

# Mejora del análisis del espesor de nieve en HIRLAM

Alberto Cansado Auría – Beatriz Navascués  
Instituto Nacional de Meteorología (INM)

## *Abstract*

A good representation of snow depth and snow cover in numerical models, in addition to its evolution during the whole year, are fundamental to get good forecasted values for screen level variables, such as 2m Temperature and 2m Relative Humidity, and for soil variables such as humidity. HIRLAM snow depth analysis has been improved using statistical interpolation method to analyze snow depth, adding a new quality control on observations and creating a snow depth first guess modelling the snow cover metamorphism depending on recent precipitations, the air temperature or the snow aging. The validation has been carried out using satellite independent data from Special Sensor Microwave Imager (SSMI)

## *Resumen*

Una buena representación de la cobertura y el espesor de la nieve en los modelos numéricos así como de su evolución a lo largo del año, resultan fundamentales tanto para obtener buenas predicciones de variables próximas al suelo, como la temperatura y la humedad relativa a 2 m, como de variables de suelo como la humedad. El análisis del espesor de nieve en el modelo HIRLAM ha sido mejorado de forma que se utiliza el método de interpolación estadística para el análisis de nieve, se incorpora un control de calidad adicional sobre las observaciones y se añade un first guess de espesor de nieve que da cuenta de la metamorfosis que sufre el manto nivoso en función de las precipitaciones recientes, la temperatura del aire o el envejecimiento de la nieve. La validación se lleva a cabo mediante el uso de datos satelitales independientes procedentes del instrumento Special Sensor Microwave Imager (SSMI).

## **1. INTRODUCCIÓN**

HIRLAM es un proyecto internacional en el que participan Noruega, Irlanda, Holanda, Finlandia, Dinamarca, Suecia, Islandia y España, a través de sus servicios meteorológicos, para realizar un modelo de predicción de área limitada a corto plazo. El modelo HIRLAM es utilizado de forma operativa por el Instituto Nacional de Meteorología para predicciones hasta H+48 (predicciones a corto plazo) en resolución 0.5 grados y hasta H+24 en resolución 0.2 grados. Se realizan cuatro pasadas al día, a las 0, 6, 12 y 18 UTC. El análisis del espesor de nieve en HIRLAM se realiza utilizando el método de correcciones sucesivas. Este método fue introducido por Bergthorsson y Doos en el año 1955 y todavía hoy continúa siendo utilizado en algunos casos. Para una descripción del método de correcciones sucesivas se puede consultar [Daley, 1991] y para una descripción detallada del análisis de espesor de nieve en HIRLAM, véase [Rodríguez et al, 2003].

Las modificaciones que se han introducido en HIRLAM con el objeto de mejorar el campo analizado de espesor de nieve son dos principalmente y se basan en el análisis global de espesor de nieve del Servicio Meteorológico Canadiense [Brasnett, 1999].

La primera consiste en utilizar el método de interpolación estadística para analizar el espesor de nieve. Este método es superior en muchos aspectos al método de correcciones sucesivas y permite además introducir un control de calidad adicional sobre las observaciones, lo que redundará en una mayor calidad del campo analizado. Si se desea información adicional sobre el método de interpolación estadística, remitimos al lector a [Daley, 1991].

La segunda modificación ha sido la introducción de una primera estimación del espesor de nieve (ó first guess) que modeliza, en primera aproximación, el metamorfismo que experimenta el manto nivoso desde el análisis anterior. Dicho first guess se basa en el análisis de nieve más reciente (en nuestro caso, el realizado seis horas antes) y utiliza las precipitaciones previstas en ese periodo de 6 horas y el análisis de temperatura a 2 m para estimar la nieve reciente. Además incluye una densidad de la nieve dinámica, que varía en cada ciclo y sobre cada punto de grid, en lugar de utilizar una densidad climatológica mensual, constante en todo el área, como en la versión de referencia de HIRLAM. Más adelante volveré sobre el tema haciendo una descripción detallada de los procesos que tenemos en cuenta.

## 2. PRUEBAS PRELIMINARES

Inicialmente se intentó comprobar de forma cualitativa que el método de interpolación estadística resultaba superior al de correcciones sucesivas en el análisis del espesor de nieve. Para ello se realizaron dos experimentos paralelos que simulaban el mes de febrero de 1996 en los que la única diferencia era el método de análisis. Ambos hacían uso de información climatológica para computar la densidad de la nieve.

