

# REPRESENTACIÓN EN MODELOS DE TIEMPO Y CLIMA DE LAS NUBES DE CAPA LÍMITE

D. Olmeda (1)

E. Sanchez (2)

J. Cuxart (2)

(1) Servicio de Variabilidad y Predicción del Clima. INM

(2) Servicio de Modelización Numérica del Tiempo. INM

## RESUMEN

Las nubes son uno de los fenómenos meteorológicos de más difícil representación en los modelos numéricos de la atmósfera. Su gran importancia en los balances de energía y materia las convierten en factores clave para una integración realista de dichos modelos. En el marco del proyecto europeo *EUROCS*<sup>1</sup> se procede al estudio de varios regímenes nubosos de capa límite: ciclo diurno de estratocúmulos sobre océanos, ciclo diurno de cúmulos de buen tiempo y ciclo diurno de convección profunda sobre tierra. A través de la simulación explícita de estos regímenes con modelos no hidrostáticos de muy alta resolución, se evalúan las parametrizaciones frente a las observaciones. Mediante este procedimiento, se identifican y evalúan las carencias de las diferentes parametrizaciones, para su posterior mejora en las implementaciones de los modelos operativos. En esta presentación se mostrarán los trabajos realizados en el INM con los modelos *MESO-NH* y *HIRLAM-ID*.

## 1. Introducción

Como refleja el último informe de la IPCC ( Conferencia Intergubernamental del Cambio Climático) el rol de las nubes en el sistema climático es una de las mayores fuentes de incertidumbre en la evaluación del cambio climático antropogénico. La existencia de nubes altera de forma drástica el flujo de radiación solar, al tener un albedo muy alto ( 0.6-0.8 ) en comparación con el de las superficies oceánica ( 0.05 ) o terrestre ( 0.2 ). Su efecto a escalas sinóptica y sub-sinóptica es también significativo, ya que afectan a los intercambios y distribuciones de humedad y calor en la capa límite. La alteración del balance radiativo en superficie, determinará finalmente la intensidad con la que los flujos de superficie lleguen a la troposfera. Por otro lado la predicción de fenómenos de tiempo severo, basada en la distribución de la precipitación convectiva media y extrema, depende en gran medida de una buena representación de las nubes en los modelos de predicción operativa.

## 2. Objetivo

El objetivo del proyecto "*European Project on Cloud Systems in Climate Models*" ( *EUROCS* ), es mejorar el tratamiento de los sistemas nubosos en modelos atmosféricos tanto a escala regional como global. Con el fin de integrar estudios de nubes en las distintas bandas de escala, *EUROCS* basa su estrategia en el uso de una jerarquía de modelos y de observaciones. Los modelos numéricos usados van desde los "*General Circulation Models*" ( GCM ) de baja resolución ( decenas de km ), hasta los "*Large Eddy Simulations*" ( LES ) de resolución muy alta ( decenas de m ). Las observaciones varían desde observaciones globales realizadas desde satélites hasta observaciones locales de nubes individuales realizadas con lidares o radares milimétricos.

Otros modelos usados son:

◆ Los de una sola dimensión, "*Single Column Models*" ( SCM ): Un modelo SCM es una columna aislada del resto del modelo tridimensional con la misma física que el GCM completo. El rol de estos modelos es hacer de unión entre los GCMs y los datos recogidos en las campañas de observación. Una limitación de los SCM es su incapacidad para representar las interacciones de los sistemas nubosos con la circulación a gran escala, de forma que las tendencias advectivas han de ser impuestas externamente.

---

<sup>1</sup> <http://www.cnrm.meteo.fr/gcss/EUROCS/EUROCS.html>

♦ Los "*Cloud Resolving Models*" ( CRM ): Un CRM es un modelo capaz de resolver circulaciones a escala de nube. Por ejemplo puede representar células convectivas individuales ( de unos pocos kms ) mientras que su dominio abarca el sistema convectivo entero. Por el contrario, un GCM con una resolución típica de 100 km, no los puede resolver y necesita por tanto parametrizar el conjunto de los efectos de estos procesos. Estos efectos que son difíciles de deducir directamente de las observaciones, pueden sin embargo, ser determinados fácilmente de las simulaciones de un CRM.

