ESTUDIO
DE
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
EN UN TRAMO DEL RIO GRANDE DE ARECIBO CERCA DE UTUADO, PUERTO RICO

Preparado por
Stormwater Associates
Ferdinand Quiñones, PE
30 de noviembre de 2006

TABLA DE CONTENIDO

Tabla de Contenido i

Resumen Ejecutivo iv

1.0 Introducción y Propósito del Estudio 1

2.0 Descripción del Área del Estudio 3

2.1 Localización Específica 3

2.2 Clima y Topografía 6

2.3 Geología y Suelos 7

2.4 Hidrografía e Hidrología 11

3.0 Métodos y Procedimientos para la Determinación del Transporte de Sedimentos en el Tramo de la Actividad 14

3.1 Datos de Campo del USGS 14

3.2 Calibración del Modelo GStars 16

4.0 Colección y Análisis de Datos Adicionales 17

4.1 Datos de Campo 17

4.2 Análisis de los Datos de Campo y del USGS 21

4.3 Aplicación y Calibración del Modelo GStars 29

4.3.1 Versión y Aplicabilidad de GStars 30

4.3.2 Calibración de GStars 32

4.3.3 Resultados de la Calibración y Cómputos con GStars 36

4.3.4 Evaluación de Posibles Impactos en el Fondo del Canal 39

5.0 Análisis de los Resultados 46

5.1 Resultados de los Datos de la Estación del USGS 46

5.2 Estimados Obtenidos con GStars 47

6.0 Conclusiones y Recomendaciones 48

7.0 Limitaciones del Estudio 50

8.0 Bibliografía 51

9.0 Apéndices 51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fotografía Aérea del Tramo del Río Grande de Arecibo donde se propone extraer material 2
Figura 2. Mapa topográfico de la localización del tramo de la Actividad.....5
Figura 3. Perfil del fondo del cauce y el agua en el tramo del RGA propuesto para la Actividad 5
Figura 4. Diagrama de la ubicación de la estación 50024950 operada por el USGS en el tramo de la Actividad.....6
Figura 5. Lluvia promedio en la cuenca superior del RGA aguas arriba de Utuado y el tramo de la Actividad 7
Figura 6. Geología general en la cuenca superior del RGA.....8
Figura 7. Suelos generales en la cuenca superior del RGA 10
Figura 8. Ríos y embalses en la cuenca superior del RGA.....12
Figura 9. Depósitos de arena, grava y cienos en el tramo de la Actividad cerca de la secciones transversales 3 y 22.....18
Figura 10. Depósitos de arena, grava y cienos en el tramo de la Actividad cerca de la secciones transversales 23 y 32.....19
Figura 11. Ubicación aproximada de las secciones transversales definidas en el tramo de la Actividad en el RGA 20
Figura 12. Flujo Promedio Diario en la Estación Operada por el USGS en el Tramo del Río Grande de Arecibo donde se Propone la Actividad.....21
Figura 13. Relación entre el flujo de agua y la concentración de sedimentos suspendidos en el tramo de la Actividad en la estación 50024950 en el Río Grande de Arecibo.....23
Figura 14. Descarga diaria de sedimentos suspendidos (SS) en la estación 50024950 en el RGA, ubicada en el tramo de la Actividad.....24
Figura 15. Descarga de sedimentos suspendidos en la estación 50024950 durante la creciente de septiembre 22 de 1998 25
Figura 16. Niveles aproximados de la inundación con intervalo de recurrencia de 100 años en el tramo de la Actividad 32

Figura 17. Distribución del particulado en muestras del material de fondo en las secciones transversales 1, 3 y 12 del tramo del cauce del Río Grande de Arecibo propuesto para la Actividad 35
Figura 18. Curva de transporte de sedimentos totales (TS) derivada con GStars para la sección 9A del tramo de la Actividad 37
Figura 19. Resultados de las simulaciones con GStars de las condiciones en el canal del RGA ilustrando el cambio en volumen en la sección 9A en condiciones de equilibrio sin remoción de sedimentos en el lecho del río 43
Figura 20. Resultados de las simulaciones con GStars de las condiciones en el canal del RGA ilustrando el cambio en volumen en la sección 9A cuando se remueve un (1) metro (3.281 pies) de sedimentos del lecho del río 44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características principales de los embalses en la cuenca del Río Grande de Arecibo comparados con Dos Bocas 4
Tabla 2. Clasificación de Maddock para estimar el arrastre (“bedload”) de sedimentos en ríos 26
Tabla 3. Descargas anuales de sedimentos suspendidos en la estación 50024950 operada por el USGS en el tramo de la Actividad 27
Tabla 4. Regresiones utilizadas para estimar los flujos picos para las recurrencias de 2, 10, 25, 50, y 100 años en la estación 50024950 33
Tabla 5. Descargas de sedimentos totales (TS) estimadas con el modelo GStars para frecuencias variadas en la sección 9A del tramo del RGA donde se propone la Actividad 36
Tabla 6. Estimados de la descarga de sedimentos totales (TS) obtenidos con GStars en la sección 9A del tramo de la Actividad en el RGA 39

RESUMEN EJECUTIVO

Este informe resume el "Estudio de Transporte de Sedimentos en un Tramo del Río Grande de Arecibo cerca de Utuado" llevado a cabo por PRORAMA, Inc. (PRORAMA) como parte de la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) para el proyecto "Extracción de Materiales de un Tramo del Río Grande de Arecibo (RGA) cerca de Utuado". PRORAMA propone al Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) extraer hasta 1,000 metros cúbicos por día de grava, arena, y cienos que son depositados en el cauce del RGA por crecientes periódicas. El tramo donde se propone la extracción (Actividad) tiene aproximadamente 7,000 metros de longitud, extendiéndose aguas abajo de la zona urbana de Utuado hasta el remanso del Embalse Dos Bocas. Los sedimentos en el tramo del proyecto fluyen desde la cuenca superior del RGA hasta el Embalse Dos Bocas, contribuyendo a la sedimentación de este importante cuerpo de agua.

El estudio incluyó la determinación del régimen de transporte de sedimentos en el tramo del RGA donde se propone el proyecto. Se utilizaron dos métodos independientes para estimar la cantidad de sedimentos totales que transporta el RGA en el tramo del proyecto.

1. El primer método utilizó datos de flujo de agua y concentraciones de sedimentos suspendidos determinados por el Servicio Geológico Federal (USGS) en la estación 50024950, que ubica en el tramo propuesto para la Actividad. La estación cuenta con siete (7) años de datos de flujo continuo y descarga promedio diaria de sedimentos suspendidos. Los sedimentos totales se determinaron estimando el arrastre ("bedload") en el cauce, el cual se añadió al cómputo anual de sedimentos suspendidos.
2. El segundo método utilizó el modelo de transporte de sedimentos GStars, desarrollado en el 2006 por el *US Bureau of Reclamation* (BUREC) para condiciones variadas de canales naturales y artificiales. El modelo se calibró con datos de campo, incluyendo secciones transversales, perfiles hidráulicos, y tamaño de los materiales en el fondo del cauce. GStars también se utilizó para simular los posibles efectos de la extracción de hasta un (1) metro de los materiales depositados por crecientes en el fondo del cauce.

Los resultados del estudio fueron los siguientes:

1. Los cálculos con los datos de la estación del USGS establecen que el promedio del transporte de sedimentos totales en el tramo del proyecto desde 1997 al 2004 fue de 474,200 toneladas por año (t/a), variando desde un mínimo de 125,480 t/a en 1977 a un máximo de 1,158,922 t/a en 1998. La mayor parte de los sedimentos son transportados durante crecientes, y depositados en diferentes segmentos del tramo. La creciente de septiembre 22 de 1998 inducida por el huracán Georges contribuyó el 70 % de la descarga anual de sedimentos totales medidos en el tramo del Proyecto.
2. Los cálculos con el modelo GStars estimaron el transporte de sedimentos en aproximadamente 457,600 t/a, muy similar al promedio obtenido de los cálculos con los datos del USGS. La descarga pico para una creciente con una magnitud de 67,000 pies cúbicos por segundo (pcs) también fue similar a la calculada por el USGS para la creciente de septiembre 22 de 1998. El análisis de posibles cambios en el canal como consecuencia de la extracción de hasta un (1) metro de los materiales depositados en el cauce, concluyó que la remoción neta sería mínima. Esto se debe a que los sedimentos en el cauce fluyen a través del tramo en un "equilibrio dinámico" de transporte y deposición. Grandes cantidades de materiales son erosionados de las rocas areniscas entre Adjuntas y Utuado, y transportados por el RGA hacia el tramo del proyecto y el Embalse Dos Bocas. Cada creciente contribuye nuevas cargas de sedimento que reemplazan las que son removidas hacia el embalse.

El estudio concluye que la extracción de los materiales del tramo del RGA aguas abajo de Utuado contribuiría a disminuir hasta en un 25 % la tasa anual de sedimentación del Embalse Dos Bocas. Debido a la gran importancia de este embalse para el Superacueducto de la Costa Norte, la extracción de materiales según propuesta sería de gran beneficio al bien público.

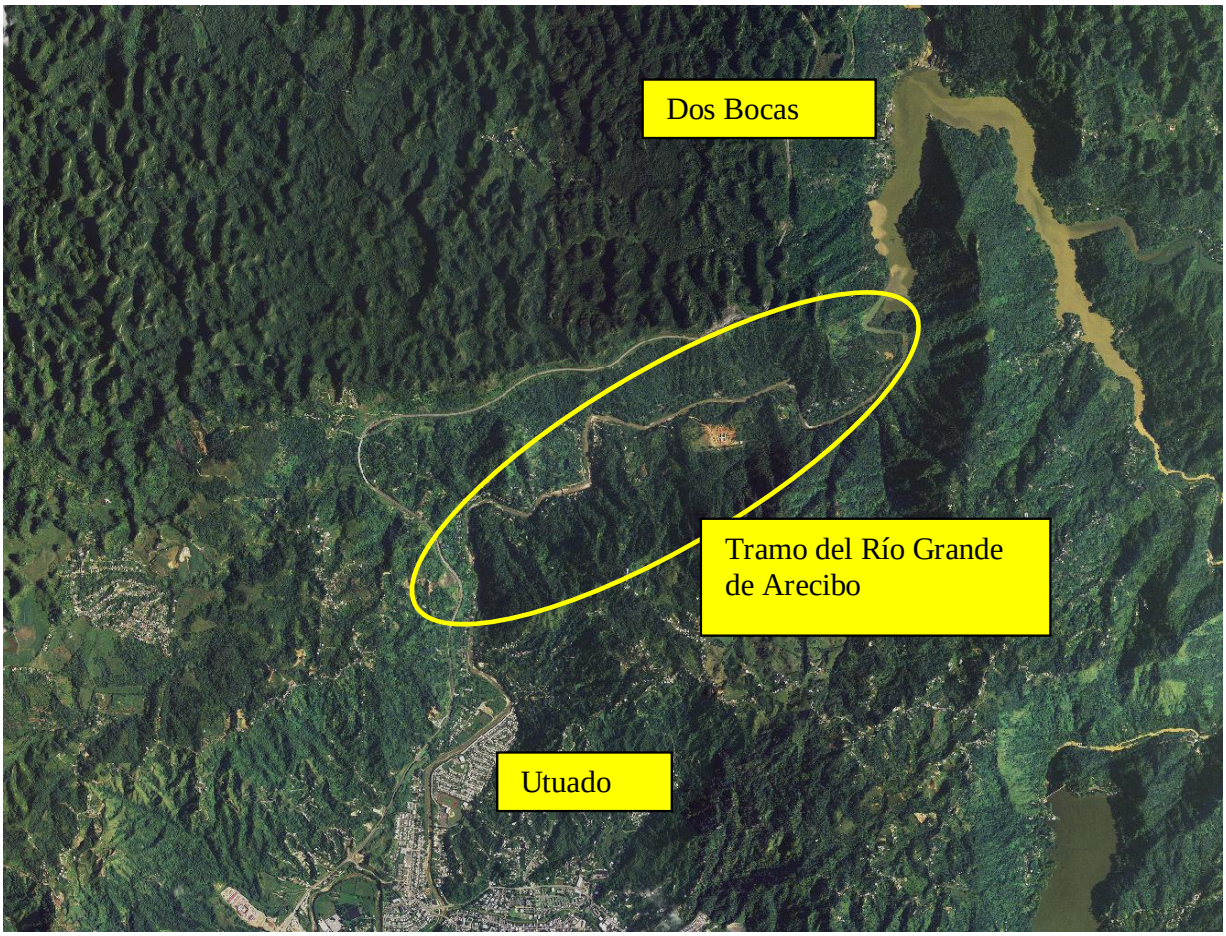
1.0 Introducción y Propósitos del Estudio

La empresa Constructora Orama. SE (ORAMA) propone extraer material del cauce del Río Grande de Arecibo (RGA) en un tramo que comienza aguas abajo de la zona urbana de Utuado hasta la vecindad del remanso del Embalse Dos Bocas (Figura 1). ORAMA propone la extracción de hasta 800 metros cúbicos por día de materiales acumulados por las crecientes del RGA en un tramo de aproximadamente 5 kilómetros (Km.) entre Utuado y el Embalse Dos Bocas. La extracción propuesta se define de aquí en adelante como la "Actividad".

