

## Metodología para estimar los volúmenes máximos de explotación de materiales de arrastre en un río

Carlos A. Ramírez<sup>\*§</sup>, Ricardo A. Bocanegra<sup>\*</sup>, Santiago Santacruz<sup>\*</sup>,  
Héctor J. Quintero<sup>\*</sup>, Maria C. Sandoval<sup>\*\*</sup>

*\*Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle*

*\*\*Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca*

*§caramir@univalle.edu.co*

(Recibido: Junio 02 de 2009 - Aceptado: Diciembre 01 de 2009)

### Resumen

La extracción de los materiales del lecho en un río origina la erosión o incisión general del cauce, erosión remontante en los tributarios, daños en diferentes estructuras (puentes, captaciones, diques, muros de protección, casas y carreteras), descenso en los niveles freáticos, pérdida de la flora y la fauna acuáticas y riparias y, en general, el desequilibrio del río, poniendo en riesgo el ecosistema fluvial y su entorno. Con el fin de minimizar estos impactos negativos se propone una metodología para estimar los volúmenes máximos de explotación anuales basada en el transporte anual de sedimentos en el río, esto es, en la capacidad de la corriente para reponer los materiales extraídos. Es fundamental, inicialmente, adelantar un estudio integral del río, considerando los diferentes aspectos (hidrológicos, hidráulicos, transporte de sedimentos) para comprender su dinámica, enfatizando en los procesos geomorfológicos y en la identificación de otras intervenciones (presas, captaciones, obras de protección, descargas) que puedan estar afectándolo. Se deben establecer los posibles sectores de agradación del cauce, es decir, los tramos con mayores potenciales de explotación, e igualmente estimar los cambios morfológicos que se puedan originar por las actividades mineras. En la metodología propuesta también es imprescindible el monitoreo periódico de la carga de fondo y la variación de los niveles del fondo del cauce, la actualización de la curva de duración de las cargas anuales de sedimentos en el río y el pronóstico del régimen de caudales para cada año.

**Palabras clave:** Minería en ríos, Reservas dinámicas, Erosión, Impactos negativos

## Methodology for the estimation of the maximum volume extraction of river materials

### Abstract

Sand and gravel mining on rivers causes erosion or incision of the river bed, upstream erosion in tributaries, damage to different structures (bridges, water intakes, dykes, bank protection works, houses and roads), and, it alters the river equilibrium, affecting the fluvial ecosystem. In order to minimize the negative effects a methodology is proposed for estimating the maximum annual extraction volumes, based on the annual sediment transport of the river, in other terms, on the natural replenishment rate. Initially it is important to carry out an integral study of the river to understand the fluvial dynamics, including the different aspects (hydrology, hydraulics, sediment transport.) with emphasis on the geomorphologic processes and the identification of other aspects (dams, intakes, protection works.) that could be affecting it. The possible areas of aggradation should be estimated, this is, the areas that are potentially exploitable, and the morphological changes due to the mining activities should be estimated. The proposed methodology also requires a periodic monitoring of the bed load and of the variation of the river bed levels, the updating of the annual sediment loads duration curve and the forecasts of the river discharges for a given year.

**Keywords:** Mining of river, Dynamic reserves, Erosion, Negative impacts

## 1. Introducción

En muchos ríos alrededor del mundo las arenas y las gravas del lecho –o materiales de arrastre– son extraídos masivamente para ser usados en la construcción de diferentes obras de infraestructura y edificaciones debido a sus buenas propiedades fisicomecánicas, los bajos costos de explotación y transporte y por requerir un procesamiento mínimo con respecto a los materiales de cantera. No obstante, generalmente esta minería intensiva origina graves efectos en el sistema fluvial debido al desbalance causado en el transporte de sedimentos en el sitio de extracción; se origina una erosión general del cauce que puede alcanzar grandes distancias aguas arriba y aguas abajo, generando a su vez la inestabilidad de las orillas, cambios en la morfología del cauce, erosión regresiva en los afluentes, descenso en el nivel freático, afectación de la flora y fauna acuáticas y riparias, y, además, poniendo en riesgo las diferentes estructuras localizadas a lo largo del cauce y sus tributarios (puentes, captaciones, muros de protección, entre otros).

