

# **CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA E IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS EN UN TORRENTE ALPINO (SARCA DI VAL GENOVA, ITALIA)**

**Gabriel Kaless**

Dirección General de Obras Hídricas, Provincia del Chubut  
Roger 643, Rawson (9103) Chubut. Tel. 02965 484498 / 484506  
E-mail: dgoh@speedy.com.ar

## **RESUMEN**

Las formas y los procesos fluviales están íntimamente vinculados, proponiéndose la lectura de las formas como clave para la interpretación de procesos pasados que definieron las formas actuales y de aquellos operantes en el presente para estimar la tendencia evolutiva del curso. Se expone la metodología empleada para caracterizar los procesos dominantes y formas fluviales en el torrente Sarca di Val Genova (Provincia di Trento, Italia). A través de los registros del evento aluvional del año 1987, los distintos procesos fueron clasificados y georeferenciados para poder agruparlos ulteriormente según las tipologías morfológicas identificadas. El empleo combinado de varios sistemas de clasificación de cursos de agua (Rosgen, 1994; Montgomery y Buffington, 1993) permitió arribar a una mejor y más profunda descripción y conocimiento de la dinámica del torrente.

## **ABSTRACT**

Fluvial forms and processes are closely related. The reading of forms is proposed as a key for the interpretation of past processes that defined the current morphology and present acting processes to assess the river evolutionary tendency. The methodology employed for the characterization of fluvial forms and processes in Sarca di Val Genova stream (Province of Trento, Italy) is presented. With historical records of 1987 flood, different processes were classified and geo-referenced, and then summarized taking into account the morphologies identified. The combined use of several stream classification systems (Rosgen, 1994; Montgomery y Buffington, 1993) allowed a better and deeper description and knowledge of the stream dynamics.

## **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

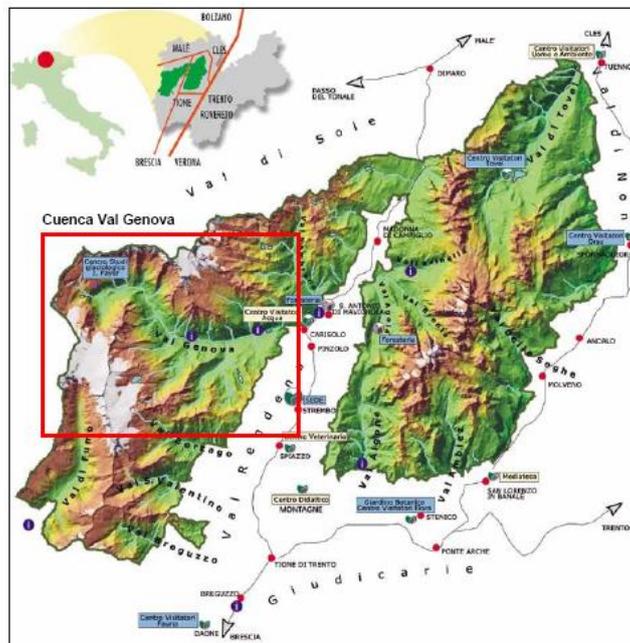
La ingeniería fluvial desarrolla su actividad en un campo donde los objetos involucrados, ríos y planicies de inundación, se caracterizan por su constante dinamismo. Formas y procesos están íntimamente vinculados, proponiéndose la lectura de las formas como clave para la interpretación de procesos pasados que definieron las formas actuales y de aquellos operantes en el presente para estimar la tendencia evolutiva del curso. Los problemas a resolver en la práctica se refieren al mantenimiento de los cursos, la reconstrucción morfológica, la definición de una faja de pertinencia fluvial, como así también aquellos referidos a los tradicionales de erosión localizada y defensas contra crecidas.

El objetivo del presente estudio fue el de aplicar y probar una aproximación morfológica con la finalidad de afrontar en forma holística los problemas concernientes a los sistemas fluviales. Se planteó la evaluación de las formas fluviales utilizando dos sistemas de clasificación: el de Rosgen (1994), de carácter general, y el de Montgomery y Buffington (1993), especial para torrentes. El método de Rosgen (1994) se basa en la medición de parámetros característicos del curso y su relación con el valle que lo contiene. El sistema de Montgomery y Buffington (1993) se basa en la identificación de las formas de fondo, estrechamente ligadas con los procesos de transporte y alimentación sólida en el río.

Los sistemas de clasificación de los cursos naturales surgieron a partir de la necesidad de

contar con un lenguaje, universal si fuera posible, para describir los objetos encontrados en la naturaleza. De esta forma, han sido propuestos diferentes sistemas basados en las formas planimétricas (Brice, 1984) y su relación cualitativa con el transporte sólido (Schumm, 1981) y también con las características de los sedimentos (Mollard, 1973). Otros criterios hacen referencia especialmente a los procesos (Montgomery y Buffington, 1993, 1997) o a las características geométricas de los cursos susceptibles de ser medidas en campo (Rosgen, 1994, 1996).

La variedad y cantidad de sistemas disponibles en la actualidad es un reflejo de la diversidad de formas fluviales y de la dificultad de colocar todas ellas dentro de un sólo marco conceptual. Los sistemas empleados en este estudio nacieron con el objetivo de estimar la posible respuesta de los ríos ante cambios naturales o antrópicos tanto en la cuenca como en el mismo álveo. Según Leopold (1994) no existe todavía una teoría del comportamiento de los ríos que pueda ser utilizada para los proyectos de restauración (river restoration). Es más, este autor sostiene que a pesar que las formas y procesos fluviales siguen las leyes de la física, no existe una solución unívoca para la reacción del río a los cambios impuestos.



**Figura 1.-** Ubicación geográfica de la cuenca del torrente Sarca di Val Genova en la Provincia Autónoma de Trento (norte de Italia). Se indica en la figura la extensión del Parque Natural Adamello Brenta en cuyo territorio se encuentra la cuenca del torrente estudiado.

El estado actual de un curso natural es la mejor expresión de la síntesis de factores (clima, geología, morfología y cobertura vegetal en la cuenca) y de la evolución geomorfológica del paisaje. En una nueva lectura y extensión de la “balanza de Lane” D’Agostino (2003, 2005) propone como “clave de lectura” las modalidades según las cuales un curso de agua compensa desde aguas arriba a aguas abajo la pérdida de energía potencial. Entre estas modalidades se encuentran la forma del cauce (planimétrica y de fondo), la rugosidad del lecho y la alimentación de material sólido proveniente de aguas arriba. Agregando los condicionamientos externos, que confieren los caracteres particulares a cada torrente (topográficos, litológicos, vegetación en las márgenes), ha desarrollado una metodología de reconocimiento de campo (Lenzi et al, 2000) empleada con éxito en ambiente alpino. Siguiendo esta visión integradora se eligieron como sistemas de clasificación, el propuesto

