

MORFOLOGÍA Y ESTABILIDAD DE LAS SECUENCIAS EN ESCALONES (STEP POOL) EN LOS TORRENTES ALPINOS DE ELEVADA PENDIENTE

Mario Aristide Lenzi¹

RESUMEN: Abrahams y otros (1995) han demostrado que la morfología de tramos de cauce en escalones se aproxima a una condición de maximización de la resistencia al flujo y de elevada estabilidad. Para verificar esta teoría ha sido realizado un levantamiento de campo en 5 torrentes con estructuras escalón-remanso, obteniéndose una muestra de 49 secuencias a las cuales corresponden más de 250 escalones. Los resultados muestran que la validez de la inecuación de máxima resistencia : $S < (H/L_s) < 2S$, es sólo parcial. La mencionada teoría se ajusta a los torrentes caracterizados por una alimentación de material sólido limitada y en donde no se ha producido -al menos en los últimos 15-20 años- una crecida excepcional. En los torrentes afectados recientemente por crecidas con $Tr > 30-50$ años la relación entre (H/L_s) y S puede ser menor de uno, alejándose de la condición de máxima resistencia. En una de las 5 cuencas estudiadas (Rio Cordon) funciona, desde el año 1986, una estación experimental para la medición continua de los caudales líquidos y sólidos. En este torrente ha sido analizada la analogía entre la longitud de onda de las antidunas y la distancia entre los escalones, y evaluada la transformación que han experimentado las secuencias después del pasaje de una crecida con $Tr > 30-50$ años. El mecanismo evolutivo predominante es el de la migración aguas abajo de las estructuras y la modificación de los escalones se produce por socavación y desestabilización de la base de apoyo.

INTRODUCCIÓN

Los tipos de morfología de mayor evidencia y reiteración de los cauces torrenciales pueden ser agrupados sintéticamente en las unidades escalón-remanso (D'Agostino, 1996 ; D'Agostino, Lenzi, 1997; Lenzi, 1998) y rápido-remanso. Estas se encuentran raramente en los torrentes con pendiente mayor del 3-5 % (Ros-gen, 1994 ; Montgomery y Buffington, 1997). Las secuencias en escalones (*Figura 1b*), frecuentes en los torrentes de montaña, cubren un campo de pendientes comprendido entre el 3-5% y el 35-40%. Pueden ser subdivididas en las siguientes tipologías :

- *Escalones de bloques.* Constituidos por un grupo de peñones o bloques dispuestos transversalmente al flujo, a lo largo de una línea recta o arqueada;
- *Escalones-rápidos.* Edificados por bloques recíprocamente embriciados formando una rampa natural corta con fuerte pendiente ; pueden incorporar durante el desarrollo longitudinal algunos escalones de bloques;
- *Escalones en roca.* Son característicos de los tramos de cauce condicionados por afloramientos de roca ; esta unidad está condicionada por la geología, antes que por las condiciones hidráulicas del flujo (Chin, 1989);

- *Escalones de troncos.* Son producidos por la abstrucción de detritos vegetales y troncos de árboles que se incorporan en el lecho conjuntamente con el material sólido, al punto de transformarse en parte integrante de la morfología del lecho.

Los escalones en roca y los formados por troncos de árboles se diferencian de los escalones-rápidos y de bloques por una marcada irregularidad en la interdistancia (longitud de onda, L_s , *Figura 1a*) según la cual se repiten a lo largo del perfil longitudinal del fondo del torrente. Tienen también una mayor probabilidad de desarrollarse en modo aislado, en vez de ordenarse en secuencias regulares y bien organizadas, como en cambio sucede en el caso de los escalones de bloques (Lenzi y D'Agostino, 1998).

Las secuencias de rápidas y remansos han sido estudiadas por diferentes autores en función de sus relaciones con la granulometría del lecho, el ancho y la profundidad media del flujo, el tipo y la modalidad de transporte sólido (Leopold y otros, 1964; Yang, 1971; Richards, 1976, 1978; Keller, Melhorn, 1978; Milne, 1982). En cambio, no tan claras resultan las diferenciaciones y clasificaciones propuestas para la morfología en escalones

¹ Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali, Università di Padova, Agripolis, 35020 Legnaro (PD), Italia e-mail: lenzi@agripolis.unipd.it

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol. 6 Num.2 (junio 1999), páginas 151-162, recibido el 7 de octubre de 1998 y aceptado para su publicación el 5 de mayo de 1999. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

y para otras formaciones similares en las cuales prevalece el desarrollo transversal de la unidad fisiográfica, en los cauces torrenciales de elevada pendiente ($> 3-5\%$) con transporte de materiales de gruesa granulometría. Una comparación de las denominaciones y clasificaciones propuestas ha sido efectuada por algunos investigadores (Grant, 1994; Rosport, Dittrich, 1995; Montgomery, Buffington, 1997) y sintetizada por D'Agostino, Lenzi (1997). Algunos autores (Judd, Peterson, 1969; Hayward, 1980; Heede, 1981; Whittaker, 1987; Chin, 1989; Grant y otros, 1990; Grant, 1994; Wohl, Grodek, 1994) observaron que la longitud media de los step (Ls) relativa a una secuencia, está ligada a la pendiente del lecho a través de una relación del tipo

$$L = K/(a S^b)$$

en la cual K representa una dimensión característica de la granulometría del lecho, mientras a y b son constantes dependientes de la cuenca considerada (D'Agostino, Lenzi, 1997).

Han sido formuladas diferentes teorías con la finalidad de explicar el origen, la dinámica formativa y la evolución y transformación de las estructuras en escalones (D'Agostino, Lenzi, 1997; Lenzi, D'Agostino, 1998). Estas se pueden agrupar sintéticamente en cinco tipos principales:

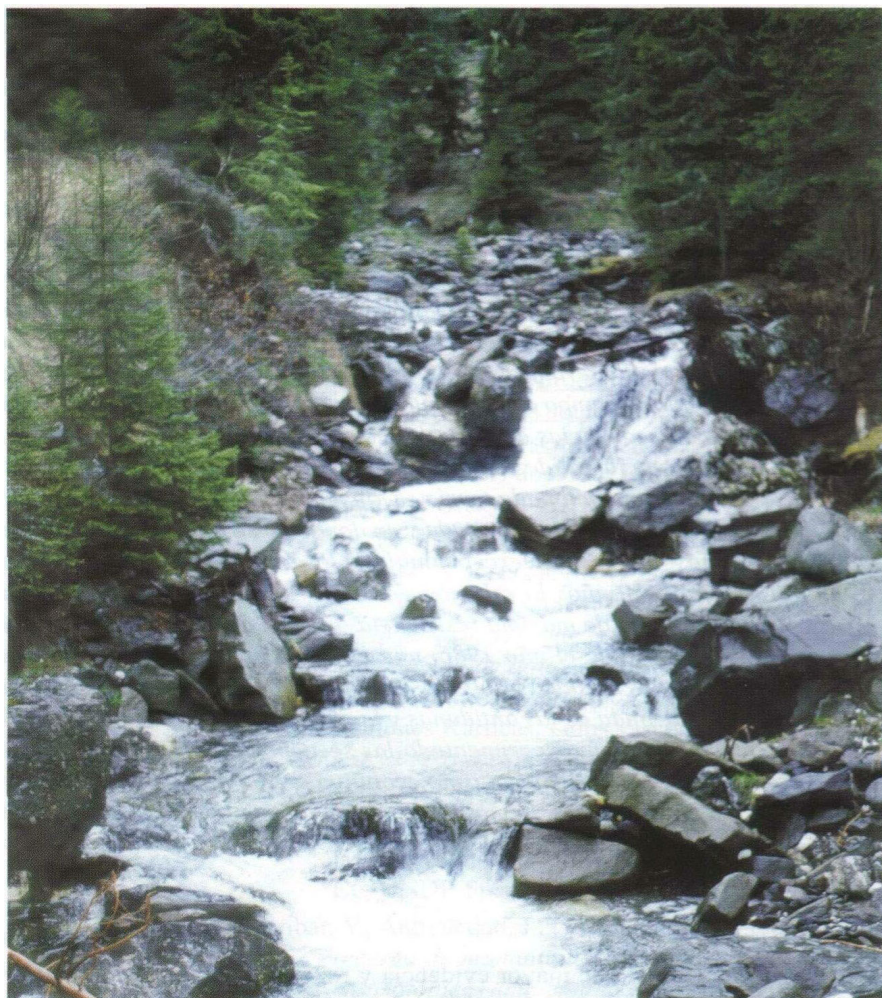


Figura 1b. Ejemplo de un tramo en escalones

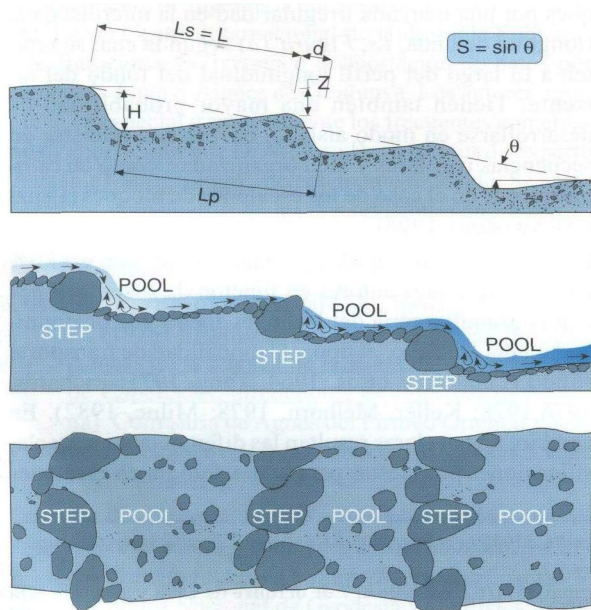


Figura 1a. Esquema de una secuencia en escalones

- Modelo de formación de los escalones según la teoría de las antidunas (Ashida y otros, 1984; Grant y Mitzuyama, 1991; Grant, 1994; Rosport, 1994; Rosport y Dittrich, 1995);
- Modelo de maximización de la resistencia al flujo (Davis y Sutherland, 1980, 1983; Whittaker y Jaeggi, 1982; Abrahams y otros, 1995);
- Combinación del modelo de las antidunas con el proceso de armoring del lecho (Whittaker, 1982; Whittaker y Jaeggi, 1982; Whittaker, 1987; Rosport, 1994);
- Teoría de la velocidad inversa (Keller, 1971; Keller, Melhorn, 1978);
- Relación de Yang (1971) en base al concepto de potencia unitaria.

Grant (1994), así como Whittaker (1982, 1987), planteó para la configuración escalón-remanso una situación de relativa estabilidad en condiciones de flujo normales. Al mismo tiempo consideró que los escalones de mayores dimensiones pueden ser destruidos y reconstruidos por crecidas con $Tr > 50$ años y por las corrientes de lodo, mientras que aquellos más pequeños pueden ser modificados por eventos relativamente frecuentes ($Tr = 5-10$ años). Otros autores (Wohl, Grodek, 1994)

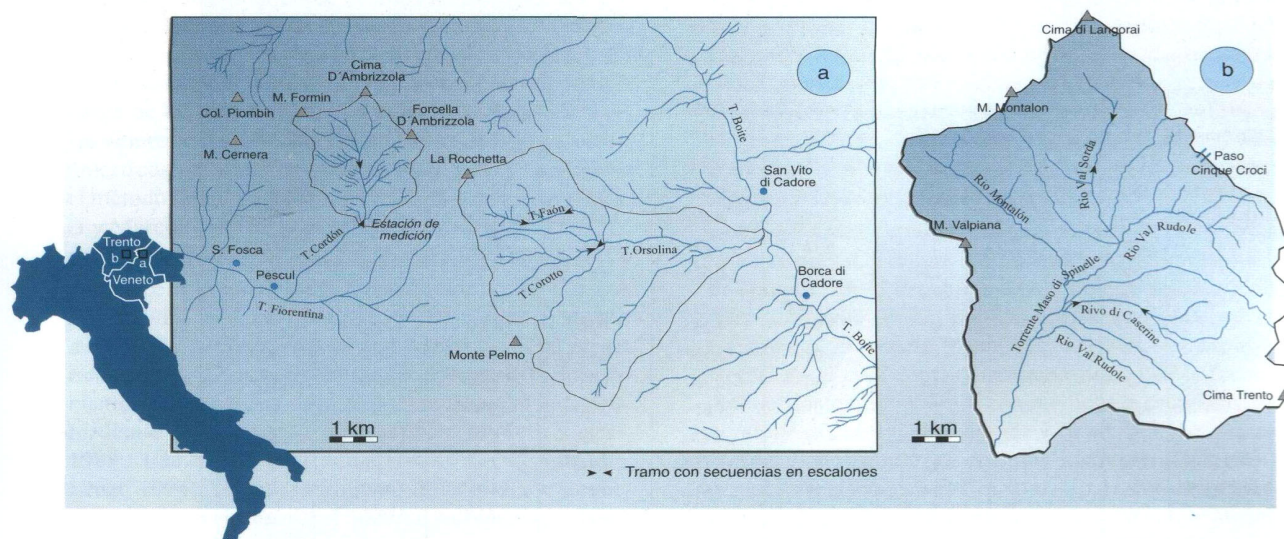


Figura 2. Localización geográfica del área de estudio : a) euenca de los torrentes Cordon y Orsolina (Región veneto) ; b) cuenca del torrente Maso di Spinelle (Provincia Autónoma de Trento).

han sostenido que los escalones no logran reordenarse durante una crecida, aunque ésta sea de carácter extraordinario; es por lo tanto más probable que sean influenciados y lentamente modificados por caudales caracterizados por una frecuencia anual o interanual.

La presente investigación tiene la finalidad, por un lado, de identificar las relaciones existentes entre las dimensiones geométricas y sedimentológicas de la morfología escalón-remanso en los 5 torrentes objeto de la investigación; y por el otro, de verificar la teoría de la maximización de la resistencia al flujo. Significativamente importante es, en el caso específico del torrente Cordon, la posibilidad, tanto de analizar la analogía existente entre la longitud de onda de las antidunas y la distancia entre los escalones, cuanto de verificar teorías resultantes de experimentos de laboratorio sobre la estabilidad, la dinámica y la transformación de las estructuras en escalones.

ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Los cinco torrentes objeto de la investigación, Río Cordon, Río Faon, Río Corotto, Rivo di Caserine y Río Val Sorda, pertenecen a dos cuencas de las Dolomitas Orientales (cuencas del Río Cordon y del torrente Orsolina, *Figura 2a*) y a una cuenca del Valle del Brenta (cuenca del Maso di Spinelle, *Figura 2b*). Estas cuencas, situadas en la zona alpina en el Noreste de Italia, se caracterizan, desde el punto de vista fluviomorfológico, por la presencia de secuencias en escalones alternadas a otras de rápidos y remansos y a tramos sin organización definida, con mayor congestión de sedimentos. El clima de las cuencas es marcadamente continental y se refleja en el régimen de los escurrimientos, caracterizado por caudales elevados en los meses de mayo y junio, durante los cuales se concentra el fenómeno de fusión nival, y por significativas crecidas en otoño y en los meses esti-

Características	Río Cordon	Río Faon	Río Corotto	Rivo di aserine	Río Val Sorda
Superficie (km ²)	5.0	4.5	3.7	8.5	8.8
Cota máxima (m s.n.m.)	2748	2449	2616	2541	2577
Cota mínima (m s.n.m.)	1763	1371	1367	1294	1456
Altitud media (m s.n.m.)	2200	1851	1868	1923	2023
Pendiente media de las laderas (%)	52	52	66	61	49
Longitud del cauce principal (km)	2.8	4.0	3.0	5.7	5.5
Pendiente media del cauce (%)	17	27	20	21	17
Precipitación media anual (mm)	1100	1050	1050	1100	1300
Altura media de los step: H' (m)	1.0	0.8	0.8	1.9	0.9
D ₅₀ superficial (mm)	95 (*170)	75	65	325	180
D ₉₀ superficial (mm)	330 (*460)	310	350	895	540

* Después de la crecida del 14 de septiembre de 1994

Tabla 1. Caracterización de las cuencas y de los torrentes estudiados

	Sección	n.	LT(m)	B(m)	Z(m)	H(m)	Lp(m)	Ls(m)	S
Rio Cordon antes de la crecida del 14-09-1994	SP1	8	40	6.60	1.06	1.28	5.51	5.66	0.22
	SP2	4	13	4.76	0.78	1.05	4.50	4.46	0.17
	SP3	10	59	6.19	0.77	1.00	6.62	6.53	0.12
	SP4	4	19	6.23	0.91	1.16	4.93	6.42	0.14
	SP5	7	25	4.96	0.51	0.85	4.21	4.22	0.12
	SP6	4	12	4.87	0.47	0.83	4.12	3.95	0.12
	SP7	4	13	6.12	0.61	0.66	6.54	6.48	0.09
Rio Cordon después de la crecida del 14-09-1994	SP8	6	26	5.92	0.61	0.85	5.05	5.23	0.12
	N1	7	41	7.99	1.29	1.28	6.65	6.80	0.22
	SP1	4	19	5.62	1.15	0.94	6.33	6.32	0.20
	N2	3	16	7.30	0.78	1.03	8.88	8.11	0.18
	SP2	3	11	5.01	1.05	0.94	5.54	5.60	0.20
	N4	3	12	4.69	0.47	0.49	6.76	6.23	0.15
	SP4	2	13	7.05	2.15	1.93	7.98	11.03	0.21
Rio Faon	N6	4	14	5.19	0.51	0.75	4.82	4.50	0.16
	SP7	1	8	8.19	0.35	0.81	10.79	7.56	0.05
	SP8	3	13	7.21	0.87	0.68	6.00	6.43	0.16
	OR1	4	24	11.03	0.61	0.83	5.71	5.70	0.11
	OR2	4	38	12.83	1.020	1.12	9.10	9.09	0.11
	OR3	3	15	4.65	0.80	0.82	3.37	3.50	0.23
	OR4	7	36	4.96	0.79	0.77	5.00	5.19	0.15
Rio Corotto	OR5	16	69	4.49	0.66	0.80	4.40	4.31	0.15
	OR6	6	26	4.03	0.49	0.71	4.12	3.96	0.12
	OR7	4	13	3.13	0.74	0.61	3.90	4.01	0.19
	OR8	3	11	3.40	0.59	0.82	4.26	4.36	0.14
	OR9	4	11	6.50	0.79	1.19	4.48	4.81	0.16
	OR10	3	16	9.30	0.39	0.74	5.08	5.15	0.08
	CO1	8	40	4.21	0.68	0.90	4.76	4.81	0.14
Rio di Casserine	CO2	5	30	4.52	0.60	0.74	5.86	5.69	0.11
	CO3	4	24	4.33	0.95	0.84	5.73	5.43	0.17
	CS1	9	66	5.96	0.52	1.13	5.87	7.22	0.08
	CS2	4	26	5.88	0.57	1.05	5.59	6.27	0.09
	CS3	6	40	8.32	1.07	1.67	5.79	6.71	0.17
	CS4	3	24	6.77	1.82	3.32	6.65	7.91	0.25
	CS5	7	55	7.53	2.16	2.96	7.43	7.99	0.29
Rio Val Sorda	CS6	4	24	5.98	0.73	1.26	4.15	5.90	0.10
	CS7	3	24	5.73	1.45	2.07	7.32	8.00	0.18
	CS8	4	29	5.45	1.45	2.15	6.34	7.31	0.21
	VS1	4	13	3.80	0.56	0.73	4.01	3.17	0.19
	VS2	9	26	3.42	0.33	0.70	2.93	2.70	0.13
	VS3	7	15	3.90	0.21	0.44	2.16	2.20	0.10
	VS4	5	20	3.36	0.58	0.94	3.78	3.89	0.15
Rio Val Sorda	VS5	6	30	4.08	1.02	1.37	3.85	4.92	0.19
	VS6	4	18	4.08	0.56	1.04	4.19	4.41	0.14
	VS7	6	17	3.48	0.41	0.82	2.59	2.72	0.14
	VS8	8	46	3.56	0.70	1.04	5.48	5.41	0.13
	VS9	6	22	3.62	0.54	0.99	3.53	3.54	0.16
	VS10	5	15	2.94	0.35	0.64	2.74	2.97	0.13
	VS11	5	22	3.48	0.32	0.59	2.51	4.35	0.08

Sección Código de identificación de la secuencia

B(m) Ancho del cauce en correspondencia con los escalones

Lp(m) Distancia media (longitud de onda) remanso-remanso

n. número de escalones de cada secuencia

Z desnivel medio entre dos escalones consecutivos

Ls(m) longitud de onda escalón-escalón. Ls = L

LT(m) longitud total de la secuencia

H desnivel medio fondo remanso escalón de aguas arriba

S pendiente media de la secuencia

Tabla 2. Valores medios de los parámetros geométricos de las secuencias en escalones

vales, en concomitancia de eventos meteorológicos asociados a lluvias intensas. Las principales características de las cuencas analizadas se resumen en la *Tabla 1*. En ésta han sido incluidos también los valores medios de la altura de los escalones (H') medidos en cada torrente y los valores del D50 y del D90 calculados a partir de los muestreos del material superficial del lecho aplicando el método de retícula (Wolman, 1954) modificado (Lenzi y Marchi, 1988).

El Río Cordon es un afluente del torrente Fiorentina y pertenece a la cuenca del torrente Cordevole (Región Veneto). La subcuenca analizada drena una superficie de 5 km² y presenta una altitud media de 2200 m. En este cauce los caudales líquidos y el transporte de sedimentos son medidos continuamente desde el año 1986 mediante un dispositivo automático (Fattorelli y otros, 1988 ; Lenzi y otros, 1990, 1996, 1997 ; D'Agostino, Lenzi, 1996). El funcionamiento de la estación de medición se basa en separar el material sólido grueso transportado como arrastre de fondo del sedimento fino en suspensión y del caudal líquido. La estructura experimental ha permitido la medición de la crecida extraordinaria del 14 de septiembre de 1994, caracterizada por una duración total de 12 horas, por un tiempo de retorno de 30-50 años y por un caudal pico de 10.4 m³ s⁻¹ (Lenzi, 1997). Los valores de la velocidad media del flujo, del número de Froude, de la tensión de tracción media y de la "stream power" unitaria que han sido evaluados en correspondencia con el caudal pico del hidrograma son, respectivamente, 3.37 m s⁻¹, 1.7, 500 N m⁻² y 1800 watt m⁻². La crecida ha transportado un volumen de 890 m³ de material grueso, manifestándose con una intensidad máxima de transporte sólido de fondo de 500 kg s⁻¹. A pesar de la modesta permanencia de los caudales en torno al caudal pico (5-10 minutos), ha sido movilizado, en términos de granulometría, la casi totalidad del material que constituye el lecho (D'Agostino, Lenzi, 1996 ; Lenzi, 1997) con diámetros intermedios de los bloques de mayor dimensión del orden de 50-60 cm.

