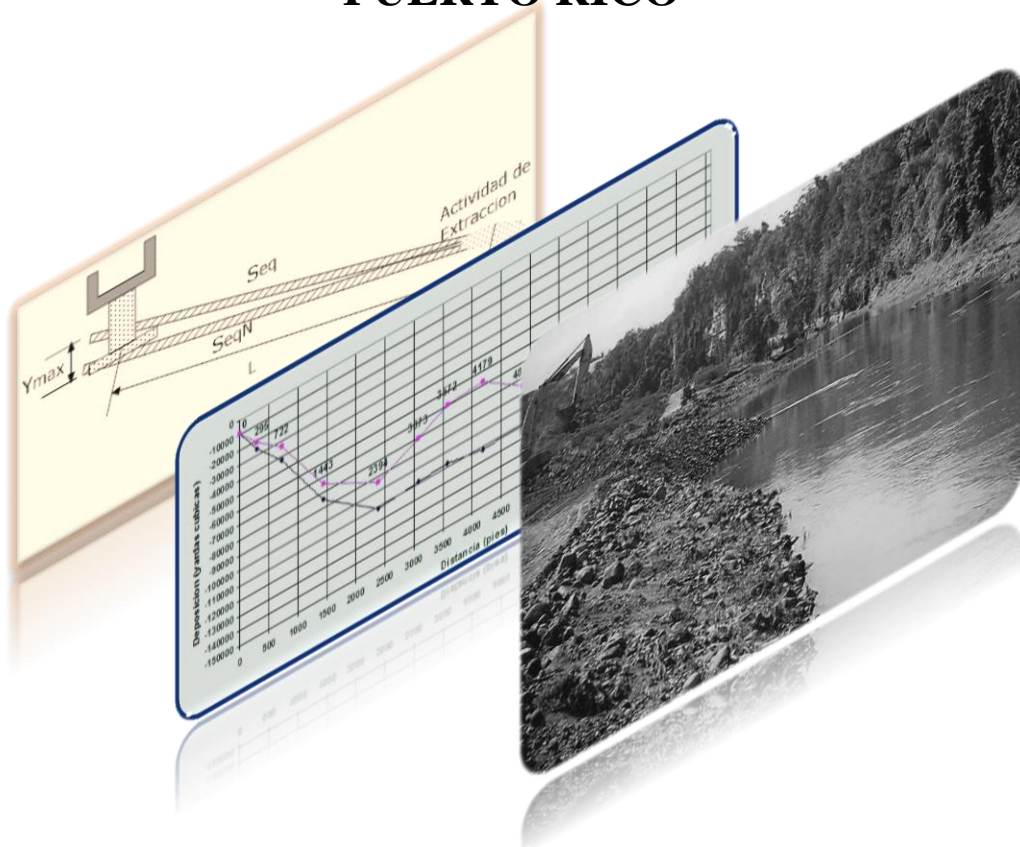


ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO  
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y AMBIENTALES  
SAN JUAN, PUERTO RICO

# GUÍAS PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PARA LA EXTRACCIÓN DE MATERIAL EN LOS RÍOS DE PUERTO RICO



DICIEMBRE 2016





## Tabla de Contenido

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>TRASFONDO Y BASE LEGAL</b>	<b>8</b>
<b>3.</b>	<b>PROPÓSITO Y ALCANCE DE ESTA GUÍA</b>	<b>9</b>
<b>3.1.</b>	<b>ESTUDIO DE ESTABILIDAD VERTICAL DEL CAUCE</b>	<b>9</b>
<b>3.2.</b>	<b>ESTUDIO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO</b>	<b>10</b>
<b>3.3.</b>	<b>ESTUDIO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS</b>	<b>10</b>
<b>4.</b>	<b>METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD VERTICAL</b>	<b>11</b>
<b>4.1.</b>	<b>RECONOCIMIENTO Y EVALUACIÓN GEOMORFOLÓGICA DEL TRAMO DONDE SE PROPONE LA ACTIVIDAD DE EXTRACCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>4.2.</b>	<b>RECONOCIMIENTO DE CAMPO</b>	<b>12</b>
<b>4.2.</b>	<b>ESTABILIDAD VERTICAL DEL LECHO DEL RÍO</b>	<b>15</b>
<b>4.2.1.</b>	<b>ANÁLISIS DE MOVIMIENTO INCIPIENTE</b>	<b>16</b>
<b>4.2.2.</b>	<b>ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE EROSIÓN DEL TRAMO DEL RÍO</b>	<b>19</b>
<b>4.2.2.1.</b>	<b>POSIBLE FORMACIÓN DE CORAZA EN EL FONDO DEL RÍO</b>	<b>20</b>
<b>4.2.2.2.</b>	<b>ANÁLISIS DE PENDIENTE ESTABLE</b>	<b>22</b>
<b>4.2.3.</b>	<b>ANÁLISIS DE CONTINUIDAD PARA SEDIMENTOS</b>	<b>26</b>
<b>5.</b>	<b>METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS</b>	<b>30</b>
<b>5.1.</b>	<b>PASOS PARA LA CREACIÓN DE UN MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS</b>	<b>30</b>
<b>5.2.</b>	<b>MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS USANDO HEC-RAS</b>	<b>32</b>
<b>5.3.</b>	<b>OBTENCIÓN DE CAUDALES Y CONDICIÓN DE BORDE AGUAS ARRIBA</b>	<b>33</b>

<b>5.4.</b>	<b>CONDICIONES DE BORDE AGUAS ABAJO</b>	<b>36</b>
<b>5.5.</b>	<b>DATOS DE SEDIMENTOS</b>	<b>36</b>
<b>5.5.1.</b>	<b>SELECCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS</b>	<b>37</b>
<b>5.5.2.</b>	<b>MÉTODOS DE MEZCLA DE SEDIMENTOS</b>	<b>37</b>
<b>5.5.3.</b>	<b>VELOCIDAD DE CAÍDA DE PARTÍCULAS DE SEDIMENTO</b>	<b>38</b>
<b>5.5.4.</b>	<b>DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE DEGRADACIÓN DEL LECHO</b>	<b>38</b>
<b>5.5.5.</b>	<b>MUESTRAS PARA LA GRANULOMETRÍA</b>	<b>39</b>
<b>5.5.6.</b>	<b>PROPIEDADES DE LOS SEDIMENTOS</b>	<b>44</b>
<b>5.5.7.</b>	<b>MÉTODO DE RASTREO DE LOS SEDIMENTOS</b>	<b>44</b>
<b>5.5.8.</b>	<b>CALIBRACIÓN DE LAS FUNCIONES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS</b>	<b>45</b>
<b>5.5.9.</b>	<b>TOLERANCIAS PERMITIDAS PARA LAS VARIABLES DEL MODELO</b>	<b>45</b>
<b>5.5.10.</b>	<b>PREDICTORES DE RUGOSIDAD DEL LECHO POR EFECTO DE LOS SEDIMENTOS</b>	<b>46</b>
<b>5.5.11.</b>	<b>MODELAJE DE EXTRACCIÓN DEL MATERIAL</b>	<b>46</b>
<b>5.5.12.</b>	<b>RESULTADOS REQUERIDOS DEL MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS</b>	<b>47</b>
<b>6.</b>	<b>DATOS REQUERIDOS PARA LA EXTENSIÓN DE TIEMPO DE UNA EXTRACCIÓN</b>	<b>48</b>
<b>7.</b>	<b>INFORMACIÓN ADICIONAL</b>	<b>49</b>
<b>7.1</b>	<b>CERTIFICACIÓN</b>	<b>49</b>
<b>7.2</b>	<b>INFORMACIÓN A SOMETER EN FORMATO DIGITAL</b>	<b>50</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>51</b>

## **CRÉDITOS**

Esta Guía fue elaborada por el Instituto de Investigaciones sobre Recursos de Agua y el Ambiente de Puerto Rico de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez (RUM), para el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales bajo el contrato número 2014-000008.

El equipo de trabajo estuvo formado por ingenieros y estudiantes del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura del RUM en conjunto a personal de la División de Hidromodificaciones del Negociado de Endosos adscrito a la Secretaría Auxiliar de Permisos, Endosos y Servicios Especializados del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales.

### **Autores:**

Walter F. Silva Araya, Ph.D., P.E.  
Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, RUM

Jorge Rivera Santos, Ph.D., P.E.  
Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, RUM

### **Colaboradores:**

Ing. Ivonne Medina Cortés, Directora Interina División de Hidromodificaciones  
Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico

Plan. Giovanna I. Fuentes Santiago, Directora Negociado de Endosos  
Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico

## **RESUMEN**

Las actividades de extracción de material del cauce de los ríos proveen agregados para la construcción de infraestructura; sin embargo, la extracción excesiva puede alterar el delicado equilibrio entre el sedimento que el río provee y el que se extrae. Estas Guías tienen como objetivo principal minimizar los daños al ambiente y reducir los impactos ocasionados por esta actividad.

Este documento consta de dos partes principales; 1) un estudio geomorfológico y de estabilidad vertical del lecho y 2) un estudio de transporte de sedimentos que incluye modelaje por computadora.

El estudio geomorfológico y de estabilidad vertical ayudará a los ingenieros a determinar la viabilidad de llevar a cabo una actividad de extracción antes de decidir si se procede o no con un estudio de transporte de sedimentos. Además, este estudio proveerá información de utilidad práctica en caso de que se determine preparar el estudio de transporte de sedimentos.

El estudio de transporte de sedimentos permitirá evaluar los posibles impactos a largo plazo producidos por la actividad de extracción. Estas Guías establecen que se usará el modelo HEC-RAS, con versiones posteriores a la 5.0, como el recurso de computadora para elaborar un estudio Hidráulico que incluya los cálculos del transporte de sedimentos en el tramo del río dentro del cual se realizará la actividad de extracción. El modelaje de transporte de sedimentos utiliza muchas variables y ecuaciones matemáticas que están sujetas a incertidumbre, tanto por la escasez o falta de datos como por las aproximaciones envueltas en la derivación de dichas ecuaciones. Estas condiciones hacen que los resultados obtenidos puedan tener variaciones muy grandes, dependiendo del conjunto de datos y las relaciones matemáticas que se seleccionen. Estas Guías uniforman los criterios y las opciones que se deben mantener en todos los modelos que se construyan con HEC-RAS y sean sometidos al Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA).

El documento se complementa con una descripción general sobre los impactos al ambiente provocados por las actividades de extracción y los fundamentos legales que facultan al DRNA a adoptar estas Guías.

Las Guías se prepararon teniendo presente que los ingenieros que están a cargo de realizar estos estudios poseen un conocimiento de los procesos y las metodologías asociadas con el transporte de sedimentos en ríos.

## **1. Introducción**

Los materiales que constituyen el lecho de los ríos, principalmente gravas y arenas, constituyen un recurso útil para la construcción de carreteras y estructuras de hormigón, entre otros usos. Sin embargo, el manejo inadecuado y la extracción excesiva del recurso provoca alteraciones en el balance de sedimentos dentro del río que pueden conducir a problemas de deposición o erosión en el cauce, alteraciones del balance entre la cantidad, distribución y la carga de los sedimentos, cambios en la composición del fondo y los bancos del río, alteraciones de la vegetación ribereña, efectos en el ecosistema acuático y, efectos en las estructuras cercanas o dentro del río tales como puentes, atarjeas y muros.

Desde el punto de vista ecológico, los impactos incluyen cambios en la constitución del sustrato, pérdida o daño del hábitat para algunas especies, eliminación de lugares donde refugiarse algunos organismos y posibles alteraciones en los flujos base por efectos sobre el agua subterránea. Los efectos sobre la calidad del agua incluyen la movilización de sedimentos finos ocasionada durante la extracción del material o por el cruce de vehículos o, por la eliminación de vegetación en la ribera. Un efecto inmediato es el aumento en la turbidez que reduce la claridad del agua, lo que a su vez afecta la calidad y disponibilidad de alimentos para peces e invertebrados y altera el hábitat de los organismos acuáticos. Los efectos de una extracción excesiva pueden ser irreparables y causar costosos daños a estructuras cercanas y a los ecosistemas.

