

ALGUNAS PRECISIONES SOBRE EL ROL DE LOS GLACIARES EN EL ESCURRIMIENTO ANDINO

Marcelo E. Lascano^{1,2} y Ricardo Villalba²

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera – UBA

²Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales
IANIGLA – CONICET

Av. Ruiz Leal s/n, Ciudad de Mendoza. e-mail: mlascano@lab.cricvt.edu.ar

RESUMEN

A lo largo de los Andes se desarrollan glaciares allí donde la temperatura, la precipitación, o una combinación de ambos factores permiten la acumulación de agua en fase sólida de un año a otro. Este fenómeno de balance interanual puede asumir diferentes significados hidrológicos. La influencia de la alimentación interanual, de origen glaciario y nival, en la conformación del escurrimiento suele ser mencionada pero no existen análisis que delimiten su gravitación. En este estudio se compara el comportamiento nivo-glaciario de 7 cuencas ubicadas en las vertientes Este (Blanco, Patos superior, Mendoza, Tunuyán, Atuel y Colorado) y 2 en la vertiente Oeste (Aconcagua y Maipo) de los Andes Centrales, en relación a la variabilidad interanual de la precipitación. Para el desarrollo de este planteo se utilizaron los caudales medios mensuales, la altura de la isoterma de 0 °C, la altimetría de las cuencas y las superficies de cuerpos de hielo relevadas en las cuencas del Atuel y el Mendoza. La menor variabilidad interanual del derrame del Mendoza tiene relación con el volumen de agua suministrada por la sumatoria de los glaciares presentes en su cuenca, así como por manchones de nieve de recarga cíclica. El Tunuyán también posee una componente interanual reconocible, aunque de menor importancia. Los ríos Blanco, Patos superior y Colorado no registran incidencias de importancia. El principal factor de control para la ocurrencia de esta conjugación de factores resultaría ser la altura de las cuencas activas. En los casos donde la alimentación interanual muestra importancia durante años de nevadas escasas debe tenerse en cuenta que estos aportes se producen sólo hacia fines del verano, por lo cual su efecto compensador no es sincrónico con la programación anual de los usos consuntivos.

Almacenamiento interanual – hielo – nieve – variabilidad - derrame

Introducción

El volumen anual de agua que escurre por el cauce de un río, denominado derrame, es el resultado del ciclo anual del clima. En las cuencas donde no se registra una persistencia anual o estacional de temperaturas bajo cero, el escurrimiento reproduce la alternancia y la intensidad de las precipitaciones de forma más o menos inmediata. Por el contrario, en las cuencas frías en cuya superficie total o parcial se acumula el agua en fase sólida, las fluctuaciones del caudal responden a una combinación de la precipitación y la temperatura, o solamente a la temperatura. Es decir que el escurrimiento de un río puede clasificarse desde el punto de vista climático según responda sólo a la precipitación, a una combinación entre la precipitación y la temperatura, o sólo a la temperatura. A escala subregional, el escurrimiento es el resultado total de la intervención de más de una de estas modalidades, en la que una predomina quedando así definido su régimen. En este trabajo dirigimos la atención sobre las cuencas de los Andes Centrales, cuyo escurrimiento se da en forma mayormente o completamente disociada de la estacionalidad de la precipitación. A lo largo de la cordillera se dan condiciones para la acumulación de agua en fase sólida. Este eslabón del ciclo del agua desfasa la ocurrencia de eventos hidrológicos de la ocurrencia de precipitación. Un primer tipo de desfase está relacionado con la nieve que constituye mantos efímeros que se derriten a los pocos días del evento de precipitación. Esta es una primera escala temporal de desfase. Una segunda escala es la estacional, donde la nieve se derrite mayormente luego de la estación invernal de precipitaciones. Y por último existe una serie de comportamientos hidrológicos derivados del desfase interanual, cuando el agua precipitada escurre sólo uno o más años después de caída (Jansson *et al.*, 2003). Entre estas 3 escalas hay una diferencia en la persistencia temporal del frío que retiene el agua. La persistencia temporal depende de la altitud y de la latitud. A mayor altura y mayor latitud el período durante el cual la precipitación se acumula y permanece retenida en fase sólida es más largo. Los resultados de Bruniard (1992, 1994), de Lascano y Villalba (2005b) y los de Carrasco *et al.* (2005) indican que las diferencias de altura media entre cuencas tienen una importancia mayor a la latitud como factor determinante del rango del ciclo anual de temperaturas. El sólo hecho de que el Colorado tenga su pico un mes y medio antes que el Mendoza, localizado 330 km más al norte, pone en evidencia la gran importancia que tiene la altura media de una cuenca como reguladora de la estacionalidad. En la figura 1 se ilustran las alturas medias de las

