

Dinámica del manto nivoso en el Pirineo: Seguimiento con Spot-Vegetation de los años 1998-2003.

Nicolau Pineda⁽¹⁾, Joan Jorge⁽²⁾, Gloria Martí⁽¹⁾, Carles Garcia⁽¹⁾ y Ramón Tarruella⁽²⁾

⁽¹⁾Servei Meteorològic de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Generalitat de Catalunya. C.Berlín 38 08029 Barcelona. npineda@meteocat.com.

⁽²⁾ Dep. Física Aplicada. Escola Universitària Politècnica de Manresa. Universitat Politècnica de Catalunya. Av.Bases de Manresa 63-71 08240 Manresa. jorge@fa.upc.es.

Resumen

Este estudio pretende mejorar el conocimiento sobre la dinámica anual del manto nivoso del Pirineo. Para ello se han usado imágenes SPOT-Vegetation S_{10} del periodo Abril 1998 a Diciembre 2003; así como datos de la red nivometeorológica (XANIC) del Servei Meteorològic de Catalunya. A partir del índice de cobertura nival NDSII calculado con las S_{10} , se ha estimado el manto nivoso para periodos de 10 días durante 5 temporadas. Aunque este estudio supone una primera aproximación al estudio de la dinámica nival en los Pirineos con imágenes SPOT-Vegetation S_{10} , se han obtenido resultados interesantes. Cabe destacar dos puntos:

1. Hay una buena correspondencia entre el NDSII derivado de VGT y los datos de espesor de las estaciones XANIC a la hora de detectar presencia de nieve. Así mismo, a lo largo de la temporada el NDSII es sensible a la mayoría de episodios de precipitación y por tanto es útil para seguir su evolución con una visión más global de la que se puede extraer de las observaciones de superficie.

2. El estudio de la evolución del NDSII indica que hay un comportamiento anual similar en la dinámica de la cobertura del manto nivoso. Aunque la superficie innivada varía de año en año, el inicio y final de temporada se dan en fechas similares en las 5 temporadas estudiadas.

1. Introducción

Las simulaciones meteorológicas e hidrológicas, así como los pronósticos del tiempo de montaña y los boletines de peligro de aludes, requieren de una valoración de la dinámica espacio-temporal de variables como el albedo, la humedad del suelo y la extensión y espesor del manto nivoso.

Esta información no puede conseguirse únicamente con sensores de superficie, pues el

número de muestras y la frecuencia de medidas requeridos para caracterizar correctamente las diversas cuencas hidrológica del Pirineo son prohibitivos. La teledetección no supone una alternativa al muestreo en superficie pero si que aporta una valiosa información que viene a complementar la que se obtiene en el terreno.

2. Índices de cobertura nival

Los satélites de observación de la tierra ofrecen un gran potencial en el seguimiento de la dinámica del manto nivoso. Aunque la mayoría de los sensores no se diseñan para medir el equivalente del agua de la nieve (*snow water equivalent*, SWE) ni el espesor de nieve, el grado de cobertura de nieve se puede identificar fácilmente con las bandas del visible y del infrarrojo cercano, bandas presentes en varios de los sensores que operan en distintas resoluciones espaciales y temporales.

2.1. SPOT-Vegetation

Con un ancho de barrido de 2250 kilómetros, el instrumento SPOT- Vegetation (en adelante VGT) proporciona cobertura diaria de todo el globo con una resolución espacial de aprox. 1 kilómetro. El sensor de VGT utiliza el mismo sistema geométrico de referencia y tiene los mismos canales espectrales que el sensor HRV de SPOT (ver Tabla 1). El canal infrarrojo de onda corta (SWIR) es sensible a la humedad del suelo, a la cubierta de la vegetación y al contenido de agua de la hoja, y puede mejorar la discriminación de la vegetación y de otras cubiertas de tierra.

Tabla 1. Canales de SPOT-VGT

Canal	Descrip.	Rango del espectro (μm)
B0	Azul	0,43 – 0,47 μm .
B2	Rojo	0,61 – 0,68 μm .
NIR	IR cercano	0,78 – 0,89 μm .
SWIR	IR medio	1,58 – 1,75 μm .

