

REGISTRO DEL COMPORTAMIENTO DE CORRIENTES CON DERRUBIOS EN EL TORRENTE MOSCARDO (ALPES ITALIANOS)

Lorenzo Marchi

Resumen:

Los datos sobre corrientes con derrubios recogidos en cuencas monitoreadas tienen gran importancia para mejorar la comprensión de estos peligrosos fenómenos, a fin de desarrollar medidas de mitigación (sistemas de alerta temprana, obras de ordenación). El torrente Moscardo, un pequeño curso de los Alpes Orientales (área de la cuenca: 4.1 km²) ha sido instrumentado para el monitoreo de las corrientes con derrubios, registrándose catorce eventos desde 1990 hasta 1997. La instrumentación de monitoreo instalada en la cuenca incluye pluviógrafos, sensores ultrasónicos, sensores sísmicos y una telecámara, que permiten medir la lluvia, el nivel del flujo y las vibraciones causadas por el paso de la corriente con derrubios. Otras importantes variables, como la velocidad media del frente del flujo, el caudal máximo y el volumen, se estiman elaborando los datos medidos. Las imágenes registradas por la telecámara han sido utilizadas para interpretar las diferentes fases que se producen en una crecida y han permitido estimar la velocidad superficial de la corriente.

Palabras clave: corriente con derrubios, monitoreo, sensores ultrasónicos, telecámara, hidrograma, cuencas alpinas.

INTRODUCCIÓN

El monitoreo de las corrientes con derrubios (*debris flow*) en cuencas instrumentadas representa una fuente de datos de gran importancia para mejorar la comprensión de estos procesos, así como para la calibración de modelos físicos y numéricos y para el desarrollo de medidas de mitigación de la peligrosidad y del riesgo (sistemas de alerta y obras de ordenación, como diques abiertos y cerrados).

El monitoreo de las corrientes con derrubios en áreas apropiadamente instrumentadas se ha desarrollado notablemente en las últimas décadas, especialmente en Japón (Okuda et al., 1980; Suwa et al., 2000), en China (Zhang, 1993) y en los Estados Unidos (Pierson, 1986), mientras que en Europa se observaba, hasta hace pocos años, una carencia generalizada de datos experimentales registrados directamente por tareas de campo. En los años más recientes esta situación se ha modificado por el desarrollo de actividades de monitoreo de las corrientes con derrubios en cuencas torrenciales italianas (Marchi et al., 2002; Tecca et al., 2003) y suizas

(Hürlimann et al., 2002). Objetivo de la presente nota es presentar una síntesis de los resultados obtenidos en la cuenca del torrente Moscardo, que ha sido el primer área de estudio europeo equipado con instrumentos permanentes para el monitoreo de las corrientes con derrubios.

ÁREA DE ESTUDIO

En las pequeñas cuencas alpinas, así como en otras regiones, las corrientes con derrubios se producen normalmente con una frecuencia bastante alta para ocasionar serios peligros, pero demasiado baja para que una actividad de monitoreo resulte justificable. Además, no es fácil individualizar cursos de agua que presenten al mismo tiempo una elevada frecuencia de las corrientes con derrubios y características de buena accesibilidad, con un tramo de torrente que no esté afectado por excesivas divagaciones, que podrían hacer problemática la instalación de los equipamientos y su operatividad.

CNR IRPI. Corso Stati Uniti 4 - 35127 Padova - Italia.
Teléfono: 39 0498295825, e-mail: lorenzo.marchi@irpi.pd.cnr.it

Artículo recibido el 26 de febrero de 2004, recibido en forma revisada el 14 de junio de 2004 y aceptado para su publicación el 24 de junio de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

El torrente Moscardo, un pequeño curso de los Alpes Orientales italianos (Fig. 1; Tab. 1), ha sido elegido para el monitoreo de las corrientes con derrubios, dado que cumple con los requisitos antes mencionados con respecto a la frecuencia de los eventos y a las características de accesibilidad y de estabilidad del sitio de medición. Las investigaciones en la cuenca del torrente Moscardo han sido desarrolladas, a partir de los años 80, por las Secciones de Torino y Padova del Instituto de Investigación para la Defensa Hidrogeológica del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas de Italia (*Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del Consiglio Nazionale delle Ricerche - CNR IRPI*).