Numerosos casos se encuentran ampliamente documentados en la literatura sobre los enormes impactos negativos en los ríos a causa de la sobre-explotación de los materiales del lecho (CVC-UV, 2008; López, 2004; Alvarado-Villalón et al., 2003; Batalla, 2003; Castro y Cluer, 2003; Padmalal et al., 2003; Femmer, 2002; Kondolf et al., 2002; CVC, 1999; Roell, 1999).

Desde hace varias décadas algunos ríos en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, vienen siendo explotados intensamente, con tasas de extracción de materiales superiores a los aportes de sedimentos de las cuencas. Debido a esto, la autoridad ambiental -Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca- desde hace más de diez años ha planteado propuestas y desarrollado algunas acciones para restringir la extracción de materiales en algunos ríos, procurando así detener los graves procesos de erosión en los cauces, permitir su recuperación y evitar la afectación y pérdidas de estructuras localizadas en sus cauces (CVC, 1999).

En este estudio se propone una metodología para estimar los volúmenes de extracción máximos

anuales permitidos, fundamentada en la carga o transporte anual de sedimentos, el monitoreo riguroso de los cambios en la morfología del cauce y el pronóstico del régimen de caudales para un año dado. La metodología enfatiza la necesidad de determinar sólo año a año los volúmenes potencialmente explotables teniendo en cuenta las variaciones observadas en la morfología fluvial y el transporte de sedimentos, en contraste con las licencias de explotación que generalmente se otorgan por periodos de 10 o más años, en las cuales los volúmenes se estiman únicamente considerando los materiales que existen en el cauce por encima de un determinado nivel.

## 2. Efectos de la explotación minera en ríos

La extracción de los materiales del lecho puede generar serios impactos ambientales al alterar las condiciones geométricas e hidráulicas del río en el sitio de explotación y originar un desequilibrio entre los sedimentos transportados y la capacidad de transporte de la corriente. Estas alteraciones en las condiciones naturales del cauce genera a su vez procesos de erosión del lecho, tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo; es decir, genera la incisión o descenso de los niveles del lecho, erosión que puede propagarse grandes distancias. La incisión del cauce puede inducir otros efectos, tales como, inestabilidad y erosión de las orillas, cambios en la morfología del cauce, erosión remontante en los afluentes, descenso del nivel freático en la planicie aluvial cercana al cauce (disminuyendo los niveles de agua en los pozos cercanos), variación en el tamaño de los materiales del lecho y ampliación del cauce. Estos cambios en la morfología del río pueden originar daños en las estructuras existentes en el cauce y sus márgenes. Igualmente las actividades de explotación de materiales de arrastre deterioran la calidad del agua (incrementando la turbiedad, por ejemplo) lo cual afecta a los usuarios aguas abajo y a la fauna y flora acuáticas.

Toda excavación o extracción de materiales del lecho de un cauce constituye una modificación de la geometría del cauce (profundidad, pendiente, ancho) y una interrupción de la continuidad del transporte de sedimentos en el río, ante las cuales se produce una respuesta del sistema fluvial hacia

un nuevo estado de equilibrio por medio de dos procesos erosivos importantes:

- En el extremo aguas arriba de la excavación el incremento abrupto de la pendiente del cauce, debido al talud de la zanja excavada, incrementa la velocidad y la capacidad erosiva del flujo, produciendo la erosión de este extremo y el desplazamiento hacia aguas arriba de dicho punto. Este fenómeno se conoce como erosión remontante y puede afectar varios kilómetros del cauce e incluso reflejarse sobre algunos de sus afluentes, hasta alcanzar sus cabeceras o encontrar un control geológico o una estructura construida por el hombre (Figura 1 a,b) (San Diego State University, 2002)

- La profundización del lecho por la excavación amplía la sección del flujo y reduce la velocidad y la capacidad de transporte de sedimentos, de tal manera que parte de la carga de sedimentos se deposita al interior del pozo excavado. Aguas abajo de la excavación la corriente recupera sus características hidráulicas y, por ende, su capacidad de transporte pero su transporte real se reduce. Para compensar, el flujo erosiona progresivamente el lecho y las orillas hasta alcanzar nuevamente su capacidad de transporte. Es decir, aguas abajo de la explotación se genera una erosión progresiva debido al “agua hambrienta” (agua o flujo con una capacidad de transporte superior al transporte real) (Figura 1c).