cuencas activas de vertiente Este de los Andes entre los 31° y 41° 30'. El cambio más brusco se da entre las cuencas del Colorado y el Atuel, con una diferencia de altura media de 800 metros. Del Atuel al norte todos los ríos escurren desde cuencas desarrolladas en promedio por sobre los 3300 metros de altura. Considerando la magnitud de los cambios altimétricos de norte a sur podemos descartar parcialmente la importancia de la latitud, como indicador del gradiente radiativo, y centrar la atención sobre las diferencias altimétricas. De esta manera para un sector latitudinalmente poco extendido puede suponerse que la persistencia de las condiciones para el almacenamiento de agua en fase sólida depende de la altura. Por lo tanto cuanto mayor sea la altura media de una cuenca activa, la duración del almacenamiento se aproxima más al año entero. Esta es la condición para el desarrollo de las llamadas "nieves eternas" y de cuerpos de hielo. Según su distribución altimétrica cada cuenca activa contará con más o menos superficie para el desarrollo del almacenaje de agua en escalas de tiempo iguales o mayores al año. De esta manera el rol hidrológico de los glaciares, y de la nieve interanual, puede ser más o menos importante. En general se habla de la reducción de la variabilidad interanual del derrame sólo como consecuencia del aporte glaciario. Pero en el Ambiente de la cordillera central, sujeto a una intensa variabilidad interanual de la precipitación, la recarga de nieve, por ejemplo en rincones umbríos de la montaña, podría tener la misma incidencia reguladora. La cobertura nival identificada en febrero de 1998 por Vargas y Fornero (2002, figura 10) constituye una de las primeras constataciones de este segundo factor de regulación interanual. Este trabajo tiene por objetivo identificar la importancia del rol del desfase interanual de agua, glaciario y nival, en la configuración del escurrimiento de la vertiente Este de los Andes.

Datos

Se utilizaron los caudales mensuales, provistos por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRRHH, Argentina, 2006), de los ríos Jáchal, Blanco, De los Patos Superior, San Juan, Mendoza, Tunuyán, Atuel y Colorado. Los caudales de los ríos de la vertiente Oeste, Maipú y Aconcagua, fueron provistos por la Dirección General de Aguas de la República de Chile. Las estaciones de aforo correspondientes figuran en el cuadro 1. Las extensiones de las series disponibles son diversas, y por otro lado algunos años no están completos, especialmente en el caso de los ríos Aconcagua y Maipú. Al proceder por comparación deben compatibilizarse las series eliminando en todos los casos los años que pueden faltar en un solo río. Luego de evaluar la cantidad de años completos que se perdían, se decidió que lo más conveniente para utilizar la mayor cantidad de información es utilizar un grupo de datos para la comparación entre vertientes (1956-57 a 2005-06) y otro para la comparación latitudinal (1954-55 a 2004-05). Por lo demás estos dos períodos son muy similares en extensión y superposición.

A diferencia de los ríos de la vertiente Este, los ríos de Chile se analizan en base al año hidrológico abril-marzo. En primer lugar porque estos ríos desarrollan un piso de alimentación líquida, y el Índice de Estacionalidad utilizado aquí requiere no fraccionar las dos respuestas hidrológicas que corresponden a un ciclo anual de precipitaciones invernales. Cabe mencionar también que los ríos de la vertiente Este tienen un proceso de memoria (Minetti *et al*, 1990) por el cual no corresponde adoptar el año hidrológico abril-marzo. En síntesis en cada caso se adopta el año hidrológico que refleja el derrame que corresponde a cada ciclo invernal de precipitación.