La extracción de materiales de la corteza terrestre en Puerto Rico, incluyendo del cauce de los ríos, es reglamentada por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA). El DRNA requiere preparar una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) para evaluar los impactos ambientales potenciales de extracciones de materiales de los cauces de los ríos, según propuesto por ORAMA cerca de Utuado. El DRNA, como parte de la DIA, requiere que se lleven a cabo estudios y análisis para determinar los efectos morfológicos de extracciones en el cauce del río a impactarse, incluyendo definir el transporte de sedimentos y el potencial para erosión en el tramo a ser afectado.

Este informe resume los resultados del "***Estudio de Transporte de Sedimentos en un Tramo del Río Grande de Arecibo cerca de Utuado***" llevado a cabo como parte de la DIA Preliminar (DIAP) para la Actividad según propuesta. El estudio analiza el transporte de sedimentos presentes en el tramo del RGA donde se propone la Actividad. En el análisis se utilizaron datos de transporte de sedimentos generados por el U.S. Geological Survey (USGS) de medidas de flujo y concentraciones de sedimentos suspendidos (SS) en la estación 50024950, ubicada en el tramo propuesto para la Actividad. Además, se utilizó el modelo matemático de transporte de sedimentos GStars (*U.S. Bureau of Reclamation, 2006*) para estimar las descargas de sedimentos totales (ST) para crecientes de magnitud variada y cambios morfológicos potenciales en el cauce debido a las extracciones de materiales propuestas.

Figura 1. Tramo del Río Grande de Arecibo cerca de Utuado donde se propone la Actividad.



2.0 Descripción del Área del Estudio

Las siguientes secciones del informe describen brevemente la localización de la Actividad, así como el clima, la topografía, la geología, los suelos, y la hidrografía de la parte superior de la cuenca del RGA. Estas características son los factores principales que afectan el transporte de sedimentos en dicha zona de la cuenca del RGA. Estos parámetros, combinados con información sobre la geometría, granulometría, y el perfil del tramo propuesto para la Actividad, son esenciales para la calibración del modelo matemático (GStars) utilizado para estimar la descarga total de sedimentos (TS).

2.1 Localización Específica

El tramo propuesto para la Actividad está localizado en la parte superior del RGA, en la Región Central de Puerto Rico (Figura 2). El RGA es formado por varios tributarios que se originan en la Cordillera Central en terrenos de los municipios de Adjuntas y Utuado, incluyendo los ríos Vacas, Cidras, Pellejas, y Viví, así como un gran número de quebradas menores. El RGA discurre hacia el sur a través de las zonas urbanas de Adjuntas y Utuado, descargando eventualmente al Embalse Dos Bocas. Segmentos de los ríos Vacas, Pellejas y Viví han sido represados por la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE) como parte del sistema hidroeléctrico del RGA. Los embalses Viví, Pellejas, Adjuntas y Jordán son de capacidad menor (Tabla 1), y están conectados por una serie de túneles y canales que permiten descargar cantidades moderadas de agua hacia Dos Bocas. El Embalse Garzas, cuya área de captación es también menor, descarga agua hacia la Región Sur para abastecer el sistema de agua potable que suple a Peñuelas y Tallaboa. La acumulación de sedimentos ha reducido la capacidad de estos embalses a una fracción de la original, según se ilustra en la Tabla 1. El almacenamiento de agua en estos embalses es menor en comparación con los picos durante crecientes en los tributarios indicados y el RGA. En general, durante crecientes los sedimentos transportados por los ríos indicados fluyen aguas abajo hacia Utuado y Dos Bocas, ya que la capacidad de

los embalses Pellejas, Viví y Jordán se ha reducido drásticamente.

Tabla 1. Características principales de los embalses en la cuenca del Río Grande de Arecibo comparados con Dos Bocas.

EMBALSE	AÑO TERMINADA	AREA CAPTACION (MILLAS CUADRADAS)	CAPACIDAD INICIAL EMBALSE (ACRES-PIES)	CAPACIDAD ACTUAL ESTIMADA (ACRES-PIES)
ADJUNTAS	1950	14.70	465	100
DOS BOCAS	1942	170.00	30,400	13,200
GARZAS	1943	6.25	4,700	4,060
PELLEJAS	1950	8.50	152	100
VIVI	1950	6.50	277	100

Fuente: DRNA, 2004

El tramo propuesto para la Actividad discurre a través de terrenos en los barrios Río Abajo, Salto Abajo, y Sabana Grande de Utuado (Figura 2). El Río Cagüana es el tributario principal al RGA en el tramo propuesto para la Actividad, además de varias quebradas menores. Como se presenta más adelante, las contribuciones de flujo y sedimentos del Río Cagüana y las quebradas tributarias son menores en comparación con el RGA. El perfil del tramo utilizado en el análisis de transporte de sedimentos (que incluye un tramo desde el norte de la zona urbana de Utuado) es moderado, con un promedio de 0.004 metros/metro (m/m) de longitud (Figura 3). La parte superior del tramo exhibe un perfil más empinado (0.01 m/m) que el segmento inferior cercano a Dos Bocas (0.002 m/m). Es lógico que las velocidades del agua en el cauce son mayores en el tramo con la pendiente mayor, y que el transporte de sedimentos es más activo en este tramo. Las inspecciones de campo reflejan que los sedimentos en la parte superior del tramo se precipitan en zonas donde la velocidad se reduce, tal como en curvas agudas. En comparación, en el tramo inferior, los sedimentos aparentan estar distribuidos más uniformemente. La estación 50024950 (*Río Grande de Arecibo below Utuado*) operada por el USGS se encuentra aguas abajo de la confluencia del Río Cagüana con el RGA, a un tercio del tramo aguas abajo desde el Utuado (Fig. 4).

Figura 2. Localización del tramo de la Actividad propuesta.

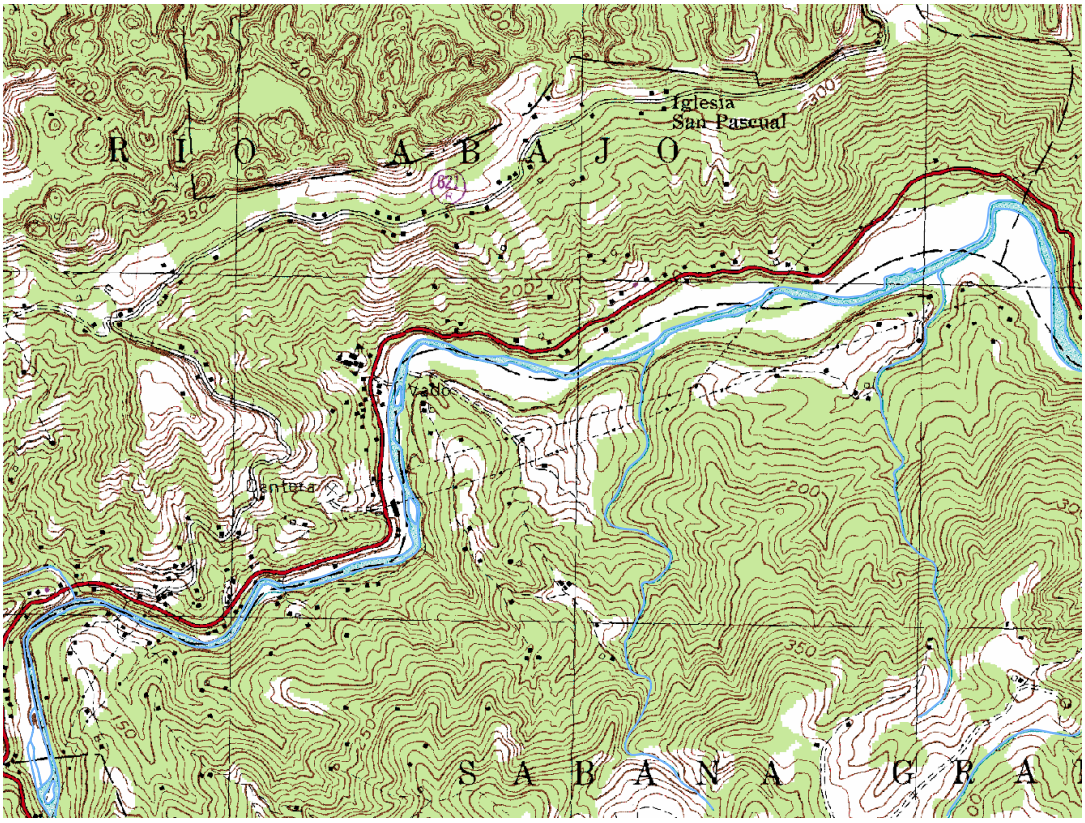
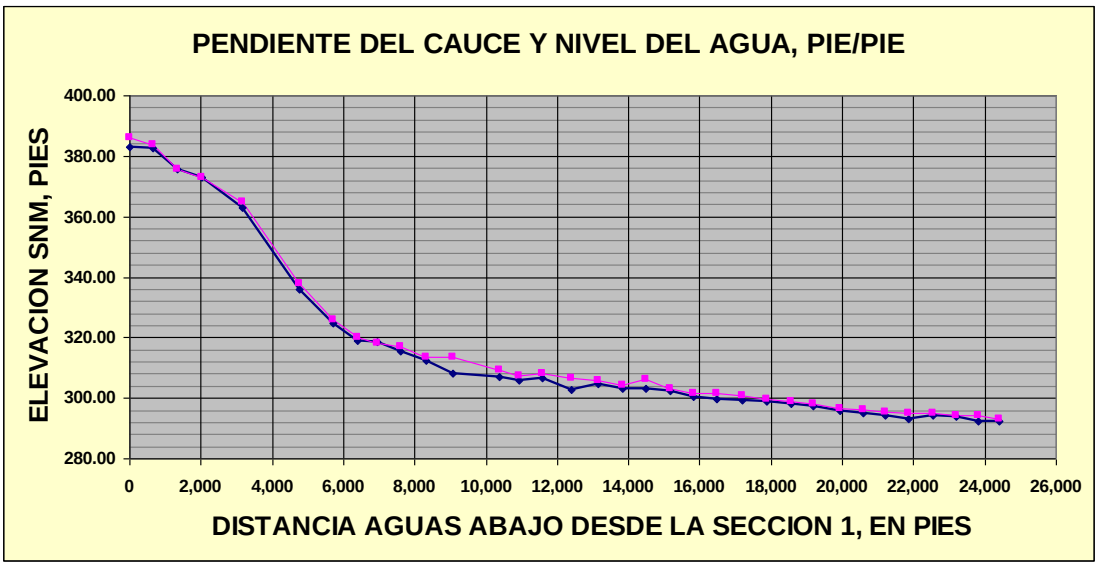
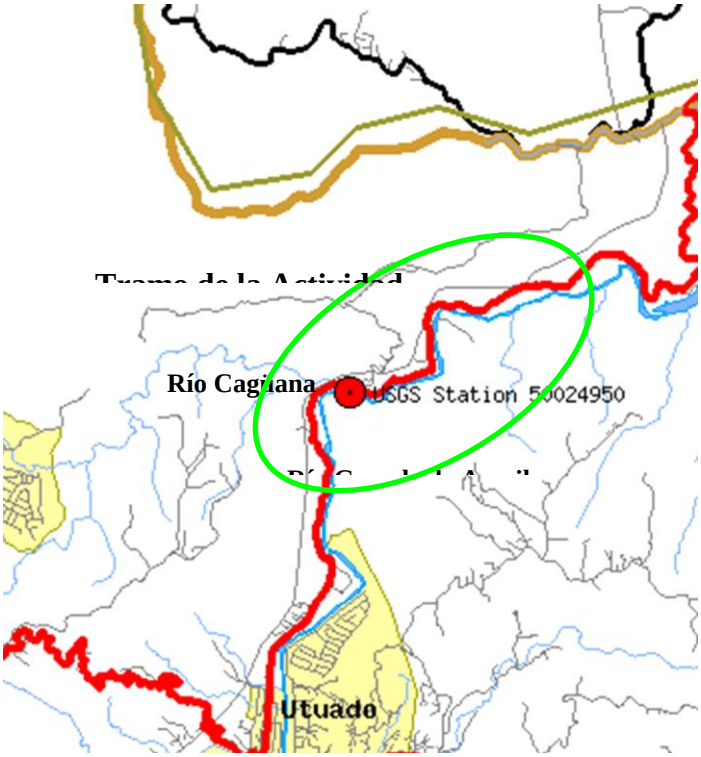


