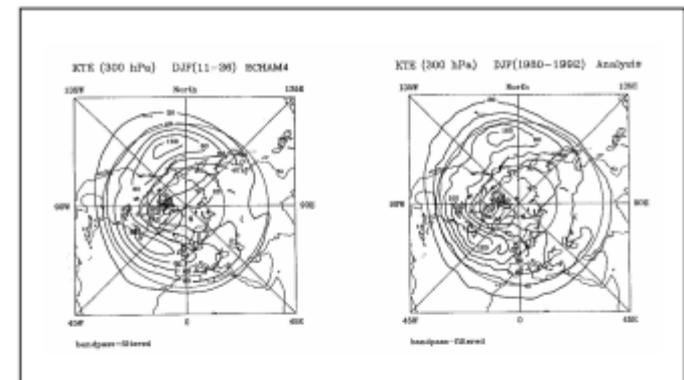
Max-Planck-Institut  
für Meteorologie

- Están disponibles las siguientes variables:
  - ✓ Temperaturas media, máxima y mínima.
  - ✓ Precipitación.
  - ✓ Presión media al nivel del mar.
  - ✓ Radiación solar incidente.
  - ✓ Velocidad del viento.



**Max-Planck-Institut  
für Meteorologie**

REPORT No. 218



THE ATMOSPHERIC GENERAL CIRCULATION MODEL  
ECHAM-4: MODEL DESCRIPTION AND SIMULATION OF  
PRESENT-DAY CLIMATE

by

E. Roeckner • K. Arpe • L. Bengtsson • M. Christoph • M. Claussen • L. Dümenil  
M. Esch • M. Giorgetta • U. Schlese • U. Schulzweida

HAMBURG, September 1996



# GFDL R30 (1)



- \* El modelo R30 es uno de los proyectos del **Geophysical Fluid Dynamics Laboratory** - University Consortium (GFDL), llevado a cabo al simular las condiciones medias del ciclo climático global en los últimos 17 años.
- \* Este proyecto cuenta con la colaboración de NOAA y la oficina de administración oceánica y atmosférica de Estados Unidos.

# GFDL R30 (2)



- \* La rejilla (grid) utilizada tiene una resolución de 2.25 latitud x 3.75 longitud
- \* La cuadrícula tiene 96x 80 celdas (grid points)
- \* Considera la atmósfera dividida en 14 niveles verticales
- \* El modelo cuenta con la variación de insolación, temperatura del mar y capas de hielo polares diarias.
- \* Esta disponible la simulación con los escenarios A2 y B2.

# HadCM3 (1)



- \* HadCM3 son las siglas de la versión 3 del Modelo Acoplado del Hadley Centre.
- \* Desarrollado en 1999.
- \* Fue la primera configuración climática de modelo unificado que no requiere ajustes de flujo (ajustes artificiales para evitar estados de clima poco realistas).
- \* Es uno de los principales modelos utilizados por el IPCC.

# HadCM3 (2)



- \* El componente atmosférico tiene 19 niveles con una resolución horizontal de 2,5 grados de latitud por 3,75 grados de longitud, que produce una rejilla de celdas de la cuadrícula global de 96 x 73. Esto es equivalente a una resolución de la superficie de alrededor de 417 kilómetros x 278 kilómetros en el ecuador, lo que reduce a 295 km por 278 kilómetros a 45 grados de latitud.

# HadCM3 (3)



- \* El componente oceánico tiene 20 niveles con una resolución horizontal de  $1,25 \times 1,25$  grados. En esta resolución es posible representar detalles importantes en las estructuras actuales oceánicas.