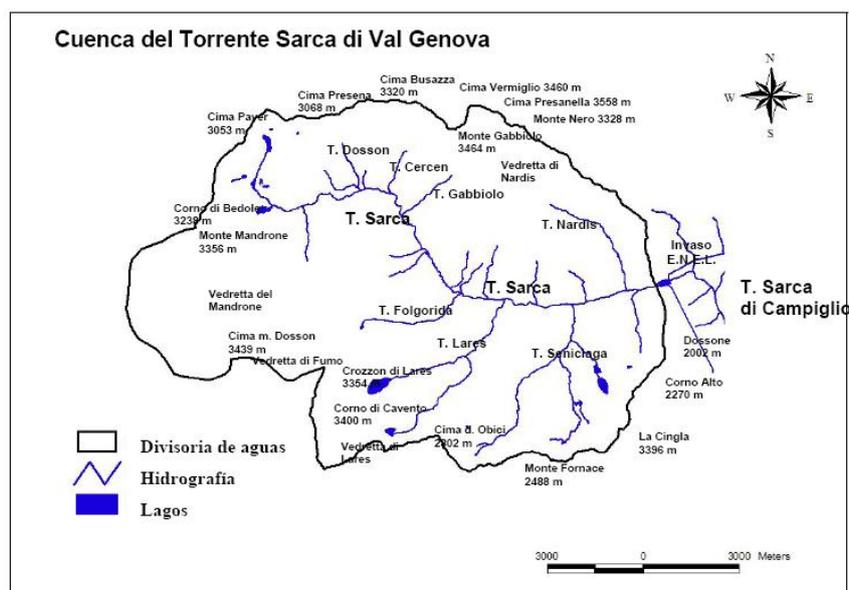
por Montgomery y Buffington (1993, 1997), en lo concerniente a los procesos y formas de fondo, y el sistema de Rosgen (1994, 1996) por integrar las características geométricas transversales y la relación del curso con el valle que lo contiene.

## DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

La cuenca “Val di Genova” se encuentra ubicada en el territorio del Parque Natural Adamello Brenta en la Provincia Autónoma de Trento (norte de Italia), constituyendo una de las unidades paisajísticas fundamentales. La cuenca se emplaza en un ambiente típico alpino pero con algunas características geológicas particulares que la diferencia de su entorno.

Considerando un punto de síntesis a cota 895 m s.n.m., coincidente con la toma del embalse artificial del ENEL, la cuenca así definida se extiende en una superficie de 138,4 km<sup>2</sup>. La pendiente media es 49,6%, valor elevado si se lo compara con la extensión de la cuenca. La cota media es también elevada (2350 m s.n.m.) a causa de las montañas que componen el grupo Presanella y Adamello, algunas de las cuales superan los 3500 m s.n.m.

La geología del territorio se presenta uniforme. Cerca del 99% de la masa rocosa magmática actualmente expuesta está conformada por tonalitas y en menor proporción por granodioritas (Callegari y Brack, 2002). La morfología del valle ha sido determinado por la acción de dos agentes morfogenéticos diferentes: la actividad de los glaciares en el periodo wurmiano y la fluvial-aluvional sucesiva. El valle del torrente Sarca se presenta en la actualidad como una incisión en U en correspondencia de numerosas planicies interrumpidas por escalones glaciares que crean gargantas y cascadas. Los depósitos más frecuentes son los cuaternarios vinculados con la glaciación reciente. Se observan depósitos de relleno de tipo aluvional, deltaico y lacustre. Gran parte del valle está conformado por formaciones incoherentes tales como detritos morénicos y de falda.



**Figura 2.-** Cuenca hidrográfica del Torrente Sarca di Val Genova, con punto de síntesis en correspondencia del embalse del ENEL; se incluye la divisoria de aguas y la red hidrográfica.

En lo que concierne a la cobertura del suelo, la cuenca se caracteriza por una preponderancia

de zonas con ausencia de vegetación (40%) sobre todo en los sectores altos del valle. Estas zonas están constituidas por afloramientos de roca y depósitos morénicos no cubiertos por la vegetación. Las superficies glaciales siguen en importancia cubriendo el 17% del área de la cuenca. Las restantes porciones de la cuenca están ocupadas por formaciones vegetales forestales, prados alpinos y formaciones arbustivas.

El clima del territorio resulta ser una transición entre el clima sublitoral y el continental caracterizándose por inviernos duros y secos, y periodos estivales y otoñales frescos y lluviosos. La precipitación media es de 1400mm anuales. El régimen térmico controla la fusión de los glaciares y por lo tanto el régimen hídrico del torrente (caudales de base). Los picos de crecidas se deben a fuertes precipitaciones convectivas estivales como la registrada en el año 1987. En la tabla N° 1 se expone un resumen con las principales características de la cuenca.

**Tabla 1.-** Características principales de la cuenca.

Superficie	138,4 km <sup>2</sup>
Perímetro	53,9 km
Cota mínima	894 m s.n.m.
Cota máxima	3558 m s.n.m.
Cota media	2349 m s.n.m.
Pendiente media	28,4°
Exposición media	O – E
Precipitación anual	1400 mm
CN(número de curva) medio	66

## **SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN IMPLEMENTADOS**

### **Sistema de clasificación de Rosgen**

El sistema para clasificar los cursos de agua propuesto por Rosgen (1994, 1996) forma parte de un metodología para el análisis de la morfología del álveo, su estado presente y su posible respuesta como reacción a cambios en la cuenca o en el mismo curso. La metodología está estructurada en forma jerárquica compuesta por los siguientes niveles de análisis: caracterización geomorfológica de la cuenca, descripción del curso de agua, evaluación del estado actual y, finalmente, un nivel de validación.

A todo curso natural es posible asignarle una categoría a partir de la medición en campo de distintas magnitudes que se pueden agrupar en: planimétricas, perfil longitudinal y sección transversal. Estos componentes fundamentales de la morfología reflejan la respuesta integrada del río que le permite alcanzar un equilibrio con el gradiente de energía existente, el aporte de sedimentos y su capacidad de transportarlos. La planimetría se refiere a la forma adoptada por el curso medida a través de su sinuosidad. Las características del perfil longitudinal son condensadas a través de la medición de la pendiente, mientras que la sección transversal es descrita a través del grado de confinamiento (relación ancho de inundación/ ancho para el caudal a cauce lleno –bankfull discharge) y la relación ancho/profundidad para el caudal a cauce lleno (bankfull discharge). Con estas mediciones viene definida la tipología básica (nominada con una letra de A a G, ver tabla 1) y posteriormente se completa la clasificación sobre la base de las características del material del lecho asignándose un número de 1 a 5 (ver tabla 2). De esta forma resulta un código alfanumérico con 41 opciones según las combinaciones posibles de tipologías morfológicas y materiales de fondo, y sub-tipologías.

Por ejemplo, la clasificación A3 responde a un típico curso de montaña, confinado, con pendiente comprendida entre 4% y 10%, y posible morfología de salto-resalto (A); con lecho de cantos rodados (3). Si la pendiente fuera superior al 10% se le agregaría al código un segundo carácter indicando que la pendiente se encuentra fuera del rango establecido para esa tipología, en este caso se escribiría: A3a+.

