

## ***Efecto de las Extracciones en los Ríos de Puerto Rico***

*Ivonne Medina Cortés  
Ingeniería Civil  
Christian Villalta Calderón, Ph.D.  
Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad Politécnica de Puerto Rico*

**Resumen** — *En Puerto Rico, desde la década del 50, se está llevando a cabo la extracción de agregados en algunos ríos del país. El problema que ha ocasionado esta actividad es la contribución a la degradación de sus lechos. Mediante este proyecto se pretende analizar el proceso de evaluación que se lleva a cabo para determinar si se otorga o se deniega un permiso de extracción. Se seleccionó un tramo del Río Grande de Manatí como caso de estudio. Para lograr este objetivo se determinó, mediante un modelo hidráulico, el flujo a banco lleno en el río de estudio. De este análisis se determinaron las velocidades y radios hidráulicos para cada sección transversal. Con éstos se determinó el esfuerzo cortante en el lecho y se comparó con el esfuerzo cortante crítico. Se concluyó que bajo estas condiciones el río no es capaz de reponer su material a corto plazo. A base de lo analizado y de la revisión a varios expedientes de permisos de extracción, se emiten recomendaciones al final de este escrito.*

**Palabras clave** — *degradación, extracción de material, flujo a banco lleno, transporte de sedimentos.*

### **INTRODUCCIÓN**

El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) es la agencia facultada en ley para regular 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 de la corteza terrestre, que no esté reglamentado como mineral económico, en terrenos públicos y privados, dentro de los límites geográficos del Estado Libre Asociado de Puerto Rico [1]. El

objetivo de este trabajo es analizar el proceso de evaluación realizado para otorgar un permiso de extracción en río y emitir recomendaciones que ayuden a estandarizar el proceso. Estas extracciones pueden causar serios problemas debido a la degradación progresiva del lecho, la cual se puede propagar tanto aguas arriba como aguas abajo del sector intervenido. En los últimos años se han estado realizando visitas a diferentes ríos: Río Inabón, Río Grande de Loíza, Río Grande de Manatí, Río Humacao, Río Loco, donde se llevan a cabo extracciones de material encontrando que estos lechos se encuentran en un proceso de degradación. Esto se evidencia en los puentes cercanos a los tramos de los ríos que son objeto de extracción, como el que se muestra en la siguiente figura.



**Figura 1**  
**Degradación del Lecho Río Inabón – Puente PR-52**

### **Problema**

La extracción de materiales en los ríos está contribuyendo a la degradación de sus lechos.

## TRASFONDO

Por miles de años las arenas y gravas han sido utilizadas en la industria de la construcción. Los cauces de los ríos son fuente para suplir esta necesidad. En Puerto Rico, desde la década del 50, se está llevando a cabo la extracción de agregados en algunos ríos del país [2]. La actividad de extracción en los ríos debe ser coordinada con la agencia estatal con jurisdicción para asegurar que se lleva a cabo de manera responsable con el mínimo impacto posible. La incisión del cauce producida por la extracción puede provocar erosión aguas arriba por el proceso de corte vertical de cabecera “headcutting” (ejemplo en la Figura 2) y erosión aguas abajo debido a la falta de insumo de material. Al aumentar la sección hidráulica producto de la extracción, provoca que la velocidad disminuya y se deposite el sedimento en la fosa creada. Aguas abajo a la extracción la sección hidráulica es menor, la velocidad y la energía aumentan. La cantidad de sedimento es menor a la capacidad de transporte del flujo y el “hungry water” comienza a buscar sedimentos en los bancos y en el lecho provocando degradación aguas abajo de la extracción. La extracción de materiales en los cauces facilita que los bancos se conviertan en fuentes de sedimento. Es necesario determinar si el río tiene la capacidad de recuperar el material extraído en un periodo razonable al momento de decidir continuar con la actividad de extracción.



