



Procesos de acorazamiento en un río tropical regulado, el caso del río La Miel*

Juan Daniel Ríos Arboleda^a ■ Andrés Vargas Luna^b

Resumen: En el presente estudio se analiza el proceso de acorazamiento (blindaje) que se presenta en el río La Miel (Colombia), un importante río tropical regulado y fuertemente modificado en sus regímenes hidrológicos, hidráulicos y sedimentológicos. Para confirmar la hipótesis del acorazamiento se emplean tres enfoques diferentes: 1) verificación cualitativa del proceso de acorazamiento realizada durante un recorrido de campo; 2) verificación cuantitativa del acorazamiento con el empleo del criterio definido por Little y Meyer para la desviación geométrica estándar de la granulometría del lecho (determinada con el *software* Basegrain), y 3) análisis de los registros de carga de sedimentos en suspensión y de fondo en las estaciones de monitoreo hidrosedimentológico. Los resultados indican que el río La Miel, efectivamente, se encuentra acorazado, según la evidencia de campo y la marcada disminución en la carga de sedimentos de fondo; además, por un lado, se identifica que el proceso de acorazamiento se ha dado en escalas de tiempo más cortas que las reportadas en la literatura para ríos extratropicales, debido al exceso de capacidad de transporte producido por el aumento sistemático de los caudales mínimos, luego de la regulación y los trasvases de los ríos Guarín y Manso. Por otro lado, podemos indicar que efectivamente existe un umbral de caudal importante (234 m³/s), el cual se debe superar para que se rompa la coraza y se registre transporte de la carga de fondo.

Palabras clave: procesos de acorazamiento; ríos tropicales; ríos regulados; río La Miel

Recibido: 17/11/2023.

Aceptado: 16/03/2024.

Disponible en línea: 30/06/2024.

Cómo citar: J. D. Ríos Arboleda y A. Vargas Luna, «Procesos de acorazamiento en un río tropical regulado, el caso del río La Miel», Cien.Ing.Neogranadina, vol. 34, n.º 1, pp. 23–36.

* Artículo de investigación.

a Magíster en ingeniería-recursos hidráulicos, ingeniero civil, de la Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.

Correo electrónico: juan.riosar@campusucc.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4863-9968>

b Doctor en ingeniería hidráulica, magíster en recursos hidráulicos e ingeniero civil, de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: avargasl@javeriana.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5317-8975>

Armoring Processes in a Regulated Tropical River: La Miel River Case

Abstract: This study investigates the armoring process occurring in the La Miel River, Colombia, an essential tropical river subject to regulation and significant modification in its hydrological, hydraulic, and sedimentological dynamics. Three distinct methodologies were employed to validate the armoring hypothesis: 1) qualitative assessment of armoring conducted during fieldwork, 2) quantitative verification of armoring utilizing the criteria outlined by Little and Meyer for the geometric standard deviation of bed granulometry (determined through BASEGRAIN software), and 3) analysis of suspended and bed sediment load records at hydrosedimentological monitoring stations. The findings indicate that the La Miel River exhibits armoring, substantiated by field observations and a notable decrease in bed sediment load. Moreover, it is observed that the armoring process has occurred on shorter time scales compared to extratropical rivers, attributed to excess transport capacity resulting from the systematic elevation of minimum flows post-regulation and transfer of the Guarino and Manso rivers. Additionally, a significant flow threshold ($234 \text{ m}^3/\text{s}$) is identified, which must be surpassed to disrupt the armor layer and initiate bed load transport.

Keywords: Armoring Processes; Tropical River; Regulated River; La Miel River

Processos de erosão em um rio tropical regulado, o caso do rio La Miel

Resumo: No presente estudo é analisado o processo de erosão que ocorre no rio La Miel (Colômbia), um importante rio tropical regulado e fortemente modificado em seus regimes hidrológicos, hidráulicos e sedimentológicos. Para confirmar a hipótese de erosão são utilizados três enfoques diferentes: 1) verificação qualitativa do processo de erosão realizada durante um percurso de campo; 2) verificação quantitativa da erosão com o uso do critério definido por Little e Meyer para o desvio geométrico padrão da granulometria do leito (determinado com o software Basegrain); e 3) análise dos registros de carga de sedimentos em suspensão e de fundo nas estações de monitoramento hidrosedimentológico. Os resultados indicam que o rio La Miel, efetivamente, está erodido, segundo a evidência de campo e a marcada diminuição na carga de sedimentos de fundo; além disso, por um lado, identifica-se que o processo de erosão ocorreu em escalas de tempo mais curtas do que as reportadas na literatura para rios extratropicais, devido ao excesso de capacidade de transporte produzido pelo aumento sistemático das vazões mínimas, após a regulação e os transvases dos rios Guarino e Manso. Por outro lado, podemos indicar que realmente existe um limiar de vazão importante ($234 \text{ m}^3/\text{s}$), que deve ser superado para que os sedimentos se rompam e seja registrado o transporte da carga de fundo.

Palavras-chave: processos de erosão; rios tropicais; rios regulados; rio La Miel

Introducción

El acorazamiento consiste en la formación de una capa relativamente delgada de material grueso granular (coraza) sobre materiales más finos (subcapa), como respuesta directa de los sistemas fluviales a la regulación de los caudales y al corte en el suministro de sedimento producto de la construcción de presas y la adecuación de sus respectivos embalses [1], en los que se aloja la mayor parte del sedimento y los nutrientes provenientes desde aguas arriba. Entender la dinámica del acorazamiento es importante, porque juega un rol fundamental en lo siguiente: 1) la estabilidad del lecho, y 2) en los servicios ecosistémicos que puede soportar el tramo del río aguas abajo de presas y embalses.

Los procesos de acorazamiento han sido y siguen siendo de gran interés para la comunidad académica y profesional [2], puesto que los proyectos de generación hidroeléctrica continúan en desarrollo y operación debido a su denominación de mecanismo de desarrollo limpio. Por ejemplo, desde la época de los años setenta hasta hoy existen contribuciones como las de Little y Meyer [3], quienes fueron pioneros en documentar en que a medida que el material fino es transportado y sale del sistema de análisis, las tasas de transporte de sedimentos de fondo decrecen, debido a que cada vez hay menos material disponible para el transporte, y si las condiciones de flujo permanecen suficiente tiempo (ejemplo, un sistema fluvial regulado en el que el caudal turbinado responde a la demanda horaria de energía), la tasa de transporte de sedimento de fondo se aproxima a cero.

Posteriormente, se presenta la hipótesis de igual movilidad [4] para las tasas de transporte de sedimentos finos (q_{AB}) y gruesos (q_{BB}), sumada a la definición formal del concepto de movilidad relativa (r_{AB}):

$$r_{AB} = \frac{q_{AB}}{q_{BB}} \quad (1)$$

En paralelo, [5] al usar datos de campo para estudiar la distribución del tamaño de la carga de sedimentos de fondo, en corrientes con lecho de grava acorazados, formulan un método para calcular la carga de fondo total que requiere solo el tamaño de grano medio (D_{50}) de la subcapa, en lugar de la distribución de tamaño completa.

