

Actualización de patrones sedimentológicos en cuencas andinas

Update of sedimentological patterns in Andean basins

Iván Campos-Herrera^{a1}, Marcos Sanz-Ramos^{ib1*}, Alejandro López-Alvarado^{a2}, Martí Sánchez-Juny^{ib2}

^aEscuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), 2340000 Valparaíso, Chile.

^bInstitut Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC BarcelonaTECH) – Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), 08034 Barcelona, España.

E-mail: ^{a1}ivan.campos.h@mail.pucv.cl, ^{*b1}marcos.sanz-ramos@upc.edu, ^{a2}raul.lopez.a@pucv.cl, ^{b2}marti.sanchez@upc.edu

*Autor para correspondencia

Recibido: 29/10/2024

Aceptado: 14/01/2025

Publicado: 31/01/2025

Citar como: Campos-Herrera, I., Sanz-Ramos, M., López-Alvarado, A., Sánchez-Juny, M. 2025. Update of sedimentological patterns in Andean basins. *Ingeniería del agua*, 29(1), 30-43. <https://doi.org/10.4995/ia.2025.22713>

RESUMEN

El régimen sedimentológico de una cuenca es de sumo interés debido a la relación que tiene la producción de sedimentos con el desarrollo y aprovechamiento de recursos naturales dentro de una cuenca hidrográfica. En Chile, la Dirección General de Aguas (DGA) realiza el control de la concentración sedimentométrica y caudal líquido (entre más variables hidrometeorológicas) en toda la extensión del territorio nacional. Con esta información se han actualizado algunas de las expresiones de cuencas de alta montaña, llamadas patrones sedimentológicos y estudiadas por Bzdigian y López-Alvarado hasta 1985, que relacionan el caudal sólido (GS) con el líquido (Q). Para ello, mediante el método de mínimos cuadrados, se han obtenido los parámetros A y B que definen el gasto sólido en función de las características hidrometeorológicas y morfológicas de la cuenca según la expresión $GS=A \cdot Q^B$. Los resultados muestran cambios en el comportamiento sedimentológico, con un aumento del caudal sólido en las cuencas centrales durante el periodo de deshielo. Por otra parte, debido al desarrollo de embalses, se observa una disminución del caudal sólido en las cuencas donde se presentan este tipo de obras. Sobre este mismo tipo de estructuras, se evalúan las expresiones realizadas en la aplicación de aterramiento de embalses.

Palabras clave | sedimentos; cuencas de alta montaña; régimen sedimentológico; gasto sólido en suspensión; aterramiento de embalses.

ABSTRACT

The sedimentological regime of a watershed is directly tied to sediment production, which is primarily influenced by the utilization of natural resources within a geographical basin. In Chile, the General Directorate of Water (DGA, in Spanish) oversees sediment concentration and liquid flow (along with other meteorological variables) across the entire national territory. Using this data, some of the expressions of high mountain basins, called sedimentological patterns and studied by Bzdigian and López-Alvarado until 1985 have been updated, which relate the solid flow (GS) with the liquid (Q). These expressions, known as sedimentological patterns, relate solid and liquid flow using the equation $GS=A \cdot Q^B$, where A and B are coefficients defined based on the hydrometeorological and morphological characteristics of the catchment. Changes in these patterns have been studied and applications evaluated, such as reservoir siltation and hydraulic structures characterized by sediment retention. The results show changes in sedimentological behavior, particularly an increase in solid flow in central watersheds during the thawing period. Additionally, the presence of reservoirs has led to a reduction in solid flow in watersheds with such structures. These expressions have also been applied to evaluate processes like reservoir siltation and sediment retention by hydraulic structures.

Key words | sediments; high mountain catchment; sedimentological patterns, suspended sediment discharge; siltation in reservoirs.

INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de realizar un correcto aprovechamiento y desarrollo de los recursos naturales, resulta crucial comprender el régimen sedimentológico de una cuenca debido a la influencia que tiene la producción de sedimentos en él (Bzdigian, 1985; López-Alvarado y Bzdigian, 1988). La sedimentación en cuencas puede ocasionar la pérdida de suelos agrícolas, la obstrucción de sistemas de riego y la disminución de la calidad del agua destinada al consumo, entre otros problemas (Ruiz-Flaño *et al.*, 2008).

En Chile existe una red sedimentométrica a nivel nacional, gestionada por la Dirección General de Aguas (DGA), que está diseñada para registrar la concentración de sedimentos en suspensión mediante muestreos rutinarios (DGA, 1991, DGA, 2024). Esta red se concentra principalmente en cuencas ubicadas en la cordillera de Los Andes y en parte del valle Central, donde se encuentran sistemas fluviales esenciales para el desarrollo del país. Sin embargo, esto deja una falta de información sedimentológica en cuencas secundarias (Bzdigian, 1985).

Para suplir esta falta de información, se han llevado a cabo investigaciones utilizando los datos disponibles de las cuencas controladas con el fin de caracterizar los fenómenos sedimentológicos y la producción de sedimentos. Estos estudios tienen por objetivo definir patrones sedimentológicos en cuencas controladas de la región andina de Chile, con el objetivo de generalizarlos y aplicarlos a otros ríos con características similares que carecen de información sedimentométrica o la presentan de manera irregular (Bzdigian, 1985).

Estudios con características similares han sido realizados considerando cuencas de alta montaña con arrastre de sedimentos discretizados por periodos estacionales: verano, asociado al derretimiento del manto nival; invierno, asociado al impacto de la precipitación con el material disponible, disgregando y añadiéndolo al cauce (Bzdigian, 1985; Kang *et al.* 2020). Metodologías semejantes han sido desarrolladas en el Norte de Grecia, donde existe una componente de aporte sedimentológico por mayor erosión del suelo en periodos secos sobre los húmedos (Mimikou, 1982).

La intensificación de eventos extremos y el retroceso de la línea de nieve (Trenberth, 2011) aplican sedimentológicamente a una mayor área pluvial aportante y, a su vez, mayor material disponible para ser arrastrado. Esto relaciona tendencias de aumento de caudal sólido arrastrado en las cuencas centrales para los periodos de deshielo. Por otra parte, para las cuencas donde se desarrollan obras hidráulicas, como embalses que tienden a retener sedimento (Fuentes-Norambuena, 2018; Lecaros-Sánchez, 2011), se presenta una disminución del material arrastrado en los registros más recientes.

El presente estudio tiene por objetivo determinar los patrones sedimentológicos de un grupo de cuencas de alta montaña de los Andes centrales chilenos, estudiadas por Bzdigian (1985), extendiendo los datos hasta la actualidad. Ello permitirá encontrar cambios y/o tendencias en el comportamiento sedimentológico de las cuencas analizadas. Considerando este contexto, también se presenta una aplicación sobre de aterramiento de embalses ya que, en función de las magnitudes de caudal líquido, puede pronosticarse el comportamiento sedimentológico de las cuencas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cuencas de estudio

La actualización de los patrones sedimentológicos presentado originalmente por Bzdigian (1964-1985) se realizó en las cuencas andinas de Chile Central de Maipo, Cachapoal, Teno y Bío Bío (Figura 1). Tan solo se han empleado aquellas cuencas que actualmente cuentan con estaciones de aforo de caudal líquido y sólido con el fin de obtener una nueva serie para el periodo 1985-2010 y una serie extendida con todos los datos (1964-2010).

Se trata de cuencas con características sensiblemente diferentes entre ellas, y que abarcan extensiones entre 354 y 7252 km², longitudes del cauce principal entre 41 y 213 km con pendientes medias de 1.7 a 6.9 %, y una altitud media que varía entre 1390 y 3427 m.s.n.m. Los usos del suelo son característicos de cuencas de media y alta montaña de la cordillera andina, con grandes extensiones de suelo desnudo en las zonas altas y presencia de vegetación en las zonas bajas y valles. Cabe destacar que la cuenca del río Bío Bío presenta alteración antrópica por la presencia de tres presas (Figura 1d).