Estas Guías proporcionan al DRNA una herramienta que contribuye al cumplimiento de su deber ministerial de proteger el ambiente y, específicamente, los recursos asociados con los ecosistemas acuáticos y la protección de los ríos de Puerto Rico. También contribuye

a uniformar la recolección y presentación de los datos, a la vez que les provee a los ingenieros que presentan estudios de transporte de sedimentos una guía técnica para su preparación. Específicamente, las Guías presentan los requisitos con los que se debe cumplir para preparar el estudio de transporte de sedimentos, el cual es un componente esencial en el proceso para obtener un Permiso para la Extracción de Materiales de la Corteza Terrestre de los Ríos de Puerto Rico.

## **2. Trasfondo y Base Legal**

El Secretario del DRNA, facultado por la Ley Núm. 23 del 20 de junio de 1972, según enmendada, conocida como la “Ley Orgánica del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales” es responsable de implementar en lo que respecta a la fase operacional, la política pública de conservación de recursos contenida en la Sección 19 del Artículo VI de la Constitución del Estado Libre Asociado de Puerto Rico. El DRNA tiene una amplia gama de poderes ministeriales conforme el alcance jurisdiccional de la agencia. Entre los poderes conferidos a la agencia a través de sus leyes especiales relativo a la administración de los recursos naturales se encuentran: la jurisdicción sobre los terrenos de dominio público como el agua y los cauces de los ríos, competencia sobre los recursos y sistemas naturales, y la fiscalización de actividades de origen antropogénico como las extracciones de material en terrenos de dominio público, entre otros.

Entre las leyes especiales que administra el DRNA y que están vinculadas con el contenido de este documento se mencionan las siguientes: la Ley Núm. 49 del 4 de enero de 2003, según enmendada, mediante la cual se declara que es política pública del Gobierno de Puerto Rico preservar los ríos como ecosistemas que proveen múltiples beneficios. Mientras que en virtud de la Ley Núm. 136 del 3 de junio de 1976, según enmendada, conocida como Ley para la Conservación, el Desarrollo y Uso de los Recursos de Agua de Puerto Rico, se declaran los cuerpos de agua propiedad y riqueza del Pueblo de Puerto Rico. Además, según la Ley Núm. 132 del 25 de junio de 1968, según enmendada, conocida como la Ley de Arena, Grava y Piedra, se regula la extracción, excavación, remoción y dragado de los componentes de la corteza terrestre llamados arena, grava,



piedra, tierra, sílice, calcita, arcilla y cualquier otro componente similar que no esté reglamentado como mineral económico en terrenos públicos y privados dentro de los límites geográficos del Estado Libre Asociado de Puerto Rico.

De otra parte, la Ley Núm. 161 del 1 de diciembre de 2009, según enmendada, conocida como Ley para la Reforma del Proceso de Permisos de Puerto Rico, creó un nuevo sistema integrado de permisos para el cual se adoptó el Reglamento Conjunto para la Evaluación y Expedición de Permisos Relacionados al Desarrollo y Uso de Terrenos. El Reglamento Conjunto absorbió el Reglamento Núm. 6916 del 15 de diciembre de 2004, Reglamento para Regir la Extracción, Excavación, Remoción y Dragado de los Componentes de la Corteza Terrestre, para dar paso al Capítulo 43, Extracción, Excavación, Remoción y Dragado de los Componentes de la Corteza Terrestre.

Al amparo de las leyes especiales antes mencionadas se prepara este documento con la intención de agilizar y uniformar los análisis y estudios sobre transporte de sedimentos en los ríos para toda actividad de extracción, excavación, remoción y dragado de los componentes de la corteza terrestre (llamados arena, grava, piedra, tierra y cualquier otro componente similar) que no esté reglamentado como mineral económico, en terrenos de dominio público, dentro de los límites geográficos del Estado Libre Asociado de Puerto Rico.

### **3. Propósito y Alcance de esta Guía**

El propósito general de esta guía es contribuir con la protección de los recursos asociados a los ecosistemas acuáticos y la conservación de los ríos donde se propongan o se llevan a cabo actividades de extracción de material. El alcance de la Guía incluye los criterios que se deben utilizar para realizar los siguientes estudios:

#### **3.1. Estudio de Estabilidad Vertical del Cauce**

El proponente realizará un estudio de estabilidad vertical del cauce que demuestre que el tramo del río tiene la capacidad de recibir material, esto es, que ocurra deposición de material en el lecho proveniente de aguas arriba. De no ser así, el

proponente deberá desistir de solicitar el permiso de extracción, ya que ese tramo del río no podrá recuperar el material extraído y la actividad puede ir en detrimento del recurso natural. De resultar positiva esta evaluación, el estudio geomorfológico pasará a formar parte del informe, el cual incluirá además, la elaboración de un Estudio Hidrológico-Hidráulico y un Estudio de Transporte de Sedimentos.

### **3.2. Estudio Hidrológico-Hidráulico**

El Estudio Hidrológico-Hidráulico es un informe técnico mediante el cual se calculan los caudales y los niveles de agua en el tramo del río donde se propone la actividad de extracción. Este estudio deberá cumplir con las *Guías para la Elaboración de Estudios Hidrológicos - Hidráulicos* adoptadas por la Junta de Planificación y el DRNA en junio de 2016 en lo que se refiere a las especificaciones sobre el levantamiento de los datos de campo, la incorporación de los datos en el modelo HEC-RAS y la calibración. El modelo hidráulico obtenido constituye la base sobre la cual se trabajará el estudio de Transporte de Sedimentos que se describe a continuación.

### **3.3. Estudio de Transporte de Sedimentos**

Un estudio de transporte de sedimentos es la evaluación cualitativa y cuantitativa de la dinámica del movimiento de los sedimentos debido a las fuerzas de arrastre de un fluido. Específicamente, estas Guías se refieren a un estudio del arrastre de materiales transportados por el río debido a la corriente de agua. Este tipo de estudio permite evaluar si en el tramo del río ocurre deposición o erosión y determinar los volúmenes y tamaños de material que son arrastrados y depositados. Los efectos de una extracción de material se pueden incorporar dentro del estudio para cuantificar el impacto que estas actividades tendrán dentro del río.

La cuantificación de los cambios en el nivel del cauce ocasionada por los efectos de la actividad de extracción requiere de la preparación de un modelo hidráulico detallado al cual se le añaden los datos necesarios para realizar un balance de la cantidad de sedimentos transportados por la corriente. En estas Guías se detallan

los requisitos para el modelo de transporte de sedimentos y la manera en que se debe incluir la actividad de extracción de materiales.

#### **4. Metodología para el Estudio de Estabilidad Vertical**

En esta sección se describen los métodos que se usarán para determinar si es viable que el tramo del río donde se ubica la extracción propuesta tenga la capacidad de recuperar el material sin agravar los procesos de erosión del cauce ni causar daños a los recursos naturales ni a las estructuras dentro o en la ribera del cauce.

##### **4.1. Reconocimiento y Evaluación Geomorfológica del Tramo donde se propone la Actividad de Extracción**

El reconocimiento y evaluación geomorfológica y de la estabilidad vertical del lecho ayuda a determinar si un tramo del río puede ser considerado para una posible extracción de material. Si se determina que el tramo está en un proceso de erosión de material no se debe considerar apropiado para actividades de extracción, ya que estas actividades podrían acelerar dicho proceso, produciendo umbrales geomorfológicos cuyas consecuencias afectan el cauce aguas abajo y aguas arriba. Además, no habría posibilidad de reponer el material que se extraiga. Por el contrario, si el tramo recibe deposición de material en forma continua y acelerada, entonces la operación de extracción producirá efectos que pueden ser amortiguados por las aportaciones naturales de material.

Solo se deberán presentar solicitudes de permisos de extracción de material de los ríos en tramos donde la evaluación geomorfológica de estabilidad vertical demuestre que el cuerpo de agua tiene la capacidad de recibir material para reponer el que se extraiga. Este estudio pasará a formar parte del Estudio de Transporte de Sedimentos que se deberá presentar a la consideración del DRNA. A continuación, se describen los pasos que deben seguirse en la evaluación geomorfológica.

## **4.2. Reconocimiento de Campo**

El reconocimiento de campo tiene dos propósitos principales: 1) proveer información sobre la geomorfología del tramo del río y, 2) recoger datos para realizar los cálculos que permitan hacer la evaluación cuantitativa preliminar del tramo. Los resultados de este estudio ayudarán al ingeniero en la decisión sobre proceder o no con un estudio detallado del transporte de sedimentos, el cual es requerido junto con la solicitud del permiso para la extracción. En un reconocimiento de campo se examinan las características del río que permitan documentar los procesos geomorfológicos principales que están ocurriendo. Previo a la visita, se deben consultar mapas y fotografías aéreas que ayuden a identificar áreas donde puede haber problemas o, tramos del río que son más apropiados para las actividades de extracción. La comparación de fotografías aéreas provee información sobre la migración de los meandros del río, los cambios ocurridos en el uso de terreno de la cuenca tales como urbanización, deforestación y cambios de cultivos que pueden promover la aportación de sedimentos al río. También se pueden detectar cambios en los alrededores del tramo considerado para la de extracción y cambios en la longitud y ubicación de las barras de sedimentos, así como en los tributarios cercanos. A continuación se dan los detalles de las observaciones y datos requeridos, los cuales fueron adaptados de la experiencia del Centro de Desarrollo e Investigaciones (ERDC, por sus siglas en inglés) del Cuerpo de Ingenieros de Ejército de los Estados Unidos [1]. Otras referencias pueden ser usadas para suplementar el estudio.

Durante el reconocimiento de campo se deberá documentar el área donde se propone realizar la actividad de extracción, así como los tramos del río aguas arriba y aguas abajo del lugar de interés. Las áreas donde se observa algún tipo de inestabilidad, erosión y sedimentación, así como efectos de inundaciones, deben ser descritas y documentadas. El reconocimiento de campo permitirá tomar abundantes fotografías donde se observen secciones estables o lugares de posibles problemas. Deberá indicarse la localización, la fecha y una descripción general de cada fotografía. Específicamente se debe mirar las siguientes características geomorfológicas:

**Controles del lecho del río:** Los umbrales geomorfológicos son aquellos lugares donde ocurre un cambio abrupto en la pendiente del lecho del río provocando erosión, ya sea formando una caída casi vertical o a lo largo de una corta distancia con pendiente empinada. Estas características geomorfológicas se llaman en inglés “knickpoints” y “knickzones” respectivamente. Las causas de estos cambios pueden ser naturales, como en el caso de un cambio en el material del fondo del río, el cual cambia la resistencia del flujo, o provocadas por actividades antropogénicas como ocurre típicamente aguas abajo de una represa, un vado o una atarjea, o debido a una actividad de extracción de material del río. Los umbrales geomorfológicos se desplazan con el tiempo, ya que el proceso de erosión es continuo y pueden afectar los tributarios. Algunas referencias denominan estas características geomorfológicas como “atrincheramiento” [2]. En el reconocimiento de campo se debe documentar la existencia de umbrales geomorfológicos y estimar la caída de altura provocada. Si el umbral consiste de materiales de alta resistencia, que lo mantienen estacionario, el mismo puede usarse como un control geológico, siempre y cuando un estudio geotécnico así lo determine.

**Terrazas y bermas:** Las bermas forman depósitos de sedimentos en zonas donde se ha reducido la capacidad de transporte de sedimentos. La presencia de vegetación en estas estructuras geomorfológicas indica estabilidad en ese tramo del río. Mientras que las bermas se encuentran dentro de las zonas activas afectadas por inundaciones usualmente del orden de 1 o 2 años de recurrencia, las terrazas son terraplenes que se encuentran a mayor altura y solamente son inundadas por eventos extremos. Si las bermas se encuentran dentro del tramo de extracción, es importante conocer sus dimensiones para estimar cuanta cantidad de material pueden proveer.

**Geometría del Cauce:** El reconocimiento de campo servirá para identificar aquellos lugares donde se deben levantar secciones transversales. Para el estudio de estabilidad vertical se requiere una sección transversal representativa del tramo donde se propone la actividad de extracción. Si el tramo de extracción es uniforme bastará con una sección, sin embargo, si hay cambios dentro de un tramo recto, la sección que se use

puede ser una sección promedio de ese tramo. La forma de obtener esta sección es subdividir el tramo propuesto para la actividad de extracción en varios sub-tramos, basados en características geomorfológicas similares. Luego se calculan los parámetros de cada sección transversal y se promedian para el tramo completo. El sitio donde se levante cada sección transversal debe quedar monumentado y referido a controles verticales y horizontales según se establece en la *Guía para la Elaboración de Estudios Hidrológicos-Hidráulicos* [3] o en el *Reglamento Conjunto de la Junta de Planificación*, Capítulo 43 [4]. De esta manera se podrán levantar nuevas secciones transversales en los mismos lugares y ser comparadas en el futuro. Las secciones transversales deben extenderse verticalmente lo suficiente para abarcar bermas, terrazas y el cauce inundable cercano al río. Si se procede con el modelaje del transporte de sedimentos, entonces el levantamiento topográfico de secciones transversales deberá ser más abarcador para tener una descripción detallada del tramo. Cuando se dispone de secciones transversales de diferentes años se deberá hacer un análisis comparativo que permita conocer los cambios históricos, particularmente si la tendencia ha sido erosionarse o sedimentarse.