Más recientemente, el proceso ha sido analizado mediante ensayos de laboratorio [6], [7], [8] y estudios de campo [9], [10], [11], sin embargo, no se encuentra en la literatura documentado un proceso de acorazamiento de un río tropical regulado.

Dada la necesidad de conocer la distribución granulométrica de los materiales que conforman el lecho del canal, se ha empleado típicamente el denominado conteo de piedras (*pebble count*) propuesto por Wolman [12], sin embargo, este método requiere de un tiempo importante, y cuando se deben realizar campañas de monitoreo extensas en un tramo importante de río, no es posible realizarlo; a raíz de esto han surgido varios métodos alternativos para la obtención de la curva granulométrica por medio del procesamiento digital de imágenes, procedimiento que se ha popularizado como resultado directo de la reducción en el precio de las computadoras y de las mejoras en la capacidad de procesamiento [13]. Múltiples autores han realizado aportes al análisis granulométrico mediante imágenes, por ejemplo, análisis de texturas en fotografías aéreas [14], análisis de textura de escaneos con láser terrestre [15], análisis de frecuencia de microfotografías digitales [16], entre otros, y han propuesto modelos para obtener la curva granulométrica a partir de imágenes.

El engrosamiento de la superficie del lecho es típico de tramos de ríos que se están degradando debido a un déficit en el suministro de sedimentos (típico de tramos aguas abajo de presas), pero las corrientes con lecho de grava que no se degradan también pueden exhibir algún grado de blindaje en relación con sus patrones hidrológicos específicos [17].

En los últimos años han surgido modelos probabilísticos [18], [19] para determinar el tamaño del grano del lecho posterior a la regulación, sin embargo, aún son más abundantes las contribuciones sobre acorazamiento a partir de ensayos de laboratorio [20], [21], [22], [23]. Por otro lado, recién han aparecido trabajos que analizan el espesor de la coraza a partir de simulaciones [24], sin importar la aproximación; es importante entender el proceso de formación de la coraza, pues esta puede limitar los procesos de incisión del lecho [25]. Así mismo, es importante diferenciar la causa

del acorazamiento [26]. Por último y no menos importante, se destacan los trabajos en México de García y Maza [27], que aportan una metodología detallada para el cálculo del diámetro máximo de la coraza en función de la distribución de tamaños y la desviación estándar geométrica.

En este artículo se analiza el proceso de acorazamiento que se presenta en el río La Miel desde tres enfoques diferentes: 1) verificación cualitativa del proceso de acorazamiento llevada a cabo en campo removiendo la coraza y constatando que el sustrato es mucho más fino; 2) verificación cuantitativa del acorazamiento con el empleo del criterio definido por Little y Meyer [3] para la desviación geométrica estándar de la granulometría del lecho, y 3) análisis de los registros de carga de sedimentos en suspensión y de fondo, mostrando estos últimos una marcada disminución, lo que es consistente con lo reportado por Vázquez-Tarrió [17] en su compilación de datos de 49 corrientes naturales con lecho de grava y procesos de acorazamiento. Además, se analiza la alteración al régimen hidrológico con la información disponible para los periodos de prepresa (1965-2002) y pospresa (2002-2021), identificando los efectos de la regulación del caudal.

Finalmente, es debido resaltar que el aporte específico a la ingeniería es una metodología clara para el análisis de procesos de acorazamiento en ríos tropicales aguas abajo de presas y embalses, probada al emplear el caso de estudio.

Zona de estudio

La cuenca hidrográfica del río La Miel se encuentra ubicada en el oriente del departamento de Caldas, en zona limítrofe con el departamento de Antioquia (figura 1); tiene una forma elongada en dirección NE y hace parte de la megacuenca del río Grande de la Magdalena, al que entrega sus aguas en el corregimiento de Buenavista, municipio de La Dorada (Caldas), a una elevación promedio de 150 msnm. La altura máxima de la cuenca se ubica a los 3600 msnm en la divisoria. La cuenca hidrográfica limita al sur con la cuenca del río Guarinó, al oriente con el río Grande de la Magdalena y al noroccidente con la cuenca del río Samaná Sur.

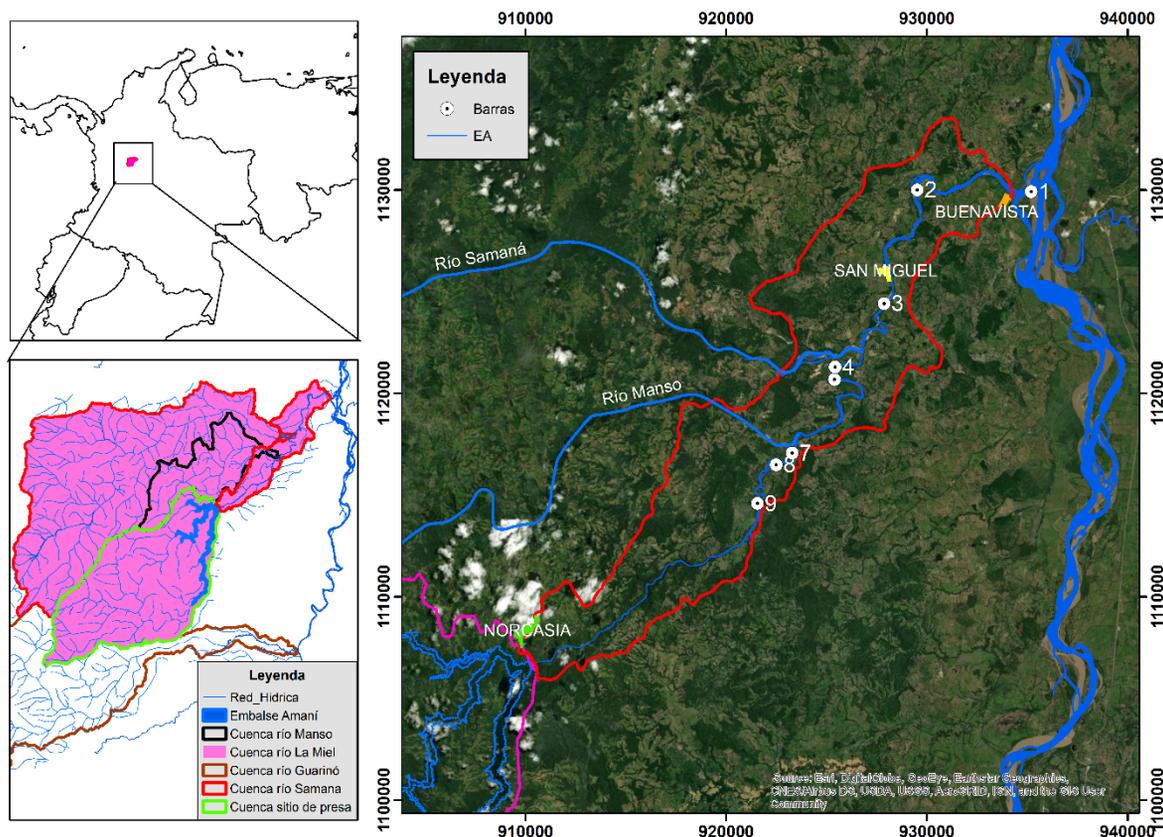
El área de estudio específica corresponde a un tramo de cerca de 47 kilómetros del río La Miel localizado entre el sitio de presa de la central hidroeléctrica Miel I y la desembocadura en el río Magdalena (figura 1). El proyecto hidroeléctrico Miel I aprovecha el caudal de las cuencas de los ríos La Miel (donde se localizan las obras principales), Moro, Guarinó y Manso (estos dos últimos mediante el trasvase de un porcentaje de sus caudales a la cuenca del río La Miel). La Central tiene una capacidad instalada de 396 mw en tres unidades e inició su operación comercial en diciembre de 2002 [28]. El caudal de máxima generación es de 216 m³/s y el embalse Amaní tiene una capacidad de almacenamiento de 571 millones de metros cúbicos, de los cuales 444.98 millones de metros cúbicos corresponden al volumen útil.