2.1.1. VGT-S₁₀

Las imágenes ‘S’ de VGT son productos de síntesis entre orbitas sucesivas. Existe un producto de síntesis diaria (VGT-S₁) así como un producto de síntesis para un período de 10 días (VGT-S₁₀). Los dos productos contienen los canales originales junto con el índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Ambos son globales, con una resolución nominal de 1 Km². A grandes rasgos, los productos “S” pasan por el siguiente proceso de corrección: un remuestreo con ortorectificación, una calibración radiométrica y una corrección atmosférica con el SMAC [2].

Los datos VGT-S₁₀ se generan seleccionando los píxeles VGT-S₁ con valores normalizados máximos de NDVI dentro de un periodo de diez días, reduciendo así al mínimo el efecto de las nubes. Se generan tres S₁₀ cada mes: días 1 al 10, días 11 al 20 y día 21 al último día del mes.

2.2. NDSI

Tanto la nieve como el hielo tienen valores de reflexión muy altos en las longitudes de onda visibles (0,40-0,70 μm). Por otro lado, presentan valores bajos de la reflexión en el infrarrojo medio (1,55 μm -1,75 μm). Esas características espectrales son las que usa el índice NDSI (*Normalized Difference Snow Index*) para detectar superficies con nieve. Este índice se calcula como la diferencia normalizada entre la banda del verde y la banda del SWIR [3]. En el caso del *Thematic Mapper* de Landsat (TM) el NDSI se calcula usando las bandas 2 y 5:

$$NDSI = \frac{(TM2 - TM5)}{(TM2 + TM5)} \quad (1)$$

Para determinar si más de la mitad de un píxel está cubierto por nieve o hielo [3] propusieron un umbral de NDSI de 0,40.

2.3. NDSII

Otros estudios han sugerido que las longitudes de onda del rojo son igualmente útiles para identificar la nieve y el hielo. El índice *Normalized Difference Snow/Ice Index* (NDSII) [4] se calcula como diferencia normalizada entre el rojo y el SWIR. En Landsat esas longitudes de onda corresponden a los canales 3 y 5 respectivamente.

Un estudio de la comparación ente NDSI y el NDSII realizado con imágenes TM [5] concluye que ambos están altamente correlacionados y que los

algoritmos de NDSI y de NDSII dan estimaciones similares del área y de la distribución espacial de la cubierta de nieve/hielo. Este estudio es interesante pues da pie a usar el VGT para obtener resultados similares a los que se obtienen con el NDSI de Landsat. En el caso del VGT, no se puede calcular directamente el NDSI pues el sensor no dispone de un canal equivalente al TM2, pero si que se puede calcular el NDSII usando los canales B2 y SWIR (similares a los canales 3 y 5 del sensor TM).

3. Datos

3.1. Imágenes VGT-S₁₀

El centro de procesado y archivo de SPOT en Bélgica (CTIV) del VITO (*Flemish Institute for Technological Research*), distribuye gratuitamente los productos S₁₀ de VGT. (<http://free.vgt.vito.be>). En este estudio se han usado las S₁₀ para la zona europea, desde abril de 1998 hasta diciembre de 2003. Cada año se compone de 36 imágenes S₁₀, habiéndose usado en total más de 200 imágenes para cubrir los 6 años del estudio.

3.2. Datos de superficie

Los datos de campo relativos a la duración y extensión y espesor del manto nivoso en el Pirineo de Catalunya han sido proporcionados por la red de estaciones automáticas nivometeorológicas (XANIC) [1] del Servei Meteorològic de Catalunya (en adelante SMC) y por los Boletines de Peligro de Aludes (en adelante BPA) elaborados por el SMC para la Generalitat de Catalunya. En la figura 1 se muestra una de las estaciones automáticas de dicha red.



Figura 1. Estación nivometeorológica de Ulldeter, a 2380m. (Prov.Girona).