**Estimación de rugosidad:** La estimación de la rugosidad se hace para determinar los coeficientes para la ecuación de Manning. Deben determinarse para las diferentes condiciones del terreno incluyendo el cauce inundable, los bancos del río y el cauce principal. Los coeficientes dependerán de la rugosidad de la superficie, la cantidad de vegetación y el alineamiento del cauce. En caso de arenas y gravas se usarán ecuaciones que obtienen el valor del coeficiente de Manning a partir de la granulometría del río.

**Temperatura del agua:** La temperatura del agua es necesaria para calcular la velocidad de sedimentación de las partículas. Si se dispone del día completo para realizar el reconocimiento de campo, se debe tomar a diferentes horas del día para obtener un promedio. Las horas y valores de temperatura obtenidos deben ser informados.

**Muestras de sedimento:** Las muestras de sedimento deben recogerse de los bancos y el lecho del río separadamente. Además de la distribución por peso de los tamaños de los granos, debe calcularse el peso unitario y ángulo de reposo. Véase la Sección 5.5.5 para más detalles sobre la toma de muestras. En el reconocimiento de campo también se deben identificar fuentes de sedimentos tales como los bancos del río, tributarios, surcos, canales naturales de drenaje, caminos y erosión en la parte alta de la cuenca [5].

**Profundidad del Sedimento:** Medir la profundidad de la capa de sedimentos que cubre el lecho del río lo más cercano posible al punto de mayor profundidad y en las secciones donde se propone extraer material.

**Estructuras Existentes:** Localizar estructuras incluyendo puentes, tramos con revestimiento, atarjeas y cualquier otra obra o estructura dentro del cauce o en las riberas. Observar si hay indicios de socavación o deposición de materiales en ellas y documéntelas con fotografías.

#### **4.2. Estabilidad Vertical del Lecho del Río**

Un tramo de un río está estable si existe un balance entre el sedimento que se deposita proveniente de aguas arriba y el sedimento que se remueve y es transportado aguas abajo del tramo [1]. Según este concepto, un tramo de río que recibe más sedimento del que se remueve no está estable, sino que sufre deposición o sedimentación en el cauce. Por el contrario, un tramo del río en el que se arrastra más sedimento del que le llega, sufre erosión o degradación del cauce.

Los lugares de extracción de material deben ser aquellos donde el río tiene la capacidad de reemplazar el material extraído sin desencadenar un proceso de inestabilidad severo iniciado por la formación de un umbral geomorfológico. Esto significa que debe estar ocurriendo un proceso de deposición natural que permita, en un tiempo razonable, reponer el material.

La evaluación geomorfológica realizada con los datos recolectados durante el reconocimiento de campo descrito en la sección anterior ayuda en la determinación cualitativa del comportamiento esperado del río en términos del transporte de

sedimentos. Sin embargo, antes de proceder a un estudio detallado y más exhaustivo de balance de los sedimentos en el río y los impactos de la actividad de extracción, es necesario un cálculo preliminar que permita estimar la carga de sedimentos que el río es capaz de mover, que permita establecer cómo se afectará el río cuando parte de esa carga de sedimentos sea reducida mediante la extracción y cuánto tiempo podría tomarle al río en lograr nuevamente un equilibrio. Este análisis requiere una cantidad limitada de datos. Se realiza para una sección transversal promedio del tramo donde se propone llevar a cabo la operación de extracción y utiliza funciones de transporte de sedimentos preseleccionadas. La metodología es una adaptación de las ideas propuestas por la Administración Federal de Autopistas (FHWA, por sus siglas en inglés) en las referencias [6] y [7]. Los resultados de este análisis ayudarán a tener criterios adecuados para continuar con un estudio detallado del transporte de sedimentos en el tramo del río.

#### 4.2.1. Análisis de movimiento incipiente

El análisis de movimiento incipiente consiste en determinar las condiciones bajo las cuales las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre una partícula de sedimento alcanzan el valor tal que, si se aumentan por encima de ese valor, la partícula de sedimento comenzaría a moverse. En estas condiciones se dice que la partícula se encuentra en condición crítica o de movimiento incipiente [8]. El cálculo del diámetro crítico de partícula se hace usando el diagrama de Shields [8]. Este diagrama permite determinar el tamaño crítico a partir del número de Reynolds de la partícula y de un factor que depende del esfuerzo cortante llamado parámetro de Shields. En estas Guías se usará la siguiente relación matemática para estimar el parámetro de Shields,  $\tau_c^*$ , a partir de un número de Reynolds,  $Re_p$  [9]:

$$\tau_c^* = \frac{1}{2} \left[ 0.22 Re_p^{-0.6} + 0.06 \times 10^{-7.77 Re_p^{-0.6}} \right] \quad (1)$$

donde

$$Re_p = \frac{\sqrt{gRD_c}D_c}{\nu} \quad \text{y} \quad \tau_c^* = \frac{\tau_b}{\rho g R D_c}$$



$Re_p$  = Número de Reynolds de las partículas,

$g$  = Aceleración de la gravedad,

$R$  = Peso específico de la partículas de sedimento sumergidas =  $\gamma (SG_s - 1)$ ,

$\gamma$  = Peso específico del agua,

$SG_s$  = Gravedad específica de los sedimentos,

$D_c$  = Diámetro crítico de la partícula,

$\nu$  = Viscosidad cinemática del agua para la temperatura promedio,

$\tau_b$  = Esfuerzo cortante en el fondo del río, y

$\rho$  = Densidad del agua.

El esfuerzo cortante en el fondo del río se calcula usando una ecuación diferente para arenas y para gravas o materiales más gruesos [6].

**Para arenas** se usará la ecuación de Manning:

$$\tau_b = \frac{\gamma n^2 V^2}{K_u^2 R_h^{1/3}} \quad (2)$$

donde

$n$  = Coeficiente de rugosidad de Manning,

$V$  = Velocidad promedio del agua correspondiente al caudal efectivo,

$R_h$  = Radio hidráulico, y

$K_u$  = Constante igual a 1 si se usa el sistema internacional de unidades o 1.486 si se usa el sistema inglés de unidades.

El coeficiente de rugosidad de Manning, que se usa en la Ecuación 2, se calculará con la ecuación de Strickler dada por:

$$n = K_u D_{50}^{1/6} \quad (3)$$

donde  $D_{50}$  el diámetro correspondiente al 50% del material pasando en la curva granulométrica.  $K_u = 0.0482$  si  $D_{50}$  se usa en metros,  $K_u = 0.0395$  si  $D_{50}$  se usa en pies. Se considera arenas aquellos materiales con tamaños entre 2 mm y 0.062 mm.

**Para materiales más gruesos** el esfuerzo cortante del fondo del río se obtendrá con la ecuación [6]:

$$\tau_b = \frac{\rho V^2}{\left[5.75 \log\left(\frac{12.27 R_h}{k_s}\right)\right]^2} \quad (4)$$

donde  $k_s$  es el tamaño característico de la rugosidad igual a  $3.5 D_{84}$  para gravas y materiales de mayor tamaño y  $D_{84}$  es el diámetro correspondiente al 84% del material pasando en la curva de granulometría.

En las ecuaciones anteriores se utilizará la velocidad promedio obtenida para el *caudal efectivo*. El caudal efectivo es aquel que transporta la mayor fracción de la carga de sedimentos del fondo y, por lo tanto, es un estimado del caudal que da forma al cauce del río [10]. Para el estudio solicitado en esta Guía el *caudal formador del cauce* se aproximará usando el caudal correspondiente al 90 % de probabilidad de excedencia (1.11 años de periodo de retorno). Este valor es cercano al que se encuentra más frecuentemente en los ríos. Únicamente cuando no se dispone de datos de caudal suficientes para realizar el análisis de frecuencias se usará el caudal correspondiente al banco lleno, que es aquel que ocupa toda la sección transversal del cauce principal del río.

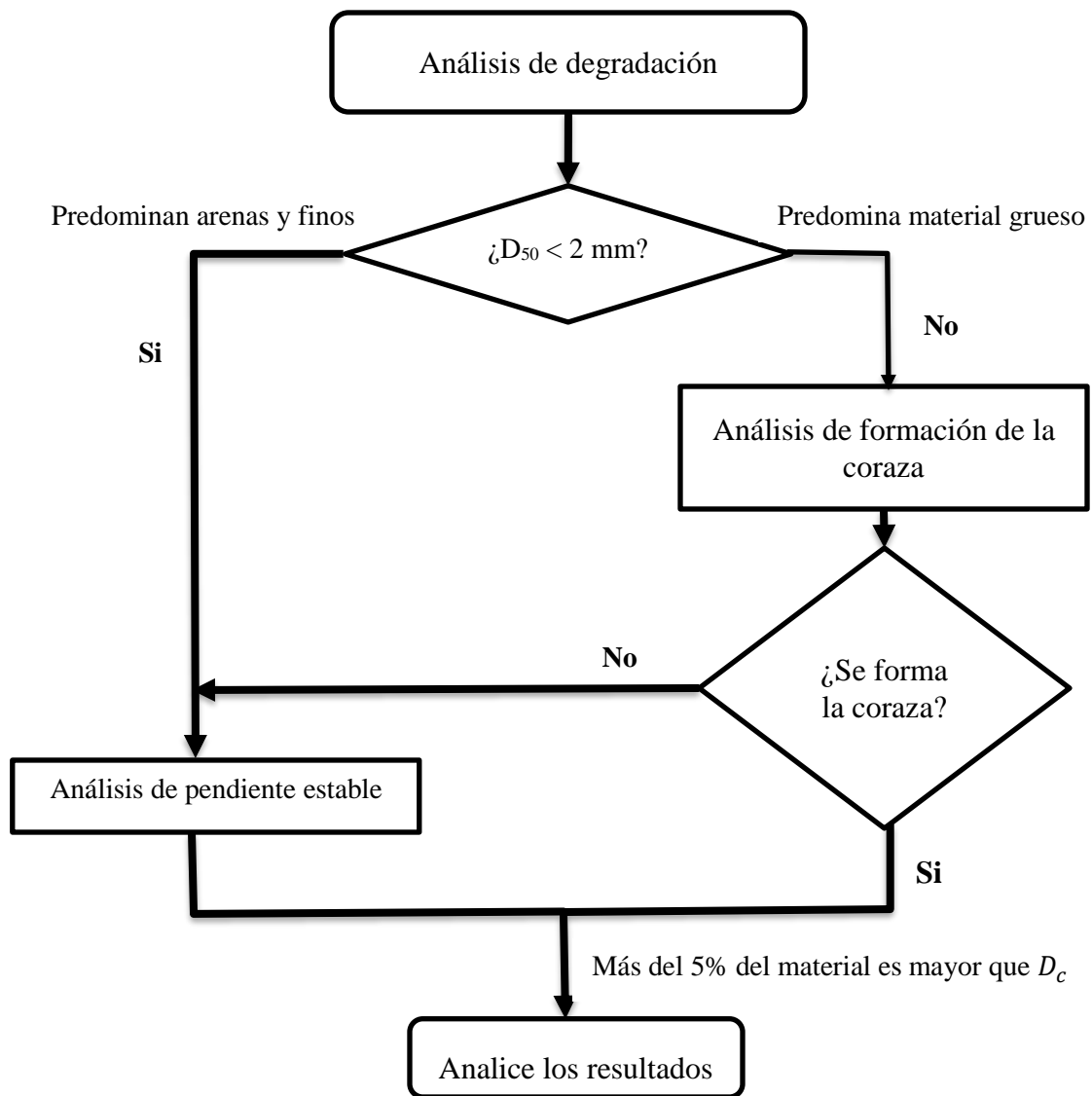
Los pasos para este cálculo se resumen como sigue:

- 1) Obtener la profundidad, el área y el radio hidráulico para el caudal efectivo.
- 2) Calcular la velocidad promedio dividiendo el caudal efectivo entre el área de flujo.
- 3) Calcular el esfuerzo cortante en el fondo del río,  $\tau_b$ , usando la Ecuación 2 o Ecuación 4, según sea el caso. No sustituir el radio hidráulico por la profundidad dentro de estas ecuaciones.