El primero era el experimento de referencia, utilizando la versión 6.1.0 de HIRLAM que emplea el método de correcciones sucesivas con una dependencia en la horizontal de tipo Cressman y con 4 iteraciones de radios iguales a 600, 400, 150 y 100 km. Adicionalmente, existe una dependencia en la vertical para tener en cuenta las diferencias entre la orografía real y la del modelo.

El segundo era idéntico a la referencia salvo que el método de análisis empleado esta vez fue el método de interpolación estadística univariante. La función de estructura horizontal es modelada con una función gaussiana con longitud de escala  $L_H$  de 85 km, que corresponde aproximadamente con lo que se hace en el servicio meteorológico de Canadá [Brasnett, 1999].

La anisotropía inducida por la orografía se introduce en la función de estructura mediante una gaussiana dependiente de la distancia entre la orografía real y la del modelo, modulada por una longitud de escala  $L_V$  de 565 m, de modo que la función de estructura total puede escribirse de la siguiente forma:

$$\rho(r, \Delta z) = \exp \left\{ -0.5 \left( \frac{r^2}{L_H^2} + \frac{\Delta z^2}{L_V^2} \right) \right\}$$

En estas pruebas se pudo constatar la superioridad del método de interpolación óptima (OI) frente al de correcciones sucesivas (SC) empleado en HIRLAM, comprobando que la distribución del manto nivoso se ajustaba mejor a la realidad detectada por los datos satelitales de SSML.

Las principales diferencias se producían en áreas del sur de Europa, donde la nieve no tenía, en esas fechas, carácter permanente, mientras que en el norte de Europa las diferencias tendían a ser mínimas.

### **3. NUEVO FIRST GUESS EN EL ANÁLISIS DE ESPESOR DE NIEVE**

Posteriormente, se han realizado otros experimentos en los que se ha introducido una diferente estimación del first guess de espesor de nieve que trata de modelar, de forma muy simplificada, los cambios que experimenta el manto nivoso a lo largo del tiempo.

La razón principal para modificar el first guess de nieve estriba en que el modelo no considera el envejecimiento de la nieve, no existe ecuación de evolución para la densidad y en los procesos de fusión utiliza la temperatura del modelo.

En la nueva estimación se introduce una ecuación de evolución para la densidad de la nieve, haciéndose uso de la temperatura a dos metros analizada, en lugar de la temperatura a dos metros prevista por el modelo. Se incluye una más compleja modelización del manto nivoso en el paso del análisis, aunque todavía está sujeto a los errores.

Se siguió la metodología descrita en [Brasnett, 1999] que hace uso de los siguientes campos

- ◆ El campo de espesor de nieve analizado 6 horas antes del análisis.
- ◆ La precipitación acumulada en las 6 horas anteriores.
- ◆ El análisis actual de temperatura a 2 m (que se realiza previamente al de nieve)
- ◆ El campo de densidad de nieve actualizado 6 horas antes del análisis.

#### **3.1. MODELIZACIÓN DEL METAMORFISMO DE LA NIEVE Y CÁLCULO DEL FIRST GUESS**

La nieve no es una sustancia estática, que no evoluciona. Más bien al contrario, una vez que llega al suelo se inicia una serie de cambios continuos (metamorfosis de la nieve) que dará lugar, a su vez, a cambios en las propiedades físicas de la nieve (densidad, albedo, conductividad térmica, granulometría, etc) que influirán en diferentes variables de suelo y próximas al suelo en los modelos numéricos.

La metamorfosis de la nieve y los procesos implicados en la misma resultan de vital importancia al establecer la estabilidad del manto nivoso para predicción de riesgo de avalanchas de nieve en zonas de montaña no protegidas. Sin embargo, los cambios que experimenta la nieve son muy complejos e implican mecanismos mecánicos y termodinámicos [Sergent, 1998], [Pahaut et al, 1991] que van mucho más allá de lo que nosotros queremos (podemos) modelar en HIRLAM.

Nuestro modelo de metamorfosis de la nieve se limita a actualizar la densidad de la nieve en cada análisis, en lugar de utilizar información climatológica y con valores homogéneos y constantes para todo el área de integración como se hacía hasta ahora, y a tener en cuenta procesos como la fusión del manto cuando la temperatura se encuentra por encima de los cero grados.