Finalmente las parametrizaciones, aisladas del marco de la dinámica de gran escala de los GCMs, ya chequeadas en los SCM pueden ser transferidas directamente al GCM tridimensional

Los modelos usados por el INM en el proyecto son:

- **HIRLAM-1D:**

El modelo atmosférico HIRLAM-1D es la versión SCM del modelo tridimensional HIRLAM operativo.

La física empleada para la representación de estos casos es la de la versión operativa actualmente en el INM : el esquema de turbulencia sin condensación (seco) CBR y el de condensación-convección STRACO.

- **MESO-NH:**

El modelo MESO-NH (modelo no-hidrostático de simulación a mesoescala) (J. Cuxart y otros, 1999) en este proyecto se usa en las dos configuraciones siguientes, como SCM y como LES:

a) Como modelo unidimensional a alta resolución vertical. Usa básicamente la misma física que HIRLAM-1D (excepto que los procesos de condensación están incluidos en el esquema de turbulencia CBR "húmedo"), pero en condiciones ideales. Se utiliza como parametrización de referencia frente a la implementación operativa en HIRLAM.

b) Como modelo CRM, simulando los casos de Sc y Cu con ciclo diurno a muy alta resolución (a escala de nube) para obtener diagnósticos de la física de cada caso , funcionando como laboratorio numérico

La estrategia **EUROCS** consiste en, a través del estudio de los casos que se especifican a continuación, formular nuevas parametrizaciones y probarlas en los modelos para ver su impacto tanto en integraciones cortas en los modelos operativos de predicción como en las simulaciones climáticas a largo plazo.

### 3. Casos de estudio

Como deficiencias bien identificadas en los modelos climáticos pueden citarse:

- la representación de estratocúmulos sobre el océano
- el ciclo diurno de cúmulos sobre tierra
- el ciclo diurno de la precipitación producida por convección profunda sobre tierra
- la sensibilidad de la convección profunda al perfil de humedad

Este trabajo se centrará en el estudio de los dos primeros casos de nubes bajas expuestos anteriormente: estratocúmulos y cúmulos de convección somera. Ambas se consideran nubes de capa límite en las cuales el flujo turbulento es su característica fundamental.

#### 3.1 Caso FIRE: ciclo diurno de estratocúmulos marinos

Los estratocúmulos aparecen con bastante frecuencia sobre extensas áreas oceánicas, y con períodos de permanencia muy altos. Se forman en las regiones de fuerte subsidencia en los bordes orientales de los anticiclones subtropicales de los océanos Pacífico y Atlántico.

Al tratarse de nubes bajas, el calentamiento neto que producen en la emisión de onda larga no compensa el déficit de calentamiento solar que producen al reducirse la radiación de onda corta que alcanzaría la superficie si no estuvieran. Por lo tanto, su existencia produce un efecto de enfriamiento neto en la atmósfera.

Los modelos atmosféricos tienden a subestimar la cobertura nubosa de este tipo de nubes. Este error da lugar a un exceso del flujo de calor descendente y como resultado un exceso de la temperatura del agua del mar. Este exceso de temperatura en un modelo acoplado océano-atmósfera supone un error sistemático que puede tener una gran influencia en la circulación general.

Para el estudio de la representación de estratocúmulos sobre el océano consideramos un ciclo diurno completo de estratocúmulos sobre la costa de California basadas en las observaciones del "*First ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) Regional Experiment (FIRE)*" (Albrecht, B. A., 1988).

La campaña de observación **FIRE**, llevada a cabo en Junio y Julio de 1987, tuvo lugar mar adentro en las proximidades de la costa californiana. La finalidad era el estudio de la extensa capa de estratocúmulos que son una característica persistente en la capa límite marina subtropical. Por primera vez se realizaron medidas a tanto a escala regional como a escala local, lo suficientemente pequeña para permitir una interpretación lo más amplia posible de las características químicas, radiativas y microfísicas de dichas nubes. La interacción entre estas propiedades ejerce un papel preponderante en el control de la estructura y evolución de los estratocúmulos.

En la campaña se realizaron medidas "*in situ*" desde aviones. Estos datos proporcionaron un puente entre la microescala y las características de macroescala observadas desde satélites. En la Isla de San Nicolás, sita en la región de referencia, se instalaron satélites e instrumentos de medida terrestres.

