

## Comunicación D-8

# ESTUDIO DE DIFERENTES ESQUEMAS DE LA DIFUSIÓN HORIZONTAL EN EL MODELO HIRLAM

Isabel Martínez Marco

Servicio de Predicción Numérica (INM)

### RESUMEN

*Las ecuaciones de un modelo de predicción numérica contienen un término de difusión horizontal. El ruido de alta frecuencia de pequeña escala se puede desarrollar durante la predicción como un resultado de la cascada de energía a escalas pequeñas. La difusión horizontal se necesita para filtrar dicho ruido. En este trabajo se estudian diferentes esquemas de difusión horizontal, tanto explícitos como implícitos, con el fin de implantar el esquema más adecuado en los modelos operativos HIRLAMINM\_0,5° y HIRLAMINM\_0,2°. Se estudió la variación temporal del promedio en todo el área de integración de varias variables así como el espectro relativo de energía cinética asociado a cada experimento.*

### 1. Introducción

Actualmente, los modelos de predicción numérica poseen un brazo de rejilla (distancia entre dos puntos de rejilla contiguos) que hace que sean incapaces de describir la mezcla horizontal de masas de aire en escalas espaciales más pequeñas que dicho brazo. Si no existe una parametrización de la difusión horizontal que tenga en cuenta las escalas no resueltas, la enstrofia potencial se acumula en las escalas más pequeñas en el modelo. Tal acumulación, conocida como «bloqueo espectral»), da lugar a una desviación del espectro de energía observado y es visible tanto como un excesivo ruido de pequeña escala como una variación de la vorticidad potencial. Por lo tanto, es necesario incluir esquemas de difusión horizontal que imiten las mezclas de escala subrejilla quitando enstrofia potencial en las escalas pequeñas. Si no incluye una condición de cierre única, existe una infinidad de posibles esquemas para parametrizar las mezclas horizontales no resueltas. Es de esperar que, según la resolución del modelo se incrementa, sea posible ajustar el esquema de difusión para dar resultados de gran escala de acuerdo con las observaciones. Debido a que las interacciones entre todas las escalas espaciales son no lineales, no está claro que todos los esquemas convergerán a tal límite.

Los esquemas más comúnmente utilizados son los hiper-laplacianos donde la tendencia de cualquier variable del modelo está dada por:

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} = -(-1)^q K \nabla^{2q} \chi \quad [1]$$

donde  $\chi$  es la variable en cualquier superficie de presión o sigma. El caso de  $q = 1$  fue utilizado por Bourke (1974) y se conoce como proceso de difusión Fickian. Si la difusión Fickian describe adecuadamente o no los procesos de mezcla no lineales en la atmósfera es una cuestión debatible. Lo que si se observa es que para amortiguar las pequeñas escalas se necesitan valores de  $K$  tan grandes que también amortiguan las grandes escalas y por tanto el esquema no es suficientemente selectivo. Debido a la eficiencia en el cálculo de los operadores hiper-laplacianos en los modelos espectrales, los esquemas de hiper-difusión con  $q > 1$  han sido muy utilizados.

El efecto de los esquemas de difusión horizontal en el comportamiento de las ondas baroclínicas de latitudes medias, especialmente en la fase de decaimiento de su ciclo de vida, puede ser crucial en reproducir con exactitud la circulación general.

Las ecuaciones de un modelo de predicción numérica contienen un término de difusión horizontal. El ruido de alta frecuencia de pequeña escala se puede desarrollar durante la predicción como un resultado de la cascada de energía a escalas pequeñas. La difusión horizontal se necesita para filtrar el ruido y conservar la señal meteorológica. En muchos casos la difusión horizontal se expresa más en términos de un filtro matemático que en términos de una disipación física.