Figura 3. Perfil del fondo del cauce y el agua en el tramo del RGA utilizado para el cálculo de trasporte de sedimentos.



Fuente: Agrimensura 2006

Figura 4. Ubicación de la estación 50024950 operada por el USGS en el tramo de la Actividad



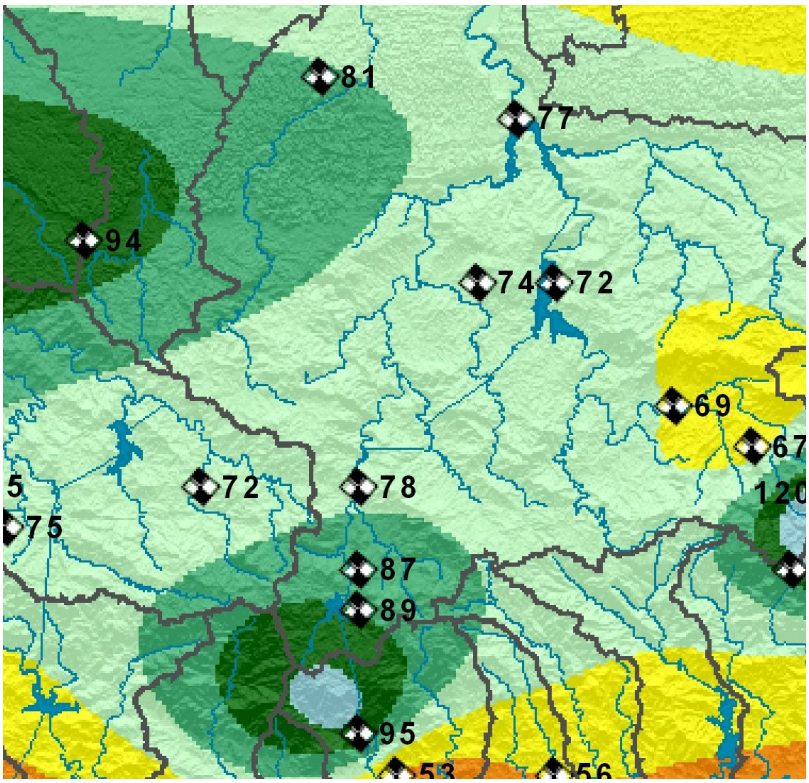
Fuente: USGS, 2006

2.2 Clima y Topografía

El área de la Actividad está ubicada en las pendientes norte de la Cordillera Central, cerca de la zona donde comienzan las rocas calizas de la Región Norte. En esta zona, la lluvia es abundante, con promedios anuales que varían desde 100 pulgadas en las cimas de las montañas en Adjuntas hasta 70 pulgadas en la vecindad de Utuado (NWS, 2006, Figura 5). Las elevaciones del terreno en la zona varían desde 450 metros sobre el nivel del mar (msnm) en las cimas de los montes al este y oeste del cauce, hasta 90 msnm en el cauce propio del río (USGS, 1957, Figura 2). Hacia el sur y la zona montañosa de Utuado y Adjuntas, las elevaciones del terreno alcanzan hasta 800 msnm. Los terrenos en las montañas exhiben pendientes agudas, frecuentemente excediendo el 20

porciento. Estas pendientes agudas del terreno, conjuntamente con la intensidad de las lluvias y las características de los suelos, promueven tasas elevadas de erosión en las laderas de las montañas. Los suelos erosionados son transportados aguas abajo por la escorrentía hasta descarga a Dos Bocas.

Figura 5. Lluvia promedio en la cuenca superior del RGA aguas arriba de Utuado y el tramo de la Actividad.



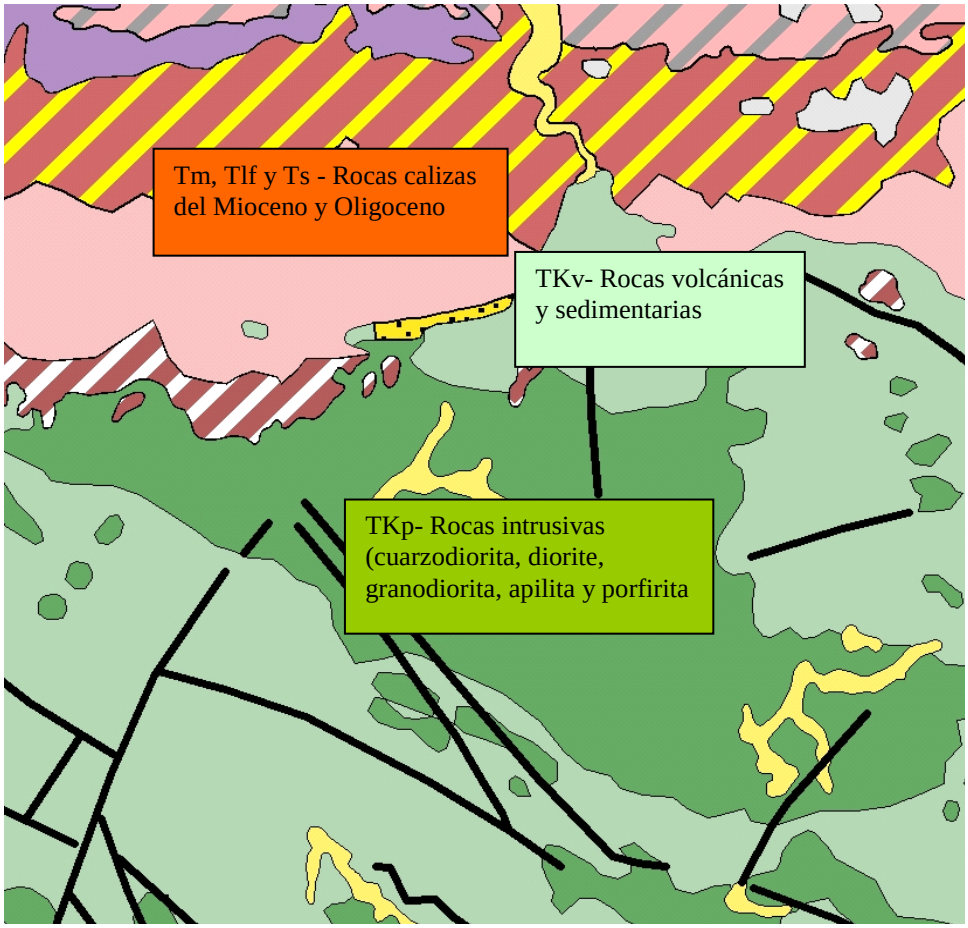
Fuente: NWS, 2006

2.3 Geología y Suelos

La geología de la zona de Utuado y la vecindad de la Actividad consiste de dos grupos litológicos principales. Estas unidades incluyen rocas volcánicas e intrusivas hacia el sur y sureste, y depósitos marinos calcáreos hacia el oeste-noroeste (USGS, 1997). Depósitos aluviales (Qa), formados principalmente por arena, grava y fragmentos angulares de rocas de menor tamaño, ocurren en el valle del RGA y los ríos menores de la zona. Las rocas volcánicas hacia el sur-

suroeste (al sur de Utuado y hacia Adjuntas) son predominantemente residuos de cuarzo y granodioritas del Batolito de Utuado. Estas rocas intrusivas son frágiles y se erosionan con facilidad, produciendo grandes cantidades de arena y grava. Estos materiales son arrastrados hacia las quebradas y ríos de la zona por la escorrentía superficial. Los depósitos calcáreos hacia el oeste-noroeste son primordialmente mezclas no-consolidadas de la Formación San Sebastián, incluyendo depósitos de derrumbes de las laderas de la Formación Lares, de rocas calizas consolidadas (Monroe, 1962). Estos materiales incluyen barros, arenas y residuos calizos. Los depósitos aluviales, con espesores menores de 10 pies resultan de la erosión en la zona de Adjuntas, donde predominan las rocas intrusivas del Batolito de Utuado (Figura 6).

Figura 6. Geología general en la cuenca superior del RGA.



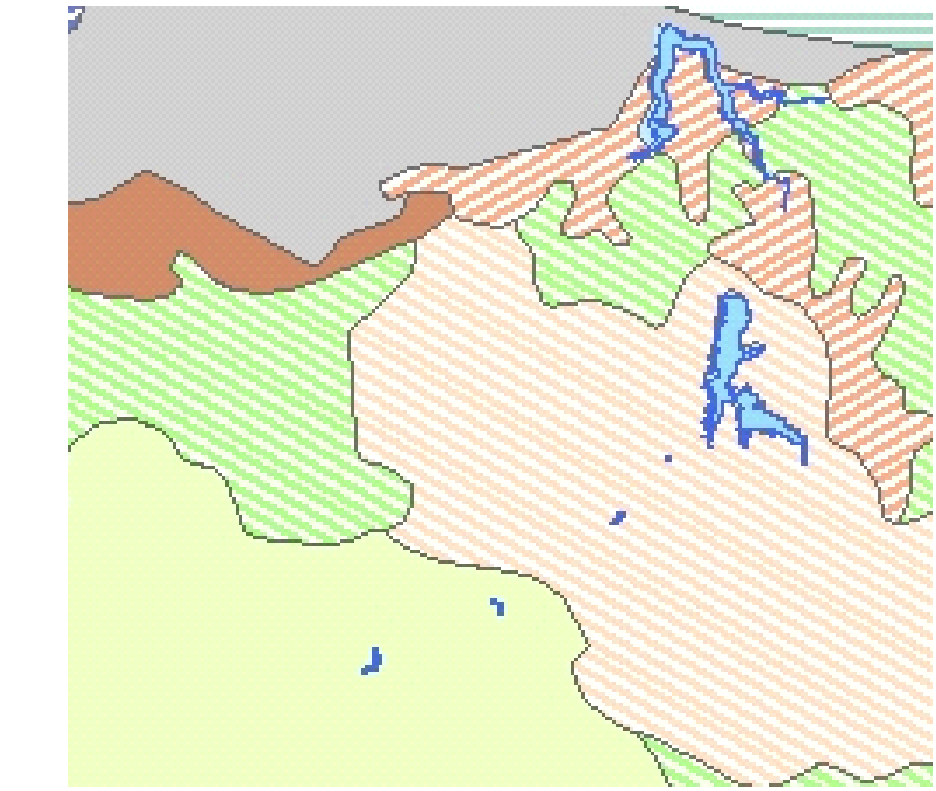
Fuente: USGS, 1957

En la zona de Utuado los suelos principales son formados primordialmente por barros; arcillas y residuos de rocas volcánicas e intrusivas en las laderas sur; residuos calizos hacia el norte; y aluvión en los valles de los ríos y quebradas. Los estudios del Servicio Federal de Conservación de Recursos (NRCS, 2006) establecen que las series de suelos que predominan en el área de la Actividad incluyen las siguientes series (Figura 7):

1. *Humatas (HmF)*, series de suelos formados por mezclas de barro en laderas empinadas (pendientes desde 20-40 porciento), de baja permeabilidad y relativamente poco fértiles, que ocupan el 20.6 de los suelos en la zona.
2. *Lirios (LcE2),* suelos formados por mezclas de barros y arcillas, de baja permeabilidad y poca fertilidad, que ocupan el 20.4 porciento del área.
3. *Pellejas (PeF)*, mezclas de barro y arcilla en las laderas de las lomas, de baja permeabilidad y fertilidad moderada, que ocupan el 13.9 de los terrenos.
4. *Múcara (MuF)*, suelos formados por barros en laderas empinadas, de permeabilidad y fertilidad moderada, que ocupan el 10.7 de la zona.
5. *Soller (SrF)*, afloramientos de rocas desprovistas de suelos granulados u orgánicos, primordialmente formados por rocas calizas, que predominan en las cimas de los montes, ocupando el 10.2 por ciento del área.