El envejecimiento (snow aging) de la nieve se considera en este modelo a través de un aumento de la densidad del manto y viene dada por la siguiente ecuación

$$\rho = \rho_a + [\rho_{-6} - \rho_a] \exp\left(\frac{-6}{\hat{\sigma}}\right)$$

donde la densidad actualizada  $\rho$  viene dada en función de la densidad más reciente disponible  $\rho_{-6}$  (calculada en el análisis realizado 6 horas antes) y dos parámetros: la densidad asintótica  $\rho_a$  a la que tiende la densidad del manto nivoso y el tiempo de relajación  $\tau$ . Estos valores se escogen de forma que se ajusten a valores empíricos. En nuestro caso se emplearon valores de  $\rho_a$  de  $300 \text{ kg m}^{-3}$  para todos los terrenos excepto para los bosques de coníferas en los que el valor de  $\rho_a$  es de  $210 \text{ kg m}^{-3}$ . Para  $\tau$  se ha escogido un valor de 100 horas. Todos ellos coinciden con los descritos en [Brasnett, 1999].

La nieve fresca recogida en las 6 horas anteriores se considera que tiene una densidad igual a  $100 \text{ kg m}^{-3}$ . Cuando nieve fresca se acumula a otra vieja, la densidad se actualiza de nuevo utilizando unos pesos que son proporcionales a la masa del manto previo y de la nieve reciente.

Además para tener en cuenta el efecto del agua líquida que se infiltra en el manto nivoso cuando la temperatura se encuentra por encima de cero grados, la densidad de la nieve aumenta a un ritmo de  $0.5 \text{ Kg m}^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Cuando la densidad supera la densidad asintótica  $\rho_a$ , el algoritmo de envejecimiento de la nieve deja de aplicarse, aunque la densidad puede seguir aumentando si continúa la fusión hasta un valor límite de  $550 \text{ kg m}^{-3}$ .

Si la temperatura supera el punto de congelación del agua, se elimina además nieve del manto por escorrentía y/o evaporación. La cantidad eliminada es constante y tiene un valor de  $0.15 \text{ mm h}^{-1} \text{ K}^{-1}$  de equivalente en agua (espesor de la nieve multiplicado por densidad del manto y dividido por densidad del agua líquida).

El resultado de todas estas consideraciones es un nuevo campo de espesor de nieve, calculado a partir del campo de espesor previamente analizado y del análisis de temperatura a la hora considerada, las densidades actualizadas tal y como se describe arriba y las precipitaciones acumuladas previstas 6 horas antes.

Existen muchos procesos que no se tienen en cuenta aquí y que son importantes (radiación solar incidente, flujos de calor desde el suelo, pérdidas de masa por procesos distintos a la fusión, como la sublimación, tipo de precipitación, tipo de granos, gradiente térmico del manto, etc). Esto significa que el análisis de nieve va a mejorar el campo de espesor de nieve en HIRLAM pero no nos va a servir, por ejemplo, para realizar predicciones de estabilidad del manto. Esto requeriría un modelo de mucha mayor resolución, que tuviera en cuenta muchos más procesos termodinámicos de los que se consideran en el nuestro, así como aspectos como pendientes del terreno, orientación de los valles, granulometría, rozamientos internos, etc. Sin embargo, las pocas consideraciones de metamorfosis de la nieve que hemos tenido en cuenta en el cálculo del first guess son suficientes para mejorar el análisis del espesor de nieve en un modelo como HIRLAM, así como los campos de variables próximas al suelo y éste, precisamente, era nuestro objetivo.

