

La prévision régionale du risque d'avalanche

Carles García¹

***Résumé.** La prévision régionale du risque d'avalanche vise à évaluer la stabilité du manteau neigeux sur l'ensemble d'une région. L'évaluation de la stabilité est liée à l'état actuel du manteau neigeux tandis que la prévision se réfère non seulement à l'état présent mais également au futur. Dans la pratique, l'évaluation de stabilité et les prévisions ne sont pas indépendantes. En fait, les prévisions régionales doivent permettre de répondre à la question suivante : quelles sont les zones les plus soumises au risque d'avalanche dans cette région ? La réponse doit être récapitulée par un niveau de risque. En Europe, une échelle commune de risque d'avalanche a été adoptée et elle s'étend du niveau 1 (faible) au niveau 5 (très fort).*

La meilleure méthode pour évaluer la stabilité d'une pente est de prendre en compte trois caractéristiques critiques du manteau neigeux : sa résistance, sa structure et la qualité de la surface de cisaillement. La résistance conditionne l'initiation de la fracture, alors que la structure et la surface de cisaillement déterminent si cette fracture peut se propager et comment. Lorsqu'elles sont combinées, ces trois caractéristiques du manteau peuvent être utilisées comme outil de prédiction. La difficulté réside dans la manière de les intégrer.

Les tests de stabilité comme le test de compression ou le test du bloc glissant (« rutschblock ») sont de bons indicateurs de la résistance (initiation de la fracture), alors que l'observation de la structure du manteau grâce à des sondages et à la réalisation de tests révélant la qualité de la surface de cisaillement ("extended column test") sont des indicateurs du potentiel de propagation de la fracture.

La structure du manteau neigeux résulte des conditions météorologiques qui modifient sans discontinuer la forme des grains de neige et leurs caractéristiques mécaniques. Les données météorologiques peuvent être acquises au moyen de réseaux météorologiques classiques mais peuvent également être complétées par des enregistrements automatiques dédiés. Le principal avantage des stations automatiques est l'enregistrement continu des données et leur consultation en temps quasi-réel. Ces stations peuvent être implantées à proximité des zones de départ alors que les réseaux météorologiques classiques sont généralement implantés en fond de vallée. Un point important à souligner est que les seules conditions météorologiques ne sont pas suffisantes, l'historique de l'évolution du manteau devant être pris en compte. Cela peut être fait en identifiant les couches fragiles souvent présentes dans le cas des avalanches déclenchées accidentellement. C'est particulièrement essentiel lorsque l'on traite des avalanches de plaques dont le déclenchement est dû à une surcharge.

Après avoir évalué la stabilité, l'estimation du risque qui prend en compte le manteau neigeux sur une région et non seulement sur une pente est une tâche problématique. La détermination d'un niveau de risque nécessite une prise en compte objective des différents critères parmi les prédicteurs et une harmonisation non seulement au niveau européen mais également au sein d'un même service. Des outils tels que la matrice bavaroise sont en cours de développement et discussion.

Une fois le niveau de risque évalué, un bulletin d'alerte est publié. Ce bulletin doit être compris par l'utilisateur, sinon, l'évaluation de stabilité n'a pas de sens. Un bulletin à destination des usagers de la montagne tels les skieurs, surfers, etc., sera différent de celui envoyé à la protection civile ou aux services de secours. Les études sur la compréhension des bulletins montrent que la plupart des utilisateurs ne sont

¹ Institut Geològic de Catalunya, Unitat de Riscos Geològics, C/ Balmes 209-211, E-08006 Barcelona
Tel : +34 93 553 84 26 ; fax : +34 93 553 84 36; e-mail : cgarcia@igc.cat. Web: www.igc.cat

pas capables d'assimiler toute l'information contenue dans le texte. De plus, de nombreux utilisateurs ne peuvent mémoriser l'information principale décrite dans le bulletin comme les secteurs les plus soumis au risque d'avalanche. La tendance actuelle est donc d'élaborer des bulletins avec une structure hiérarchisée présentant en premier lieu le niveau de risque d'avalanche suivi d'une brève description de la situation avalancheuse. Ensuite les secteurs les plus dangereux sont décrits avec un éclairage sur les conditions aggravantes (comme les couches fragiles). Finalement la tendance pour les prochains jours est présentée. Les bulletins sont également améliorés en employant des icônes complétant le texte puisque les utilisateurs ont plus de facilités à se remémorer l'information graphique une fois en situation.

The regional avalanche forecasting

Carles García¹

***Abstract.** The regional avalanche forecasting consists on assessing the snowpack stability for a whole region. Stability evaluation refers to assessment of present conditions of the snow cover, whereas forecasting refers to both current and future prediction. In practice, stability evaluation and forecasting are not usually separated. In fact, a regional forecasting must give an answer to the next question: which are the most endangered zones in this region? The answer has to be summarized into a specific danger level. In the case of Europe, a common scale of degree of avalanche hazard exists and it ranges from the level 1 (weak) to the level 5 (very high).*

The best method of stability evaluation is to take into account three critical snowpack characteristics: strength, structure and shear quality. Strength controls initiation of a fracture while shear quality and structure determine whether that fracture can propagate and how. When used in combination, these three snowpack qualities represent a useful predictive tool. The difficulty is how to integrate the results of the three items.

Stress tests such as the compression and rutschblock test are good indicators of strength (fracture initiation), while observation of the snowpack structure by means of performing snow pits and tests for shear quality such as the extended column test are indicators of the potential for fracture propagation.

Snowpack structure is the result of the effects of the meteorological factors on the snow which are continuously transforming the shape of the snow grains and their mechanical conditions. Meteorological elements must be registered by means of a conventional network of meteorological stations but it can be complemented by an automatic network. The main advantage of an automatic station is that data are continuous and they can be consulted almost on real-time. Another advantage is that automatic stations can report information near from the starting zones of the avalanches, whereas conventional stations usually are located in the bottom of the valleys. A hot point is that meteorological conditions not always act on the same way on the snowpack stability, so it depends on the previous state of the snowpack.

In addition to the meteorological data, it is necessary to know and to integrate the internal conditions of the snowpack. It can be done by means of identifying the weak layers characteristics that are common in human-triggered avalanches. This is especially essential when dealing with slab avalanche situations since avalanches are triggered by adding load.

After evaluating stability, a problematic task is to assign a hazard degree that summarizes the snowpack conditions for a whole region, not for a single slope. To determine a specific danger level entails objectivity and harmonization of criteria among predictors, not only from different countries but also from inside the same office. Tools for that such as the Bavarian matrix are in progress and discussion.

Once the avalanche danger has been determined, a warning report is issued. The avalanche report must be understood by the user, if not, stability evaluation makes no sense. A report to the mountain user for skiing, surfing, etc, will be different from that advising to the responsible for civil protection or rescue services. Studies on the understanding of the warning reports highlight that the most users are not capable to absorb all the information contained in the text format. Also many users cannot recall the main information described in the bulletin such as the most endangered areas. That is way the current trend is to elaborate the

¹ Institut Geològic de Catalunya, Unitat de Riscos Geològics, C/ Balmes 209-211, E-08006 Barcelona
Tel : +34 93 553 84 26 ; fax : +34 93 553 84 36; e-mail : cgarcia@igc.cat. Web: www.igc.cat

advisories with a hierarchical structure focusing in the top the avalanche danger level with a brief description of the avalanche situation. Afterwards the most endangered areas must be described highlighting the dangerous conditions (state of the weak layers) and finally the trend for next days and weather forecasting will be showed. Likewise, bulletins are being improved by using icons to complement the text since graphical information is easier to retain and to recall by the users once they are on the field.

1. Generalidades

La predicción regional del peligro de aludes consiste en estimar el peligro de aludes para una determinada superficie del orden de un macizo montañoso o cuenca hídrica, de un área superior a 100 km². En caso de una predicción para una zona de menores dimensiones hablaríamos de una predicción local, en la que se evalúa la estabilidad de una ladera concreta, y no la caracterización media de un sector con laderas en distintas orientaciones y altitudes. El nivel de peligro es el establecido en la escala europea unificada de peligro, que consta de cinco grados: 1 débil, 2 moderado, 3 notable, 4 fuerte y 5 muy fuerte.

Básicamente, la predicción regional consiste en prever la evolución a corto plazo de las condiciones del manto nivoso. Las condiciones del manto determinan el nivel de estabilidad, es decir la propensión de alguna capa del manto a desprenderse por gravedad ladera abajo dando lugar a un alud. Las condiciones del manto varían en el tiempo y en el espacio por efecto de la meteorología y de los factores geo-topográficos. Estos últimos se consideran factores fijos (orientación, altitud, rugosidad, inclinación, entre otros) ya que no evolucionan temporalmente y son intrínsecos al relieve, mientras que los factores meteorológicos son considerados variables (temperatura, radiación solar, precipitación, viento, entre otros) ya que dependen del estado de la atmósfera y ésta se encuentra en evolución continua.

Por tanto, para realizar una predicción regional, es decir, prever la estabilidad del manto nivoso y la consiguiente probabilidad de ocurrencia de aludes a escala de macizo montañoso, es necesario:

- Primero, conocer el estado actual de las condiciones físicas y mecánicas del manto nivoso.
- Segundo, conocer la evolución prevista de las condiciones meteorológicas, ya que la nieve se transforma y evoluciona por efecto de la meteorología.
- Tercero, prever la evolución de las condiciones mecánicas del manto a partir de los dos puntos anteriores y, en consecuencia, estimar el grado de peligro de aludes para las próximas 24 horas.

Es fundamental disponer de una red de observación nivometeorológica para obtener datos del estado del manto nivoso y de las condiciones meteorológicas en alta montaña, suficientemente densa para caracterizar el estado del manto a escala de un macizo montañoso.

2. Observación del manto nivoso

El estado del manto nivoso se determina a partir de la observación de su estructura interna, la cual nos permitirá evaluar su estabilidad.

Tradicionalmente, el procedimiento para conocer el estado interno del manto consiste en efectuar un sondeo por percusión y a continuación un perfil estratigráfico.

Sondeo por percusión. El sondeo por percusión o golpeo sirve para calcular la dureza de las distintas capas de nieve desde la superficie del manto hasta el contacto con el suelo, mediante la siguiente fórmula:

$$R = \frac{nh}{d} + q + P \quad \text{forma simplificada por } R = \frac{nhP}{d} + qQ + P$$

donde R es la resistencia o dureza (en newtons), n el número de golpes para una tanda de golpes durante los cuales el hundimiento de la sonda es regular, h es la altura (cm) desde la que se deja caer el peso sobre la sonda, d es el hundimiento parcial de la sonda (cm) para esa tanda de golpes, q es el número de tramos de la sonda (un tramo por cada metro de sonda) y P es el parámetro que identifica el uso del peso móvil (1/0, peso/sin peso). Se calcula R para cada serie de golpes y se grafica respecto al valor d , es decir la dureza para un determinado tramo del manto nivoso.

Se trata de hacer penetrar una sonda (sonda Haeffeli), de dimensiones y peso estándar, verticalmente en el manto mediante el golpeo que produce un peso que se deja resbalar por una varilla acoplada a la parte superior de la sonda. Se recomienda ajustar la altura desde la que se deja caer el plomo, de manera que por cada golpeo la penetración de la sonda sea de 1 cm aproximadamente. Cuando la sonda se acelera o se frena, se detiene la tanda de golpes y se anota el hundimiento parcial y a continuación se inicia una nueva tanda de golpes. Para ajustar la altura de caída del golpeo a la dureza del manto (a mayor dureza, mayor altura de caída del peso y viceversa), se recomienda antes de iniciar la medida ir penetrando la sonda a mano e ir anotando a que alturas hay cambios de dureza, para después ajustar bien la altura de caída del peso a la dureza detectada.



Foto 1 : Sondeo por golpeo (autor: Ramon Baylina)

2.1. Perfil estratigráfico

Una vez realizado el sondeo, se procede a efectuar el perfil estratigráfico haciendo un corte en el manto hasta el suelo. El objetivo de esta medida es identificar las capas o estratos de nieve y describir sus características: espesor, tipo y diámetro de grano de nieve, dureza, humedad y densidad. Es como si hiciéramos una radiografía en el manto. En paralelo, se calcula el gradiente térmico de la nieve midiendo la temperatura de la nieve cada 10 cm.

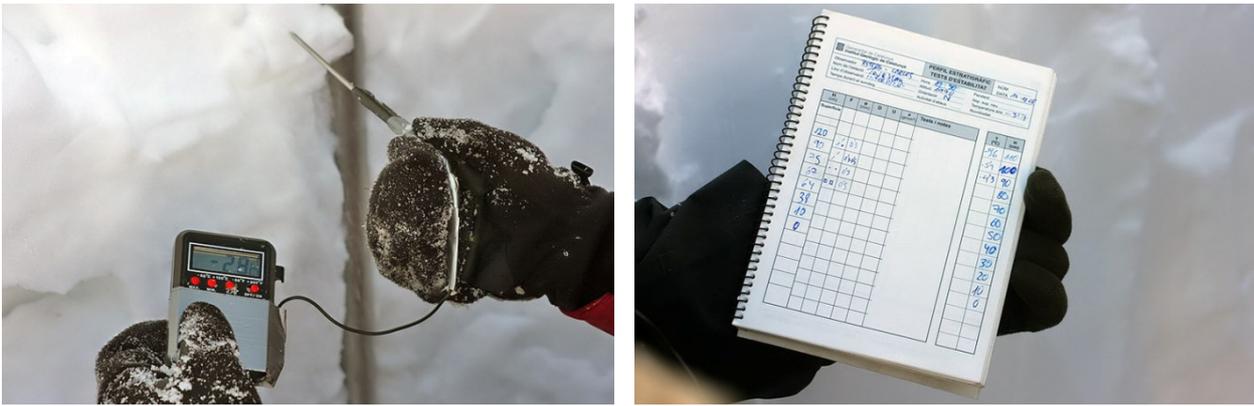
El objetivo final es detectar capas o estratos débiles (capas formadas por granos con escasa cohesión entre ellos) y contactos o interfaces entre capas que puedan constituir planos de deslizamiento (escaso rozamiento o cohesión en el contacto entre capas), así como su relación con el resto de capas. La detección de una capa débil o de un posible plano de deslizamiento siempre será el resultado de la combinación de las diversas observaciones realizadas en el manto, nunca el resultado de una única observación o de un sólo parámetro.



Fotos 2 y 3 : Perfil estratigráfico (autor: Ramon Baylina).



Fotos 4 y 5 : Perfil estratigráfico. Observación del tipo de grano y densidad de capa (autor: Ramon Baylina).



Fotos 6 y 7: Perfil estratigráfico. Medición del gradiente térmico y anotación en libreta de campo (autor: Ramon Baylina).



Foto 8 : Plaqueta de identificación y diámetro del tipo de grano (autor: Ramon Baylina).

2.2. Limitaciones

La elección de la ubicación del punto de sondeo y perfil es fundamental para una correcta interpretación de los datos. La distribución de puntos de sondeo y perfil en una región objeto de predicción viene condicionada por la disponibilidad de personal observador, por la accesibilidad y por las condiciones meteorológicas, de manera que lo habitual es acometer un perfil semanal por cada punto y es recomendable disponer de más de un punto por región.

Puede haber disparidad de criterios a la hora de elegir los puntos de sondeo, pero es fundamental que sean representativos de las condiciones que definan la situación nivológica de aquella región. Siempre, el primer criterio es la seguridad, por tanto, el punto de sondeo debe estar fuera de una zona de alud. Por tanto se realizarán en laderas en cota alta con condiciones nivales similares a la zona de salida de los aludes, pero donde las condiciones del relieve impidan el arranque o paso de una avalancha. Por ejemplo, una región donde la actividad de aludes venga determinada en gran parte por el transporte de nieve por el viento, el perfil y sondeo debe recoger estas condiciones. Por tanto, se escogerá una ladera a sotavento de la dirección de transporte más frecuente donde poder detectar la formación de placas de viento y su evolución; ya que una placa de viento va a ser inestable en función de la existencia de capas débiles subyacentes,

será interesante que ese punto permita también detectar la formación de esas capas débiles. Así, escogeremos una ladera a la sombra, ya que el manto permanecerá más frío que en el resto de laderas y favorecerá la presencia de capas débiles por metamorfismo de gradiente alto y medio. También hay que tener en cuenta que la actividad de aludes varía en función de la época del año; siguiendo el ejemplo anterior, si las placas de viento eran el objetivo en los meses más fríos del invierno y habíamos escogido una ladera umbría en orientación nordeste, puede ser interesante escoger una ladera soleada a partir del mes de marzo para controlar los procesos de fusión.

3. Interpretación de la estructura del manto nivoso

Aunque cada centro de predicción utilice diferentes programas para la introducción de datos de la estructura del manto nivoso, la representación gráfica es muy similar ya que el objetivo es la combinación visual entre la dureza del manto y las diferentes capas que lo forman.