# HadCM3 (4)

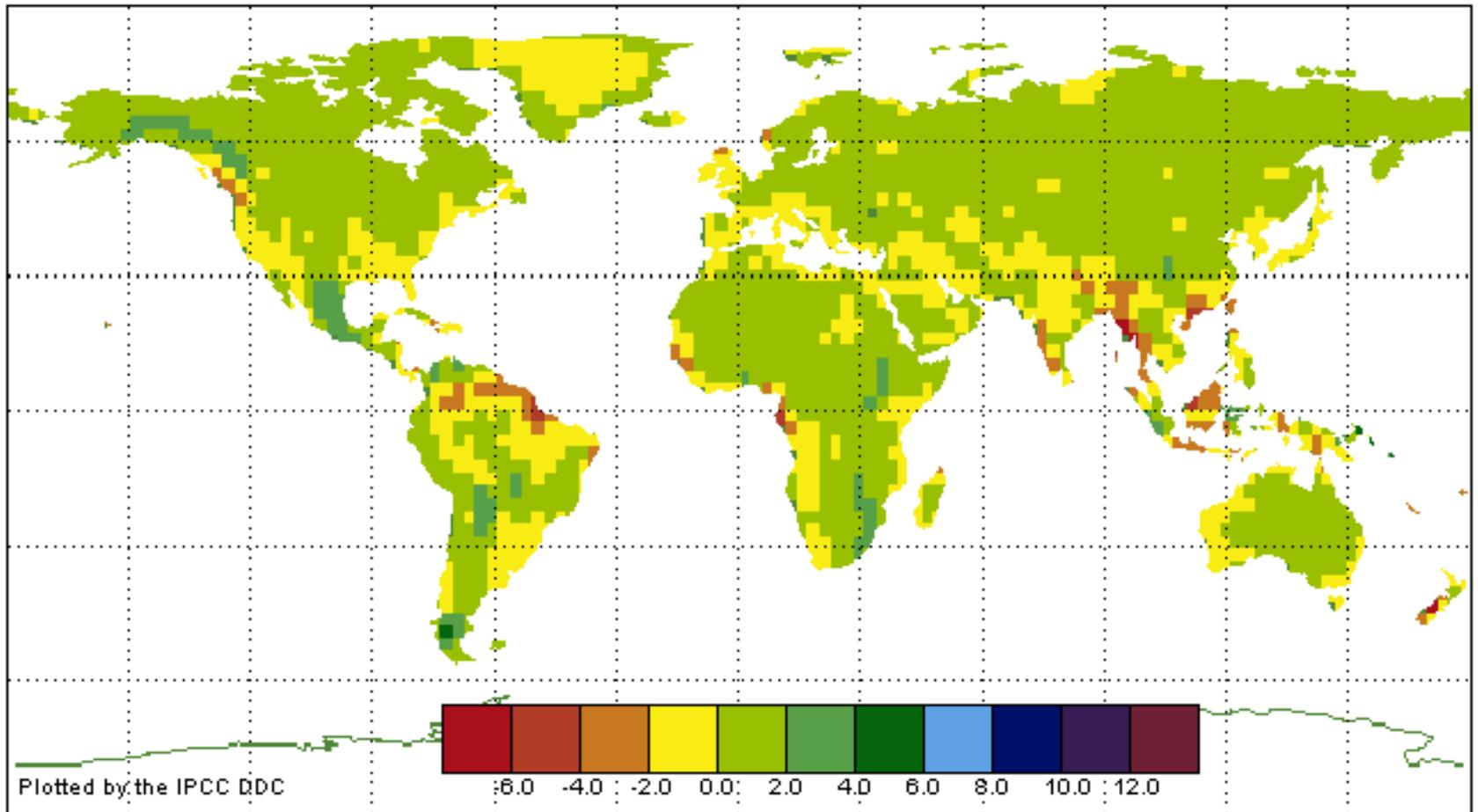


- \* La máscara mar-tierra del modelo es la siguiente:



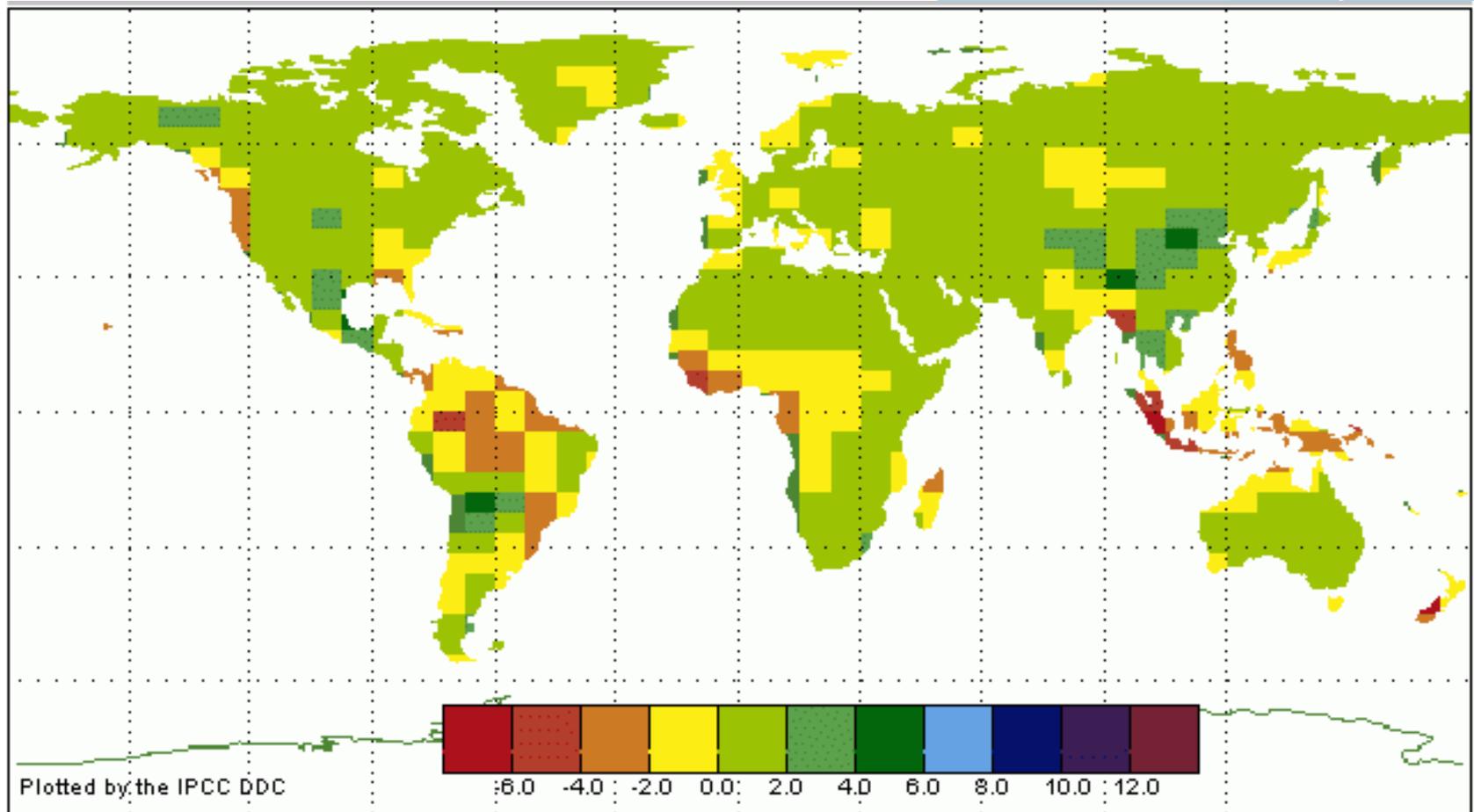
# ¿Qué tan precisos son?(1)

\* ECHAM4:



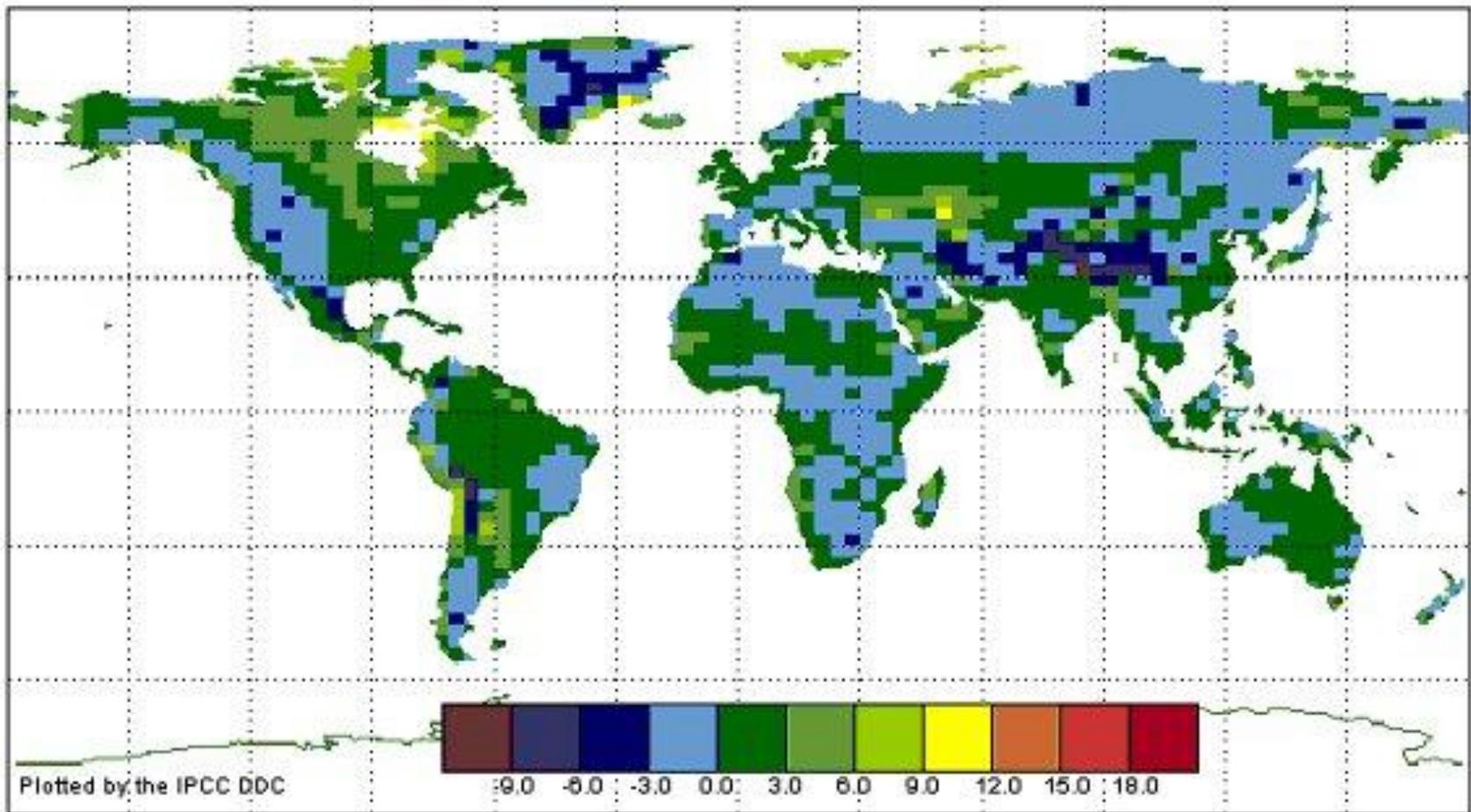
# ¿Qué tan precisos son?(1)