El fondo del cauce del tramo del RGA donde se propone la Actividad es formado por rocas induradas de origen volcánico. Depósitos de arena, grava, y cienos finos descansan sobre las rocas en segmentos del cauce. Estos depósitos son “transitorios”, ya que son transportados por las frecuentes crecientes en el RGA desde la parte alta de la cuenca en Adjuntas y al sur de Utuado. Existe lo que puede denominarse como un equilibrio dinámico de deposición y transporte de sedimentos de un lugar a otro. El material que una creciente deposita en el tramo de la Actividad es removido por la siguiente creciente, fluyendo aguas abajo hasta eventualmente descargar al Embalse Dos Bocas. Nuevo material es transportado al tramo por otras crecientes, depositándose a lo largo del mismo.

Figura 7. Suelos generales en la cuenca superior del RGA.



DESCALABRADO-JACANA-SAN GERMAN
DESCALABRADO-URBANO VARIANTE TERRENO-GUAYAMA
FE-GUANICA
FRATERNIDAD-AGUIRRE-CARTAGENA
FRATERNIDAD-PASO SECO-FE
GUERRERO-CARRIZALES-JOBOS
HUMATAS-LOS GUINEOS-ALONSO
HUMATAS-LOS GUINEOS-MARICAO
HUMATAS-NARANJITO-CONSUMO
MABI-RIO ARRIBA-CANDELERO
MABI-URBAN LAND-RIO ARRIBA
MARICAO-LOS GUINEOS
MOCA-PERCHAS
MUCARA-CAGUABO-TERRENO URBANO
MUCARA-MORADO-MARAGUEZ
PANDURA-LIRIOS-CAYAGUA
PANDURA-SALIDERO DE ROCAS-VIEQUES
PELLEJAS-LIRIOS-INGENIO

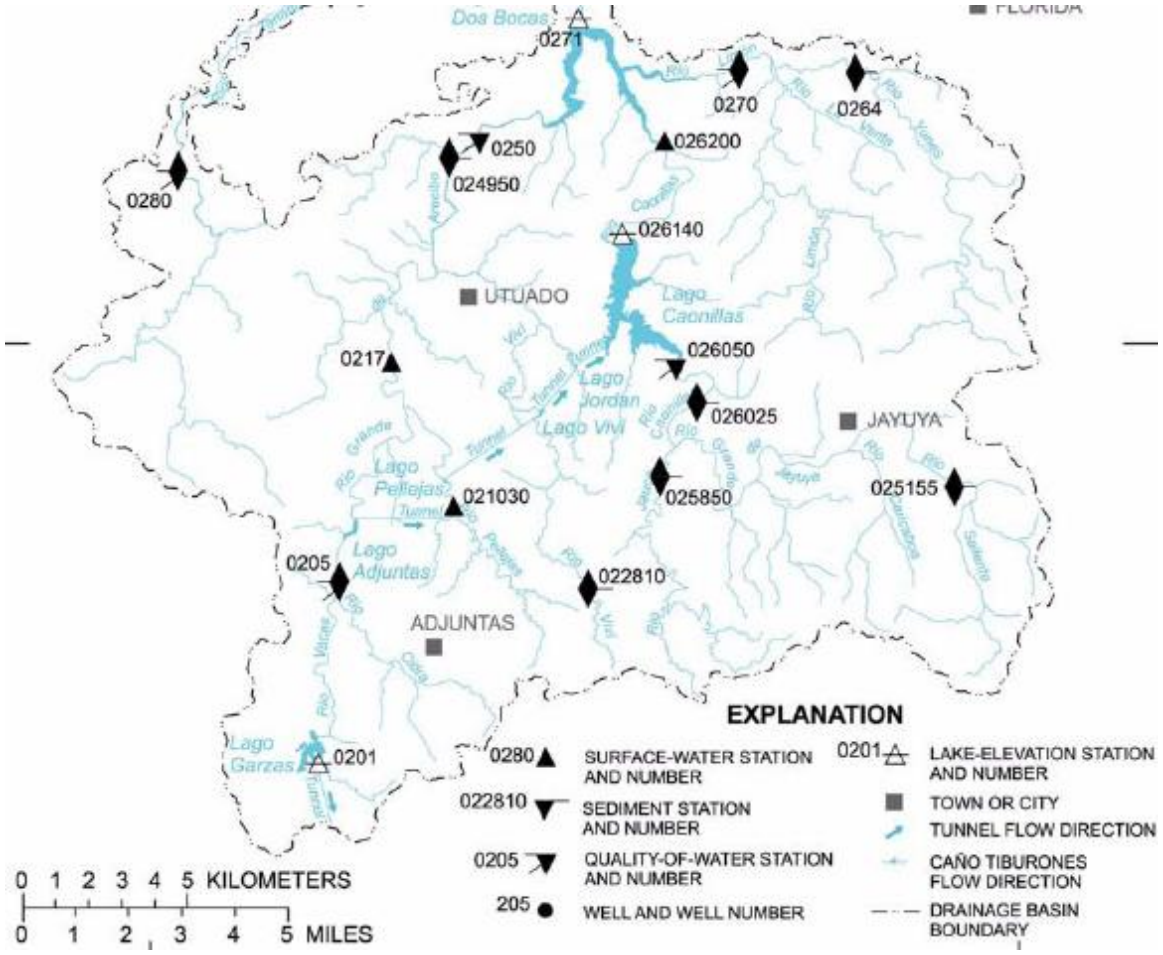
2.4 Hidrografía e Hidrología

La cuenca superior del RGA es drenada por una red de quebradas y riachuelos que forman varios tributarios principales. Estos tributarios incluyen a los ríos Vacas, Cidra, Viví, Pellejas, y Adjuntas, entre otros (Figura 8). Los tributarios desembocan en el cauce principal del RGA en la vecindad de Adjuntas y al sur de Utuado. Las lluvias copiosas e intensas en la región inducen escorrentías abundantes la mayor parte del tiempo en los tributarios y el RGA. Lluvias de hasta 30 pulgadas en 24 horas pueden ocurrir en esta parte de la cuenca (Torres-Sierra, 2002), resultando en inundaciones severas a lo largo del cauce. Las inundaciones del 22 de septiembre de 1988, inducidas por las lluvias ocasionadas por el Huracán Georges, resultaron en una descarga pico histórica de aproximadamente 76,000 pies cúbicos por segundo (pcs) en la estación hidrográfica 50024950 operada por el USGS en el tramo propuesto para la Actividad (Torres-Sierra, 2002). Los datos de flujo y concentraciones de sedimentos suspendidos determinados por el USGS en dicha estación desde 1996, documentan inundaciones frecuentes que resultan en descargas de grandes cantidades de sedimentos en los tributarios y el RGA. Estos sedimentos se acumulan en el tramo de la Actividad hasta ser eventualmente descargados al Embalse Dos Bocas.

En el tramo donde se propone la Actividad varios ríos y quebradas de menor importancia fluyen al RGA, siendo el principal el Río Cagüana, que descarga al cauce principal aproximadamente cinco (5) Km. aguas abajo de la zona urbana de Utuado (Figura 4). Sin embargo, el área de captación de este río en su confluencia con el RGA es de solamente 4.5 millas cuadradas (mi^2), lo que representa solamente el 6.8 porciento del área que drena el RGA en la estación 50024950 (65.6 mi^2). La confluencia del Río Cagüana con el RGA ocurre luego de transcurrido un tercio del tramo de la Actividad. La contribución de sedimentos del Río Cagüana al cauce del RGA y el tramo de la Actividad no se consideró significativa debido a su pequeña área de captación y la naturaleza de

los suelos que drena. Estos suelos sobre rocas volcánicas y calcáreas son menos susceptibles a erosión que los que se encuentran aguas arriba de Utuado y Adjuntas, donde predominan suelos areniscos derivados de granodiorita y rocas similares.

Figura 8. Ríos y embalses en la cuenca superior del RGA.



Fuente: USGS Data Report, 2004

Como se indicara anteriormente, el Embalse Dos Bocas es uno de los más importantes en Puerto Rico. El embalse, propiedad de la AEE, es fuente de energía hidroeléctrica a esta corporación pública, pero más importante aún, es la fuente de agua al Superacueducto de la Costa Norte. El Superacueducto suple

hasta 100 millones de galones de agua por día a la Región Norte-Central de la Isla. Los estudios del USGS sobre la sedimentación de Dos Bocas han establecido que Dos Bocas sufre una tasa de sedimentación acelerada, reduciéndose su capacidad actual a aproximadamente el 44 porciento de la original (USGS, 1997; DRNA, 2004). La mayor parte de estos sedimentos provienen de la cuenca del RGA, ya que los sedimentos que se descargan desde la cuenca del Río Caonillas se retienen casi en su totalidad en el Embalse Caonillas. Datos del USGS y el DRNA sugieren que será necesario dragar a Dos Bocas en los próximos 15-20 años, para mantener la viabilidad del embalse de suplir toda el agua que necesita el Superacueducto. La necesidad de dragar a Dos Bocas pudiera acelerarse de ocurrir uno o más huracanes que resulten en lluvias y crecientes significativas en la cuenca del RGA, lo que aceleraría la sedimentación del embalse. La remoción de sedimentos que ahora fluyen a Dos Bocas, como se propone en la Actividad, reduciría la tasa de sedimentación del embalse.

3.0 *Métodos y Procedimientos para la Determinación del Transporte de Sedimentos en el Tramo de la Actividad*

El estudio de transporte de sedimentos incluyó análisis independientes con datos de campo y generados por el modelo matemático para definir transporte de sedimentos totales (TS) denominado GStars. Afortunadamente, la operación de la estación 50024950 por el USGS provee datos de flujos y concentraciones de sedimentos suspendidos que independientemente pueden utilizarse para estimar el régimen de transporte de sedimentos totales en el tramo de la Actividad. Luego, utilizando datos de campo de la geometría del canal, el tamaño del particulado en el fondo del cauce, y regresiones matemáticas derivadas por el USGS sobre la magnitud de flujos para diferentes frecuencias, se calibró el modelo GStars.

3.1 Datos de Campo del USGS: Los datos de flujo de agua y concentraciones de sedimentos suspendidos (SS) se obtuvieron de la estación operada por el USGS en el tramo de la Actividad (estación 50024950, *Río Grande de Arecibo below Utuado*, Figuras 4 y 8).