Las condiciones sinópticas que favorecen la aparición de estratocúmulos sobre el océano son:

- La existencia de subsidencia a gran escala con una zona de estratificación condicionalmente inestable y otra estable por encima, de tal forma que la convección profunda queda suprimida, y las nubes queden confinadas en una estrecha capa.
  - Un aporte de humedad desde el suelo suficiente como para compensar los factores que tienden a secar esa capa como son el "*entrainment*" en la cima de la nube (mezcla a pequeña escala del aire seco de alrededor con el húmedo de la nube), la subsidencia de grandes masas de aire seco y caliente desde arriba, y el calentamiento por absorción de radiación solar o por flujos de calor en superficie.
- Ambas condiciones se cumplen en la región oceánica donde se realiza el estudio.

### 3.2 Caso ARM: ciclo diurno de cúmulos de buen tiempo

Los modelos atmosféricos suelen fallar en la representación de la fase del ciclo diurno de la cobertura nubosa de cúmulos de convección somera sobre tierra. Este hecho tiene unas consecuencias muy importantes en el comportamiento de la capa límite, en tanto en cuanto afecta al intercambio de energía con la superficie. Una representación inadecuada de la actividad convectiva afectará de igual forma a la predicción de la temperatura y humedad del suelo, lo que puede ser decisivo en la predicción del posible desarrollo de una actividad convectiva más profunda. Además, una correcta representación de los cúmulos condiciona el transporte de energía y materia desde el suelo hasta la atmósfera libre.

Para el estudio del ciclo diurno de cúmulos someros sobre tierra nos basamos en las observaciones realizadas por el programa **ARM** en la región de las grandes planicies del sur americano (en los estados de Kansas y Oklahoma), el 21 de Junio de 1997 (Zhang, M.H. and Lin, J.L., 1997).

**ARM** (*Atmospheric Radiation Measurement Program*) es el mayor programa de investigación de cambio global patrocinado por el departamento de energía americano (DOE).

## 4. Descripción de los experimentos y resultados de las simulaciones

### 4.1 Caso FIRE<sup>2</sup>

Para simular un ciclo diurno de estratocúmulos sobre el océano, se emplean datos de la campaña **FIRE** (Duynderke, P.G. and J. Teixeira, 2000). Se parametriza la radiación de onda corta en función de la cantidad integrada de agua líquida y del ángulo cenital, para así generar un ciclo diurno de calentamiento-enfriamiento. Se prescriben unos perfiles de temperatura y humedad bien mezclados respecto a sus variables conservativas, temperatura potencial del agua líquida ( $\theta_l$ ) y proporción de mezcla total ( $r_t$ ), con una fuerte inversión alrededor de 600m (con una variación de temperatura potencial y de la proporción de mezcla del vapor de agua de  $\Delta\theta=12K$  y  $\Delta r_v=-3g\ kg^{-1}$ , respectivamente) representativos de las condiciones de esa zona oceánica durante la campaña observacional. Además se prescriben una subsidencia y unos forzamientos de gran escala también basados en las observaciones, constantes en el tiempo.

La simulación se integra durante 37 horas en un dominio de 50x50x120 puntos de rejilla, con una resolución horizontal de  $\Delta x= \Delta y=50m$  (para el LES), y vertical de  $\Delta z=10m$ . En la Figura 1 se muestran los resultados con el modelo Meso-NH en tanto modo LES (3D), como en modo SCM (1D).

---

<sup>2</sup> [http://www.phys.uu.nl/~wwwimau/EUROCS/eurocs\\_art.html](http://www.phys.uu.nl/~wwwimau/EUROCS/eurocs_art.html)