Desde el 2010, la central hidroeléctrica Miel I cuenta con el trasvase Guarinó en operación comercial, el cual aumentó la capacidad de generación de la Central a 308 gwh-año. El trasvase Manso entró en operación en 2013 y se encuentra localizado en el departamento de Caldas en límites de los municipios de Samaná y Norcasia, en la vertiente oriental de la cordillera Central. El río La Miel, aguas abajo de la presa Patángoras (la cual posee un vertedero de borde libre, sin compuertas), se caracteriza por un lecho con distribución de tamaños muy uniforme y grueso granular (figura 2).

Desde el punto de vista geomorfológico, la zona de estudio corresponde a una transición entre valle estrecho y planicie aluvial. Inicia con un cañón estrecho entre la presa Patángoras y el sector conocido como Puente Hierro, donde gradualmente se transforma en planicie aluvial y el río tiene la libertad de divagar, gracias al espeso depósito aluvial sobre el cual fluye.

En cuanto al alineamiento en planta es necesario indicar que se caracteriza por un primer tramo conformado por una sucesión de segmentos de canal con alineamiento en planta semirrectos conectados por curvas suaves; dicha situación abarca el sector donde se localiza el túnel de fuga (aproximadamente a cuatro kilómetros aguas abajo de la presa) y hasta un poco más aguas abajo de la sección de monitoreo denominada La

Figura 1. Localización general de la zona de estudio: a) macroubicación, b) cuencas hidrográficas tributarias y c) tramo de estudio (los números indican la localización de las barras de sedimento muestreadas)



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Apariencia del lecho: a) en la cuenca media, b) en la cuenca baja



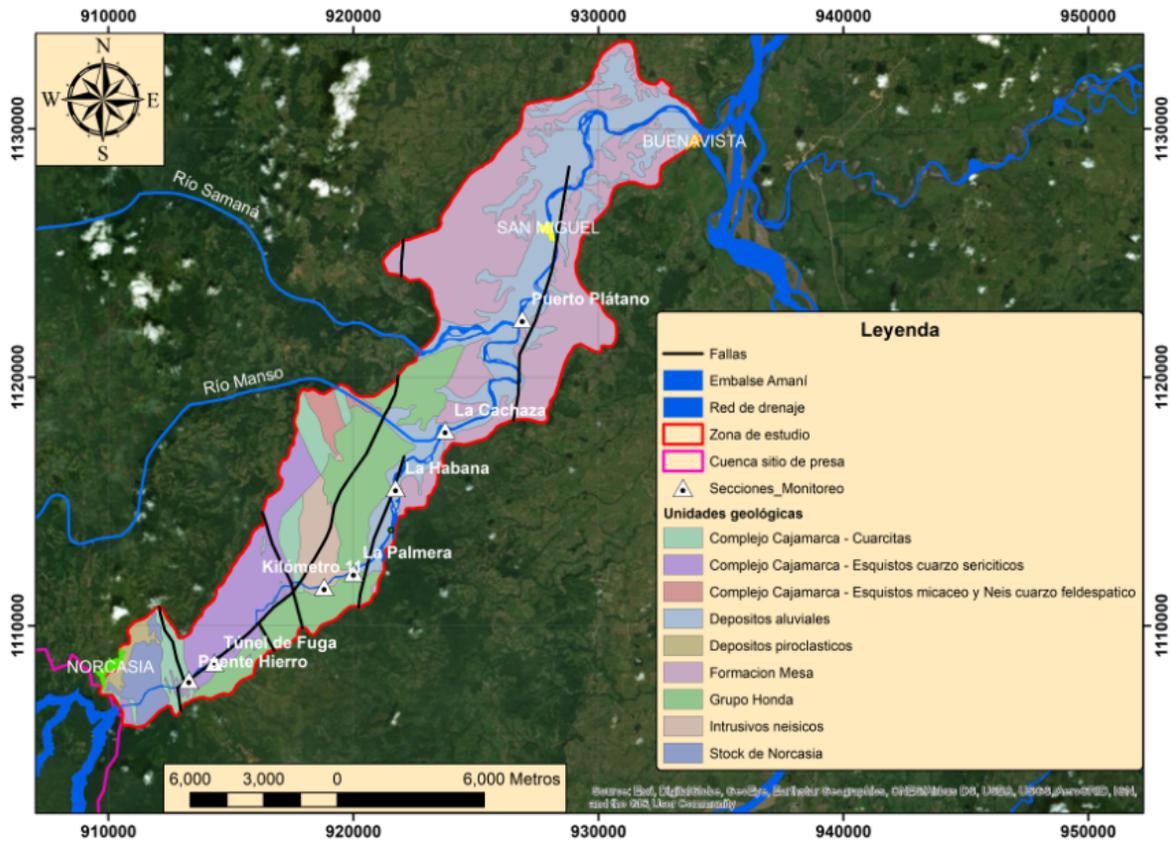
Fuente: elaboración propia.

Palmera (figura 3), donde el valle del río se amplía y da origen a una gran planicie de inundación que es consistente con los depósitos aluviales reportados en la cartográfica geológica de la zona (figura 3) y presenta un alineamiento sinuoso con múltiples meandros y madrevejas.