1. En esta estación el USGS determina desde 1998 el flujo promedio diario y toma muestras diarias de sedimentos suspendidos (SS). Estos datos se publican en los informes anuales del USGS (Water Resources Data for Puerto Rico, 1998-2004).
2. Las muestras de SS se toman en dicha estación con un instrumento automático, que tiene la capacidad de tomar muestras múltiples durante crecientes. Además de las muestras con el instrumento, se toman muestras manuales periódicas para validar las del instrumento. Las muestras se analizan en los laboratorios del USGS para determinar la concentración de SS (en miligramos por litro, mg/L). El

USGS también analiza periódicamente el tamaño de las partículas de sedimentos en las muestras.

3. Utilizando los flujos promedios diarios (denominados “Q”) y los valores diarios promedios de concentraciones de sedimentos suspendidos (SS), ambos obtenidos por el USGS en la estación indicada, se calculó la descarga promedio diaria de SS en toneladas por día (t/d). Durante crecientes, muestras múltiples permiten calcular un promedio diario “pesado” que toma en cuenta el Q incremental y la concentración en aumento de SS. Los datos diarios permiten estimar la descarga anual de SS que fluye en el punto de la estación. Luego de un número de datos estadísticamente significativos, es posible estimar la descarga promedio anual de SS que fluye por el canal del RGA en la estación.
4. Generalmente el USGS no toma muestras del material del fondo del canal, ni se mide el sedimento de “arrastre” en dicho fondo (denominado “bedload, BL”). La descarga anual de SS más el BL provee un estimado de la descarga total de sedimentos, denominada TS (TS=SS+BL). En ausencia de datos medidos sobre el BL, se pueden utilizar datos empíricos de la literatura donde se estima el BL como una fracción del TS, basado en estudios en cauces que transportan materiales de diferentes tamaños (Colby, 1965; Murdock, 1972). En el tramo de la Actividad, el TS se estimó utilizando los datos de SS computados por el USGS y estimando el BL de guías

provistas por Murdock (1975).

3.2 Calibración del Modelo GStars: La cantidad total de sedimento (TS) transportado en la vecindad de la estación del USGS para las condiciones actuales y propuestas se estimaron también mediante la calibración del modelo matemático de transporte de sedimentos ***GStars*** (Yang, 2006). GStars es recomendado por el "*U.S. Bureau of Reclamation (BUREC*)" para condiciones similares a las del tramo de la Actividad. El modelo permite estimar la descarga total de sedimentos (TS) y evaluar posibles cambios en la morfología del canal luego de la extracción propuesta de materiales en el tramo de la Actividad. La selección de GStars obedeció al régimen de transporte de sedimentos en el tramo de la Actividad. Como se indicara anteriormente, en el tramo se depositan transitoriamente materiales arrastrados por las crecientes frecuentes en el RGA. La Actividad propone extraer parte del material que se deposita, sin "minar" o alterar el cauce natural del RGA que es formado por rocas induradas de origen volcánico. Aunque GStars se define como un modelo unidimensional, su estructura es representativa de modelos bi-dimensionales complejos, ya que permite el análisis de transporte de sedimentos en un tramo entre dos secciones de un cauce o canal. En el caso de la Actividad, el interés es estimar la cantidad de sedimentos transportados por las crecientes de diferentes frecuencias, y los posibles efectos de la extracción del material en los segmentos del canal a ser afectado. Copia electrónica de GStars y su manual de usuario se incluye como el Apéndice 3.

4.0 Colección y Análisis de Datos Adicionales

Se llevaron a cabo varias visitas al lugar de la Actividad como parte de la investigación, con el propósito de recolectar datos sobre el tramo y del material en el fondo del cauce. Los datos de la estación operada por el USGS (50024950) se obtuvieron de la página en la Internet de dicha agencia federal (http://pr.water.usgs.gov).

4.1 Datos de Campo

1. Durante la primera visita se llevó a cabo un reconocimiento del tramo de la Actividad, incluyendo el lecho del RGA, y se determinaron los lugares para definir las características hidráulicas de las secciones transversales. El RGA posee un lecho de rocas volcánicas induradas donde se acumulan grava, arenas y cienos con tamaños que van desde 0.062 milímetros (mm) a 2 mm. En las Figuras 9 y 10 se pueden observar algunos de los depósitos de arena y grava sobre el lecho del RGA. Estos materiales son depositados en el tramo por las crecientes periódicas que ocurren en el RGA. Los materiales son transportados desde la parte alta de la cuenca del RGA al sur de Utuado y en la zona de Adjuntas. En un tramo de aproximadamente una cuarta parte del trecho de la Actividad, se pudo observar que el material a un lado del cauce contiene mayor cantidad de sedimentos finos.
2. Durante la segunda visita se tomaron muestras representativas del material en tres lugares del cauce del RGA. Estos lugares se ubicaron en la vecindad de las estaciones 1, 3 y 12, donde se hicieron excavaciones a una profundidad de aproximadamente 1.5 metros para obtener muestras de material. Las excavaciones se hicieron con una pala, y se tomaron duplicados de cada muestra, asegurándose que las mismas fueran representativas del material. Esto se logró integrando

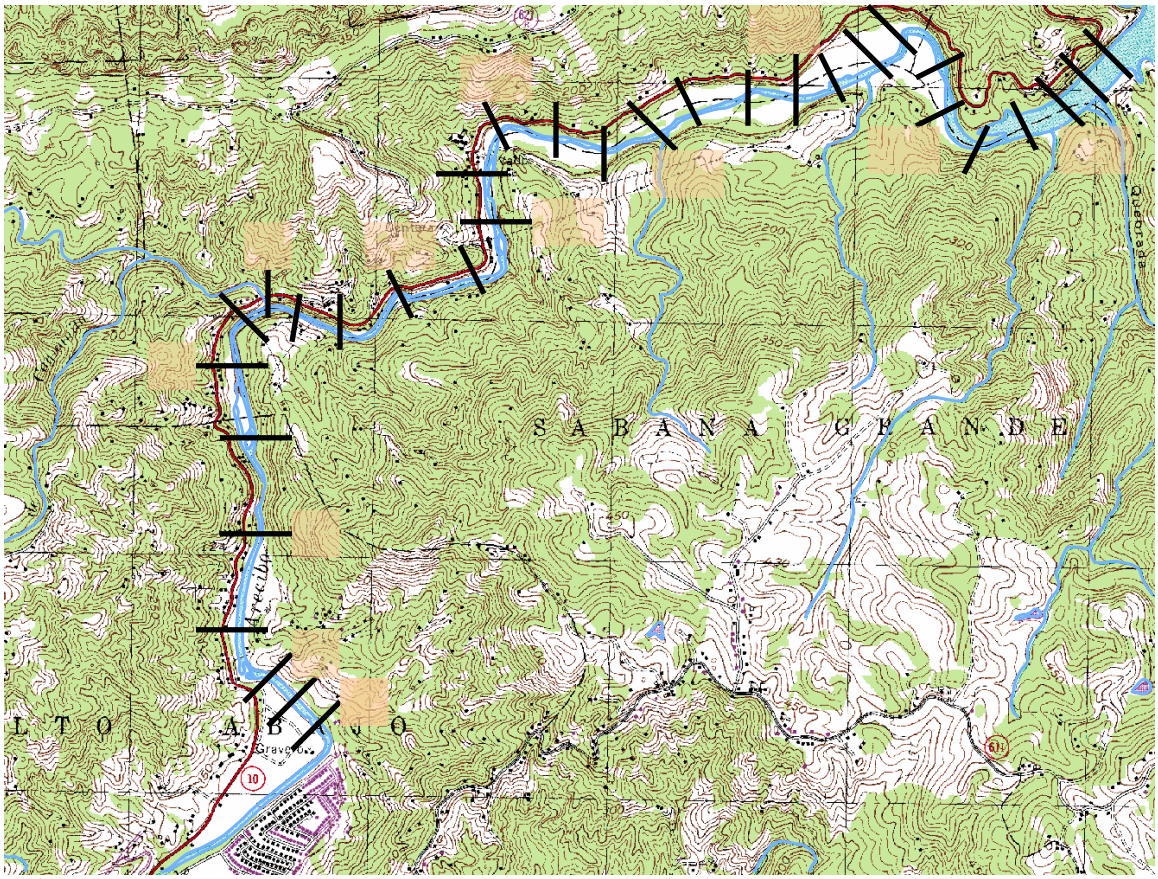
verticalmente el material excavado antes de tomar la muestra Las muestras fueron analizadas por la empresa GeoConsult (quienes operan un laboratorio geotécnico) para análisis de particulado total, incluyendo gravas, arenas, cienos y barros. Se utilizó un formulario de custodia para asegurar la integridad de las muestras y su identificación adecuada.

Figura 9. Depósitos de arena, grava y cienos en el tramo de la Actividad cerca de la secciones transversales 3 Y 22.

Figura 10. Depósitos de arena, grava y cienos en el tramo de la Actividad cerca de la secciones transversales 23 y 32.

3. En febrero del 2006, se definieron secciones transversales representativas del trecho de la Actividad. Este trabajo de campo lo llevó a cabo por el Agrimensor Ángel M. Otero-Pagán, Lic. Núm. 7190. Se obtuvieron perfiles de 34 secciones en el trecho, incluyendo estimados de la profundidad de los depósitos de arena y grava en segmentos del tramo (Apéndice 1 y Figura 11).
4. Utilizando los datos de las secciones transversales obtenidas durante la agrimensura, se definieron las pendientes del cauce y del nivel del agua durante flujos bajos en el tramo desde el norte de Utuado hasta Dos Bocas (Figura 3). Estos perfiles son necesarios para la calibración de GStars.

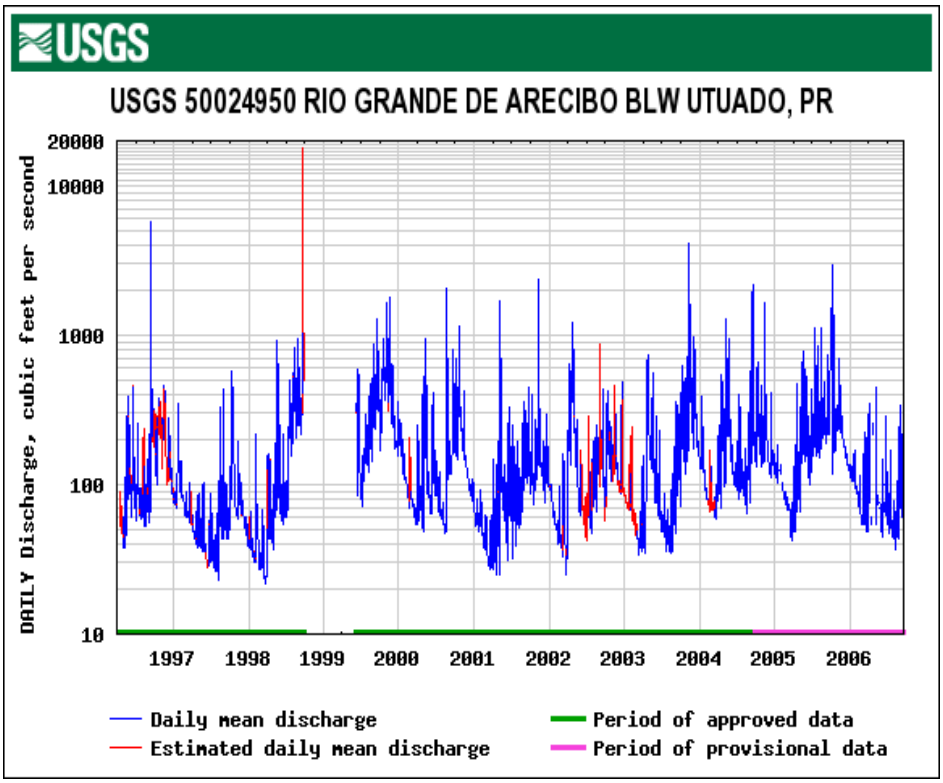
Figura 11. Ubicación aproximada de las secciones transversales definidas en el tramo de la Actividad en el RGA.