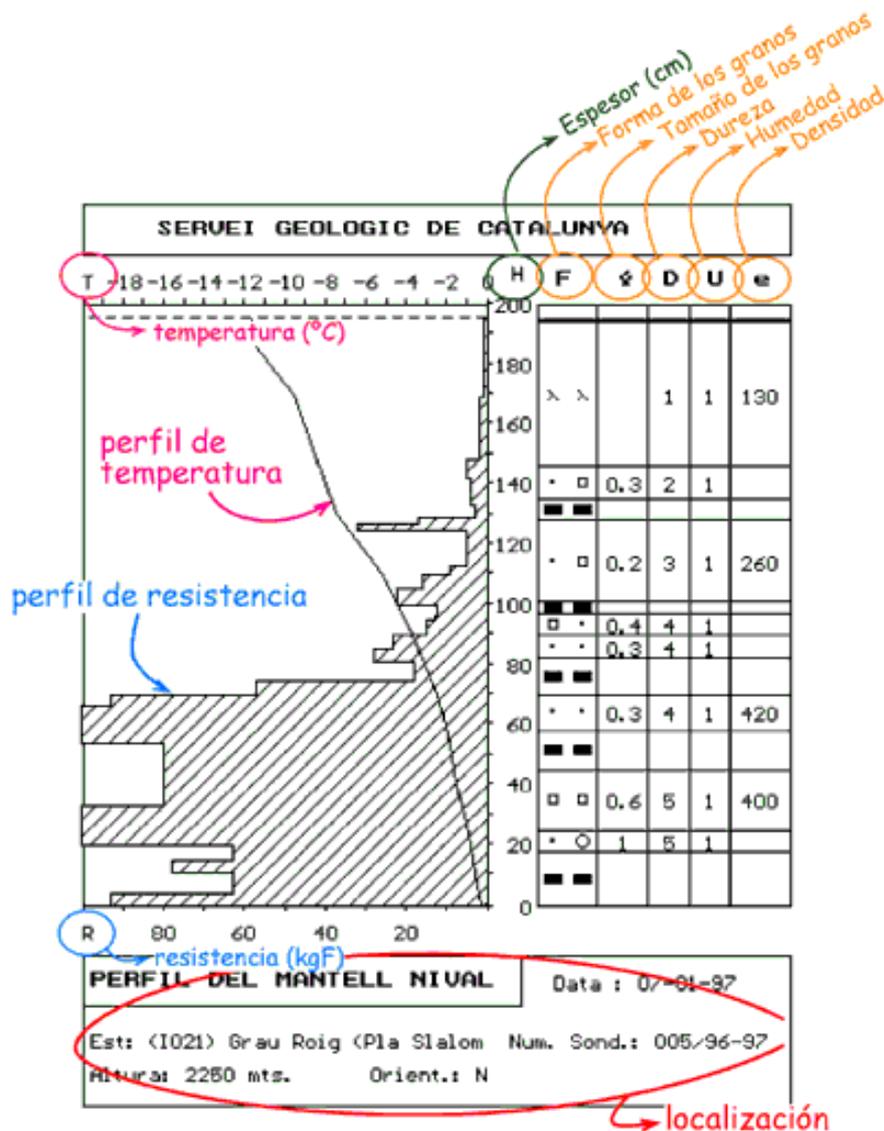


Figura 1 : Representación del sondeo por golpeo y del perfil estratigráfico

A continuación se muestran algunos perfiles representativos de situaciones habituales.

3.1. Nevada intensa

Este perfil corresponde a la temporada excepcional de 1995-1996 en el Pirineo de Catalunya. En superficie se aprecia un nivel de casi un metro de espesor de resistencia mínima formado por agujas visibles y partículas reconocibles, es decir el primer estadio de transformación de la nieve reciente en que se empiezan a romper las dendritas. Intercalado entre 110-110 cm hay un nivel de nieve granulada, que es un tipo de nieve reciente en forma de gránulos de muy lenta transformación y que puede permanecer como capa débil en el interior del manto durante bastantes días. Por debajo de los 80 cm hasta el suelo hay nieve vieja transformada en grano fino con costras de rehielo de resistencia muy alta, incluso superior a 1000 N. En este caso, se trata de un perfil que indica alta probabilidad de aludes de nieve reciente, incluso de gran tamaño. Además, en caso de que se anunciara viento fuerte, el metro de nieve superior sería fácilmente transportable formando grandes acumulaciones a sotavento. Al cabo de 6 días de efectuarse el perfil, cayeron aludes excepcionales en ese sector destruyendo bosques de más de 100 años de edad.

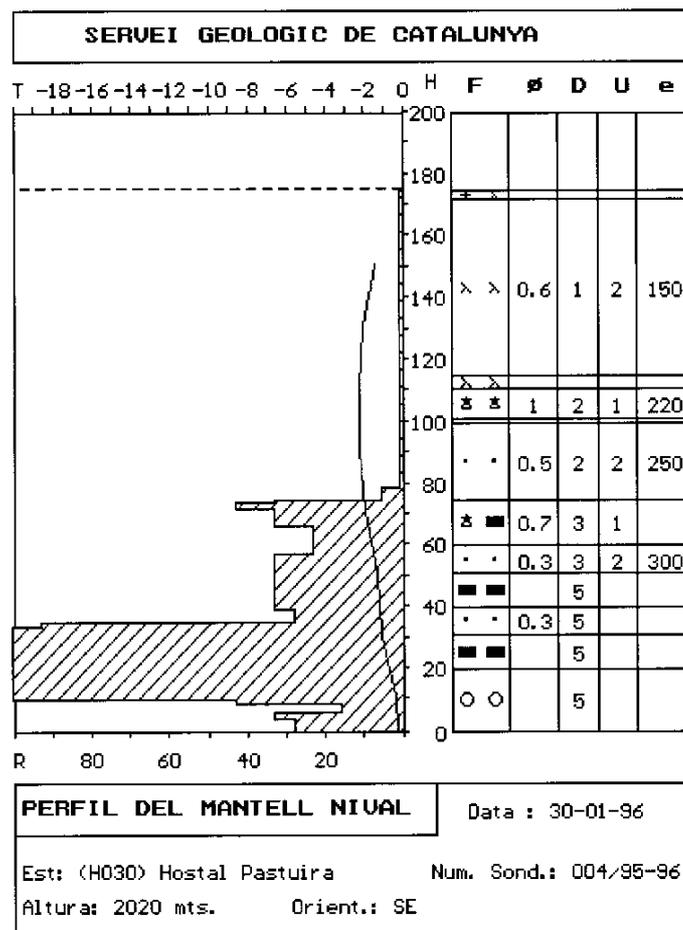


Figura 2 : Situación de manto con nevada intensa

3.2. Estructura de placa de viento

Este perfil corresponde a un manto con nieve empaquetada por el viento en superficie (70 a 115 cm) con una capa débil formada por granos con facetitas en la base de esta placa de viento (60 a 70 cm). A priori, es una estructura potencialmente inestable, aunque para determinar su estabilidad habría que evaluar la capacidad de sobrecarga, el esfuerzo de cizalla necesario para que falle la placa y la capacidad de propagación de la fractura. Es muy significativa la existencia de una fina costra de rehielo entre 58-60 cm, que favorece la formación de granos incohesivos en su superficie y una falta de cohesión con la capa suprayacente. La nieve venteada se identifica por su aumento de dureza, un grano fino de pequeñas dimensiones y una densidad elevada (cercana a los 300 kg/m³). Por debajo de los 60 cm, la nieve está muy endurecida y bien consolidada.

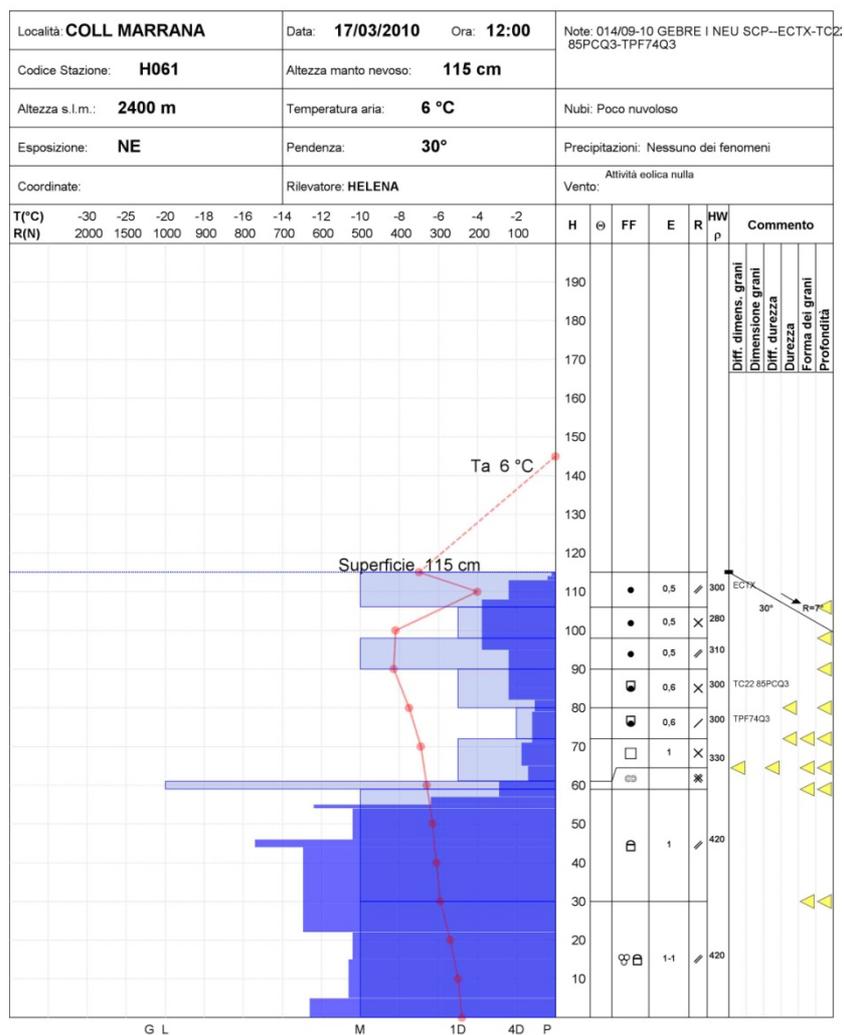


Figura 3 : Situación de manto con formación de placa

3.3. Manto en estado de fusión.

Todo el manto está formado por nieve que ya ha entrado en proceso de fusión, como es habitual que suceda a finales de abril, incluso en una ladera orientada al norte a 2200 m de altitud. El tipo de nieve corresponde en su totalidad a granos de fusión y a costras diversas. La temperatura de la nieve está muy cercana a cero grados y la densidad de las

capas es muy elevada (supera incluso los 400 kg/m³). Durante el día, a medida que aumenta la insolación y la temperatura ambiental la nieve superficial empieza a fundir, aumentando el volumen de agua líquida y percolando por los poros hacia niveles inferiores, haciendo disminuir la cohesión de los granos de nieve. Al llegar a un determinado volumen de agua líquida, se produce el alud de fusión. Una vez que la temperatura ambiental vuelve a bajar de cero grados o bien el manto se enfría por irradiación durante la noche, el agua líquida se congela, formando las costras de rehielo y dotando al manto de una alta estabilidad. En el perfil en concreto, se observa como la fusión superficial afecta ya a los 20 cm superficiales, mientras que por debajo aún hay una fina costra de rehielo que muestra un aumento lógico de la dureza. Por debajo, la cohesión vuelve a disminuir y se aprecian capas de granos con facetitas (nieve que proviene de etapas con manto frío) transformándose en granos de fusión, con una humedad bastante elevada. En ocasiones, la costra que se observa por debajo de los 20 cm superficiales puede favorecer la actividad de aludes de fusión, ya que la percolación de agua líquida se frena al llegar a la costra, que al ser más impermeable puede concentrar un flujo laminar del agua sobre su superficie debilitando los posibles enlaces con la capa superior y favoreciendo su deslizamiento en forma de alud de fusión.

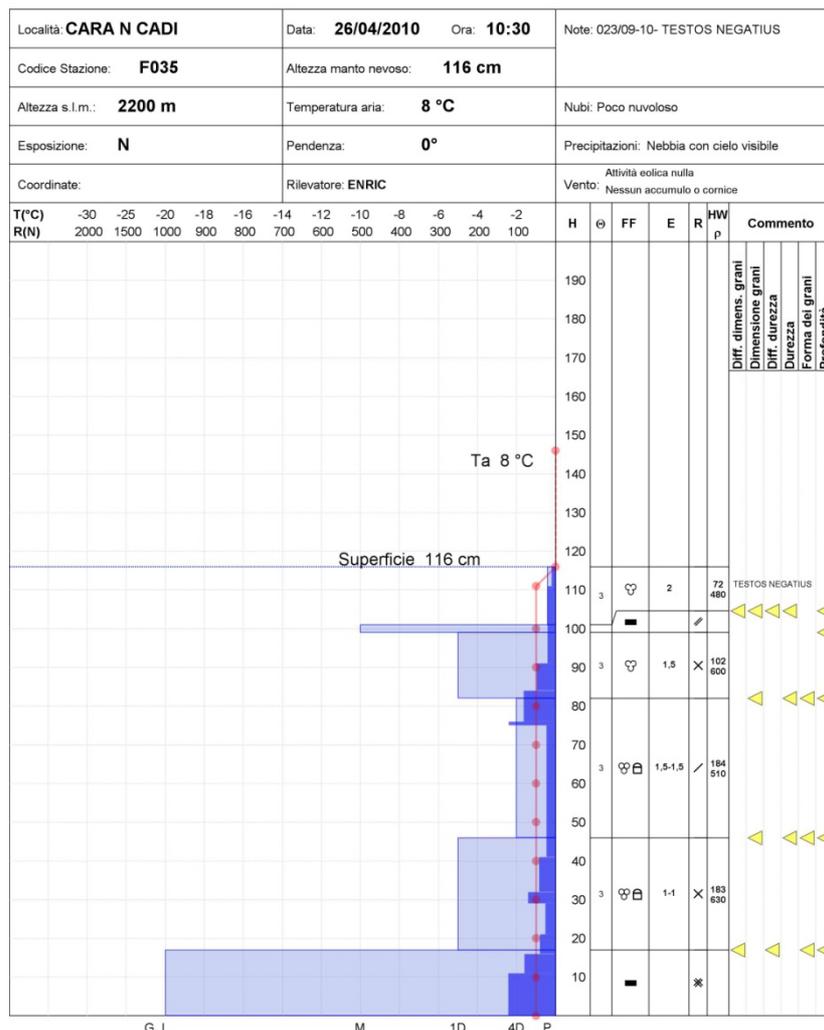


Figura 4 : Situación de manto con nieve de fusión

3.4. Manto bien consolidado

Este perfil corresponde a un manto nivoso bien consolidado y muy estable. La característica principal es el progresivo aumento de la dureza en profundidad, adquiriendo la representación de la resistencia la forma de pirámide invertida. Las durezas altas van ligadas obviamente a un tipo de grano de alta cohesión como es el grano fino. Incluso entre las capas de grano fino se observan numerosas costras, que aunque sean finas, en este caso contribuyen a la estabilidad del manto. El gradiente térmico es bajo, lo cual favorece la formación y el mantenimiento de estos granos finos. En superficie, se observa cómo se está iniciando la fusión de la capa de nieve en contacto con el aire.

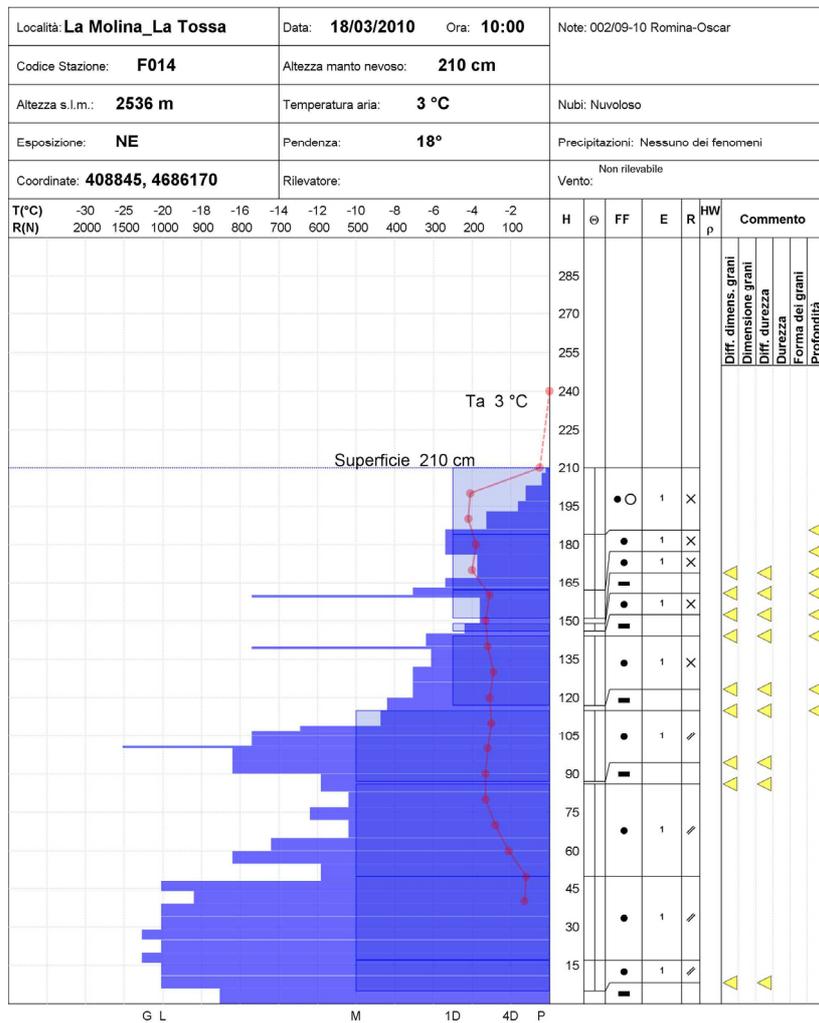


Figura 5 : Situación de manto con alta estabilidad

4. Observación meteorológica

Una vez la nieve procedente de una nevada o de un episodio de transporte de nieve por el viento se ha depositado sobre el suelo o sobre el manto nivoso, se va a transformar en distintos tipos de grano en función de las condiciones meteorológicas. Lo mismo va a suceder con el resto de capas ya existentes. Por tanto, las condiciones meteorológicas proporcionan información sobre la estabilidad presente y futura del manto nivoso.