## 4. EXPERIMENTOS INCLUYENDO EL FIRST GUESS DE ESPESOR DE NIEVE

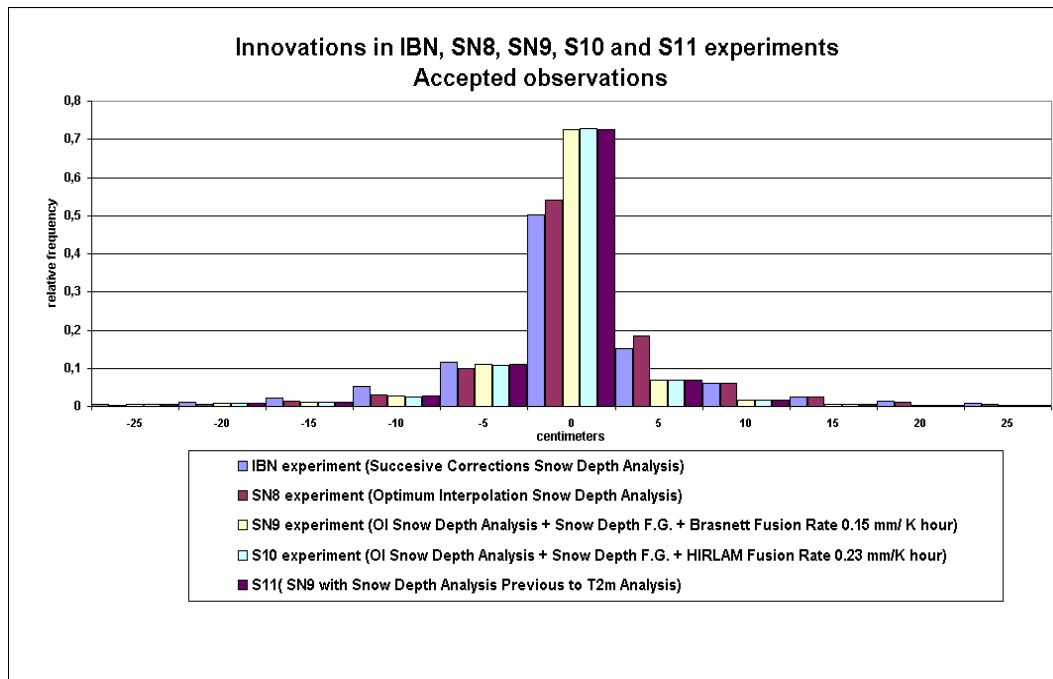
### 4.1. RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS PREVIOS

Se hizo una serie de cinco experimentos de análisis de espesor de nieve para testear la conveniencia de utilizar una diferente estimación del first guess. Todos se han llevado a cabo utilizando la versión 6.1.2 de HIRLAM utilizando el área de integración DMR (que cubre Europa, Asia central y gran parte del Atlántico Norte) y a 0.5° de resolución durante el mes de Febrero de 1996.

- ◆ **IBN:** Experimento referencia. HIRLAM 6.1.2 y correcciones sucesivas
- ◆ **SN8:** HIRLAM 6.1.2 y método de interpolación estadística (O.I) . Sin First Guess.
- ◆ **SN9:** HIRLAM 6.1.2 + O.I + First Guess. Tasa de fusión  $0.15 \text{ mm h}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .
- ◆ **S10:** HIRLAM 6.1.2 + O.I + First Guess. Tasa de fusión  $0.23 \text{ mm h}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .
- ◆ **S11:** HIRLAM 6.1.2 + O.I + First Guess. Tasa de fusión  $0.15 \text{ mm h}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Análisis de nieve previo a análisis de temperatura .

Los resultados mostraron claramente que la introducción del first guess tenía un impacto muy significativo (reflejado en los histogramas de diferencias entre Observaciones y First Guess, figura 1) y las diferencias entre SN9, S10 y S11 eran muy pequeñas.

*Figura 1. Histograma de innovaciones (Obs menos F.G) de los diferentes experimentos*



Otros índices como los scores de verificación apoyan también la introducción de un first guess de espesor de nieve así como el cambio del método de análisis a interpolación estadística, especialmente en áreas cubiertas por nieve de forma no permanente (Francia o Península Ibérica)

### 4.2. AJUSTE DE LA FUNCIÓN DE ESTRUCTURA HORIZONTAL

Inicialmente, en los experimentos previos, se escogió una gaussiana para modelar la función de estructura horizontal de nuestro análisis por interpolación estadística. Sin embargo, de acuerdo con [Brasnett,1999] y basado en los datos empíricos de correlación de los errores del first guess, es preferible el uso de una función autorregresiva de segundo orden de la forma

$$\alpha(r) = (1 + cr) \exp(-cr)$$

La función de estructura vertical se mantuvo sin cambios respecto a los experimentos previos con interpolación estadística: gaussiana con una longitud de escala  $L_V$  de 565 m. En consecuencia, el modelo escogido para la función de estructura total viene dado por :

$$\rho(r, \Delta z) = (1 + cr) \exp \left\{ - \left( cr + 0.5 \left( \frac{\Delta z^2}{L_V^2} \right) \right) \right\}$$