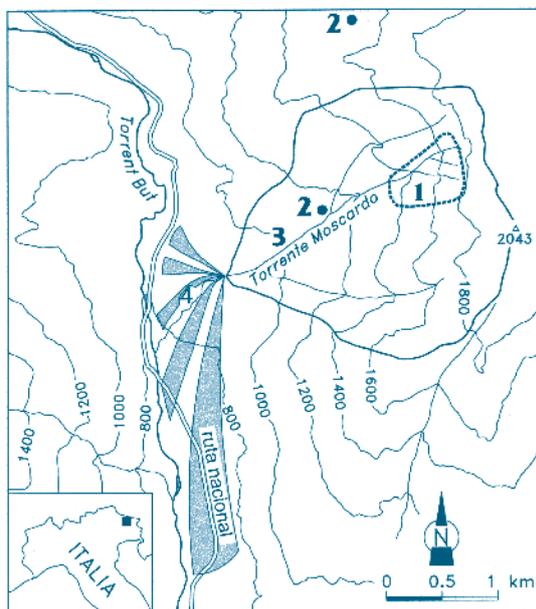


Figura 1. La cuenca del torrente Moscardo y su cono de deyección.

- 1: área donde se originan las corrientes con derrubios;
- 2: pluviógrafos;
- 3 y 4: tramos de cauce monitoreados.

El substrato rocoso de la cuenca del torrente Moscardo está constituido de flysch del Carbonífero; los depósitos cuaternarios, consistentes en su mayoría de detritos y acumulaciones de derrumbes, están ampliamente difundidos en la cuenca.

La mayor parte de la superficie de la cuenca está ocupada por bosques de coníferas (64% de la superficie de la cuenca) y por arbustos de montaña (18% de la superficie de la cuenca); detritos y afloramientos rocosos prevalecen en la parte superior de la cuenca y a lo largo del torrente, ocupando la parte restante de la cuenca. Aunque limitadas en comparación con la superficie cubierta por la vegetación, estas áreas pueden aportar una cantidad ingente de detritos a la red hidrográfica.

Las condiciones climáticas de la cuenca del torrente Moscardo son típicas de la parte más oriental de los Alpes Italianos, con precipitaciones abundantes durante todo el año, inviernos fríos y veranos frescos. La precipitación media anual asciende a 1660 mm con 113 días de lluvia; las precipitaciones más abundantes se verifican generalmente en octubre y noviembre con valores mensuales de 170 – 180 mm. Las corrientes con derrubios en el torrente Moscardo se producen principalmente en verano y son causadas, bien por lluvias locales de fuerte intensidad y breve duración, o bien por perturbaciones de frentes meteorológicos de duración más larga.

INSTRUMENTOS INSTALADOS

A partir del comienzo de las actividades de estudio en la cuenca del torrente Moscardo, los instrumentos para el monitoreo de las corrientes con derrubios han registrado significativas evoluciones; la configuración presentada en la figura 2 incluye tres sensores ultrasónicos, una telecámara y una serie de sensores sísmicos, con los que se han registrado los eventos ocurridos en los últimos años. Los sensores ultrasónicos están instalados en la zona del cono de deyección (Fig. 2); la longitud del tramo instrumentado es de alrededor de 370 m con una pendiente del 10 %. Los sensores ultrasónicos miden el nivel del flujo en el torrente, mientras que los sensores sísmicos registran las vibraciones inducidas en el terreno por el paso de la masa fluyente. A esta instrumentación se añaden dos pluviómetros registradores, uno ubicado fuera de la cuenca pero próximo a ella y el otro dentro de la misma (Fig. 1).