## 2. Propiedades de los esquemas de difusión horizontal

En el sistema de referencia HIRLAM se emplea un esquema explícito lineal de cuarto orden. Este método se supone que afecta a las escalas más pequeñas. Para cualquier variable  $X$  este esquema se define como:

$$K_x = -K(\eta) \nabla^4 X^{n-1} \quad [2]$$

donde  $n$  se refiere al paso de tiempo y  $K(\eta)$  es el coeficiente de difusión, que puede depender de la variable vertical  $\eta$ . En la versión operativa con un esquema de difusión horizontal explícito, el coeficiente de difusión  $K$  se considera constante en la vertical y con el mismo valor para  $u$ ,  $v$ ,  $T$  y  $q$ .

El comportamiento de cualquier operador se puede estudiar por su función de respuesta  $R$  que se define como:

$$R = X' / X \quad [3]$$

donde  $X'$  se refiere a los valores filtrados. Para que el operador  $R$  sea estable debe cumplir que  $|R| \leq 1$  y para asegurar que no hay cambios de fase es necesario que  $R \geq 0$ .

Por ejemplo, si los coeficientes métricos son iguales a 1,  $\Delta x = \Delta y = 0,5^\circ$  y  $\Delta t = 180$  s la condición de estabilidad se cumple si

$$0 \leq K \leq 2,42 \quad [4]$$

En la práctica esto significa que el valor del coeficiente de difusión horizontal no puede aumentar o disminuir más allá de estos límites, de otra manera el esquema es inestable.

De las ecuaciones anteriores se deduce que si el paso de tiempo o el brazo de rejilla varían, el valor del coeficiente  $K$  también deberá variar para que la cantidad de difusión sea la misma. Así, si tenemos

dos versiones del inodelo, la versión 1 con  $K_1, \Delta t_1$  y  $\Delta x_1$  y la versión 2 con  $K_2, \Delta t_2$  y  $\Delta x_2$ , la relación entre  $K_1$  y  $K_2$  será:

$$K_1 = \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} K_2 \quad [5]$$

Por lo tanto, si el esquema utilizado se resuelve de forma explícita, su estabilidad está condicionada a los valores del coeficiente de difusión  $K$ .

Otra posibilidad es resolver dicho esquema de forina implícita que es absolutamente estable, es decir, su estabilidad no depende de los valores del coeficiente de difusión  $K$ . Sin embargo, es necesario ajustar tal valor para que el espectro de energía resuelto por el modelo esté de acuerdo con el observado; pues si no fuera así se produciría una desviación del modelo de la circulación general.

Por otra parte, al ser absolutamente estable nos permite más difusión y por tanto eliminar el exceso de ruido que se acumula en las escalas pequeñas y que era perceptible en el modelo operativo explícito HIRLAMINM\_0,5°, especialmente en el campo de temperaturas y en la presencia de precipitación espúrea debajo de los anticiclones atlánticos. En el modelo operativo explícito HIRLAMINM\_0,2° se observaba ruido de pequeña escala en la temperatura a 2 m al mediodía en días con fuerte calentamiento y en la precipitación sobre el océano.

Como consecuencia de lo anterior, decidimos comenzar un estudio de los diferentes esquemas de difusión horizontal. Lo primero que hicimos fue aumentar el valor del coeficiente de difusión del esquema explícito. Efectivamente, esto dio buenos resultados y inuchos de los problemas mencionados desaparecían. Sin embargo, debido a la condición de estabilidad CFL no siempre eran posibles valores tan altos del coeficiente de difusión. A continuación decidimos incluir el esquema de difusión horizontal implícito, absolutamente estable, desarrollado por A. McDonald junto al nuevo código del resolvente de Helmholtz que paliaría el aumento de tiempo de cálculo del esquema implícito (relación de 107 a 100 de tiempo de CPU utilizando el esquema implícito de cuarto orden frente al explícito del mismo orden) (A. McDonald, 1995).

### 3. Estudio de los diferentes esquemas de difusión horizontal de cuarto orden

Desde el principio, decidimos elegir esquemas de difusión implícita de cuarto orden puesto que el tiempo de CPU no aumenta excesivamente, ya que nuestro objetivo era montarlo en las pasadas operativas.