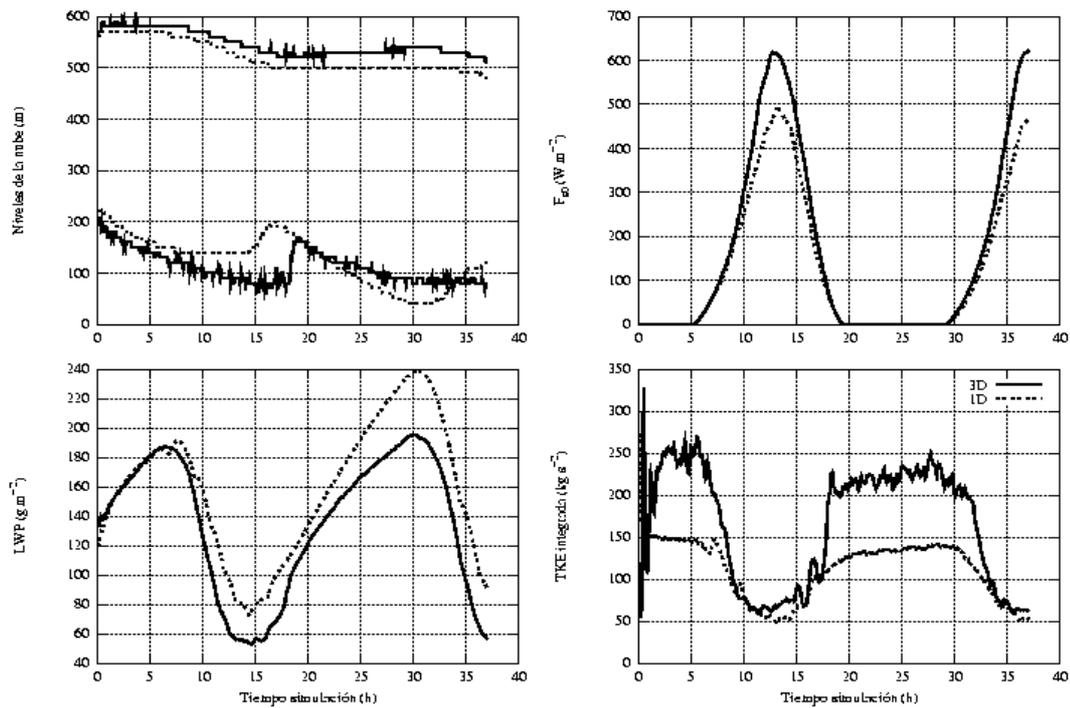


Figura 1: Series temporales . Modelo MESO-NH: LES y SCM

En la Figura 1 se muestran las series temporales de: el ciclo diurno de la radiación (arriba derecha), la altura de la cima y la base de la nube (arriba izquierda), la cantidad de agua integrada verticalmente “LWP” (abajo izquierda), y la energía cinética integrada verticalmente “TKE” (abajo derecha). Se puede ver claramente que los máximos de radiación entre las 12-14 horas de simulación corresponden con un mínimo de la cantidad de agua de la nube, y de energía, mientras que en torno a las 23-27 h estamos en condiciones claramente nocturnas, y los valores son entonces máximos.

Es conocido que la radiación de onda corta tiende a debilitar la capa de estratocúmulos al contribuir a un aumento de la evaporación en la capa límite, y también en un aumento relativo de la estabilidad de la capa nubosa respecto a la capa inferior, lo que da lugar a un menor suministro de humedad desde el suelo. En cambio, de noche la nube suele ser mas gruesa y vigorosa, como así se observa en estos resultados.

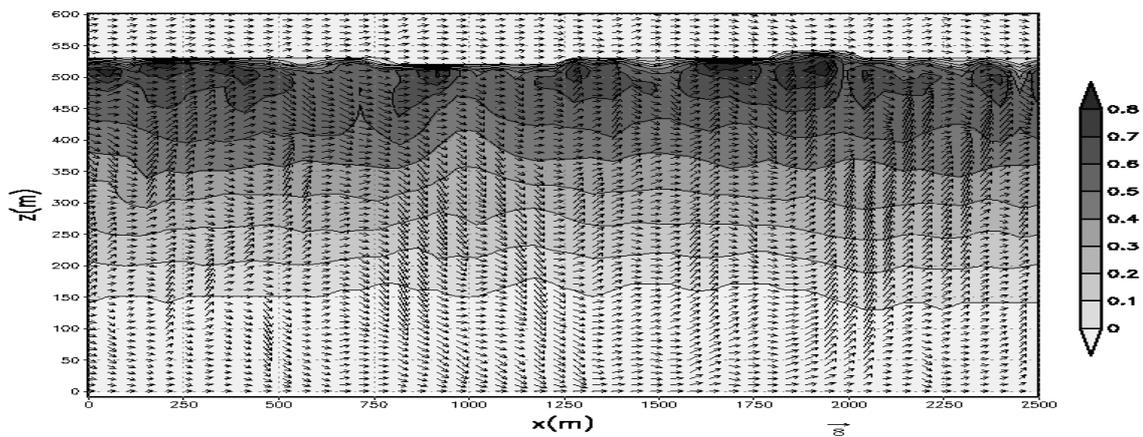


Figura 2: LES: corte vertical del contenido de agua líquida (g/kg)