Tabla 1. Principales parámetros morfométricos del torrente Moscardo

| área de la cuenca (km ²) | elevación máxima (m) | elevación mínima (m) | pendiente media de la cuenca (%) | longitud del curso (km) | pendiente media del curso (%) |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 4,1 | 2.043 | 890 | 63 | 2,76 | 37 |

REGISTRO DEL COMPORTAMIENTO DE CORRIENTES CON DERRUBIOS EN EL TORRENTE MOSCARDO (ALPES ITALIANOS)

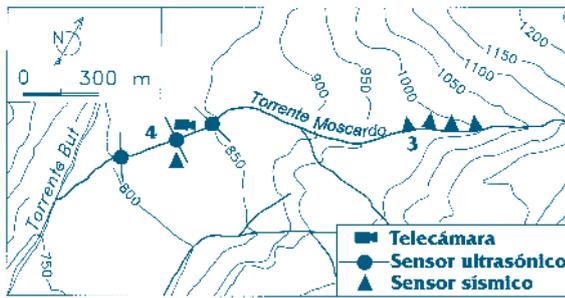


Figura 2. Tramos de cauce monitoreados; 3 y 4: ubicación mostrada en la figura 1.

En este artículo se presenta una breve síntesis de los principales resultados obtenidos por el monitoreo de las corrientes con derrubios en el torrente Moscardo, con particular atención al empleo de sensores ultrasónicos para el registro de los hidrogramas y de las imágenes de vídeo con miras a la caracterización tipológica de los eventos. Para un examen aún más completo de las investigaciones sobre las corrientes con derrubios en el torrente Moscardo se remite a un artículo reciente (Marchi et al., 2002). Otros estudios profundizan más sobre aspectos particulares de la actividad de monitoreo; así Moscardiello y Deganutti (2000) han realizado un estudio de las características sedimentológicas de los depósitos del torrente Moscardo. Un análisis de las relaciones entre las características de los eventos de precipitación y la formación de corrientes con derrubios ha sido desarrollado por Deganutti et al. (2000); mientras que el uso de sensores sísmicos y la elaboración de los datos registrados por éstos ha sido analizado en detalle por Arattano (1999).

RESULTADOS

Los sensores ultrasónicos miden el nivel del torrente, permitiendo el registro de los hidrogramas de las corrientes con derrubios. Inicialmente (1989) se había establecido un intervalo de 60 segundos entre el registro de dos datos sucesivos. Este intervalo se redujo a 10 segundos el año siguiente con el fin de aumentar la precisión de las observaciones, y por último se redujo a 1 segundo en 1995.

La velocidad media de propagación de las corrientes con derrubios en el tramo instrumentado puede ser calculada como: el cociente entre la distancia entre dos sensores, instalados en secciones sucesivas del torrente, y el tiempo transcurrido entre en presentarse la onda de la corriente en las dos estaciones de medida (Fig. 3).

El análisis de los hidrogramas permite también detectar las eventuales fases de erosión y de depósito que afectan al cauce del torrente en correspondencia con las estaciones de medida.

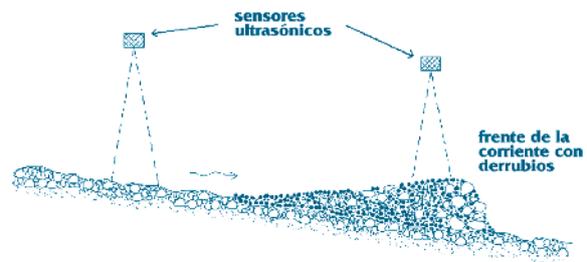


Figura 3. Esquema de la disposición de los sensores ultrasónicos (la escala horizontal se ha reducido en lo que se refiere a la distancia entre los sensores y al perfil de la corriente con derrubios).