\* GFDL R30:



# ¿Qué tan precisos son?(1)

\* Hadcm3:



# ¿Qué tan precisos son?(1)

\* Visualizaciones de modelos en:

<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/java/visualisation.html>

# Modelos climáticos regionales

- \* La regionalización se realiza usualmente mediante dos procesos:

## FORTALEZAS Y DEBILIDADES DE LA REDUCCIÓN DE ESCALA ESTADÍSTICA COMPARADA CON LA DINÁMICA (SEGÚN FOWLER ET AL. 2007)<sup>26</sup>

	<i>Estadística</i>	<i>Dinámica</i>
<b>Ventajas</b>	<p>Comparativamente barata e informáticamente eficiente.</p> <p>Puede proporcionar variables climáticas en la escala de puntos a partir de los datos de salida de un MCG.</p> <p>Puede incorporar directamente las observaciones en el método.</p>	<p>Produce respuestas con base en procesos físicamente homogéneos.</p> <p>Puede resolver procesos atmosféricos a una escala menor (por ejemplo, efectos orográficos y de sombra pluvial en las zonas montañosas).</p>
<b>Desventajas</b>	<p>Depende de la elección de los predictores.</p> <p>No toma en cuenta el carácter no estacionario de la relación entre el predictor y el pronóstico.</p> <p>No incluye retroalimentaciones del sistema climático regional afectado por los sesgos en los MCG subyacentes.</p>	<p>Informáticamente intensiva.</p> <p>Disponibilidad de un número limitado de conjuntos de escenarios.</p> <p>Depende de que se fuercen los límites del MCG afectado por sesgos en el MCG subyacente.</p> <p>Depende de las parametrizaciones de los MCR.</p> <p>MCR diferentes darán resultados diferentes.</p>

# Aplicación de Modelos climáticos regionales en Perú

---

**Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno).**

**Climate change scenarios using regional models for the Peruvian Altiplano (Department of Puno)**

**JANEET SANABRIA<sup>1</sup>, JOSE MARENGO<sup>2</sup> & MARIA VALVERDE<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI, Casilla 11 1308, Lima 11, Perú.  
jsanabria@senamhi.gob.pe

<sup>2</sup> Centro de Ciencias do Sistema Terrestre-INPE. Rodovia Presidente Dutra, Km 40, 12630-000 Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil.