Los elementos meteorológicos de interés en la predicción de aludes son muy numerosos, aunque la importancia de cada uno de ellos va a variar en función del tiempo y del espacio. Habitualmente es necesario registrar: dirección y velocidad del viento, temperatura del aire, precipitación, nieve reciente, ventisca, radiación solar, humedad del aire. Así, no todos los centros de predicción regional toman los mismos datos, aunque sí comparten el núcleo básico que acabamos de citar; es decir, a estos se pueden añadir otros como estado de la nubosidad, visibilidad, intensidad de la precipitación, etc. Por ejemplo, los centros de predicción de los Pirineos (Francia, Aragón, Catalunya, Andorra) utilizan el código NIMET, que difiere ligeramente del protocolo que puedan seguir los centros de predicción de Suiza o Italia.



Fotos 9 y 10 : Parcela de observación e interior de garita meteorológica (archivo IGC).

A diferencia de las observación del manto nivoso, que es de carácter semanal, las condiciones meteorológicas, dada su variabilidad temporal deben ser registradas diariamente, incluso varias veces al día. En el emplazamiento donde se registran las condiciones meteorológicas, se observa también el estado superficial de la nieve, entre los cuales destaca el espesor total de nieve, la temperatura de la nieve en superficie,

aspecto de la superficie, tipos de grano superficiales, diámetro de los granos, número de capas en la parte más superficial, penetración del primer tramo de sonda, densidad de la nieve superficial. Finalmente se reporta también la actividad de aludes observada en las últimas 24 horas.

Las redes de observación meteorológica pueden ser manuales o automáticas. Los observadores manuales efectúan una o dos observaciones al día (mañana y tarde) en una parcela donde se ubica una garita meteorológica que contiene los instrumentos habituales de observación meteorológica. Las redes de estaciones nivometeorológicas automáticas registran de forma continua la evolución de los parámetros meteorológicos y puede acceder a estos datos casi en tiempo real. Esta es la principal ventaja de una red automática sobre una red convencional. Otras ventajas sobre las estaciones convencionales es que las automáticas pueden colocarse en ubicaciones similares a las zonas de salida de los aludes, zonas remotas, mientras que las estaciones convencionales suelen estar en fondos de valle o zonas habitadas, excepto en las estaciones de esquí.



Foto 11 : Estacion nivometeorológica automática (archivo IGC).

No obstante, debe entenderse que las estaciones automáticas no substituyen sino que complementan las convencionales, ya que existen observaciones meteorológicas de carácter cualitativo que difícilmente puede registrar un sensor y que deberán ser realizadas por una persona. Además, las estaciones automáticas implican un elevado coste de mantenimiento y una ardua tarea de validación de los datos. Normalmente, los problemas en las estaciones automáticas van asociados a la fuente de alimentación (habitualmente energía solar) y al funcionamiento del sistema de transmisión de los datos debido a las duras condiciones ambientales. La elección del emplazamiento de una estación automático es fundamental para la representatividad de los datos. Normalmente, un buen emplazamiento para un tipo de registro meteorológico es incompatible con el de

otro parámetro meteorológico. Por ejemplo, si queremos conocer bien la dirección y velocidad del viento podemos optar por una ubicación elevada, como una cresta, pero perderemos información sobre el espesor de nieve o la precipitación, ya que la fuerza del viento impedirá la acumulación de nieve o por el contrario sobreacumulará la nieve en el suelo o en el pluviómetro sobreestimando o subestimando el registro de la precipitación.

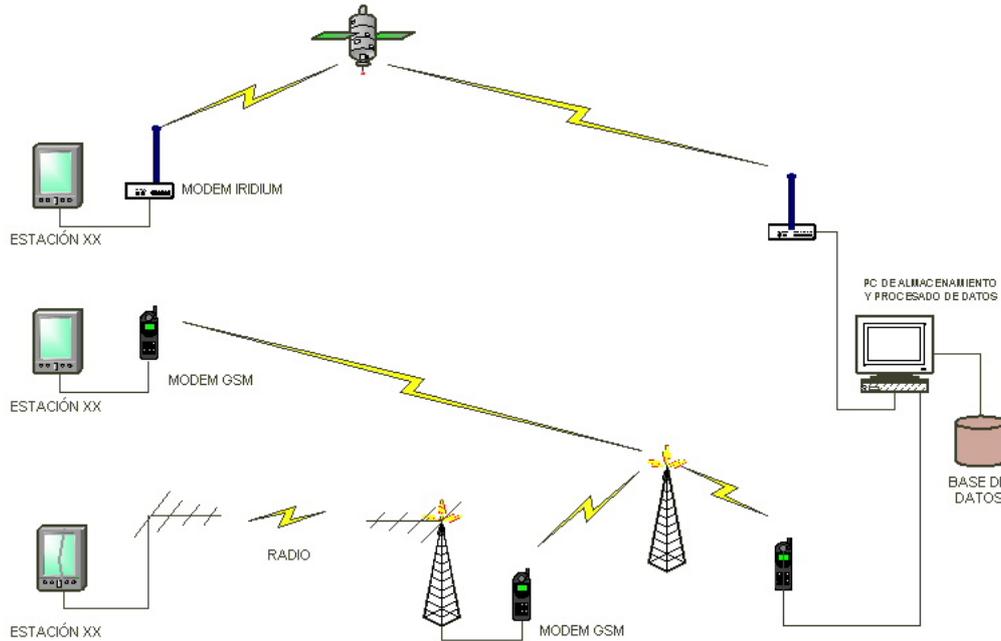


Figura 6 : Sistemas de comunicación de una red de estaciones nivometeorológicas automáticas.

La gran dificultad a la hora de evaluar el peso de una variable meteorológica o determinar qué valor o umbral ha de rebasar un parámetro para propiciar actividad de aludes es debido a que una única variable no es suficiente para estimar la estabilidad del manto nivoso. Incluso una regla aplicable en un caso, no es aplicable a otro caso similar. Normalmente, al plantearnos si una variable meteorológica contribuye a la inestabilidad del manto nivoso, la respuesta acostumbra a ser "depende". Por ejemplo, ¿la lluvia va a incrementar el peligro de aludes?:

- Depende de la cantidad: una lluvia ligera puede hacer aumentar la estabilidad del manto al aumentar la cohesión entre los granos por rehielo del agua en contacto con una manto claramente por debajo de ceros grados. Una lluvia moderada puede incrementar la densidad de la capa superficial o hacer disminuir su cohesión y provocar aludes de fusión.
- Por tanto, ¿una lluvia moderada o intensa inestabiliza siempre el manto? Depende. Depende del estado previo del manto. Si la lluvia cae sobre un manto endurecido, con granos de fusión consolidados tras varios días de fusión-rehielo, con poca porosidad, no afectará a la estabilidad del manto. Por contra, una lluvia moderada sobre un manto formado por nieve reciente o partículas reconocibles, frío y poroso, penetrará en profundidad fundiendo las dendritas y provocará una fuerte inestabilidad provocando aludes de nieve reciente.

No obstante, a lo largo de la experiencia un predictor acaba elaborando una serie de reglas empíricas que van a ser de utilidad, aunque no de validez universal, ya que van a

depender del clima, del relieve, de la época del año, entre otros factores. La mayoría de situaciones con notable actividad de aludes van a ir asociadas a:

- Nevadas intensas (superiores a aproximadamente 60 cm en 24 horas o un metro en 72 horas).
- Transporte de nieve por el viento con temperaturas bajas y manto poco cohesivo.
- Lluvia sobre un manto frío y poroso.
- Aumento súbito y notable de la temperatura con un manto frío y poco cohesivo.

Aparte de las precipitaciones, un elemento fundamental en la predicción regional de aludes es el control del gradiente térmico del manto nivoso ya que va a determinar el proceso de transformación de los granos de nieve, y por tanto, la formación de capas cohesivas o de capas débiles. El gradiente térmico de la nieve no depende exclusivamente de la evolución de la temperatura ambiental, sino del balance radiativo o térmico del manto nivoso, resultado del intercambio de energía entre el manto nivoso, la atmósfera y la superficie terrestre. Hay que destacar, que, en contra de lo que se suele pensar, el manto no se calienta fundamentalmente por efecto de la radiación solar en los meses más fríos del invierno, ya que el albedo de la nieve es muy elevado, sino por efecto de la nubosidad nocturna. Por otra parte, el manto se enfría notablemente no únicamente por temperaturas ambientales bajas, sino por efecto de la irradiación nocturna en largas noches despejadas con humedad baja y ausencia de viento.

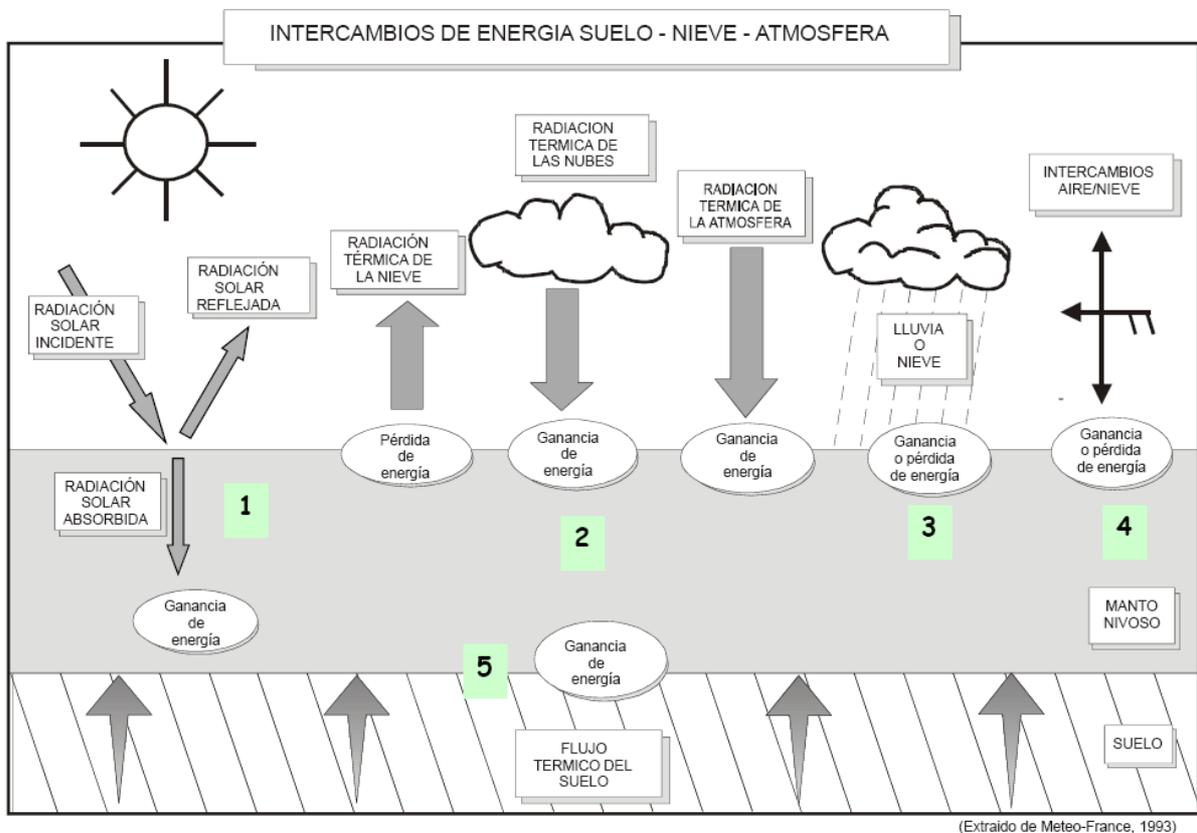


Figura 7 : Flujos de intercambios de energía entre el manto nivoso, la atmósfera y el suelo

La velocidad del viento, por su capacidad de transportar nieve, es también una variable fundamental. Así, la predicción de aludes de placa de viento no hay tenerla sólo en cuenta cuando nieva con viento, sino también días después de la nevada en caso de una entrada de viento que coincida con disponibilidad de nieve transportable, es decir, nieve poco cohesiva, como nieve reciente caída días atrás que se ha mantenido poco transformada por efecto de temperaturas bajas y ambiente seco.

5. Estabilidad del manto nivoso

En predicción, el objetivo del análisis de la estabilidad es saber si el manto va a deslizar, si el alud se producirá. En situaciones de actividad espontánea o natural, el análisis de la estabilidad puede ser suficiente a través de la observación de la estructura del manto nivoso y del rol de los elementos meteorológicos, que hemos visto previamente. No obstante, en la predicción de situaciones de peligro de aludes por sobrecarga (aludes de placa) la situación se complica, ya que en el análisis de la estructura del manto (sondeo y perfil) nos van a faltar elementos que nos den información de la capacidad de sobrecarga del manto, de la resistencia a la cizalladura y de la capacidad de propagación de una fractura que pueda iniciarse. En los últimos años, se han diferenciado los dos componentes que participan en el desencadenamiento de una avalancha de placa: mientras la inestabilidad mecánica –ligada a la resistencia a la cizalla- era un parámetro conocido y evaluado desde hace años, la inestabilidad estructural – la capacidad de la nieve de concentrar el estrés en un plano y propagar la ruptura- sólo ha sido bien estudiada los últimos años.

Los nuevos indicadores de inestabilidad se centran en la evaluación de la inestabilidad estructural a partir de la calidad de la cizalla o del carácter de la fractura o bien en la combinación de los dos tipos de inestabilidad. Finalmente, la aparición del Test de la Columna Extendida (*Extended Column Test*) ha aportado un indicador que proporciona una información objetiva, tanto mecánica como estructural, y es fácil y rápido de realizar. Este test se suma a los que clásicamente se ha venido aplicando, el test de la columna y el Rutschblock test.

Por tanto, evaluar la estabilidad del manto obliga a integrar los tres tipos de información obtenidos en la ejecución del perfil y sondeo y los tests de sobrecarga citados. A la resistencia a la sobrecarga y la capacidad de propagación de la fractura (tests) hay que sumar los factores críticos que presentan las capas débiles que han acabado provocando accidentes (observación de la estructura del manto). A través del estudio de las capas débiles en accidentes provocados por aludes de placa se han identificado 5 factores que caracterizan estas capas débiles y que algunos autores denominan “lemons” y otros “yellow flags”. Estas características comunes en las capas débiles que han provocado accidentes son:

- Granos persistentes (cubiletes, facetas, escarcha).

- Diferencia de tamaño de grano entre la capa débil y las capas adyacentes superior a 1 mm.
- Diferencias de dureza entre la capa débil y las adyacentes superior a un nivel (5 niveles de observación cualitativa basada en la penetración de puño, 4 dedos, 1 dedo, lápiz o navaja).
- Espesor de la capa débil inferior a 10 cm.
- Situación de la capa débil en el primer metro superior de nieve.

Estas características comunes se han obtenido en estudios hechos en Canadá y Suiza, y probablemente deban ser ajustados a diferentes climas, especialmente para zonas más meridionales como los Pirineos.

Finalmente, para llegar a una conclusión sobre la estabilidad del manto, todas estas piezas deben ser encajadas como en un puzzle, y tal vez la mejor manera es hacerlo mediante una *checklist* donde anotemos y puntuemos el resultado de los tests, la existencia de “lemons” e indicios de inestabilidad como pueden ser actividad reciente de aludes, meteorología, transporte de nieve por el viento, asentamiento o no de la nieve superficial, etc.

6. La escala europea de peligro de aludes

Los boletines de predicción de peligro de aludes en Europa utilizan la escala europea unificada de peligro de aludes, a excepción de algunas regiones donde se utilizan escalas distintas pero muy similares, como el caso de Escocia en que las zonas de predicción se consideran de dimensiones inferiores a la categoría de regional o en Noruega donde la densidad de población es más baja y la vulnerabilidad del territorio es distinta a la de zonas alpinas o pirenaicas.