Para caracterizar el régimen hidrológico aguas abajo de la presa Patángoras se utilizó la información hidrométrica de la estación San Miguel (23057140), operada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam), la cual cuenta con más de 55 años

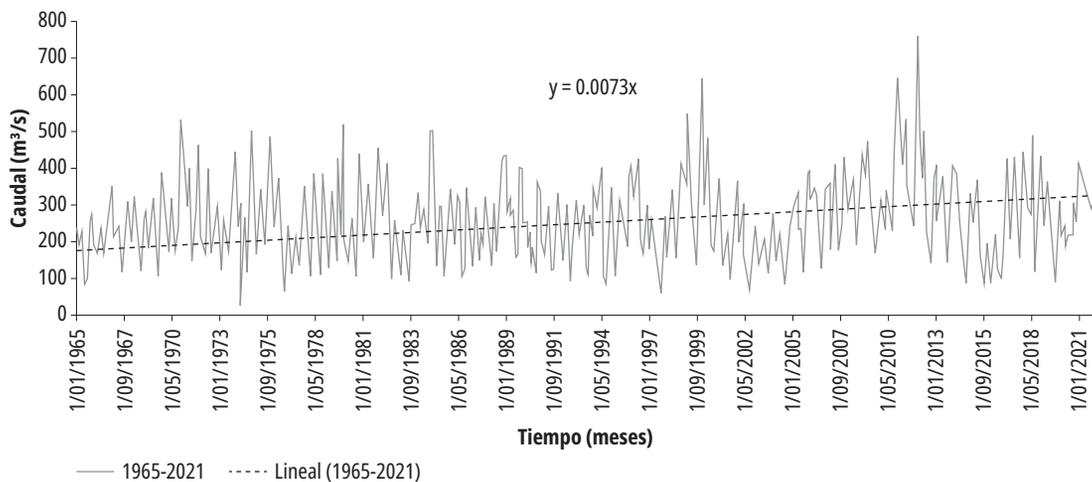
de registro. En particular, los registros de caudal medio mensual muestran una tendencia creciente (figura 4) con cambios en la media y la varianza (tabla 2).

Figura 3. Geología de la zona de estudio y localización de las secciones de monitoreo



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Serie de caudal medio mensual de la estación San Miguel (23057140)



Fuente: elaboración propia

Materiales y métodos

Información hidrológica

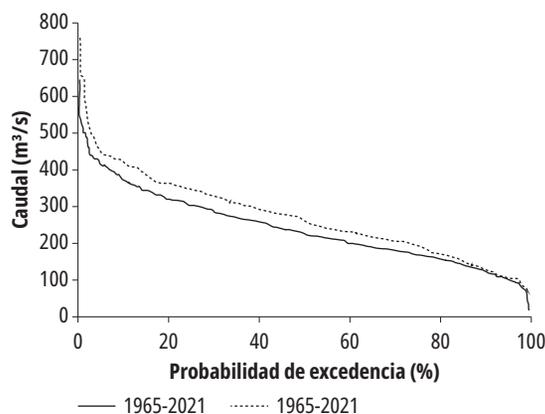
La información hidrológica empleada corresponde a los registros de la estación San Miguel (23057140), la cual se encuentra aguas abajo de la central Miel I y captura los aportes tanto del caudal turbinado como del caudal natural de los ríos Manso y Samaná Sur. Por un lado, el ciclo anual de caudales presenta un comportamiento bimodal con dos periodos de caudales máximos alrededor de mayo y noviembre, y con un periodo de caudales mínimos alrededor de julio (figura 5).

Por otro lado, se observa que el segundo periodo húmedo presenta caudales mayores que el primero, sin embargo, tiene una duración mucho menor que el primer periodo. El régimen hidrológico refleja una buena disponibilidad hídrica: durante ocho (8) meses al año, el caudal medio del mes se encuentra por encima del caudal medio multianual (252,91 m³/s). Además, se identifica que en la mayor parte de los meses del año, el caudal posregulación supera el caudal prerregulación, contrario a lo típico reportado en la literatura [29], [30], [31], entre otros.

Por último, se analizaron las curvas de duración de caudales de la estación San Miguel en prepresa (1965-2002) y pospresa (2002-2021), y se encontró que la cuenca en el periodo pospresa presenta un volumen de agua mucho mayor que

en el de prepresa (figura 6), mostrando el efecto de la inclusión de los trasvases de agua de los ríos Manso y Guarinó. El caudal medio de prepresa es de 242 m³/s, mientras que el de pospresa es de 275 m³/s; por su parte, los caudales mínimos aumentaron de 22,5 m³/s a 75,7 m³/s, con un porcentaje de cambio del 236 %. A pesar de esto, para caudales por encima del Q₉₀ las curvas de duración de caudales son muy similares.

Figura 6. Curvas de duración de caudales en la estación San Miguel (23057140), en prepresa (1965-2002) y en pospresa (2002-2021)

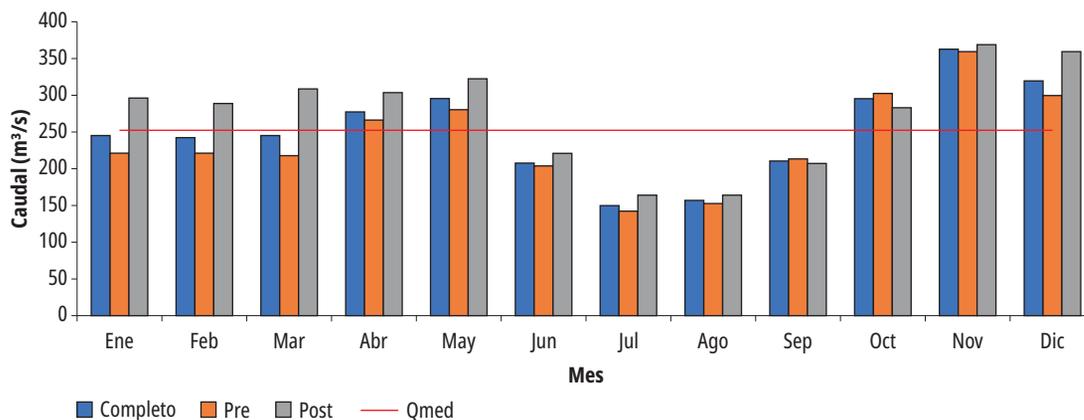


Fuente: elaboración propia.