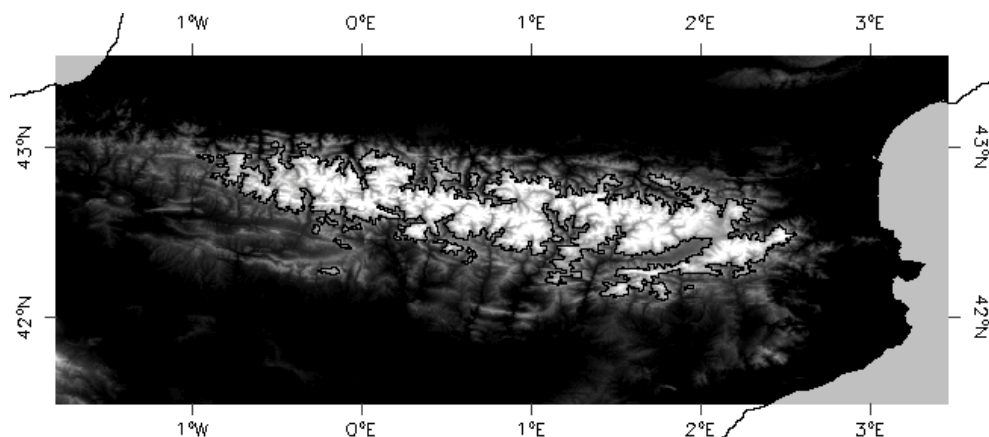


Figura 2: Modelo digital de elevaciones del Pirineo con vector de cota 1500 m. que delimita la zona del estudio.

Los sensores instalados en cada estación de la XANIC son:

- conjunto anemométrico de medida de velocidad y dirección,
- piranómetro de radiación global,
- sensor sónico de espesor total de nieve,
- sensor de temperatura y humedad del aire,
- sensor de temperatura de la nieve y
- pluviómetro con capacidad de medida de precipitación sólida.

Las estaciones de la XANIC son válidas para el estudio de la distribución y evolución del manto nivoso en el Pirineo de Catalunya ya que todas ellas se hallan entre los 2200-2600 m; están ubicadas en puntos con distribución homogénea del manto y se reparten en distintas cuencas hidrográficas que cubren aquellas zonas donde de forma empírica se han delimitado unidades nivoclimáticas diferenciadas.

4. Procesado

4.1. Cálculo del NDSII

El procesado de imágenes se ha realizado para el recorte que cubre el conjunto del Pirineo (véase figura 2). A partir de los canales B2 y SWIR de las imágenes VGT-S₁₀, se ha calculado el NDSII para el conjunto de las imágenes. Según [6] el umbral de 0,40 propuesto en [3] para el NDSI se corresponde a un umbral de 0,37 en el caso del

NDSII calculado con imágenes VGT. En nuestro estudio, se ha aplicado este mismo umbral para determinar los píxeles VGT con más de la mitad de superficie cubierta por nieve.

5. Resultados

5.1. Análisis de las series de NDSII

Se ha computado, para cada imagen VGT-S₁₀, la superficie con NDSII igual o superior a 0,37 para los píxeles del Pirineo con una cota superior a 1500 metros. En la figura 3 se representan esas superficies para los meses de febrero, abril y diciembre des de diciembre de 1998 a abril de 2002. En la figura 4 se representa la evolución de la superficie del manto nivoso (en píxeles) para el área del Pirineo (cota > 1500 m).

En referencia a la evolución temporal del manto nivoso, no tiene sentido hablar de año natural sino de temporada entendiéndola como aquel periodo de tiempo en el que el Pirineo está cubierto de nieve de forma más o menos permanente en cotas próximas a los 1500 m. Normalmente en el Pirineo las temporadas suelen iniciarse a finales de octubre-inicios de noviembre, prolongándose hasta finales de mayo del año siguiente.

En la figura 3 se presenta el manto nivoso de los meses de diciembre, febrero y abril de cuatro temporadas.