- 4) Presumir un valor del diámetro crítico de la partícula y calcular el Número de Reynolds de la partícula,  $Re_p$ .
- 5) Resolver la Ecuación 1 para obtener el parámetro de Shields,  $\tau_c^*$ .
- 6) Despejar el valor del esfuerzo cortante en el fondo,  $\tau_b$ , a partir de la definición del parámetro de Shields.
- 7) Comparar el valor obtenido en el Paso 3 con el valor obtenido en Paso 6. Si ambos valores son iguales en por lo menos dos cifras significativas, el valor de diámetro crítico de la partícula es el obtenido presumido en el Paso 4. Si son diferentes, presumir otro valor de  $D_c$  y repetir el procedimiento a partir del Paso 5.
- 8) Con base en su curva granulométrica y el  $D_c$ , concluir qué porcentaje del material del fondo del río será movido y que porcentaje permanecerá en el fondo del río.

#### **4.2.2. Estimación del potencial de erosión del tramo del río**

Para el estimado de la erosión del tramo del río cercano a la actividad de extracción propuesta se realizará uno o ambos de los dos cálculos propuestos a continuación. El primero es un análisis de formación de la coraza sobre el río y el segundo es un análisis de pendiente estable. Primero se realiza el análisis de formación de la coraza. Si se demuestra que la coraza se formará y es capaz de resistir el caudal formador del cauce, entonces no será necesario realizar el análisis de pendiente estable. La Figura 1 muestra los criterios a seguir. Ambos análisis, formación de coraza y pendiente estable, se realizan con el flujo formador del cauce, el cual para los efectos de estas *Guías*, corresponde a un periodo de recurrencia de 1.11 años (90% de probabilidad de excedencia).



**Figura 1. Procedimiento para decidir el tipo de análisis de estabilidad vertical.**

#### **4.2.2.1. Posible formación de coraza en el fondo del río**

Se requieren tres condiciones para que ocurra la formación de una coraza. La primera es que el río debe estar en un proceso de erosión, o sea que la capacidad de transporte de sedimentos debe ser mayor que la cantidad de sedimentos que suple el río. La segunda es que el material que se transporta sea lo suficientemente grueso para que se deposite sobre el lecho. Esto se determina a partir de la condición de

movimiento incipiente presentada en la Sección 4.2.1 y, tercero debe haber suficiente cantidad de material grueso para cubrir el fondo del río. Esto se cuantifica conociendo qué fracción de la distribución granulométrica consiste de tamaños mayores al diámetro crítico de la partícula [11]. Si más de un 5% del material es mayor que el tamaño crítico de la partícula, se presume que se puede formar una coraza en el fondo del cauce [6]. Este dato se obtiene de los resultados del análisis de movimiento incipiente.

Durante la actividad de extracción la coraza es removida y el substrato queda expuesto. Presumiendo que se cumplen las condiciones para su formación, deberá pasar un tiempo para que el lecho se cubra nuevamente. En el transcurso de este tiempo el lecho se erosiona una profundidad  $y_d$ . La profundidad de erosión hasta que se forme nuevamente la coraza se estima con la fórmula del Negociado Federal de Reclamaciones (USBR, por sus siglas en inglés) [12]. La fórmula es:

$$y_d = y_a \left( \frac{1}{\Delta P} - 1 \right) \quad (5)$$

donde

$y_d$  = Profundidad medida a partir del nivel original del lecho, hasta el nivel en que se formará la coraza. Esto es lo mismo que la profundidad a la que se va a erosionar el fondo del río antes de que se forma la coraza.

$y_a$  = Espesor de la coraza. Este valor es el menor entre tres veces el diámetro de la partícula crítica ( $3D_c$ ) o 0.5 pies (0.15 m).

$\Delta P$  = Fracción decimal del material del fondo cuyo tamaño es mayor que  $D_c$

Los datos para la aplicación de la Ecuación 5 se obtienen a partir del análisis de movimiento incipiente (Sección 4.2.1). Este cálculo permite determinar cuánto podría erosionarse, en promedio, el lecho del río antes de que se forme una coraza que lo proteja. La formación de una coraza ayuda en la estabilidad vertical del río, ya que disminuye la rapidez con que se erosiona el mismo. Sin embargo, esta

estabilidad es relativa, ya que si ocurre un caudal que exceda el caudal que la formó, entonces el río será erosionado a mayor rapidez.

#### **4.2.2.2. Análisis de pendiente estable**

El análisis de pendiente estable, también llamada pendiente de equilibrio, se realiza en el caso de ríos con materiales arenosos. El procedimiento que se describe a continuación fue adaptado de las prácticas del USBR [12] y del FHWA [6]. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Determinar el caudal efectivo según se definió en la Sección 4.2.1.
2. Estimar la descarga de sedimentos correspondiente al caudal efectivo. Para esto se ajustará la carga de transporte de sedimentos a una ecuación del tipo:

$$q_s = aV^bY^c \quad (6)$$

donde  $q_s$  es la capacidad de transporte de sedimentos por unidad de ancho del río,  $V$  es la velocidad promedio del agua correspondiente al caudal efectivo,  $Y$  es la profundidad del agua correspondiente al flujo efectivo,  $a$  es un coeficiente y  $b, c$  son exponentes.

Los coeficientes y exponentes de la Ecuación 6 se obtienen al cambiar la misma a una forma lineal con una transformación logarítmica y luego realizar una regresión múltiple. Esta regresión requiere datos de  $q_s$ ,  $V$  y  $Y$ , los cuales se obtienen de dos posibles maneras:

- a) Usando datos medidos si se dispone de por lo menos 10 años de medición. Este es el método preferido.
- b) Si no se dispone de datos medidos, entonces se deberán calcular. Para esto se seguirá el siguiente procedimiento:
  - a. Obtener la sección transversal representativa para el lugar donde se realizará la actividad de extracción.
  - b. Determinar el coeficiente de rugosidad,  $n$ , de la sección transversal. Si los materiales cambian a través de la sección transversal, obtener un valor de  $n$  representativo para diferentes profundidades del agua. La sección

transversal debe ser lo suficientemente amplia para incorporar la profundidad del caudal efectivo definido en la Sección 4.2.

- c. Obtener la profundidad del agua para un intervalo de valores de velocidad usando la ecuación de Manning. Es necesario utilizar el radio hidráulico en la ecuación de Manning en lugar de aproximarle al ancho del río. Si no lo hace así, su regresión dará como resultado un valor del coeficiente  $b$  igual a cero, ya que el  $\ln V$  y el  $\ln Y$  estarán relacionados linealmente. Sus valores deben exceder los correspondientes al valor de caudal efectivo. Estos valores se presentarán en una tabla.
- d. Obtener la carga de sedimentos para cada caudal incluido en la tabla preparada en el Paso c. para las condiciones existentes usando una de las relaciones para transporte de sedimentos no-cohesivos propuestas por Yang [13], [7]:

**Para arenas**, si el diámetro promedio de la partícula es menor de 2 mm, usar:

$$\begin{aligned} \log C_t = & 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega D_{50}}{v} - 0.457 \log \frac{V_*}{\omega} + \\ & \left( 1.799 - 0.409 \log \frac{\omega D_{50}}{v} - 0.314 \log \frac{V_*}{\omega} \right) \log \left( \frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

**Para materiales más gruesos**, si el diámetro promedio de las partículas está entre 2 mm y 10 mm, usar:

$$\begin{aligned} \log C_t = & 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega D_{50}}{v} - 4.816 \log \frac{V_*}{\omega} + \\ & \left( 2.784 - 0.305 \log \frac{\omega D_{50}}{v} - 0.282 \log \frac{V_*}{\omega} \right) \log \left( \frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

donde  $C_t$  es la concentración de sedimentos en partes por millón por peso,  $\omega$  es la velocidad de caída de la partícula con diámetro promedio,  $v$  es la viscosidad cinemática del agua para la temperatura promedio,  $V_*$  es la velocidad cortante,

$$V_* = \sqrt{gRS}$$

$g$  es la aceleración de la gravedad,  $R$  es el radio hidráulico,  $S$  es la pendiente de la línea de energía,  $V$  es la velocidad promedio del flujo, y  $V_{cr}$  es la velocidad crítica, la cual se calcula con las siguientes ecuaciones.

$$\text{Si } 1.2 < \frac{V_* D_{50}}{v} < 70 \quad \frac{V_{cr}}{\omega} = \frac{2.5}{\log \frac{V_* D_{50}}{v} - 0.06} + 0.66 \quad (9)$$

$$\text{Si } \frac{V_* D_{50}}{v} \geq 70 \quad \frac{V_{cr}}{\omega} = \frac{V_* D_{50}}{v} \quad (10)$$

$$\text{Si } 70 \leq \frac{V_* D_{50}}{v} \quad \frac{V_{cr}}{\omega} = 2.05 \quad (11)$$

La velocidad crítica es la velocidad promedio del flujo bajo las condiciones de movimiento incipiente.

Para el cálculo de la velocidad de caída,  $\omega$ , se usará la ecuación de Rubey [13]:

$$\omega = F \left[ \left( dg \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \right) \right]^{1/2} \quad (12)$$

donde

$$F = \left[ \frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gD_{50}^3 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)} \right]^{1/2} - \left[ \frac{36v^2}{gD_{50}^3 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)} \right]^{1/2}$$

$\gamma_s$  = Peso específico de los sedimentos, y

$\gamma$  = Peso específico del agua a la temperatura ambiente.

La Sección 4.2.3 provee detalles adicionales sobre el uso de las ecuaciones de Yang y sus límites de aplicación.

- c) Añadir los valores de carga de sedimentos a la tabla de velocidades y profundidades y obtener los coeficientes de la Ecuación 6.
3. Calcular la pendiente de equilibrio usando la siguiente ecuación [6]:

$$S_{eq} = \left( \frac{a}{q_s} \right)^{\frac{10}{3(c-b)}} q^{\frac{2(2b+3c)}{3(c-b)}} \left( \frac{n}{K_u} \right)^2 \quad (13)$$



donde  $S_{eq}$  es la pendiente de equilibrio para lograr que el río transporte la carga de sedimento existente,  $q_s$  es la carga de sedimentos proveniente de aguas arriba por unidad de ancho del río,  $q$  es el caudal unitario,  $K_u$  es un factor de conversión de unidades (1.486 para unidades americanas y 1.0 para el sistema internacional de unidades), y  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning.

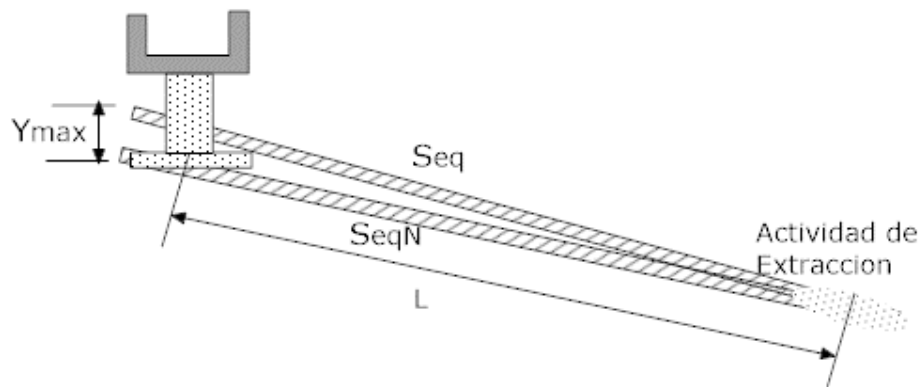
4. La pendiente del Paso 3 es aquella que el río tendría bajo condiciones de equilibrio usando las condiciones existentes. La extracción de material reducirá la disponibilidad de sedimentos aguas abajo. Esta reducción en el abasto de sedimentos será igual al volumen de sedimentos extraído. Se calculará el déficit de sedimentos que se producirá y se convertirá a carga de sedimento,  $q_s$ <sup>1</sup>. Por ejemplo, si se estima que la extracción anual será de un 20% de la carga que se recibe actualmente, entonces la carga de sedimento será 80% de la que se recibe actualmente. Esta reducción provocará un déficit de sedimentos que ocasionará erosión del cauce y lo obligará a buscar una nueva condición de equilibrio caracterizada por una pendiente de equilibrio menor. Si se presume que la aportación de material que acarrea el río no cambia y que la condición existente es cercana a la de equilibrio, entonces la nueva pendiente de equilibrio se calcula sustituyendo en la Ecuación 13 el valor reducido de la carga de sedimentos (en el ejemplo sería  $0.8 q_s$ ). Se denota la nueva pendiente como  $S_{eqN}$ .
5. La diferencia de pendientes multiplicada por la longitud del tramo afectado permite un estimado de la erosión por efecto de la reducción de material dentro del río. Estos cálculos se harán para una longitud,  $L$ , de 400 metros. Entonces, el estimado de la erosión máxima es:

$$Y_{max} = L (S_{eq} - S_{eqN})$$

La Figura 2, adaptada de Lagasse, et al. [6], muestra un esquemático del efecto esperado de la erosión.