Información de campo

Para analizar la variación del nivel del lecho del río La Miel se contó con la información topobatemétrica de las secciones transversales de monitoreo

Figura 5. Ciclo anual de caudales en la estación San Miguel (23057140), en prepresa (1965-2002) y en pospresa (2002-2021)



Fuente: elaboración propia.

hidrosedimentológico (figura 1 y tabla 1), anexa a la comunicación con radicado N.º 2018176489-1-000, obrante en el expediente ambiental LAM0005 Proyecto Miel I, de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

Tabla 1. Coordenadas de las secciones de monitoreo hidrosedimentológico

#	Sección	X	Y	Distancia desde la presa [km]
1	Puente Hierro	913287,61	1107810,93	3,3
2	Túnel de Fuga	914322,37	1108510,91	4,6
3	Kilómetro 11	918811,12	1111559,17	11,0
4	La Palmera	920007,80	1112133,00	12,3
5	La Habana	921723,55	1115536,86	16,4
6	La Cachaza	923748,43	1117870,00	20,3
7	Puerto Plátano	926894,27	1122351,55	29,6

Fuente: [32]

En las secciones transversales se identifica una tendencia a la cuasiestabilidad del lecho, con variaciones mínimas en elevación a lo largo de los cinco años (2013-2017) de datos disponibles. También se usaron los datos reportados de cargas de sedimento tanto de fondo (Qsf) como de suspensión (Qss) muestreadas en cada recorrido de campo. Finalmente, es necesario indicar que durante un recorrido de campo realizado en el año 2018 se capturaron fotografías de las barras puntuales, con su respectiva escala, en varios sitios a lo largo del río La Miel (figura 1); la numeración de las barras inicia en la desembocadura con el número uno y remonta el río hasta la identificada con el número nueve, algunos kilómetros aguas abajo de la presa Patángoras.

Pruebas estadísticas

Para identificar las tendencias en la media se evaluaron las pruebas T (T), Hotelling-Pabst (H-P), Mann-Kendall (M-K) y Sen (s). Para identificar cambios en la media se aplicaron las pruebas con punto de cambio: T Simple (T-s), T modificada

(T-M), U de Mann-Whitney (U) y Prueba de signo (PS).

Para cambios en la varianza se aplicaron las pruebas F Simple (F-s), F modificada (F-M), Ansari Bradley (A-B) y Bartlett (B). Las diferentes pruebas detectan cambios de manera consistente y alrededor de las mismas fechas.

Caracterización del lecho

Para la caracterización de la distribución granulométrica a lo largo del río se emplea la serie de fotografías capturadas durante un recorrido de campo realizado en el año 2018 y el *software* Basegrain, desarrollado por [33] el Instituto Federal Suizo de Tecnología (ETH Zurich).

Además, en uno de los sitios visitados se removió la capa superficial y se tomó un registro fotográfico, el cual evidencia que por debajo de la capa superficial grueso granular existe un depósito de material mucho más fino (figura 7), lo que constituye una aproximación empírica y cualitativa que valida la hipótesis del acorazamiento.

Figura 7. Verificación de campo del proceso de acorazamiento



Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenidas las curvas granulométricas y los diámetros característicos (D16, D50, D84), se procedió a calcular la desviación geométrica estándar (σ_g) y el coeficiente de gradación (Gr), utilizando las siguientes expresiones:

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} \quad (2)$$

$$Gr = 0.5 \left(\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right) \quad (3)$$

Resultados

Pruebas estadísticas

En los resultados del análisis de homogeneidad (tabla 2) se identifica que todas las pruebas de tendencia en la media evaluadas [prueba τ (T), Hotelling-Pabst (H-P), Mann-Kendall (M-K) y Sen (s)] confirman la existencia de una tendencia, en este caso creciente. Mientras que la mayor parte de las pruebas de cambio en la media evaluadas [T Simple (T-s), T modificada (T-M), U de Mann-Whitney (u) y Prueba de signo (ps)] confirman la existencia de un régimen hidrológico no estacionario. Por último, la mayor parte de las pruebas de cambio en la varianza evaluadas [F Simple (F-s), F modificada (F-M), Ansari Bradley (A-B) y Bartlett (B)] confirman nuevamente la existencia de un régimen hidrológico no estacionario.

Tabla 2. Resultados de los análisis de homogeneidad

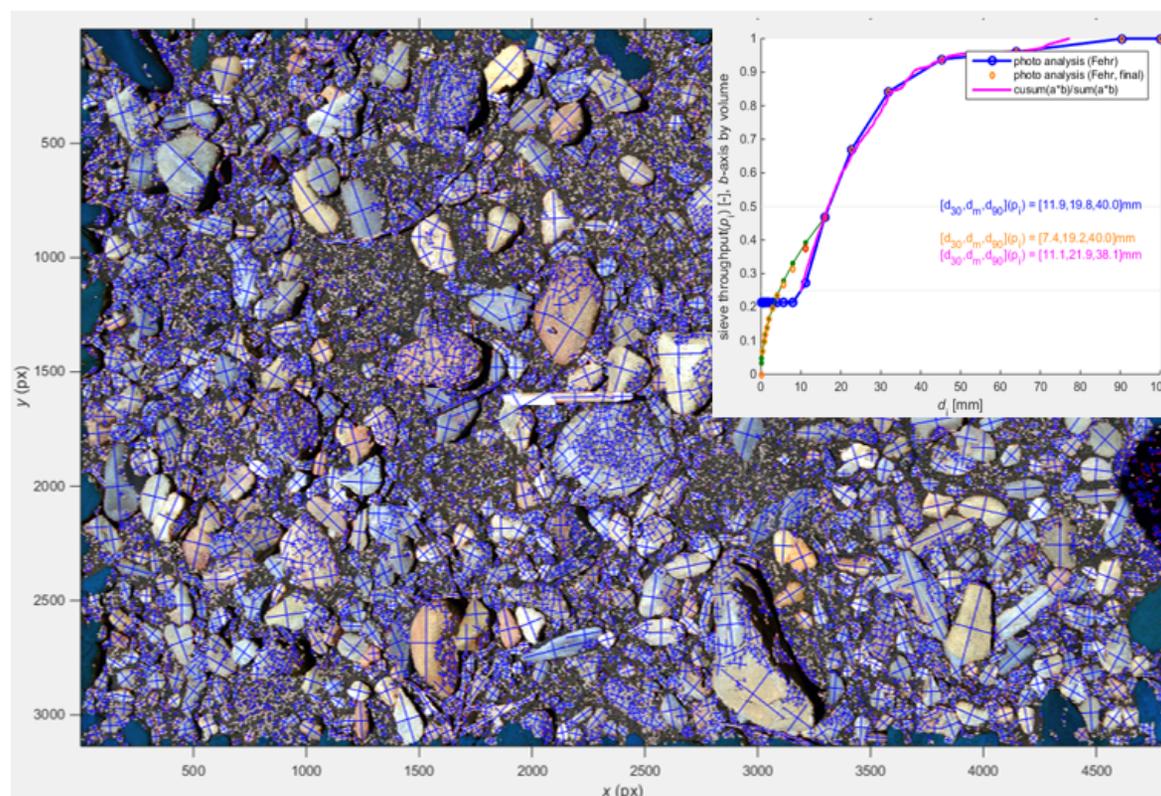
Río Estación	Tendencia en la media			
	T	H-P	M-K	S
	Sí	Sí	Sí	Sí
La Miel [23057140]	Cambio en la media			
	U	T-S	T-M	P-S
	No	04/05/1966	04/05/1966	09/01/1965
	Cambio en la varianza			
	F-S	F-M	A-B	B
	-	11/02/1966	11/02/1966	11/02/1966

Fuente: elaboración propia a partir de datos IDEAM.