En el mes de abril de 1993, se reunieron en Wildbad Kreuth (Alpes Bavareses, Alemania) los organismos encargados de realizar la predicción pública de avalanchas de nieve. En esta reunión se acordó unificar la escala de peligro de aludes a nivel europeo, ya que cada país utilizaba una propia. En esta reunión se definieron cinco índices de peligro y para cada índice, el nivel de estabilidad, la probabilidad de desencadenamiento y algunas indicaciones para el esquí fuera de las pistas. Durante los primeros años de aplicación de la escala se depuraron pequeños matices hasta quedar definida la escala actual.

Las definiciones de la escala actual son muy generales y resumidas, y a veces llevan a interpretaciones erróneas. De hecho, todavía se discute el contenido de la escala para mejorarla y sobretodo armonizar su uso entre todos los países que la utilizan. Antes de nada tenemos que entender cómo se aplica la escala en un Boletín de Peligro de Aludes (BPA) y cuáles son sus limitaciones:

- Cuando se da un valor de peligro, se aplica a escala regional, o sea, se aplica a una extensión relativamente grande de territorio (escala de macizo montañoso o valle), donde puede haber variaciones locales cuando el grado es muy distinto entre dos zonas limítrofes, por lo que hay que entender que habrá un gradiente entre las dos zonas.

- Las regiones en las que se aplica el valor se pueden haber definido en base a sus características nivo-climáticas o bien a límites político-administrativos, con lo que pueden haber distintos patrones de comportamiento del manto nivoso en una misma región. Algunos países han solucionado este problema evitando prefijar regiones (Austria), de manera que la extensión territorial del grado de peligro varía en función de cada situación.
- La forma de aplicar la escala de peligro no es exactamente igual en todos los organismos ya que, por una parte en la estimación de la estabilidad no todos los centros aplican exactamente la misma metodología, y por otra parte, las distintas condiciones nivoclimáticas de cada país hacen que la frecuencia de uso de cada nivel sea distinta y se puedan acabar aplicando los niveles de forma relativa. Es decir, en un país donde nieva más que en otro es posible que se usen menos valores altos ya que son situaciones muy frecuentes y por tanto no se perciben como tan críticas, mientras que en otro país donde nieva menos estas situaciones pueden considerarse más críticas por ser menos frecuentes y utilizarse un grado de peligro más elevado, con lo que en algunos casos podrían darse valores distintos de peligro para una misma situación.

Índice de peligro	Estabilidad del manto nivoso	Probabilidad de desencadenamiento	Indicaciones para el esquí fuera de las pistas y recomendaciones
<p>1  Débil</p>	En la mayoría de las vertientes el manto nivoso está bien estabilizado.	Excepcionalmente, sólo pueden desencadenarse aludes en algunas pendientes muy propicias (*) y, sobre todo, a causa de fuertes sobrecargas. De forma natural sólo pueden desencadenarse coladas o pequeños aludes.	Las excursiones y el descenso con esquís son posibles casi sin restricciones.
<p>2  Limitado</p>	En algunas pendientes (***) suficientemente propicias a los aludes, el manto sólo está moderadamente estabilizado. En el resto, está bien estabilizado.	Se pueden desencadenar aludes sobretodo por sobrecargas fuertes y en algunas pendientes cuyas características se describen normalmente en el boletín. No se esperan salidas espontáneas de aludes de gran amplitud.	Las excursiones deben realizarse con previa planificación. Se recomienda prudencia a la hora de elegir los itinerarios, evitando, en lo posible, las vertientes inclinadas con la orientación y la altitud que se indican.
<p>3  Notable</p>	En numerosas pendientes (***) suficientemente propicias, el manto sólo está moderada o débilmente estabilizado.	Se pueden desencadenar aludes incluso por sobrecargas débiles y en numerosas pendientes cuyas características se describen habitualmente en el boletín. En ciertas situaciones son posibles algunas salidas espontáneas de aludes de dimensiones medias y a veces grandes.	Deben evitarse las vertientes inclinadas en las orientaciones y altitudes que se indican. Se requiere mucha experiencia y una gran capacidad de apreciación del peligro de aludes.
<p>4  Fuerte</p>	En la mayoría de las pendientes (***) suficientemente propicias a los aludes, el manto nivoso está débilmente estabilizado.	Se pueden desencadenar aludes incluso por sobrecargas débiles en la mayoría de las pendientes suficientemente propicias a los mismos. En ciertas situaciones, son posibles numerosas salidas espontáneas de aludes de dimensiones medias y a veces grandes.	Las excursiones tienen que limitarse a las zonas con pendiente moderada. Es posible que la parte baja de las pendientes esté igualmente expuesta al peligro de aludes.
<p>5  Muy fuerte</p>	Inestabilidad generalizada del manto nivoso.	Se esperan numerosos y grandes aludes originados espontáneamente incluyendo zonas con pendientes poco propicias.	Se tiene que renunciar a hacer excursiones.

(*) Pendientes propicias a los aludes son aquellas que reúnen determinadas condiciones de inclinación, configuración del terreno, proximidad de la cresta...

(**) Las características de estas pendientes, generalmente, están precisadas en el boletín: altitud, exposición, topografía...

(***) Sobrecarga:

- Sobrecarga fuerte: p.e. esquiadores agrupados...
- Sobrecarga débil: p.e. esquiador o montañero aislado.

La expresión desencadenamiento de aludes se refiere a los provocados por una sobrecarga, principalmente por uno o varios esquiadores.

La expresión salida espontánea se refiere a los aludes originados sin acción externa.

Figura 8 : Escala europea unificada de peligro de aludes

Por todo ello, la definición de la escala, su interpretación y su aplicación está en evolución continua a partir de su discusión entre todos los centros de predicción. Los resultados y modificaciones que se efectúan se pueden consultar en la web www.avalanches.org.

En cuanto a la escala hay que decir que aunque es de peligro creciente, del 1 (débil) al 5 (muy fuerte), hay que tener en cuenta que no es una progresión aritmética, sino más bien exponencial. Un ejemplo, el grado 3 (notable), intermedio en la escala, no significa que haya un 50% de probabilidades de que se produzca un alud, sino que en muchas ocasiones puede representar una situación crítica para los practicantes de deportes de montaña. Una situación de peligro 3, se considera ya una situación crítica para la práctica de actividades en zonas no controladas. En el texto de los boletines deben describirse las características de cada situación y las orientaciones y cotas que están expuestas a este peligro.

Dicho esto pasemos a analizar cada uno de los índices de peligro.

Peligro 1, débil. Ante todo es importante destacar que el peligro 0 no existe. Mientras haya nieve es imposible asegurar que no pueda haber un alud, aunque pequeño, en una zona de las dimensiones a las que se refiere el BPA. La situación de peligro 1 es la de máxima estabilidad del manto. Esta situación se suele dar después de algunos días de estabilidad atmosférica y temperaturas relativamente suaves que cohesionan y endurecen el manto. En primavera también se suele asignar, con tiempo estable, a primeras horas del día en que el manto está encostrado superficialmente, aumentando el valor de peligro a medida que el sol empieza a calentar el manto y la temperatura del aire empieza a subir. Las zonas que eventualmente pueden ser peligrosas se encuentran muy localizadas y tienen características muy concretas y muy diferentes al resto del territorio (zonas de fuerte pendiente, zonas muy próximas a las crestas, umbrías...). En éstas es posible algún desencadenamiento esporádico, generalmente de pequeñas dimensiones y por sobrecarga fuerte.

Peligro 2, limitado. Suele ser la situación más frecuente a lo largo de la temporada. En esta situación, la estabilidad del manto empieza a ser pobre en determinadas localizaciones, interiormente existen discontinuidades que no permitan garantizar una buena estabilidad. Las situaciones en que se suele aplicar este valor de peligro son, por un lado, aquellas resultado de la progresiva estabilización del manto tras una situación de peligro 3, pero localmente aún existen restos de inestabilidad. Generalmente el desencadenamiento es posible por sobrecarga fuerte. Otra situación típica es aquella que proviene de una inestabilización por causas meteorológicas que alteran en poca medida el conjunto del manto, como por ejemplo después de una nevada débil acompañada de viento. En esta situación se pueden haber formado placas, muy localmente, pero que son susceptibles de romperse por sobrecarga débil, al mantenerse frágiles (figura 2). Se considera que no puede haber un alud de grandes dimensiones. Las zonas peligrosas siempre vienen indicadas en el BPA.

Peligro 3, notable. En esta situación las laderas peligrosas son numerosas y la inestabilidad es acusada. El peligro accidental es muy acusado, mientras que el peligro natural empieza a ser importante y las avalanchas espontáneas pueden alcanzar más allá del pie de la ladera. Las situaciones típicas en que se asigna este índice son en caso de nevada notable, o moderada con viento, y cuando hay aumentos notables de temperatura con un manto poco estabilizado. Ya son posibles aludes de grandes dimensiones, que puntualmente pueden llegar a los fondos de valle. Una situación típica es la nevada de entre 20 y 40 cm con vientos de norte y noroeste con la formación de placas en laderas sur y este y otros puntos menos evidentes pero protegidos de la acción del viento. En estas situaciones de peligro 3 es cuando se registra el mayor porcentaje de accidentes por alud.

Peligro 4, fuerte. Se trata de una situación de peligro muy elevado para la práctica de actividades en zonas no controladas. El manto nivoso es muy inestable y de la mayoría de las laderas se pueden desencadenar aludes. La característica dominante son los desencadenamientos espontáneos, que se pueden producir en cualquier momento, y que pueden llegar hasta zonas llanas alejadas de las laderas de donde han partido. En cuanto a los aludes por sobrecarga, en estas situaciones son característicos los desencadenamientos a distancia, ya que la capacidad de propagación de la fractura es muy elevada. Son probables aludes de grandes dimensiones con afección en zonas antropizadas. Es importante destacar que a veces esta situación de peligro se asigna a uno u dos días determinados en que existe un peligro latente, pero verdaderamente, cuando se producen el máximo de desencadenamientos puede ser un lapso relativamente corto de tiempo de pocas horas. Normalmente se asigna este valor de peligro en situaciones de nevadas intensas (superiores a los 50 cm. en 24h), o en caso de lluvia fuerte hasta cotas altas con un manto poco consolidado. Generalmente no suele mantenerse más de dos o tres días para pasar a peligro 3, o a veces directamente a peligro 2.

Peligro 5, muy fuerte. Se trata de una situación de peligro extremo, no solo para las actividades en montaña sino también para las zonas habitadas y las carreteras. Es aquella situación en que las avalanchas pueden rebasar los límites conocidos hasta el momento, con resultados catastróficos. Todas o casi todas las orientaciones se encuentran afectadas y las avalanchas pueden partir hasta de pendientes inferiores a los 25°. Estas situaciones son excepcionales y vienen dadas por nevadas muy intensas, o sea, del orden de 1 m en 24 horas o 1,5 m en 72 horas. Por lo tanto son situaciones raras y hay temporadas en que no se presentan.

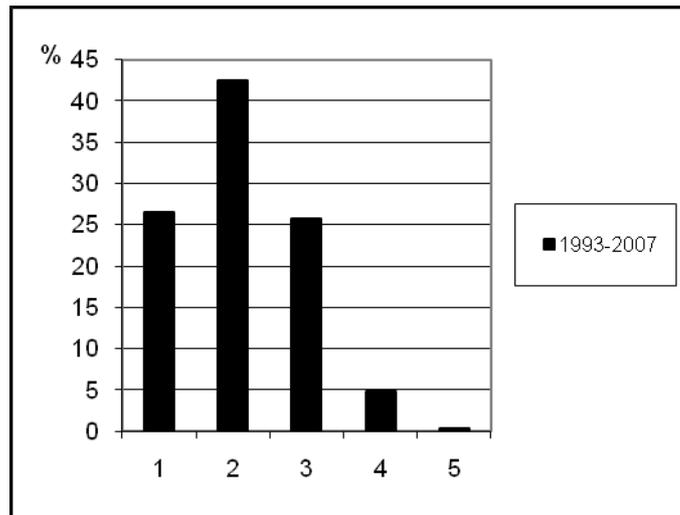


Figura 9 : Frecuencia de uso de cada grado de peligro en el Pirineo de Catalunya (1993-2007)

A la hora de determinar el grado de peligro se intenta que el proceso sea lo más objetivo posible y no depende de la experiencia o subjetividad de cada predictor, no tan sólo entre diferentes países sino incluso entre los de un mismo centro. Con este objetivo se ha ideado lo que se denomina "Matriz bavaresa", que es una tabla mediante la cual determinar el grado de peligro atendiendo a la probabilidad de ocurrencia, a las dimensiones, a la extensión territorial y a la capacidad de sobrecarga del manto.

Distribution of Hazard Sites		generally only with large surcharge	particularly with large surcharge (possibly also with small surcharge)	already with small surcharge possible	with small surcharge probable
	single hazard sites (specifiable in AR ¹)	1	2	2	2
	hazard sites on some steep slopes (specifiable in AR ¹)	2	2	3	3
	hazard sites on many steep slopes (specifiable in AR ¹)	2	2	3	4
	hazard sites on many steep slopes ²	2	2	4	4
	hazard sites also in moderately steep slopes				5

Figura 10 : Matriz bavaresa correspondiente a actividad por sobrecarga

		Spontaneous release of small avalanches possible	Spontaneous release of medium, in some cases large avalanches possible	Spontaneous release of many medium, in several cases large avalanches probable	Spontaneous release of many large avalanches probable
Distribution of Hazard Sites	single hazard sites (specifiable in AR ¹)	1	2		
	hazard sites on some steep slopes (specifiable in AR ¹)	2	3	3	
	hazard sites on many steep slopes (specifiable in AR ¹)	2	3	4	4
	hazard sites on many steep slopes ²	3	4	4	5
	hazard sites also in moderately steep slopes		4	5	5

AR = avalanche report

- 1) specifiable with respect to altitude, exposition and/or relief
- 2) the hazard sites are too numerous or too diffusely distributed to be specifiable with respect to altitude, exposition and/or relief

Figura 11 : Matriz bavaresa correspondiente a actividad natural

7. Boletines de predicción

Una vez analizada la estabilidad del manto nivoso y determinado el grado de peligro de aludes, hay otro aspecto fundamental y es el de la elaboración y redacción del boletín de peligro de aludes. Por muy correcto que sea el análisis, si después esa información no llega al usuario en el formato necesario para su correcta interpretación de poco sirve la tarea de análisis. Es evidente que en función del destinatario final de la información o del uso que de ella debe hacerse, el formato y contenido del boletín deberán ser los

adecuados para su máximo rendimiento. No es lo mismo un boletín de predicción dirigido al practicante de actividades en alta montaña invernal (esquiador fuera pista, alpinista, raquetista, surfer, esquiador de montaña, etc), que un boletín dirigido a los cuerpos responsables de la protección civil. En ocasiones, no habrá más opciones que realizar un único boletín para todo tipo de usuario, lo cual resultará aún más complejo.

Otro aspecto del boletín relacionado con su interpretación es el de la finalidad. Las informaciones contenidas en los boletines no deben autorizar ni prohibir, sino informar objetivamente de las condiciones existentes y previstas para que cada usuario adapte su actividad a las circunstancias del medio y a su propia experiencia.

Es fundamental conocer cómo percibe e interpreta el usuario el boletín y sus contenidos para conseguir un producto realmente útil. Una limitación para la correcta interpretación del boletín es el nivel de educación y formación del individuo que recibe la información. Por ello, una de las tareas que engloban la predicción de aludes debería ser la educación/formación o, en todo caso, facilitar herramientas o productos complementarios al boletín encaminados a la sensibilización y concienciación del riesgo de aludes, como pueden ser guías de interpretación del boletín.

Una limitación del grado de peligro es la complejidad de su interpretación por parte del usuario. Es difícil hacer entender al usuario que un grado de peligro describe una situación en la que se engloban distintos estados del manto nivoso y, por tanto, distintas probabilidades de ocurrencia de aludes para una misma región. Por ejemplo, en una situación habitual de peligro 3 debido a placas de viento con orientaciones sobrecargadas y otras erosionadas, la percepción del usuario puede ser que el boletín estima a la alza el grado de peligro, ya que él se ha movido en orientaciones erosionadas donde afloran costras y la estabilidad es muy elevada, pero en cambio las orientaciones con placas de viento apenas admiten sobrecarga y se fracturan fácilmente. Es por esto que la redacción del boletín debe ser muy clara explicando cual es la situación y la localización de las zonas más propensas a la actividad de aludes.

En ocasiones se determina más de un grado de peligro para una zona. Esto sólo se debe emplear cuando el grado de peligro va a aumentar o disminuir claramente durante el periodo de predicción, o cuando pueden establecerse dos situaciones claramente diferenciadas por cotas, pero nunca por orientaciones, ya que las diferencias en probabilidad de ocurrencia por orientaciones es uno de los criterios que por definición diferencian un grado de otro. Es decir, el estilo de redacción de un boletín debería ajustarse al siguiente ejemplo:

"El grado de peligro de aludes es limitado (2). Las zonas donde los aludes son más probables se encuentran por encima de 2400 metros en laderas umbrías sobrecargadas por el viento, preferentemente las orientadas al nordeste...".