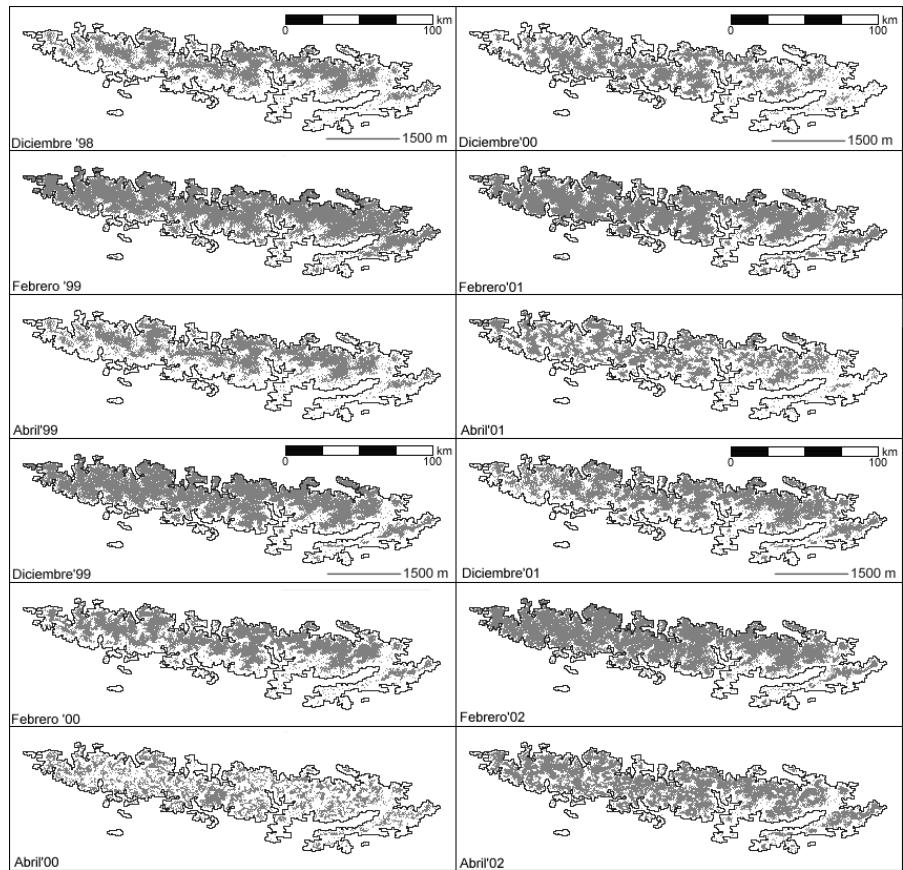


Figura 3: Manto nivoso en el conjunto del Pirineo en cotas superiores a 1500 m. para la segunda década de los meses de diciembre, febrero y abril de 4 temporadas, de diciembre 1998 a abril 2002.

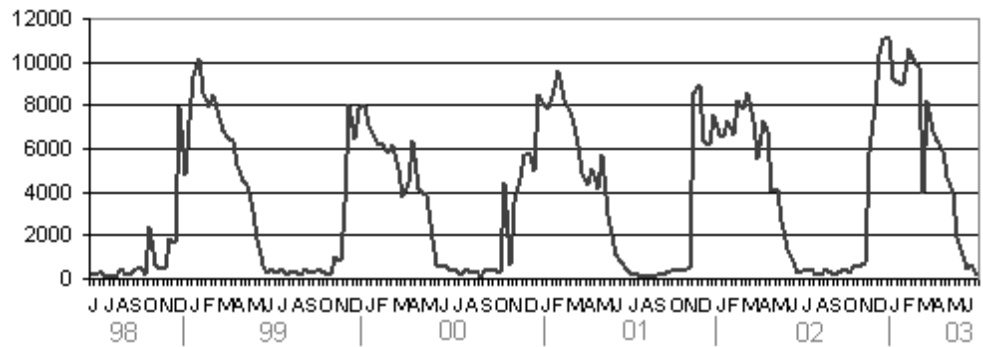


Figura 4: Evolución de la superficie del manto nivoso (en píxeles VGT) a lo largo del conjunto de décadas de las cinco temporadas.

De la observación de la figura 3 cabe destacar dos puntos. Primero, se puede observar una similitud entre las temporadas 1998-99, 2000-01 y 2001-02. En febrero casi toda la superficie por encima de los 1500 m. está cubierta de nieve, si se exceptúan las zonas más meridionales del Pirineo oriental. Así mismo, la distribución del manto de diciembre se parece bastante al de abril. Este patrón no se observa pero en la temporada 1999-2000, donde el manto nivoso es superior en diciembre, presentando ya en febrero un aspecto más típico de abril. En segundo lugar, se puede apreciar en la mayoría de imágenes una diferencia de cota entre las caras norte y sur. Así como en la cara norte en febrero hay siempre nieve a lo largo de toda la cota 1500m., en la cara sur esta cota está situada por encima de los 1800 m aproximadamente.