Distribución granulométrica

Del procesamiento digital de imágenes con el *software* Basegrain (figura 8) se obtuvo la curva

Figura 8. Procesamiento de la foto barra # 5



Fuente: elaboración propia en *software* Basegrain.

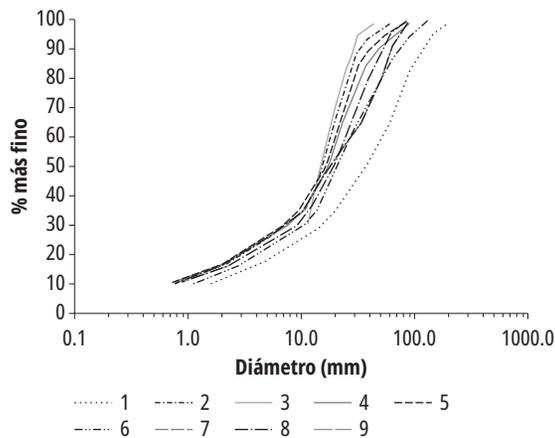
granulométrica asociada con cada sitio (figura 9) y se identificó el patrón general de variación del diámetro medio en la dirección del flujo (tabla 3), el cual exhibe una tendencia decreciente hacia aguas abajo, excepto cuando recibe los aportes de un tributario importante como los ríos Manso y Samaná Sur.

En las curvas granulométricas (figura 9) se observa que la muestra uno, correspondiente a la desembocadura en el río Magdalena, hace parte de un sistema con mayor nivel energético que puede movilizar tamaños de material más grandes, mientras que las muestras en las barras dos

al nueve son más similares en términos de gradación (Gr). Por su parte, de los diámetros D_{50} estimados se identifica que todas las barras analizadas están conformadas por material grueso granular (>2 mm), según el umbral sugerido por Vázquez-Tarrío [17]. De igual manera, todas las desviaciones geométricas estándar (σ_g) calculadas están por encima de 1,3 (tabla 3) y sugieren que los lechos pueden estar acorazados tal y como lo definieron Little y Meyer [3].

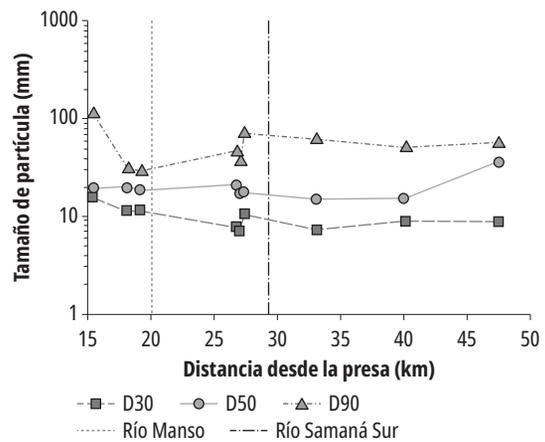
Con relación a la variación del tamaño de partícula del lecho en sentido longitudinal, aguas abajo de la presa Patángoras, se observa que el

Figura 9. Curvas granulométricas obtenidas con el software Basegrain



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Variación del tamaño de partícula del lecho



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resultados del análisis granulométrico

Barra	Río	D50 [mm]	σ_g	Gr	Distancia desde la presa [km]
9	Miel	19,06	4,44	5,41	15,4
8	Miel	19,69	4,23	5,23	18,1
7	Miel	18,34	5,45	6,41	19,2
6	Miel-Manso	21,16	4,55	5,17	26,8
5	Miel-Manso	16,81	4,15	5,53	27,0
4	Miel-Manso	17,61	4,36	5,53	27,4
3	Miel-Samaná Sur	14,90			33,1
2	Miel-Samaná Sur	15,25			40,1
1	Miel-Magdalena	36,96	4,90	5,86	47,5

Fuente: elaboración propia a partir de datos Basegrain.

D_{50} presenta un comportamiento muy uniforme, excepto en la desembocadura al río Magdalena. Mientras que los diámetros D_{30} y D_{90} muestran una gran variación hasta 29 km aguas abajo de la presa (desembocadura del río Samaná).

Cargas de sedimento

Al analizar y evaluar las cargas o tasas de transporte de sedimento en suspensión (figura 11) reportadas por Gotta Ingeniería durante su monitoreo semestral, aguas abajo de la central Miel I, se observa que muestran un comportamiento típico de un sistema fluvial con caudales líquidos regulados por un sistema presa-embalse, en el cual la discontinuidad en el suministro de sedimento se refleja en tasas de transporte bajas, justo aguas abajo de la presa, que aumentan paulatinamente en el sentido del flujo, debido a la mayor disponibilidad de material y al aporte de tributarios como los ríos Manso y Samaná Sur.

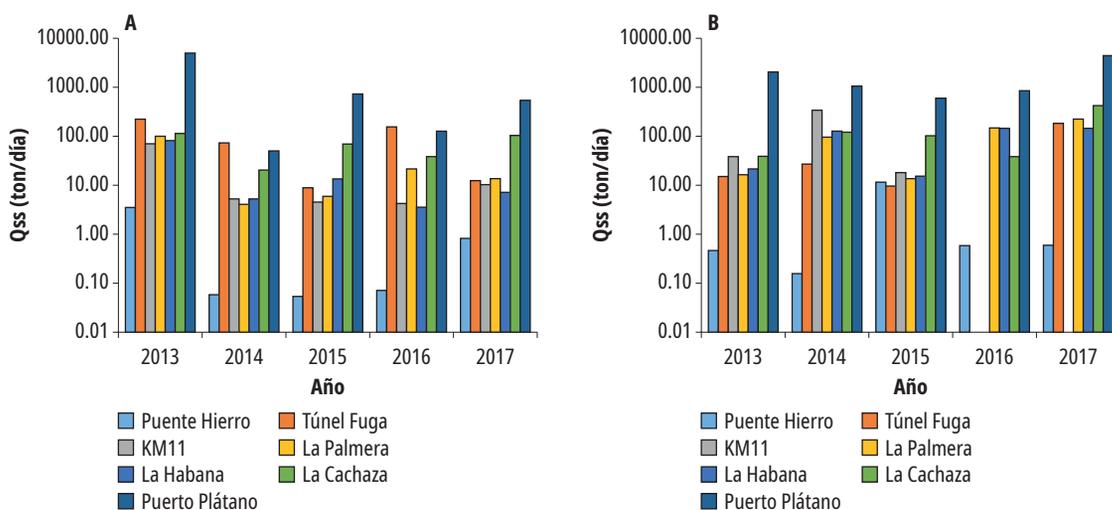
Es necesario indicar que las condiciones particulares del proyecto Miel I también se ven reflejadas en los registros (figura 11), en los que se observan altas cargas o tasas de transporte de sedimento en suspensión (ton / día), en las estaciones

Túnel de Fuga y Kilómetro 11, consistentes con la ubicación de la descarga del caudal turbinado y el proceso de resuspensión de sedimento fino.