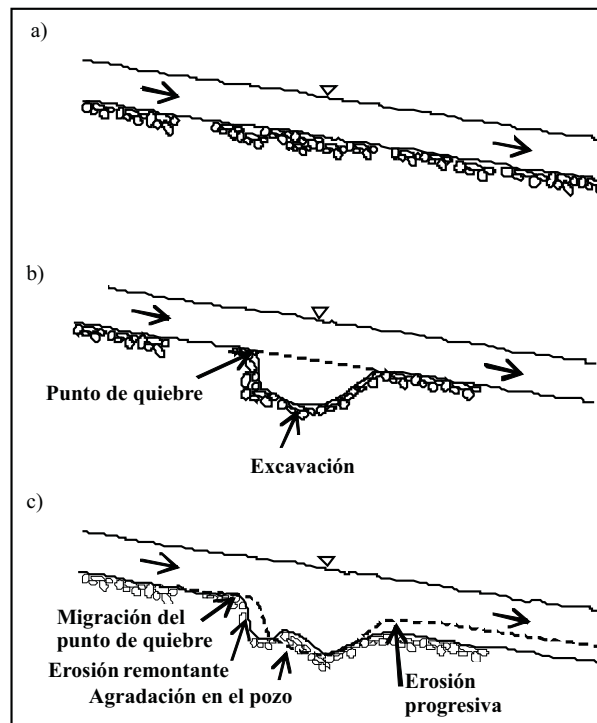


Figura 1. Fenómeno de erosión remontante y progresiva por extracción de materiales de arrastre en ríos

a) Estado inicial del río, en el cual se tiene un determinado transporte o carga de sedimentos; b) La excavación originada por la extracción de materiales del lecho genera un punto de quiebre aguas arriba y actúa simultáneamente como trampa de sedimentos interrumpiendo su continuidad; aguas abajo se conserva la capacidad de transporte de la corriente pero se reduce el material disponible para ser transportado; c) El punto de quiebre se desplaza aguas arriba causando erosión remontante; aguas abajo se produce una erosión progresiva por efecto del agua sin sedimentos (“agua hambrienta”) (Adaptado de Kondolf *et al.*, 2002).

Tabla 1. Potenciales efectos de la extracción de materiales de arrastre en ríos

Efectos locales	Efectos aguas arriba	Efectos aguas abajo
- Erosión de orillas	- Incremento del gradiente hidráulico	- Erosión del lecho
- Descenso del nivel freático	- Mayor velocidad del flujo	- Incremento de la turbiedad y de los sedimentos suspendidos
- Menor velocidad del flujo	- Erosión remontante	- Mayor inestabilidad de las bancas y el lecho
- Descenso de los niveles del fondo y del agua	- Acorazamiento del lecho	- Obstrucción de captaciones y vertimientos por sedimentos en suspensión
- Socavación de puentes y estructuras	- Socavación de orillas y ensanchamiento del cauce	- Descenso de los niveles del fondo y del agua
- Destrucción de hábitats riparios y acuáticos	- Erosión de afluentes	- Socavación de puentes y estructuras
	- Descenso de los niveles del fondo y del agua	- Destrucción de hábitats riparios y acuáticos
	- Socavación de puentes y estructuras	
	- Destrucción de hábitats riparios y acuáticos	

La erosión remontante y progresiva en el cauce origina la inestabilidad de las bancas y del canal principal, la socavación de estructuras y puentes, el descenso del nivel freático y la destrucción del hábitat ripario. Por esto, una intervención desmedida del cauce puede tener notables repercusiones, no sólo localmente sino a nivel de la cuenca, que pueden ser desastrosas para el ambiente y las comunidades que se benefician del río, tanto aguas abajo como aguas arriba de la explotación. En la Tabla 1 se relacionan los efectos directos e indirectos que pueden producirse por una práctica indebida de la minería de ríos (López, 2004; Alvarado-Villalón et al., 2003; Padmalal et al., 2003; Kondolf et al., 2002).