---

<sup>1</sup> Si el volumen de extracción estimado es de material seco, corrija los valores con una porosidad de 0.4.



**Figura 2. Estimado de erosión según análisis de pendiente estable.**

6. El resultado de este análisis será un estimado preliminar de la erosión ocurrida. Los cálculos se realizarán para una reducción igual al volumen de extracción anual.

#### **4.2.3. Análisis de continuidad para sedimentos**

El propósito de este análisis es estimar los efectos del déficit de sedimentos que se produce por la extracción del material y que modifica las condiciones en el cauce río abajo. El procedimiento consiste en estimar el volumen promedio anual de sedimentos que arrastra el río en las condiciones existentes y compararlo con el que se producirá aguas abajo del lugar de extracción. El volumen de extracción del material representa una reducción en el sedimento que sale del área de extracción.

Este análisis requiere la siguiente información.

- 1) Caudales promedio mensuales del río.

Los caudales se obtendrán de estaciones de aforo cercanas al área de extracción. En caso de no haberlas, se seguirán los métodos de estimación de caudales mencionados en la *Guía para la Elaboración de Estudios Hidrológicos-Hidráulicos* [3].

- 2) Geometría de una sección transversal del cauce representativa del tramo de extracción.

La Sección 4.2 explica los detalles para la selección de esta sección. Es la misma que se usó para el análisis de movimiento incipiente.

3) Granulometría del material del fondo del río.

La granulometría se obtiene durante el reconocimiento de campo. Véase la Sección 4.2.

4) Carga de sedimentos promedio mensuales.

La carga de sedimentos para las condiciones existentes se obtendrá de mediciones de sedimentos cercanas al lugar donde se propone la actividad de extracción. De no estar disponible esta información, entonces se calculará usando una de las relaciones para transporte de sedimentos no-cohesivos propuestas por Yang [13], [7] y presentadas en la Sección 4.2.2.2. Las relaciones o funciones de transporte de Yang usan el diámetro promedio de la partícula y no requieren subdivisión en clases. Sus límites de aplicación son adecuados para los propósitos de esta guía, por lo cual se propone para los cálculos del análisis de estabilidad. Los límites de aplicación se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1. Intervalos de datos utilizados en el desarrollo de las funciones de transporte de sedimentos de Yang [14].**

<b>Variable</b>	<b>Arenas</b>	<b>Gravas</b>
<b>Tamaños de Partículas, <math>D_{50}</math>, mm</b>	0.15 – 1.7	2.5 – 7.0
<b>Velocidad, pies/s</b>	0.8 – 6.4	1.4 – 5.1
<b>Profundidad, pies</b>	0.04 – 50	0.08 – 0.72
<b>Pendientes del fondo</b>	0.000043 -0.028	0.0012 – 0.029

5) Volumen de material extraído anualmente.

El proponente deberá estimar el volumen de material que se espera remover en un año. Este valor deberá ser convertido en volumen sumergido presumiendo una porosidad de 0.4.

6) Propiedades del agua y de los sedimentos.

Se requiere la densidad del agua y de las partículas de sedimento, el peso específico del agua y del sedimento, la temperatura y la viscosidad del agua.

Las funciones de Yang no necesariamente serán las que se utilicen en el modelo detallado de transporte de sedimentos. La Sección 5.5.1 describe como se obtiene la función para el modelo si se utiliza HEC-RAS.

## **METODOLOGÍA**

La metodología sigue los pasos generales propuestos para el análisis de estabilidad vertical para proyectos de construcción de estructuras en carreteras [6]. Sin embargo, esta metodología fue adaptada para actividades de extracción de material de los ríos. La reducción de sedimento será el volumen de material que se propone extraer durante el año, el cual se convierte en carga de fondo promedio por unidad de ancho del cauce. Hay dos rutas a seguir, según se disponga o no de datos históricos de carga de sedimentos para el lugar de interés.

**Si se tienen datos de carga de sedimentos:** El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) publica el promedio mensual en toneladas/día (short-tons/day) con base en mediciones en algunas de sus estaciones de aforo. Este valor se convertirá a volumen en pies cúbicos o metros cúbicos. Los datos del USGS proveerán la cantidad de sedimentos que llega al tramo donde se propone la actividad.

**Si no se tienen datos de carga de sedimentos:** En este caso la carga de sedimentos se estimará con las ecuaciones de Yang para los caudales promedio mensuales. Las ecuaciones de Yang requieren la velocidad de caída del sedimento. Este valor se calculará con la ecuación de Rubey [13].

Una vez obtenido el estimado del volumen de material promedio movido durante un año, se aplicará la reducción en la carga de sedimentos correspondiente al volumen a ser extraído. Este volumen será distribuido a través del año según sea la intensidad con que se estará extrayendo el material durante el año de operación. En todo caso, se debe presentar, por lo menos, el escenario correspondiente a una reducción uniforme durante todo el año.

Con la reducción de volumen debido a la extracción del material es posible determinar el cambio promedio anual en la elevación del fondo del cauce. Este estimado se hace usando el ancho promedio del tramo del río y la distancia hasta algún punto de interés. Se deberá estimar la reducción promedio en el fondo del cauce ocasionado por el material extraído a lo largo de un tramo de 400 metros aguas abajo de la actividad de extracción. Se debe medir los 400 metros a partir del extremo aguas abajo del tramo donde se realizarán las operaciones. La altura promedio de erosión del cauce debe calcularse usando el volumen de la mezcla de sedimentos y agua, para lo cual se utiliza una porosidad de 0.4.

Aunque el análisis de continuidad presentado en la sección anterior permite obtener un estimado de la disminución promedio en la altura del fondo por efectos de la extracción, en realidad el cauce no se erosiona simultáneamente a lo largo del tramo del río, sino que comenzará a erosionarse a partir del lugar de extracción y el efecto progresará poco a poco en dirección aguas abajo. También ocurrirá un efecto similar de erosión hacia aguas arriba por el umbral que crea el déficit de material en el río. El cálculo permite evaluar la posible magnitud del impacto ocasionado por la actividad de extracción.

Los datos y la información recopilada se usarán para hacer una evaluación cualitativa y cuantitativa de la estabilidad del tramo del río, enfatizando aquellos aspectos relacionados con la capacidad del tramo para recibir y atrapar los sedimentos y los posibles efectos que tendrá la extracción de material sobre las estructuras, los tributarios, la zona ribereña y la estabilidad vertical del río.

## **5. Metodología para el Estudio de Transporte de Sedimentos**

La forma más adecuada para estimar el balance de sedimentos en un tramo de cauce es mediante el uso de modelos de transporte de sedimentos. El modelo seleccionado para estudios en Puerto Rico es HEC-RAS. La versión que se utilice debe ser igual o posterior a la 5.0. Los modelos hidráulicos se pueden clasificar en modelos de lechos rígidos, en los cuales la sección transversal y el fondo del río no cambian con el tiempo, y modelos de lechos movibles, en los cuales ocurren cambios debido al movimiento del material que lo constituye. Estos últimos se conocen también como modelos de transporte de sedimentos. Un modelo del transporte de sedimentos presupone la existencia de un modelo hidráulico de lecho rígido calibrado, el cual debe seguir las indicaciones de la *Guía para la Elaboración de Estudios Hidrológico-Hidráulicos* [3].

Una vez que se tiene el modelo hidráulico calibrado con lecho rígido, se procederá a introducir los cambios necesarios para el modelo de transporte de sedimentos. Los datos que se requieren para un modelo de transporte de sedimentos son cuantiosos y, en muchos casos, habrá incertidumbre en los mismos. Por lo tanto, se deben establecer guías para que los estudios realizados sean lo más correcto posibles y se guarden criterios uniformes en todos ellos. En esta sección se establecen los criterios que serán comunes a todos los estudios de transporte de sedimentos.

### **5.1. Pasos para la Creación de un Modelo de Transporte de Sedimentos**

Los siguientes pasos deben seguirse para la creación de un modelo de transporte de sedimentos con el propósito de analizar los impactos de la actividad de extracción de agregados en ríos [15]. De no poderse cumplir con alguno de ellos, se deberá someter una justificación.

- 1) Reunir datos: mapas, secciones transversales, mediciones de sedimentos suspendidos y sedimentos de fondo, tipos de suelo, hidrogramas, temperatura del agua, mediciones históricas de niveles de agua observados, actividades de construcción y estructuras que afectan el cuerpo de agua (puentes, atarjeas, embalses).

2) Hacer reconocimiento de campo a lo largo del área de estudio. Determinar lugares de posible inestabilidad en los bancos o en el lecho del cuerpo de agua. Observar las superficies para estimar los coeficientes de rugosidad en los bancos, el lecho y las zonas inundables. Determinar los límites donde comienza y donde termina su modelo. Ambos extremos deben estar localizados donde el flujo de agua y de sedimento es conocido y que sean secciones donde se justifique una condición de control. En la siguiente sección se especifican otros requisitos para las secciones de comienzo y final del tramo de río modelado.

3) Preparar datos geométricos y de caudales para el modelo hidráulico en flujo permanente. Probar el modelo usando el flujo máximo para un periodo de recurrencia de dos años y duraciones de 6, 12 y 24 horas. Utilizar estos resultados para identificar posibles lugares con limitaciones, tal como la falta de datos geométricos. De ser necesario, se debe obtener información de campo adicional. Utilizar las *Guía para la Elaboración de Estudios Hidrológico-Hidráulicos* [3] y el *Reglamento Conjunto de la Junta de Planificación*, Capítulo 43, [4] para obtener los requisitos y detalles del modelo hidráulico y utilizar las condiciones más restrictivas entre estas dos referencias.

4) Calibrar los valores de los coeficientes de rugosidad comparando los perfiles de agua obtenidos con el modelo con datos históricos. Luego añadir los datos de sedimentos y correr el modelo para frontera movable con el propósito de confirmar su calibración.

5) Preparar los datos de sedimentos necesarios. Esto incluye las granulometrías, las concentraciones de sedimentos para diferentes caudales, la selección de la función de transporte de sedimentos y las concentraciones y gradaciones correspondientes a las secciones en las fronteras de modelo. En estas Guías se describe la metodología para la selección de la función de transporte de sedimentos.

6) Calibrar el modelo de transporte de sedimentos. El proceso de calibración requiere la existencia de mediciones de sedimentos que permitan estimar el rendimiento de sedimentos, ya sea anual o de menor duración. De existir los datos, se debe ejecutar el modelo con hidrogramas de eventos en los cuales se conozcan las concentraciones de sedimentos que ocurrieron para demostrar que el modelo predice, con error aceptable,

la descarga de sedimentos observada. Otra prueba de calibración alterna es estimar el “caudal formador del cauce” en cada segmento y comparar el rendimiento anual obtenido con el modelo con el valor obtenido de las mediciones.

7) Ejecutar el modelo con la serie de caudales disponible para la condición sin actividad de extracción.

8) Ejecutar el modelo para las condiciones propuestas siguiendo diferentes secuencias de la actividad de extracción que se presentan en estas Guías. Deberá simular los casos para las condiciones durante el periodo de extracción y luego de finalizada la actividad. Este último caso permitirá determinar cuánto tiempo tardará el cauce en reponer el material extraído.

9) Analizar los resultados y comparar los impactos producidos por las diferentes alternativas ejecutadas en el Paso 8.