Del análisis de las mediciones de carga de sedimentos de fondo realizadas por Gotta Ingeniería se observa que en las estaciones más cercanas al sitio de presa (en su orden, Puente Hierro, Túnel de Fuga, K11, La Palmera, La Habana) la carga de fondo es nula (figura 12), lo que es explicable por el proceso de acorazamiento [34]. Se produce un transporte selectivo de sedimento, en general, los más finos (arcillas, limos y arenas finas) quedan en el lecho una selección de materiales gruesogranulares que no pueden ser transportados por el flujo regulado; estos materiales se concentran y agrupan cubriendo materiales más finos, y forman una estratificación vertical del lecho (figura 7) que no permite un transporte uniforme de sedimentos.

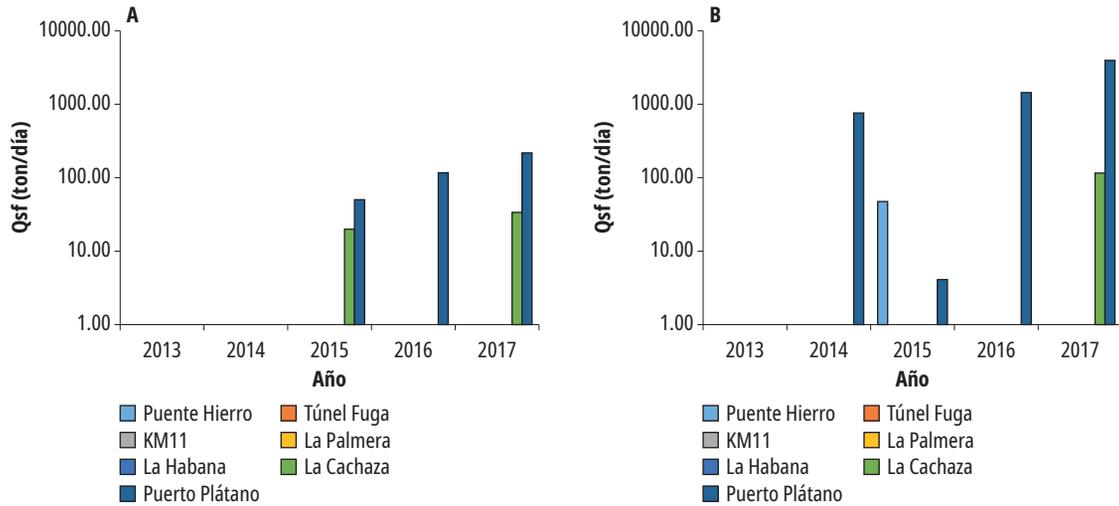
También se observa que el caudal promedio con el cual se presentó transporte de sedimentos de fondo en la sección Puerto Plátano, a 29,6 km de la presa Patángoras, es de 234 m³/s, que es excedido el 59 % del tiempo, según la curva de duración de caudales de la estación San Miguel en el periodo posregulación (figura 6).

Figura 11. Cargas de sedimento en suspensión (Qss): a) primer semestre y b) segundo semestre



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Cargas de sedimento de fondo (Qsf): primer semestre (a izquierda) y segundo semestre (a derecha)



Fuente: elaboración propia.

Discusión

Los resultados obtenidos del caso de estudio (río La Miel), por un lado, muestran que los ríos tropicales regulados por embalses también sufren procesos de acorazamiento o formación de una capa superficial gruesa que reposa sobre materiales más finos, tal y como lo han reportado para latitudes extratropicales [18], [19], [25]. Por otro lado, podemos indicar que, efectivamente, existe un umbral de caudal importante (234 m³/s), el cual se debe superar para que se rompa la coraza y se registre transporte de la carga de fondo (Qsf), lo que puede presentarse cuando se superpone la generación a máxima capacidad (descarga de 216 m³/s), con el vertimiento de excedentes por al aliviadero de la presa Patángoras.

Se destacan las grandes bondades del uso del procesamiento digital de imágenes para analizar grandes tramos de río (varios kilómetros), como se ha documentado en este caso de estudio, permitiendo obtener la granulometría del lecho de forma rápida y económica.

Finalmente, resaltamos la importancia de los monitoreos hidrosedimentológicos, pues han permitido identificar los procesos actuantes en el cauce del río, además de ayudar a entender, en parte, la nueva dinámica fluvial luego de la regulación de los caudales líquidos y sólidos.

Conclusiones

Los resultados del análisis trienfoque empleado permiten concluir que el río La Miel, aguas abajo de la presa Patángoras, se encuentra acorazado en su totalidad. Las alteraciones hidrológicas más importantes se relacionan con el aumento desproporcionado (236 %) de los caudales mínimos, efecto directo de la operación de la central Miel I y de los trasvases de los ríos Manso y Guarinó.

Por último, el caso de estudio permitió presentar una metodología de análisis fluvial con elementos modernos que aporta una semilla para futuros análisis de sistemas regulados tropicales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Cooperativa de Colombia por el tiempo suministrado para el desarrollo de este trabajo, y al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam) y a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) por los datos suministrados.

Referencias

- [1] E. D. Andrews y G. Parker, "Formation of a course surface layer as the response to gravel mobility", in *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, pp. 269-325, 1987.