**Tabla 1.** Resumen de tipologías propuestas por Rosgen

Tipología	Características morfológica
A	<b>Salto-resalto (Step-pool) o rápidas.</b> Saltos y cuencos de erosión. Alta energía, baja capacidad de almacenamiento de sedimentos, curso estable.
B	<b>Rápidos (Riffles), rápidas.</b> Algunos pozos de erosión y raramente con barras. Curso estable.
C	<b>Secuencia de rápidos-remansos (Riffle-pool).</b> Meandros, point bars, planicies de inundación bien desarrolladas, márgenes estables o inestables.
D	<b>Entrelazado (Braided).</b> Múltiples canales, barras alternadas y en evolución, actividad de erosión y sedimentación, alto aporte de sedimentos, alta erosión de márgenes
DA	<b>Anastomizado.</b> Múltiples canales, secuencia de rápidos-remansos (riffle-pool), planicie de inundación vegetada, tierras pantanosas, márgenes estables
E	<b>Meandros en praderas.</b> Planicie de inundación bien desarrolla. Secuencia de rápidos-remansos (riffle-pool). Relativa alta capacidad de transporte de sedimentos. Cursos estables.
F	<b>Valle meandriforme.</b> Curso incidido, pobre planicie de inundación. Secuencias de rápidos-remansos (riffle-pool), márgenes estables o inestables.
G	<b>Cárcavas.</b> Incisiones en laderas o praderas, alto aporte de sedimentos márgenes inestables. Secuencia de saltos-resaltos (step-pool).

**Tabla 2.** Código según la granulometría predominante en el lecho del cauce.

Código	Descripción	Diámetro (mm)
1	Lecho de roca	---
2	Bloques	> 256
3	Cantos rodados	64 – 256
4	Grava	2 – 64
5	Arena	0.064 – 2
6	Limos/Arcilla	< 0.064

En el caso particular del torrente Sarca di Val Génova, de las 8 tipologías definidas en el sistema se observan 5, a saber: las tipologías B, C, D y F y la subtipología Aa+ perteneciente a la tipología A. A continuación se realizará una breve descripción de las mismas y sus criterios delineativos ya que serán utilizadas con frecuencia en este informe.

Bajo la denominación “Aa+” se engloban torrentes de elevada pendiente y alto grado de confinamiento. La morfología observable cambia según el tipo de material del fondo. Desde la roca desnuda a la arena es posible encontrar cascadas (A1a+), rápidas, secuencias de saltos-resaltos (step-pools), para las granulometrías más gruesas (A2a+ o A3a+), y canales típicos coluviales incididos en el coluvio, depósitos glaciales o terrazas en el caso de las granulometrías más finas (A4a+ o A5a+). Los parámetros característicos son: grado de confinamiento, < 1.4; pendiente típica, >10%, relación ancho/profundidad, <12; sinuosidad, 1,0 – 1,1.

En la tipología B, tanto el perfil longitudinal como las laderas del valle presentan pendientes moderadas que limitan el desarrollo de una planicie de inundación y la divagación del curso. Las formas de fondo están estrechamente vinculadas al transporte sólido y las características geológicas locales. Los tipos B2 y B3 se presentan como rápidas con pozos (pools) distribuidos en forma irregular, a lo largo de conos aluviales o depósitos coluviales gruesos. El tipo B4 también puede presentarse como rápidas o con lechos planos. Los parámetros característicos son: grado de confinamiento, 1,4 - 2,2; pendiente típica, 2% - 3,9%, relación ancho/profundidad, >12; sinuosidad, >1,2.



**Figura 3.** Ejemplo de tramo con tipología A1a+ en el torrente Sarca di Val Genova. Los tramos de fuerte pendiente, generalmente con lechos y paredes de roca comunican las planicies en distintos niveles por las cuales escurre el torrente.



**Figura 4.** Ejemplo de tramo con tipología B en el torrente Sarca di Val Genova. Tramo con pendiente de 2,5%, con presencia de grandes bloques que posibilitan el desarrollo de rápidos como forma de fondo.

La tipología C comprende los cursos que desarrollan una amplia planicie de inundación en un valle constituido por depósitos aluvionales. Planimétricamente se presentan como cursos sinuosos dado la baja limitación ofrecidas por las laderas del valle. Los elementos morfológicos típicos son las barras alternadas y en el interior de las curvas (point-bar) y las secuencias de rápidos-remansos (riffle-pools) en el cauce activo. Los parámetros característicos son: grado de confinamiento,  $> 2,2$ ; pendiente típica,  $< 2\%$ , relación ancho/profundidad,  $> 12$ ; sinuosidad,  $> 1,2$ .



**Figura 5.** Ejemplo de tramo con tipología C en el torrente Sarca di Val Genova. En primer plano, a la derecha, se observa el pool y aguas arriba el riffle precedente. En el extremo inferior izquierdo se aprecia una barra (point-bar).

Los cursos tipo D corresponden con los conocidos como “entrelazados” o “braided”. Se trata de ríos con múltiples canales entrelazados, con barras longitudinales y transversales sumamente dinámicas. Se caracterizan por una relación ancho/profundidad muy elevada; márgenes muy erosionables y bajo grado de confinamiento. Los parámetros característicos son: grado de confinamiento, no corresponde; pendiente típica,  $< 4\%$ , relación ancho/profundidad,  $> 40$ ; sinuosidad: no corresponde.



**Figura 6.** Ejemplo de tramo con tipología D en el torrente Sarca di Val Genova. Se observa la formación de barras centrales que definen múltiples cursos, y la progresiva colonización por parte de la vegetación.

Finalmente, la tipología F corresponde a cursos confinados y sinuosos, profundamente incididos en el valle que los contiene y en proceso de restablecer una llanura de inundación a un nivel inferior según la resistencia de las márgenes. Las formas de fondo típicas son los rápidos-remansos (riffle-pools). Parámetros característicos: grado de confinamiento,  $< 1,4$ ; pendiente típica,  $< 2\%$ , relación ancho/profundidad,  $> 12$ ; sinuosidad,  $> 1,2$ .



**Figura 7.** Ejemplo de tramo con tipología F en el torrente Sarca di Val Genova. Las márgenes se elevan notablemente confinando completamente el curso. En el fondo se observan rápidas con una disposición alineada de los bloques que tienden a la formación de salto-resalto (step-pool).

### **Sistema de Clasificación de Montgomery y Buffington**

Montgomery y Buffington (1994, 1997) propusieron un sistema de clasificación como base para el estudio de las posibles respuestas de una cuenca y su red hidrográfica ante cambios de origen natural o antrópico. El sistema comprende cinco niveles: la provincia geomórfica, la cuenca, los segmentos valletanos, los cursos de agua y los tramos que constituyen las unidades más pequeñas de estudio.