Cuadro 1 : ríos y estaciones de aforo seleccionadas

Río	Estación de aforo	Caudal medio a. (m3/s)	Sup cca. Activa (km2)	Presas aguas abajo	potencia inst(KW)	Período (años Hidrol.)	Años hidrol. Completos
Mendoza	Guido			1	n/d	1956-57 a 2005-06	44
Tunuyán	Valle de Uco			1			
Aconcagua	Chacabucuito	32	2059				
Maipo	El Manzano	107,5	4769		n/d		
Choapa	Cuncumén	9,1	1172			1954-55 a 2004-05	45
Blanco	El Horcajo	23,3	4790				
Patos Superior	Álvarez Condarco	41,7	3710				
San Juan	Km. 47	48,8	3153	2	45.000		
Mendoza	Cacheuta/Guido	27,2	2380		n/d		
Tunuyán	Valle de Uco	36,7	2900		n/d		
Atuel	La Angostura	113	6180	2	281.960		
Colorado	Buta Ranquil	35,8	2900	1	60.000		

Todas las estaciones de aforo miden caudales naturales, no sujetos a regulación por operación de embalses. Los datos de potencia instalada fueron tomados del Informe anual del sector eléctrico (Argentina, 2004)

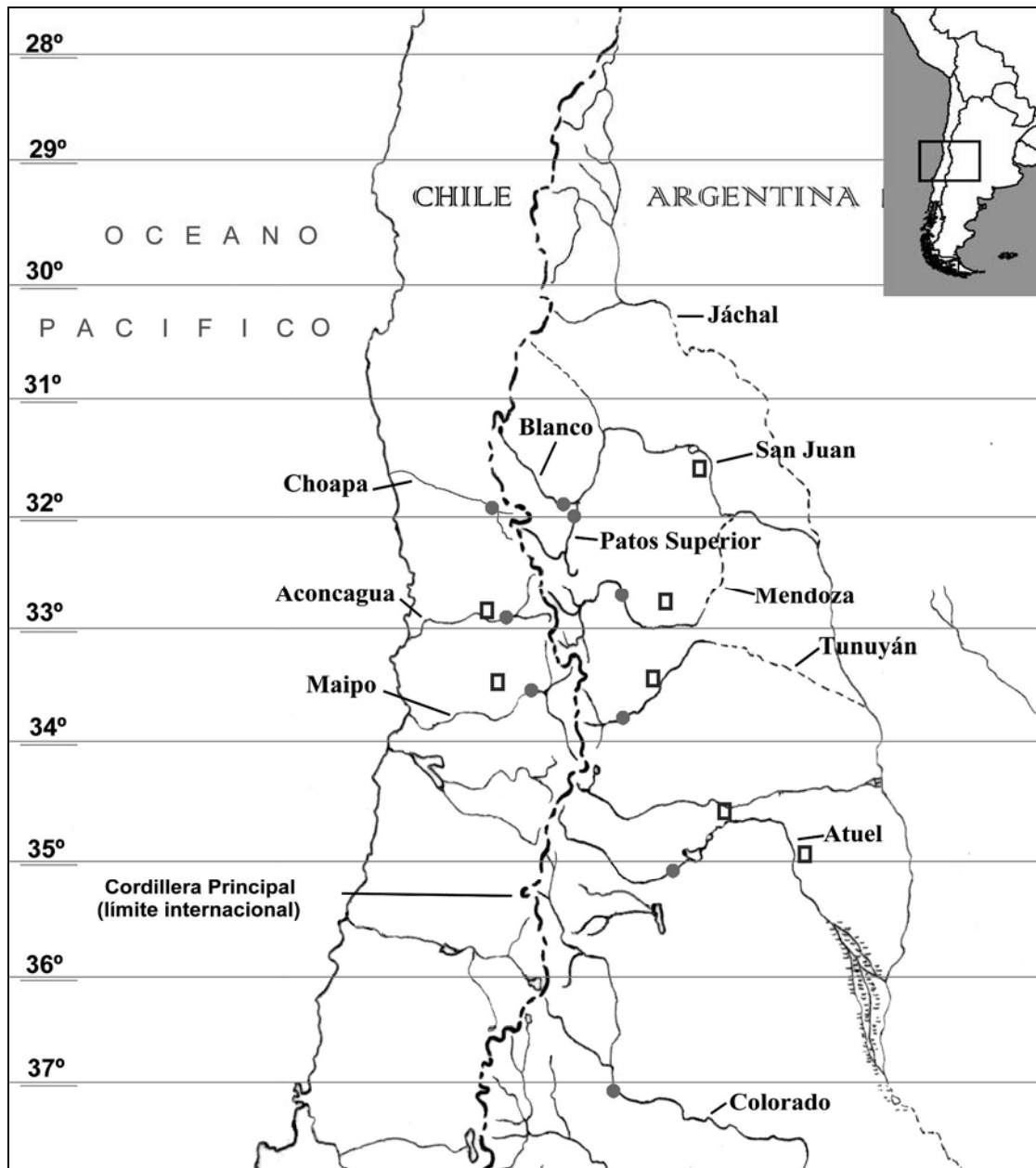


Figura 1 : ríos y ubicaciones de aforos.

Los caudales del Jáchal fueron descartados ya que este río se alimenta también de las lluvias estivales derivadas de la expansión de la circulación subtropical. Esta segunda componente de alimentación compensa parcialmente la variabilidad de la alimentación nival : el c.v. del Jáchal es 10 puntos menor al del Blanco.