**Figura 2**  
**Corte de Cabecera Río Inabón**

## Revisión de Literatura

El movimiento incipiente es importante en el estudio de transporte de sedimentos, degradación de canales y en el diseño de canales estables. Es difícil precisar bajo qué condiciones de flujo una partícula de sedimento comienza a moverse. Existen diferentes enfoques entre los cuales se encuentran: el enfoque por esfuerzo cortante y el enfoque por velocidad. En este caso se utilizó el enfoque de esfuerzo cortante conocido como el diagrama de Shields.

Shields (1936) pensó que era difícil expresar analíticamente las fuerzas que actúan sobre una partícula de sedimento. El realizó un análisis dimensional para determinar algunos parámetros adimensionales para establecer su diagrama para movimiento incipiente. Los factores importantes en la determinación de movimiento incipiente son: el esfuerzo cortante  $\tau$ , la diferencia en densidad entre el sedimento y el fluido  $\rho_s - \rho_f$ , el diámetro de la partícula  $d$ , la viscosidad cinemática  $\nu$  y la aceleración gravitacional  $g$  [3].

El diagrama de Shields es utilizado por muchos ingenieros como criterio del movimiento incipiente. Para determinar si el tramo de río analizado tiene la capacidad de mover su sedimento se utilizó este enfoque. El parámetro Shields representa la relación entre las fuerzas que crean movimiento y aquellas que resisten movimiento en el lecho del río. Las fuerzas que crean movimiento es el producto del esfuerzo cortante en el lecho y el área seccional de la partícula expuesta al flujo. La fuerza que resiste el movimiento es la gravedad. Las fuerzas gravitacionales son proporcionales al volumen de la partícula y su peso sumergido. El valor crítico representa el punto donde el movimiento de la partícula es observado por primera vez como significativo. Si el esfuerzo cortante en el lecho es mayor al esfuerzo crítico, el material es arrastrado. Para calcular el esfuerzo cortante bajo flujo a banco lleno, se necesita la velocidad, el radio hidráulico y la pendiente. La velocidad y el radio hidráulico se pueden obtener

de mediciones en el campo o mediante la utilización de modelos matemáticos.

El modelo HEC-RAS 4.0 [4] es un programa de simulación y modelaje hidráulico desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América. Este programa incorpora cuatro modelos unidimensionales entre ellos uno para computar perfiles de la superficie del agua bajo condiciones de flujo estable. Este modelo ayuda a determinar el flujo a banco lleno para el cuerpo de agua de interés. Como entrada de datos este modelo requiere las secciones transversales del tramo de interés, los coeficientes de rugosidad de Manning y condiciones de frontera.

El flujo a banco lleno es la descarga que llena un canal aluvial estable hasta la elevación de la planicie inundable activa [5]. Un río es estable cuando mantiene su planta, perfil y sección transversal y transporta su carga de sedimentos sin agrandar ni degradar su lecho con la hidrología actual. El tamaño de un cauce está determinado por cuatro factores básicos: carga de sedimentos ( $Q_s$ ), tamaño de partícula ( $d_{50}$ ), flujo ( $Q_w$ ) y pendiente ( $S$ ). De forma cualitativa Lane demostró que:

$$Q_s \cdot d_{50} \propto Q_w \cdot S \quad (1)$$

Por lo tanto, el equilibrio en el canal ocurre cuando hay un balance entre los cuatro parámetros. Al extraer material del río se reduce el volumen de sedimentos entrando al tramo aguas abajo de la extracción, esto resulta en una disminución temporal de la pendiente del canal hasta que el río encuentre su balance.

Un dato importante en el modelo hidráulico es la geometría. Durante el trabajo de campo se deben definir los bancos en cada sección transversal.

El modelo utiliza la ecuación de Manning para evaluar las pérdidas de energía por fricción. Esta ecuación depende de un parámetro de rugosidad ( $n$ ) que está asociado a los componentes de la superficie del canal. Luego de la realización de múltiples experimentos se han desarrollado extensas tablas con valores del parámetro para la mayoría de las condiciones que se encuentran en los ríos. A las secciones transversales se le asigna

de uno a tres valores de  $n$ , comparando cualitativamente cada sección del río con las tablas.