La difusión horizontal fue aplicada a lo largo de superficies híbridas para las componentes del viento  $u$  y  $v$  y para la humedad específica  $q$  y a lo largo de superficies de presión para la temperatura  $T$ .

En los diferentes experimentos, el coeficiente de difusión fue constante en la vertical salvo en los cinco niveles superiores, situados en la estratosfera, donde el coeficiente para cada nivel se obtiene del coeficiente en el nivel anterior multiplicado por dos, salvo para los dos últimos que tienen el mismo coeficiente. De esta manera el valor del coeficiente de difusión para los dos últimos niveles es 16 veces el valor de los niveles inferiores. Es una relación semejante a la existente en otros modelos operativos como por ejemplo en el CEPPM. En las situaciones en las cuales el análisis presenta un excesivo ruido, estas capas eliminan gran parte del mismo, no siendo necesarias en otros casos y no alterando el valor de las variables su presencia. Estas capas se denominan capas absorbentes.

Se han realizado varios experimentos con el modelo HIRLAMINM\_0,5° con el mismo coeficiente para todas las variables:

- a) experimento OPR: difusión horizontal explícita de cuarto orden con  $K = 0,3 \cdot 10^{14}$
- b) experimento DIS: difusión horizontal implícita de cuarto orden con  $K = 3,5 \cdot 10^{14}$ .
- c) experimento DI2: difusión horizontal implícita de cuarto orden con  $K = 2,0 \cdot 10^{14}$ .

Del mismo modo, se han realizado varios experimentos con el modelo HIRLAMINM\_0,2°:

- a) experimento HIR: difusión horizontal explícita de cuarto orden con  $K = 0,2 \cdot 10^{14}$  para las componentes de la velocidad  $u$  y  $v$  y para la temperatura  $T$  y  $K = 0,05 \cdot 10^{14}$  para la humedad específica  $q$ .
- b) experimento H12: difusión horizontal implícita de cuarto orden con  $K = 2,0 \cdot 10^{14}$  para las componentes de la velocidad  $u$  y  $v$  y para la temperatura  $T$  y  $K = 0,5 \cdot 10^{14}$  para la humedad específica  $q$ .
- c) experimento HNL: difusión horizontal implícita de cuarto orden con  $K = 1,0 \cdot 10^{14}$  para las componentes de la velocidad,  $u$  y  $v$  y para la temperatura  $T$  y  $K = 0,25 \cdot 10^{14}$  para la humedad específica  $q$ .
- d) experimento BDN: difusión horizontal implícita de cuarto orden con  $K = 1,0 \cdot 10^{14}$  para todas las variables excepto  $K = 0,25 \cdot 10^{14}$  para la humedad específica  $q$  en los ocho niveles inferiores (capa límite).

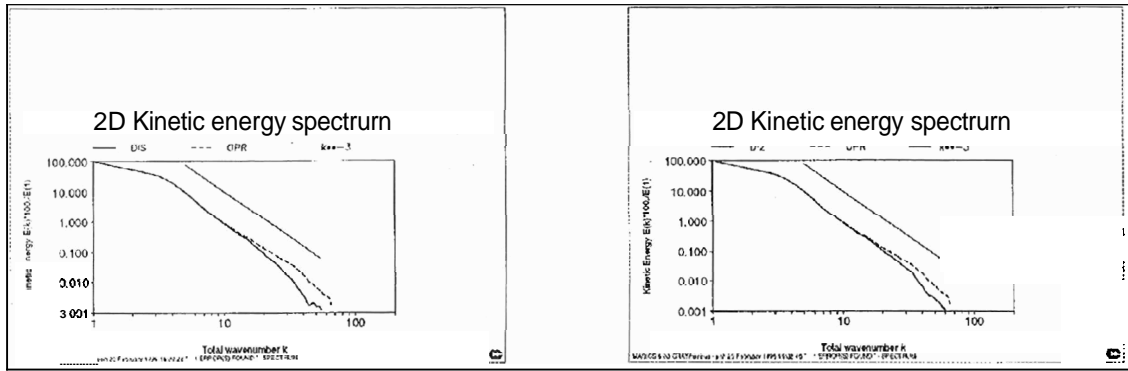
Estos experimentos fueron analizados por tres vías:

- a), Comparando los espectros relativos de energía cinética de los experimentos explícitos e implícitos con el espectro relativo teórico de la atmósfera  $K^{-5}$ .
- b) Se realizaron integraciones largas (hasta 96 horas en el modelo HIRLAMINM\_0,5° y hasta 48 horas en el modelo HIRLAMINM\_0,2°) y se estudió la variación temporal del promedio en todo el área de integración de las siguientes variables:
  - presión en superficie,
  - energía cinética,
  - humedad específica,
  - contenido de agua de nube y
  - energía potencial y total.
- c) Y simplemente observando los campos básicos del modelo.

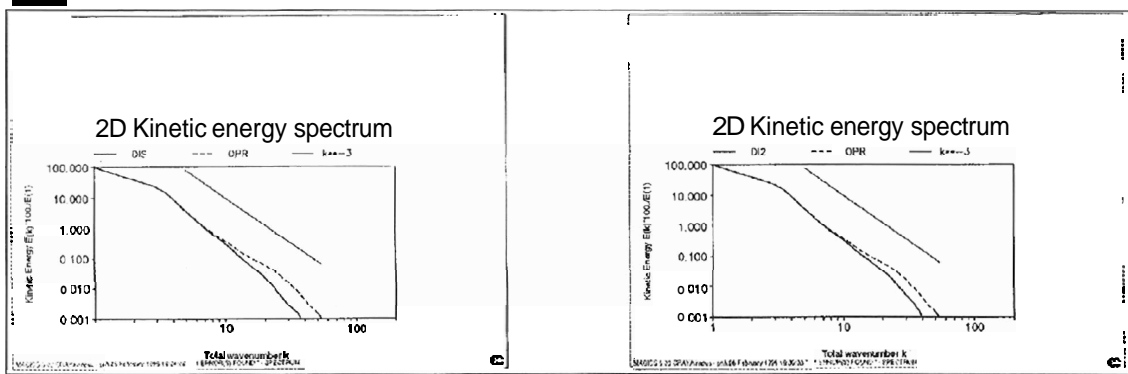
#### 4. Conclusiones

Respecto al modelo HIRLAMINM\_0,5°, utilizando el esquema implícito de la difusión horizontal frente al explícito cabe destacar:

- Disminuye el ruido de pequeña escala en todos los campos en niveles bajos y medios, especialmente en las zonas oceánicas.
- Desaparece gran parte de la precipitación espúrea que se observaba debajo de los anticiclones atlánticos.
- La energía cinética es ligeramente menor, pero no se producen variaciones significativas en los campos de viento.
- La energía global no varía, debido a que la energía potencial es mucho mayor que la cinética.
- La humedad específica y el contenido de agua de nube son mayores y la precipitación total es menor. La causa puede estar en que, al aumentar la difusión, son más los puntos con valores altos de la humedad específica pero menos los puntos que alcanzan el valor de referencia para comenzar a precipitar.
- Si aumentamos el coeficiente de difusión por encima de  $K = 2,0 \cdot 10^{14}$ , el espectro relativo de energía cinética promediado en los niveles superiores se aleja del espectro relativo teórico de la atmósfera e incluso realimenta el ruido de pequeña escala al aumentar la energía de ondas pequeñas (Figs. 1 y 2).



**Fig. 1.** Espectros relativos de energía cinética de los experimentos explícito (OPR) e implícitos y espectro relativo teórico de energía cinética de la atmósfera ( $K^{-3}$ ), promediados para todos los niveles