Los valores de los parámetros  $c$  y  $L_V$  han sido determinados mediante una serie temporal de correlaciones de las innovaciones. Es el método que se conoce como Hollingsworth y Lönnberg [Hollingsworth et al, 1986] para determinar las estadísticas de los errores del first guess y de las observaciones. Los datos de entrada han sido las correlaciones entre las innovaciones (Observación menos valor del first guess) del mes de febrero de 1996 en función de la distancia. El cálculo de los datos a partir del conjunto de todas las innovaciones fue realizado por Carmen Martín Herreros (INM). El procedimiento es el mismo que el utilizado en el INM para estimar las funciones de estructura de la temperatura y la humedad relativa a dos metros utilizando funciones autorregresivas de tercer orden siguiendo lo descrito en [Mitchell et al, 1990].

Para calcular el parámetro  $c$  de la función  $\alpha(r)$  se utilizó la rutina E04GYF de la librería NAG. E04GYF es un algoritmo cuasinewtoniano para encontrar el mínimo de la suma de los cuadrados de  $m$  funciones no lineales de  $n$  variables. Se necesita conocer las derivadas primeras. El algoritmo se encuentra documentado en [Gill et al, 1978]

Adicionalmente se obtiene un segundo parámetro de ajuste que nos proporciona información sobre el reparto de la varianza total entre las observaciones y el first guess. El resultado es que el parámetro  $c$  tiene un valor de  $0.009 \text{ km}^{-1}$  y el parámetro de reparto de varianza asigna un 46,4% de la varianza al first guess y el resto a las observaciones.

### 4.3. EXPERIMENTOS DE TEMPORADA INVERNAL COMPLETA

Una vez obtenida la función de estructura que debemos utilizar en nuestros análisis de espesor de nieve, se llevaron a cabo dos nuevos experimentos de larga duración para comprobar el comportamiento de los análisis. Esta vez la versión de HIRLAM utilizada ha sido la 6.2. con 0.5 grados de resolución y en el área DMR.

- ◆ **SNR:** Experimento de referencia. HIRLAM 6.2. Correcciones sucesivas. Densidad de la nieve climatológica.

- ◆ **SNA:** HIRLAM 6.2. Función de estructura autorregresiva de 2º orden. O.I. Densidad de la nieve que evoluciona en el modelo y se actualiza en cada pasada.

Ambos experimentos comprenden el periodo entre octubre de 2002 y mayo de 2003 y por tanto incluyen la aparición, evolución y fusión del manto nivoso sobre Europa.