Aparte del contenido del boletín es muy importante la estructuración de la información, para que pueda ser aprehendida por el usuario. A partir de estudios en los que se analizaba el grado de comprensión del boletín mediante encuestas a los usuarios, se ha

visto que el típico boletín en formato texto no permite la memorización y reproducción de la información sobre el terreno por parte del usuario.

Para evitar este problema, se está recurriendo a boletines con estructura jerárquica de la información y con el recurso a iconos y símbolos, para facilitar, primero, centrar la atención en aquellos elementos de mayor importancia, y, segundo, retener esta información mediante la representación con símbolos asociativos. Así, un boletín, debería informar primero del grado de peligro, después del tipo de situación de forma breve, a continuación detallar las orientaciones y cotas más expuestas (mejor si es de forma gráfica), a continuación detallar las condiciones de peligro (estado de las capas débiles y otros elementos de peligro a tener en cuenta), y finalmente la predicción meteorológica en alta montaña (gráficamente) y la evolución prevista para las próximas 48-72 horas. Se pueden consultar distintos formatos de boletín en la web del European Avalanche Warning Services (EAWS) www.avalanches.org.

Bibliografía

- [1] AMERICAN AVALANCHE ASSOCIATION (2004): Snow, weather and avalanches: observational guidelines for avalanche programs in the United States. Versión accesible en www.avalanche.org.
- [2] ASSOCIAZIONE INTERREGIONALE NEVE E VALANGHE (AINEVA): Neve e Valanghe. Cuatrimestral.
- [3] MCLUNG, D. AND SCHAEERER, P. (2006): The avalanche handbook. The Mountaineers Books. Seattle.
- [4] Revue de l'Association Nationale pour l'Etude de la Neige et des Avalanches (ANENA): Neige et avalanche. Trimestral.
- [5] SIMENHOIS, R. AND BIRKELAND, K. (2006): The extended column test: a test for fracture initiation and propagation. *Proceedings of the International Snow Science Workshop. Telluride, Colorado, USA. Oct. 2006.*
- [6] SCHWEIZER, J. (2002): The rutschblock test. Procedures and applications in Switzerland. *The Avalanche Review* 20(5), 1, 14-15.
- [7] TREMPER, B. (2008): Staying alive in avalanche terrain. The Mountaineers Books. Seattle.

La prévision locale du risque d'avalanches

Carles García¹

Résumé : Le but de la prévision locale du risque d'avalanche est d'évaluer la stabilité d'une pente particulière. Généralement cette pente correspond à un couloir d'avalanche menaçant bâtiments, routes ou autres équipements. La prévision locale du risque d'avalanches est destinée à éviter les dommages sur ces biens ou personnes. C'est pourquoi les méthodes utilisées et les bulletins d'alerte sont différents de ceux concernant la prévision régionale. La prévision locale concerne plus particulièrement les stations de ski et les services de gestion des routes et chemins de fer. Bien qu'il soit courant d'implanter des dispositifs paravalanches pour protéger bâtiments et autres équipements, cela implique, pour être efficaces, des investissements coûteux et des travaux de maintenance fréquents.

Une solution pour éviter ces investissements, tout en assurant la sécurité, est d'adopter des mesures de protection temporaire (évacuations, déclenchement artificiel avec explosifs, fermeture des routes, ...). Dans ce cas-ci, il est nécessaire d'évaluer la stabilité du manteau neigeux tout au long de la saison afin de connaître la probabilité de déclenchement de l'avalanche et par conséquent de mettre en place les dispositifs de protection temporaire adéquates.

La prévision locale du risque d'avalanche est une tâche difficile du fait d'une part, de la forte variabilité spatiale du manteau neigeux et d'autre part, de la pression économique exercée sur le prévisionniste puisque la prise de décision implique généralement des pertes financières (entreprises privées, mairies, ...).

Dans le cas d'une prévision régionale affichant un risque 4 (fort) ou 5 (très fort), on observera généralement des avalanches dans la région concernée. Cependant lorsque l'on s'intéresse à la prévision d'avalanche au niveau d'un couloir, la probabilité d'occurrence sera bien inférieure à 50%. Mais ce n'est pas parce que la probabilité est faible que le risque doit être accepté. Il s'agira vraisemblablement du jour le plus dangereux mais l'avalanche ne surviendra probablement pas.

Il existe un autre point sensible. La prévision locale du risque d'avalanche concerne toutes les personnes confrontées à ce risque et tous devraient être à même de déterminer si la pente à traverser est susceptible d'être déclenchée ou non : c'est une question de sécurité.

La meilleure manière d'évaluer la stabilité d'une pente est de réaliser des tests de stabilité. La principale difficulté est de choisir le meilleur endroit, représentatif des caractéristiques du couloir (orientation, dépôts de neige, altitude) pour lequel on a à prédire le risque. De plus cet endroit doit être sûr.

Les données météorologiques, et celles concernant la neige, nécessaires à la prévision locale d'avalanche sont celles utilisées pour la prévision régionale, mais quelques paramètres additionnels propres à la zone de départ du couloir doivent être pris en considération, comme le transport de neige par le vent et les accumulations de neige.

Pour analyser les données, le prévisionniste local s'appuie sur des raisonnements à base de règles et sur des analyses sur les plus proches voisins. La meilleure méthode dépendra des conditions climatiques, des caractéristiques des couloirs d'avalanche et de la disponibilité des séries de données.

¹ Institut Geològic de Catalunya, Unitat de Riscos Geològics, C/ Balmes 209-211, E-08006 Barcelona
Tel : +34 93 553 84 26 ; fax : +34 93 553 84 36; e-mail : cgarcia@igc.cat. Web: www.igc.cat

The local avalanche forecasting

Carles García¹

Abstract : *The aim of the local avalanche forecasting is to evaluate the stability of a specific slope. Normally that slope is an avalanche path that threatens buildings, roads or other facilities. Local avalanche forecasting is intended to avoid affection and damages. Thus, methods, goals and advisories are different from those of the regional avalanche forecasting.*

Local forecasting concerns to ski resorts and to the management services of roads and railways. Even though is usual to set on permanent defence structures to protect building and facilities, it implies expensive investments and requires frequent many maintenance works to be effective. One solution to save investments keeping the safety is to adopt temporary defensive measures (evacuations, artificial triggering with explosives, roads closing...). In this case, it is necessary to continuously evaluate the stability of the snowpack in the avalanche paths to know when the avalanche activity is probable and consequently to activate the temporary safety measures.

Local avalanche forecasting is a hard task due both to the high spatial variability of the snowpack stability and to the economic pressure on the forecaster since the decision making usually implies financial loses (private companies, councils, etc). On the avalanche predictability, the probability of avalanches varies in function of the spatial scale. In a regional avalanche prediction, when forecasting an avalanche situation of level 4 High or 5 Very high, avalanche activity usually will be reported in some place of the region. However, when forecasting avalanche activity for a specific avalanche path, the probability of occurrence will be well lower than 50%, as demonstrated in some works in Switzerland. Nevertheless, the low probability of occurrence does not entail that the risk be low enough to be accepted. Indeed, it will be the most dangerous day but the avalanche likely will not fall.

There is another hot spot. Local avalanche forecasting concerns to everybody dealing with avalanches and all of them should be able to predict whether the slope is being crossed is prone to avalanche or not; it is a security matter of oneself.

The best way to assess the stability of a slope is by means of performing stability tests. The main problem is to choose the best spot that summarizes the characteristics of the avalanche path to predict (aspect, wind transport, altitude). At the same time, this place has to be safe.

Snow and weather data that are needing for the local avalanche forecasting are those used for the regional prediction, but some parameters have to be recorded in the starting zone of the avalanche path, specially parameters involved with snowdrift and accumulation of snow.

To analyze data and to favour making decision the local forecaster normally follows rule-based systems and k-nearest neighbours systems. The best method will depend on the climate conditions, characteristics of the avalanche paths and availability of data series.

¹ Institut Geològic de Catalunya, Unitat de Riscos Geològics, C/ Balmes 209-211, E-08006 Barcelona
Tel : +34 93 553 84 26 ; fax : +34 93 553 84 36; e-mail : cgarcia@igc.cat. Web: www.igc.cat

1. Generalidades : Diferencias entre predicción local y regional

La predicción local de aludes tiene como objetivo la evaluación de la estabilidad de una ladera concreta, a diferencia de la predicción regional de aludes donde se resume la situación del manto nivoso a nivel de macizo montañoso, con distintas altitudes y orientaciones.

Por tanto, la finalidad, los métodos y las informaciones derivadas de una predicción local son distintos a los de una predicción regional.

Normalmente la finalidad de una predicción local es evitar daños en una determinada infraestructura que se halla en el interior del perímetro de la envolvente de una zona de alud. Las predicciones locales suelen hacerse en estaciones de esquí, tanto para evitar daños en remontes, edificios y que las propias pistas de esquí sean afectadas por aludes espontáneos, así como también en carreteras y líneas de ferrocarril.

Aunque para proteger bienes e infraestructuras amenazadas por avalanchas se recurre a la construcción de obras de defensa permanentes (cuñas, diques de contención, muros deflactores, etc), estas suelen ser muy costosas y requieren de unas tareas de mantenimiento para ser efectivas. Una opción más económica para garantizar la seguridad en estaciones de esquí y carreteras es adoptar sistemas de protección temporal (desalojos, cierre temporal, desencadenamientos preventivos, etc) que exigen un seguimiento de la estabilidad del manto para determinar el momento en que se activan dichas medidas de protección. Hay que estimar el peligro de aludes en las laderas de interés y prever cuando va a haber actividad de aludes. Esto se consigue mediante una predicción local.

La predicción local es una tarea difícil por varios motivos. Uno, por las características propias de la predictibilidad del fenómeno, que varía según la escala a la que trabajemos. Al pronosticar actividad de aludes a escala regional en una situación de peligro 4 Fuerte o 5 Muy Fuerte, muy probablemente habrá actividad de aludes en alguna ladera de la región. En cambio, en la misma situación, la probabilidad de que se desprenda un determinado alud en una ladera concreta puede ser bastante inferior al 50%, como se ha demostrado en estudios en zonas de aludes con un gran número de observaciones. No obstante, la baja probabilidad de ocurrencia no significa que el riesgo sea suficientemente bajo como para ser aceptado, ya que va a ser justamente esa jornada con unas determinadas variables nivometeorológicas cuando la probabilidad de ocurrencia va ser más alta y por tanto se activarán las medidas de protección requeridas. Otro motivo que hace esta tarea bastante ingrata es la presión a la que está sometido el predictor por parte del sistema de explotación o de gestión del dominio esquiable o de la carretera, ya que el tiempo en que va a estar cerrado el acceso o dominio puede significar una elevada pérdida económica. Además, la mayoría de las veces, como ya hemos visto, no bajará ningún alud.

Hay otro punto muy importante. Todo aquel que se dedique al mundo de los aludes o bien se mueve sobre terreno virgen nevado, debe ser capaz de hacer una predicción local, en

el sentido de evaluar aquella ladera por la que se está moviendo o trabajando para saber si es segura o no.

2. Monitorización

A la monitorización adecuada para la predicción regional (registro de datos meteorológicos y nivológicos), hay que añadir el registro de ciertos parámetros y otras observaciones justamente en las zonas de salida de los aludes que se desean prever.

Las variables a registrar dependerán de la tipología de los aludes de interés y la monitorización vendrá condicionada por las características del terreno. En latitudes medias como es el caso de Alpes, Pirineos y Rocosas gran parte de la actividad de aludes está condicionada por el transporte de nieve por el viento que sobrecarga las zonas de salida de las avalanchas, hasta que el manto se desprende de forma espontánea.



*Figura 1 : FlowCapt instalado en el Pirineo.
A la izquierda se aprecia el sensor acústico dispuesto verticalmente*

Para controlar el transporte de nieve y estimar la sobreacumulación de nieve en un punto de desencadenamiento habitual existe un conjunto de sensores denominado *FlowCapt* que mide el flujo de nieve transportado. Este sistema fue desarrollado en los 90 por V. Chritin y H. Gubler. El flujo de partículas sólidas (los granos de nieve) junto con el viento mismo (fricción del aire) provoca vibraciones en el cuerpo del sensor y se genera una presión acústica medible por el sistema, que teóricamente filtra la vibración provocado por el impacto de los cristales de la fricción del aire. El sistema funciona autónomamente mediante energía solar, dando registro continuo y posibilidad de recepción de datos en tiempo real. El registro viene expresado en $\text{gr/m}^2/\text{s}$ y kg/m^2 y ofrece tasas de transporte horario por cuadrantes en función de la dirección del viento. El sistema consta de dos tubos de 1 m de longitud cada uno colocados verticalmente, de manera que miden el flujo de nieve entre 0-1 m y entre 1-2 m. El *FlowCapt* para ser efectivo debe colocarse en un cordal o cresta ya que son los puntos donde se concentran las mayores tasas de transporte de nieve, debajo de la cual exista la zona de acumulación que se desea

controlar. Los tubos sensores deben encararse al viento predominante para poder registrar los impactos de los cristales.

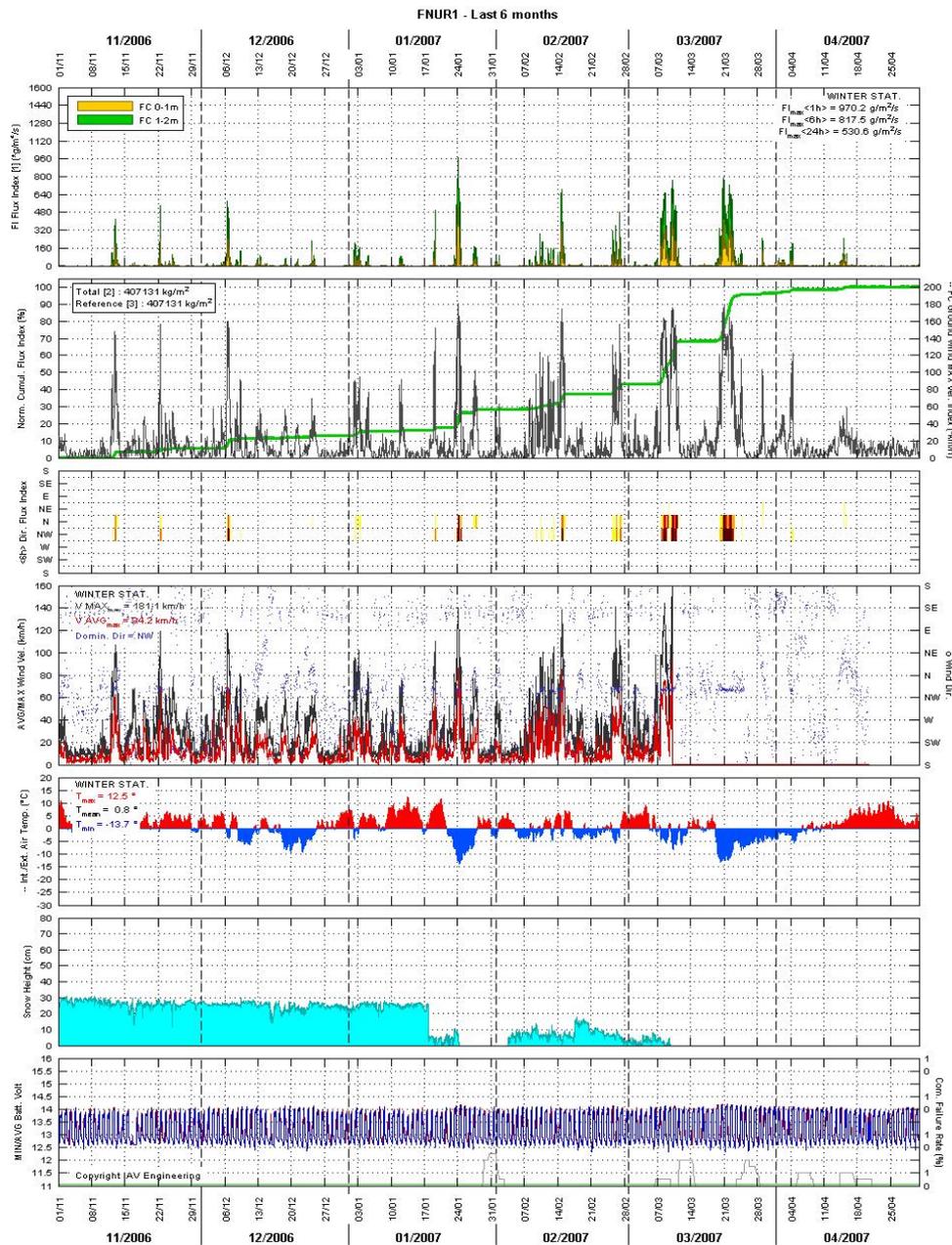


Figura 2 : Parámetros y visualización de los registros de un FlowCapt

Como desventaja, cabe señalar que no es un sistema que permita una gestión completa y autónoma por parte del usuario sino que ésta recae en manos de la empresa fabricante. La sobreacumulación de nieve en la zona de salida de una avalancha también puede controlarse mediante sistemas más sencillos como la colocación de una simple percha coloreada con la que controlar la altura de nieve. En este caso habrá que recurrir a la instalación de una webcam en algún punto con visual directa sobre la percha para observar la evolución de los espesores. Cada vez hay más oferta de webcams con resultados contrastados en zonas de alta montaña, de escaso consumo energético y envío de imágenes de calidad en tiempo real y de poco peso.