Además de estos efectos drásticos sobre el cauce y su entorno, se deben mencionar los efectos, generalmente transitorios, que normalmente se producen en toda actividad minera (contaminación por ruido, finos suspendidos, tráfico de vehículos pesados y vertimiento de contaminantes y residuos). En los ríos se producen efectos ambientales de mayor escala debido a su naturaleza altamente dinámica (Alvarado-Villalón et al., 2003; Kondolf et al., 2002).

Debido a los graves impactos, la minería en ríos ha sido prohibida en países desarrollados como Alemania, Holanda, Inglaterra, Francia y Suiza y

ha sido reducida o prohibida en muchos ríos de Italia, Portugal y Nueva Zelanda, en los cuales los efectos ambientales son aparentes (Kondolf, 1997). En Estados Unidos las regulaciones ambientales están siendo más estrictas, llevando a que muchas compañías de minería de ríos abandonen la actividad o incluso importen la arena desde Baja California, México (San Diego State University, 2002). En muchos sitios de Estados Unidos y otros países se continúa ilegalmente con la minería de ríos (Kondolf, 1997). Sin embargo, en la mayoría de los países en vías de desarrollo no es posible decretar la prohibición total de la minería de ríos debido a las implicaciones económicas y sociales, por cuanto en las poblaciones ribereñas existen muchos mineros artesanales que derivan su sustento y el de sus familias de esta actividad. A pesar de esto, es necesario restringir drásticamente los volúmenes de explotación para impedir que continúe la degradación de los sistemas fluviales y permitir su recuperación.

### 3. Metodología propuesta para determinar los volúmenes máximos de explotación

Generalmente, en la minería de ríos los volúmenes de arenas y gravas a extraer se calculan con base en el volumen de sedimentos en el cauce por

encima de un determinado nivel en un instante dado, el cual ha sido depositado por el río de acuerdo con su historia geomorfológica. Los volúmenes de materiales así estimados resultan muy altos y usualmente son explotados a tasas muy superiores a la tasa de transporte de sedimentos del río, y por ende, a la capacidad de la corriente para rellenar la zanja excavada (reservas dinámicas) (Alvarado-Villalón et al., 2003; Kondolf et al., 2002). En algunas regiones se permite la extracción de materiales hasta que el nivel del lecho no descienda por debajo de un nivel predefinido; sin embargo, esta estrategia es bastante difícil de controlar debido a que la incisión del cauce generada por la extracción de materiales puede tardar un periodo largo antes de manifestarse en toda su severidad. En otras regiones se permite un volumen de extracción de materiales hasta la carga anual de sedimentos en el cauce o una fracción de ella (Kondolf, 1997).

Si la tasa de extracción es superior a la tasa de reposición de la corriente (es decir, de la carga de sedimentos transportados por la corriente) ocurrirán cambios importantes en la morfología del cauce, aguas arriba y aguas abajo del sitio de explotación, desencadenado a su vez otros problemas en todo el sistema fluvial, como se indicó anteriormente (Alvarado-Villalón et al., 2003). La magnitud y la celeridad de las afectaciones dependerán de las características geológicas, hidrológicas, hidráulicas, sedimentológicas y del historial de intervenciones en el cauce (represas, desvíos, captaciones, entre otros), pero sobretodo de la diferencia entre la tasa de extracción y la capacidad de restitución de la corriente. No obstante, cualquier tasa de extracción de materiales, por pequeña que sea, interrumpirá la continuidad del transporte de sedimentos en el cauce (ocasionando el efecto de "agua hambrienta"), y generará la erosión del cauce aguas abajo del sitio de extracción. Por lo anterior y con el fin de minimizar los efectos negativos que pueden originarse por las actividades mineras en un río, el volumen máximo de explotación debe corresponder solamente a una fracción pequeña de la carga de sedimentos del río.