Observando los resultados de la evolución del manto nivoso derivada del NDSII (véase figura 4), se constata que la temporada se inicia casi siempre en noviembre, con nevadas importantes en la primera o la segunda década de noviembre, quedando ya cubierta a principios de diciembre la zona que se mantiene nevada durante el invierno. La Tabla 2 presenta los valores medios de cobertura a final de mes para las cinco temporadas estudiadas.

Tabla 2. Coberturas medias (en píxeles) en la última década de cada mes para el conjunto de las 5 temporadas estudiadas

Set	Oct	Nov	Dic	Ene
363	628	6473	8492	7966
Feb	Mar	Abr	May	Jun
7851	5614	4236	1210	337

Las nevadas que inician la temporada se dan básicamente en noviembre, dónde se registra un incremento medio en el manto nivoso de casi 6000 píxeles (lo supone un 75% del manto medio de enero), frente a los incrementos de 265 en octubre y de unos 2000 píxeles en diciembre. Aún así, en alguna temporada ya hay nevadas apreciables en octubre, pero sin superar nunca las extensiones de noviembre. Los máximos de cobertura se distribuyen entre diciembre y febrero según los años, manteniéndose unas coberturas similares durante esos 3 meses, aunque de forma general se aprecia una caída sostenida a partir de mediados de diciembre. Las cinco temporadas terminan en mayo, alcanzándose los mínimos estivales a principios de junio. La pérdida de superficie innivada durante mayo presenta una media de más de 3000 píxeles, frente a los aproximadamente 1380 píxeles de media de abril y los 870 de junio.

Comparando las cinco temporadas, se puede observar en la figura 4 como la que tuvo en su conjunto un manto nivoso más reducido fue la 1999-2000 y la más nevada fue la 2002-2003. El máximo de esas 5 temporadas se dio en diciembre de 2002.

5.2. Comparativa NDSII - XANIC

El estudio comparativo entre el NDSII y los datos de superficie registrados por la XANIC se ha dividido en dos partes.

La primera parte corresponde a la comparación entre el valor de NDSII y la estimación de espesor de nieve. Aunque se trata de dos variables distintas, de ambas se puede extraer la presencia o no de nieve en superficie. Así como para determinar los píxeles VGT con más de la mitad de superficie cubierta por nieve se ha usado un umbral de NDSII de 0,37, el umbral para asignar una mínima presencia de nieve en un píxel es de -0,1 [6]. Cabe recordar que el NDSII tiene un rango de -1 a 1.

Se ha comparado, para los píxeles VGT que contienen cada una de las estaciones XANIC, el momento de la aparición y desaparición de la nieve, a partir del espesor medido por la estación y el valor de NDSII. En la mayoría de inicios y finales de temporada, el cambio de cubierta se ha detectado en ambas variables durante la misma década (55%) mientras que en el resto de ocasiones la diferencia ha sido de una década (sólo en un caso la diferencia ha sido de 2 décadas).

La segunda parte de la comparativa se centra en el estudio de la evolución del manto a lo largo de la temporada. Se ha realizado para las temporadas 2001-02 y 2002-03; ya que hasta octubre de 2001 la XANIC no dispuso de los primeros pluviómetros, concretamente en Val d'Aran (estación XANIC de Bonaigua) y en la cuenca de la Noguera Ribagorçana (estación de Boí), que complementan los datos procedentes del sensor de espesor total de nieve, sometidos en algunos casos a variaciones por efecto de transporte de nieve por el viento.

Principalmente se ha atendido a los datos de precipitación sólida y líquida, evolución de la temperatura y velocidad del viento para detectar incrementos y descensos en la cota altitudinal de distribución del manto nivoso a lo largo de la temporada. Estas variaciones de cota se han concretado cuantitativamente con los datos observacionales de la red convencional de observadores nivometeorológicos del SMC, recogidos en los BPA.