4.2 Análisis de los Datos de Campo y del USGS

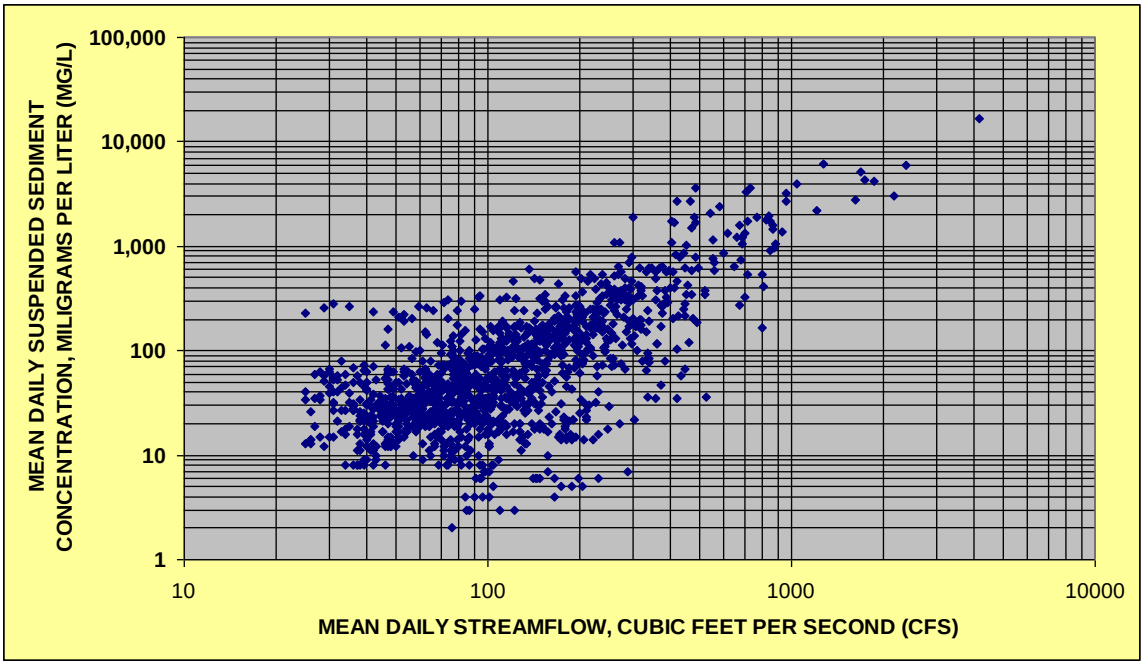
1. Se recopilaron los datos de la estación operada por el USGS donde se mide el flujo en el tramo propuesto para la Actividad (estación 50024950). El flujo promedio diario varía desde un mínimo de 12 pies cúbicos por segundo (pcs) hasta 18,000 pcs (Figura 12). Es importante notar la frecuencia de crecientes anuales que ocurren en el RGA durante la época de lluvia. Los datos más recientes del USGS indican que anualmente en esta estación fluyen un promedio de 114,400 acres-pies de agua, lo que es suficiente para llenar 8.7 veces el Embalse Dos Bocas. Este gran flujo, que en ocasiones exhibe descargas instantáneas de hasta 76,400 pcs (USGS, 2002, el 22 de septiembre de 1998), es la razón principal para la gran cantidad de sedimentos que fluye hacia Dos Bocas.

Figura 12. Flujo promedio diario en la estación operada por el USGS en el tramo del Río Grande de Arecibo donde se propone la Actividad.



2. Como se indicara anteriormente, además de medir el flujo en la estación 50024950, el USGS toma muestras de agua diariamente y durante crecientes para medir la cantidad de sedimentos en suspensión (SS).
    a. El SS representa normalmente las partículas que tienen un tamaño menor de 0.1 milímetros (mm), aunque el tamaño puede variar con las condiciones de flujo, ya que partículas con tamaños hasta un (1) mm pueden ser suspendidas temporalmente. En general, el SS representa hasta el 80 % del material sólido transportado por un río. El balance, formado por el material de tamaño mayor de 0.062 milímetros, representa el acarreo en el fondo ("bedload", BL). La proporción de BL depende de la granulación del material, lo que a su vez varía con la geología de la cuenca que nutre el punto de medir. La cuenca del RGA aguas arriba de Utuado y el tramo de la Actividad se caracteriza por la presencia de las rocas intrusivas del Batolito de Utuado, donde predomina la granodiorita y materiales de cuarzo y arenisca. Esto causa que la mayor parte del material erodado de la cuenca y transportado hacia el río sea suspendido durante crecientes significativas. En esencia, durante crecientes mayores, el fondo del cauce del río se "levanta" debido a la velocidad del agua y es transportado de un punto a otro en el cauce. Esto resulta en la acumulación de bancos de arena y grava en diferentes puntos del cauce como se ilustra en las figuras en el Apéndice 1.
    b. Utilizando los datos de flujo promedio diario que se miden en la estación, el USGS calcula el transporte de sedimento suspendido diario y anual. Los datos existentes datan de 1998. La relación entre el flujo de agua (Q) y el transporte de sedimentos suspendidos (SS) en la estación indicada se ilustra en la Figura 13.

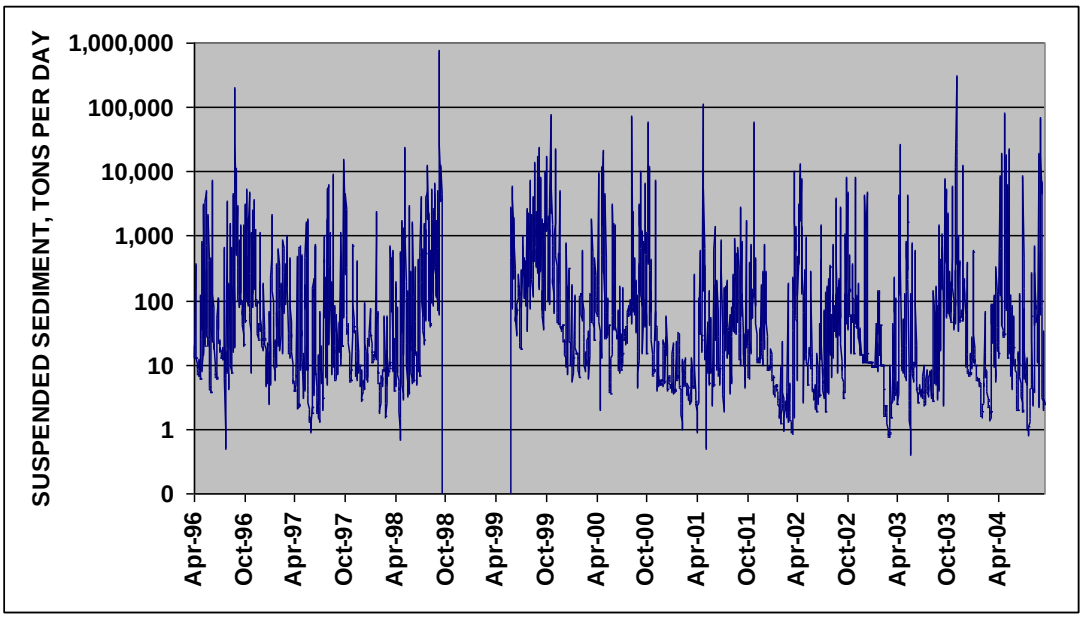
Figura 13. Relación entre el flujo de agua y la concentración de sedimentos suspendidos en el tramo de la Actividad en la estación 50024950 en el Río Grande de Arecibo.



Fuente: USGS Water Data Report for Puerto Rico, 1996-2004

3. La relación entre la descarga (Q) y la concentración de sedimentos suspendidos (SS) es utilizada por el USGS para estimar la descarga promedio diaria de SS en la estación 50024950 (Figura 14). Los datos en la Figura 14 indican una variabilidad desde menos de una tonelada por día, hasta un máximo de 768,000 ton/día durante la creciente de septiembre 22 de 1998. Los datos en la Figura 14 también ilustran descargas significativas de sedimento cada vez que ocurren crecientes en el RGA, lo cual es a menudo durante las temporadas de lluvia en la cuenca. Esto resulta en un transporte de sedimentos abundante en el tramo de la Actividad, que ahora se descarga a Dos Bocas.

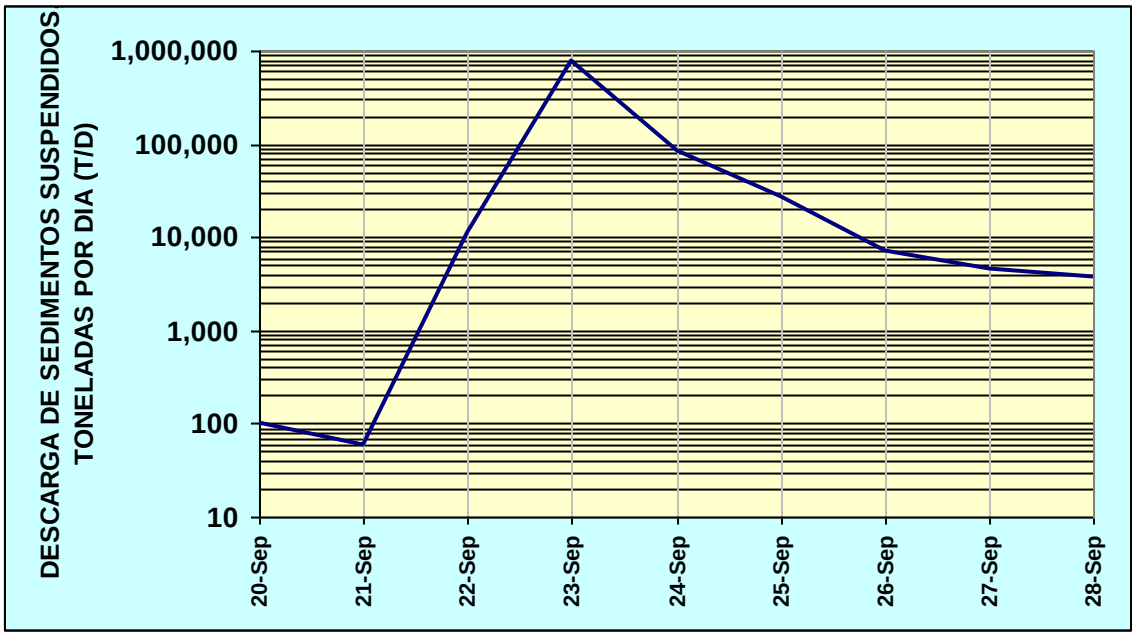
Figura 14. Descarga diaria de sedimentos suspendidos (SS) en la estación 50024950 en el RGA, ubicada en el tramo de la Actividad.



Fuente: USGS, 1996-2004

4. Los datos en la Figura 14 documentan en forma general que la mayor parte de los sedimentos transportados por el RGA en el tramo de la Actividad ocurren durante las múltiples crecientes de gran magnitud que ocurren cada año. Como ejemplo extremo de esta condición, la Figura 15 ilustra la descarga de sedimentos suspendidos durante la creciente del 22 de septiembre de 1998, durante el huracán Georges. Como se indicara anteriormente, la descarga de flujo pico estimada por el USGS para esta creciente fue de aproximadamente 76,000 pcs. La descarga promedio de sedimentos suspendidos durante el día de la creciente indicada fue de 768,000 toneladas. Esta cantidad de SS en ese día representa aproximadamente el 70 % de la descarga total de SS medida por el USGS durante el año-"agua" de octubre 1 de 1997 a septiembre 30 de 1998. Estas descargas de grandes cantidades de sedimentos durante crecientes significativas ocurre en la mayor parte de las cuencas en la Isla.

Figura 15. Descarga de sedimentos suspendidos en la estación 50024950 durante la creciente de septiembre 22 de 1998.