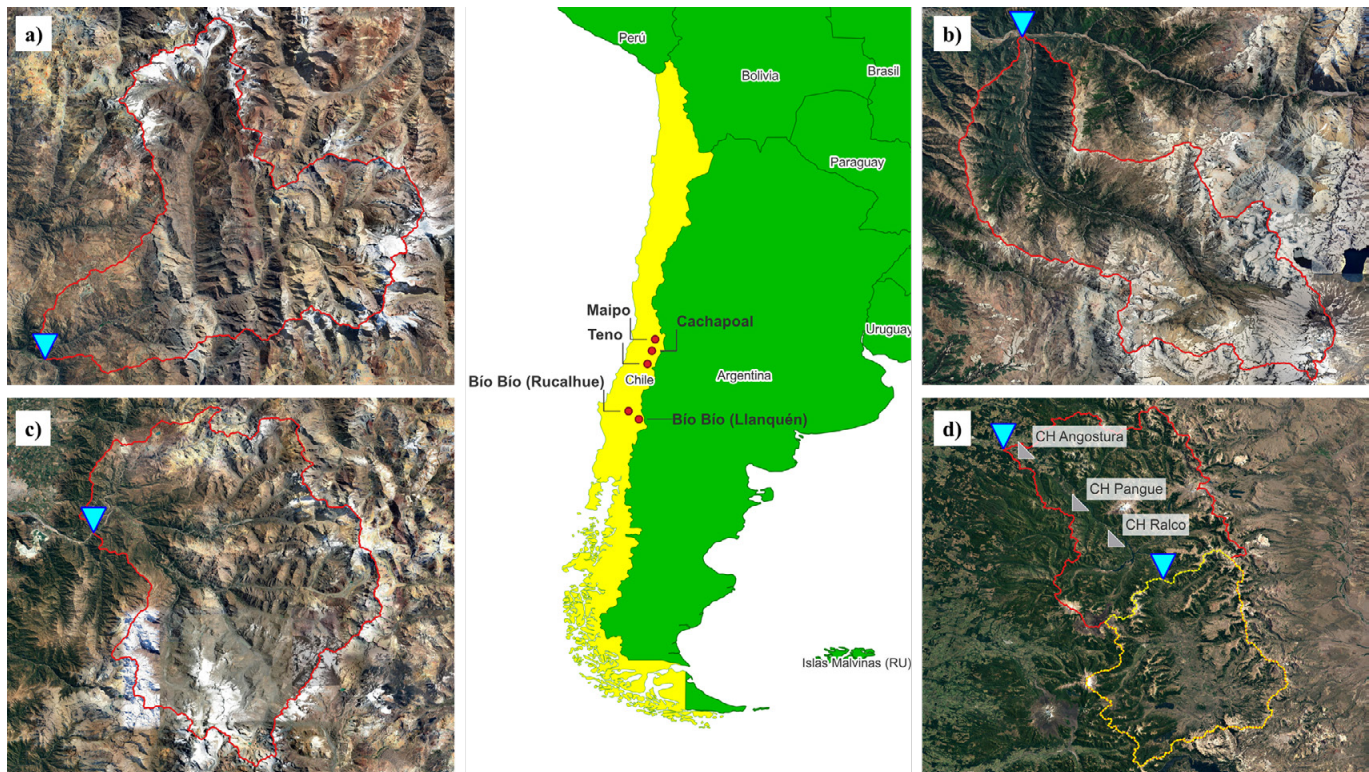


Figura 1 | Ubicación de las cuencas de estudio, vista en planta y localización de las estaciones de aforo (▼): (a) Maipo; (b) Teno; (c) Cachapoal; (d) Bío Bío hasta Rucalhue (rojo) y Bío Bío hasta Llanquén (amarillo). Localización de las presas y centrales hidroeléctricas (CH) en la cuenca del Bío Bío (▲).

Estaciones de aforo

Los datos fluviométricos se obtuvieron de la red hidrométrica de recursos hídricos de la Dirección General de Aguas (DGA), un sistema de libre acceso a través de su plataforma web (DGA, 2024). Las estaciones fluviométricas se componen de un sensor de presión que registra datos del nivel de agua, y que posteriormente son almacenados en un *datalogger* para su recogida y tratamiento. De forma regular se realizan campañas de aforo en cada una de las estaciones con el objetivo de calibrar la curva de descarga (DGA, 1991). La metodología empleada para la evaluación de la concentración de sedimentos consiste en muestreos superficiales realizados diariamente mediante un canastillo, el cual se posiciona levemente bajo superficie de agua hasta rellenar tres cuartos del recipiente. Posteriormente, estas muestras se analizan en laboratorio para obtener la concentración de sedimento en suspensión tras eliminar la materia orgánica presente. Ello permite la actualización de la base de datos de la red de la Dirección General del Agua (DGA, 2020).

A pesar de que las estaciones de aforo consideradas registran datos de nivel de agua a escala horaria, un tratamiento posterior permite obtener registros agregados a escala media diaria y media mensual, en unidades de caudal líquido [m^3/s], que minimizan las incertidumbres propias de este tipo de estaciones de aforo en ríos de montaña (Ayala *et al.*, 1995). Los reportes de sedimento de carácter público son muestreos diarios de concentración de sedimento (en [mg/L]) que, al ser multiplicados por el caudal líquido, son reportados como gasto sólido en suspensión (en [$\text{ton}/\text{día}$]) mediante la siguiente expresión:

$$Q_s = 0.0864 \cdot Q_{l,obs} \cdot C_{obs} \quad (1)$$

donde Q_s corresponde al gasto sólido, en unidades de [$\text{ton}/\text{día}$], $Q_{l,obs}$ corresponde al caudal líquido observado diario, en unidades de [m^3/s], y C_{obs} la concentración de sedimento en suspensión en [mg/L]. El valor de 0.0864 es el factor de conversión en [$\text{L}/\text{m}^3 \cdot \text{ton}/\text{mg} \cdot \text{s}/\text{día}$].

En primera instancia, las estaciones que registran datos de caudal sólido cumplen con mediciones de caudal líquido, no así en el sentido contrario (medición de caudal líquido no implica medición de concentración de sedimento en suspensión). La Tabla 1 resume las características de las cuencas estudiadas, así como la información que identifica la estación de aforo según el código de la red hidrométrica de la DGA.

Tabla 1 | Características de las cuencas hasta la estación de aforo (código y ubicación).

Cuenca	Área [km ²]	Longitud cauce [km]	Pendiente media [%]	Altitud media [m s.n.m]	Código estación	WGS 84		Cota estación [m s.n.m.]
						UTM E	UTM N	
Maipo	1663	72.2	6.9	3427	05707002-1	372 847	6 282 122	890
Cachapoal	2462	61.6	2.0	2647	06008005-4	356 632	6 209 212	700
Teno	354	41.2	4.8	1865	07103001-6	334 603	6 125 334	900
Bío Bío (Rucalhue)	7252	213.2	1.7	1390	08307002-1	244 162	5 822 456	261
Bío Bío (Llanquén)	3356	96.7	1.9	1466	08317001-8	298 706	5 769 399	780

Cabe destacar diversas particularidades en las cuencas de Cachapoal y Bío Bío. Por un lado, la estación de la cuenca Cachapoal presenta una obra de captación de caudal líquido (Canal Sauzal) 7 km aguas arriba de la estación de aforo. Se asume que i) la concentración de sedimentos registrada es única para toda la cuenca, ii) el caudal líquido total es el medido en dicha estación más el volumen extraído en la obra de desvío, iii) el gasto sólido es el producto entre la suma de caudales líquidos y la concentración. Por otro lado, los datos empleados en la cuenca de Bío Bío, sector Rucalhue, se tomaron en una ubicación distinta a los proporcionados por Bzdigian (1985) debido a la no vigencia de las estaciones empleadas en el año 1985 del río Bío Bío en puente Queuco y en San Pedro, ubicadas 27 y 35 km aguas abajo. Según la información proporcionada por la DGA, la estación 08307002-1, Bío Bío en Rucalhue, cumple con la condición de estar vigente en la medición de gasto sólido en suspensión. Esta estación, por la posición en la que se encuentra, puede ser relacionada con las estaciones de río Bío Bío en San Pedro y Queuco en puente Queuco que fueron empleadas por Bzdigian (1985).