3. Observaciones sobre el terreno

La forma habitual de evaluar la inestabilidad de la nieve de una ladera es mediante los tests de estabilidad. En predicción local pueden realizarse individualmente o bien asociados a un perfil simplificado.

3.1. Tests de estabilidad

Hay un gran repertorio de tests y sirven para determinar el potencial que tiene la nieve, en una ladera concreta, de dar lugar a un alud de placa desencadenado accidentalmente (el paso de una persona, una carga de explosivo, un animal, una cornisa). Así pues, con los tests de estabilidad evaluaremos la capacidad que tiene una capa débil de colapsar y producir una fractura frente a un estímulo externo. No son útiles, por tanto, para evaluar la probabilidad de caída de un alud de fusión o de nieve reciente (aludes espontaneos). Esto, que podría parecer una limitación muy importante, no lo es tanto ya que los aludes accidentales son los más difíciles de pronosticar y además será una de las mejores herramientas de las principales situaciones a la hora de evaluar la estabilidad de un sector de fuera pista en un dominio esquiable, o para decidir si limpiar un sector mediante explosivos. Las situaciones en que queramos evaluar la probabilidad de aludes espontáneos nos basaremos principalmente en factores meteorológicos.

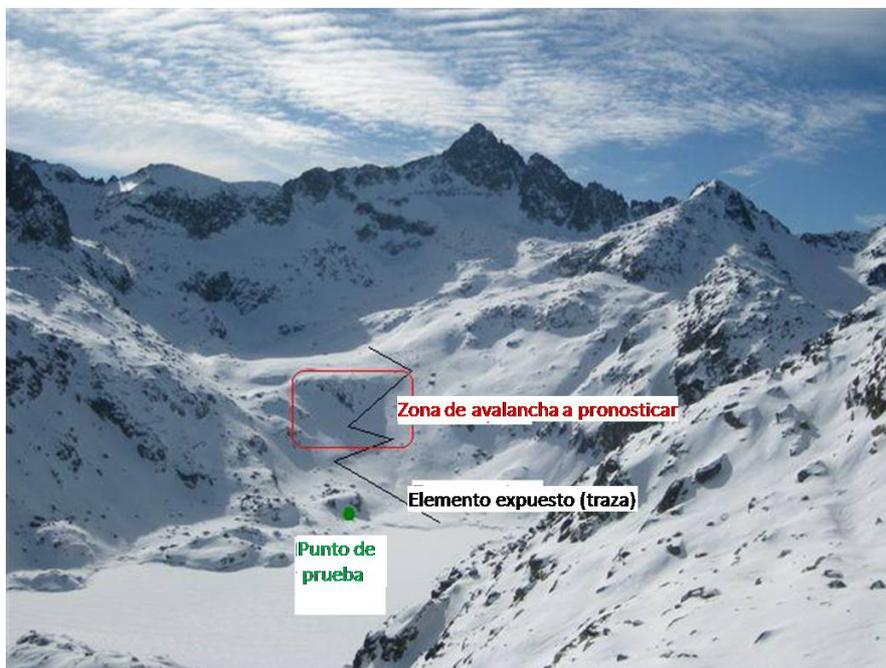


Figura 3 : Ejemplo de predicción local: zona de avalancha, elemento a proteger (itinerario) y punto de toma de datos

Una vez efectuado el perfil simplificado, aprovecharemos la propia trinchera que hemos excavado para describir las capas, lo ensancharemos si es necesario y haremos los tests desde el corte ladera arriba. La mayoría de tests necesitan pendientes comprendidas entre 30° y 45° para ser efectivos, ya que es el ángulo crítico a partir del cual la nieve

tiene capacidad de deslizarse por gravedad, así que habrá que estar atentos a este punto para no situarnos en una zona de avalancha. Habrá entonces que buscar una zona protegida con pendiente, cota, orientación y efectos del viento lo más similares posible a la zona de avalancha que queremos pronosticar y que se encuentre a la mínima distancia posible. Haremos los tests en un lateral de la placa, donde esta sea relativamente delgada (aproximadamente, entre 40-80 cm de espesor de placa). No siempre es fácil encontrar un punto idóneo, pero de ello dependerá la validez del análisis.

En cuanto a las limitaciones, si bien es cierto que la correlación entre el resultado de un terminado test de sobrecarga y la estabilidad del manto en aquel punto es elevada, probablemente la extrapolación de los resultados del punto de análisis a la zona de avalancha objeto del pronóstico no tendrá una fiabilidad tan alta. Esto es debido a la alta anisotropía del manto nivoso, es decir, a la alta variabilidad espacial de las condiciones del manto nivoso. Las diferencias que pueden existir dentro del manto nivoso en unos pocos metros de distancia son muy grandes. Tal vez una avalancha ya ha afectado a una parte de la ladera y la otra no, o el viento ha barrido la escarcha de manera irregular, o el espesor de la placa varía mucho lateralmente. Los tests de estabilidad serán, pues, un dato más a integrar en el análisis de la estabilidad.

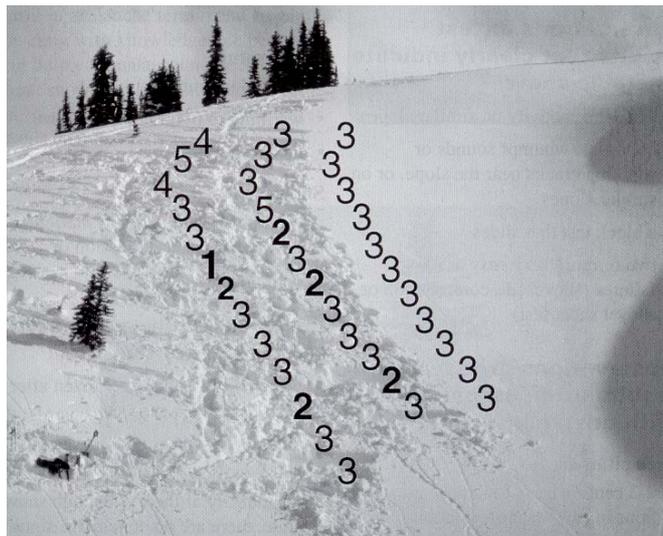


Figura 4 : Ejemplo de la variabilidad espacial del resultado de un test de sobrecarga. En este caso el Rutschlock (valores de 1 a 7). (Extraído de Jamieson, 2001)

3.2. Perfil simplificado

El perfil simplificado es una propuesta de Robert Bolognesi a partir del perfil estratigráfico y sondeo por percusión comentado en el módulo 4.1 "Predicción Regional". La resistencia de cada capa del manto se obtiene a partir de la correlación existente entre la dureza y la resistencia a la penetración de la sonda Haefeli para cada tipo de grano. La resistencia en el perfil simplificado se mide mediante una sencilla prueba de dureza de mano, en la que intentamos hacer penetrar en cada capa en función de la dureza, progresivamente, el puño, los cuatro dedos, un dedo, un lápiz y una navaja.

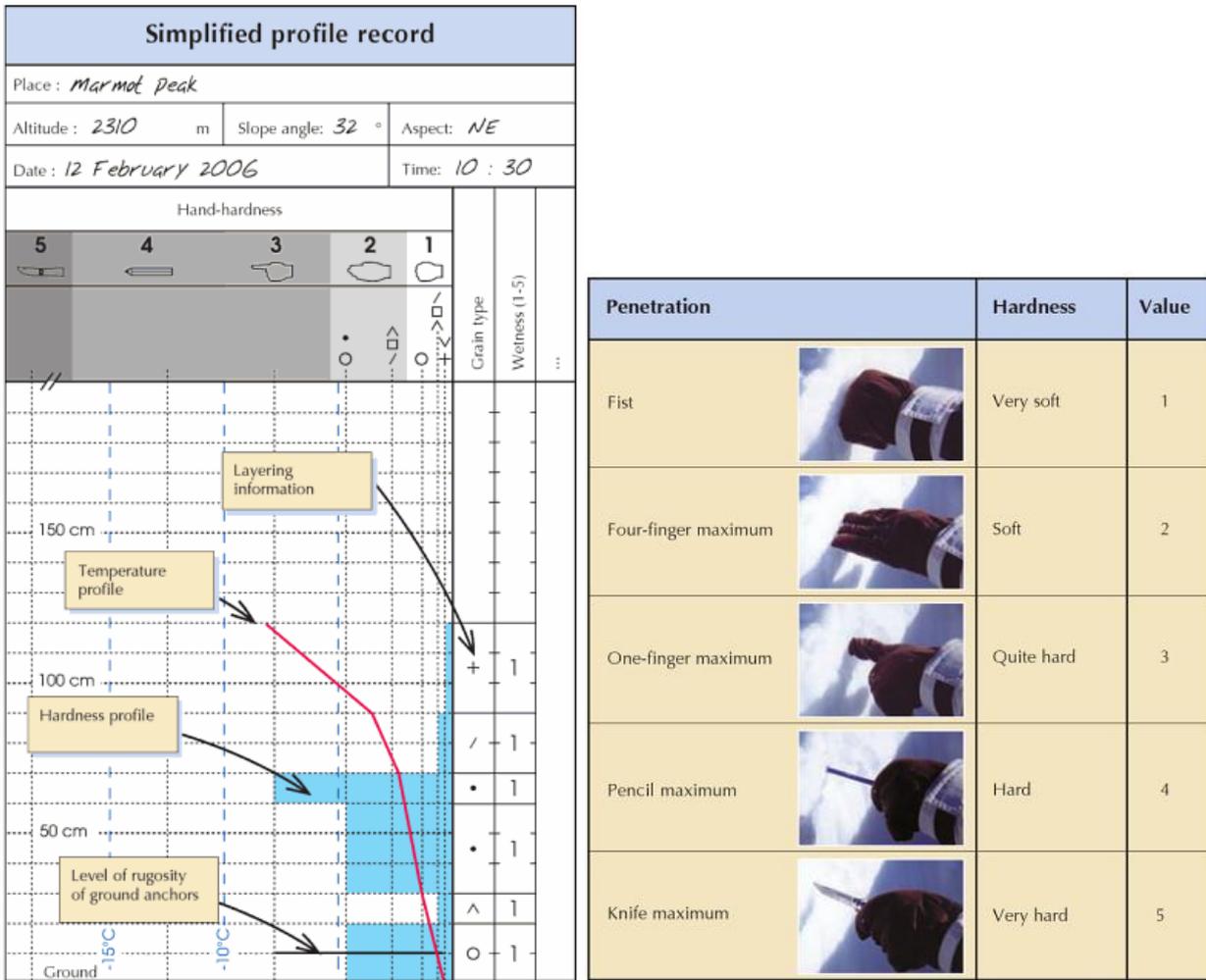


Figura 5 : Representación gráfica del perfil simplificado y niveles de dureza

La gran ventaja de este sistema es la rapidez de ejecución comparado con el perfil y sondeo completo, lo que permite realizar esta prueba en diversas laderas y orientaciones en una misma jornada. No es necesario calcular la densidad y evitar cargar con una sonda penetrométrica. Tan sólo es necesario un lápiz, una navaja y una pala, todo ello material que habitualmente llevamos consigo en montaña. Se puede añadir un termómetro para calcular el gradiente térmico de la nieve, que nos dará una idea de la posible evolución futura del manto.

De cara a relacionar el perfil simplificado con el cálculo de "Lemons" y "Yellow flags" (ver módulo 4.1 "Predicción Regional") es interesante matizar cada valor de la dureza de capa mediante un nivel + (superior) y – (inferior). Por ejemplo, nivel 2+ significaría "Penetración cuatro dedos que cuesta, sin llegar a ser nivel 3, penetración de un dedo". Lógicamente esta medición fina puede aplicarse siempre que el observador sea el mismo, para que los valores de dureza sean equiparables de un perfil a otro.

3.3. Inestabilidad mecánica e inestabilidad estructural

Como se ha visto en el módulo 4.1 la existencia de una capa débil o interficie es clave para que se pueda producir el desencadenamiento accidental de una placa. La resistencia a la cizalla o la compresión de esta capa controlará el esfuerzo que hay que añadir para que se produzca la ruptura, es decir, para que se inicie la fractura. Es lo que llamamos inestabilidad mecánica. La capacidad de concentrar el estrés de cizalla en la capa débil o interficie y así propagar lateralmente esta fractura hasta producir el desencadenamiento de una placa se conoce como inestabilidad estructural.

La inestabilidad mecánica ha sido evaluada desde hace más de veinte años mediante los tests de estabilidad. Existe una elevada diversidad, en general consisten en aislar un bloque de nieve de un tamaño determinado, de modo que sólo se soporte por su base, y sobrecargarlo progresivamente hasta producir la fractura. En Europa lo más aceptado es el test de salto (Rutschblock). A su favor tiene que la mayor superficie testada resulta más representativa en cuanto al manto, mientras que la principal desventaja está en el elevado tiempo de ejecución. En Norteamérica los tests de menor superficie, más rápidos de hacer pero menos representativos, han sido mejor aceptados. El test de compresión y el stuffblock o test de la bolsa han sido los más utilizados hasta hace poco, en que los nuevos tests de compresión extendida y de propagación de la sierra han cambiado el panorama. Se ha observado una buena correlación entre los resultados de estos tests y el desencadenamiento accidental de placas, pero el ajuste no es ni mucho menos perfecto (los mejores resultados rondan entre el 70% y el 80%). Es relativamente frecuente que los tests sobreestime o subestimen la inestabilidad. Falsos resultados de inestabilidad no son tan problemáticos como situaciones de falsa estabilidad, en las que con valores del test de 5 y hasta 6 (en el caso del rutschblock, véase más adelante) se han producido desencadenamientos accidentales.

3.3.1. Calidad de cizallamiento y tipo de fractura

Vistas las carencias de los tests de estabilidad, especialmente en la valoración de la inestabilidad estructural (capacidad de la nieve de propagar una fractura), diversos métodos de trabajo han sido puestos en práctica con la finalidad de incluir algún parámetro en la observación que informe de la capacidad del manto de propagar la fractura. La más antigua es la usada por los observadores suizos, que desde 1995 registran junto con el resultado del test del salto (rutschblock test), la calidad del plano de deslizamiento (regular, medio o irregular) y la porción del bloque que se desliza (todo el bloque, parte del bloque, sólo una esquina). Al trabajar con el rutschblock, que testea una gran superficie, estos indicadores serían suficientes para indicar el potencial de propagación de la fractura de la nieve en el lugar muestreado.

En Norteamérica (Canadá y EEUU) en 2002 se presentaron paralelamente dos métodos que servían para evaluar el potencial de propagación de la fractura. Los observadores

venían constatando hacía tiempo, que lo que ellos llamaban "drops" (caídas súbitas del bloque al hacer el test) y "pops" (deslizamientos súbitos) se correlacionan muy bien con la estabilidad de la ladera, mejor aún que los propios resultados del test. Dos grupos diferentes de científicos de la nieve, en Montana y Calgary, formalizaron estas observaciones, y actualmente la información que proporcionan estos parámetros acompaña siempre los resultados de los tests de columna.

El sistema canadiense se llama carácter de la fractura y consiste en clasificar la rotura del bloque en uno de los cinco categorías siguientes:

- SP: Súbito planar. Se trata de una fractura planar que cruza súbitamente la columna y el bloque se desliza fácilmente sobre la capa débil.
- SC: Colapso súbito. Se trata de una fractura que cruza rápidamente la columna y causa un desplazamiento vertical del bloque.
- RP: Resistente planar. Fractura planar o casi planar que necesita cierta fuerza para cruzar la columna y el bloque se desliza con cierta facilidad.
- PC: Compresión progresiva. La fractura cruza normalmente la columna con un incremento de la fuerza y sigue una gradual compresión de la capa al ir incrementando la fuerza
- B: Fractura no planar. Superficie de fractura irregular

Los dos primeros, SP y SC, corresponden a mantos con un elevado potencial de propagación de la fractura, mientras que el potencial va decreciendo en RP y PC y es muy bajo en el caso de B.

El sistema adoptado en Estados Unidos tiene sólo tres categorías, por eso es más fácil de aplicar, y se basa en cómo se produce el cizallamiento del bloque testeado. Se denomina calidad del cizallamiento y estos son los descriptores:

Q1: Superficie de cizallamiento inusualmente limpia, planar, regular y rápida. La capa débil puede colapsar durante la rotura. El bloque típicamente cae tras la fractura de la capa débil en pendientes superiores a 35°, y a veces en pendientes más suaves (del orden de 25°). Los tests realizados en capas débiles gruesas y susceptibles de colapsar pueden mostrar una superficie de cizallamiento más irregular, debido a la erosión de las capas basales cuando el bloque desliza, pero la fractura inicial es aún planar y rápida. Indica un alto potencial de propagación de la fractura.