En el Río Cordon, el primer levantamiento topográfico de las secuencias en escalones fue efectuado en 1993, mediante la utilización de una estación total (Total Station Positioning System). El sucesivo levantamiento , realizado en 1995, ha permitido constatar como algunas secuencias preexistentes han sido parcial o completamente modificadas (SP3, SP5, SP6, *Tabla 2*) ; mientras unas nuevas secuencias se formaron, (N1, N2, N4, N6, *Tabla 2*), en tramos caracterizados por la ausencia de un perfil escalonado bien definido, aguas arriba de algunos escalones aislados ya existentes (Lenzi y otros, 1997).

El torrente Orsolina (19 km²), afluente del torrente Boite, está localizado en proximidad de la cuenca del Río Cordon, en la Región Veneto. En el presente estudio han sido tomados en consideración las subcuencas del Río Faon y Corotto (*Tabla 1*). En 1996, en los mencionados torrentes, se levantaron 13 secuencias en escalones, utilizando, como instrumentos de medición, un clinómetro, un par de cintas métricas, un teodolito y un relevador de distancias a rayos laser. Estos dos torrentes fueron

también afectados el 14 de septiembre de 1994 por un evento similar a aquel que se verificó en la cuenca del Cordon. La distribución espacial de las precipitaciones registradas en los pluviógrafos situados en el área de influencia de la cuenca , como así también el análisis de las curvas intensidad-duración-frecuencia han evidenciado que el tiempo de recurrencia de la crecida es de alrededor de 25-30 años (Lenzi, D'Agostino, 1998).

Los dos últimos torrentes considerados, el rivo di Caserine y el río Val di Sorda, son afluentes del torrente Maso di Spinelle, en la Provincia Autónoma de Trento. Este último torrente forma, conjuntamente con el Maso di Calamento, el torrente Maso, afluente a su vez del Río Brenta en el cual confluye en proximidad de la localidad de Castelnuovo. Han sido medidas 8 secuencia en escalones en el rivo di Caserine y 11 en el río Val Sorda (*Tabla 2*) utilizando los mismos instrumentos ya empleados en el Faon y el Corotto. A partir de la evaluación de las precipitaciones que han afectado en los últimos treinta años a la cuenca del torrente Maso, es posible afirmar que después de la crecida catastrófica de noviembre de 1966, las restantes se han caracterizado por tiempos de recurrencia no superiores a 10-15 años.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La transformación de las secuencias en escalones en los torrentes Cordon, Faon y Corotto

Los levantamientos topográficos efectuados en el Río Cordon antes y después de la crecida del 14 de septiembre de 1994 han permitido delinear las principales modalidades de transformación de esta unidad morfológica (Lenzi, D'Agostino, 1998) , las cuales se describen a continuación:

- La secuencia completa puede trasladarse casi simétricamente aguas abajo acompañada de una modesta alteración de la longitud de onda media;
- Los escalones que constituyen la secuencia se modifican sensiblemente debido a la remoción de los bloques encastrados en las márgenes del cauce y/o a la erosión-socavación de la base;
- Algunos escalones, especialmente los de menor altura, pueden desaparecer migrando aguas abajo, incorporándose en el escalón sucesivo ; de esta manera aumentan la longitud de onda dando lugar a la formación de una secuencia rápido-escalón;
- Toda la secuencia o parte de ella puede transformarse o bien en tramos rápido-escalón o bien en tramos dominados por un perfil del fondo nivelado (lecho plano) . En el primer caso se produce un alargamiento consistente de la longitud de onda ; en el segundo se observa, si existe en el tramo de aguas arriba una elevada alimentación de material sólido, una "sepultura" o "ateramiento" de los escalones debido a la progresiva sedimentación de los remansos.

La elaboración de los parámetros geométricos que definen una unidad escalonada (*Figura 1*) ha permitido establecer, para el Río Cordon, las relaciones que a continuación se detallan :

- La longitud de onda remanso-remanso (L_p) coincide con la longitud de onda escalón-escalón (L_s), pues ha sido obtenida $L_s = 1.03 L_p$ ($r = 0.86$), evidenciando que la estructura es intrínsecamente simétrica. Tal relación se mantiene después de la crecida, ya que $L_s = 1.04 L_p$ ($r = 0.80$).
- El ancho medio de los escalones está vinculado con la longitud de onda a través de la relación $L_s = 0.94 B$, con $r = 0.84$. Después de la crecida ha sido obtenido: $L_s = 1.09 B$, con $r = 0.52$.
- La altura media de los escalones es directamente proporcional a la pendiente media del tramo: $H = 6.80 S$, con H en m, S en m/m y $r = 0.71$ antes de la crecida. Bastante similar es la relación obtenida después del pasaje de la crecida: $H = 5.56 S$, con $r = 0.63$.
- La longitud de onda crece al aumentar la relación H/S . Los datos de la *Tabla 2*, relativos al Río Cordon antes de la crecida, son interpretados por la expresión: $H/L_s = 1.30 S$, con $r = 0.58$, bastante cercana a la ecuación (I). Cuando el salto crece, permaneciendo inalterada la pendiente media del lecho, los escalones tienden a alejarse. Es evidente en este sentido la similitud existente entre los escalones y los diques de consolidación dispuestos en manera tal de formar un escalonamiento, utilizados en la estabilización de cauces torrenciales. Del análisis de los parámetros geométricos de la precedente expresión y de los datos de la *Tabla 2* se deduce que el tramo de cauce desde el fondo del remanso hasta la cabeza del sucesivo escalón aguas abajo se presenta constantemente en condiciones de pendiente negativa. Una situación opuesta ocurre, en cambio, después de la crecida, obteniéndose la relación: $H/L_s = 0.79 S$ ($r = 0.75$), la cual demuestra que los remansos, aterrados de sedimentos, han generado tramos horizontales o con pendiente positiva hacia aguas abajo.

El ancho medio del cauce se ha incrementado en término medio de 1 metro. Este dato confirma el fenómeno de la erosión de las márgenes, el cual, además de aportar sedimento al cauce, ha permitido en algunos tramos una parcial adaptación lateral del canal, favoreciendo la formación de barras laterales. El valor medio de la altura de los escalones se ha mantenido próximo a 1 metro (tanto antes como después de la crecida), confirmando el hecho que este parámetro está más relacionado con las dimensiones de la granulometría del material grueso presente en el lecho que con las condiciones hidráulicas del flujo.

La longitud de onda media de las secuencias, calculada ya sea en relación a los escalones como a los remansos (*Tabla 2*), ha experimentado las variaciones mayores, manifestando un incremento medio cercano a 2 metros. A la modificación de este parámetro se le puede atribuir la causa principal que ha determinado el alejamiento de la ecuación (I) de la condición de maximización de la resistencia al flujo, al no variar en forma sensible los restantes valores medios de H y de S .