Régimen hidrológico

El régimen hidrológico en la región de los Andes chilenos está influenciado por varios factores, incluyendo la altitud, la latitud, la topografía, los vientos dominantes y las corrientes marinas. Por un lado, la temporada de lluvias en los Andes chilenos generalmente coincide con los meses de invierno en el hemisferio sur, que van de abril a agosto. Durante este período, las precipitaciones pueden ser significativas, especialmente en las regiones australes. Por otro lado, la aportación hídrica por fusión nival también desempeña un papel relevante en el régimen hidrológico de los Andes chilenos. Los deshielos estacionales de los glaciares y nieves temporales contribuyen significativamente al caudal de los ríos durante los meses de verano, lo que ayuda a mantener el suministro de agua en las cuencas hidrográficas.

Las cuencas consideradas, ubicadas en la parte central de la Cordillera de los Andes, presentan un régimen hidrológico similar y que, a nivel sedimentológico, pueden caracterizarse por procesos de transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente (Aguirre-Pe *et al.*, 2000) donde se dan los dos tipos de origen y modos de transporte naturales en cuencas y cursos fluviales (Figura 2a). Éste responde, por un lado, a fenómenos de origen nival (Strömquist, 1985; Tripodi y Fernández, 2000; Vargas, 1999), teniendo sus valores máximos de escorrentía superficial en el periodo de deshielo (septiembre-marzo) debido al derretimiento del manto nival acumulado en la temporada de invierno (Figura 2b). En cambio, las precipitaciones en los meses de abril-agosto aportan menor magnitud a la escorrentía directa (Link *et al.*, 2019), y lo hacen tanto por puesta en suspensión debido al impacto de las gotas de lluvia como por el arrastre asociado a la escorrentía (Figura 2c).

Dado el comportamiento hidrológico de las cuencas estudiadas, se consideran dos niveles de generación y transporte de sólidos en suspensión (Ayala *et al.*, 1984; López-Alvarado y Bzdigian, 1985): uno por derretimiento nival con arrastre a nivel local desde la posición del manto nival; y otro por impacto de las gotas de lluvia a nivel general en el área pluvial disponible.

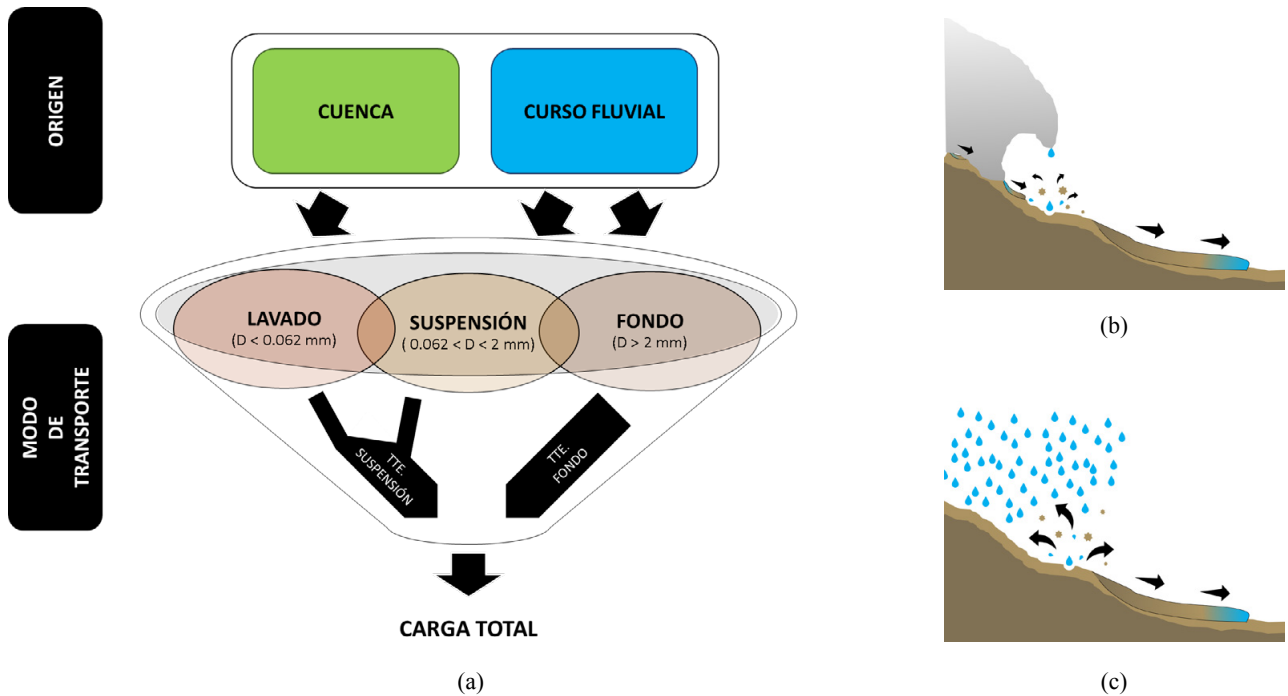


Figura 2 | (a) Clasificación del tipo de sedimentos según origen y modo de transporte. Mecanismos de producción de sedimento en cuencas: (b) por fusión nival; (c) por precipitación.

Régimen sedimentológico

Un patrón sedimentológico es una representación cualitativa y/o cuantitativa del comportamiento sedimentológico medio, temporal y espacial, de una cuenca. Cada cuenca tiene una respuesta sedimentológica particular frente a los estímulos que recibe, consecuencia de variables como son el gasto sólido en suspensión (GS) y los caudales líquidos (Q). Así, un patrón sedimentológico puede identificar la relación que existe entre gasto sólido y caudal que, por estar condicionada por parámetros morfológicos (área aportante, pendiente media de la cuenca, longitud de cauces, etc.), climáticos y geológicos de la cuenca, responde al comportamiento sedimentológico global de dicha cuenca (Bzdigian, 1985).

En el año 1985, Bzdigian estudió cuencas andinas en la zona central de Chile. De este estudio se desprende que la cuantificación del régimen sedimentológico de las cuencas estudiadas se rige por la siguiente expresión:

$$GS = A \cdot Q^B \quad (2)$$

donde GS es el gasto sólido medio mensual en unidades de [ton/mes], Q el caudal líquido medio mensual [m^3/s], A y B son parámetros función de los factores geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca (Skau *et al.*, 1980; Mimikou, 1982). Esta relación permite predecir el comportamiento sedimentológico de las cuencas analizadas con un elevado grado de confianza. Sin embargo, la utilización de otras relaciones no se descarta (Ayala *et al.*, 1984; Bzdigian, 1985; López-Alvarado y Bzdigian, 1985).

Un análisis de consistencia reveló que algunos datos de gasto sólido registrados por la DGA muestran incrementos en los valores de concentración que parecen no tener justificación con los valores de caudal líquido registrados. Existen casos puntuales donde es posible asociarlo a condiciones de avalanchas de sedimentos, ya sea por la acumulación de estos en embalses como por eventos climáticos. Con el objetivo de reducir la incertidumbre y dotar de mayor consistencia a las series temporales, dado que en estas relaciones se trabajan con valores de medios mensuales, se realizaron dos procesos para:

- eliminar los valores de caudal nulo que no entren en la tendencia de la serie;
- filtrar los valores eliminando el percentil 95 superior de los datos medidos de gasto sólido que relacionen magnitudes de caudal mínimos.

De este modo, se determinó la correlación entre el valor medio mensual de caudal líquido y gasto sólido respectivo para obtener los parámetros A y B realizando la calibración de la recta por mínimos cuadrados sobre un eje doble-logarítmico. Sobre dicha representación gráfica se representan los coeficientes de la regresión creada entre estos valores (parámetros A y B de la Ecuación (2)), tanto para la serie de Bzdigian (corroborando los valores obtenidos en su trabajo) como para la serie nueva. De este modo, se puede obtener una nueva serie de valores extendida, desde 1964 a 2010, con el fin de proponer nuevos parámetros A y B sólo en el caso de que el comportamiento sea sostenido en el tiempo.