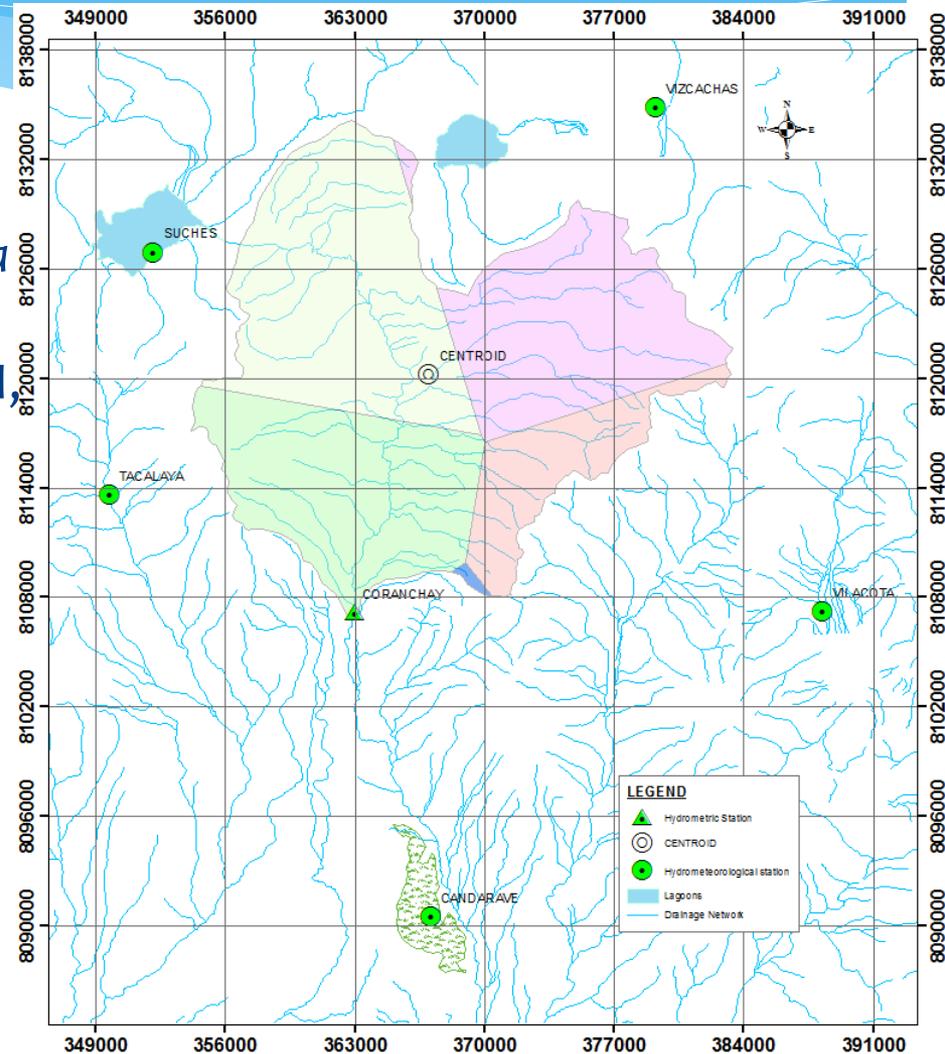
---

# Parte V

## Ejemplo de Aplicación

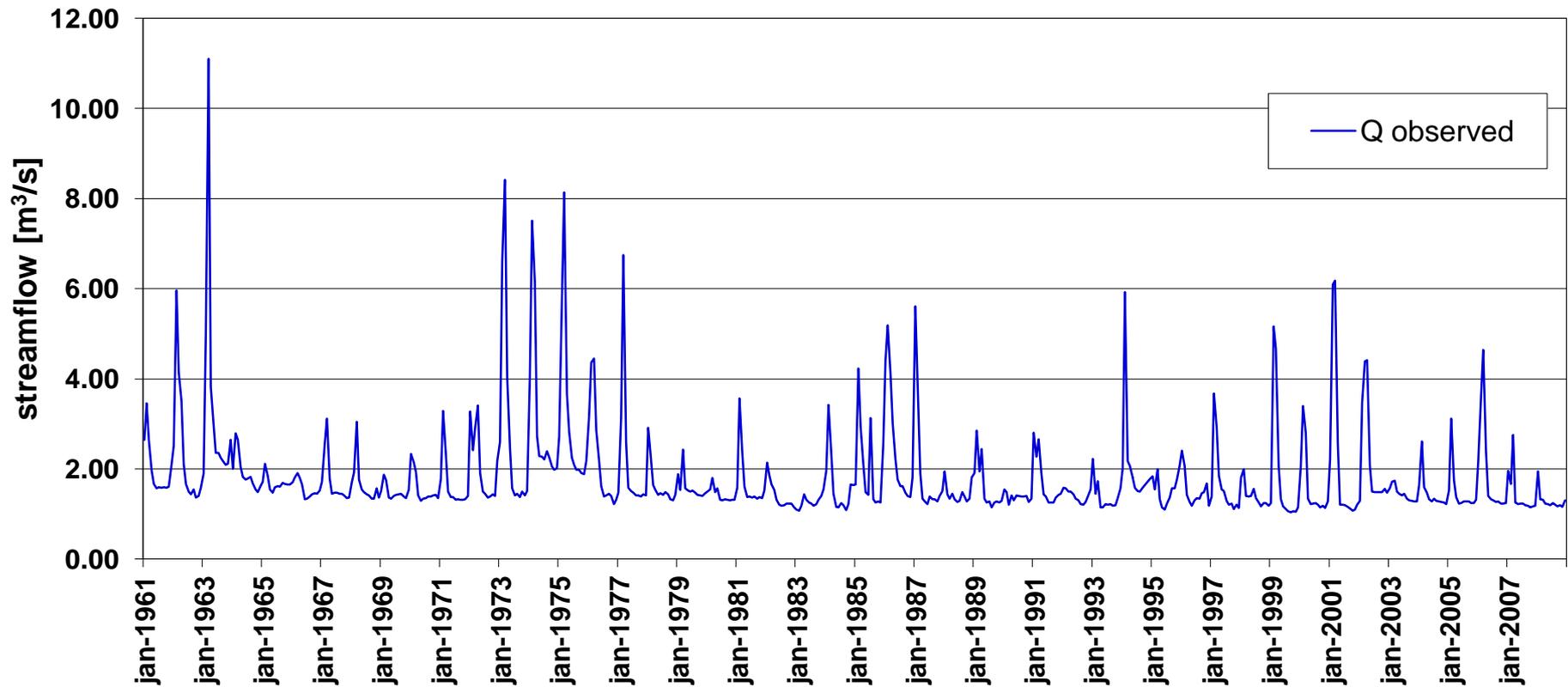
# Data (1)

- \* Data extraída del “Estudio de factibilidad: construcción de defensa ribereña y encausamiento del río Ilabaya y Locumba en los sectores de Chejaya, Ilabaya y Oconchay. Informe Final” (MDI, 2009).



# Data (2)

\* Precipitación media