En muchos ríos alrededor del mundo no se realizan programas regulares ni ocasionales de mediciones de la carga de sedimentos. Para cuantificar el

transporte de sedimentos no existe en la actualidad un procedimiento único, sistemático y estandarizado, debido a la complejidad y la gran variabilidad espacial y temporal de los mismos procesos sedimentológicos. La determinación de la carga de sedimentos resulta una tarea de alta incertidumbre, a causa de las simplificaciones, y supuestos necesarios, la dificultad para obtener mediciones exactas y representativas y las limitaciones en la comprensión y descripción teórica de este fenómeno; prueba de ello es la innumerable cantidad de ecuaciones y metodologías empíricas disponibles para su estimación (Alvarado-Villalón et al., 2003; Maza-Álvarez, 1996; Van Rijn, 1993). A pesar de esto, es una tarea imprescindible e inaplazable incluir en los programas de monitoreo y control de los ríos la medición de la carga de sedimentos.

Teniendo en cuenta lo anterior, así como los graves efectos que se originan en un cauce y su cuenca debido a la sobreexplotación de los materiales de arrastre, se propone aquí una metodología para establecer los volúmenes de extracción máximos anuales permitidos, fundamentada en: (i) las reservas dinámicas (permitiendo extraer sólo un porcentaje relativamente bajo de la carga anual de sedimentos); (ii) el monitoreo periódico de la variación de los niveles del fondo del cauce y (iii) el pronóstico del régimen de caudales para el siguiente periodo. Estos volúmenes deberán ser establecidos por la autoridad ambiental para fines de otorgamiento de las licencias de explotación anuales.

Considerando la incertidumbre inherente a la estimación del transporte de sedimentos en un cauce así como la variabilidad en las condiciones climatológicas en la cuenca e hidrológicas en el río, los volúmenes de explotación máximos permitidos se deben definir anualmente. El método propuesto se basa en la curva de duración de la carga anual de sedimentos en el río, la cual se obtiene del procesamiento estadístico de los registros o mediciones del transporte de sedimentos en el cauce (cuando se dispone de esta información) o de estimaciones a partir de la aplicación de alguno de los predictores disponibles en la literatura y que a juicio del investigador permite estimar de manera razonable la carga de sedimentos en el río.

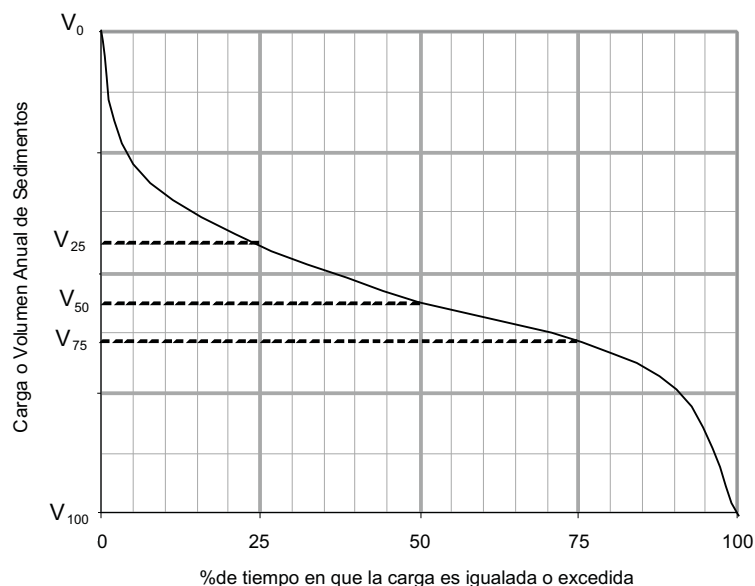


Figura 2 Curva de duración de la carga de fondo anual en un río

De la curva de duración de la carga anual de sedimentos (Figura 2) se determina el volumen o carga anual de sedimentos con permanencia del 25% del tiempo, considerada representativa de la carga anual transportada en promedio por el río durante un año húmedo o de invierno (caudales altos). De igual forma, se determinan los volúmenes con permanencias del 50 y 75%, representativos del transporte de sedimentos durante años de condiciones hidrológicas medias (caudales medios) y de verano (caudales bajos), respectivamente.