10) Realizar un análisis de sensibilidad cambiando las condiciones de borde, la serie de caudales y el coeficiente de rugosidad (un cambio a la vez) en un 25% hacia arriba y hacia abajo. Esto permitirá comparar los resultados y estimar los impactos dentro de un intervalo de escenarios posibles.

## **5.2. Modelo de Transporte de Sedimentos usando HEC-RAS**

A continuación se incluyen los requisitos que se deben usar en las opciones de HEC-RAS cuando se construye un modelo de transporte de sedimentos para evaluar la capacidad de recuperación del material del lecho en los tramos donde se propone la extracción de material.

Para el transporte de sedimentos, el usuario tiene dos opciones: la primera opción es hacer un modelo que simula una secuencia de condiciones permanentes una tras otra. A esto se le conoce como un modelo cuasi-no-permanente. En este caso se resuelven las ecuaciones de flujo gradualmente variado permanente y se cambian las condiciones con el tiempo en periodos de días, semanas o meses. La segunda es hacer un modelo de flujo no-permanente en la cual se considera el flujo variando con el tiempo continuamente. En este caso se resuelven las ecuaciones con los componentes



dinámicos. La Tabla 2 ofrece algunas de las opciones generales de ambos tipos de modelo.

Los estudios para transporte de sedimentos asociados con lugares de extracción de material se harán usando solamente la opción de flujo cuasi-no-permanente (quasi-steady). A continuación se especifican condiciones requeridas para la creación de cualquier modelo de transporte de sedimentos para los propósitos de esta Guía.

### **5.3. Obtención de Caudales y Condición de Borde Aguas Arriba**

Para estimar el efecto de las extracciones de material de un río a lo largo de un periodo de tiempo se requiere de datos obtenidos a través de los años. Específicamente datos de caudales y de cargas de sedimentos. El procedimiento para obtenerla o estimarla depende de la información disponible. En todo caso siempre se necesita una serie de valores de caudal en todas las secciones aguas-arriba de cualquier tramo del río. Los datos pueden ser dados con intervalos de tiempo irregulares, pero deben ser iguales o menores que una semana. Los valores semanales se utilizan para representar periodos de verano donde los flujos son bajos y los cambios morfológicos son pequeños. La serie de caudales históricos puede ser obtenida de estaciones de aforo del USGS si las hay disponibles en las cercanías del proyecto. Aunque se ha estado utilizando la data histórica para hacer este análisis, no hay ninguna garantía de que las secuencias de flujo históricos se van a repetir en el futuro.

Hay tres posibles escenarios en cuanto a la disponibilidad de datos históricos.

1. Existe una serie de datos lo suficientemente larga (más de 20 años) cercana al tramo de la extracción.
2. Existen datos cercanos a la extracción, pero su periodo es corto (menos de 20 años)
3. No hay datos.

**Tabla 2. Opciones de simulación con modelos Cuasi-Permanente y No-Permanente**

<b>Cuasi-no-permanente</b>	<b>No-permanente</b>
Tiene la capacidad de resolver las ecuaciones de flujo gradualmente variado en flujo permanente (steady) para una serie de flujos vs tiempo (histogramas).	Resuelve las ecuaciones de Saint Venant para flujo no-permanente.
No conserva flujos ni almacenamiento dentro del cauce.	Conserva los flujos y almacenamiento dentro del cauce.
La estabilidad es mayor porque cada cálculo es individual. Toma más tiempo el cálculo por cada tiempo modelado, pero como son cálculos individuales, resulta en una operación del modelo más rápido.	Es menos estable. Cada cálculo en este modelo es más rápido que el de flujo permanente, pero su solución es más compleja. Los modelos dinámicos requieren cálculos intensivos y la simulación requiere intervalos de tiempo pequeños para mantener la estabilidad numérica. Como resultado de estas operaciones, en un modelo de transporte de sedimento, tenderá a tardar más para converger al resultado.
Está limitado únicamente a opciones de flujo permanente.	Condiciones de frontera complejas pueden incluirse, tales como agua subterránea, afluentes, estructuras laterales, barreras internas como válvulas, compuertas de control, bombas y otras.

El uso de datos históricos es para estimar y preservar los parámetros estadísticos de la serie de datos (promedio, varianza, etc.) y aumentar el largo de la serie para el Escenario 2. Si se dispone de una cantidad limitada de datos de caudal, como en el Escenario 2, se debe considerar un enfoque regional para la estimación de estos parámetros. Este enfoque provee para la utilización de datos procedentes de otras estaciones de aforo con mayor cantidad de datos (20 años o más) y de registro continuo para la estimación de los parámetros estadísticos del modelo estocástico. En la selección de las estaciones de aforo (conocidas como estaciones índices) se debe considerar las propiedades estadísticas de la serie con mayor énfasis en lugar de la proximidad y similitud hidrológica de la cuenca al punto de interés. El trabajo investigativo de Segarra-García [16] utilizó la técnica de análisis discriminatorio para estimar los parámetros de cuencas sin aforar utilizando conglomerados de cuencas aforadas. Se identificaron cuatro conglomerados en los cuales se clasificaron todas las cuencas aforadas en ese momento. La importancia de este trabajo es que permite seleccionar cuencas aforadas para el uso de sus datos históricos de caudales en la estimación de los parámetros estadísticos del punto de interés en una cuenca desaforada.

En el Escenario 3 se usará el trabajo de Segarra-García [16] para identificar una estación de aforo con suficientes datos para hacer una transferencia de caudales al punto de interés y ajustarlo por área y otros parámetros fisiográficos pertinentes. Cuando existen tendencias en los datos, por ejemplo, aumento del promedio a través de los años o la varianza no es constante con el tiempo, las mismas deben ser reproducidas en las secuencias de flujo generadas para representar caudales más reales.

Cuando los caudales y el error estocástico son normalmente distribuidos se puede usar el proceso de Markov de primer orden directamente. De no existir datos de caudal y se demuestra que ninguno de los procedimientos anteriores es adecuado, se permitirá el uso de un modelo hidrológico determinístico, el cual incorpora los cambios de la cuenca y será alimentado con lluvia sintética generada por un modelo estocástico para hacer una simulación hidrológica continua sobre la cuenca y obtener los caudales.

Existen numerosos modelos estocásticos. Uno de ellos es el “Streamflow Record Extension Facilitator (SREF)” versión 1.0 del USGS. Esta aplicación, libre de costo, utiliza el método de regresión regional con las estaciones de aforo del USGS y puede ser utilizada para extender, o aumentar, el registro de datos diario de caudales para estaciones con registros cortos, o datos parciales, utilizando otras estaciones de aforo representativas con registros continuos mayores o de largo plazo.

#### **5.4. Condiciones de Borde Aguas Abajo**

HEC-RAS permite tres tipos de condiciones de borde aguas abajo de la extracción. Estos requisitos son más fáciles de cumplir, sin embargo, se debe justificar el tipo de condición que se selecciona. En todos los casos, la sección transversal donde se aplica la condición de borde debe ser una donde no se esperen cambios morfológicos significativos durante el periodo de tiempo que dura la simulación. La condición de frontera que se requiere para los modelos es una curva de elevación de agua contra duración (Stage Time Series). De no haber disponibilidad de datos para esta condición, se usará una curva de descarga (rating curve), o sea, flujo contra altura de agua en la sección. No se permite el uso de la profundidad normal, ya que introduce mucha incertidumbre en los cálculos.

#### **5.5. Datos de Sedimentos**

Para el análisis de transporte de sedimento, el modelo requiere de cuatro archivos. Estos son archivo de caudales, archivo con la geometría del cauce, archivo con los datos de sedimento, y archivo especificando el “Plan”, que es una combinación de uno de cada uno de los archivos anteriores. La descripción de la geometría del cauce debe ser realizada siguiendo las indicaciones presentadas en la *Guía para la Elaboración de Estudios Hidrológicos-Hidráulicos* [3]. Los archivos de flujo deben contener las series de tiempo de caudales y condiciones de borde descritas en la sección anterior. El archivo para el plan debe incluir, además, el archivo con los datos de sedimentos, los cuales contienen la información que se describe a continuación.

Los datos de sedimentos son de diferentes tipos. Los más importantes, y que pueden afectar los resultados en mayor grado, se describen a continuación.

#### **5.5.1. Selección de la función de transporte de sedimentos**

La aplicación HEC-RAS, versión 5.0, tiene ocho funciones de transporte de sedimentos que son:

- *Ackers y White*
- *Engelund y Hansen*
- *Laursen en la forma modificada por Copeland*
- *Meyer-Peter y Müller (MPM)*
- *Toffaletti*
- *MPM – Toffaletti*
- *Yang (ecuación para arena y gravas)*
- *Wilcock y Crowe*

La función que se seleccionará para un cauce en particular será aquella que, dentro de los límites de aplicación para los que fue obtenida, cumpla con la mayor cantidad de parámetros usados en su derivación. Los parámetros a evaluar son el diámetro promedio del material, la pendiente y el ancho del cauce. Por las limitaciones de HEC-RAS, la función debe ser una de las que se incluyen en la lista anterior. En caso de que haya dos o más funciones que satisfacen los tres criterios, entonces se añadirán dos variables más que son la velocidad promedio del flujo y la profundidad del agua. Estos valores deben ser representativos de los flujos promedio en el cuerpo de agua. El programa SAM [14] contiene una base de datos con 20 funciones de transporte de sedimentos, entre las cuales se encuentran las de la lista anterior, con excepción de Wilcock y Crowe. En todos los estudios, se debe justificar la selección de la función de transporte.

#### **5.5.2. Métodos de mezcla de sedimentos**

La opción requerida será la de “capa activa” (active layer) usando los parámetros pre-seleccionados en HEC-RAS. Esta opción puede aplicarse a ríos con materiales arenosos y con grava y provee resultados que pueden ser más fáciles de interpretar. La capa activa para esta opción va a tener un grosor del tamaño igual al  $D_{90}$  de la distribución granulométrica del material del fondo del cuerpo de agua.

### **5.5.3. Velocidad de caída de partículas de sedimento**

HEC-RAS tiene cinco fórmulas para calcular la velocidad de caída de una partícula de sedimento, las cuales son:

- Ruby
- Toffaleti
- Van Rijn
- Dietrich
- Report 12

De estas fórmulas, se utilizará la de Van Rijn [13] ya que, comparada con valores experimentales, posee alta eficiencia y errores bajos [17].

### **5.5.4. Determinación de los límites de degradación del lecho**

En HEC-RAS se debe definir el volumen del lecho que estará sujeto a deposición o degradación. Si se conoce la profundidad de la capa de material disponible debajo del fondo, la misma se debe usar. La profundidad máxima dependerá de las características granulométricas y de la profundidad de lecho del río. En todos los casos deberá ser mayor que la profundidad máxima solicitada en el permiso de extracción. De esta manera se asegura que, en las simulaciones, se incluya la posibilidad de que un evento pueda socavar naturalmente el material que se desea remover para otros usos.

Además de la profundidad máxima, el modelo requiere los límites laterales de la porción del lecho donde se permitirá erosionar o depositar material. Para los estudios sometidos al DRNA, se usará como frontera hasta un máximo igual al ancho del río, pero dejando por lo menos un metro de distancia entre la base del talud y el lugar de la excavación. Estos límites deberán coincidir con los límites especificados en los planos topográficos del área de extracción sobrepuesto en el plano de deslinde del cauce legal del río certificado por el DRNA. Para las secciones transversales ubicadas fuera de los límites del tramo de extracción se mantendrán los límites laterales del lecho erosionable con un ancho similar a los del proyecto, a menos que las condiciones específicas del lugar requieran otros ajustes. En este último caso, deberá consultarse con el DRNA. Si se prevé la

existencia de múltiples zonas de lecho movable debido a las condiciones morfológicas del lecho dentro del ancho del cauce, deberá proveerse justificación.

#### **5.5.5. Muestras para la granulometría**

La granulometría dentro del tramo del río puede ser variada. Las diferentes características geomorfológicas del cuerpo de agua contienen materiales con granulometrías distintas. Por esta razón es importante que las muestras granulométricas sean representativas del lugar donde se estará extrayendo material. A continuación se presenta una lista de recomendaciones propuesta por el Departamento Federal de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) [18] para obtener muestras representativas.