RESULTADOS

A continuación, se describen y analizan los resultados obtenidos. Debido a la gran cantidad de datos tratados en todas y cada una de las cuencas, a modo de ejemplo solo se representan los resultados de la cuenca Maipo. El resto de datos se encuentra en el Material Suplementario.

Relación caudal líquido – concentración de sedimentos

Para las estaciones consideradas, con el registro de caudal líquido y concentración de sedimento en suspensión, se estudia la calidad de la información considerando el horizonte de datos disponibles y datos correctamente medidos. En la Figura 3 se aprecia que existe una relación entre los máximos de caudal líquido y la concentración de sedimento en suspensión para la estación 05707002-1 (Maipo), siendo coherentes con el fenómeno estudiado (caudales más altos poseen mayor capacidad de arrastre de caudal sólido). Como ejemplo, se aprecia que en el periodo de verano del año 1987 la estación registró mediciones de partículas de sedimento con caudales líquidos nulos, entendidos estos últimos como falta de consistencia. Asimismo, también se aprecian periodos sin registro de datos entre los años 1990-1993 y 1998-2004.

Con el fin de obtener una serie robusta y consistente de datos, los valores anómalos fueron tratados con los procesos anteriormente mencionados (eliminación de valores de caudal nulo y filtrado de caudal sólido elevado asociado a caudal líquido reducido). Los registros de caudal líquido y concentración de sedimento para las estaciones restantes se presentan en el Material Suplementario.

Series de caudal líquido – caudal sólido

Mediante la representación de la serie de datos de caudal líquido y gasto sólido (producto entre la concentración de sedimentos y caudal líquido, ver Ecuación (1)), a escala doble-logarítmica, se puede observar la relación potencial entre ambas variables.

La Figura 4, considerando como escala estacional el periodo anual, presenta la correlación entre caudal líquido y gasto sólido en la estación 05707002-1 (Maipo) para los datos tomados por Bzdigian hasta el año 1985 (serie roja) y la nueva serie considerando los registros desde el año 1985 a 2010 (serie azul). Se observa que existe un aumento en el gasto sólido para los nuevos registros (1985-2010), representando gráficamente por la subida posición de la regresión potencial (recta en escala logarítmica), en comparación con la serie anterior (1964-1985). Se desprende que, para un mismo nivel de caudal líquido, los nuevos registros proporcionan una respuesta con mayor de gasto sólido.

También se puede obtener una representación media considerando que ambos registros forman parte de un solo comportamiento entre el caudal líquido y el sedimento, trabajando toda la información disponible como una sola serie, obteniendo así una nueva expresión media entre ambas regresiones potenciales. La expresión para la serie conjunta de datos se presenta de la forma:

$$GS = 0.0702 \cdot Q^{2.7864} \quad (3)$$

donde GS es el gasto sólido medio mensual en unidades de [ton/mes] y Q el caudal líquido medio mensual [m^3/s] para el horizonte temporal completo en la estación 05707002-1 (Maipo).

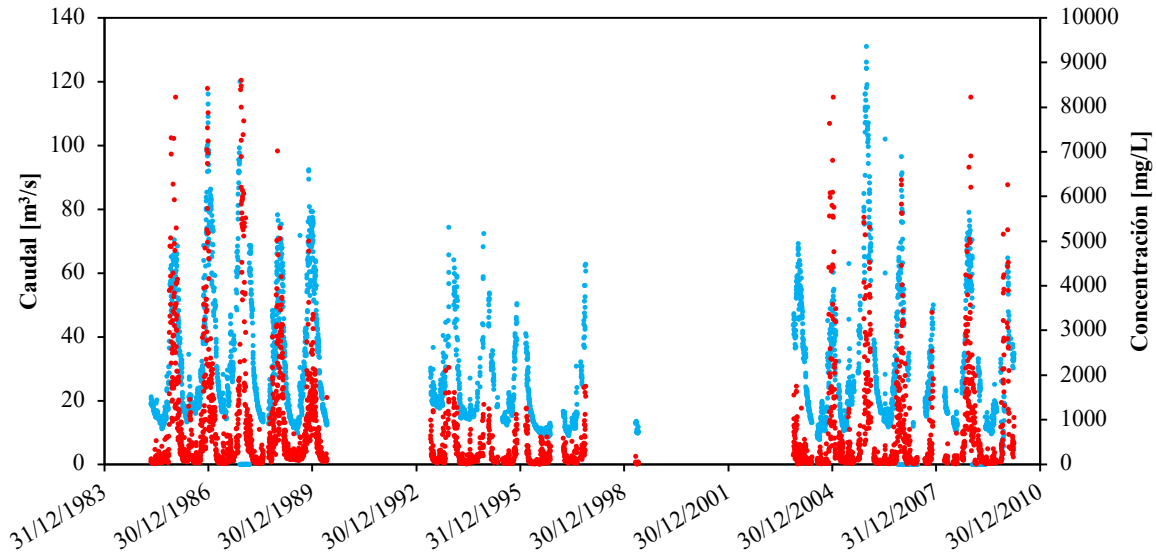


Figura 3 | Distribución temporal de caudal líquido (azul) y concentración de sedimento en suspensión (rojo) medidos en la estación hidrométrica 05707002-1 (Maipo).

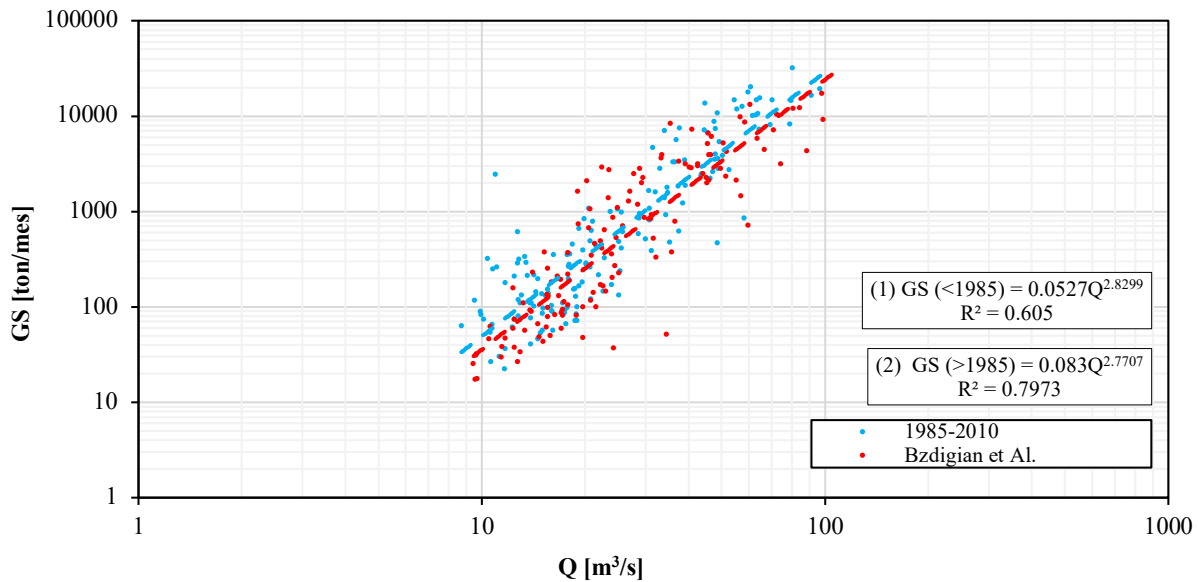


Figura 4 | Correlación entre caudal líquido y gasto sólido en la estación 05707002-1 (Maipo) para el periodo anual: serie de datos previo al 1985 registrados por Bzdigian (rojo) y los datos actualizados desde 1985 hasta 2010 (azul). Expresiones potenciales de la serie de Bzdigian (1) y la nueva correlación potencial propuesta (2).