Q2: Cizallamiento ligeramente irregular, donde la superficie de cizallamiento se muestra mayoritariamente lisa, pero el bloque no se desliza tan rápidamente como en Q1. La superficie de cizallamiento puede tener pequeñas irregularidades, pero no es tan irregular como Q3. La fractura afecta a toda la interficie placa / capa débil. Normalmente, el bloque entero no se desliza dentro de la cata. Indica un potencial de propagación medio.

Q3: La superficie de cizallamiento es no planar, desigual, irregular y rugosa. La fractura normalmente no afecta a toda la interficie placa / capa débil. Después de la fractura el

bloque se desliza muy poco, o no se desliza nada, incluso en pendientes superiores a 35°. Es indicador de un bajo potencial de propagación.

Calidad de cizallamiento	Carácter de la fractura
Q1	SP (Planar súbita)
	SC (Colapso súbito)
Q2	RP (Planar resistente)
Q3	PC (Compresión progresiva)
	B (Rotura no planar)

Figura 6 : Equivalencia entre los sistemas estadounidense y canadiense

La cuestión es anotar este parámetro junto al resultado del test y utilizar el sistema con el que cada uno se sienta más cómodo.

3.4. Test de la pala (*Shovel test*)

Este fue uno de los primeros tests en aparecer. Comenzó a ser usado por los servicios de predicción de aludes de Canadá a finales de la década de los 70. Aunque desde entonces han aparecido otros tests mucho más exactos y cuantificables, su uso es muy extendido en todo el mundo ya que presenta algunas ventajas sobre el resto.

La principal desventaja de esta medida es la relatividad de la anotación: diremos que ha sido necesario aplicar "mucho" fuerza o "muy poca" para desplazar el bloque. Se trata por tanto de un test cualitativo y no cuantitativo, que nos servirá para detectar la presencia de capas débiles en el interior del manto pero no para valorar su fragilidad.

Por otro lado tiene dos ventajas que lo hacen único e insustituible: es el único test que puede hacerse en un lugar llano o de escasa pendiente y también es de los pocos capaces de testear niveles débiles enterrados a mucha profundidad en la nieve. Contrariamente a la mayoría de tests, que sólo funcionan en los primeros 100 a 120 cm, el test de la pala se puede ir repitiendo sin límite de profundidad.

3.4.1. Metodología

Como en el resto de tests, para no dar resultados falseados nunca cortaremos costras o capas muy duras de espesor superior a unos 10 cm. Procedimiento a seguir:

1. Aislar una columna de nieve de 30x30 cm de lado. Empezaremos aislando la columna por los lados y por la parte delantera (la que mira al valle) utilizando la sierra y la pala, procurando que las paredes sean rectas, verticales y lo más lisas posible. Si no disponemos de sierra se puede utilizar la cola del esquí o un cordino con nudos para cortar las paredes del bloque. Hay que tener cuidado de no hacer fuerza lateralmente al bloque para no dañarlo.

2. Cortar con cuidado la parte superior de la columna (la que mantiene la columna unida al resto del manto) con la sierra, sin realizar ningún tipo de fuerza sobre la columna, hasta una profundidad igual al tamaño de la pala.
3. Una vez aislada la columna insertaremos la parte plana de la hoja de la pala en la parte posterior del bloque que hemos cortado con la sierra. A partir de este punto, utilizando el mango de la pala, estiraremos suavemente hacia nosotros sin hacer palanca, permitiendo que la capa débil, en caso de existir, se cizalle y, por tanto, que se deslice el bloque.
4. En caso de deslizamiento del bloque y debido a que lateralmente pueden haber cambios en la altura de las capas respecto al perfil, habrá que identificar nuevamente la capa débil para poder hacer la correlación con el perfil. A veces el bloque se desliza por una superficie que no habíamos identificado al hacer el perfil, o bien siguiendo una capa débil de poco grosor que nos había pasado desapercibida. Habrá entonces hacer la descripción de esta capa o superficie en la parte inferior del impreso. Pensad que seguramente esta es la capa más importante de todo el manto, y hay que identificarla con precisión.
5. Retirar la parte de la columna que ya hemos testeado y repetir el procedimiento desde el punto 2 de la misma manera que hemos hecho para el primer tramo.



Figura 7 : Medidas y procedimiento del test de la pala. Fotos: Ivan Moner

Como decíamos al principio, este es un test cualitativo que sobre todo servirá para identificar las posibles capas débiles. Resulta muy útil hacer este test antes de empezar a hacer el perfil simplificado, para saber en qué capa o capas hay que prestar especial atención. La valoración de la debilidad de éstas, y de su capacidad de propagación, habrá que hacerla usando otro test o algún índice de estabilidad estructural, como los lemons o yellow flags. Por tanto, este test, por sí mismo, no es válido para evaluar la estabilidad del manto.

3.5. Test del salto (*Rutschblock test*)

El test del salto se desarrolló en Suiza en los años 80 y, con unas leves variaciones en la metodología, sigue siendo el principal test efectuado en la mayoría de países alpinos. La

correlación de sus resultados con la inestabilidad de la ladera testeada es muy alta, si se incorporan a la interpretación algunos parámetros que indiquen la calidad de la ruptura que se produce. Proporciona resultados tan buenos como los de los tests desarrollados más recientemente.

Entre sus ventajas, además de la buena correlación con la inestabilidad de la ladera, está el hecho de que la mayor superficie testada reduce, en parte, los problemas de variabilidad espacial del manto. Esto significa que es más difícil que el test proporcione un resultado falso debido a que el lugar donde cortamos el bloque tenga una estratigrafía diferente a la del resto de la ladera. También resulta ventajoso el "feeling" que nos dará realizar este test, pues es el que más se parece a la realidad que queremos modelizar: ¿aguantará el manto la sobrecarga que yo implico?

La principal desventaja en cuanto a predicción local se encuentra en que resulta bastante largo de realizar. Dependiendo del grosor del manto, dos observadores entrenados pueden tardar de 20 a 45 minutos en realizarlo, con lo que difícilmente podremos evaluar más laderas. Además, a un solo observador le resulta difícil hacer la medida correcta; es recomendable que una persona sobrecargue el bloque mientras la otra observa la aparición de una posible ruptura.

Hay que remarcar que en este, como en la mayoría de los tests de estabilidad, es fundamental que la pendiente esté entre 30 ° y 45 °, y mejor si es en torno a los 35 °. Puede aprovecharse la trinchera del perfil, ampliándola hasta alcanzar las medidas que a continuación se indican.

3.5.1. Metodología

Se trata de aislar un bloque de nieve que haga 2 m de ancho por 1.5 m de alto y hasta 1.5 m de espesor en caso de manto de espesores superiores a este grosor. Como en el resto de tests no deben cortar costras ni capas muy duras de espesor superior a los 10 cm. Si se encuentra una de estas capas el test se hace hasta esa profundidad. Tanto la base de bloque como los lados se excavarán con una pala. La parte superior del bloque se aislará con la sierra, teniendo cuidado de no sobrecargar el bloque mientras la cortamos, y en caso de ser dos observadores se podrá aislar fácilmente con un cordino.



Figura 8 : El cordino con nudos nos puede ahorrar mucho trabajo en este test. Foto:Carles García

Puede que el bloque se rompa mientras se procede a aislarlo. Este es el resultado que indica una mayor inestabilidad, y en caso de ocurrir, se dará el test por finalizado. En caso contrario hay que entrar dentro del bloque con los esquís calzados por su tercio superior. Normalmente lo haremos desde un lateral, de forma perpendicular a la pendiente. Una vez el bloque se encuentra totalmente aislado del resto del manto nivoso, empezaremos a sobrecargarlo con nuestro propio peso de forma progresiva. Procedimiento a seguir:

1. Flexionar con fuerza las rodillas haciendo un esfuerzo en sentido vertical.
2. Efectuar un salto vertical con fuerza moderada.
3. Hacer un segundo salto, más fuerte y aplicando un esfuerzo de cizalladura al caer, no en vertical sino en el sentido de la pendiente.
4. A partir de aquí se abren dos posibilidades, en función de la dureza de la placa que estamos testando:
 - En caso de tratarse de una placa blanda, en la que los esquís se hundan, haremos un paso hacia abajo que nos sitúe en el centro del bloque y repetiremos los pasos ya descritos.
 - Si se trata de una placa dura, en la que los esquís se hundan poco o nada, nos descalzaremos los esquís y saltaremos con fuerza, repetidas veces, sobre la parte alta del bloque.



*Figura 9 : La sobrecarga se efectuará en la parte central del tercio superior del bloque aislado.
Foto: Glòria Martí*

Resultado del test, en función del momento en que se desliza el bloque:

RB1: Aislado el bloque o aproximándonos a él.

RB2: Al subir sobre el bloque

RB3: Al flexionar sobre el tercio superior

RB4: Al hacer un salto sobre el tercio superior

RB5: Al hacer un segundo salto sobre el tercio superior

RB6: Al bajar al centro del bloque y hacer una flexión o en los saltos sucesivos, o bien al saltar sin esquíes.

RB7: El bloque no se desliza.



*Figura 10 : Primero se efectúa una flexión. Si el bloque no cede, procedemos a efectuar un salto.
Foto: Ivan Moner*

Es importante constatar si el bloque se desmorona entero, sólo parcialmente (generalmente bajo los esquís), o bien sólo una esquina. También habrá que observar el tipo de superficie del plano de fractura (lisa, medianamente lisa o rugosa).

3.5.2. Interpretación del test

- El bloque cae en los niveles RB1, RB2 o RB3: estabilidad débil (semáforo rojo). Las laderas con características similares se consideran inestables.
- El bloque cae en los niveles RB4 o RB5: estabilidad dudosa (semáforo calabaza). Las laderas similares podrían ser inestables, por lo tanto habría que aplicar alguna medida de precaución.
- El bloque cae al nivel RB6 o no hay caída RB7: buena estabilidad (semáforo verde). Baja probabilidad de desencadenamiento de placas en laderas de características similares.



Figura 11 : Deslizamiento del bloque tras sobrecargarlo con los esquís.

Foto : Carles García

A este esquema hay que añadir la información de la calidad de la fractura. Es especialmente valiosa la información que da la parte del bloque que se desliza: si desliza el bloque entero en cualquier nivel de sobrecarga deberá tratar la vertiente como inestable, si es sólo una esquina la que se desliza, difícilmente se producirá un desencadenamiento accidental. Del mismo modo, una superficie lisa hace aumentar la probabilidad de avalancha respecto a una superficie muy irregular.

Hay que entender que el nivel de sobrecarga nos indicará cómo de difícil es iniciar una fractura en la placa, mientras que la parte del bloque que se desliza y el tipo de superficie serán indicadores del potencial de propagación de la fractura que tiene el conjunto de capa débil y placa en ese lugar.

En base a este análisis, el servicio de predicción de Suiza define dos parámetros a tener en cuenta en la valoración de una ladera mediante el test del salto ya que mejoran su eficacia. Pueden observarse en la siguiente tabla:

Parte del bloque que desliza	Todo (T)	El bloque entero se desplaza en un nivel de sobrecarga, también la parte que queda por encima de los esquís.
	Parte (P)	Medio o más bloque desliza. Es habitual que sea de los esquís para abajo.
	Esquina (C)	Sólo una pequeña parte del bloque.
Tipo de superficie de deslizamiento	Lisa (L)	La superficie es inusualmente lisa
	Media (M)	La superficie presenta pequeñas irregularidades.
	Rugosa (R)	La superficie es rugosa y desigual.

Figura 12 : Observaciones respecto a la calidad de la fractura en el Rutschblock test

3.6. Test de la compresión

Los guardas de Parks Canada, responsables de la predicción de aludes en Canadá, desarrollaron este test a mediados de los años 70. Poco a poco fue sustituyendo al test de la pala, por las ventajas de cuantificación y objetividad que ofrecía.

Si se hace asociado a un perfil estratigráfico se aprovechará la propia cata para hacer los tests. La pendiente deberá estar siempre entre los 30° y los 45°. Debe haber espacio suficiente para repetir el test una segunda, y posiblemente una tercera vez, como se explica más adelante.

3.6.1. Metodología

Procedimiento para la realización del test de la compresión:

1. Aislar una columna de 30x30 cm del resto de la nieve. Con la pala retirar toda la nieve de la parte frontal y uno de los laterales, mientras que la parte posterior y el otro lateral se cortan con la sierra o el cordino. La profundidad máxima en que este test es efectivo es de unos 120 cm, pero si antes de llegar nos encontramos una capa muy dura o una costra nos detendremos allí.
2. Si se produce una fractura mientras se aísla el bloque, esto ya es un resultado.
3. Colocar la hoja de la pala sobre la columna y picar 10 veces con la punta de los dedos, moviendo sólo la mano mediante la articulación de la muñeca.
4. Si aún no ha habido deslizamiento, picar 10 veces con la punta de los dedos o con los nudillos de la mano, mediante la articulación del codo. Los golpes son más fuertes que en el paso 2. Si hay fractura, se anota el número de golpes iniciado en el paso 3 más el paso

5. Finalmente picar la pala con la mano plana o con el lateral del puño haciendo caer el brazo mediante la articulación del hombro 10 veces más. Se anota cualquier fractura indicando en número de golpes iniciados desde el paso 2. Los golpes son más fuertes que en el paso 3.
6. Si no hay fractura el resultado del test es negativo.
7. Repetir el test desde el principio. Si el resultado es similar al primero, se da por bueno. Si no, hay que realizarlo una tercera vez y reflejar el resultado que más se haya repetido.



Figura 13 : A la izquierda, medidas del bloque para la realización del test de la compresión. A la derecha, primero se golpea con la punta de los dedos. Fotos: Jordi Gavalrà e Ivan Moner



Figura 14 : A la izquierda, golpeo desde la articulación del codo. A la derecha, golpeo desde la articulación del hombro. Fotos: Ivan Moner

El test tiene 5 resultados posibles, en función de cuando desliza el bloque:

- Muy fácil (aislando el bloque)
- Fácil (articulación de muñeca)
- Moderado (articulación de codo)
- Difícil (articulación de hombro)
- Negativo (no hay fractura).

La codificación internacional es la siguiente, siendo # el número de golpes:

- CTV: Si el bloque falla mientras el despejamos
- CT #: Si falla en el número de golpes especificados
- CTN Si no hay fractura

El resultado se acompaña con la información sobre la calidad de la fractura, ya que matizará la estimación de la probabilidad de avalancha.

3.6.2. Interpretación

Si el bloque falla mientras se aísla o en los primeros 16 golpes, el resultado del test es inestable y la probabilidad de avalancha por sobrecarga débil es alta. Si la fractura se produce después del golpe 21 la ladera se considera estable.

Una limitación o crítica del test es que la sobrecarga puede ser muy variable de una persona a otra. Para evitar este problema se ha ideado el Stuffblock Test, en el cual se substituye el golpeo manual por una bolsa llena de nieve con peso conocido (4.5 kg) que se deja caer desde distintas alturas sobre la pala. Si se produce una fractura en el bloque mientras se aísla, al poner la bolsa o al dejarla caer desde 10 o 20 cm de altura, el resultado del test se considera inestable. Si la fractura aparece cuando dejamos caer la bolsa desde 30 o 40 cm, la estabilidad es precaria. Si el deslizamiento se produce dejando caer la bolsa desde 50 cm o más o no hay fractura, el resultado del test indica estabilidad.

3.7. Test de la columna extendida (*Extended Column Test*)

Este test, junto con el test de propagación de la sierra (Propagation Saw Test) son los de más reciente aparición. Fue presentado en 2006 en el International Snow Science Workshop e inmediatamente causó una fuerte impresión por las ventajas que presentaba a todos los niveles. Es tan rápido de hacer como un test de columna pequeña y presenta unos resultados incluso más precisos que los del test del salto, si se incluye la calidad de la fractura. De hecho, los primeros resultados científicos demuestran un acierto superior al 95%, que más tarde ha sido matizado y reducido a porcentajes sobre el 85%.

El test fue ideado y desarrollado por un pister-socorrista de una estación de esquí estadounidense, Ron Simenhois, que buscó el apoyo de la comunidad científica para su verificación, homogeneización y difusión.

Debe realizarse en pendientes entre 30° y 45°, mejor en torno a 35°.