5. La determinación del transporte de sedimento del fondo (BL) se logra mediante ecuaciones empíricas desarrolladas por investigadores a través del tiempo. Las ecuaciones de Yang (2002) proveen la base de una serie de métodos para estimar el BL. Estos datos del USGS permiten estimar la cantidad de sedimentos que se transporta en el RGA por el tramo de la Actividad y que eventualmente descarga al Embalse Dos Bocas. Como se indicara anteriormente, existe un equilibrio dinámico en el transporte de sedimentos en el tramo, desplazándose los sedimentos hacia el embalse con cada creciente, que a su vez contribuye nuevas cargas de materiales erosionados de la cuenca aguas arriba de Utuado. Aunque el

número de años de datos es solamente 7 (no se obtuvieron datos en el año 1998-99), la disponibilidad de datos diarios y la variabilidad de flujos para los cuales se obtuvieron muestras y análisis del sedimentos suspendidos, provee una medida confiable de la cantidad de los sedimentos suspendidos que fluyen hacia Dos Bocas. Sin embargo, los datos del USGS no permiten estimar la descarga total de sedimentos (suspendidos y arrastre), ya que no se llevan a cabo medidas del arrastre ("bedload"). Aunque en la literatura existen datos y referencias que pueden utilizarse para estimar el arrastre (Maddock, 1975), la incertidumbre de estos estimados es variable (Tabla 2). Los factores que afectan el arrastre en un cauce incluyen la pendiente del canal, la velocidad del agua, y el tamaño del particulado. Estos parámetros se entrelazan en la Ley de Stokes (V.T. Chow, 1962), que rige la suspensión o precipitación de materiales en fluidos, tales como los sedimentos en el agua.

Tabla 2. Clasificación de Maddock para estimar el arrastre ("bedload") de sedimentos en ríos.

Suspended sediment concentration parts per million	River bed material	Suspended elements texture	Bedload discharge expressed as % of suspended sediment discharge
less than 1000	sand	similar to the river bed	25-150
less than 1000	gravel, rocks, hard clay	low sand content	5-12
1000 – 7500	sand	similar to the river bed	10-35
1000 – 7500	gravel, rocks, hard clay	25% sand or less	5-12
more than 7500	sand	similar to the river bed	5-15
more than 7500	gravel, rocks, hard clay	25% sand or less	2-8

Fuente: Maddock, 1975

6. Los cálculos de descargas anuales de sedimentos suspendidos (SS) obtenidos por el USGS en la estación 50024950 para los siete (7) años de 1996-98 y 1999-2004 (la estación no operó de 1998-99), se resumen en la Tabla 3. Estos datos se utilizaron para obtener un valor preliminar de la descarga anual promedio de SS. Este valor resultó en una descarga promedio anual de 440,240 toneladas/año. Existe una variabilidad de un orden de magnitud entre el año de menor descarga (1996-97) y el de mayor (1997-98). Además del año 1997-98, los años del 2001-02 y 2003-04 exhiben valores que exceden significativamente el promedio anual. Es lógico concluir que no existen datos suficientes para obtener un promedio anual confiable.

Tabla 3. Descargas anuales de sedimentos suspendidos en la estación 50024950 operada por el USGS en el tramo de la Actividad.

Año	Sedimentos Suspendidos (SS), ton/año	% de Arrastre (BL)	Arrastre (BL), ton/año	Sedimentos Totales (TS), ton/año
1996-1997	104,567	20	20,913	125,480
1997-1998	1,103,735	5	55,187	1,158,922
1999-2000	162,822	20	32,564	195,386
2000-2001	697,433	5	34,872	732,305
2001-2002	167,260	20	33,452	200,712
2002-2003	122,719	20	24,544	147,263
2003-2004	723,152	5	36,158	759,310

Fuente: USGS Water Data Reports 1998-2004

7. La Tabla 3 también resume los estimados de BL y TS para cada año ilustrado. Los valores de arrastre (BL) se estimaron utilizando los datos de descarga de SS diarios y los valores en la Tabla 2. En los años que no ocurren crecientes significativas, la velocidad del agua en el canal del RGA se mantiene laminar la mayor parte del tiempo, lo que resulta en transportes menores de SS. En estos años, los BL representan hasta un

20 % de la descarga total (TS). En los años que ocurren crecientes significativas, la alta velocidad del agua suspende esencialmente todos los sedimentos en el fondo del cauce, por lo que los BL se estiman en un 5 % del TS. Usando estos estimados de contribuciones del BL, se calcularon los valores de TS ilustrados en la Tabla 3. Aunque estos son estimados aproximados, es obvio que las contribuciones del BL a la descarga total de sedimentos (TS) no es significativa en años que ocurren crecientes de gran magnitud. Como se indicara anteriormente, esto se debe a que las altas velocidades en el canal suspenden esencialmente todo el material disponible debido a su tamaño relativamente menor. El promedio anual de TS para estos 7 años de datos es de aproximadamente 474,200 ton/año, lo que es un promedio de aproximadamente 34,000 ton/año mayor que los SS.

8. Los estudios de sedimentación de Dos Bocas llevados a cabo por el USGS nos permiten cierta validación de los estimados en la Tabla 4. El estudio más reciente de la sedimentación en Dos Bocas llevados a cabo por el USGS (Soler, 2001) estima la tasa de sedimentación anual del embalse en 277 acres-pies por año. Utilizando una gravedad específica de 60 libras por pié cúbico para los sedimentos húmedos (V.T. Chow, 1962), esto resulta en una descarga promedio anual de aproximadamente 362,000 ton/año. Este valor incluye las contribuciones de sedimentos que pudiera descargar Caonillas hacia Dos Bocas. El USGS estima la eficiencia de retención de Caonillas en aproximadamente el 93 % de los sedimentos que recibe de la cuenca (Soler, 2001). Esto implica que hasta un 7 % de los sedimentos que se acumulan en Dos Bocas proviene de esa cuenca. Esto permite estimar a la descarga neta de TS a Dos Bocas provenientes del RGA, lo cual es de aproximadamente 337,000 ton/año (93 % de 362,000). Al comparar este valor con el promedio de los TS obtenidos de los datos en la Tabla 4, la diferencia entre ambos valores es de aproximadamente 137,200 ton/año (474,200-337,000), lo que representa una variación de aproximadamente el 30 %. Como se indicara

antes, el record de SS y TS en la estación 50024950 representado en la Tabla 4 se basa en solamente siete (7) años de datos, en un período de variabilidad de una orden de magnitud. Aún así, los valores obtenidos por ambos métodos son razonablemente cercanos para los efectos de la Actividad.

4.3 Aplicación y Calibración del Modelo GStars

Durante las últimas dos décadas se desarrollaron modelos matemáticos que estiman el transporte total de sedimento (SS más BL). Estos modelos incluyen códigos unidimensionales (Ej., HEC-6 del USCOE); códigos bi-dimensionales (Ej. SAMWin, USCOE); códigos cuasi bi-dimensionales (GStars, BUREC); y ecuaciones uni- y bi-dimensionales incluyendo las de Einstein (1957), Yang (2002); Yang (2006), entre otros. Además, estos modelos pueden utilizarse para estimar la posible socavación y erosión de los bancos del cauce, y su contribución al transporte total (SS+BL) de sedimentos. Los modelos pueden utilizarse para hacer proyecciones de posibles cambios en el canal de un río para diversas condiciones. En el caso de extracción de materiales de un tramo de un río, como se propone en la Actividad, los modelos pueden utilizarse para estimar si van a ocurrir cambios en el canal. Esto es de gran importancia, pues la erosión del fondo y socavación de los bancos de un tramo de un canal de un río se puede manifestar aguas arriba o abajo del tramo afectado. Los modelos matemáticos, tales como HEC-6 (COE), SAM (COE) y GStars (USBR), son las más utilizados para estimar estos posibles cambios.

En el caso de la Actividad propuesta, se calibró el modelo GStars en varios

segmentos del tramo en el RGA propuesto para la extracción de materiales. El término GStars se refiere a "*Generalizad Sediment Transport for Alluvial Rivers*", según definido por sus autores en el BUREC (Yang and Brinam, 2006). Las características principales de GStars (Apéndice 3) son las siguientes:

4.3.1 Versión y Aplicabilidad de GStars: Se utilizó la versión GStars 1D, V. 1.1, actualizada en febrero de 2006 (BUREC, 2006).

1. GStars es un modelo numérico diseñado para computar transporte de sedimentos en ríos y canales con fondos permanentes o móviles. En el caso del tramo de la Actividad en el RGA, el fondo es fijo, con depósitos móviles de arena, grava y cienos.
2. Las capacidades de cómputos de GStars incluyen:
    a. Flujos laminares o turbulentos.
    b. Transporte de sedimentos en flujos laminares o turbulentos.
    c. Transporte de sedimentos agregados y no-agregados. Utilización de hasta 16 ecuaciones para el cómputo de la carga de sedimentos no-agregados, aplicables a una gran gama de condiciones hidrológicas de campo.
    d. Flexibilidad en la aplicación de coeficientes de rugosidad variables ("n") en una misma sección transversal.
    e. Capacidad de estimar cambios en la sección transversal debido a erosión y socavación del canal.
    f. Capacidad de implantarse en tramos sin y con efluentes.

3. Aunque estas capacidades de GStars ofrecen flexibilidad extrema y adaptabilidad para aplicarse al tramo de la Actividad, al igual que todos los modelos matemáticos, incluye limitaciones que requieren consideración por el analista que lleva a cabo la calibración del modelo. Estas limitaciones incluyen:
    a. No debe utilizarse en análisis donde efectos laterales hagan necesario el uso de un modelo de dos o tres dimensiones.
    b. En zonas costaneras, donde el flujo no es uniforme, segmentos de este pueden fluir en diferentes direcciones, afectando el transporte y deposición de los sedimentos en forma irregular. En el caso del tramo de la Actividad, esta restricción no aplica, ya que el flujo está contenido en un canal estrecho, particularmente durante crecientes con intervalos de recurrencia de hasta 100 años (Figura 16).

Figura 16. Niveles aproximados de la inundación con intervalo de recurrencia de 100 años en el tramo de la Actividad.

Fuente: JP, 2006

4. En forma semejante a todos los modelos matemáticos basados en ecuaciones diferenciales, GStars calcula aproximaciones al mundo real. En el caso del tramo del RGA donde se propone la Actividad, existen datos de campo obtenidos por el USGS sobre la cantidad de sedimentos suspendidos transportados durante flujos normales y crecientes. Esto permite comparar los resultados de GStars con los medidos por el USGS.

4.3.2 Calibración de GStars: La calibración de GStars incluyó el siguiente procedimiento:

1. Entrada de los datos de elevación, ancho, y rugosidad (“n”) de 32

secciones transversales en el tramo del RGA donde se propone la Actividad, y de los perfiles del canal y superficie del agua obtenidas de la agrimensura de campo (Apéndice 1). Los valores de rugosidad se estimaron durante las visitas de campo usándose un promedio de 0.050 en el canal y en los bancos.

2. Entrada de los datos de flujo (Q) y elevación en la estación del USGS 50024950 para inundaciones con intervalos de recurrencia de 2, 10, 25, 50 y 100 años. Como se indicara anteriormente, estas descargas fueron estimadas utilizando regresiones matemáticas desarrolladas por el USGS. Estas descargas se utilizan por GStars para calcular el transporte de sedimentos durante crecientes de magnitud variada, permitiendo discernir cuando ocurre la mayor parte del transporte de sedimentos. Las ecuaciones utilizadas y los valores de descarga pico (Q) para cada intervalo de recurrencia (*RI*) analizado (2, 5, 10, 25, 50, y 100 años) se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Regresiones utilizadas para estimar los flujos picos para las recurrencias de 2, 10, 25, 50, y 100 años en la estación 50024950.