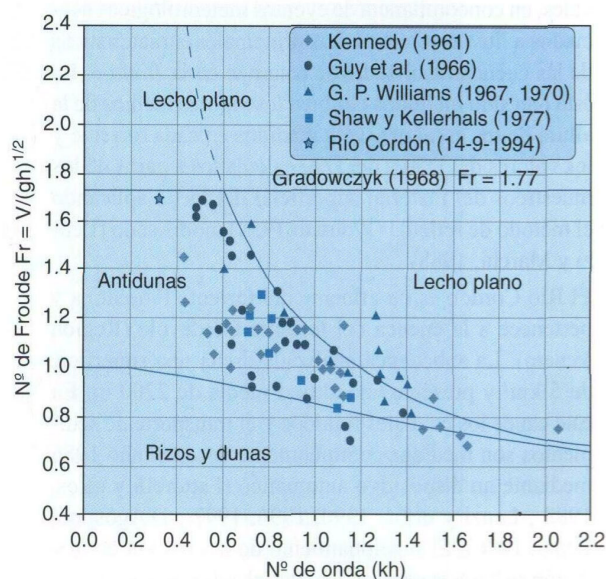


Figura 3. Configuraciones de fondo según Allen (1982)

La expresión utilizada para el cálculo de la longitud de onda de las antidunas, definida por la ecuación $L_b = 2\pi Vr^2/g$ (donde Vr es la velocidad media del flujo y g la aceleración de la gravedad), da lugar, aplicándola a la velocidad correspondiente al caudal pico ($V = 3.37 \text{ m s}^{-1}$), a una longitud de onda de 7.3 metros (D'Agostino, Lenzi, 1997). Tal valor interpreta correctamente los datos obtenidos en campo representativos de la distancia media remanso-remanso de las secuencias neoformadas N1, N2, N4 e N6 ($L_p = 6.8 \text{ m}$), de aquellas preexistentes y modificadas después de la crecida ($L_p = 7.3 \text{ m}$), e incluso de ambas tipologías ($L_p = 7.08 \text{ m}$). Por otro lado, los datos obtenidos en el campo del Río Cordon relativos a la crecida del 1994, llevados en el diagrama de Allen (1982) —el cual relaciona el número de Froude (Fr) de la corriente con el número de onda ($kh = 2\pi h/L_s$)— muestran (*Figura 3*) el evento formativo de los nuevos escalones en el campo de las antidunas ($Fr = 1.7$, $Kh = 0.36$), aunque en una posición cercana a la de un perfil del fondo plano (Lenzi, D'Agostino, 1998). A pesar de estas coincidencias objetivas existen elementos de incertidumbre sobre el modelo de formación de los escalones basado en la teoría de las antidunas. Esta requiere, en efecto, que el sedimento grueso que forma la estructura de los escalones permanezca completamente sumergido por los caudales que condicionan la formación de la misma. Esta condición raramente ha sido alcanzada en los tramos analizados del Río Cordon y sólo en concomitancia de algunas secciones transversales marcadamente estrechas. Por lo tanto, los nuevos tramos en escalones formados en el cauce pueden fundamentarse con el modelo de las antidunas sólo en forma parcial.

Los parámetros hidráulicos relativos al valor máximo de caudal de la crecida del 1994 pueden ser llevados al diagrama de Grant (1994) concerniente el dominio de formación de los escalones. En este gráfico, que contie-

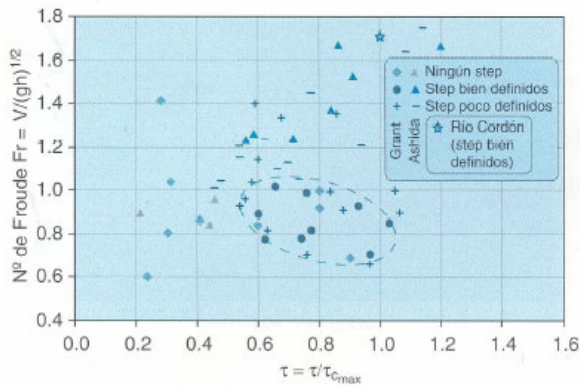


Figura 4. Dominio de deformación de los escalones (Grant, 1994) ne también los datos de laboratorio de Ashida y otros (1984), la abscisa representa el parámetro adimensional τ^* (dado por la relación entre el esfuerzo de tracción medio (τ) y el esfuerzo de tracción máximo (τ_{Cmax}) ne-

cesario para iniciar el movimiento del material del lecho del cauce de mayor dimensión granulométrica) y la ordenada el número de Froude (Fr) del flujo. Es posible observar en la *Figura 4* que el campo del dominio de los escalones obtenido por Grant (1994) aparece más restringido respecto a aquel definido por Ashida y otros (1984) y tiende a excluir del dominio de formación de los escalones bien definidos el régimen del flujo rápido o supercrítico ($Fr > 1$) y los valores de $\tau^* > 1$. Ashida y otros (1984), a diferencia de Grant (1994), clasifican los escalones bien definidos en el campo $Fr < 1.7$ y $\tau^* < 1.2$. No lejos del límite superior definido por Ashida y otros (1994) se localiza el punto obtenido en base a los datos de campo del Rio Cordon ($Fr = 1.7$, $\tau^* = 1.0$). Es posible hipotetizar, con buena aproximación, que el parámetro τ^* haya alcanzado valores muy cercanos y/o levemente superiores a la unidad, ya que en la plazoleta de depósito de la estación experimental han sido medidos, después del evento de crecida del 1994, solo algunos peñones con la misma dimensión del D95 del material superficial del lecho del cauce.

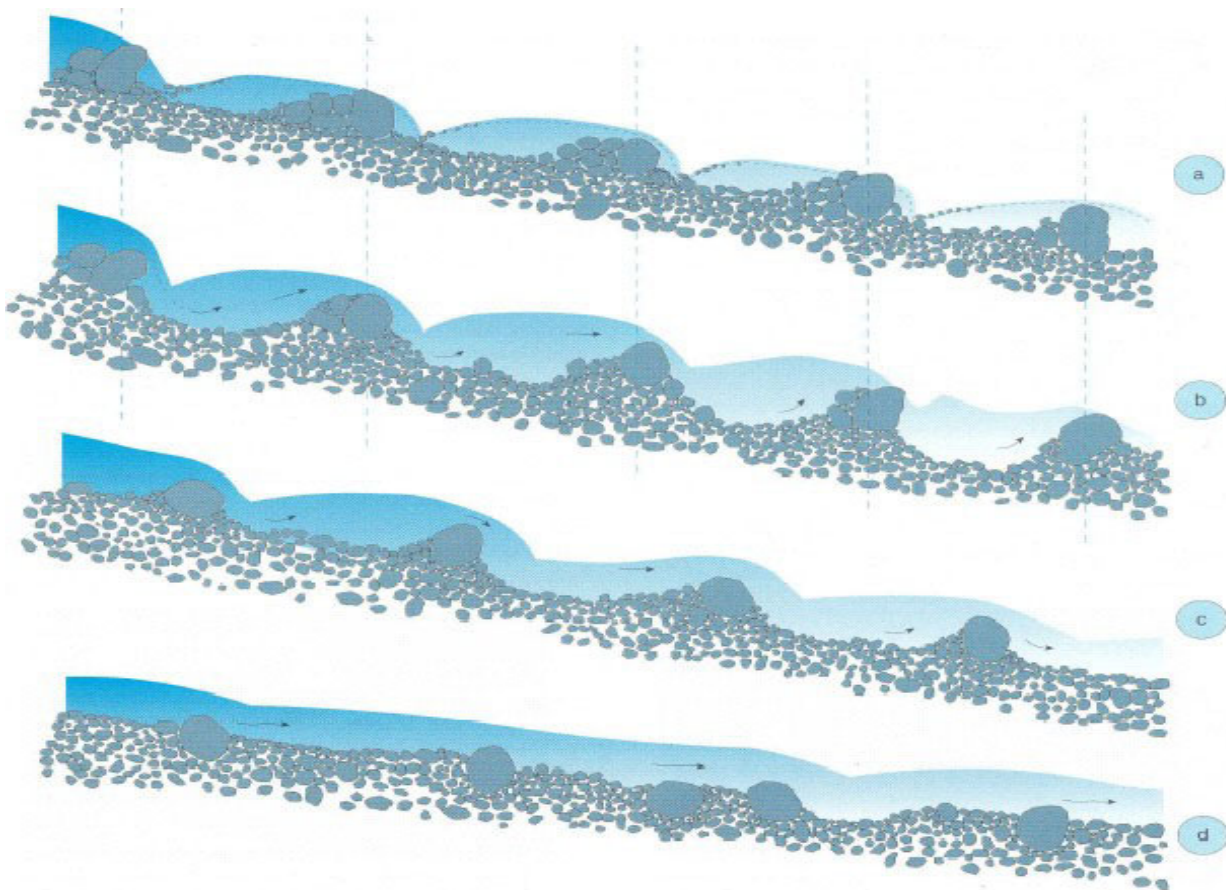


Figura 5. Evolución de una secuencia en escalones ; las Figuras a-b-c ilustran la migración aguas abajo, las Figuras a-b-d el pasaje de una secuencia en escalones hacia un tramo con fondo plano con eventuales escalones o rápidos aislados