## CASO DE ESTUDIO

Entre todos los ríos que fueron visitados, se seleccionó el Río Grande de Manatí como caso a ser analizado. En este tramo se llevaron a cabo actividades de extracción durante los años 1994 hasta el 1998. Durante este periodo fueron otorgados dos permisos para extraer arena, grava y piedra, y varias extensiones de tiempo. En ambos permisos la profundidad máxima permitida fue de dos metros. En la actualidad se llevan a cabo dos extracciones comenzando aproximadamente a 1,500 metros aguas abajo del puente de la PR-149. Estas extracciones son ajenas al tramo analizado.

### Localización

El tramo del río ubica en la carretera PR-145, Km. 1.5 del Municipio de Ciales. La Figura 3 muestra la ubicación del tramo de estudio en copia del cuadrángulo topográfico del USGS. La extracción se propone en un tramo de 1.16 km de longitud.

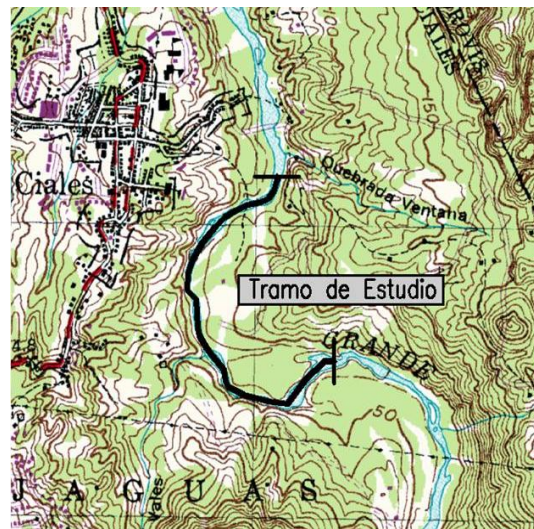


Figura 3  
Río Grande de Manatí

### Cuenca

La cuenca del área de estudio se encuentra en la zona montañosa de Ciales. La geología del área está caracterizada por depósitos aluviales en los que

se encuentran arenas, gravas, peñascos y pedruscos. Estos depósitos se encuentran tanto en el lecho como en terrazas. Las mismas tienen una altura de 15 a 20 metros sobre el nivel del río.

## METODOLOGÍA

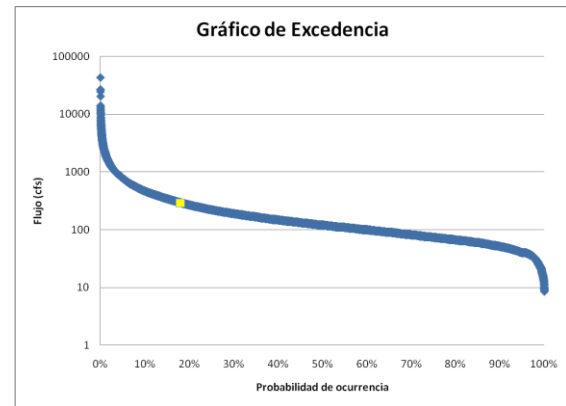
Para realizar este proyecto se siguieron los siguientes pasos:

- Se revisaron varios expedientes de la División de Corteza Terrestre del DRNA donde se incluyen el documento ambiental, secciones transversales del tramo de río solicitado para extraer y estudio de transporte de sedimentos.
- Se visitaron varios ríos donde se ha extraído en el pasado y algunos con extracciones activas para observar las condiciones del cauce.
- Se seleccionó un caso de estudio con el propósito de analizar el proceso que se lleva a cabo en la evaluación de una solicitud de permiso de extracción en río.
- Se tomaron muestras del material típico en el río y se realizó un análisis de granulometría para determinar el valor del diámetro característico ( $d_{50}$ ).
- Se seleccionaron los datos de flujo promedio diario de la estación 50035000 del USGS [6].
- Con estos datos se construyó la gráfica de excedencia para determinar valores de flujo para diferentes probabilidades de ocurrencia.
- Se utilizó el modelo HEC-RAS para determinar el flujo a banco lleno y los parámetros necesarios para determinar si el sedimento se mueve bajo las condiciones actuales del río.
- De los resultados obtenidos del modelo hidráulico se obtuvieron los valores de velocidad, pendiente y radio hidráulico para calcular el esfuerzo cortante del lecho.
- Este esfuerzo cortante se comparó con el parámetro de Shields con el propósito de conocer si bajo el flujo a banco lleno, la pendiente y profundidad del río se inicia el movimiento de las partículas.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los flujos bajos son insuficientes para movilizar el sedimento en el lecho del río y los sedimentos finos son transportados sin interacción significativa con el lecho [7]. Por esta razón, se decidió trabajar con el flujo a banco lleno.

Luego de analizar el segmento del río con el modelo hidráulico HEC-RAS se encontró que el flujo a banco lleno es de 290 cfs. Comparando este valor con la tabla de excedencia, mostrada en la Figura 4, se encontró que este valor corresponde a un evento con probabilidad de ocurrencia anual de 18%, lo que equivale a una recurrencia de 5 años.



**Figura 4**  
Gráfico de Excedencia Estación 50035000

Con el flujo a banco lleno se realizó una simulación para obtener la velocidad y radio hidráulico para cada sección. Con el radio hidráulico y la pendiente se computó el esfuerzo cortante en términos de velocidad.

$$V_* = (gR_h S)^{1/2} \quad (2)$$

Esta velocidad se utilizó para calcular el número de Reynolds de la partícula para cada sección transversal.

$$Re_* = V_* d_{50} / \mu \quad (3)$$

Estos números resultaron en valores mayores a 1,000, por lo que, en el diagrama de Shields todos los esfuerzos críticos resultaron ser 0.06. Este valor es comparado con el esfuerzo cortante calculado. Este esfuerzo cortante se calculó de

manera adimensional utilizando el radio hidráulico, la pendiente, el diámetro ( $d_{50}$ ) y la gravedad específica.

$$\tau_* = V_*^2 / (S-1)gd_{50} \quad (4)$$

Los resultados se muestran en las Tablas 1 y 2.

Mediante el análisis de granulometría se determinó que el  $d_{50}$  en el tramo de estudio fue de 23 mm. Se analizó además, una muestra de material seleccionada aproximadamente a 400 metros aguas abajo, bajo el puente de la PR-145, encontrando un  $d_{50}$  de 12.4 mm. Esto es de esperarse, ya que el material más grueso se va depositando en las fosas creadas por la extracción y no llega a los tramos aguas abajo de ésta.

**Tabla 1**  
**Condiciones Hidrodinámicas de Análisis**

XS	$d_{50}$ (m)	$R_h$ (m)	S	V (m/s)
11	0.023	0.232	0.0065	1.53
10	0.023	0.595	0.0065	1.00
9	0.023	0.204	0.0106	1.38
8	0.023	0.265	0.0057	1.64
7	0.023	0.616	0.0057	0.97
6	0.023	0.335	0.0068	1.26
5	0.023	0.186	0.0057	1.38
4	0.023	0.726	0.0057	0.80

**Tabla 2**  
**Condiciones de Esfuerzos Cortantes en el Lecho**

XS	$\tau^*$ Lecho	$\tau^*$ Shields
11	0.04	0.06
10	0.10	0.06
9	0.06	0.06
8	0.04	0.06
7	0.09	0.06
6	0.06	0.06
5	0.03	0.06
4	0.11	0.06

En cinco de las ocho secciones analizadas el esfuerzo cortante del lecho resultó menor al esfuerzo crítico. Esto indica que con el flujo a

banco lleno no hay movimiento de las partículas, por lo que, el río no recupera su material a corto plazo, máxime cuando el flujo utilizado sólo tiene una probabilidad de ocurrencia anual de 18%. Este tramo requiere flujos altos para mover el sedimento del lecho, que tienen bajas probabilidades anuales de ocurrir. Renovar permisos de extracción en este tramo puede resultar en mayores problemas de degradación que pueden reflejarse aguas arriba y aguas abajo del tramo. De hecho, el puente de la carretera PR-149, que ubica aproximadamente a 1,500 metros aguas abajo de la extracción, refleja señales de socavación en su estribo derecho. Ver Figura 5.