El modelo LES también permite observar estructuras tridimensionales que presentan dichas nubes, como se ve en la Figura 2. En esta figura se muestra un corte vertical de la cantidad de agua en el estratocúmulo, en  $\text{g kg}^{-1}$ , durante la hora 23 (condiciones nocturnas), junto con el viento, con la componente vertical

magnificada en un orden de magnitud respecto al valor horizontal, para apreciar mejor los ascensos y descensos.

De la observación de las figuras podemos concluir que, el modelo MESO-NH, tanto en su version LES como en modo columna, captura el ciclo diario de la capa de estratocúmulos. Por otro lado, aunque los resultados 1D no describen con igual precisión que los 3D algunos de los aspectos de esta capa límite nubosa, si son capaces de mostrar los aspectos cualitativos comentados en este párrafo.

#### 4.2 Caso ARM<sup>3</sup>

En esta simulación se pretende reproducir el comportamiento de un campo de cúmulos de poco desarrollo sobre tierra, y para ello se emplearon datos de la campaña **ARM**. Se prescribe un forzamiento de calor y humedad cíclico en el suelo del dominio, como factor principal modulador del mismo (gráfica superior derecha. Figura 3 ). Los perfiles iniciales de humedad y temperatura muestran una inversión mucho más débil que en el caso anterior, y se encuentra cerca de las condiciones saturantes, aunque en promedio no alcancen dicho valor. Se prescriben unos forzamientos externos que también presentan una variación cíclica. En estos modelos, la parametrización de los procesos de condensación submalla que permita que la célula esté “parcialmente” condensada (pues en promedio la celda probablemente esté en condiciones subsaturadas) es fundamental para obtener resultados razonables.

La simulación se integró durante 14 horas y media con un  $\Delta z=40$  m en el MESO-NH-1D y 40 niveles en la vertical en el HIRLAM-1D (equivalente a 14 niveles en los 2 primeros kilómetros y 3 o 4 niveles en la nube).

A continuación se muestran resultados de las simulaciones unidimensionales tanto de MESO-NH como de HIRLAM