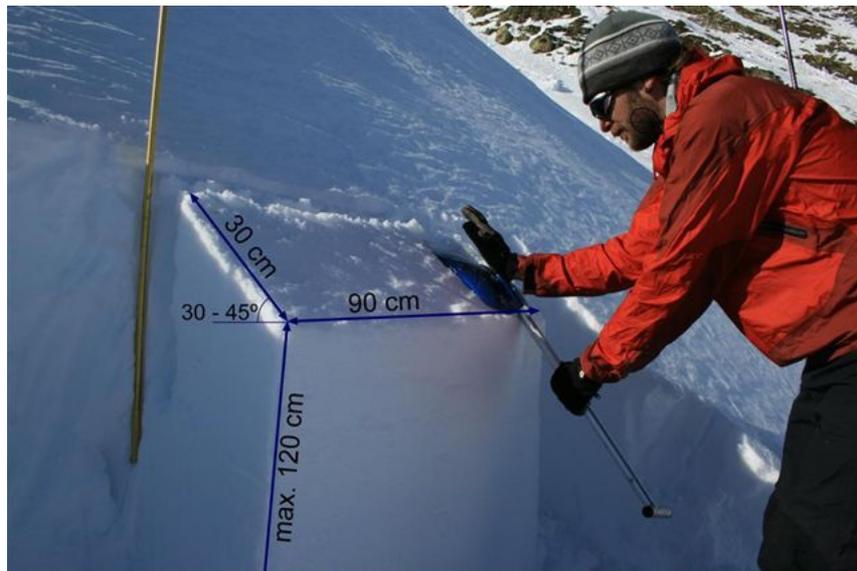


Figura 15 : Medidas del test de la compresión extendida. Foto: Jordi Gavalrà

3.7.1. Metodologia

El procedimiento a seguir es muy similar al test de la compresión:

1. Aíslar un bloque de 90 cm de ancho y 30 cm de lado. La parte trasera del bloque debe ser aislada con la sierra con extensor o con un cordino con nudos. Es muy importante que las paredes del bloque sean bien verticales y que el bloque conserve su sección en todos los puntos.
2. Sobrecargar un extremo del bloque con la misma metodología que en el test de la compresión, picando sobre la pala a partir de la muñeca, codo y hombro.
3. Hay que observar el número de golpes necesarios para iniciar una fractura dentro del bloque y el número de golpes necesarios para que la fractura atravesase todo el bloque. Si aparece una fractura pero ésta no atraviesa el bloque entero, continuaremos sobrecargando un extremo de la columna hasta que haya propagación o hayamos completado los 30 golpes.



Figura 16 : La sobrecarga se efectúa igual que en el test de la compresión. Foto: Jordi Gavalrà

La anotación internacional del resultado es la siguiente:

- ECTPV - La fractura se propaga a través del bloque entero mientras lo aislamos.

- ECTP # - La fractura se inicia y se propaga a través de la columna entera en # o # +1 golpes después de la fractura.
- ECTN - La fractura no se propaga a través de la columna entera, o hay 2 o más golpes entre la iniciación y la propagación de la fractura.
- ECTX - No se produce ninguna fractura durante la realización del test.

En este test no tiene mucho sentido anotar la calidad del cizallamiento o el tipo de fractura, pues es el mismo resultado del test el que informa del potencial de propagación.

3.7.2. Interpretación

Es muy sencilla, de aquí su éxito. Si aparece una fractura que cruza el bloque entero mientras se aísla o una fractura se inicia y cruza el bloque entero de una sola vez o en el golpe siguiente a iniciarse (resultados de ECTP0 o ECTP) la ladera se considera inestable y la probabilidad de avalancha es alta. En cualquier otro caso -no aparece fractura, no se propaga por el bloque entero o necesita más de dos veces para hacerlo-el test se considera estable. Estudios muy recientes indican que si la iniciación y propagación de la fractura se dan después del golpe 21 es muy difícil iniciar un alud en una ladera similar.

Cabe destacar que este test es el que ofrece, en estos momentos, unos niveles de acierto más elevados de todos los disponibles. Las situaciones en que se le resta fiabilidad son:

- Placas delgadas y/o muy blandas, donde puede dar resultados de falso estable.
- Placas muy duras y gruesas, en que puede ser muy difícil iniciar una avalancha mientras que el test, en cambio, da positivo (falsa alarma).



Figura 17 : Izquierda, test de la columna extendida sin propagación de la fractura.
Derecha, resultado con propagación

3.8. Test de propagación de la sierra (Propagation Saw Test)

El test de propagación de la sierra fue presentado por los científicos de la Universidad de Calgary en el mismo congreso que el ECT. Tuvo una muy buena acogida a nivel mundial, y desde 2006 ha sido probado y verificado extensamente. Aporta información sobre el potencial de propagación de la fractura (inestabilidad estructural). Esto es especialmente valioso para la predicción local: puede hacerse en terreno sin pendiente, y no está tan limitado como la ECT o el CT por el espesor de la nieve, pudiendo evaluar el potencial de propagación de fracturas asociadas a niveles profundos, enterrados hasta 250 cm bajo la superficie de la nieve.

En cuanto a limitaciones, no es fiable en niveles débiles muy poco profundos y precisa identificar previamente la capa débil a testear (puede aplicarse primero el test de la pala o de la compresión).

3.8.1. Metodología

Procedimiento a seguir:

1. Identificación de la capa débil.
2. Aislar una columna de 30 cm de ancho por 100 cm de largo, o de una longitud igual a la profundidad de la capa débil si ésta se encuentra enterrada a una profundidad de más de 100 cm. La columna se aísla del resto del manto nivoso. Asegurarse de que se aísla el bloque hasta una profundidad superior a la de la capa débil que se quiere testear.
3. Serrar la capa. Con la capa débil claramente visible, deslizar la sierra por el lado que no corta de abajo arriba a lo largo de la capa débil, hasta que la fractura se propague. Parar de serrar y marcar el punto donde estaba la sierra en el momento de producirse la propagación. Habrá que repetir el test si con la sierra nos hemos salido de la capa débil mientras cortábamos.

Pueden darse tres resultados diferentes:

- La propagación se detiene dentro de la capa débil antes de llegar al final de la columna.
- La propagación se detiene en una fractura que atraviesa verticalmente la columna.
- La propagación continúa ininterrumpidamente hasta el final de la columna.

3.8.2. Interpretación

Se entiende que la propagación de una fractura es probable en laderas similares sólo cuando en el test la propagación alcanza el final de la columna y se inicia cuando se ha reseguído la capa débil en menos de la mitad de su longitud. Todos los demás resultados indican que la propagación es improbable.

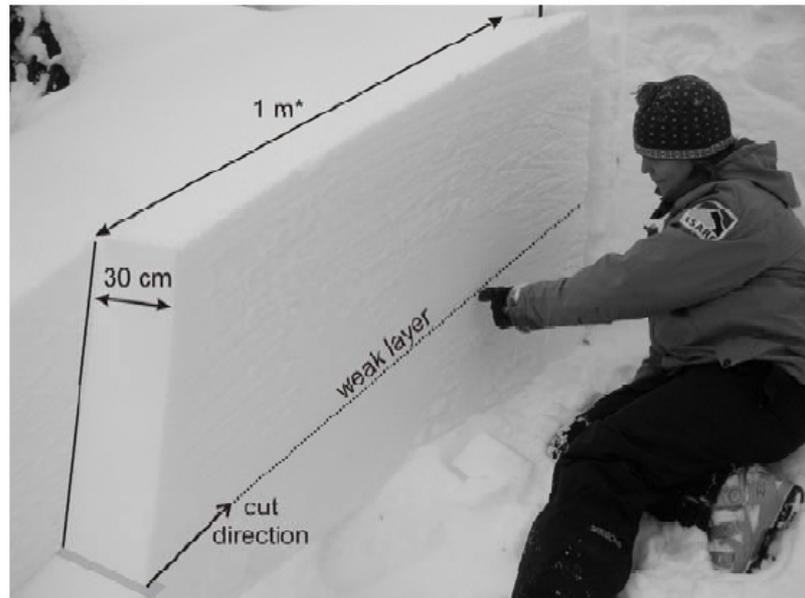


Figura 18 : Medidas para efectuar el test de propagación de la sierra.
(Extraído de Gauthier y Jamieson, 2007)

4. Métodos y útiles de predicción local

Una vez obtenidos datos del estado del tiempo, de la nieve y de la estabilidad del manto, es útil disponer de algún sistema informático que facilite el proceso de análisis y la ayuda en la toma de decisiones. En este sentido cabe destacar la existencia de diversos softs de gestión, visualización y análisis de datos para la predicción local que se hallan en el mercado. Entre ellos, los más extendidos tal vez sean *SnowPro* y *NivoLog*.

SnowPro es un soft para la visualización de los sondeos y perfiles estratigráficos, tanto para los completos como para los simplificados, que son más prácticos para la predicción local. También se puede añadir los resultados de los tests de estabilidad y referirlos a la capa débil representada en el perfil. Igualmente es posible añadir la información sobre los *lemons* y *yellow flags*. Como desventaja cabe señalar que los datos no constituyen una base de datos por sí mismos y ello imposibilita el análisis estadístico de los datos introducidos.

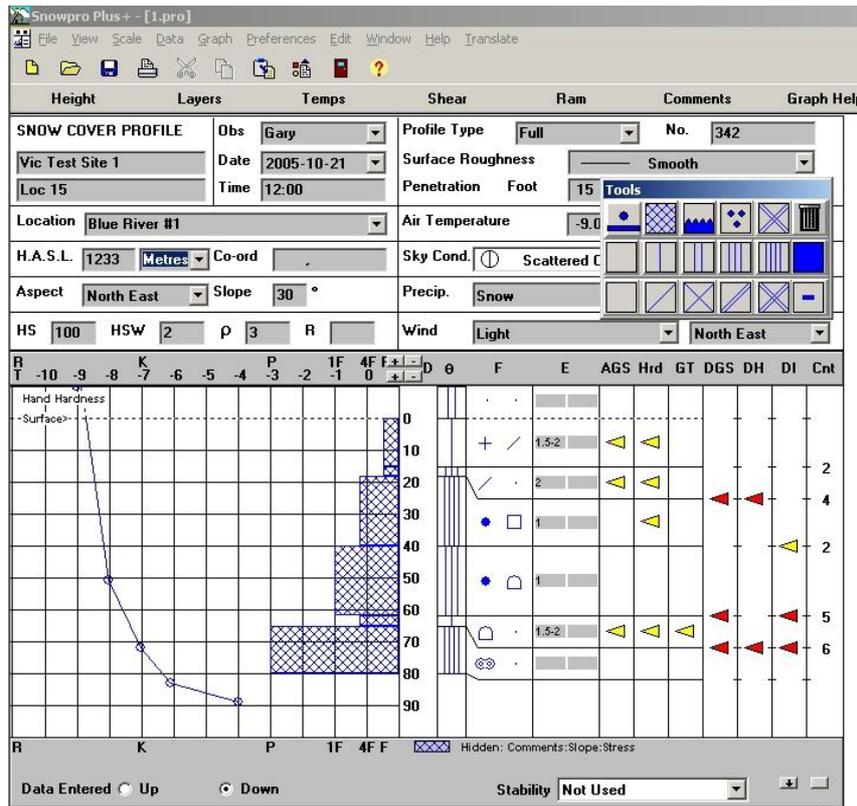


Figura 19 : Aspecto de la visualización de un perfil simplificado en el soft SnowPro

El sistema *NivoLog* es un útil para la ayuda de la estimación del peligro de aludes en predicción local. Apareció en la década de los 80 ideado por R. Bolognesi y se ha ido desarrollando y perfeccionando hasta la actualidad. Es un sistema experto basado en el análisis de datos mediante *k-nearest neighbours algorithm*, que permite la búsqueda de casos almacenados en una base de datos con características lo más similares posibles al caso objeto de análisis. Es decir, permite seleccionar aquellos días del pasado con unas condiciones nivometeo similares el día en cuestión y observar cual fue la actividad de aludes. Igualmente permite conocer al predictor cuales son las condiciones nivometeo más favorables para la actividad de aludes en cada una de las zonas de avalancha con registros almacenados. Ello facilita al predictor estimar la probabilidad de avalanchas para el día en cuestión.

El sistema precisa disponer de una base de datos nivometeorológicos y de actividad de aludes fiable y suficientemente larga por parte del usuario. Una limitación del sistema es que el usuario debe tener un perfil especializado en nivología para obtener un máximo rendimiento de los resultados que proporciona el sistema.

	0.000	1	2	3	4	5
d	0.000	1.827		1.996	2.510	3.314
Data (DD-MM-AAAA)	11-02-2009	25-12-1993	27-12-1993	10-03-2006	11-03-2006	12-03-2006
Hora (HH:MM)	7:45	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
Nivocel·la (cc)	8	8	8	7	7	3
Direcció del vent (º)	360	45	360	?	315	360
Velocitat del vent (m/s)	3	54	0	2.5	12	13
Humitat aire (%)	27	100	100	90	58	99
Alçada neu 24h (cm)	19	40	0	0	46	0
Temps passat darrera pluja (dia)	16	6	7	8	0	1
Temps passat darrera nevada >20 cm (dia)	10	?	1	2	39	1

Figura 20 : Salida de NivelLog en la que selecciona los días más similares (un total de 5) al día a analizar (11-02-2009).

Los sistemas inferenciales basados en reglas deducidas a partir de observaciones locales (*rule-based systems*), válidas para sectores concretos, con una climatología concreta, es otro de los recursos utilizados en predicción local. El objetivo es establecer los umbrales en los que oscilan determinados parámetros nivometeorológicos con relación directa en la actividad de aludes, para cada una de las zonas de avalancha objeto de predicción. Para que este sistema sea aplicable requiere de un gran esfuerzo observacional histórico previo.

5. Ejemplos de predicción local

Hay tantos sistemas de predicción local como bienes e infraestructuras a proteger, disponibilidad de datos nivometeorológicos, condiciones nivoclimáticas, entre otras variables. Algunos ejemplos son:

- **Carreteras:** Para la protección de la carretera Mildford Road (Nueva Zelanda) se han establecido unos umbrales nivometeorológicos que cuando son superados la probabilidad de avalanchas es elevada. Los umbrales no se consideran individualmente sino en combinación con el perfil meteorológico de los temporales que generan la actividad espontánea de avalanchas (evolución temporal de los valores de temperatura, precipitación y viento). Es una predicción basada en el *rule-based system*.

- **Dominio esquiable:** En el Pirineo de Catalunya la Estación de Esquí y Montaña de Vall de Núria ha diseñado un sistema de predicción local (dominio esquiable y vía de ferrocarril de cremallera) basado en el sistema *k-nearest neighbours* ya que se dispone de una base de datos nivometeorológicos y de actividad de aludes de 25 años, poco habitual en el Pirineo del estado español. La estimación de la probabilidad de aludes se apoya también en el seguimiento visual mediante webcams de la sobreacumulación de nieve en puntos de salida habituales y en la interpretación de datos de flujo de transporte de nieve por el viento, ya que la climatología del sector está muy condicionada por vientos violentos del norte que redistribuyen rápidamente los aportes de nieve reciente.

- **Itinerarios de esquí de montaña:** En la Val d'Aran (Pirineo de Catalunya) existe una predicción local de peligro de aludes dirigida a los practicantes de actividades de montaña, donde se informa de la probabilidad de avalanchas en los itinerarios más frecuentados como son los accesos a refugios y las cumbres más visitadas. Este servicio tiene su justificación en que la Val d'Aran es una de las zonas más nevadas del Pirineo y donde la vulnerabilidad es más elevada, dada la gran frecuentación que existe. Esta predicción local está basada especialmente en el control de la inestabilidad mecánica y estructural del manto nevado ya que la peligrosidad se centra en el desencadenamiento accidental de placas de viento por el paso de personas. Para ello se efectúan perfiles simplificados, tests de estabilidad, cálculo de *yellow flags* y *lemons* en las laderas más frecuentadas.

Bibliografía

- [1] BOLOGNESI, R. (2004): La Neige. Ed. Fernand Nathan. 64 pg.
- [2] BOLOGNESI R. (1998): Prévention des avalanches: le système NivoLog, ANENA Revue n°71.
- [3] CONWAY, H., CARRAN, W., TECHEL, F., CARRAN, A. (2008): Guidelines for forecasting snow avalanches on the Mildford Road, New Zealand. *Proceedings of the International Snow Science Workshop. Whistler, Canada, 2008.*
- [4] GAUTHIER, D., JAMIESON, J. (2007): The Propagation Saw Test. *Avalanche ca. Journal.* 6 pg.
- [5] GAVALDÀ, J., MONER, I. (2008): Mountaineer-oriented local avalanche forecasting system in a graphical format in val d'Aran (Eastern Pyrenees). *Proceedings of the International Snow Science Workshop. Whistler, Canada, 2008.*
- [6] JAMIESON, B. (2001): Backcountry Avalanche Awareness. Ed. Canadian Avalanche Association. 78 pg.
- [7] MARTÍ, G., MONER, I., GARCÍA, C., OLLER, P., GAVALDÀ, J., COSTA, O. (2010). Manual de presa de dades nivometeorològiques i d'allaus. *Document intern.* Institut Geològic de Catalunya.
- [8] OLLER, P., PARET, D., GARCIA, C., JANERAS, M., COSTA, O., MARTI, G. Y MARTINEZ, P. (2009): Prevención del riesgo de aludes en la línea del cremallera de Núria, Pirineo Oriental. *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables.* E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.) CIMNE, Barcelona, 2009. 456-467.
- [9] SIMENHOIS, R. AND BIRKELAND, K. (2006): The extended column test: a test for fracture initiation and propagation. *Proceedings of the International Snow Science Workshop. Telluride, Colorado, USA. Oct. 2006.*
- [10] SCHWEIZER, J. (2002): The rutschblock test. Procedures and applications in Switzerland. *The Avalanche Review* 20(5), 1, 14-15.

www.flowcapt.com/

www.snowproplus.com