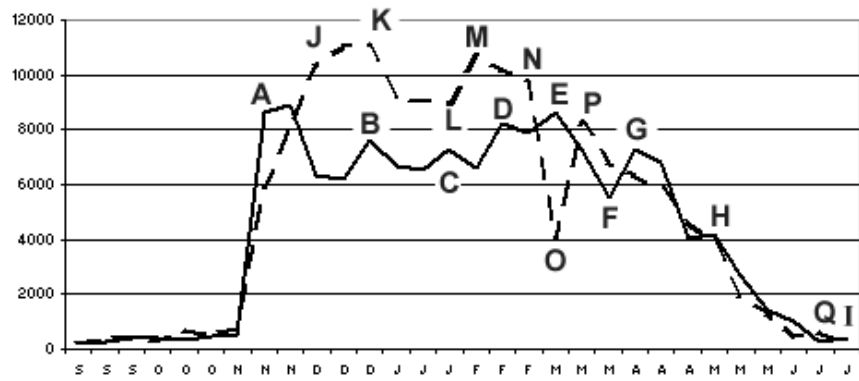


Figura 5. Superficie (en píxeles VGT) innivada para las temporadas 2001-02 (línea continua) y 2002-03 (línea discontinua) para las 3 décadas mensuales de setiembre a junio.

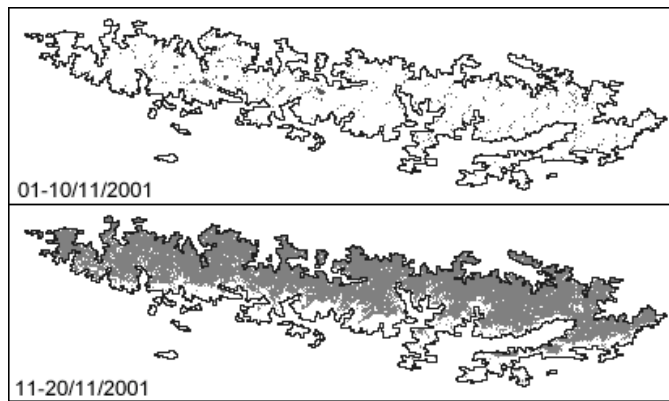


Figura 6. Comparación del manto nivoso en dos décadas sucesivas, en este caso correspondiente al inicio de la temporada 2001-02.

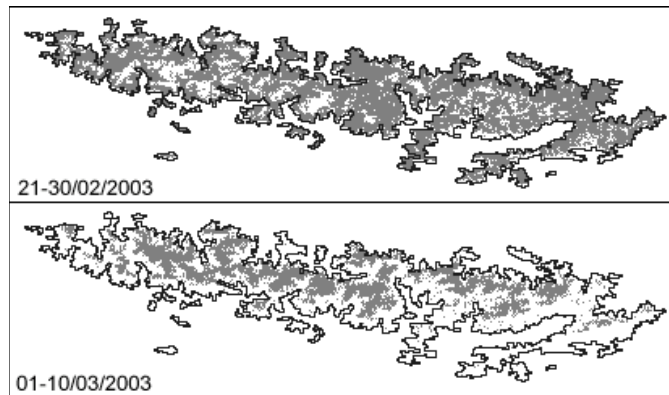


Figura 7. Comparación del manto nivoso en dos décadas sucesivas, en este caso correspondiente al episodio de lluvia intensa de inicios de marzo de 2003 que fundió mucha nieve.

El análisis realizado permite constatar que el índice NDSII detecta bien tanto la aparición como la desaparición del manto nivoso al inicio y fin de las temporadas (Véase figura 5: puntos A e I para la temporada 2001-02 y J y Q para la temporada 2002-03). El fuerte pendiente que se observa en la gráfica justo antes del punto A y J respectivamente para cada temporada, se corresponden con las primeras nevadas importantes, normalmente en noviembre, a partir de las cuales la presencia de nieve en el suelo es permanente en determinadas cotas hasta el fin de la temporada (véase un ejemplo en la figura 6). Así mismo el declive paulatino de la temporada a partir de abril, se refleja con un pendiente más suave pero progresivo (obsérvese en la figura 5 la evolución de la gráfica entre los puntos G-I para la temporada 2001-02 y los puntos P-Q).