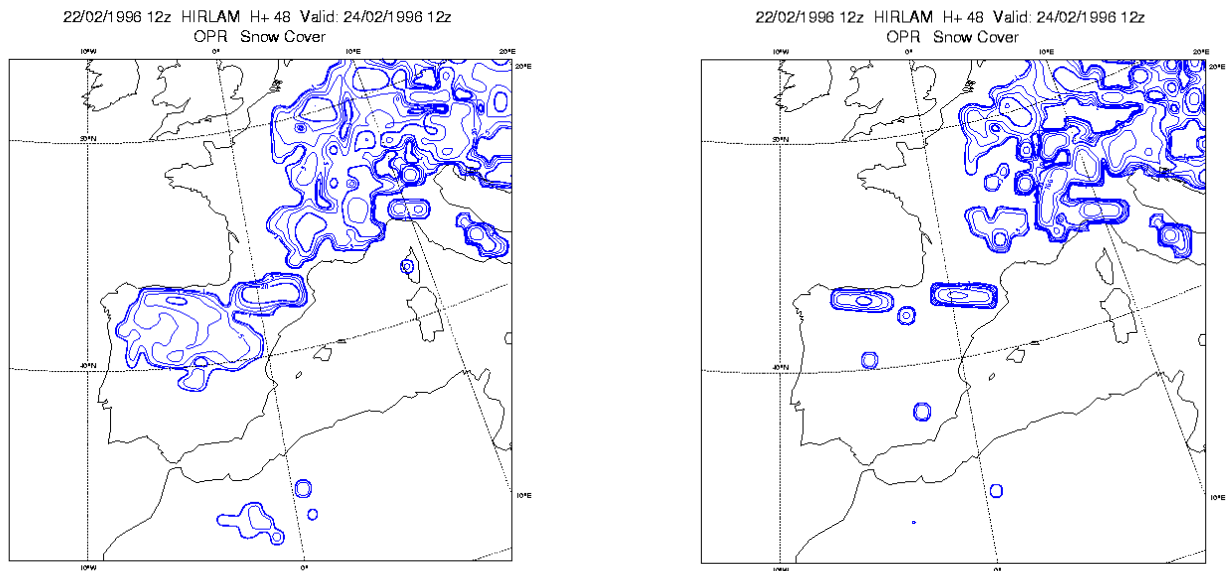
## 5. VALIDACIÓN DEL ANÁLISIS

La validación de los experimentos ha sido efectuada de forma complementaria a través de tres métodos diferentes

- ◆ Índices de verificación de las observaciones (RMS y bias)
- ◆ Histogramas de innovaciones y residuos
- ◆ Datos satelitales del instrumento SSMI

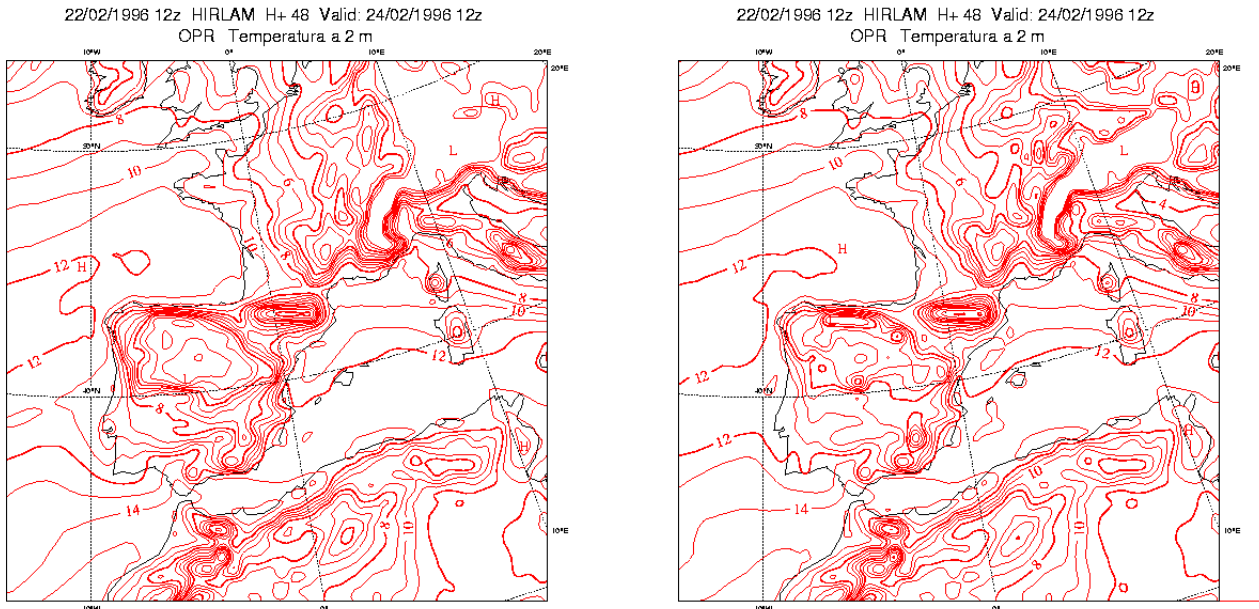
Los índices de verificación no muestran diferencias significativas cuando son considerados globalmente, aunque quizás si que se aprecia una ligera mejora en el experimento SNA en alcances largos (H+48) y especialmente en zonas no cubiertas por la nieve de forma permanente. Sin embargo si que es posible encontrar casos particulares en los que existen diferencias notables entre los métodos de análisis. Por ejemplo, en la Península Ibérica el caso siguiente resulta significativo

*Figura 2. Comparación entre predicción a 48 horas del campo de espesor de nieve en el suelo de los experimentos IBN (izda) y SN9 (dcha)*



Obviamente, estas diferencias tienen la suficiente entidad para tener impacto en variables como la temperatura a 2 m y otras variables de suelo y próximas al suelo.