La crecida del 1994 apoya, mediante con un dato experimental de campo, la posibilidad de formación de los escalones en un régimen supercrítico.

Las observaciones de campo realizadas en los torrentes Cordon, Faon y Corotto, después de la crecida del 1994, han evidenciado que el mecanismo de transformación predominante de los escalones se produce, como en el caso de los diques de consolidación, por efecto de la erosión de la base de apoyo (Figura 5a). Tal afirmación es sugerida por la profunda socavación presente en el pie de algunos escalones de grandes dimensiones, los cuales están sujetos a una condición de precario equilibrio. La acción erosiva prosigue, durante la fase de la crecida, desde aguas abajo provocando el colapso de la estructura. Después de la desestabilización, los grandes peñones o bloques van a ocupar el remanso subyacente. Teniendo en cuenta que el remanso se sedimenta y que, además, se reconstruye un nuevo alineamiento de bloques un poco más aguas abajo (Figura 5b), la estructura en escalones se define, una vez más, por efecto de la acción erosiva y gracias a la formación de nuevos remansos (configuración indicada en la Figura 5a pero trasladada aguas abajo) (Lenzi, D'Agostino 1998). Tal hipótesis encuentra justificación y se adapta mejor a los resultados obtenidos en las experimentos de laboratorio efectuadas por Rosport (1994) y Rosport, Dietrich (1995).

Morfología y estabilidad de las secuencias en escalones en los 5 torrentes

El análisis efectuado en el Rio Cordon ha evidenciado que la relación propuesta por Abrahams y otros (1995), ecuación (1), no se adapta si el torrente ha sido afectado recientemente por una crecida excepcional capaz de modificar la estabilidad y la regularidad geométrica de las secuencias en escalones preexistentes. Con la finalidad de evaluar en forma más detallada este fenómeno, ha sido analizado el comportamiento de la variable $c = (H/L_s)/S$ en los 5 torrentes objeto de investigación, subdividiendo la muestra, constituida por las 49 secuencias, a las cuales corresponden 253 escalones, en clases de amplitud de 0.1. Se obtuvo una distribución de probabilidades de la muestra caracterizada por un coeficiente

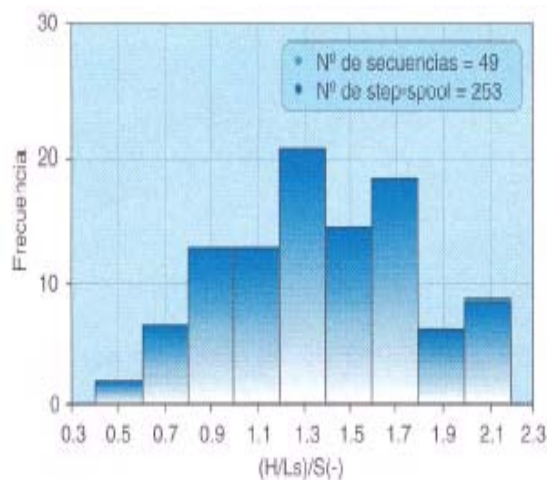


Figura 6. Distribución de frecuencia de la variable $c = (H/L_s)/S$

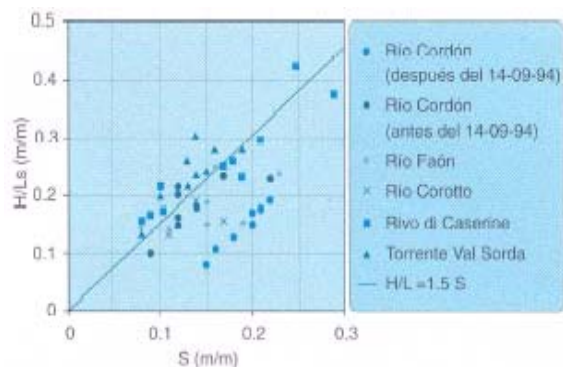


Figura 7. Relación entre H/L_s y la pendiente S en los tramos en escalones

de asimetría de 0.02 y por un coeficiente de curtosis de 2.3 (Figura 6). La distribución es por lo tanto aproximadamente simétrica y algo aplastada respecto a la distribución de Gauss. Presenta una frecuencia acumulada del 87% en correspondencia del valor $c = 1.8$ de la variable muestral. Se observa además una cierta frecuencia para los valores de inferiores a la unidad (a $c = 1$ le corresponde una frecuencia acumulada del 20%). Si bien el valor medio del parámetro $c = 1.37$ (Tabla 3), es bastante similar al valor 1.5 de la ecuación (1), el análisis detallado de la muestra evidencia que ésta puede ser dividida idealmente en dos categorías. A la primera pertenecen los datos del Rio Cordon levantados antes de la crecida del 1994, del Rio Val Sorda y del Rivo di Caserine; a la segunda, los datos de los torrentes Faon, Corotto y Cordon relativos a las mediciones efectuadas después de la crecida del 1994. El primer grupo sigue idealmente el modelo de maximización de la resistencia al flujo, mientras el segundo se aleja en modo apreciable (Figura 7), ya que la variable c asume valores próximos o inferiores a la unidad. Si se considera la temporalidad de los levantamientos efectuados en relación a las crecidas que han afectado los 5 torrentes, se deduce que los dos grupos corresponden a momentos diferentes de la evolución temporal de los escalones (D'Agostino, Lenzi, 1998).

En el primer caso (condición de maximización de la resistencia al flujo) se ha medido en el campo una mor-

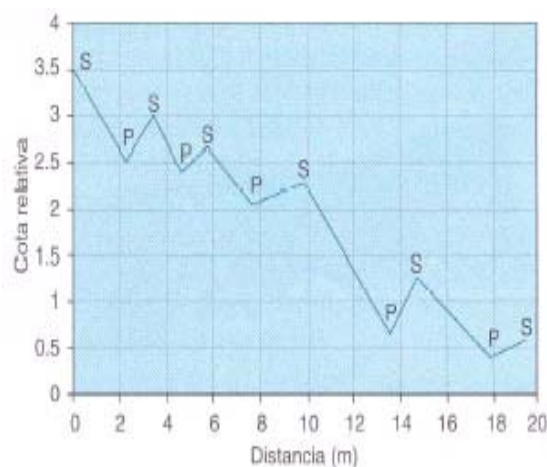


Figura 8. Perfil longitudinal de la secuencia VS4 (Val Sorda)



Figura 9. Ejemplo de secuencia en escalones en el Rivo di Caserine

fología en escalones determinada por una crecida que se produjo al menos hace 15 años en el Río Cordon (antes de septiembre de 1994), y al menos hace 30 años en los torrentes Val Sorda y Caserine. Los valores del coeficiente c de la ecuación $H/Ls = c S$ son 1.3, 1.49 y 1.63, respectivamente, para el Cordon, el Caserine y el Val Sorda. En el segundo caso los levantamientos topográficos han sido efectuados poco después de las crecidas que han determinado la formación de los escalones. Los valores del coeficiente c son 0.8, 1.1 y 1.1, respectivamente para el Cordon (datos medidos después del 1994), el Corotto y el Faon.