## High-resolution gridded datasets

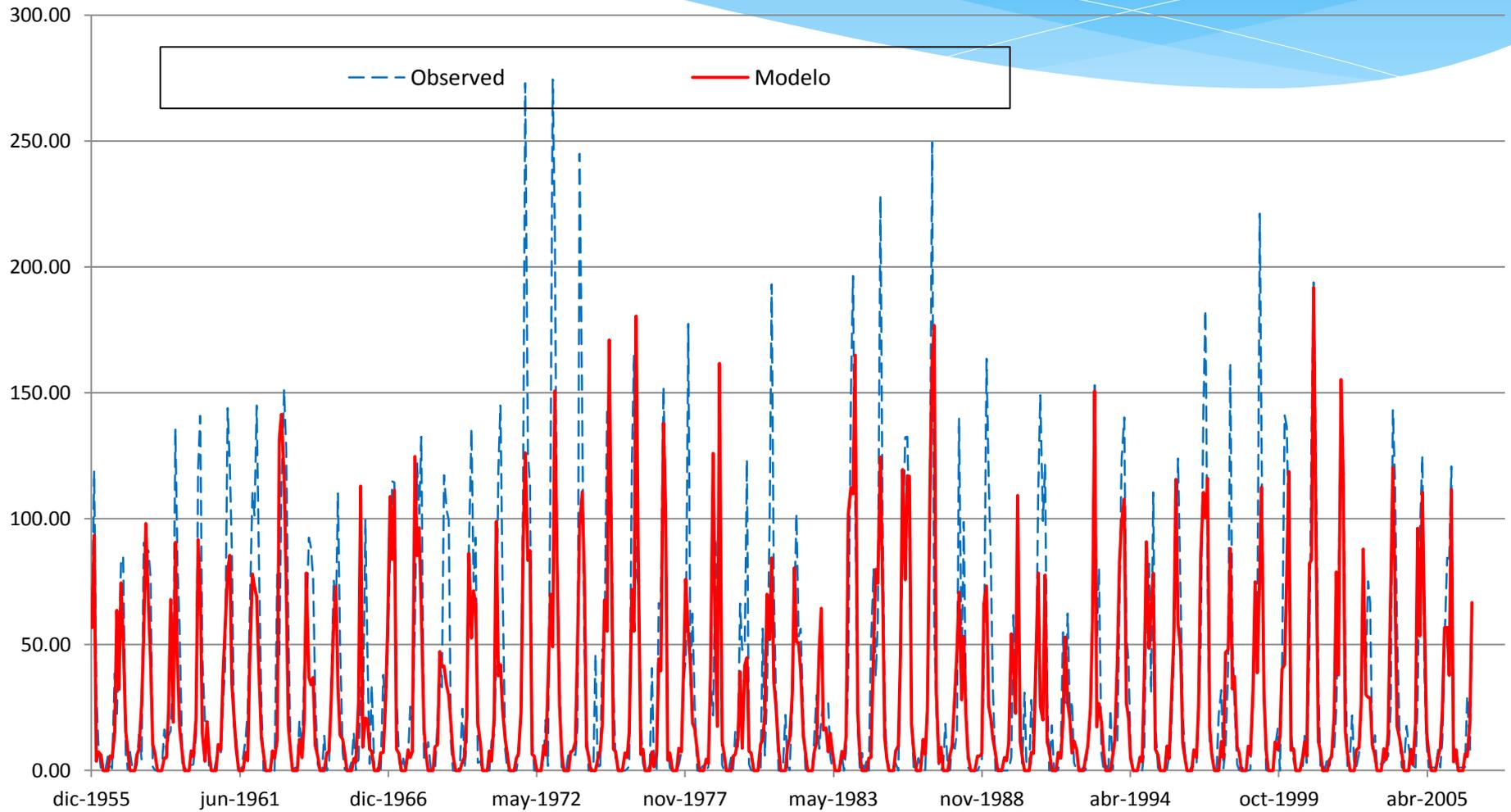
This table presents the high-resolution gridded climate datasets available from the Climatic Research Unit. We have developed a consistent form of identification for these data-sets to provide greater clarity to users. We recommend that any users of these data-sets should use these labels to refer to these data-sets.