Combinando la medida de la profundidad del flujo y la evaluación de la velocidad media de su propagación, ambas obtenidas por las mediciones efectuadas mediante los sensores ultrasónicos, con el levantamiento topográfico de las secciones monitoreadas es posible una evaluación, aunque aproximada, de los caudales máximos y de los volúmenes (líquidos y sólidos) de la corriente (Marchi et al., 2002). La determinación de los caudales máximos y de sus volúmenes se limita a los eventos que no han ocasionado importantes fenómenos de erosión o de deposición en las estaciones de medida.

Hidrogramas registrados por sensores ultrasónicos se disponen para doce de los catorce eventos monitoreados en el torrente Moscardo entre 1990 y 1997 (Fig. 4 y 5). Los datos referidos a la velocidad media, a los caudales máximos y a los volúmenes se encuentran en la tabla 2.

La estación de medida intermedia ha proporcionado de vez en cuando unos datos irregulares durante los años 1996-1997: en estos casos han sido registrados en la tabla 2 los valores medios calculados entre la estación de aguas arriba y la de aguas abajo. De las figuras 4 y 5 es posible evidenciar algunos aspectos comunes a la mayoría de los eventos: la brevedad de la fase ascendente, la forma muy acentuada del hidrograma y la limitada duración total de los fenómenos. Junto a estas características comunes se observan también, por otra parte, unas diferencias notables entre un evento y otro y entre las diferentes estaciones de medida.

Tabla 2. Velocidad, caudal máximo y volumen de la corriente con derrubios estimados de las medidas con los sensores ultrasónicos.

| 1990 - 1994: 2 estaciones de medida | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|---|---------------------------|--|
| fecha | velocidad media (m s ⁻¹) | caudal máximo (m ³ s ⁻¹) | volumen (m ³) | |
| 17.08.1990 | 1,0 | - | - | |
| 13.08.1991 | 5,0 | 88 | 19.000 | |
| 30.09.1991 | 1,9 | 24 | 3.250 | |
| 01.09.1992 | 2,5 | 46 | 5.800 | |
| 11.07.1993 | 3,0 | 14 | 5.600 | |
| 19.07.1993 | 0,9 | 3 | 730 | |
| 20.07.1993 | 4,3 | 16 | 6.500 | |
| 14.09.1993 | 2,5 | 10 | 3.800 | |
| 18.07.1994 | 4,0 | - | - | |

| 1996 - 1998: 3 estaciones de medida | | | | |
|-------------------------------------|------------|--------------------------------------|---|---------------------------|
| fecha | estación | velocidad media (m s ⁻¹) | caudal máximo (m ³ s ⁻¹) | volumen (m ³) |
| 22.06.1996 | monte | | 132 | 16.800 |
| | | 3,2 | | |
| | intermedia | | 136 | 15.600 |
| | valle | 3,8 | 151 | 16.000 |
| 08.07.1996 | monte | | 255 | 65.800 |
| | valle | 4,0 | 134 | 49.800 |
| 27.06.1997 | intermedia | | | |
| | valle | 2,9 | 25 | 3.000 |

Debido a la ampliación de la sección del flujo y a una acentuada atenuación de la pendiente en la sección aguas abajo, por la presencia de un vado, el paso de las corrientes con derrubios se acompaña muy a menudo con la deposición de materiales. Esto resulta evidente, por ejemplo, en el evento del 17 de agosto de 1990 (Fig. 4), cuando al paso de dos pequeñas pero bien definidas ondas en la estación de aguas arriba se correspondió con una sobreinundación del cauce del torrente en la estación de aguas abajo. Una tendencia a la sobreinundación se ha observado también en otras estaciones de medida, por ejemplo en la que corresponde al sensor de aguas arriba con ocasión del evento del 27 de junio de 1997 (Fig. 5).

La instalación de una telecámara en el tramo del cauce instrumentado con los sensores ultrasónicos, que se realizó en 1995, ha permitido integrar el registro de los hidrogramas de las corrientes con derrubios con el análisis de las filmaciones. La toma de imágenes de vídeo es activada por un software, que registra las variaciones del nivel del torrente medido por el sensor ultrasónico de aguas arriba.