Con los caudales mensuales se calcularon los derrames (volúmenes escurridos por año). Los derrames se utilizan, luego de exponer la correspondiente justificación, en determinados casos como indicadores del monto anual de precipitación en la cuenca activa correspondiente. Este punto de vista, formulado por Bruniard para valores hidroclimáticos, fue aplicado por estos autores (Lascano y Villalba , 2005b) ante la falta de representatividad o brevedad de las pocas series pluviométricas medidas en los Andes (Lascano, 2006). El derrame también fue utilizado como *proxy* del monto anual de la precipitación sobre la vertiente Oeste de los Andes en el estudio de Aceituno y Vidal (1990). Las dificultades para medir la precipitación al interior de los Andes centrales, señaladas por Capitanelli (1967), también destacan la utilidad del derrame como *proxy*. Al tratarse de un sector del país con una marcada estacionalidad invernal de la precipitación, el derrame en determinados casos no sólo indica el monto invernal de precipitación, sino también de la magnitud de la acumulación estacional de nieve. A medida que crece

la incidencia del desfase interanual el valor del derrame como *proxy* del monto de precipitación se reduce. La retención de una parte de la precipitación que se produce durante años abundantes y la restitución que ocurre en años secos pueden apartar significativamente el ritmo del derrame del ritmo de la variabilidad de la precipitación. Por esta razón se discriminan fisiográfica e hidrológicamente los casos en que la componente glaciario-nival no existe o donde no es significativa, para luego resaltar su incidencia en otros casos.