1. Identificar los tramos del río con características geomorfológicas similares (homogéneas). Si el proyecto se ubica en tramos donde el cauce es uniforme, sin la presencia de meandros u otras formaciones geomorfológicas, las muestras tomadas en las zonas donde se propone la extracción serán representativas del lugar.
2. El muestreo debe ser suficiente para abarcar la variabilidad espacial, el tamaño, y la granulometría del material del lecho. Al menos tres muestras en una sección son necesarias para tomar en cuenta la variabilidad espacial a través de una sección transversal.
3. Las granulometrías provenientes de varias muestras a través de una misma sección transversal deben ser promediadas para tener una sola distribución que sea representativa de esa sección. Las diferentes granulometrías de la misma sección transversal se promedian pesándolas por la longitud del perímetro húmedo correspondiente al tramo de la sección donde predomina. De esta manera se toma en cuenta la contribución de cada distribución de partículas a los esfuerzos cortantes a través de la sección transversal.
4. Las secciones de muestreo deben ser representativas de los procesos hidráulicos y de sedimentación que ocurren en el tramo del cuerpo de agua. El tramo debe ser estable desde el punto de vista geomorfológico.

5. Se deben evitar confluencias con tributarios que interfieran con el balance de sedimentos en el tramo.
6. Es preferible que no hallan zonas activas de erosión en los bancos para no alterar las muestras del lecho. No se deben tomar muestras en zonas de flujo estancado detrás de las barras, cerca de estructuras como pilastras o estribos de puentes que produzcan socavación local o provoquen contracciones del cauce.
7. En lugares donde se lleva a cabo una actividad de extracción, las muestras deben tomarse en diferentes épocas del año para tomar en cuenta las variaciones por la estación.
8. En lugares donde se lleva a cabo una actividad de extracción se debe medir el espesor de la capa de material debajo del fondo en los sitios donde se midan secciones transversales.
9. Las muestras deben ser tomadas durante caudales bajos.
10. Materiales más finos que las arenas finas ( $< 0.062$  mm) no se usarán para calcular la carga de sedimentos de fondo. Como regla general, el 10% más fino se considera material fino atrapado en los intersticios del depósito.
11. Las barras de punta que se forman en los meandros poseen variabilidad lateral en la distribución de los materiales. Estos sitios no son recomendables, ya que las velocidades varían grandemente reduciéndose en dirección hacia el banco del río.
12. Los ríos con materiales arenosos donde las condiciones predominantes son estables, no debería haber variaciones verticales ni temporales de material. En caso de que ocurra variaciones del material a lo largo del tramo se debe muestrear en diferentes lugares, como se mencionó en el Punto 2.
13. HEC-RAS permite introducir una granulometría diferente en cada sección transversal. Esto permite considerar la variación longitudinal de los materiales del lecho.

***Consideraciones para Ríos con Material Grueso (gravas, guijarros y cantos rodados)***

Los ríos con mezcla de gravas, guijarros o pedruscos (cobbles) y cantos rodados o bolos (boulders) se caracterizan por tener variabilidad vertical, espacial y temporal en el



material del lecho. Estos cauces se caracterizan por estratificación vertical de los materiales del lecho. Además, en muchas ocasiones se formará una armadura en la superficie dejando los materiales más finos cubiertos debajo de esta capa. La capa de armadura se forma también en las barras. En estos lugares se encuentran diferentes tipos de material, desde grandes cantos rodados hasta arenas.

La Figura 3 muestra el lecho de un río con materiales gruesos en la superficie y los materiales más finos luego de remover la capa superficial. En este caso no se forma una coraza completa, sin embargo, se observan los materiales más finos debajo de la capa superficial.



**Figura 3. Capa superficial de material grueso y material subyacente.**

En caso de que exista una coraza, se debe muestrear la capa superior usando un gravelómetro para conocer su composición. La granulometría de la capa superficial o de la coraza tiene efecto en la rugosidad hidráulica, el esfuerzo cortante crítico, el proceso de formación de la coraza y el transporte de sedimentos. El método de conteo mediante el uso del gravelómetro [18] es el requerido en lechos de gravas y guijarros donde se aprecie una coraza o una capa superficial con materiales de mayor tamaño que los subyacentes. Aunque el método tiene sus limitaciones, particularmente porque no considera partículas menores de 2 milímetros e introduce sesgo incrementando el porcentaje de las fracciones de materiales gruesos y disminuyendo la contribución de las partículas menores de 8 milímetros, este es el método más sencillo de usar y, si se mantiene su uso consistentemente, los resultados obtenidos pueden ser comparados. El

muestro debe consistir de por lo menos 200 rocas. Luego se remueve la coraza para obtener la muestra del material debajo de la coraza, asegurándose que la muestra contiene materiales de todos los tamaños disponibles en el lecho. Se debe profundizar por lo menos 20 cm para tomar la muestra. Este límite satisface, o excede, las profundidades de muestreo recomendadas por el USDA para ríos con materiales gruesos [19]. Sin embargo, se debe medir el espesor de la capa de material disponible.

Suponiendo que los efectos de resistencia son dominados predominantemente por los materiales más gruesos, algunos expertos recomiendan obtener muestras de las barras centrales porque están expuestas a las velocidades mayores que son las que transportan los materiales más gruesos y se puede tener acceso a ellas en muchas ocasiones [18]. El muestreo debe hacerse en la zona aguas arriba de las barras, ya que los sedimentos son representativos del cauce principal. Las barras de punta son menos recomendables debido a que en ellas la velocidad del agua varía grandemente y se ubican en meandros donde la sección transversal del río no es representativa de los tramos rectos [2]. Las barras laterales son las menos recomendadas de todas ya que se forman en zonas de baja velocidad afectadas por los bancos.

En cauces de agua con rápidos y pozas (riffles and pools), donde no hay barras, se recomienda tomar las muestras en los rápidos. Sin embargo, el material proveniente de los rápidos es usualmente más grueso en flujos bajos, cuando el transporte de sedimentos es mínimo, comparado con el de flujos altos cuando el transporte de sedimentos es más activo.

Todas las muestras tomadas con recogedores deberán ser procesadas por un laboratorio geotécnico debidamente acreditado, firmadas, certificadas, y selladas por un Ingeniero Licenciado e incluidas en el informe. De las muestras de conteo tomadas con gravelómetro se obtienen curvas granulométricas usando la distribución de tamaños, en lugar de pesos. Si el procedimiento se lleva a cabo cuidadosamente, los resultados deben ser idénticos a los obtenidos mediante el proceso de separación con tamices [18], por lo tanto, se pueden combinar los datos de agregados gruesos del gravelómetro con los resultados obtenidos en pruebas de tamices.

HEC-RAS permite el uso de múltiples distribuciones granulométricas, las cuales se asignan a un grupo de secciones transversales, según las características del lecho en el tramo del estudio. No se permite la interpolación automática de las granulometrías entre secciones transversales.

### **Datos de Sedimentos para las Secciones de borde del modelo**

El modelo de transporte de sedimentos necesita datos de sedimentos en los límites aguas arriba y aguas abajo del modelo. Opcionalmente pueden incluirse cargas de sedimentos en lugares dentro del tramo modelado.

Las opciones disponibles son Carga de Equilibrio y Curva de Descarga asociada con sedimentos.

#### ***Carga de Equilibrio***

En este caso HEC-RAS obtiene la capacidad de transporte de sedimentos usando la granulometría del fondo del lecho para cada intervalo de tiempo y cada clase de la distribución granulométrica en la sección aguas arriba. La suposición de que en la sección aguas arriba se satisface la capacidad (carga de sedimentos está en equilibrio) obliga a que la sección aguas arriba del modelo no se erosione ni se llene de sedimentos.

Esta condición de frontera solo es aceptable si se tiene certeza de que la sección en el límite cumple con esa condición. Los resultados son sensibles a la granulometría en esta sección y a la función de transporte de sedimentos que se seleccionó. Estos parámetros pueden producir errores de varios órdenes de magnitud. Cuando se seleccione esta opción, los límites del modelo deben seleccionarse aguas arriba lejos del tramo propuesto para la extracción y donde se tenga un tramo en equilibrio dinámico.

#### ***Curva de Descarga asociada con sedimentos***

En este caso el transporte de sedimentos se calcula según los caudales de agua en el río. Esta condición se puede utilizar en la sección de frontera aguas arriba y, de ser necesario, en secciones dentro del tramo modelado. El mayor inconveniente es la disponibilidad de los datos necesarios.

La estimación de la relación entre carga de sedimentos y caudal ( $Q_s$  vs  $Q$ ) debe documentarse. El Centro de Ingeniería Hidrológica del Ejército de los Estados Unidos (HEC, por sus siglas en inglés) recomienda las siguientes consideraciones [20]:

- 1) Ajustar por efecto de cargas de sedimentos durante flujos altos para los cuales no se conozca la carga de sedimentos. Estos flujos usualmente llevan altas concentraciones de sedimento suspendido y sedimentos de fondo.
- 2) Considerar el uso de correctores “no-prejuiciados” para corregir posibles errores al calcular concentraciones a partir de las clases de la distribución granulométrica.
- 3) Incluir suficientes puntos en la curva  $Q_s$  vs  $Q$  como para distinguir cambios en la pendiente de esta curva.
- 4) Puesto que los modelos de transporte de sedimento son sensibles a los valores de la carga de sedimentos en los límites del modelo, lo cual es un dato incierto aún en los mejores casos, se podría refinar la distribución durante el proceso de calibración.

#### **5.5.6. Propiedades de los sedimentos**

Las siguientes guías deben seguirse con respecto a los valores de las propiedades de los sedimentos.

- Gravedad Específica: Usar 2.65
- Factor de Forma: No se requiere.
- Peso Específico: Para los propósitos de esta Guía se usarán los valores predefinidos en HEC-RAS: Gravas: 93 lbs/ft<sup>3</sup>, Limos: 65 lbs/ft<sup>3</sup>, Arcillas: 30 lbs/ft<sup>3</sup>.

No se permite cambios en la escala de las clases de granulometría. Se debe respetar la escala  $\Psi$  [15].

#### **5.5.7. Método de rastreo de los sedimentos**

La Ecuación de Exner es la utilizada comúnmente para el rastreo de los sedimentos a lo largo del cauce. Sin embargo, se ha detectado que, en algunos casos, el modelo puede mover sedimentos a velocidades mayores que la velocidad del agua. Para prevenir estos

casos, se utilizará la opción de rastreo de sedimentos hasta el límite de la velocidad del agua.

#### **5.5.8. Calibración de las funciones de transporte de sedimentos**

La única modificación permitida de las funciones de transporte de sedimentos corresponde al caso en que se use la función de Mayer-Peter-Muller (MPM) modificada según Wong y Parker [20]. Este cambio se incluye como una opción dentro de HEC-RAS y se recomienda hacerlo usando la opción automática que tiene HEC-RAS y no cambiar los valores manualmente.

#### **5.5.9. Tolerancias permitidas para las variables del modelo**

*Factores de peso para propiedades de las secciones transversales:* No cambiar los recomendados por HEC [20] que son:

Sección Aguas Arriba = 0

Sección Aguas Abajo = 0

Sección donde se realizan los cálculos = 1

De esta manera se reduce la posibilidad de oscilaciones numéricas en los resultados.

*Número de Iteraciones asociadas con el algoritmo de mezcla y formación de la armadura:* Este cálculo iterativo es importante para mantener las predicciones del modelo en valores adecuados sin tener intervalos de cómputo muy cortos. Es un parámetro que se debe calibrar entre 1 y 50, comenzando por un valor alto y reduciéndolo lo más que se pueda sin que los resultados cambien. Un valor de 10 significa que el cálculo del intercambio de masa y la granulometría del lecho serán actualizados 10 veces antes de realizar un nuevo cálculo de la curva de remanso y obtener un nuevo nivel del fondo. Si la duración de las ejecuciones del programa no es un problema, se debe utilizar un valor alto.

*Cambio mínimo del nivel del lecho antes de actualizar la sección transversal:* Usar el valor recomendado por HEC-RAS (0.02 pies) o menor. Aumentar este valor no reduce los tiempos de cómputo significativamente.

***Cambio mínimo en la sección transversal antes de recalcular los parámetros hidráulicos:*** Este parámetro se debe mantener igual al del *Cambio mínimo del nivel de lecho antes de actualizar la sección transversal*.

***Método para calcular el cambio de volumen (deposición o erosión):*** Brunner [20] realiza un cotejo entre el cambio de volumen de material calculado con la ecuación de Exner y el volumen de material obtenido al ajustar las secciones transversales. Cualquier diferencia entre ellos será transferida al próximo intervalo de tiempo. Este método se debe utilizar, a menos que se desee comparar resultados con los obtenidos usando HEC-6.