Las imágenes registradas por la telecámara han sido utilizadas para interpretar las diferentes fases que se producen en una crecida. La figura 6 evidencia, durante el evento del 8 de julio de 1996, tres fases caracterizadas por tipologías de flujo diferentes entre ellas; particularmente interesante ha sido, en el caso de los dos eventos ocurridos en 1996, la identificación de una evidente onda inicial, atribuible a un flujo hiperconcentrado.

Además de proporcionar pruebas visuales para una mejor comprensión de los procesos en el flujo, las imágenes registradas en vídeo han sido utilizadas para estimar la velocidad superficial de la corriente. Levantamientos topográficos, realizados después de los eventos de 1996, han proporcionado los datos para la calibración de la telecámara y de la escena filmada por ésta (Arattano y Grattoni, 2000). El procedimiento desarrollado ha permitido calcular las coordenadas espaciales 3D de los objetos transportados en la superficie de la corriente con derrubios, tales como rocas o detritos leñosos, a partir de las coordenadas 2D identificadas en las imágenes de vídeo. La velocidad media de los objetos detectados en la superficie del flujo, ha sido determinada por el cálculo de la relación entre la distancia por ellos recorrida y el tiempo transcurrido entre la toma de los fotogramas que los contienen.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La disponibilidad de datos referidos a la profundidad del flujo, la velocidad, los caudales máximos y los volúmenes de las corrientes con derrubios permite el análisis de relaciones entre las variables que caracterizan al flujo y la comparación con relaciones desarrolladas en otras regiones geográficas. Se presenta, en la figura 7, una comparación entre los datos referidos a los caudales máximos y los volúmenes de las corrientes con derrubios registradas en el torrente Moscardo y algunas relaciones entre las dos variables (Mizuyama et al., 1992; Bovis y Jakob, 1999). Se puede notar cómo la línea de regresión de los datos del Moscardo sea más próxima a aquéllas referidas a las corrientes con derrubios de matriz fangosa (flujos macroviscosos) que a aquéllas referidas a las corrientes con derrubios de matriz granular (flujos inerciales). Eso es compatible con las características del material de las corrientes con derrubios del torrente Moscardo y con los resultados de los análisis reológicos desarrollados sobre ello (Coussot et al., 1998).

REGISTRO DEL COMPORTAMIENTO DE CORRIENTES CON DERRUBIOS EN EL TORRENTE MOSCARDO (ALPES ITALIANOS)

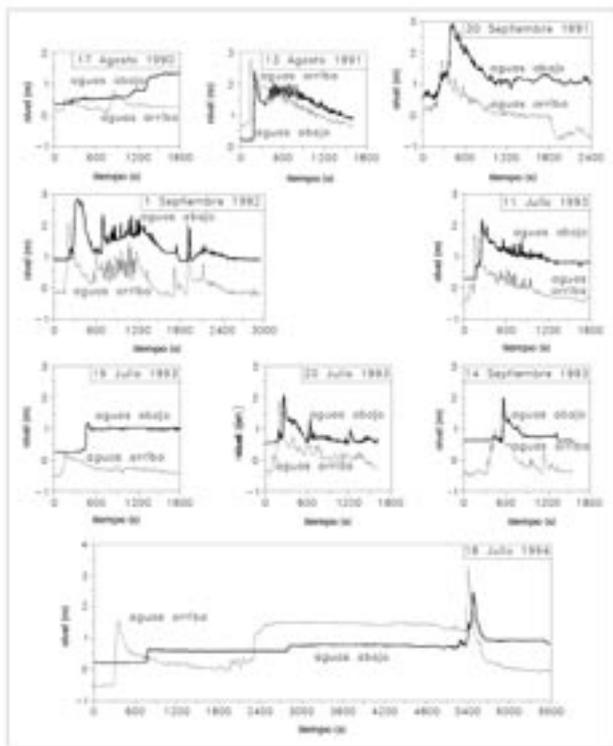


Figura 4. Hidrogramas de las corrientes con derrubios registradas por los sensores ultrasónicos desde 1990 hasta 1994.