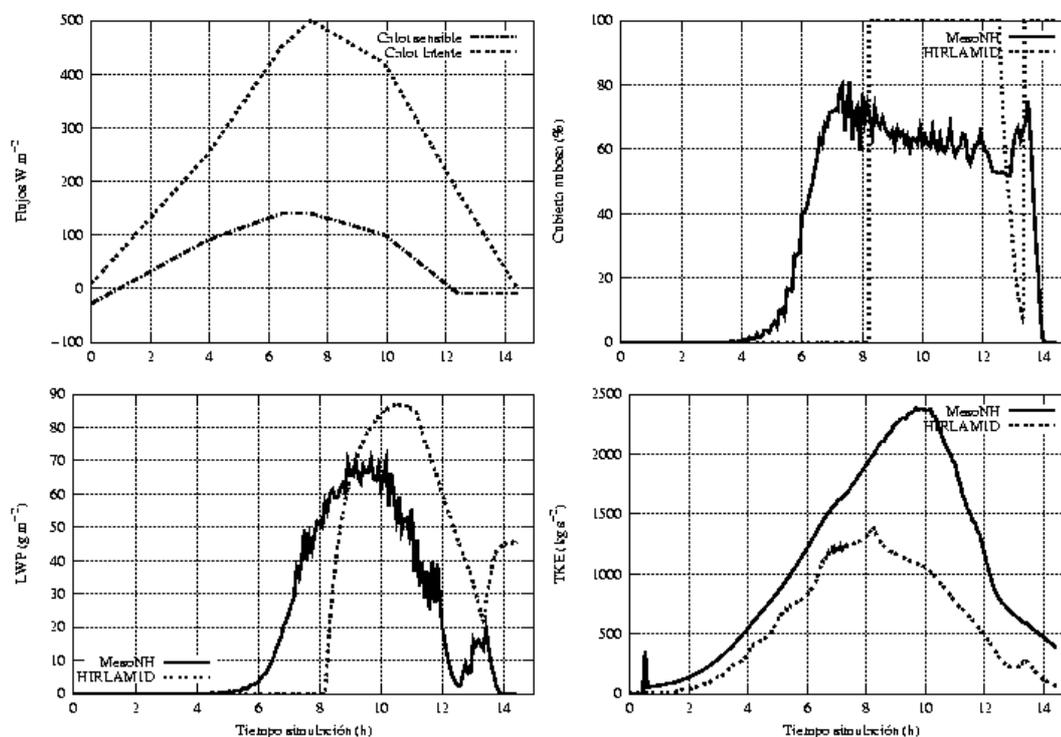


Figura 3: Series temporales. Modelos SCM: HIRLAM y MESO-NH

<sup>3</sup> <http://www.knmi.nl/samenw/eurocs/ARM>

Ambas simulaciones presentan deficiencias en la representación del ciclo diurno de nubosidad, cuando se comparan con los resultados de los modelos LES (de otros grupos participantes en el proyecto) y las observaciones. No obstante, MESO-NH consigue una cobertura nubosa menor del 100% y una caída total de la nubosidad al final del período, es decir tiene un comportamiento que al menos cualitativamente es cercano al esperado, mientras que los resultados con HIRLAM-1D son bastante defectuosos, pues no son capaces de generar una capa con cúmulos, tendiendo a crear estratocúmulos (cobertura nubosa del 100%), de dinámica completamente diferente, además de cierto retraso en el comienzo de la formación de las nubes.

## 5. Conclusiones y perspectivas

Los resultados del modelo MESO-NH están dentro de la línea del resto de los grupos: Los LES son consistentes entre sí y con las observaciones; mientras que los SCM difieren más entre ellos y son más sensibles a los forzamientos y a los perfiles iniciales. MESO-NH-1D es capaz de reproducir de forma realista el ciclo diurno. Sin embargo el modelo HIRLAM-1D, tiene limitaciones en la representación de la capa límite nubosa.

Las líneas de trabajo que se están desarrollando para mejorar las deficiencias encontradas son:

1. Para HIRLAM-1D, permitir que el propio esquema de turbulencia (CBR) represente los procesos de condensación en la capa límite (CBR húmedo), como así parecen apuntar los resultados de MESO-NH-1D
2. Un esquema de convección que sea capaz de representar este tipo de nubosidad convectiva de bajo desarrollo (esquema Kain – Fritsch), pues es conocida la limitación del esquema STRACO en este caso.
3. El uso simultáneo de las dos propuestas anteriores constituye un estudio de gran interés, pues por una parte resultan complementarios en la interacción turbulencia-condensación-convección, y debe buscarse una consistencia física entre ambos, y por otra, es probable que se estén tratando algunos procesos simultáneamente, por lo que deben analizarse cuidadosamente las posibles duplicaciones.
4. Con el soporte del modelo LES, profundizar en el análisis del cierre del esquema de turbulencia a través de la longitud de mezcla, así como el estudio detallado del comportamiento del esquema de condensación submalla, en relación con CBR húmedo para MESONH-1D.

## Referencias:

- Albrecht, B.A. y otros, 1988: Observations of marine stratocumulus clouds during FIRE. Bull. Amer. Soc., **69**,618-626
- Duynkerke, P.G and J. Teixeira, 2000: Comparison of the ECMWF Re-analysis with FIRE I observations: Diurnal variation of marine stratocumulus. Journal of Climate, **14**, 1466-1478
- J. Cuxart y otros, 1999: A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. Q. J. R. Meteorol. Soc., **126**,1-30
- Zhang, M.H., and Lin, J.L.,1997: Constrained variational analysis of sounding data based on column-integrated budgets of mass, heat, moisture and momentum: approach and application to ARM measurements. J. Atmos. Sci., **54**, 1503-1524