Finalmente se determina el volumen máximo de explotación anual permitido para las condiciones hidrológicas esperadas para un año dado. Con el fin de minimizar la erosión progresiva que se genera aguas abajo del sitio de explotación, debido a que el transporte de sedimentos real es inferior a la capacidad de transporte de la corriente (“agua hambrienta”), el volumen máximo de materiales a extraer debe corresponder sólo a una fracción pequeña -entre el 20 y el 30%- de la carga anual estimada según las condiciones hidrológicas esperadas para un año en particular. Se recomienda para un año de pronóstico húmedo (caudales altos) permitir un volumen máximo de explotación del 25% del  $V_{25}$ ; para un año de

pronóstico de condiciones hidrológicas medias (caudales medios) permitir un volumen de extracción máximo del 25% del  $V_{50}$ ; y, para un año seco (caudales bajos) aceptar un volumen máximo de explotación del 25% del  $V_{75}$ . Este porcentaje puede variarse ligeramente dependiendo del grado de afectación observado en el cauce.

La metodología propuesta para determinar los máximos volúmenes de materiales de arrastre que se permitirá extraer anualmente en un río es la siguiente:

- i. Con el propósito de identificar los sectores potencialmente explotables se deben determinar los tramos del cauce con tendencia a presentar procesos de agradación. Un estudio integral del río enfatizando en los procesos geomorfológicos observados, incluyendo -preferiblemente- la implementación de un modelo matemático sedimentológico, permitirán identificar y delimitar los sectores susceptibles a agradarse, es decir, los tramos con potencial de explotación.
- ii. Con base en la información disponible de aforos líquidos y sólidos en el río se determina la

relación funcional entre la carga de sedimentos de fondo y los parámetros hidráulicos y del sedimento o se selecciona el predictor del transporte de fondo (de los disponibles en la literatura) que mejor describa el transporte de sedimentos en el río en los sitios de agradación identificados.

iii. Estimación de los volúmenes o cargas de fondo anuales, es decir, los volúmenes de sedimentos transportados anualmente en el periodo de registros disponibles. Estos volúmenes anuales se determinan con base en la relación funcional o el predictor seleccionado en (ii) y las series históricas de caudales (horarios o diarios).

iv. Elaboración de la curva de duración o de frecuencias acumuladas de los volúmenes o cargas anuales de sedimentos. Este cálculo se realiza a partir de la serie de volúmenes anuales calculada en (iii).

v. Análisis de las condiciones climáticas esperadas para el año en el cual se realizará la explotación de materiales con el fin de establecer si corresponderá a un periodo de caudales altos, medios o bajos en el río.

vi. Determinación de la carga de sedimentos media esperada en el río a partir de la curva de duración de la carga anual de sedimentos de acuerdo con las condiciones climáticas e hidrológicas esperadas para el año de explotación, así: para un año húmedo o de invierno la carga anual de sedimentos será aquella con permanencia del 25%, para un año de caudales medios será la carga con permanencia del 50% y para un año cálido o seco será la carga con permanencia del 75%.

vii. Determinación del volumen máximo de explotación anual permitido para las condiciones hidrológicas esperadas para el año en consideración. Con el fin de minimizar la erosión progresiva que se genera aguas abajo del sitio de explotación, debido a que el transporte de sedimentos real es inferior a la capacidad de transporte de la corriente, el volumen máximo de materiales a extraer debe corresponder sólo a una fracción de la carga anual estimada en (vi) según las condiciones hidrológicas esperadas para un

año en particular. Se recomienda permitir un volumen máximo de explotación anual del orden del 25% del volumen o carga anual estimada para un año dado. No obstante este porcentaje puede incrementarse (hasta eventualmente un máximo del 50%) o disminuirse (hasta el 0%) dependiendo de las características del cauce y los cambios observados.

viii. Registro y control estricto de los volúmenes de materiales realmente explotados.

ix. Monitoreo y evaluación de los cambios en la morfología del cauce mediante el levantamiento topográfico y batimétrico, por lo menos semestralmente, de secciones transversales del cauce, tanto en el sector intervenido como aguas abajo y aguas arriba del mismo. Este monitoreo debe constituirse en una actividad permanente en el seguimiento a las respuestas del sistema fluvial a las diferentes intervenciones a las que es sometido, adoptando preferiblemente secciones de control fijas. Los levantamientos topográficos y batimétricos deben estar siempre amarrados o referenciados al mismo sistema de elevaciones.