Si nos centramos en el análisis por separado de cada temporada, se hace evidente que el índice NDSII resulta especialmente eficiente para el seguimiento de las variaciones en el manto nivoso en aquellas temporadas en las cuales hay una fuerte variación de la cota de nieve presente en suelo. En la temporada 2001-2002, la gráfica de la figura 5 presenta varios picos (puntos A, B, C, D, E, G y H) que corresponden a nevadas importantes en cuanto a su distribución en el espacio. En esta temporada se detectan claramente aquellas nevadas que, pese a no ser especialmente cuantiosas en cuanto a la acumulación, implicaron o bien una fuerte variación de la cota previa a la nevada, o bien afectaron a cotas más bajas de las habituales. Así pues B corresponde a la nevada del 14 de diciembre de 2001 donde la nieve cubrió el fondo de valle de todos los sectores, al igual que D para las nevadas del 6 y 7 de febrero de 2002 y G para las del periodo del 3 al 12 de abril de 2002. También se puede apreciar que el declive de la gráfica tras la nevada es más acusado, cuando la precipitación se dio fundamentalmente en un solo día y no fue especialmente cuantiosa (13 mm), como es el caso de B. Para periodos de nevadas continuadas y cuantiosas, como por ejemplo D y especialmente G, el descenso de la gráfica es más suave siendo compatible con la desaparición más lenta de la nieve en cotas bajas.

Siguiendo con el análisis de la figura 5, las variaciones de cota de nieve se reflejan bien en los puntos C, E y H. Se detectan por una parte nevadas en la cara sur del Pirineo (C y E), donde habitualmente la presencia de nieve en cotas relativamente bajas no es tan frecuente como en la cara norte; y nevadas que afectan a ambas vertientes pero en periodos que rozan el final de la temporada, como las que se dan habitualmente a finales de abril i principios de mayo (H).

C y D corresponden a nevadas que fueron comparativamente más cuantiosas en Boí que en Bonaigua. En C se refleja la nevada que alcanzó los 1400 m, cuando previamente solamente había nieve a 2000 m en orientaciones sur. En el punto E la precipitación fue similar pero la variación de cota fue mucho más importante ya que el manto nivoso era discontinuo desde los 2000 m hasta las cimas, pasando a ser continuo desde los 1500 m tras las nevadas.

El ejemplo de nevada a finales de la temporada corresponde a H. El 2 y 3 de mayo de 2002 la nieve llegó hasta 1200 m en la Val d'Aran y los 1400 m en la cuenca de la Noguera Ribagorçana cuando previamente sólo había nieve a partir de los 2100 m en las laderas orientadas al norte y entre los 2400-2700 m en las orientadas al sur.

Por último los descensos en la extensión de la cobertura del manto nivoso correspondientes a precipitaciones en forma de lluvia hasta cotas altas se ven reflejados en el tramo E-F. En este caso se dieron lluvias de 4mm hasta 2800m en la Val d'Aran con subida de cota de nieve en el suelo.

La comparación entre las dos curvas del gráfico de la figura 5 permite constatar que la temporada 2002-2003 presenta por un lado una mayor superficie innivada y por otro una mayor regularidad de la cota de nieve, especialmente en la Val d'Aran, en comparación con la temporada 2001-2002.

La temporada 2002-2003 se inicia con sucesivas nevadas desde el mes de noviembre hasta diciembre que cubren la mayoría de cotas de todas las cuencas del Pirineo, reflejándose en el tramo J-K dicha regularidad. Posteriormente, la ausencia de precipitación y aumento de la temperatura se refleja en una menor cobertura de manto nivoso, comprendida entre los tramos K-L. A partir de ese punto y como consecuencia de las importantes nevadas que se dieron entre el 29-30 de enero de 2003, se da un incremento de la cobertura del manto nivoso entre L y M. En este episodio se dan nevadas de entre 1 y 1,5 m a 1000 m de altura con presencia de nieve en todas la cota e incomunicación de la Val d'Aran con el resto del territorio circundante. El tramo M-N refleja esa mayor cobertura de manto nivoso.