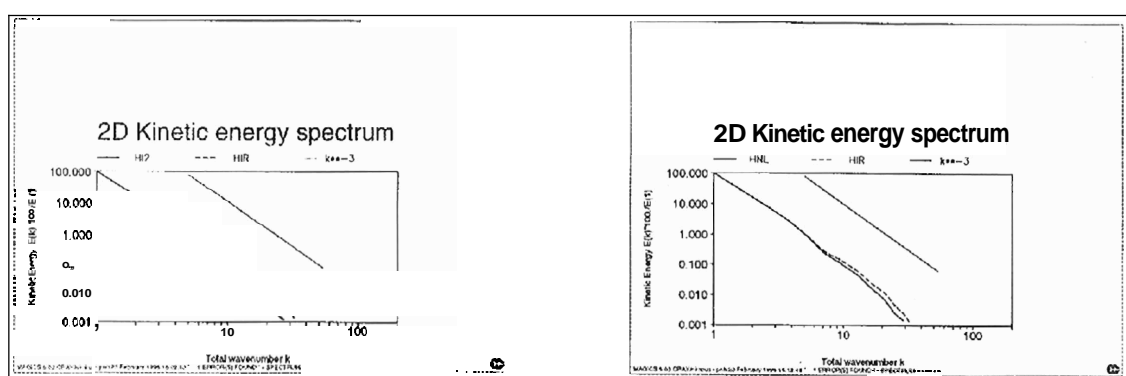
**Fig. 2.** Espectros relativos de energía cinética de los experimentos explícito (OPR) e implícitos y espectro relativo teórico de energía cinética de la atmósfera ( $K^{-3}$ ), promediados para los niveles superiores

Como consecuencia de lo expuesto, se decidió elegir para la pasada operativa el esquema implícito con coeficiente de difusión constante con la altura y el mismo para las componentes horizontales del viento  $u$  y  $v$ , la temperatura  $T$  y la humedad específica  $q$ . El valor de dicho coeficiente es  $K = 2,0 \cdot 10^{14}$  (experimento D12). No se eligieron los experimentos con mayor coeficiente pues se eliminaban longitudes de onda de escala sinóptica y se suavizaban en exceso estructuras como el chorro.

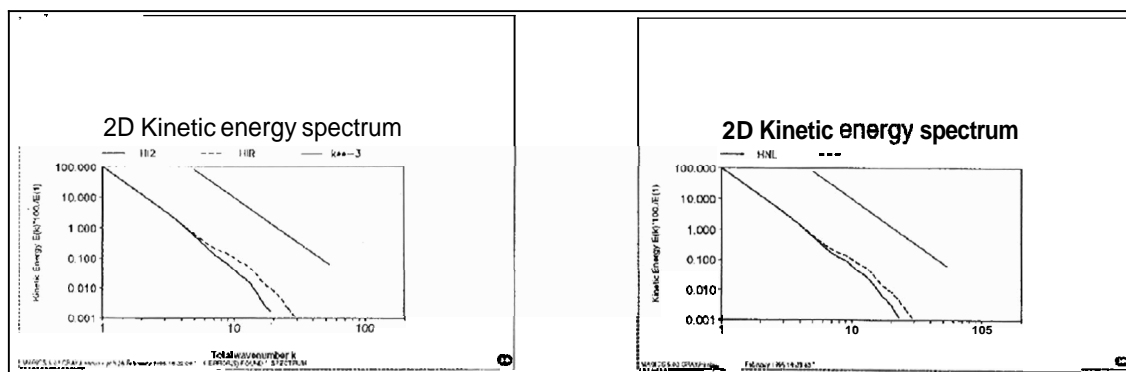
Respecto al modelo HIRLAMINM\_0,2°, utilizando el esquema implícito de la difusión horizontal frente al esquema explícito, cabe destacar:

- Disminuye el ruido de pequeña escala en todos los campos y niveles sobre mar.
- Sobre tierra, si aumentamos el coeficiente de difusión aumenta el ruido sobre las zonas montañosas, especialmente en niveles bajos donde la influencia de la orografía es mayor. Ligado al hecho de que la difusión horizontal cerca de los sistemas montañosos con mucha pendiente se convierte parcialmente en difusión vertical, aumentando erróneamente las corrientes ascendentes.
- Desaparece el ruido en la precipitación sobre el océano, debido a que el esquema implícito es absolutamente estable.
- Es necesario que la difusión sea menor en la humedad específica frente a las otras variables para que disminuya el ruido sobre las zonas montañosas y desaparezca gran parte de la precipitación espuria asociada a dichas zonas. Sin embargo, parece suficiente con que esta restricción se aplique sólo a la capa límite.
- Desaparece el ruido de inestabilidad computacional que aparecía en el campo de la temperatura a 2 m, especialmente en situaciones de fuerte calentamiento.