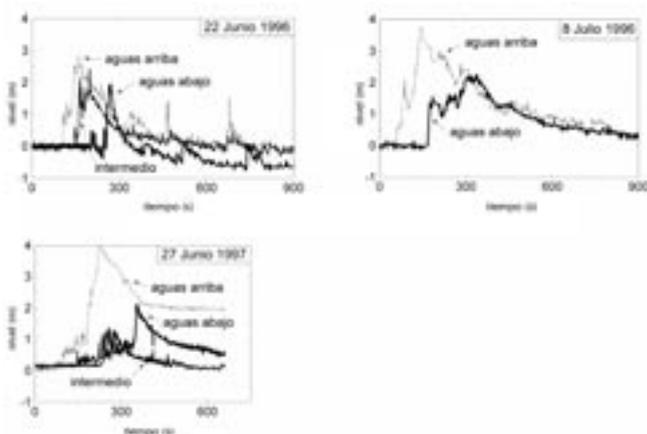


Figura 5. Hidrogramas de las corrientes con derrubios registrados por los sensores ultrasónicos entre 1996 y 1997.

Aunque el monitoreo de las corrientes con derrubios en el torrente Moscardo tenga esencialmente finalidades de investigación, los resultados obtenidos han proporcionado indicaciones útiles para el uso de diferentes tipos de sensores en sistemas de alerta. Sensores ultrasónicos y sensores sísmicos pueden ser aplicados provechosamente en sistemas de alerta dirigidos a aumentar la seguridad de carreteras y ferrocarriles, a la espera de que se realicen medidas de control de tipo estructural o cuando éstas no fueran económicamente viables.

Menos recomendable parece ser la aplicación de estos sensores, o de otros sistemas de alerta que se activan después de que la corriente con derrubios se ha iniciado, para la defensa de áreas urbanas; porque la velocidad de las corrientes con derrubios normalmente no deja un tiempo suficiente para la evacuación de las áreas a riesgo.

El valor de los datos experimentales aumenta con la cantidad de elementos de la muestra, especialmente en el caso de fenómenos tales como las corrientes con derrubios, para los cuales las series históricas son normalmente breves. Por ello el monitoreo del Torrente Moscardo continúa, paralelamente a estudios sobre la hidrología y la geomorfología de la cuenca.

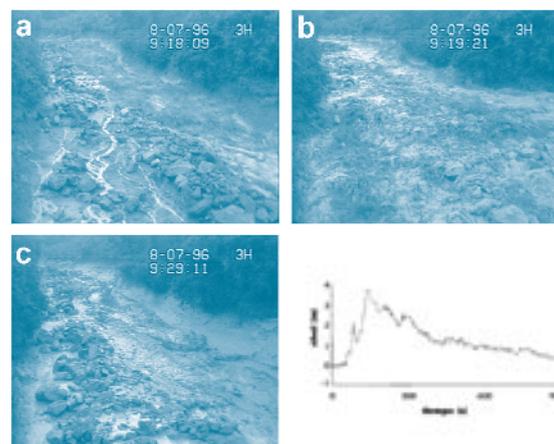


Figura 6. Diferentes fases de una corriente con derrubios en el torrente Moscardo: a) onda inicial con fuertes turbulencias; más una crecida con importante transporte sólido que una corriente con derrubios. b) punta de crecida de la corriente con derrubios: transporte de rocas de gran tamaño; turbulencias atenuadas. c) fase final, flujo bastante fluido; se producen ondas secundarias.