Where the status is marked as 'available on request', please email [cru@uea.ac.uk](mailto:cru@uea.ac.uk), stating which dataset(s) you require and the area of research you intend to use them in. Please do not request those datasets marked as 'superseded', unless you are certain that you require them.

**Please always reference the listed papers when using these datasets**

data-set	space	time	variety	variables	<a href="#">reference</a>	status
<a href="#">CRU CL 1.0</a>	0.5° global	1961-1990	climatology	pre, wet, tmp, dtr, vap, spc, cld, frs, wnd	New et al, 1999	available (via the IPCC-DDC)
<a href="#">CRU CL 2.0</a>	10' global	1961-1990	climatology	pre, wet, tmp, dtr, rhm, ssh, frs, wnd	New et al, 2002	available for download
<a href="#">CRU CL 2.1</a>	10' Europe	1961-1990	climatology	cld, vap	Mitchell et al, 2003	available on request
<a href="#">CRU TS 1.0</a>	0.5° global	1901-1995	time-series	pre, tmp, dtr, wet, vap, cld, frs	New et al, 2000	available on request but superseded by CRU TS3.00
<a href="#">CRU TS 1.1</a>	0.5° global	1996-1998	time-series	pre, tmp	New et al, 2000; extended	available on request but superseded by CRU TS3.00
<a href="#">CRU TS 1.2</a>	10' Europe	1901-2000	time-series	pre, tmp, dtr, vap, cld	Mitchell et al, 2003	available for download
<a href="#">CRU TS 2.0</a>	0.5° global	1901-2000	time-series	pre, tmp, dtr, vap, cld	Mitchell et al, 2003	available for download superseded by CRU TS3.00
<a href="#">CRU TS 3.00</a>	0.5° global	1901-2000	time-series	pre, tmp, dtr, vap, cld	Mitchell et al, 2007	available for download

# CRU (2)



# Serie Corregida (1)

- \* Para corregir la serie, se asumió un modelo exponencial mensual.