La hipótesis de partida es que existe una relación entre los cambios hacia aguas abajo en la morfología del curso, su rugosidad, cambios en la pendiente longitudinal, aporte de sedimentos y la capacidad de transporte del curso. De esta forma, la columna vertebral que atraviesa todos los niveles de estudio es el proceso de generación, transporte y depósito de sedimentos. De acuerdo con esta relación entre formas y procesos, Montgomery y Buffington (1994, 1997) propusieron una serie de unidades morfológicas características de ambientes de montaña y pedemontanos. Una vez identificadas en el lugar las morfologías de cada tramo se podrían evaluar los cambios probables partiendo de los procesos asociados a aquellas.

La diferenciación entre distintas tipologías morfológicas se realiza según las formas de fondo.

Se reconocen ocho unidades: rápidas (cascade), salto-resalto (step-pool), lecho plano (plane bed), rápidos-remansos (riffle-pool), entrelazado (braided), dunas-rizos (dunne-ripple), tramos coluviales (colluvial) y tramos en roca (bed rock); de los cuales los primeros seis corresponden a cursos sobre depósitos aluvionales. A continuación se describen brevemente las características básicas de cada uno.

Las rápidas se presentan como rampas de pendiente sostenida (mayor a 3-4%) con notoria macrorugosidad. Pueden desarrollarse escalones pero irregulares que no ocupan todo el ancho del cauce, en cuyo caso reciben el nombre de rápida con escalones (“rapida a gradini” Lenzi et al, 2000). En cambio, se llama rápida tipo rampa (“rapida a scivolo” Lenzi et al, 2000) cuando la macrorugosidad está bien distribuida en todo el lecho. Las rápidas poseen una elevada capacidad de transporte, mientras que el aporte de sedimentos es limitado. En la figura 4 se expone una rápida de baja pendiente.

Las secuencias rítmicas de saltos y cuencos, con la configuración típica de una escalera se identifican como salto-resalto (step-pool). Los sedimentos presentan una gran organización disponiéndose transversalmente los bloques más grandes a lo largo de todo el ancho del cauce, mientras que el material más fino ocupa el cuenco. Generalmente se observan para pendientes mayores al 2-3%. Al igual que las rápidas, poseen una elevada capacidad de transporte y reciben un limitado aporte de sedimentos.

En un lecho plano (plane bed) se aprecia la falta de formas de fondo bien definidas o repetitivas. Como su nombre lo indica el perfil longitudinal es relativamente plano con ocasionales rápidas de corta longitud. El fondo puede estar acorazado y en general no se observa macrorugosidad lo cual indica un cierto equilibrio entre la capacidad de transporte y la alimentación sólida desde aguas arriba. Las pendientes frecuentes son menores a 4-5%.

Los rápidos-remansos (riffle-pool) son las típicas secuencias de rápidos o correderas (riffle) y sectores profundos (pools) que se observan en los ríos de gravas debido a la alternancia de barras laterales (ver figura 5). La granulometría más gruesa se encuentra en las correderas. La capacidad de transporte de sedimentos depende del grado de corazamiento. Una vez superado el umbral de movilidad se obtiene una buena correlación entre caudales líquidos y sólidos de fondo. Las pendientes características se encuentran por debajo de 2 a 3%.

Las unidades de dunas-rizos (dunne-ripples) se caracterizan por una estrecha relación entre velocidad del escurrimiento y las formas de fondo, dado que los sedimentos están en el rango de las arenas. En el sentido creciente de velocidad se observa la siguiente sucesión: fondo plano, rizos, dunas, nuevamente fondo plano, ondas estacionarias y antidunas. Las pendientes son bajas, menores al 0,5%. La capacidad de transporte es generalmente inferior a la alimentación sólida desde aguas arriba.

La tipología “entrelazado” (braided) es en esencia la D para Rosgen (ver figura 6). Vale agregar que se observa una baja resistencia de las márgenes, y una limitada capacidad de transporte. La organización en múltiples canales puede representar una respuesta del sistema para optimizar el transporte de sedimentos (D’Agostino, 2003).

Los cursos coluviales (colluvials) se caracterizan por tener un álveo de dimensiones reducidas incidido en depósitos coluviales. Las pendientes pueden ser muy elevadas, de 15 a 20%. Los procesos fluviales de transporte no son dominantes siendo su capacidad limitada. Están

estrechamente vinculados con los procesos de remoción en masa de las laderas adenañas (creep, pequeños deslizamientos en márgenes y laderas, caída de árboles, coladas de detritos, etc)

Finalmente, los cursos en roca (bed rock) se presentan como canales confinados por paredes de roca y con escaso material aluvional en el lecho. Desde le punto de vista altimétrico, generalmente están asociados con umbrales morfológicos que controlan la pendiente de los tramos de aguas arriba (ver figura 3). La falta de sedimentos en el lecho indica una elevada capacidad de transporte, mientras que el aporte es variable según su ubicación en la cuenca.

## DESCRIPCIÓN DEL TORRENTE

El tramo del colector principal, objeto del presente estudio, se desarrolla a lo largo de 14,4km, comprendido entre la confluencia de los afluentes provenientes de los glaciares Mandrone y Lobbia, hasta la toma del aprovechamiento hidroeléctrico del ENEL (ver figura 2).

El torrente Sarca di Val Genova es un ejemplo de curso aluvional de montaña de grandes dimensiones. En éste, tramos en roca o de rápidas con elevada capacidad de transporte (pendiente elevada) se alternan con planicies ampliamente desarrolladas en las cuales prevalece la acumulación del material proveniente desde aguas arriba (ver figura 9). Los valles se presentan amplios, morfología debida a la modelación ejercida por lo glaciares del cuaternario.

El perfil longitudinal del torrente Sarca se caracteriza por una sucesión de tramos planos y otros de alta pendiente y baja longitud. Han sido individualizados un total de once tramos: 6 de baja pendiente, 2 cascadas y 3 gargantas en roca de fuerte pendiente. La pendiente media del torrente es 8,1%, con un valor mínimo de 0,7% y uno máximo del 137%.