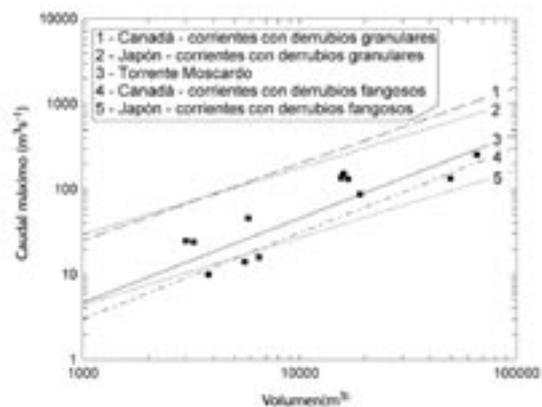


Figura 7. Relaciones entre el caudal máximo y el volumen de corrientes con derrubios. Canadá: Bovis y Jakob, 1999; Japón: Mizuyama et al., 1992.

AGRADECIMIENTOS

Las investigaciones sobre las corrientes con derrubios en el torrente Moscardo se desarrollan en el contexto del proyecto nacional GNDCI – (U.O. 1.29 y 2.63). El autor quiere agradecer a los dos anónimos evaluadores, cuyos comentarios han permitido mejorar este artículo, especialmente en lo que se refiere a la terminología utilizada, y al Prof. Mario A. Lenzi por sus sugerencias en la preparación del texto definitivo.

REFERENCIAS

- Arattano, M. (1999) On the use of seismic detectors as monitoring and warning systems for debris flows. *Natural Hazards* 20 (2-3), 197-213.
- Arattano, M., Grattoni, P. (2000) Using a fixed video camera to measure debris-flow surface velocity. In: Wiecezorek, G., Naeser, N. (Eds.), *Proceedings, Second International Conference on Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. A.A. Balkema, Rotterdam, 273-281.
- Bovis, M.J. and Jakob, M. (1999) The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth Surface Landforms and Processes*, 24 (11), 1039-1054.
- Coussot, Ph., Laigle, D., Arattano, M., Deganutti, A.M., Marchi, L. (1998) Direct determination of rheological characteristics of debris flow. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 124(8), 865-868.
- Deganutti, A.M., Marchi, L., Arattano, M. (2000) Rainfall and debris flow occurrence in the Moscardo basin (Italian Alps). In: Wiecezorek, G., Naeser, N. (Eds.), *Proceedings, Second International Conference on Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. A.A. Balkema, Rotterdam, 67-72.
- Hürlimann, M., Rickenmann, D., Graf, C. (2002) Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 40 (1), 161-175.
- Marchi, L., Arattano, M., Deganutti, A.M. (2002) Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). *Geomorphology*, 46 (1/2), 1-17.
- Mizuyama T., Kobashi S. & Ou G. (1992) Prediction of debris flow peak discharge. *International Symposium Interpraevent 1992 - Bern*, vol. 4, 99-108.
- Moscariello, A., Deganutti, A.M. (2000) Sedimentary and hydrologic processes of a debris-flow dominated alluvial fan - Moscardo Fan, Italy. In: Wiecezorek, G., Naeser, N. (Eds.), *Proceedings, Second International Conference on Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. A.A. Balkema, Rotterdam, 301-310.
- Okuda, S., Suwa, H., Okunishi, K., Yokoyama, K., Nakano, M. (1980) Observations on the motion of a debris flow and its geomorphological effects. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Suppl. Bd. 35*, 142-163.
- Pierson, T.C. (1986) Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. In: Abrahms, A.D., (Ed.), *Hillslope Processes*. Allen and Unwin, Boston, 269-296.
- Suwa, H., Yamakoshi, T., Sato, K. (2000) Relationship between debris-flow discharge and ground vibration. In: Wiecezorek, G., Naeser, N. (Eds.), *Proceedings, Second International Conference on Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. A.A. Balkema, Rotterdam, 311-318.
- Tecca, P.R., Galgaro, A., Genevois, R., Deganutti, A.M. (2003) Development of a remotely controlled debris flow monitoring system in the Dolomites (Acquabona, Italy). *Hydrological Processes*, 17, 1771-1784.
- Zhang, S. (1993) A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China. *Natural Hazards* 7(1), 1-23.