Al igual que pasa para la temporada anterior, se detecta un importante descenso de la cobertura (tramo N-O) debido a un episodio de lluvia intensa a principios de marzo de 2003 que llegó hasta los 1900-2000 m (véase la figura 7). Finalmente comentar que G representa un episodio de nevadas importantes en la cara sur del Pirineo tal y como se detectó para la temporada 2001-2002 con C y D.

6. Conclusiones

Este estudio supone una primera aproximación, simple y generalista pero con resultados interesantes, al seguimiento de la dinámica del manto nivoso del Pirineo con imágenes SPOT-Vegetation S₁₀. El estudio de la serie de imágenes del periodo 1998-2003 ha puesto de manifiesto la utilidad de las imágenes sintéticas VGT S₁₀ para seguir la evolución, con bastante detalle, de los cambios que registra el manto nivoso a lo largo de la temporada. En la comparativa realizada con datos de sensores de superficie se han usado datos de la red de estaciones automáticas nivometeorológicas del Servei Meteorològic de Catalunya. Se han obtenido resultados interesantes de los que cabe destacar dos puntos:

1. Hay una buena correspondencia entre el NDSII derivado de VGT y los datos de espesor de las estaciones XANIC a la hora de detectar presencia de nieve. Así mismo, a lo largo de la temporada el NDSII es sensible a la mayoría de episodios de precipitación y por tanto es útil para seguir su evolución con una visión más global de la que se puede extraer de las observaciones de superficie.

2. El estudio de la evolución del NDSII indica que hay un comportamiento anual similar en la dinámica de la cobertura del manto nivoso. Aunque la superficie innivada varía de año en año, el inicio y final de temporada se dan en fechas similares en las 5 temporadas estudiadas.

Por otro lado, después del trabajo realizado se ha hecho evidente la necesidad de estudiar más con detalle las distintas cuencas hidrológicas por separado, los distintos estratos e incluso las particularidades de cada año. En este sentido es importante incorporar la temporada 2003-2004 a la comparativa con datos de superficie.

Finalmente, como trabajo futuro, se ha constatado que la serie de datos disponible es lo suficientemente extensa como para pasar del nivel descriptivo de este estudio, al nivel estadístico a la hora de buscar correspondencias entre el NDSII y los datos de las estaciones nivometeorológicas.

7. Agradecimientos

Agradecer al CTIV/VITO el servicio que está dando a la comunidad teledetectora, poniendo a disposición de manera gratuita los datos del SPOT-Vegetation. Así mismo, agradecerles todo el trabajo de corrección de las imágenes que realiza el CTIV, sin los cuales este estudio y muchos otros serían mucho más laboriosos. Por otro lado, agradecer al

Servei Meteorològic de Catalunya la disponibilidad de los datos de la XANIC.

8. Referencias

- [1] García, C., Gavalda, J., Martínez, P. y Jara, J.A., "An automatic snow and weather stations network for the avalanche prediction in the Catalan Pyrenees", 3^a Conferencia Internacional sobre Experiencias con Estaciones Meteorológicas Automáticas, Centro de Publicaciones del INM, 33-41. Madrid, 2003.
- [2] Rahman H., and Dedieu, G., "SMAC: a simplified method for atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum", *Int. J. Remote Sensing*, 15, 123-143, 1994.
- [3] Hall, D. K., Riggs, G. A., and Salomonson, V. V., "Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data", *Remote Sensing of Environment*, 54, 127-140, 1995.
- [4] Xiao, X. M., Shen, Z. X., and Qin, X. G., "Assessing the potential of VEGETATION sensor data for mapping snow and ice cover: a Normalized Difference Snow and Ice Index", *Int. J. Remote Sensing* 22, 2479-2487, 2001
- [5] Xiao X., Zhang Q., Boles S., Rawlins M., Moore III B., "Mapping snow cover in the pan-Arctic zone, using multi-year(1998-2001) images from optical VEGETATION sensor", *Int. J. Remote Sensing*, 25, 5731-5744, 2004.
- [6] Dankers R. and De Jong S.M., "Monitoring snow cover dynamics in Northern Fennoscandia with SPOT VEGETATION images", *Int. J. Remote Sensing*, 25, 2933-2949, 2004.