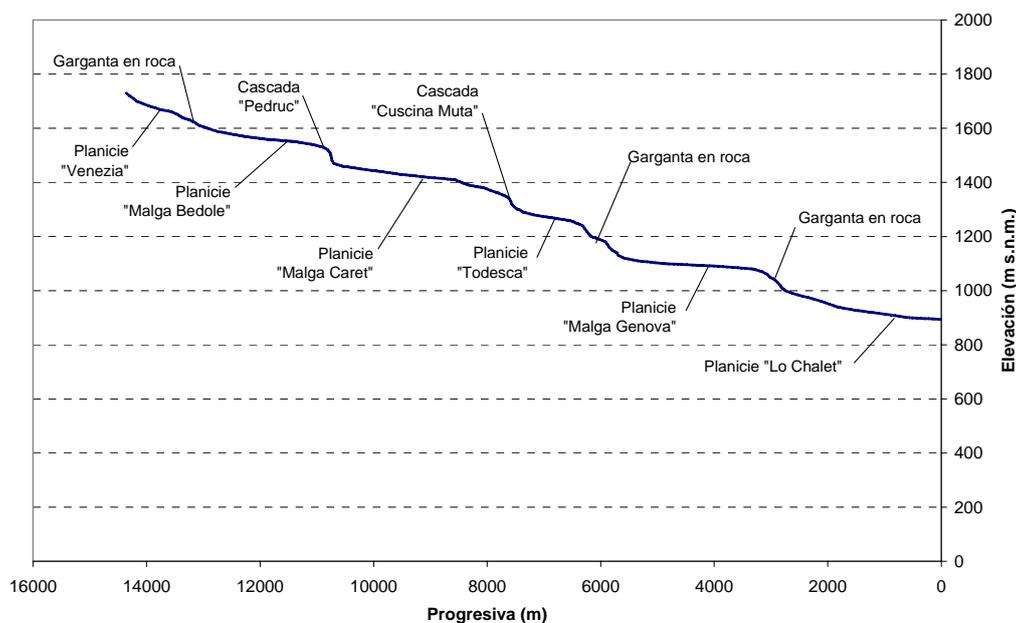


Figura 8. Perfil longitudinal del fondo del torrente Sarca di Val Genova

El grado de confinamiento posee un rol importante en la definición de la morfología del

torrente. En las zonas de llanuras, con amplias planicies aluvionales desarrolladas, el torrente tiene toda la libertad para adaptar su forma transversal y perfil altimétrico en función del caudal y aporte de sedimentos. En cambio, a medida que las laderas se acercan, la interacción con el curso es más relevante, no sólo desde el punto de vista del control lateral sino también en el aporte lateral de material bajo forma de desprendimiento, deslizamientos y coladas detríticas.



**Figura 9.** Planicie aluvional “Malga Bedole” bien desarrollada con baja pendiente (a) y tramo en roca de elevada pendiente (Cascada “Pedruc”) (b) a lo largo del curso del Torrente Sarca di Val Genova.

## IDENTIFICACIÓN DE TIPOLOGÍAS MORFOLÓGICAS

En la primera caracterización del torrente Sarca fueron identificados once tramos principales, definidos exclusivamente a partir de la morfología del valle. En resumen, todos los tramos pertenecen a dos grupos, aquellos confinados e incididos en los macizos rocosos formando cascadas y gargantas; y aquellos que se desarrollaban en las planicies. Estos tramos principales fueron subdivididos ulteriormente considerando otros criterios morfológicos: formas de fondo, grado de confinamiento, forma del canal y pendiente.

A fin de identificar estos tramos se realizaron varios relevamientos observando en el lugar las características del curso. El uso de las cartas topográficas, ortofotografía aérea y documentos históricos disponibles en el “Servizio Bacini Montani” (Provincia de Trento) ha permitido una mejor caracterización de los tramos. A cada tramo se le asignó una tipología morfológica general en virtud de la necesidad de alcanzar un nivel preliminar de clasificación. Es decir que se seleccionó la tipología principal (Rosgen, 1994) según el carácter dominante. Sin embargo dentro de cada tramo fueron identificados, posteriormente, sub-tramos a partir de unidades morfológicas específicas. Por ejemplo, el tramo 3-3 se clasifica como C, curso meandriforme con bajo grado de confinamiento, en el se encuentra una sucesión de tres unidades definidas por las formas de fondo: rápidos-remansos (riffle-pool), lecho plano (plane bed) y rápidos-remansos (riffle-pool).

Los once tramos principales fueron divididos en un total de 29 tramos cada uno con una tipología morfológica propia. Un resumen de la clasificación se expone en la tabla 3. Además de la clasificación morfológica se incluye una descripción del grado de confinamiento y la pendiente media del tramo, ésta ultima calculada a partir de la carta topográfica. Como se

desprende de la tabla, todos los tramos en planicies, indistintamente de la ubicación en la cuenca (progresiva), presentan las mismas tipologías morfológicas: C, D, B y F.

**Tabla 3.** Identificación de los tramos principales y de las tipologías morfológicas generales. Referencias: L.P. Lecho plano; R.R. resalto-remanso; (\*) Sistema de clasificación de Rosgen (1994); (\*\*) Sistema de clasificación de Montgomery y Buffington, (1993).

Nro	TRAMOS PRINCIPALES Descripción	TOPOLOGIAS MORFOLOGICAS GENERALES				PARAMETROS GEOMETRICOS		
		Nro	Clasificación		Grado de Confinamiento	Pendiente (m/m)	Longitud (m)	Desnivel (m)
			Rosgen(*)	Montgomery(**)				
1	Planicie "Lo Chalet"	1	C	R.R.	Planicie desarrollada - valle de ancho moderado	0.013	717	10
1	Planicie "Lo Chalet"	2	B	Rápida	Valle de ancho moderado	0.027	359	10
1	Planicie "Lo Chalet"	3	D	Entrelazado	Planicie desarrollada - valle de ancho moderado	0.028	452	13
1	Planicie "Lo Chalet"	4	F	Rápida	Valle de ancho moderado a reducido	0.065	1279	84
2	Garganta "Ponte Seniciaga"	1	Aa+	Lecho de roca	Incisión en roca	0.139	487	68
3	Planicie "Malga Genova"	1	B	L.P.-R.R.	Valle de ancho moderado	0.015	626	10
3	Planicie "Malga Genova"	2	F	Rápida	Incisión en depósitos aluviales	0.011	262	3
3	Planicie "Malga Genova"	3	C	L.P. - R.R.	Planicie desarrollada-ancho de moderado a amplio	0.010	555	6
3	Planicie "Malga Genova"	4	D	Entrelazado	Planicie desarrollada-ancho de moderado a amplio	0.013	306	4
3	Planicie "Malga Genova"	5	C	R.R.+barras	Planicie desarrollada - valle de ancho moderado	0.037	594	22
4	Garganta "Ponte Maria"	1	Aa+	Lecho de roca	Incisión en roca	0.159	770	123
5	Planicie "Todesca"	1	F - B	Rápida	Incisión en depósitos aluviales	0.051	367	19
5	Planicie "Todesca"	2	B	Lecho plano	Planicie y valle estrechos	0.033	239	8
5	Planicie "Todesca"	3	F	Rápida	Incisión en dep. aluviales-valle estrecho	0.043	319	14
6	Garganta - Cascada "Cascina Muta"	1	Aa+	Lecho de roca	Incisión en roca	0.180	376	68
7	Planicie "Malga Caret"	1	F - Aa+	Rápida	Incisión en depósitos aluviales	0.067	783	53
7	Planicie "Malga Caret"	2	C	L.P.-R.R.	Planicie desarrollada - valle amplio	0.021	978	21
7	Planicie "Malga Caret"	3	B	Rápida	Incisión en aluvión, confinamiento por laderas y conoides	0.026	453	12
7	Planicie "Malga Caret"	4	D	Entrelazado	Confinamiento por laderas y conoides	0.028	569	16
7	Planicie "Malga Caret"	5	B	Rápida	Confinamiento por laderas y morenas	0.084	225	19
8	Garganta - Cascada "Pedruc"	1	Aa+	Lecho de roca	Incisión en roca	0.297	178	53
9	Planicie "Malga Bedole"	1	F	Rápida	Incisión en aluvión/morena-valle estrecho	0.045	307	14
9	Planicie "Malga Bedole"	2	D	Entrelazado	Planicie desarrollada - valle amplio	0.025	857	22
9	Planicie "Malga Bedole"	3	C	R.R.+barras	Planicie desarrollada - valle amplio	0.038	597	23
9	Planicie "Malga Bedole"	4	D	Entrelazado	Confinamiento por laderas y depósitos morénicos	0.067	283	19
10	Garganta "Ponte delle Cambiali"	1	Aa+	Lecho de roca	Incisión en roca	0.122	179	22
11	Planicie "Venezia"	1	B	Rápida	Valle de ancho moderado a estrecho	0.092	228	21
11	Planicie "Venezia"	2	D	Entrelazado	Planicie desarrollada - valle amplio	0.063	680	43
11	Planicie "Venezia"	3	Aa+	Rápida	Confinamiento depósitos aluviales y morénicos	0.131	145	19