x. Muestreo periódico de la carga de fondo en el río y actualización de la relación funcional entre la carga de sedimentos y los parámetros hidráulicos y del sedimento (o verificación del predictor seleccionado anteriormente). También se debe actualizar la curva de duración de la carga de fondo anual en el río considerando los nuevos registros de campo.

xi. Registro de los volúmenes de materiales extraídos semestral y anualmente. Esta información junto con el análisis de los cambios morfológicos observados permite un mejor conocimiento de la dinámica fluvial y las respuestas del río a las actividades mineras.

xii. Ajuste del volumen de explotación máximo anual permitido: el análisis de las variaciones observadas en los niveles del lecho y las condiciones hidrológicas esperadas permitirá redefinir el volumen de extracción máximo para el siguiente año. Si la incisión del cauce continúa, el porcentaje máximo de extracción se deberá

restringir aún más, e incluso declararse la prohibición total de la explotación minera cuando las condiciones de deterioro observadas en el cauce y su entorno se consideren críticas.

Con el fin de minimizar los impactos negativos sobre el río y su entorno y maximizar los beneficios económicos y sociales se deben establecer los lineamientos para el ordenamiento de las actividades de explotación de materiales de arrastre, orientados a la optimización de los procedimientos y las actividades a realizar por parte de los diferentes actores involucrados (instituciones y autoridades minera y ambiental y mineros artesanales y mecanizados) para una adecuada planeación, ejecución, seguimiento y control del proceso de explotación de materiales de arrastre.

Es necesario implementar acciones de mitigación, recuperación y control ambiental que estén enmarcadas en los conceptos de desarrollo sostenible y gestión integrada de los recursos naturales de la cuenca. Durante el desarrollo de las actividades de extracción y después de finalizadas se deben adelantar acciones tendientes a la recuperación ambiental del río, tales como programas de reforestación y construcción de obras (estructuras de protección de pilas y estribos de puentes, bocatomas, espolones). La licencia o permiso de explotación debe incluir al menos parte de estos costos así como los costos ambientales, asociados a los diferentes efectos negativos relacionados con el deterioro de la cuenca. Esto contribuirá a desestimular la explotación masiva de materiales del lecho de los ríos e incentivará la utilización de fuentes alternas de materiales de construcción (canteras, reciclaje de escombros, entre otros).

#### 4. Conclusiones

- El volumen máximo de explotación de materiales en un río debe estimarse con base en las reservas dinámicas, es decir, en la capacidad de la corriente para rellenar la excavación realizada; estas reservas dinámicas son función del transporte de sedimentos del río. De esta forma se pueden minimizar los efectos negativos sobre el río originados por la explotación intensiva y que

con frecuencia se realiza -de manera equivocada- a partir del concepto tradicional de volumen de reserva, esto es, el volumen de sedimentos depositados en el cauce por encima de un determinado nivel.

- La explotación de materiales de arrastre debe limitarse solamente a los sectores de agradación identificados, considerados potencialmente explotables, pero la intensidad y magnitud de los volúmenes de materiales a extraer dependerá de las condiciones del cauce, tanto localmente como aguas arriba y aguas abajo de estos sectores, y del régimen hidrológico estimado para el siguiente periodo.

- El método propuesto considera la elaboración de la curva de duración de volúmenes anuales de sedimentos transportados por el río, para, a partir de ella, determinar los volúmenes  $V_{25}$ ,  $V_{50}$  y  $V_{75}$ , es decir, los volúmenes con permanencias del 25, 50 y 75% del tiempo. Estos volúmenes se consideran representativos de los volúmenes anuales transportados durante años típicos húmedos, medios y secos, respectivamente. Con el fin de minimizar los impactos negativos los volúmenes de explotación deben representar sólo una fracción relativamente baja de la carga anual de sedimentos en el río.