- [2] G. Parker, “Transport of Gravel and Sediment Mixtures”, in *Sedimentation Engineering, American Society of Civil Engineers*, pp. 165-251, 2008. <https://doi.org/10.1061/9780784408148.ch03>.
- [3] W. C. Little y G. P. Meyer, “Stability of Channel Beds by Armoring”, *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 102, no. 11, pp. 1647-1661, Nov., 1976. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004651>.
- [4] G. Parker y P. C. Klingeman, “On why gravel bed streams are paved”, *Water Resour Res*, vol. 18, no. 5, pp. 1409-1423, Oct., 1982. <https://doi.org/10.1029/WR018i005p01409>.
- [5] G. Parker, C. P. Klingeman y G. D. McLean, “Bedload and Size Distribution in Paved Gravel-Bed Streams”, *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 108, no. 4, pp. 544-571, Apr., 1982. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005854>.
- [6] M. A. Hassan y M. Church, “Experiments on surface structure and partial sediment transport on a gravel bed”, *Water Resour Res*, vol. 36, no. 7, pp. 1885-1895, Jul., 2000. <https://doi.org/10.1029/2000WR900055>.
- [7] K. G. Heays, H. Friedrich y B. W. Melville, “Laboratory study of gravel-bed cluster formation and disintegration”, *Water Resour Res*, vol. 50, no. 3, pp. 2227-2241, Mar., 2014. <https://doi.org/10.1002/2013WR014208>.
- [8] J. P. L. Johnson, “Clustering statistics, roughness feedbacks, and randomness in experimental step-pool morphodynamics”, *Geophys Res Lett*, vol. 44, no. 8, pp. 3653-3662, Apr. 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/2016GL072246>.
- [9] M. Church, M. A. Hassan y J. F. Wolcott, “Stabilizing self-organized structures in gravel-bed stream channels: Field and experimental observations”, *Water Resour Res*, vol. 34, no. 11, pp. 3169-3179, Nov., 1998. <https://doi.org/10.1029/98WR00484>.
- [10] L. Wittenberg, J. B. Laronne y M. D. Newson, “Bed clusters in humid perennial and Mediterranean ephemeral gravel-bed streams: The effect of clast size and bed material sorting”, *J Hydrol (Amst)*, vol. 334, no. 3, pp. 312-318, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.028>.
- [11] R. R. Hendrick, L. L. Ely y A. N. Papanicolaou, “The role of hydrologic processes and geomorphology on the morphology and evolution of sediment clusters in gravel-bed rivers”, *Geomorphology*, vol. 114, no. 3, pp. 483-496, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.07.018>.
- [12] M. G. Wolman, “A method of sampling coarse river-bed material”, *Transactions*, vol. 35, no. 6, pp. 951-956, 1954.
- [13] A. Domínguez, “Procesamiento digital de imágenes”, *Perfiles Educativos*, vol. 72, p. 10, 1996.
- [14] P. E. Carbonneau, S. N. Lane y N. E. Bergeron, “Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery”, *Water Resour Res*, vol. 40, no. 7, Jul., 2004. <https://doi.org/10.1029/2003WR002759>.
- [15] G. L. Heritage y D. J. Milan, “Terrestrial Laser Scanning of grain roughness in a gravel-bed river”, *Geomorphology*, vol. 113, no. 1, pp. 4-11, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.021>.
- [16] D. Buscombe, D. M. Rubin y J. A. Warrick, “A universal approximation of grain size from images of noncohesive sediment”, *J Geophys Res Earth Surf*, vol. 115, no. F2, Jun., 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JF001477>.
- [17] D. Vázquez-Tarrío, H. Piégay y R. Menéndez-Duarte, “Textural signatures of sediment supply in gravel-bed rivers: Revisiting the armour ratio”, *Earth Sci Rev*, vol. 207, p. 103211, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103211>.
- [18] L. Li, J. Xia, M. Zhou y S. Deng, “Riverbed armoring and sediment exchange process in a sand-gravel bed reach after the Three Gorges Project operation”, *Acta Geophysica*, vol. 68, no. 1, pp. 243-252, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00391-2>.
- [19] H. Fu, Y. Shan y C. Liu, “A model for predicting the grain size distribution of an armor layer under clear water scouring”, *J Hydrol (Amst)*, vol. 623, p. 129842, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129842>.
- [20] Q. Wang, L. Li, X. Li, Y. Wang y R. Nie, “Calculation Model to Predict the Static Armor Layer Size Distribution After the Reconstruction of a Gravel River Bed”, *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 9, 2021. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.660216>.
- [21] S. Zhang, Z. Zhu, J. Peng, L. He y D. Chen, “Laboratory study on the evolution of gravel-bed surfaces in bed armoring processes”, *J Hydrol (Amst)*, vol. 597, p. 125751, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125751>.
- [22] C. Ikhsan, A. S. Permana y A. S. Negara, “Armor Layer Uniformity and Thickness in Stationary Conditions with Steady Uniform Flow”, *Civil Engineering Journal*, vol. 8, no. 6, pp. 1086-099, Jun., 2022. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-06-01>.
- [23] C. Ikhsan, “The Effect of Shear Stress on Armor Layer Thickness Under Steady Uniform Flow”, *Civil Engineering Journal*, vol. 9, no. 11, pp. 2806-2822, Nov., 2023. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-11-012>.
- [24] A. S. Negara, C. Ikhsan, R. R. R. Hadiani y Hadimani. M. Purwana, “River Mobile Armor Layer Induced

- by Flood”, *Civil Engineering Journal*, vol. 9, no. 6, pp. 1356-1370, Jun., 2023. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-06-05>.
- [25] M. Zhou, J. Xia, S. Deng, J. Lu y F. Lin, “Channel adjustments in a gravel-sand bed reach owing to upstream damming”, *Glob Planet Change*, vol. 170, pp. 213-220, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.08.014>.
- [26] D. Vázquez-Tarrío, M. Tal, E. Parrot y H. Piégay, “Can we incorrectly link armouring to damming? A need to promote hypothesis-driven rather than expert-based approaches in fluvial geomorphology”, *Geomorphology*, vol. 413, Sep., 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108364>.
- [27] M. García y J. Maza, “Capítulo 8. Inicio de movimiento y acorazamiento”, in *Manual de Ingeniería de Ríos*, 1996.
- [28] Isagen, “Cartilla Central-Hidroeléctrica-Miel-I”, p. 4, 2018.
- [29] R. J. Batalla, C. M. Gómez y G. M. Kondolf, “Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain)”, *J Hydrol (Amst)*, vol. 290, no. 1, pp. 117-136, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.002>.
- [30] G. Mathias Kondolf y R. J. Batalla, “Chapter 11 Hydrological effects of dams and water diversions on rivers of Mediterranean-climate regions: examples from California”, in *Catchment Dynamics and River Processes*, vol. 7, C. García y R. J. B. T.-D. in E. S. P. Batalla, Ed., Elsevier, 2005, pp. 197-211. [https://doi.org/10.1016/S0928-2025\(05\)80017-3](https://doi.org/10.1016/S0928-2025(05)80017-3).
- [31] L. Villablanca, R. J. Batalla, G. Piqué y A. Iroumé, “Hydrological effects of large dams in Chilean rivers”, *J Hydrol Reg Stud*, vol. 41, p. 101060, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101060>.
- [32] Gotta SAS, *Aforos semestrales de monitoreo sobre los ríos La Miel y Guarínó*, 2018.
- [33] M. Detert y V. Weitbrecht, “Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains-a free stand-alone tool”, in *River Flow*, 2012, p. 6.
- [34] G. Parker y A. J. Sutherland, “Fluvial armor”, *Journal of Hydraulic Research*, vol. 28, no. 5, pp. 529-544, Sep., 1990. <https://doi.org/10.1080/00221689009499044>.