**Figura 3. Comparación de los campos de temperatura a 2 m en los experimentos IBN (izda) y SN9 (dcha)**



En cuanto a los histogramas de innovaciones y residuos, el resultado más significativo es el ya mencionado de cómo el cambio a interpolación óptima y la introducción de un first guess de nieve ayudaba a mejorar la calidad de los análisis y el hecho de comprobar como el comportamiento de la variable no es gaussiano en torno a cero (debido posiblemente a que existen muchos puntos en los que no existe nieve en el suelo)

Por último se llevó a termino una validación de los análisis con datos independientes obtenidos a partir del instrumento SSMI instalado a bordo de satélites meteorológicos. El instrumento SSMI (Special Sensor Microwave Imager) se encuentra instalado a bordo de los satélites del programa de satélites meteorológicos para la defensa de los Estados Unidos (DMSP). SSMI proporciona datos geofísicos diversos como velocidad del viento sobre el océano, cobertura de hielo, precipitación sobre tierra y sobre mar y además cobertura del manto de nieve. Éste último producto es el que utilizamos para nuestra verificación.

A la hora de realizar la verificación nos encontramos con diversos problemas que se han tratado de solventar. El primer problema que tuvimos fue que los datos SSMI y los datos de nuestro modelo no tenían la misma resolución. En concreto, los datos SSMI se suministran con una resolución espacial de 1/3 de grado, mientras que la resolución de nuestro modelo era de 0.5 grados. Se resolvió realizando un calculo del dato SSMI sobre los puntos grid de HIRLAM mediante una interpolación bilineal, utilizando los cuatro datos SSMI más próximos. De esta

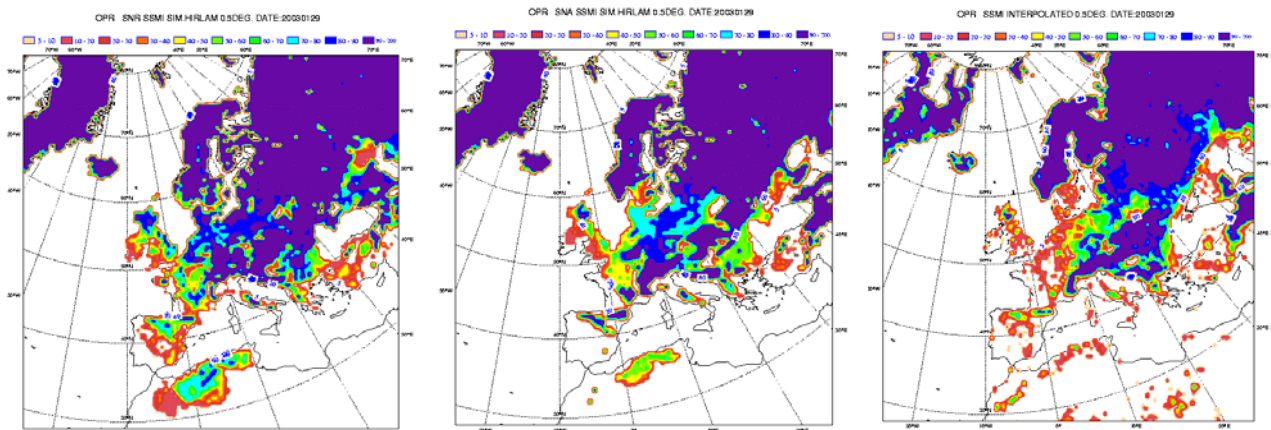


forma transformamos los datos SSMI de 1/3° de resolución espacial a datos SSMI a 0.5° de resolución.

Otro problema importante al que tuvimos que hacer frente fue que los datos SSMI miden el porcentaje de tiempo con nieve en el suelo a lo largo de una semana. HIRLAM nos ofrecía el dato en cada ciclo de análisis de si sobre un determinado punto de rejilla existía nieve en el suelo o no. En concreto se consideró que existía nieve en el suelo cuando el análisis de nieve tenía sobre un punto de rejilla un valor de espesor igual o superior a 1 cm.

Para hacer comparables los datos de HIRLAM de ambos experimentos y los datos SSMI se decidió transformar los datos de HIRLAM a porcentaje de tiempo con nieve observada. Para ello, se consideraron únicamente los análisis de espesor de nieve de las 6 horas UTC, con lo que se disponían de siete análisis semanales, y se contabilizaron el número de días en los que, sobre cada punto de rejilla, el análisis detectaba nieve en el suelo ( $\geq 1$  cm).