Todo el desarrollo del trabajo tiene como base el concepto de cuenca activa (Barrera, 2002), particularmente útil para la comprensión del escurrimiento de la vertiente Este de los Andes. Sobre este flanco los aportes se producen sólo en una parte de la superficie total aguas arriba de cada aforo. Su delimitación precisa requeriría conocer en detalle la pluviometría de montaña y esa información no está disponible. A los fines de este estudio se adopta un criterio morfológico: la cuenca activa corresponde al ámbito comprendido entre la línea principal de altas cumbres, coincidente con el límite internacional entre la Argentina y Chile, y la cresta del siguiente cordón al Este, que para las cuencas de los ríos Blanco, Patos Superior, Mendoza y Tunuyán coincide con la Cordillera Frontal. Como fuera señalado por Vallejos (1973) existen buenas correlaciones entre el máximo de nieve acumulada en puntos de registro y los caudales de fusión a raíz la estructura topográfica y climática del macizo andino central, donde los cordones son paralelos. De esta forma el volumen crítico de la precipitación, 100% nival, se acumula en una estrecha franja entre la cresta del cordón principal, y la de la Cordillera frontal, donde no se producen lluvias, ni invernales ni estivales, que puedan distorsionar la relación entre nieve y escorrentía (Vallejos 1973). Las superficies resultantes de la aplicación del criterio enunciado pueden verse en la figura 2. En la figura 3 se muestran las alturas medias de cuenca correspondientes, ordenadas de norte a sur y en forma consecutiva.

Para el análisis altimétrico de la vertiente Este se utilizó la cobertura de curvas de nivel de las cartas 1:250000 del IGM, con equidistancias de 200 y 250 metros según el caso, aplicando los conceptos metodológicos expuestos por Bruniard (1992). Para la vertiente Oeste se procesaron las coberturas vectoriales del Ministerio de Obras Públicas de la República de Chile, disponibles en forma gratuita en www.sinia.cl. Para hacer comparaciones entre las distintas cuencas se reconvirtieron los resultados a una equidistancia de 250 metros.

Por último, para ilustrar algunos caracteres hidrológicos, se calculó a partir de los 12 caudales medios mensuales de cada año hidrológico un Índice de Estacionalidad (de ahora en adelante IE), aplicado al análisis de los ríos del Oeste de los EE.UU (Stewart *et al*, 2004) y de la Argentina (Lascano y Villalba, 2005a, Lascano y Villalba 2005b). El IE mide el carácter tardío o temprano del escurrimiento estacional cada año. Su fórmula es:

$$IE = \sum (t_i q_i) / \sum q_i$$

donde t_i es el tiempo en meses desde el comienzo del año hidrológico, y q_i es el caudal medio mensual correspondiente al mes i . Al ser aplicado a un año hidrológico Julio-Junio un IE de valor 1 equivale en forma teórica al 15 de julio. El valor 2 correspondería al 15 de agosto. En el caso del Colorado adoptamos el año hidrológico abril-marzo, por lo que el valor 1 del IE corresponde al 15 de abril. Este indicador es independiente de los volúmenes de derrame, al igual que los coeficientes mensuales de Pardé (1968).

Metodología

Así como el derrame puede ser un buen indicador de la precipitación anual, otros parámetros hidrológicos sencillos contienen información sobre la configuración ambiental de una cuenca cuando se procede de forma comparativa entre varias cuencas que comparten varios atributos. En este trabajo se hacen por un lado comparaciones en el sentido latitudinal entre las cuencas y escurrimiento de los ríos Blanco, Patos Superior, Mendoza, Tunuyán, Atuel y Colorado. Por otro se comparan dos pares de cuencas, cada uno con nacientes en el mismo rango latitudinal: en primer término la del Mendoza junto a la del Aconcagua, y luego la del Tunuyán con la del Maipo. Es decir, se comparan los regímenes hidrológicos y la altimetría de norte a sur y entre las dos vertientes de los Andes en un trecho para el cual se dispone de series hidrológicas completas.

La atención se dirige a los datos de caudal mensual de fines de primavera y verano sobre todo. El valor de esta información como indicador de la acumulación invernal y la fusión y/o derretimiento durante la estación cálida tiene que ver con la persistencia de la estacionalidad de la precipitación en la alta

Cordillera. El desplazamiento anual cíclico del anticiclón del Pacífico sur (Minetti *et al.*, 1982) determina una regularidad mínima en la concentración de la precipitación durante el invierno, así como la sequedad del verano. En otras regiones del mundo las precipitaciones estivales impiden la interpretación de los datos de caudal realizada aquí (ver Frécaut, 1975, Singh *et al*, 2003; Stahl y Moore, 2006).