Discretizando la serie temporal según el régimen hidrológico, es posible obtener las correlaciones en función del origen del tipo de inicio del arrastre. La Figura 5 muestra el gasto sólido para el periodo de deshielo en septiembre-marzo; mientras que la Figura 6 muestra el gasto sólido originados por precipitación líquida en abril-agosto. Como se puede observar, la cuenca Maipo es, en general, menos productiva en el periodo pluvial, no registrándose tampoco valores de caudal líquido elevados que produzcan grandes cantidades de acarreo de sedimentos. Esto se debe a las características de la cuenca, muy influenciada por precipitación en altura de tipo nival, así como la presencia de nieves permanentes.

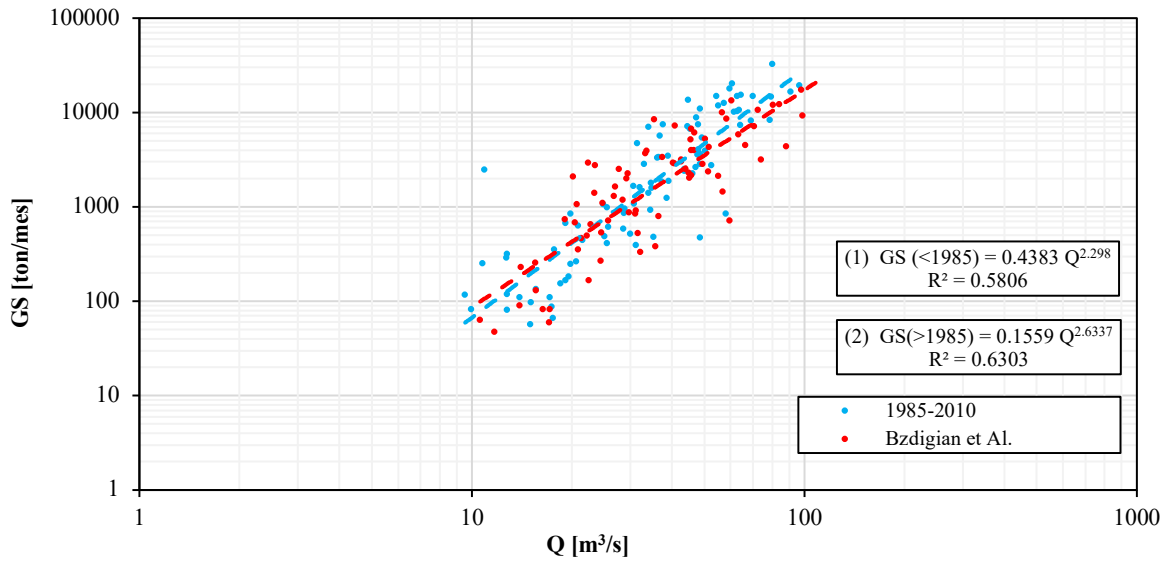


Figura 5 | Correlación entre caudal líquido y gasto sólido en la estación 05707002-1 (Maipo) para el periodo de deshielo (septiembre-marzo): serie de datos previo al 1985 registrados por Bzdigian (rojo) y los datos actualizados desde 1985 hasta 2010 (azul). Expresiones potenciales de la serie de Bzdigian (1) y la nueva correlación potencial propuesta (2).

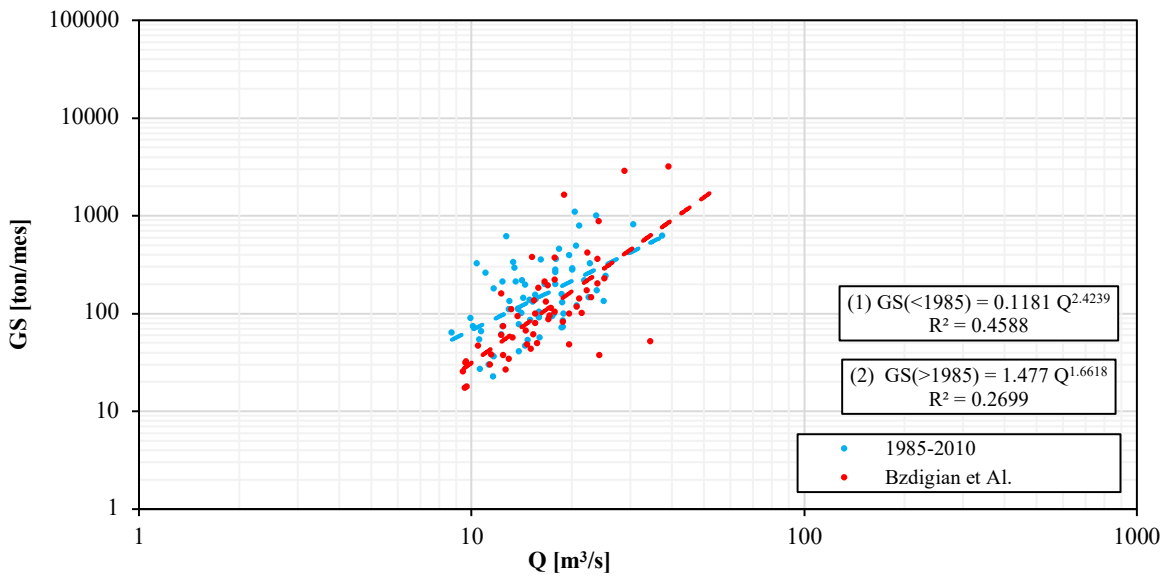


Figura 6 | Correlación entre caudal líquido y gasto sólido en la estación 05707002-1 (Maipo) para el periodo de pluvial (abril-agosto): serie de datos previo al 1985 registrados por Bzdigian (rojo) y los datos actualizados desde 1985 hasta 2010 (azul). Expresiones potenciales de la serie de Bzdigian (1) y la nueva correlación potencial propuesta (2).

De manera equivalente se trabajó el resto de las cuencas consideradas en este documento, evaluando en cada una de ellas las características propias en función de la calidad de los datos obtenidos y comparándola con la primera serie temporal realizada (1964-1985), considerando en detalle la posibilidad de trabajar según qué tan confiables son los datos. Las correlaciones del resto de cuencas consideradas en este documento se encuentran presentadas en el Material Suplementario.

Actualización de los parámetros A y B

La Tabla 2 aglutina los resultados de los parámetros A y B actualizados según la expresión $GS = A \cdot Q^B$ para las cuencas Maipo y Bío Bío, así como los de la serie anterior y la serie extendida. Para las cuencas Cachapoal y Teno no se presentan los resultados de los parámetros A y B debido, en primera instancia, al elevado grado de incertidumbre de los datos y, en segunda instancia, a cambios en el comportamiento del cauce desde el 2005. Las expresiones y correlaciones para estos dos escenarios se encuentran en el Material Suplementario.

Tabla 2 | Valores de los parámetros A y B , así como el coeficiente de determinación (R^2), para las cuencas estudiadas según el tipo de serie (1964-1985, 1985-2010, y serie extendida) y discretizando según el régimen hidrológico de producción de sedimentos (periodo anual, deshielo y pluvial).

Cuenca	Serie/Periodo	A			B			R ²		
		Anual	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial
Maipo	Serie 1985	0.0527	0.4383	0.1181	2.8299	2.2980	2.4239	0.6050	0.5806	0.4588
	Serie nueva	0.0830	0.1559	1.4770	2.7707	2.6337	1.6618	0.6792	0.6303	0.2699
	Serie extendida	0.0702	0.2425	0.4767	2.7864	2.4881	2.0074	0.5768	0.5314	0.3485
Bío Bío (Rucalhue)	Serie 1985	1.1234	4.2303	0.2378	1.0831	0.8388	1.3685	0.1328	0.0680	0.1827
	Serie nueva	0.0917	0.3543	0.0595	1.4233	1.1310	1.5643	0.5665	0.7263	0.6343
	Serie extendida	0.3349	1.1614	0.1321	1.2434	0.9884	1.4487	0.2149	0.0758	0.2490
Bío Bío (Llanquén)	Serie 1985	0.1861	0.1180	0.2687	1.5459	1.6995	1.4288	0.3315	0.4466	0.2669
	Serie nueva	0.2346	0.2127	0.2831	1.3347	1.3292	1.3308	0.7028	0.7962	0.6454
	Serie extendida	0.1547	0.1127	0.2214	1.5085	1.5740	1.4349	0.2787	0.3520	0.2934

En Maipo se observa que para la serie nueva (1985-2010) y periodos de retorno bajos, la producción de sedimentos se incrementó en época pluvial, aunque con mayor dispersión, mientras que se redujo para el periodo de deshielo, a pesar de que el parámetro B se incrementa ligeramente. A nivel anual, la cuenta es más productiva, siendo los valores obtenidos con mayor consistencia desde el punto de vista estadístico.