**Figura 4. Porcentajes semanales de nieve en el suelo obtenida a partir de los análisis de las 6h UTC de los experimentos SNR (izda) y SNA (centro) para la semana del 29/1/2003 al 4/2/2003. Junto a ellas aparece la gráfica obtenida a partir de los datos SSMI (dcha) para el mismo periodo.**



De esta forma nos encontramos finalmente en condiciones de comparar datos SSMI y HIRLAM de porcentaje de tiempo con nieve en el suelo durante cada semana considerada y con una resolución espacial de 0.5°. Al hacerlo, comprobamos que:

- ◆ La distribución de nieve en el suelo es mucho mejor en SNA (OI) que en SNR (SC). Esto es especialmente cierto en zonas donde se está formando o desapareciendo el manto nivoso en cada momento.
- ◆ El control de calidad adicional del que dispone el método de interpolación estadística (OI) ayuda a que no se introduzcan algunos errores típicos del método de correcciones sucesivas (bull eyes) debidos a un deficiente control de calidad de las observaciones.
- ◆ Ninguno de los dos ofrece una descripción precisa del manto nivoso en zonas donde el manto no es permanente. No simula de forma adecuada los deshielos rápidos.
- ◆ Los errores de precipitación del modelo parecen tener una gran influencia en los errores del manto nivoso.
- ◆ Existe todavía posibilidad de mejora de los análisis de espesor de nieve mediante la utilización de datos satelitales de cobertura de nieve diarios que permitan eliminar del

análisis la presencia de nieve donde no sea detectada por los instrumentos a bordo de satélites.

## 6.- CONCLUSIONES

El método de correcciones sucesivas analiza de forma deficiente el campo de espesor de nieve en el suelo. El simple cambio al método de interpolación estadística y el control de calidad adicional que implica hace que la calidad del análisis mejore. Sin embargo, es la introducción de las mejoras del first guess en las que se modeliza de forma muy simple el metamorfismo de la nieve lo que tiene un impacto mayor en la mejora del análisis del espesor de nieve en el suelo. Las estadísticas de los errores del first guess y de las observaciones han sido determinadas por el procedimiento de Hollingsworth y Lönnberg. Los experimentos de temporada invernal completa (Octubre – Mayo) muestran como el análisis de espesor de nieve con first guess modificado e interpolación estadística es capaz de simular la evolución del manto, aunque de forma puntual (deshielos rápidos) muestra diferencias significativas con la realidad. Existe posibilidad real de mejora mediante la utilización de datos de satélite de cobertura del manto nivoso. En este aspecto, el SAF (Satellite Application Facility) de análisis del terreno (Land Surface Analysis) que desarrolla EUMETSAT para el Meteosat de Segunda Generación (MSG) ofrecerá, sin duda, nuevas oportunidades de aumentar la calidad de los análisis a través del producto de cobertura de nieve que está desarrollando el SMHI.

## 7.- AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Carmen Martín Herreros su ayuda por calcular las correlaciones en función de la distancia, necesarias para determinar los coeficientes de la función de estructura autorregresiva y a Ernesto Rodríguez Camino por su ayuda en la interpretación de los resultados.

## REFERENCIAS

- Brasnett, Bruce. 1999. A global analysis of snow depth for numerical weather prediction. *Journal of Applied Meteorology*, **38**, 726-740.
- Daley, Roger. 1991. *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series. Cambridge University Press.
- Gill P.E. and Murray W. 1978. Algorithms for the solution of the nonlinear least-squares problem *SIAM J. Numer. Anal.* **15**, 977-992
- Hollingsworth A. and Lönnberg P. 1986. The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data. Part I and II. *Tellus*, **38A**, 111-161.
- Mitchell H.L. Chavette C., Chouinard C. and Brasnett B. 1990. Revised interpolation statistics for the Canadian Data Assimilation Procedure: Their derivation and Application. *Monthly Weather Review*, **118**, 1591-1614.
- Pahaut E. et Sergent C. 1991. *La neige: Formation et evolution*. Centre d'études de la neige. Météo France.
- Rodriguez E., Navascués B., Ayuso J.J. and Järvenova S. 2003. Analysis of surface variables and parameterization of surface processes in HIRLAM. Part I: Approach and verification by parallel runs. HIRLAM Technical Report No.58.
- Sergent, Claude. 1998. Les métamorphoses de la neige. *Neige et avalanches*, **83**.