La intrínseca estabilidad de las secuencias en escalones se confirma en los torrentes analizados, evidenciándose la necesidad de un evento con tiempo de recurrencia de

Parámetro	Máximo	Mínimo	Media	D. estándar
S	0.29	0.05	0.15	0.05
Ls/Lp	1.73	0.70	1.05	0.16
Ls/B	1.56	0.52	1.02	0.24
H/S	16.2	3.21	7.29	2.91
Z/H	1.28	0.43	0.75	0.22
H / (Ls S)	2.15	0.52	1.37	0.42
H / D₉₀	4.20	0.81	2.27	0.81

Tabla 3. Relaciones entre los principales parámetros morfológicos de las secuencias en escalones

por lo menos 30-50 años para alterar en modo apreciable estas unidades morfológicas. Ante crecidas de menor magnitud las unidades en escalones presentan una dinámica evolutiva secundaria que tiende a reforzar su grado de estabilidad, maximizando la disipación energética imputable a la resistencia de forma inducida por su misma geometría. En estas condiciones la secuencia presenta, entre dos escalones consecutivos, un perfil del fondo en contrapendiente ($S < 0$), dando lugar al desarrollo de profundos remansos. Las Figuras 8 y 9, ilustran, respectivamente para el Río Val Sorda y el Rivo di Caserine, una configuración en escalones que se ajusta a la maximización de la resistencia al flujo.

El análisis de las relaciones existentes entre los principales valores geométricos de los escalones para toda la muestra examinada (Tabla 3) es bastante similar a los resultados obtenidos sólo para el Río Cordon (D'Agostino, Lenzi, 1998). Se observa que el campo de variación de la relación Ls/B (0.5-1.6) es más reducido respecto al intervalo 1-4 indicado por otros autores (Whittaker, 1987; Grant y otros, 1990; Montgomery y Buffington, 1997), y decididamente inferior respecto al campo 5-7 que caracteriza los rápidos-remansos (Leopold y otros, 1964).

En la muestra analizada, en contraposición a las observaciones efectuadas por Chin (1989) en las montañas de Santa Monica (California, USA), son frecuentes los valores de Ls/B inferiores a la unidad (47%). No se puede tampoco dejar de lado la elevada desviación estándar de la relación entre H y S (Tabla 3); la relación entre

estos dos parámetros es de todos modos aceptable para toda la muestra ($r = 0.62$) y poco consistente si se consideran los datos relativos a cada uno de los torrentes en forma individual.

En la definición de H un rol importante está determinado por la granulometría del material que constituye el lecho del cauce : ésta tiene que ser suficientemente heterogénea ($D_{90}/D_{50} = 2.7 - 5.4$, *Tabla 1*) y condiciona, con las fracciones más gruesas, la altura de los escalones. Analizando los datos de la *Tabla 2*, se obtiene que el 37 % de las secuencias examinadas presentan una relación H/D_{90} comprendida entre 1 y 2, el 43 % entre 2 y 3 y sólo el 18 % valores de H/D_{90} superiores a 3 (D'Agostino, Lenzi, 1998).

La relación entre Z y H (*Tabla 3*) indica en definitiva que la pérdida efectiva de cota a lo largo de un tramo es, en términos medios, el 75% de la suma de las alturas de los step presentes en el mismo tramo. En otras palabras cerca 1/4 de la altura de los step está representado por la erosión (respecto a la horizontal) que se genera en los remansos (el valor de Z/H sería igual a 2/3 según la hipótesis de validez de la ecuación (1) de máxima resistencia). Tal indicación puede tener una cierta validez a nivel medio, pues en el caso de la variable Z/H es factible efectuar consideraciones análogas a las formuladas en el caso de la variable $(H/L_s)/S$, ya que es el producto $L_s S = Z$.

CONCLUSIONES

La elaboración de los datos obtenidos en los cinco torrentes estudiados han confirmado la intrínseca simetría y regularidad de las secuencias en escalones. El campo de variación de la relación L_s/B , entre 0.5 y 1.6, es más reducido respecto al intervalo 1-4 indicado por otros autores y al campo 5-7 que caracteriza los rápidos-remansos. La longitud de onda de los escalones es inversamente proporcional a la pendiente media del lecho, mientras la altura es dominada por la componente gruesa de la granulometría. El 37% de las secuencias examinadas presentan una relación H/D_{90} variable entre 1 y 2, el 43% entre 2 y 3 y el 18% mayor de 3.

La presencia de secuencias en escalones en un cauce torrencial es un buen indicador de una configuración fluviomorfológica globalmente estable y difícilmente alterable por crecidas con tiempo de retorno inferior a 30 años.

El modelo de maximización de la resistencia al flujo en una secuencia en escalones debe interpretarse como una condición evolutiva a la cual el torrente tiende progresivamente, ajustando, por efecto de crecidas de bajo tiempo de retorno y de una alimentación de sedimentos limitada, la configuración en escalones adoptada después de una crecida formativa.

Los valores que caracterizan la crecida excepcional del 1994 en el Río Cordon ($Q = 10.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; $V = 3.37 \text{ m s}^{-1}$, $Fr = 1.7$) llevados al diagrama de Allen (1982) muestran el evento en el campo de las antidunas aunque en una posición cercana a la de un perfil del fondo plano. A

pesar de ello existen elementos de incertidumbre sobre el modelo de formación de los escalones basado en la teoría de las antidunas.

Las observaciones de campo efectuadas en los torrentes Cordon, Faon, Corotto, después de la crecida del 1994, han evidenciado que el mecanismo de transformación predominante de los escalones se relaciona con la socavación y desestabilización de la base de sostén.

El conocimiento de la morfología y del grado de estabilidad de las secuencias en escalones naturales puede constituir un valioso instrumento de apoyo para el diseño y proyecto de obras transversales de corrección de torrentes, como los diques de consolidación construidos con peñones o grandes bloques de piedra, que emulen las unidades naturales, respetando las relaciones geométricas y los ámbitos de aplicación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el Centro Sperimentale Valanghe e Difesa Idrogeologica de Arabba (Regione Veneto) por el apoyo logístico. Un particular agradecimiento está dirigido a los Drs. Fabio Da Re y Diego Sonda por la asistencia brindada en los relevamientos de campo. Las investigaciones han sido promovidas y financiadas por la Unión Europea (DGXII) en el ámbito del Proyecto EROSLO-PEII (Contrato ENV4-CT96-0247).