#### **5.5.10. Predictores de rugosidad del lecho por efecto de los sedimentos**

La rugosidad del lecho del cauce puede variar con la dinámica del transporte de sedimentos. Para ríos de grava en los cuales el tamaño de las partículas es la razón principal de la rugosidad, se recomienda el uso de la ecuación de Limerinos.

#### **5.5.11. Modelaje de extracción del material**

El dragado es la remoción del material del lecho del río por medios mecánicos. Estos procesos deben ser modelados explícitamente, ya que las ecuaciones de transporte y continuidad no toman en cuenta alteraciones realizadas por los seres humanos.

HEC-RAS incluye opciones para simular la extracción de materiales en la simulación del transporte de sedimentos. El modelo permite crear “*Eventos de Extracción*” para la remoción de sedimentos de una o varias secciones a partir de una fecha de inicio y hasta una fecha final. HEC-RAS 5.0.1 contiene siete tipos de evento y permite preparar programas de extracción a lo largo del tiempo.

Los métodos disponibles se categorizan en dos tipos. Estos son (1) cambios en elevación y (2) movimiento de masa de material. Los métodos categorizados como de cambios en elevación son tres. En ellos se define la elevación y extensión lateral de la extracción y se remueve el sedimento del lecho hasta una elevación predeterminada. Los métodos funcionan como si se removiera el material contenido en un marco rectangular superpuesto sobre la sección transversal. Cada método se diferencia en la definición de los límites laterales y la elevación de la extracción. Se dispone también de 4 métodos basados en la

remoción de masa de material de las secciones transversales. La diferencia está en la forma en que la remoción del material afecta la forma de la sección transversal. En estos casos se especifica el tonelaje de material que se desea extraer y se permite que las secciones transversales respondan a esa remoción de masa manteniendo la forma natural del fondo [21].

El método recomendado dependerá de si se especifica una profundidad o una cantidad de material. En cualquier caso, se puede especificar las estaciones donde se llevará a cabo la actividad de extracción, las cuales deben estar dentro de los límites permitidos para cambios en el cauce. Es práctica común en Puerto Rico especificar la localización, el ancho y la elevación de invertida que tendrá la extracción propuesta. En estos casos se usará el método de elevaciones especificando en la sección transversal afectada las estaciones del lado derecho e izquierdo que limitan la zona donde se realizará la extracción.

HEC-RAS permite remover la cantidad de material instantáneamente o distribuir la operación a lo largo del tiempo. Este último caso es el que se aproxima a la realidad de una operación diaria en una actividad de extracción de material. En este caso se especifica la fecha de comienzo y la fecha de terminación de las operaciones. Este método es especialmente útil si se especifica la cantidad de material (masa) que se permite remover en un periodo de tiempo dado. En estos casos el modelo divide la cantidad de material especificado proporcional en el tiempo.

También es posible remover material a lo largo del tiempo usando los métodos de elevaciones. Se deberá proveer, como parte de los resultados, una gráfica que muestra la remoción del material acumulado a lo largo del tiempo.

#### **5.5.12. Resultados requeridos del modelo de transporte de sedimentos**

Los resultados de un modelo de transporte de sedimentos pueden generar archivos digitales muy grandes. Por esta razón se debe controlar el número de variables que se desee obtener.

HEC-RAS incluye 6 niveles para definir la cantidad de datos que se pueden grabar de los resultados. El nivel de resultados mínimo a utilizar, según las opciones de HEC-RAS, deberá ser 4, el cual permite obtener 14 variables dentro de los resultados. Los resultados

deben darse en dimensiones de volumen y no de masa. Esta es la opción que tiene HEC-RAS sin modificar las unidades.

El informe deberá incluir gráficas de las secciones transversales mostrando los cambios en el perfil de la sección, así como perfiles longitudinales mostrando la evolución del lecho. El intervalo al que se deben graficar debe ser cónsono con los cambios que experimente el cauce, lo cual hace que el ingeniero tenga que realizar ajustes para conseguir mostrar los cambios en forma clara y que sean explicados en el análisis de los resultados. Se permite el uso de la aplicación HDF5 para almacenar datos en forma binaria y así acelerar el procesamiento de los datos y optimizar la memoria. Este programa de computadora se obtiene libre de costo y, a partir de la versión 5.0, HEC-RAS crea los archivos listos para ser leídos en esta forma. Si el archivo de resultados es mayor de 2 GB, los datos deberán ser manejados usando HDF5.

Es de esperar que los cambios en la sección transversal obtenidos con el modelo hidráulico no siempre coincidirán geoméricamente con los cambios ocurridos en la realidad. Si se dispone de varios levantamientos topográficos en la misma sección transversal, se deberá cotejar los cambios obtenidos en el modelo con los cambios medidos para determinar su precisión. En este caso se deberá comparar, además, los datos medidos y los calculados usando los cálculos de cantidad de masa removida a lo largo del tramo activo del proyecto dividido por el cambio de volumen. Las gráficas mostrando las cantidades de material entrando y saliendo del tramo de extracción, así como los cambios en la cantidad de material que ocurren en el lecho del río son obligatorias. Estas variables son las que forman el balance de masa representado por la ecuación de Exner.

## **6. Datos Requeridos para la Extensión de Tiempo de una Extracción**

Si se planifica extraer material más allá del periodo del permiso otorgado se deberá obtener una información necesaria sobre el tramo de río donde se lleva a cabo la extracción de material:

1. Verificación de secciones de control: Esto incluye un cotejo de que las condiciones al inicio y al final del tramo del modelo considerado no han cambiado



significativamente y, por lo tanto, los datos utilizados para alimentar el modelo de transporte de sedimentos no han cambiado. De no ser así, se deberán hacer los ajustes necesarios.

2. Levantamientos de secciones transversales y profundidades máximas a lo largo del tramo usado en el modelo de transporte de sedimentos: Se realizarán levantamientos antes del inicio de las operaciones de extracción, seis meses luego de iniciar la operación y al año de haber comenzado la actividad. Si el permiso fuese renovado por un año adicional, se deberá seguir con los mismos intervalos de tiempo para obtener secciones transversales.
3. Muestreo de sedimentos aguas arriba y aguas abajo del proyecto cada mes y durante eventos de magnitudes significativas: Este muestreo incluye sedimentos en suspensión y sedimentos de fondo.
4. Comparación de secciones transversales y evolución del cauce: Las secciones transversales obtenidas según descrito en el Punto 2 servirán para verificar que la operación de extracción se realiza según lo autorizado en el permiso y para realizar ajustes, de ser necesario.
5. Actualización del modelo de transporte de sedimentos: Los cambios observados serán incluidos en el modelo hidráulico para tener mejores estimados del balance de masa en el cauce.

## **7. Información Adicional**

En el documento que presente sobre la parte descriptiva de los procesos, métodos, cómputos y resultados del estudio de transporte de sedimentos, se deberá incluir la siguiente información:

### **7.1 Certificación**

El informe del estudio de transporte de sedimentos debe incluir una certificación sellada y firmada por un ingeniero licenciado autorizado a ejercer en Puerto Rico. De ser una firma de servicios de ingeniería, el nombre de la entidad debe establecer que se trata de una

corporación profesional mediante el uso de las palabras “corporación profesional” o las abreviaciones “C.S.P.”, “P.S.C.”, “C.P.” o “P.C.”.

## 7.2 Información a someter en formato digital

El informe del estudio de transporte de sedimentos deberá incluir un disco compacto (CD) o un DVD debidamente identificado con el nombre del proyecto y la fecha de elaboración del informe. Los archivos digitales deben incluir:

1. Fotos y videos obtenidos durante el reconocimiento de campo junto con una breve explicación de los mismos.
2. Un directorio con los archivos digitales utilizados en el modelo hidrológico (si aplica), junto con otro directorio con todos los archivos digitales utilizados en el modelo hidráulico. Este requisito aplica para cualquier tipo de modelo utilizado ya sea de flujo permanente, no-permanente, bidimensional o transporte de sedimentos.
3. En el caso de la utilización de caudales históricos, o en el caso de generación de caudales sintéticos (extensión de registro de caudales), se incluirán en el disco los archivos correspondientes a los datos de entrada y resultados.
4. Incluir entre los archivos digitales únicamente aquellas corridas que contengan la condición existente y las alternativas evaluadas en el estudio de transporte de sedimentos. El ingeniero debe presentar entre sus conclusiones la alternativa seleccionada.
5. Cualquier información adicional que el ingeniero considere importante para documentar o justificar las alternativas seleccionadas y que agilice el proceso de evaluación.

## **Bibliografía**

- [1] D. Biedenharn, C. Elliot y C. Watson, WES Stream Investigation and Streambank Stabilization Handbook, Vicksburg, VA: US Army Corp of Engineers, 1997.
- [2] G. Morris, J. Portalatín, R. de Jesus, M. Ramos y T. Toledo, Guía para el Manejo de Ríos en Puerto Rico, San Juan: Departamento de Recursos Naturales y Ambientales.
- [3] W. F. Silva Araya y J. Rivera Santos, «Guías para la Elaboración de Estudios Hidrológicos-Hidráulicos,» Junta de Planificación y Departamento de Recursos Naturales de Puerto Rico, San Juan, PR, 2016.
- [4] Junta de Planificación, Reglamento Conjunto para la Evaluación y Expedición de Permisos Relacionados al Desarrollo y Uso de Terrenos, San Juan, PR, 2015, p. 1096.
- [5] C. Watson, D. Biedenharn y S. Scott, Channel Rehabilitation: Processes, Design and Implementation, Vicksburg: USACOE, 1999.
- [6] P. Lagasse, L. Zevenbergen, W. Spitz y L. Arneson, «Stream Stability at Highway Structures, FHWA-HIF-12-004, HEC-20,» Federal Highway Administration, Washington DC, 2012.
- [7] E. V. Richardson, D. B. Simon y P. F. Lagasse, «River Engineering for Highway Encroachments,» US Federal Highway Administration, Office of Bridge Technology, Washington DC, 2001.
- [8] D. B. Simons y F. Senturk, Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamics, Colorado: Water Resources Publications, 1992.

- [9] G. Parker, C. Toro-Escobar, M. Ramey y S. Beck, «Effect of Floodwater Extraction on Mountain Stream Morphology,» *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 129, n° 11, pp. 885 - 895, 2003.
- [10] D. Biedenharn y R. Copeland, «Effective Discharge Calculation,» US Army Corps of Engineers, ERDC/CHL-VIII-4, Vicksburg, MS, 2000.
- [11] P. Julien, *River Mechanics*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002.
- [12] E. Pemberton y J. Lara, «Computing Degradation and Local Scour,» Bureau of Reclamation, Denver, CO, 1984.
- [13] T. C. Yang, *Sediment Transport: Theory and Practice*, Malabar, FL: Krieger Publishing Co., 2003.
- [14] R. Copeland, D. McComas y N. Raphelt, *User's Manual for the SAM Hydraulic Design Package for Channels (DRAFT)*, Vicksburg, MS: Department of the Army, US Army Corps of Engineers, 1998.
- [15] M. García, *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, and Practice*, Reston, VI: American Society of Civil Engineering, 2007.
- [16] R. Segarra-García, «Flood Frequency for Ungaged Catchments in Puerto Rico,» n° Project 4, p. 121, August 1995.
- [17] B. Fentie, B. Yu y C. Rose, «Comparison of Seven Particle Settling Velocity Formulae for Erosion Modelling,» de *ISCO 2004 - 13th International Soil Conservation Organizations Conference*, Brisbane, 2004.
- [18] United States Department of Agriculture, «Guidelines for Sampling Bed Material: Technical Supplement 13A, Part 654 NEH,» US Department of Agriculture, 2007.

- [19] K. Bunte y S. R. Abt, «Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel and Cobble-bed Streams for Analysis in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring,» Forest Service, US Department of Agriculture, Fort Collins, CO, 2001.
- [20] G. Brunner, «HEC-RAS River Analysis System - User's Manual, V. 5.0,» US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2016.
- [21] J. a. G. S. Shelley, «Modeling Bed Degradation of a Large, Sand-bed River with In-Channel Mining with HEC-RAS 5.0,» de *3rd Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling*, Reno, NV, 2015.
- [22] M. Wong y G. Parker, «Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Muller Using Their Own Database,» *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 132, nº 11, pp. 1159-1168, 2006.