Como primer punto de análisis se confrontaron los sistemas de clasificación con la finalidad de visualizar la relación entre las formas adoptadas por los depósitos en el fondo con las características geométricas generales del curso (pendiente y ancho) y el grado de confinamiento en el valle. En la tabla 4 se exponen los resultados.

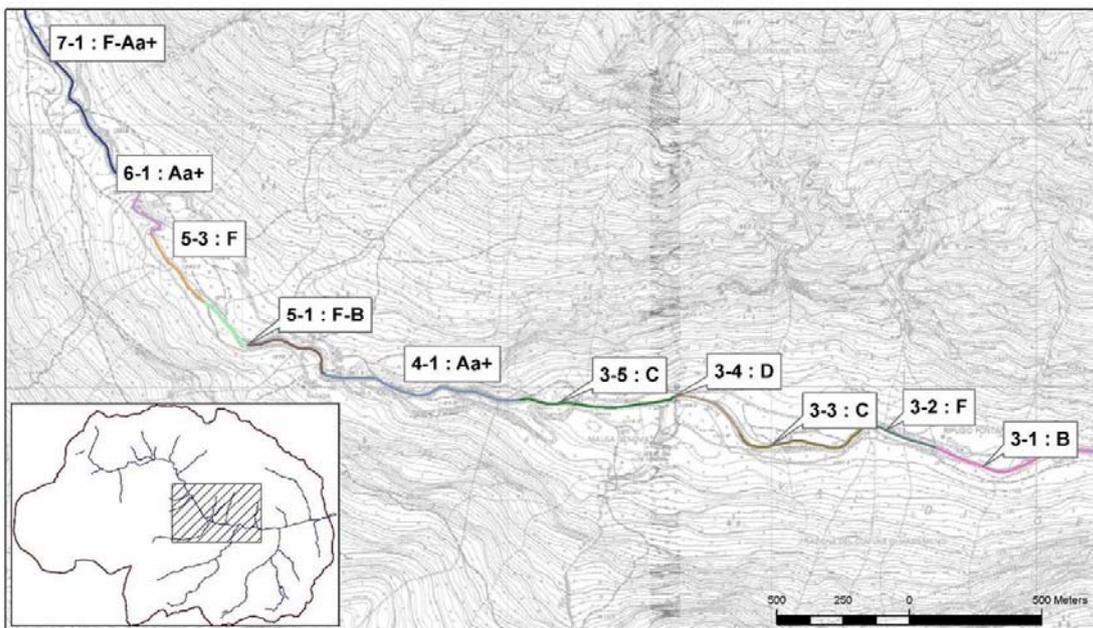
**Tabla 4.** Comparación entre los sistemas de clasificación para el caso particular del torrente Sarca di Val Genova. Los valores indican el porcentaje de unidades morfológicas encontradas y agrupadas por tipología general.

Rosgen	Montgomery – Buffington					
	Entrelazado	Rápidos-Remansos	Lecho Plano – Rápidos-Remansos	Lecho Plano	Rápida	Lecho de roca
Aa+					43%	57%
B			14%	14%	71%	
C		60%	40%			
D	100%					
F					100%	

Los tramos de elevado grado de confinamiento y pendiente, como los Aa+, se presentan mayoritariamente a lo largo de gargantas con lechos en roca (57%) y sólo en menor proporción bajo forma de rápidas (43%). También con elevado confinamiento, los tramos F, se presentan como incisiones en materiales aluviales y morénicos con formas de fondo tipo rápida y secuencias de salto-resalto (step-pool). Igualmente las rápidas ocupan un porcentaje elevado (71%) en los tramos con moderado grado de confinamiento (B). Esta tipología presenta tramos con lecho plano y hasta secuencia de rápidos-remansos (riffle-pool). Cada

forma de fondo esta asociada a pendientes diferentes. En la tabla 4 se observa cómo las rápidas presentan pendientes elevadas entre 8 y 9%, el tramo con lecho plano 3% y el de riffle-pool tiene un mínimo de 1,5%. Prosiguiendo, los tramos meandriformes con bajo grado de confinamiento y planicies de inundación bien desarrolladas se caracterizan por lechos con secuencias de rápidos-remansos (riffle-pool) (60%) y unidades intermedias tipo lecho plano (40%). Finalmente, todos los tramos clasificados como D por su reducido grado de confinamiento y elevada relación ancho/profundidad poseen una tendencia a la formación de múltiples canales.

Desde el punto de vista de los procesos se evidencia que, en general, los sectores donde el curso posee un bajo grado de confinamiento, como son los tramos con tipología C y D, las formas de fondo indican que la capacidad de transporte es menor que el aporte de sedimentos desde aguas arriba. Mientras que donde el confinamiento es de moderado a elevado, las pendientes de fondo son más pronunciadas como así también la capacidad de transporte, por lo que las formas de fondo observadas corresponden a rápidas y salto-resaltos (step-pools).



**Figura 10.** Georeferenciamiento de los tramos principales y tipologías morfológicas principales. El primer número indica el tramo principal, el segundo hace referencia al tramo interno con la designación de la tipología según Rosgen (letra final).

## PROCESOS FLUVIALES: ANÁLISIS DEL EVENTO ALUVIONAL DE 1987

El evento que se produjo en el verano de 1987 tuvo una magnitud sin precedentes que afectó no sólo todo el valle del torrente Sarca di Val Genova sino también la región alpina en general. La pronta respuesta del Servizio Bacini Montani también es de destacar conservándose hasta la actualidad una profusa documentación del evento. A través de los informes elaborados en dicha oportunidad (Coali, 1990), del georeferenciamiento actual de los desastres sobre base SIG y demás documentación fotográfica fue posible reconstruir el evento desde los aspectos geomorfológicos.