La cuenca del Bío Bío presenta un comportamiento claramente diferenciado entre la zona situada aguas arriba de los embalses (Llanquén) y la situada aguas abajo (Rucalhue). La serie nueva en Llanquén es sensiblemente más productiva, con incrementos entre el 5 y el 80 % en el parámetro A , a pesar de obtener valores del parámetro B más bajos que en la serie de Bzdigian (1985). La correlación de estos datos es la más elevada de todas las series. Para Rucalhue la productividad de la cuenca baja notablemente, reduciéndose el parámetro A por encima del 75 %; mientras que el parámetro B se incrementa entre el 15 y el 35 %. Esto se debe al efecto decantador que producen las presas de las centrales hidroeléctricas (ver Figura 1d) en los embalses (Cobo, 2008; López-Gómez et al., 2024; Palau-Ibars, 2002; Reyna et al., 2011), y que tiene efectos a nivel morfológico y de calidad del agua (Batalla et al., 2008; Roura-Carol et al., 2008; Sánchez-Juny et al., 2023; Sanz-Montero et al., 1998).

DISCUSIÓN

Cambios y patrones observados

Linealizando la Ecuación (2), mediante el operador de logaritmo, permite obtener la siguiente expresión:

$$\log(GS) = \log(A) + B \log(Q) \quad (4)$$

La Ecuación (4) representa una recta en escala logarítmica, donde el coeficiente B es la pendiente de la recta y A el término independiente. De esta aproximación se desprende que, para el periodo anual y de deshielo de la cuenca Maipo, las pendientes (B)

mantienen su orden de magnitud, siendo de mayor influencia el coeficiente A , el cuál es congruente en que la serie nueva suba en su posición (en escala anual) con el aumento del coeficiente A de 0.0527 a 0.0830. Como condición media, se puede utilizar el valor del parámetro B como 2.7864 de la serie extendida, ya que se muestra menos sensible a los cambios producidos en la cuenca.

Respecto a los periodos estacionales, se aprecia una clara tendencia al cambio influenciados principalmente por las pendientes de la correlación obtenida (B). Para el periodo de deshielo, los nuevos datos muestran una menor tendencia al arrastre de sólidos para los caudales más bajos registrados coincidentes con la disminución del coeficiente (A), pero una mayor capacidad de arrastre a medida que los caudales aumentan, coherentemente con el aumento de la pendiente (B). La situación contraria ocurre en el periodo pluvial, pues existe un aumento del parámetro (A) y una disminución del parámetro (B).

Estacionalidad, escala y representatividad de los datos

La metodología utilizada considera una representación promedio de los valores de caudal líquido y sólido dentro del mes en el cual han sido registrados. Dado que se cuenta con los datos a escala diaria (medición puntual), se puede replicar la obtención de parámetros A y B mediante una correlación con todo el abanico de datos diarios registrados. De esta manera, la Figura 7 muestra los resultados para la serie anual en la cuenca del Maipo.

Desagregando la serie anual de escala mensual a escala diaria, se pueden obtener los parámetros A y B , y el coeficiente de determinación (R^2), para los periodos anual, deshielo y pluvial (Tabla 3). Realizando la comparativa directa con los resultados obtenidos a escala media mensual para la misma estación (Tabla 2), se puede observar que los parámetros obtenidos mediante la regresión de mínimos cuadrados en la serie diaria arrojan valores de los coeficientes A , B y R^2 , en el mismo orden de magnitud. Por tanto, se demuestra la robustez del método empleado para obtener los parámetros, siendo independiente de la escala temporal empleada.

Tabla 3 | Valores de las constantes A y B para la cuenca del 05707002-1 (Maipo) para la serie 1985-2010 mediante mínimos cuadrados a escala diaria y para la serie extendida, considerando intervalos anuales, deshielo y pluvial.

Cuenca	Serie/Periodo	A			B			R ²		
		Anual	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial
Maipo	Serie nueva (diaria)	0.0830	0.1559	1.4770	2.7707	2.6337	1.6618	0.6792	0.6303	0.2699

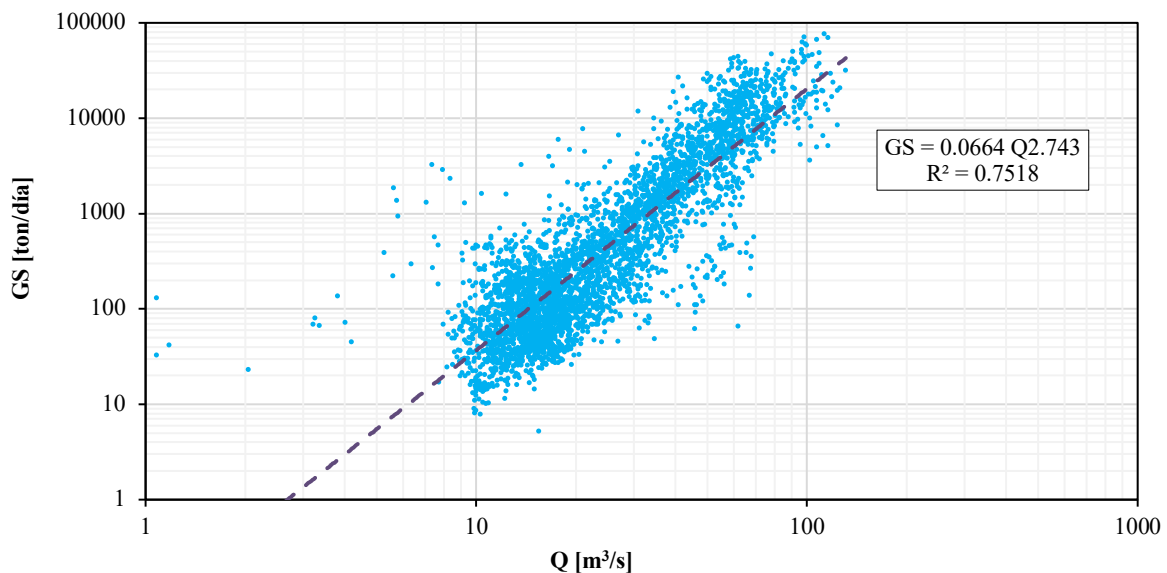


Figura 7 | Correlación entre caudal líquido y gasto sólido en la estación 05707002-1 (Maipo) sobre los datos diarios para el periodo anual de la serie 1985-2010.

Por tanto, considerando que los parámetros A y B son adimensionales, se puede estimar el comportamiento del gasto sólido a partir del caudal líquido, tal como se representa en la Figura 8. Los resultados mostrados abren la posibilidad de que, dado que los parámetros A y B son dependientes de aspectos morfológicos de la cuenca (entre otras variables), se pueda estimar el gasto sólido de otras cuencas sin información sedimentológica. A pesar de ello, esto solo sería válido en cuencas con características geomorfológicas similares, sin olvidar que además de estos factores también se debe contar con el material disponible para acarreo, los cuales están muy presentes en cuencas de alta montaña.