Resultados

Como primer recurso comparativo se utiliza la altura media de las cuencas activas correspondientes. Para los ríos de le vertiente Oeste la cuenca activa es el total de la superficie cerrada en el aforo. Para la vertiente opuesta se aplica el criterio enunciado. En la figura 2 se presentan las superficies utilizadas, y en la figura 3 las alturas medias obtenidas.

La cuenca activa del Mendoza es la única que supera los 4000 metros de altura media, con una diferencia de más de 300 metros respecto a las del Tunuyán y Patos Superior. Como puede observarse, los cambios meridionales de altura de los Andes sugieren ya de por sí un ámbito de grandes alturas, del Atuel al norte. Al contrario entre esta cuenca y la del Colorado Superior (Grande) la diferencia de altura media es de más de 700 metros. Un segundo salto se produce entre el área de aporte del Barrancas y la del alto Neuquén. Sintetizando algunos resultados que veremos a

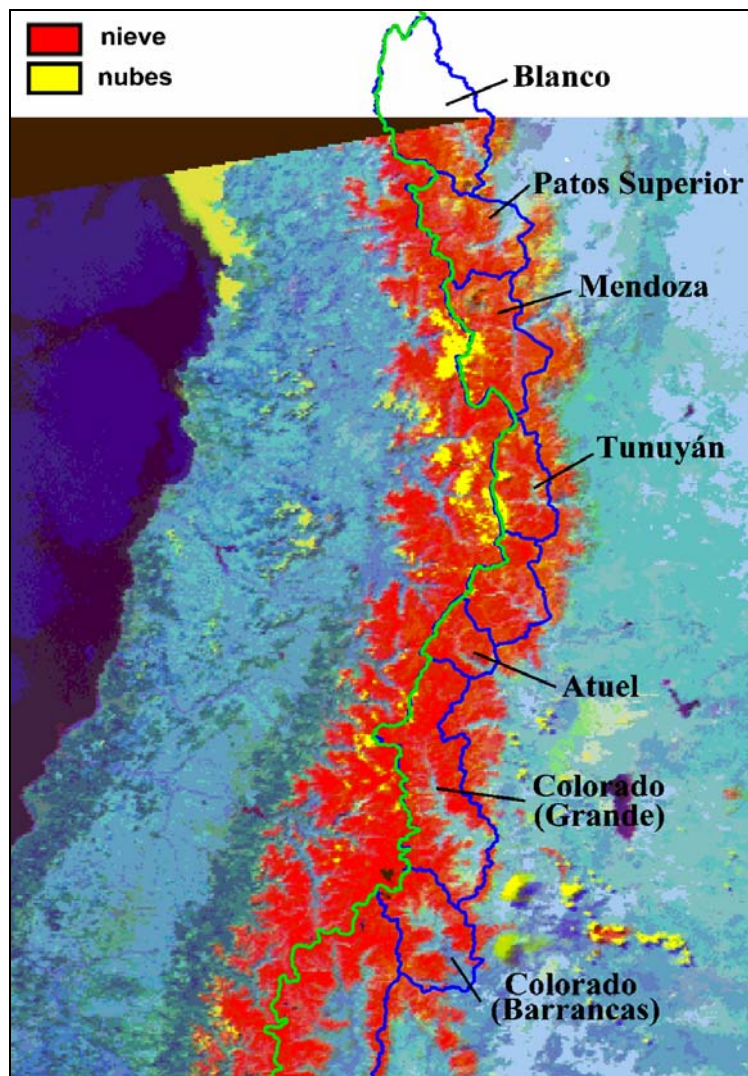


Figura 2 : delimitación de cuencas activas en Cordillera central. Perímetros impuestos sobre el manto nival definitivo del año hidrológico 2002-03. Imagen NOAA AVHRR del 29/09/02, canales 1,3,5.