En primer lugar se llevó a cabo una verificación y confrontación de toda la información

disponible mencionada anteriormente y luego se procedió a la clasificación de desastres según el proceso dominante. Las categorías elegidas fueron las siguientes:

- ❖ **Erosión general de márgenes.** Comprende aquellos casos donde la erosión se produjo a lo largo del curso con notable extensión, tanto en tramos rectilíneos como en curvas.
- ❖ **Erosión local de márgenes.** Se desarrollaron en forma puntual (localizada) generalmente sobre la margen externa de curvas.
- ❖ **Depósito de tipo fluvial.** Sedimentación del material transportado por la corriente sobre todo el álveo dando origen a fenómenos de elevación del lecho.
- ❖ **Desbordes.** Inundación de la planicie aluvional a los costados del torrente.
- ❖ **Interferencia de los afluentes.** Obstrucción del torrente Sarca debido al aporte de material desde los afluentes (sea bajo forma de coladas detríticas o intenso transporte sólido), provocando el desvío de la corriente hacia la margen opuesta y la consecuente erosión.

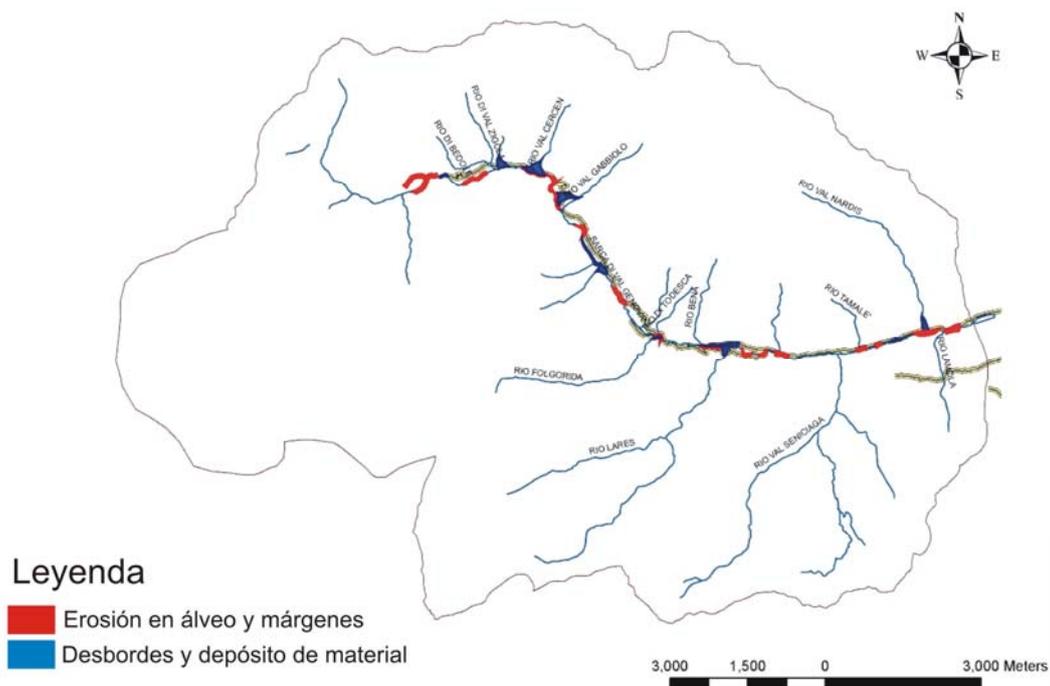
**Tabla 5.** Clasificación de los desastres y ubicación a lo largo del curso del torrente Sarca según el tramo afectado. También se indican las tipologías generales asociadas. Referencias: L.P. Lecho plano; R.R. resalto-remanso; (\*) Sistema de clasificación de Rosgen (1994); (\*\*) Sistema de clasificación de Montgomery y Buffington, (1993).

ID UNIDAD	Clasificación		Erosión de márgenes gral.	Erosión de márgenes en curvas	Depósito de tipo fluvial	Desbordes	Interferencia desde los afluentes
	Rosgen (*)	Montgomery(**)					
1-1	C	R.R.					
1-2	B	Rápida					
1-3	D	Entrelazado					
1-4	F	Rápida					
1-4	B	Rápida					
2-1	Aa+	Lecho en roca					
3-1	B	L.P.-R.R.					
3-2	F	Rápida					
3-3	C	L.P.-R.R.					
3-4	D	Entrelazado					
3-5	C	R.R.+barras					
4-1	Aa+	Lecho en roca					
5-1	F	Rápida					
5-2	B	Lecho plano					
5-3	F	Rápida					
6-1	Aa+	Lecho en roca					
7-1	Aa+	Rápida					
7-2	C	L.P.-R.R.					
7-3	B	Rápida					
7-4	D	Entrelazado					
7-5	B	Rápida					
8-1	Aa+	Lecho en roca					
9-1	F	Rápida					
9-2	D	Entrelazado					
9-3	C	R.R.+barras					
9-4	D	Entrelazado					
10-1	Aa+	Lecho en roca					
11-1	B	Rápida					
11-2	D	Entrelazado					
11-3	Aa+	Rápida					

De esta forma ha sido posible vincular: ubicación y tipo de desastre en el curso con la tipología morfológica correspondiente según se expone en la tabla 5. Posteriormente, considerando cada tipología morfológica (Aa+, B, D, F) se calculó la frecuencia de ocurrencia de cada desastre, cuyo resultado se expone en la tabla 6. También se calculó la frecuencia total de desastres por tipología (ver última columna, tabla 6).

**Tabla 6.** Agrupamiento de los desastres según las tipologías morfológicas. Referencias: (\*) Sistema de clasificación de Rosgen (1994); (\*\*) Sistema de clasificación de Montgomery y Buffington, (1993).

Tipología Morfológica		Erosión de márgenes gral.	Erosión de márgenes en curvas	Depósito de tipo fluvial	Desbordes	Interferencia desde los afluentes	Totales en %
Rosgen (*)	Montgomery (**)						
Aa+	Lecho en roca	1	2				9%
B	Rápida	1	2	1	1	1	17%
C	Rápido-remansos	3	3	3	3	1	37%
D	Entrelazado	1		3	2	3	26%
F	Rápida/satos-resaltos	2				2	11%



**Figura 11.** Mapa con la ubicación de los desastres producidos por el aluvión del año 1987.

Los resultados deben leerse teniendo en cuenta la naturaleza de la perturbación al sistema fluvial. Se trata de una crecida con caudales muy superiores a los ordinarios y un ingente aporte de material sólido desde los afluentes. De esta forma, los desastres observados son una expresión del sistema para adaptarse a esta nueva situación.