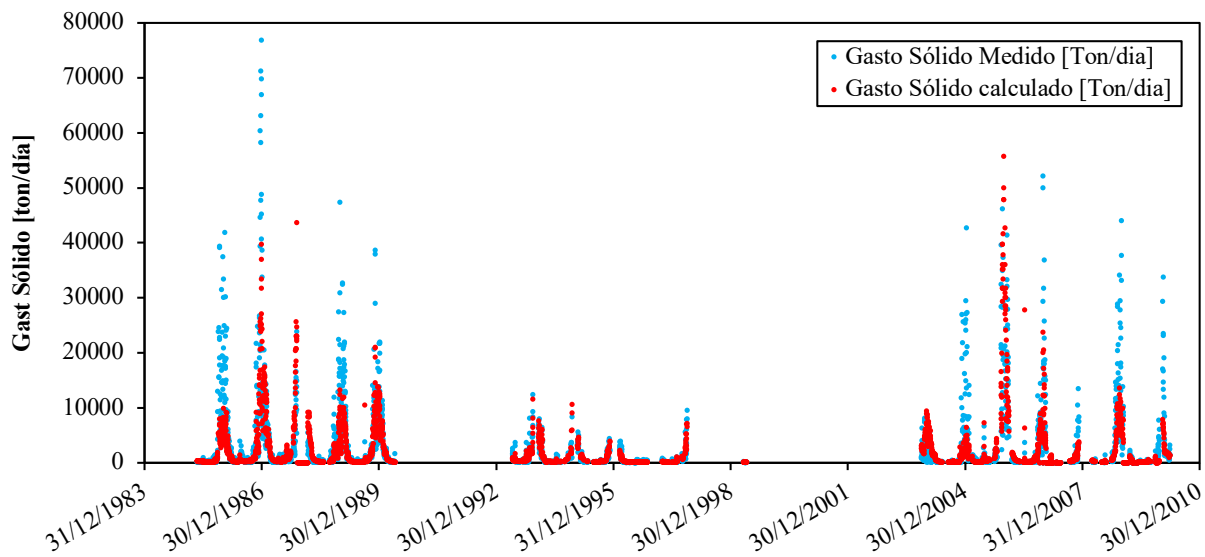


Figura 8 | Valores de gasto sólido (rojo) para la cuenca 05707002-1 (Maipo) obtenidos a partir de la correlación entre caudal líquido y sólido, teniendo como valor conocido el caudal líquido y siendo comparado con la medición real (azul) para cuantificar el comportamiento de la correlación calculada.

Dado que la hipótesis inicial relaciona los parámetros A y B con patrones hidromorfológicos, el cambio en los valores obtenidos en estos parámetros implica una variación en algunas de estas variables hidrológicas. Asumiendo la morfología como una constante –salvo cambios antrópicos o eventos extremos–, se consideran dos patrones que, al cambiar en las nuevas series de tiempo, pueden llegar a modificar el caudal sólido arrastrado por las cuencas: el aumento de temperaturas y la variación en los usos del suelo por efectos del cambio climático (Froese y Schilling, 2019). Ello implica una posición de la isoterma nival más elevada, considerando en periodos de deshielo una mayor cantidad de material disponible a ser arrastrado y, por ende, un gasto sólido mayor para la época de deshielo. Por otra parte, los periodos de sequía y años hidrológicos de condición seca vistos en los últimos años en la zona central de Chile (Fernández-Larrañaga, 1997) implican que eventos levemente intensos se desarrollen sobre un suelo de condición seca, dando respuesta al mayor acarreo de caudal sólido para caudales líquidos de menor orden.

Aterramiento de embalses

La construcción de presas supone una barrera para la conectividad longitudinal de ríos, cuyas consecuencias a nivel sedimentológico se traducen en la interrupción parcial o total del transporte de sedimentos (Casamor y Calafat, 2018; Palau-Ibars, 2002; Sanz-Ramos *et al.*, 2019). El sedimento queda retenido en los embalses, reduciendo su capacidad y menguando su vida útil y operatividad (López-Gómez *et al.*, 2024; Sánchez-Juny *et al.*, 2023). La utilización de expresiones que relacionan la aportación temporal de caudal sólido con el caudal líquido, como la analizada, muestran su utilidad a la hora de estimar la cantidad de sedimento que está llegando a un embalse y, por ende, la reducción de la capacidad del mismo a lo largo del tiempo.

A modo de ejemplo, se ha evaluado la aportación de sedimento en suspensión, en $\text{m}^3/\text{año}$, al embalse de la CH Ralco, cuya capacidad nominal es de 1222 hm^3 . Para ello se asume que el gasto líquido evaluado en la estación de Llanquén como representativo para evaluar el caudal sólido en suspensión entrante en el embalse. Este ejercicio se realizó para el caudal medio mensual mínimo ($48.4 \text{ m}^3/\text{s}$), promedio ($135.8 \text{ m}^3/\text{s}$) y máximo ($217.1 \text{ m}^3/\text{s}$) observados de la serie histórica analizada (1964-2018) para esta estación.

La Tabla 4 resume el volumen medio anual de sedimento en suspensión entrante en el embalse de Ralco de acuerdo a los parámetros A y B obtenidos para la estación de Llanquén. Además de las diferencias ya observadas entre los distintos regímenes hidrológicos, con una aportación anual de gasto sólido en suspensión un orden de magnitud de diferencia entre la época de deshielo y la pluvial, se observa que en la serie de 1985 las cuencas fueron más productivas. Esto se debe a que la aportación media del río fue entorno a un 31 % superior respecto a la serie con datos nuevos, y un 12% también superior para la serie extendida.

Tabla 4 | Estimación del volumen de sedimento medio anual ($\text{m}^3/\text{año}$) entrante en el embalse de Ralco según los parámetros estimados para el gasto sólido función régimen hidrológico de la Tabla 2 y el caudal medio mínimo, medio y máximo.

Caudal	Serie/Periodo	Anual	Deshielo	Pluvial
Mínimo	Serie 1985	615.5	136.5	4.4
	Serie nueva	184.5	168.3	19.6
	Serie extendida	314.4	133.5	3.0
Medio	Serie 1985	3553.5	596.2	6.2
	Serie nueva	726.8	664.1	40.5
	Serie extendida	1594.8	586.8	3.9
Máximo	Serie 1985	7887.2	1165.5	7.2
	Serie nueva	1355.9	1239.9	56.2
	Serie extendida	3337.4	1150.3	4.5

Cabe destacar que las tasas de aportación de sedimento en suspensión no suponen un riesgo a medio-largo plazo para el embalse de Ralco, siendo el tiempo necesario para alcanzar el aterramiento total del vaso superior a la vida útil de este tipo de infraestructuras. Empero, es necesario indicar que la tasa de sedimentación de cualquier embalse es consecuencia no solo de la aportación de sedimento en suspensión, sino también por carga de fondo (Fuentes-Norambuena, 2018; Lecaros-Sánchez, 2011). Por tanto, los muestreos de sedimento deben contemplar ambos modos de transporte para poder comprender de manera holística los patrones de sedimentológicos en cuencas.

CONCLUSIONES

La obtención de patrones sedimentológicos en cuencas de alta montaña es una actividad crucial para comprender su funcionamiento sedimentológico. Los trabajos de Bzdigian y López-Alvarado llevados a cabo con datos de 1964 a 1985 han sido reevaluados y actualizados. Debido a la interrupción de mediciones, no fue posible la actualización de la totalidad de cuencas inicialmente consideradas, reduciendo el número a la estación de la cuenca del río Maipo y las estaciones de Llanquén y Rucalhue del río Bío Bío. Esta interrupción en la serie de datos se debe a la falta de mediciones de concentración de sólidos en suspensión, que todavía se realizan de forma manual.

Sobre la cuenca del río Maipo se puede apreciar que, en el periodo anual, para el mismo nivel de caudal líquido el gasto sólido relacionado es mayor. Para el periodo de deshielo, la nueva serie muestra una menor tendencia al arrastre de sólidos para los caudales más bajos registrados coincidentes con la disminución del patrón A , pero una mayor capacidad de arrastre a medida que los caudales líquidos aumentan, coherentemente con el incremento de la pendiente de la función de tendencia. La situación contraria ocurre en el periodo pluvial, pues existe un aumento del parámetro A y una disminución del parámetro B . En cuanto a las cuencas de la cuenca del Bío Bío, se presenta una disminución de los patrones A y B , respondiendo a una menor capacidad de arrastre de sólidos para cada una de las estacionalidades consideradas. Se ligan estos resultados debido al desarrollo de embalses en el cauce del río Bío Bío, estructuras hidráulicas que tienen la característica de retener sedimento.