Optimized parameters

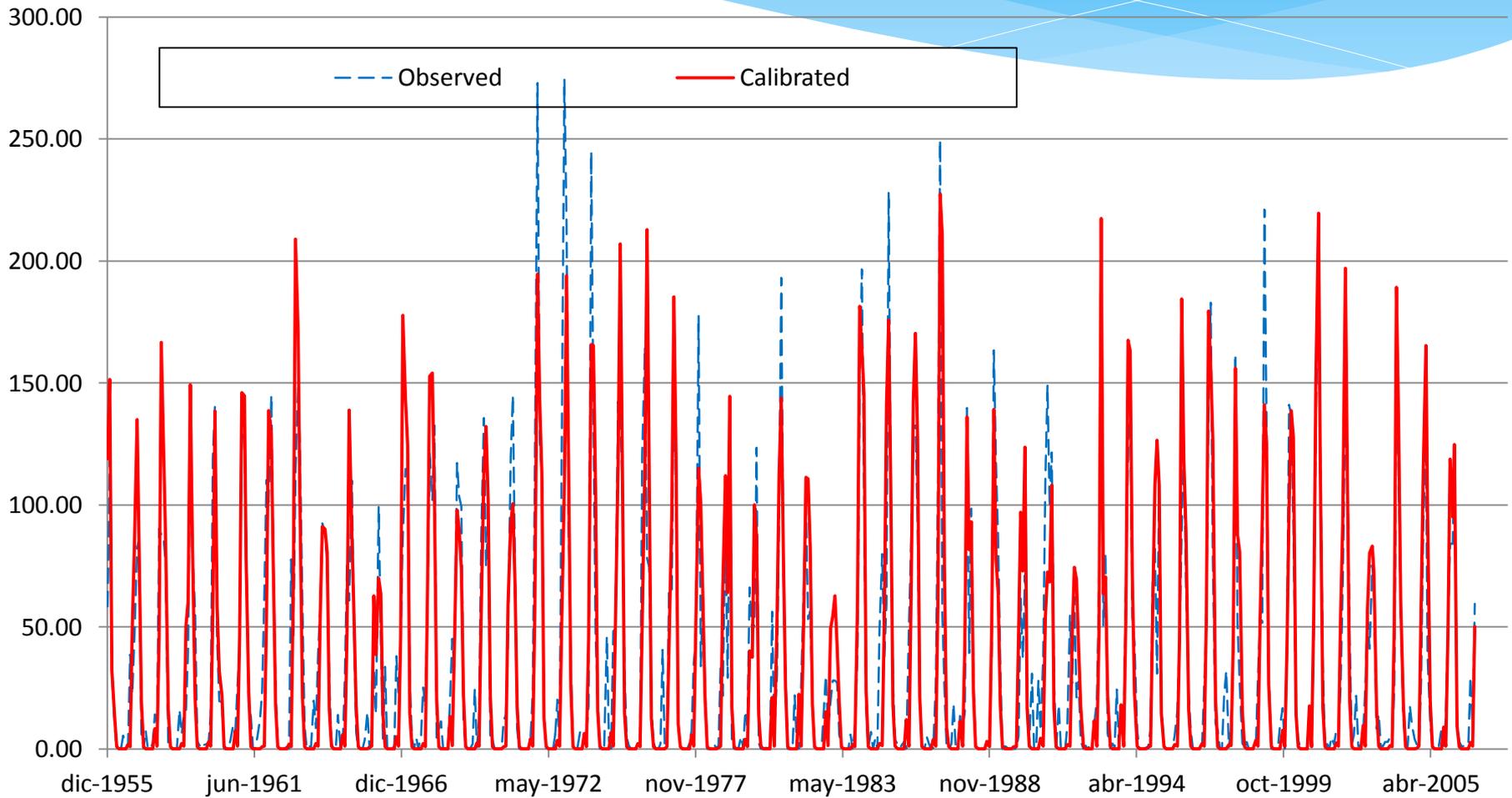
	Coeficiente	Exponente
jan	9.8028	0.6178582
feb	14.6234	0.5154412
mar	19.1646	0.3973639
apr	5.2020	0.4851601
may	1.6372	-0.256788
jun	0.0000	0.0707147
jul	0.0000	0.0707147
aug	0.0000	0.0699169
sep	0.0422	0.0488898
oct	0.0314	2.6019826
nov	0.6310	0.1778015
dec	8.4545	0.4242117

*Objective Function =>*

*SUM[e<sup>2</sup>(t)]=min 8883.9565*

*Mass balance => 0.0000*

# Serie Corregida (2)



# Conclusiones

# Conclusiones (1)

- \* Los modelos climatológicos son una herramienta que permite obtener información meteorológica en zonas que no cuentan con información.
- \* La resolución espacial del modelo seleccionado es un factor que determina su selección.
- \* Los datos obtenidos deben contrastarse con información de estaciones cercanas para validar su comportamiento.

# Conclusiones (2)

- \* Es necesario investigar la validez estadística de las series de tiempo, especialmente para las diferentes zonas geográficas del país.

¡GRACIAS!