Los tramos con fuerte pendiente (Aa+) donde el escurrimiento produjo profundas incisiones en materiales aluvionales, han sido objeto de procesos erosivos. Se trata de tramos con rápidas con erosión en las márgenes externas de curvas. Otros tipo de tramos incididos (F), de menor pendiente y más anchos, evidencian también procesos erosivos de tipo general. Ambos se caracterizan por lechos muy rugosos y por lo tanto, más resistentes que las márgenes. Por lo que el curso ha buscado adaptarse al nuevo caudal aumentando su sección a través del ensanchamiento. La tipología “rápidas” se caracterizan por una elevada capacidad de transporte que es superior en general al aporte sólido desde aguas arriba. Esto se refleja en la

tabla 5 donde no se encuentran fenómenos de depósito en los tramos F y Aa+, con excepción de un sólo punto (tramo 1-4) en donde el tramo pasa de una tipología F a un B con un ensanchamiento del valle. Esto es acompañado del desborde y depósito de material.

En los tramo con tipología B, ya con un grado menor de confinamiento, se presentan casi todos los procesos. Sin embargo debe aclararse que la ocurrencia de estos procesos es en forma aislada: sólo uno o máximo dos desastres en un mismo tramo. Un tramo presenta desborde y depósito que corresponde al mencionado anteriormente. Los restantes están afectados por procesos erosivos tanto generales como localizados.

En cambio los tramos con tipología C presentan numerosos y distintos desastres dentro de un mismo tramo. De hecho esta tipología agrupa casi el 40% de los desastres registrados indicando su carácter altamente dinámico. Los fenómenos de desborde e inundación de las planicies alledañas se deben al bajo grado de confinamiento vertical del curso, que a su vez se vincula con la baja capacidad de transporte en relación con el aporte de sedimentos recibido desde aguas arriba. La erosión localizada es favorecida por la sinuosidad del curso como así también por el bajo grado de confinamiento lateral. Finalmente el fenómeno de depósito está relacionado con los valores elevados de la relación ancho/profundidad (baja tensión de corte y velocidad media del escurrimiento).

Los tramos con tipología D siguen en grado de importancia al comprender el 25% de los desastres registrados, pero concentrados en tres categorías. Dado el bajo grado de confinamiento y el elevado ancho del curso se favorecen fenómenos de desborde hacia las planicies alledañas, desaceleración de la corriente con el consecuente depósito de material. Otro factor de relevancia ha sido el aporte de material proveniente de los afluentes laterales. Todos los conos de deyección han descargado ingentes cantidades de material en el torrente Sarca obstruyendo su cauce, produciendo un remanso en la corriente hacia aguas arriba y favoreciendo el depósito. Finalmente se recalca que los tramos con tipología C y D tienen una capacidad de transporte menor al aporte de sedimentos desde aguas arriba y provenientes de la erosión de sus propias márgenes.

## **CONCLUSIONES**

El presente estudio fue desarrollado siguiendo un enfoque metodológico integrador con la finalidad de introducir en el campo de la ingeniería aspectos que por su naturaleza pertenecen a otras disciplinas pero que resultan indispensable para abordar problemáticas vinculadas con los cursos de agua.

La clasificación de un curso natural es el primer paso para identificar los procesos dominantes para inferir su posible tendencia evolutiva debida a perturbaciones naturales o artificiales. Cada sistema disponible muestra aspectos distintos del sistema fluvial. El sistema propuesto por Montgomery y Buffington (1993) se basa en la identificación de las formas de fondo como indicadores de la relación entre capacidad de transporte y aporte de sedimentos. La metodología de Rosgen (1994) centra su atención en las características geométricas del curso y su relación con el valle que lo contiene. Sin embargo la clasificación no hace distinción entre cursos aluviales y coluviales, que pueden tener un mismo código aun a pesar de poseer procesos diversos. Es así que se propone el empleo integrado de ambos sistemas, ya que procura una descripción más completa del sistema fluvial.

Las características propias de la cuenca, su morfología, geología, clima y uso del suelo, son factores locales subyacentes que offician de variables independientes para la evolución del torrente y que, por lo tanto, deben atenderse y evaluarse para la correcta interpretación de las formas del curso y los procesos que en él se desarrollan. También debe considerarse en esta interpretación la historia reciente del curso (sucesión de eventos ordinarios o la ocurrencia de un evento extraordinario).

*Agradecimientos.* El presente trabajo forma parte de la tesis del Curso de Master realizado en la Universidad de Padova, financiado por la Provincia del Chubut. Deseo agradecer especialmente al personal del "Servizio Bacini Montani" por su amabilidad y disponibilidad para el desarrollo del estudio, como así también al personal del Parque Natural Adamello Brenta por su hospitalidad durante el periodo de relevamientos de campo, ambas instituciones pertenecientes a la Provincia Autónoma de Trento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Brice J.C.**, (1984) "Planform properties of meandering rivers". Elliot M, (ed) *River meandering*,. ASCE, New York, EE.UU, pp 1-15.

**Callegari E. y Brack P.** (2002) "Geological map of the tertiary Adamello Batholit (Northern Italy): Explanatory notes and legend", *Mem. Sci. Geol.*, Vol 54, pp 19 – 49.

**Coali R.**, (1990) - *Val di Genova, Eventi alluvionali anno 1987*. Provincia Autonoma di Trento, Servizio Azienda Speciale di Sistemazione Montana, Italia.

**D'Agostino V.** (2003) "Dinamica dei corsi d'acqua ed interventi di ricostruzione morfologica" Pagani L. (ed.), *Quaderni dell'Università degli Studi di Bergamo – Centro Studi sul Territorio: Corsi d'acqua e aree di sponda – Tecniche d'intervento sui corsi d'acqua e sulle aree spondali*, Bergamo University Press, Edizioni Sestante, Italia, pp 21-24.

**D'Agostino V.** (2005) "Morfologia e dinamica dei corsi d'acqua di montagna". *Atti del 41.mo corso di Cultura in Ecologia: Conoscere il sistema fiume in ambiente alpino*, San Vito di Cadore, Italia, pp 96-111.

**Lenzi M. A., D'Agostino V., Sonda D.**, (2000) *Ricostruzione morfologica e recupero ambientale dei torrenti*. Editorial Bios, Cosenza, Italia.

**Leopold L. B.** (1994). *A view of the river*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, EE.UU.

**Mollard J.D.**, (1973) "Airphoto interpretation of fluvial features". *Fluvial process and sedimentation*, Proc. 9 Conf. Hydr. Symp., Edmonton, EE.UU, pp. 341-380.

**Montgomery D. R. y Buffington J. M.** (1993) *Channel classification, prediction of channel response and assessment of channel condition*. Report TFW-SI-110-93-002. Washington, EE.UU.

**Montgomery D. R. y Buffington J. M.** (1997) “Channel-reach morphology in mountain drainage basins”, *Geol. Soc. of Am. Bull.*, Vol 109, No 5, pp 596 – 611.

**Rosgen D.** (1994) “A classification of natural rivers”, *Catena*, Vol 22, pp 169-199.

**Rosgen D.** (1996) *Applied river morphology*. Wildland hydrology, Pagosa Springs, Colorado, EE.UU.

**Shumm S.A.** (1981) “Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications” *Recent and ancient non-marine depositional environments: models for exploration*. Ethridge F. G., Flores R. M. (ed). Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Pub. Nro 31, pp 19-29.