- Como parte de la metodología para definir los volúmenes de explotación permitidos se debe adelantar un estricto monitoreo de los cambios en la morfología del cauce mediante el levantamiento topográfico y batimétrico, al menos semestralmente, de secciones transversales del cauce de coordenadas fijas y niveles amarrados a la misma red geodésica, tanto en el sector intervenido como aguas abajo y aguas arriba del mismo. Se debe, entonces, realizar un análisis anual de los cambios morfológicos en el río; de acuerdo con los resultados obtenidos y el pronóstico de caudales para el siguiente año, se definirán los nuevos volúmenes máximos de explotación permitidos. Cuando se observe una recuperación progresiva del río se puede incrementar el porcentaje de extracción permitido (hasta el 50% del volumen anual transportado). Por el contrario, si la incisión del cauce continúa se deberá restringir aún más el porcentaje de extracción, incluso declarar la prohibición total de



la explotación minera cuando las condiciones son muy críticas.

- Se debe diseñar e implementar un programa regular de monitoreo del río, incluyendo aforos líquidos y sólidos y la variación en la composición granulométrica del material del lecho.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca –CVC- y a la Universidad del Valle la financiación del proyecto “Estudio Integral del Río Bugalagrande para el Ordenamiento de las Actividades de Explotación de Materiales de Arrastre”, desarrollado por el Grupo de Investigación en Hidráulica Fluvial y Marítima –HIDROMAR- adscrito a la Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente –EIDENAR- con el apoyo del Grupo de Recursos Hídricos de la CVC.

## 6. Referencias bibliográficas

Alvarado-Villalón, F; Harrison, DJ & Steadman, EJ. (2003). Alluvial mining of aggregates in Costa Rica. British Geological Survey Comissioned Report, CR/0305N. 27 pp.

Batalla, R. (2003) Sediment deficit in rivers caused by dams and stream gravel mining. A review with examples from NE Spain. *Revista Cuaternario y Geomorfología* 17 (3-4), 79-91.

Castro, J, & Cluer, B. (2003) Instream aggregate mining issues in Oregon. US Fish and Wildlife Service, Oregon.

CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca). (1999). *Propuesta de restricción de las explotaciones de materiales de arrastre en algunos ríos del departamento del Valle del Cauca*. Santiago de Cali, Colombia.

CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca) – UV (Universidad del Valle). (2008). *Estudio integral del río Bugalagrande para el ordenamiento de las actividades de explotación de materiales de arrastre en el río Bugalagrande*. Santiago de Cali, Colombia.

Femmer, S. (2002). *Instream gravel mining and related issues in Southern Missouri*. U.S. Geological Survey Fact Sheet 012-02

Kondolf, M. (1997). Hungry Water: Effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental management*. 21(4), 533 – 551.

Kondolf, M., Smeltzer, M. y Kimball, L. (2002). *Freshwater gravel mining and dredging issues. White paper for Washington Department of Fish and Wildlife*. University of California, Berkeley.

López, J. L. (2004) Channel response to gravel mining activities in mountain rivers. *Journal of mountain science*. 1 (3), 264 - 269

Maza-Álvarez, J. A. y García-Flores, M. (1996). *Manual de ingeniería de ríos. Capítulo 10: Transporte de sedimentos*. Instituto de ingeniería de la Universidad Autónoma de México. Series del instituto de ingeniería No. 584. ISSN 0185-2345.

Padmalal, D., Maya, K., Mini, SR Arun, PR (2003). *Impact of river sand and gravel mining: A case of greater Kochi Region (Kerala), southwest coast of India*. In Proceedings of the International Conference on Water and Environment (WE-2003). December 15-18, 2003, Bhopal, India. Editores: Vijay P. Singh Ram Narayan Yadava, Ram Narayan Yadava. Allied Publishers, pp. 572.

San Diego State University, Universidad Autónoma de Baja California, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Southwest Center for Environment Research and Policy (2002). *Three issues of sustainable management in the Ojos Negros Valley, Baja California, Mexico*. <http://threeissues.sdsu.edu/>

Roell, M. (1999) *Sand and gravel mining in Missouri stream systems: Aquatic resource effects and management alternatives*. Missouri Department of Conservation, Missouri.

Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of Sediments Transport in Rivers, Estuaries, Coastal Seas and Oceans*. Aqua Publications, The Netherlands.