**Figura 5**  
**Estribo Derecho Puente PR-149**

Durante una inspección realizada al tramo del río se observó que el área donde se llevó a cabo la extracción en la década de los 90, no se ha recuperado en su totalidad. Este tramo tiene una profundidad mayor al comparar con los tramos aguas arriba y aguas abajo. La Figura 6 evidencia lo aquí expuesto.

## RECOMENDACIONES

Luego de analizar los resultados del proyecto se recomienda lo siguiente:

- Al solicitar un permiso de extracción en río se deben presentar secciones transversales del tramo propuesto y al menos una sección aguas arriba y una sección aguas abajo.

- Los planos de las secciones deben incluir los controles que se usaron tanto verticales como horizontales y los niveles de referencia horizontal y vertical (datum).
- Una tabla con los datos de elevación y distancia de cada sección transversal.
- Monumentar cada estación con monumentos fijos para que al solicitar renovación se tomen secciones transversales en las mismas estaciones que se utilizaron previo a la extracción original.
- Los estudios de transporte de sedimentos deben realizarse con flujo a banco lleno. No se recomienda utilizar flujos de recurrencias mayores, ya que éstos no son representativos de los caudales en un año típico.
- La selección del parámetro de rugosidad de Manning debe documentarse con fotos de la sección.
- Determinar el  $d_{50}$  mediante un análisis de granulometría y compararlo con el tamaño mayor de partícula que mueve el flujo a banco lleno. Esto debe repetirse antes de renovar un permiso de extracción para documentar cambios en el tamaño de partículas a lo largo del perfil del río.
- El documento ambiental debe discutir las condiciones del lecho del río en términos de agradación/degradación, estabilidad del lecho y los bancos y la granulometría.
- La toma de decisión de dónde, cuánto y con qué frecuencia extraer requiere estar fundamentada en los estudios correspondientes. Por lo que, se deben documentar bien los casos y tomar datos de campo antes y después de la extracción para evaluar los efectos de esta acción en el lecho del río.
- Se recomienda que la agencia reguladora amplíe los estudios en el área tomando más muestras de material del fondo en el tramo de extracción, aguas arriba y aguas abajo. Realizar análisis de granulometría, seleccionar mediante un programa adecuado las funciones de transporte de sedimentos que apliquen al tramo

de estudio y elaborar un estudio de transporte de sedimentos previo a la extracción. Repetir el estudio al finalizar la actividad para comparar los datos obtenidos en el campo con los resultados del estudio y poder así calibrar el modelo, de ser necesario.

- Se deben analizar varios ríos en diferentes zonas de la isla para luego establecer unas guías que permitan estandarizar el proceso y que se puedan llevar a cabo estas extracciones con un impacto mínimo a los cauces de los ríos.



**Figura 6**  
**Tramo del Río donde se Realizó Extracción**

## REFERENCIAS

- [1] Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, *Reglamento para Regir la Extracción Excavación, Remoción y Dragado de los Componentes de la Corteza Terrestre*, 2004.
- [2] Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, *Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico*, 2008.
- [3] Yang, Chih T., *Sediment Transport Theory and Practice*, 1996, pp. 19-24.
- [4] US Army Corps of Engineers, *HEC-RAS 4.0 River Analysis System*, 2008.
- [5] The Federal Interagency Stream Restoration Working Group, *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*, 1998.
- [6] USGS, <http://waterdata.usgs.gov/pr/mwis/sw>, Site Number 50035000.
- [7] Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, *Guía para el Manejo de Ríos en Puerto Rico*, 2009.