LISTA DE SIMBOLOS

<i>Sec.</i>	Código de identificación de la secuencia en escalones
<i>n</i>	número de escalones de cada secuencia
<i>LT</i>	longitud total de la secuencia
<i>B</i>	ancho del cauce en correspondencia con los escalones
<i>Z</i>	desnivel medio entre dos escalones consecutivos
<i>H</i>	desnivel medio fondo remanso-escalón de aguas arriba
<i>Lp</i>	distancia media (longitud de onda) remanso-remanso
<i>Ls</i>	longitud de onda escalón-escalón, $L_s = L$
<i>S</i>	pendiente media de la secuencia
<i>Fr</i>	número de Froude del flujo
τ	tensión tractiva media
τ_{cmax}	tensión tractiva máxima
<i>V</i>	velocidad media del flujo
<i>Q</i>	caudal líquido
<i>Lb</i>	longitud de onda de las antidunas
<i>kh</i>	número de onda
<i>r</i>	coeficiente de correlación
<i>D₅₀</i>	diámetro del material superficial del lecho del cual el 50 % es más fino
<i>D₉₀</i>	diámetro del material superficial del lecho del cual el 90 % es más fino

BIBLIOGRAFÍA

- Abrahams A.D., Li G. and Atkinson J.F., (1995) *Step-pool streams: adjustment to maximum flow resistance*. Water Resources Research, vol. 31, pp. 2593-2602.
- Allen J.R.L., (1982) *Sedimentary structures*, Vol I, Elsevier, Amsterdam, 593 pp.
- Ashida K., Egashira S., Ando N., (1984) *Generation and geometric features of steep-pool bed forms*, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 27 (B-2), 341-353.
- Chin A., (1989) *Step pools in stream channels*. Progress in Physical Geography, 13, 391-403.
- D'Agostino V. (1996) *La rinaturalizzazione dei torrenti montani*. Quaderni del Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali, Università di Padova, 33, 7 pp.
- D'Agostino V., Lenzi M.A. (1996) *La valutazione del trasporto solido di fondo nel bacino attrezzato del Rio Cordon*. L'Acqua, vol. 4 : 23-40.
- D'Agostino V., Lenzi M.A. (1997) *Origine e dinamica della morfologia a gradinata (step pool) nei torrenti alpini ad elevata pendenza*. Dendronatura, 2, 7-38.
- D'Agostino V., Lenzi M.A. (1998) *La massimizzazione della resistenza al flusso nei torrenti con morfologia a step pool*. XXVI Convegno Nazionale di Idraulica, Catania, Settembre 1998, Vol I, pp.281-293.
- Davis T.R., Sutherland A.J., (1980) *Resistance to flow past deformable boundaries*. Earth Surface Processes, vol. 5 : 175-179.
- Fattorelli S., Keller H.M., Lenzi M.A., Marchi L., (1988) *An experimental station for the automatic recording of water and sediment discharge in a small alpine watershed*. Hydrol. Sciences Journal, 33 :607-617.
- Grant G.E., Mizuyama T., (1991) *Origin of step-pool sequences in high gradient streams: a flume experiment*. In : Tominaga M. (ed.) Proceedings of the Japan-U.S. Workshop on Snow Avalanche, Landslides, and Debris flow Prediction and Control, Jpn. Sci. And Technol. Agency, Natl. Res. Inst. for Earth Sci. and Disaster Prev., Tsubuka, pp. 523-532.
- Grant G.E., Swanson F.J., Wolman M.G., (1990) *Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams*, Western Cascades, Oregon. Geological Society of America Bulletin, vol. 102:340-352.
- Grant G.E., (1994) *Hydraulics and sediment transport dynamics controlling step-pool formation in high gradient streams: a flume experiment*. In : Ergenzinger, P. and Schmidt, K.H. Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers. Lecture Notes in Earth Sciences, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 52:241-250.
- Hayward J.A., (1980) *Hydrology and Steam Sediment from Torlesse Stream Catchment*. Special Publication n. 17 , Tussok Grasslands and Mountain Lands Institute, Lincoln College, Canterbury, New Zealand, 236 pp.
- Heede B.H., (1981) *Dynamics of selected mountain streams in the western U. S. of America*. Zeitschrift für Geomorphologie, 25 : 17-32.
- Judd H.E. , Peterson D.F., (1969) *Hydraulics of large bed element channels*. Utah Water Research Lab., College of Engineering, Utah State University, Logan, Report PRWG 17-6, 115 pp.
- Keller E.A., (1971) *A real sorting of bed load material : the hypothesis of velocity reversal*. Geological Society of America Bulletin, 88, 753-756.
- Keller E.A. , Melhorn W.N., (1978) *Rhythmic spacing and origin of pools and riffle*. Geological Society of America Bulletin, 82 :753-756.
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P., (1964) *Fluvial processes in geomorphology*. Freeman, San Francisco, California, 522 pp.
- Lenzi M. A., (1997) *Measurements and assessments of bedload transport in the Rio Cordon (Italy)*. Atti del Corso Rischi torrentizi : erosione e inondazioni, Università Europea d'estate sui rischi naturali, St. Niklaus (Valais, Suisse), 8-13 settembre 1997, 16 pp.
- Lenzi M. A., (1998) *Criteri di classificazione dei sistemi fluviali*. Quaderni del Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali, Università di Padova, 50, 31 pp.
- Lenzi M. A., D'Agostino, (1998) *Dinamica dei torrenti con morfologia a gradinata e interventi di sistemazione dell'alveo*. En: Le sistemazioni idraulico-forestali, tra revisione e sviluppo. Quaderni di Idronomia Montana, 17 , Editoriale Bios, pp. 31-56.
- Lenzi M.A., Marchi L., Scussel G.R. , (1990) *Measurement of coarse sediment transport in a small alpine stream*. In : Lang H. and Musy A., Hydrology in Mountainous Regions, I Hydrological Measurements, the Water Cycle, IAHS Publ. no. 193: 283-290.
- Lenzi M. A., Marchi L., Tecca P.R., (1996) *Field studies on sediment transport and debris flows in small basins of the Italian Alps*. En : Hydrological problems and environmental management in highlands and headwaters: Krecek, Rajwar y Haigh (Eds.), pp.71-79.
- Lenzi M. A., Billi P., D'Agostino V. , (1997) *Effects of an extremely large flood on the bed of a steep mountain stream*. Proc. of the conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision: Stabilization, Rehabilitation, Restoration: Wang, Langendoen, Shields (eds.), Oxford, Mississippi, USA; May 19-22, 1997; pp. 1061-1066.

- Milne J. A., (1982) *Bed-material size and the riffle-pool sequence*, Sedimentology, 29, 267-278.
- Montgomery D., Buffington J. (1997) *Channel reach morphology in mountain drainage basins*, Geological Society of American Bulletin, 109, n.5, 596,611.
- Richards K. S., (1976) *The morphology of riffle-pool sequences*, Earth Surface Processes, 1, 71-88.
- Richards K.S., (1978) *Simulation of flow geometry in a riffle-pool stream*, Earth Surface Processes, 3, 345-354.
- Rosport M., (1994) *Stability of torrent beds characterised by step pool texture*. Journal of Sed. Res., Vol 9, 3:124-132.
- Rosport M., Dittrich A., (1995) *Step Pool Formation and Stability—a Flume Study—*. Proc. 6th International Symposium on River Sedimentation, pp. 525-532; Nov 1995, New Delhi, India.
- Whittaker J.G., (1982) *Flow and sediment movement in steeped channels*. Ph.D. thesis, Lincoln College, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Whittaker J.G., Jaeggi M.N.R., (1982) *Origin of step-pool systems in mountain streams*. ASCE, J. of Hydraulic Division, 108 : 758-773.
- Whittaker J.G., (1987) *Sediment transport in step-pool streams*. In : Thorne, C.R., Bathurst, J.C. and Hey, R.D. Sediment transport in Gravel-Bed Rivers. Wiley, Chichester, pp. 545-579.
- Wohl E.E., Grodek T., (1994) *Channel bed-steps along Nahal Yael, Negev desert, Israel*. Geomorphology, vol. 9: 117-126.
- Yang C. T., (1971) *Formation of Riffle and Pool*. Water resources Research, 7, n. 6 : 1567-1574.
- Yang C.T., Song C.C.S., Woldengerg M.J. (1981) *Hydraulic geometry and minimum rate of energy dissipation*. Water Resources Research, 7, n.6, 1567, 1574.