- La energía cinética es ligeramente menor, sin afectar a los campos de viento.
- La energía global no varía, por la misma causa que en el modelo de resolución 0,5°.
- Los valores absolutos del geopotencial y de la presión en superficie prácticamente no varían.
- Aparece una relación más compleja entre los parámetros: humedad específica, contenido de agua de nube y precipitación. La precipitación total y la humedad específica total son menores si bien el contenido de agua de nube es mayor. Quizás sea necesario difundir el contenido de agua de nube (que no se difunde) en la misma medida que la humedad específica.
- Del estudio del espectro relativo de energía cinética se deduce que elimina más ruido de pequeña escala, especialmente en los niveles bajos y medios. Respecto a los niveles altos, hay que tener cuidado con la elección del coeficiente de difusión pues si es muy alto puede eliminar longitudes de onda significativas sinópticamente (Figs. 3 y 4).



**Fig. 3.** Espectros relativos de energía cinética de los experimentos explícito (HIR) e implícitos y espectro relativo teórico de energía cinética de la atmósfera ( $K^{-3}$ ), promediados para todos los niveles



**Fig. 4.** Espectros relativos de energía cinética de los experimentos explícito (HIR) e implícitos y espectro relativo teórico de energía cinética de la atmósfera ( $K^{-3}$ ), promediados para los niveles superiores

Como consecuencia de lo expuesto, se decidió elegir para la pasada operativa el esquema implícito que no presenta problemas de inestabilidad computacional y elimina más ruido de pequeña escala. Nos decidimos por el experimento BDN cuyo coeficiente de difusión es  $k = 0,25 \cdot 10^{14}$  para la humedad específica  $q$  en la capa límite y  $k = 1,0 \cdot 10^{14}$  para las componentes horizontales del viento  $u$  y  $v$ , para la temperatura  $T$  y para la humedad específica  $q$  en los niveles por encima de la capa límite.

Desde octubre de 1995 hasta ahora, los resultados de montar el esquema de difusión horizontal implícita en las pasadas operativas del modelo HIRLAM(INM) han sido buenos: por una parte, el ruido de pequeña escala ha disminuido en todos los campos y por otra parte, la pasada no ha fallado nunca por inestabilidad

computacional. De esta manera, se ha eliminado la necesidad de cambiar el esquema de convección-condensación de Sunqvist por el de KUO/COND y volver a correr el modelo cuando fallaba.

## 5. Referencias

*Eerola, K., 1993: Experimentation with second and fourth order horizontal diffusion schemes. HIRLAM Technical Report no. 13. Available from Kalle Eerola, Finnish Meteorological Institute, POB 503, SF-00101 Helsinki, Finland.*

*Martínez, Navascués y Rodríguez, 1995: First Impressions about the experimental HIRLAM(INM) with resolution 0,2° HIRLAM3 Workshop on fine scale atmospheric modelling for operational applications, Copenhagen, 30-31 March 1995, pp. 36-39.*

*McDonald, A., 1994: Using second, fourth, and sixth order implicit horizontal diffusion to control noise in three dimensional semi-Lagrangian, semi-implicit, limited area, grid point models of the primitive equations. HIRLAM3 Workshop on numerical integration techniques, Oslo, 26-27 January 1994, p. 17.*

*McDonald, A., 1995: Additional testing of the implicit horizontal diffusion schemes. HIRLAM Newsletter, no. 19, April 1995, pp. 54-57.*

*Stephenson, D., 1994: The impact of changing the horizontal diffusion scheme on the northern winter climatology of a general circulation model. Q. J. R. Meteorol. Soc. (1994). 121, pp. 211-226.*