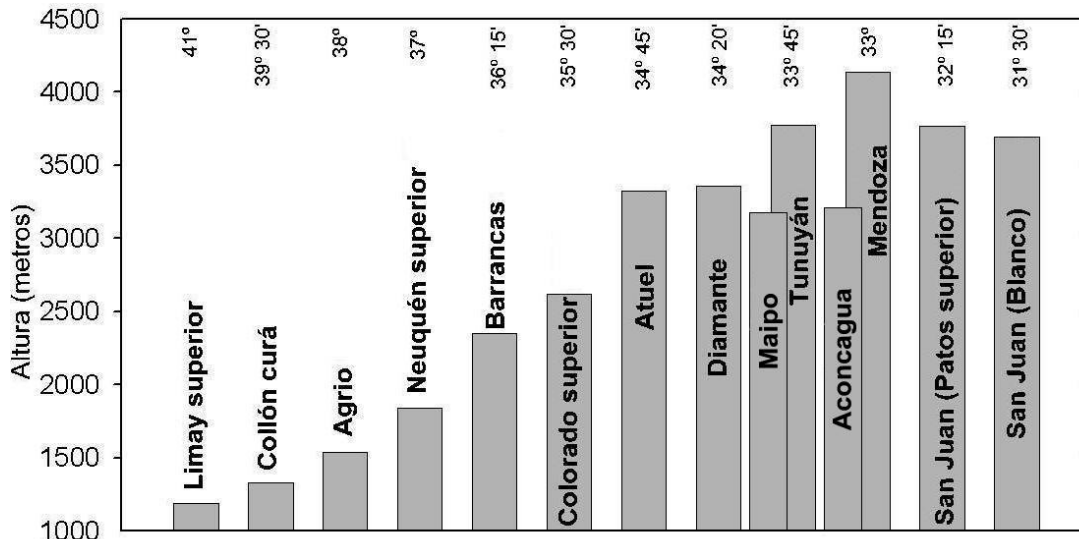


Figura 3 : alturas medias de las áreas de aporte hídrico efectivo (cuencas activas) de la vertiente oriental de los Andes entre los paralelos 31° y 41° 30' S. Las superficies correspondientes figuran en el plano n° 2 y el criterio de delimitación es explicado en el texto.

continuación, y retomando la interacción estacional entre la isoterma de 0 °C y el volumen orográfico (Bruniard, 1994), se puede asociar estos dos “escalones” con las componentes de alimentación sólida en la vertiente oriental: del Barrancas al norte predomina la alimentación nival y la pluvial no está presente de manera significativa (aunque durante algunos años alcance algo de visibilidad). Del Atuel al norte la componente líquida desaparece por completo, la nival es la más importante, a su vez que se agrega la glaciaria con distintos grados de incidencia. El planteo desarrollado a continuación apunta a comprender de forma más precisa el rol de esta última.

En primer lugar identificaremos los ríos de alimentación netamente nival donde la estacionalidad no responde ni a la precipitación líquida ni a los aportes del derretimiento de hielo o nieve interanual. Esto puede hacerse a partir de la clasificación de regímenes fluviales (Pardé 1968; Bruniard, 1992), que evalúa la reacción más o menos inmediata del caudal al incremento de la temperatura desde fines de primavera, es decir, con el comienzo de la fusión de la nieve y, cuando corresponde, con el comienzo del derretimiento de hielo. Se trata entonces de una clasificación que apunta a identificar, aunque sólo de manera general, los tipos de alimentación, a partir de los 3 caudales mensuales máximos. En el cuadro 2 se presenta la clasificación genética de regímenes hidrológicos estacionales (Bruniard, 1992).

Cuadro 2 : Clasificación genética orientativa de regímenes fluviales

	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO
ULTRAGLACIARIO												1°
GLACIARIO CLASICO									3°	1°	2°	
GLACIARIO MITIGADO									2°	1°	3°	
NIVO-GLACIARIO								4°	1°	2°	3°	
NIVAL PURO								2°	1°	3°	4°	
NIVAL MITIGADO							3°	2°	1°			
NIVO-PLUVIAL			1°B					1°A				
PLUVIO-NIVAL		1°A	1°A				1°B	1°B				

Tomado de Bruniard (1992) con modificaciones. 1A es el pico principal y 1B el secundario