La actualización de los parámetros que caracterizan el régimen sedimentológico de las cuencas estudiadas debe servir, por un lado, para rellenar la serie bajo condiciones no extremas y, por otro lado, para extender esta metodología a cuencas no aforadas de alta montaña de características similares a las analizadas.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

El material suplementario está disponible en <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/22713/17203>.

REFERENCIAS

- Aguirre-Pe, J., Olivero, M., Moncada, A. 2000. Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente. *Ingeniería del agua*, 7(4), 353–365. <https://doi.org/10.4995/ia.2000.2851>
- Ayala, L., López-Alvarado, A., Bzdigian, K. 1984. Producción de sedimentos en cuencas andinas de Chile. *Jornadas de Hidrología de Nieves y Hielos En América Del Sur*. Santiago, Chile, 3 al 8 de diciembre 1984.
- Ayala, L., López-Alvarado, A., Marín, P. 1995. Factores hidráulicos y mecánico fluviales condicionantes del control hidrométrico en ríos de montaña. *Ingeniería del agua*, 2(2), 63–75. <https://doi.org/10.4995/ia.1995.2678>
- Batalla, R. J., Vericat, D., Palau, A. 2008. Efectos de las presas en la dinámica geomorfológica del tramo bajo del Ebro. Crecidas controladas. *Ingeniería del agua*, 15(4), 243–255. <https://doi.org/10.4995/ia.2008.2938>
- Bzdigian, K. 1985. *Patrones sedimentológicos de los principales ríos de la zona central de Chile*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Casamor, J., Calafat, A. 2018. El problema del aterramiento de embalses y el cálculo de las reservas hidráulicas. *Tierra y Tecnol.* (52), <https://doi.org/10.21028/jlc.2018.10.01>
- Cobo, R. 2008. Los sedimentos de los embalses españoles. *Ingeniería del agua*, 15(4), 231–241. <https://doi.org/10.4995/ia.2008.2937>
- DGA, 1991. *Manual básico para instrucción de hidromensores*. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas (DGA). Departamento de Hidrología. Santiago de Chile, Chile.
- DGA, 2020. *Análisis crítico de la red de sedimentos de la DGA, Informe final*. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas (DGA). Departamento de Conservación y Protección de los recursos Hídricos. Santiago de Chile, Chile.
- DGA, 2024. *Estadísticas estaciones DGA*. Dirección General del Agua (DGA). Ministerio de Obras Públicas. Disponible en <https://dga.mop.gob.cl/servicioshidrometeorologicos/Paginas/default.aspx>
- Fernández-Larrañaga, B. 1997. Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile central. *Ingeniería del agua*, 4(4), <https://doi.org/10.4995/ia.1997.2734>
- Froese, R., Schilling, J. 2019. The Nexus of Climate Change, Land Use, y Conflicts. *Curr. Clim. Chang. Reports*, 5(1), 24–35, <https://doi.org/10.1007/s40641-019-00122-1>
- Fuentes-Norambuena, A.P. 2018. *Evaluación de alternativas de reducción del volumen para almacenamiento de sedimentos aportantes a embalses de riego mayores. Aplicación a un caso en Chile*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Santiago de Chile
- Kang, S., Zhang, U., Qian, Y., Wang, H. 2020. A review of black carbon in snow and ice and its impacts on the cryosphere. *Earth-Science Reviews*, 210(2020), Article 103346. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103346>
- Lecaros-Sánchez, M.H. 2011. *Estudio de sedimentación en el embalse Rapel*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Santiago de Chile.

- Link, O., Brox-Escudero, L.M., González, J., Aguayo, M., Torrejón, F., Montalva, G., Eguibar-Galán, M.Á. 2019. A paleo-hydro-geomorphological perspective on urban flood risk assessment. *Hydrological Processes*, 33, 3169–3183. <https://doi.org/10.1002/hyp.13590>
- López-Gómez, D., de Blas-Moncalvillo, M., Cuéllar-Moro, V. 2024. Herramientas para la gestión sostenible de la sedimentación en el embalse de Marmolejo (España). *Ingeniería del agua*, 28(1), 1–16, <https://doi.org/10.4995/ia.2024.20376>
- López-Alvarado, A., Bzdigian, K. 1988. Influencia de factores geomorfológicos en la producción de sedimentos en cuencas andinas chilenas. *Memorias del XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Ministerio de Educación Superior, 5 al 9 de Julio de 1988, San Pablo, Brasil.
- López-Alvarado, A., Bzdigian, K. 1985. Resultados preliminares de un estudio destinado a definir patrones sedimentológicos en algunas cuencas andinas de la zona central de Chile. *VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile, pp. 261–278.
- Mimikou, M. 1982. An investigation of suspended sediment rating curves in western and northern Greece. *Hydrol. Sci. J.*, 27(3), 369–383, <https://doi.org/10.1080/02626668209491116>
- Palau-Ibars, A. 2002. La sedimentación en embalses. Medidas preventivas y correctoras. *Actas del I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente*, vol. II, pp. 847–856. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.
- Reyna, S. M., Reyna, T., Lábaque, M. 2011. Sedimentos en embalses - aplicación de modelos. *Memorias del Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, p. 11. Hidráulica fluvial: procesos de erosión y sedimentación, obras de control y gestión de ríos, Santiago del Estero, Argentina. 2-4 noviembre de 2011.
- Roura-Carol, M., Armengol, J., Jaime, F., Dolz-Ripollés, J. 2008. Incidencia en los embalses de Mequinenza y Ribarroja en el transporte sólido en suspensión del río Ebro. *Ingeniería del agua*, 15(4), 221–229. <https://doi.org/10.4995/ia.2008.2936>
- Ruiz-Flaño, P., Arnáez Vadillo, J., Lasanta Martínez, T., Ortigosa Izquierdo, L. M. 2008. Procesos de erosión y pérdidas de suelo tras lluvias intensas en viñedos de La Rioja (España). *Zubia*, 25–26, 61–73.
- Sánchez-Juny, M., Larriva, H., Estrella-Toral, S., Sanz-Ramos, M. 2023. Modelización de corrientes de turbiedad en embalses. Caso de estudio: Embalse Amaluza (Ecuador). *Ingeniería del agua*, 27(4), 253–268. <https://doi.org/10.4995/ia.2023.20150>
- Sanz-Montero, M.E., Cobo-Rayán, R., Gómez Montaña, J. L., Avendaño Salas, C. 1998. Composición de los sedimentos acumulados en embalses españoles. *Ingeniería del agua* 5(4), 21–28. <https://doi.org/10.4995/ia.1998.2768>
- Sanz-Ramos, M., Olivares Cerpa, G., Bladé, E. 2019. Metodología para el análisis de rotura de presas con aterramiento mediante simulación con fondo móvil. *Ribagua*, 6(2), 138–147. <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1705198>
- Skau, C., Brown, J., Nadolski, J. 1980. Snowmelt sediment from Sierra Nevada headwaters. *Symposium on Watershed Management. American Society of Civil Engineers. Committee on Watershed Management*. Boise, Idaho, July 21-23, 1980, 418–429.
- Strömquist, L. 1985. Geomorphic impact of snowmelt on slope erosion and sediment production. *Zeitschrift für Geomorphol.*, 29(2), 129–138. <https://doi.org/10.1127/zfg/29/1985/129>
- Trenberth, K.D, 2011. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1), 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- Trípodí, D., Fernández, B. 2000. Cobertura NIVAL y ENOS en el pronóstico de caudales en cuencas de montaña. *Ingeniería del agua*, 7(2), 117–127. <https://doi.org/10.4995/ia.2000.2839>
- Vargas, X. 1999. Corrientes de detritos en la quebrada de Macul, Chile. Estudio de caudales máximos. *Ingeniería del agua*, 6(4), 341–344. <https://doi.org/10.4995/ia.1999.2798>