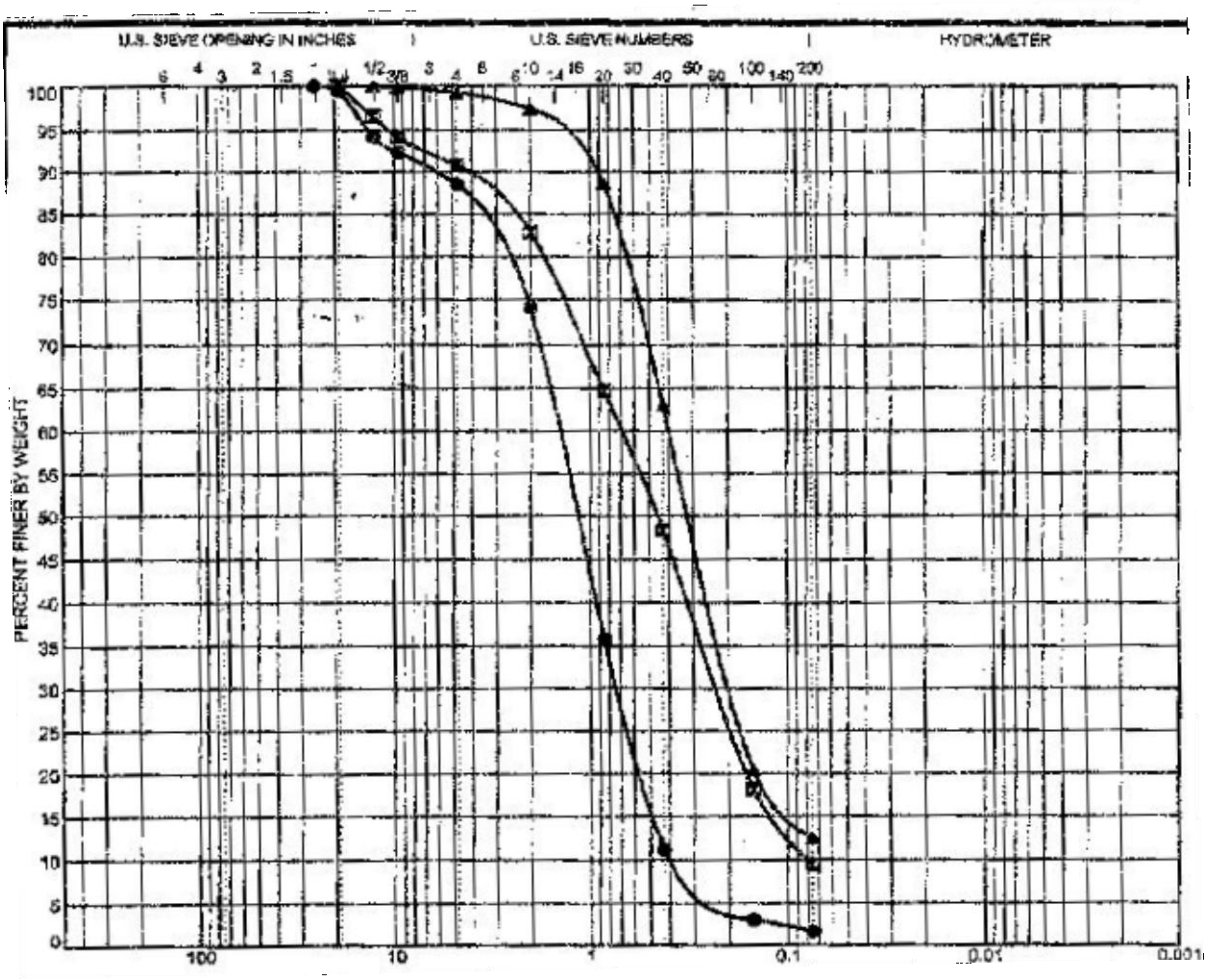
DISCHARGE FORMULA (Ramos-Ginés, USGS, 2002)	CONSTANT1	Drainage Area (CDA), square miles	CONSTANT2	Depth to Rock (DR), inches	CONSTANT3	Mean Annual Rainfall (MAR), inches	CONSTANT 4	INSTANTANEOUS DISCHARGE (Q), CUBIC FEET PER SECOND
$Q2=19.9\ CDA^{0.603}MAR^{0.852}$	19.9	65.6	0.603	0	0.000	85	0.852	10,922
$Q_{10}=3,880\ CDA^{0.697}DR^{-0.470}MAR^{0.645}$	3,880	65.6	0.697	57	-0.869	85	0.584	28,585
$Q_{25}=24,940\ CDA^{0.730}DR^{-1.25}MAR^{0.540}$	24,940	65.6	0.730	57	-1.250	85	0.540	37,177
$Q_{50}=72,220\ CDA^{0.747}DR^{-1.48}MAR^{0.525}$	72,220	65.6	0.747	57	-1.480	85	0.525	42,671
$Q_{100}=180,000\ CDA^{0.760}DR^{-1.68}MAR^{0.518}$	180,000	65.6	0.760	57	-1.680	85	0.518	48,494

Fuente: USGS WRI 99-4142

3. Entrada de los datos del tamaño del particulado del material en el cauce del tramo de la Actividad, obtenidos de los análisis de las muestras en la vecindad de las estaciones 1, 3 y 12 (Apéndice 2). Los análisis demuestran que la mayor parte del material en las muestras es arena y gravas (exceso de 80 por ciento, Figura 17).
4. Cálculo con GStars del transporte de sedimentos totales (suspendidos más arrastre) entre las secciones 9, 9A, y 10, donde ubica la estación hidrográfica operada por el USGS (estación 50024950, ubicada cerca de la sección 9A). En los cálculos se utilizaron los datos de la geometría y pendiente de las secciones transversales 9, 9A, y 10; datos de flujos picos (Q) para las frecuencias de 2, 10, 25, 50, y 100 años en la estación operada por el USGS; y datos del tamaño del particulado del fondo del cauce en la vecindad de la sección 12, asumiéndose que son representativos de la sección 9A. El perfil de la sección 9A se derivó de los datos de las secciones 9 y 10, así como de aforos (mediciones de flujo en el campo) llevados a cabo por el USGS en la vecindad de la estación 50024950.
5. Desarrollo de una relación entre las descargas picos para las frecuencias indicadas y las descargas de TS obtenidas con GStars. Esta relación, conjuntamente con la curva de frecuencia de flujos en la estación 50024950, se utilizó para estimar la descarga promedio anual de TS en dicha estación.

6. Estimados generados con GStars de posibles cambios en el canal del tramo de la Actividad luego de la extracción de hasta un (1) metro del material depositado sobre las rocas que forman el fondo del cauce.

Figura 17. Distribución del particulado en muestras del material de fondo en las secciones transversales 1, 3 y 12 del tramo del cauce del Río Grande de Arecibo propuesto para la Actividad.



Fuente: Geoconsult, 2006 (Muestras de las Secciones 1, 3 y 12 tomadas por ORAMA en Octubre de 2006,)

4.3.3 Resultados de la Calibración y Cómputos con GStars: Los resultados de la calibración de GStars en la vecindad de la estación 50024950 fueron como sigue:

1. Las descargas promedios diarias de TS para las frecuencias de 1, 2, 10, 25, 50 y 100 años se resumen en la Tabla 5, donde también se incluyen las descargas de flujo obtenidas de las regresiones en la Tabla 4.

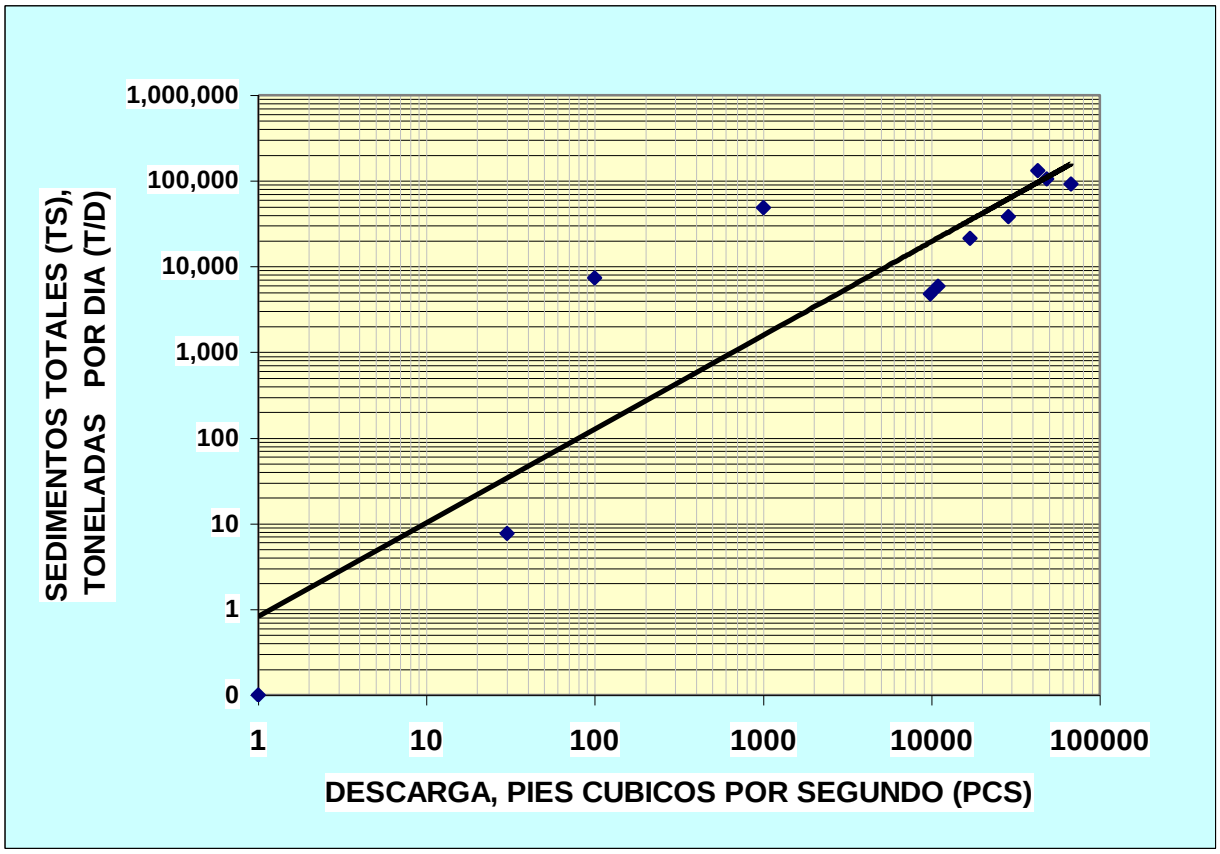
Tabla 5. Descargas de sedimentos totales (TS) estimadas con el modelo GStars para frecuencias variadas en la sección 9A del tramo del RGA donde se propone la Actividad.

INTERVALO DE RECURRENCIA, años	DESCARGA DE AGUA, pies cúbicos por segundo (pcs)	DESCARGA DE SEDIMENTOS TOTALES POR DIA (TS), toneladas por día (t/d)
<1	**1**	0
<1	30	1
<1	100	45
<1	1,000	260
1	9,820	4,829
2	10,922	7,000
10	17,000	30,780
25	28,585	68,200
50	42,671	315,200
100	48,494	379,500
>100	67,700	657,000

2. Utilizando estos datos calculados con GStars, se desarrolló una curva de transporte de sedimentos totales (TS) para la sección 9A (Figura 18). Esta curva relaciona las descargas picos de flujo (Q) a

la descarga diaria de sedimentos totales (TS). La parte baja de la curva se ajustó con valores de Q y TS obtenidos de la curva de transporte desarrollada por el USGS. La incertidumbre de la parte baja de la curva no es significativa debido a que la mayor parte de los sedimentos se transportan durante las crecientes de gran magnitud, como lo ilustran los datos de la Tabla 6.

Figura 18. Curva de transporte de sedimentos totales (TS) derivada con GStars para la sección 9A del tramo de la Actividad.



5. Los resultados en la Tabla 6, particularmente para la descarga

máxima de TS de 657,000 ton/d con una descarga de 67,700 pcs, se aproxima a la descarga promedio diaria computada por el USGS para la creciente del 22 de septiembre de 1998. Como se indicara anteriormente en la Sección 4.2, 4., para la creciente de ese día con una flujo pico de 76,000 pcs estimada por el USGS, se calculó una descarga de SS de aproximadamente 768,000 toneladas. Análisis de la geometría de la sección 9A establecen que para el pico de 67,000 pcs utilizado en la calibración de GStars, la velocidad del agua era de aproximadamente 13.4 pies por segundo (p/s). Esta velocidad suspendería todas las partículas en el tramo del RGA evaluado, por lo que la contribución de arrastre (BL) era insignificante durante esta creciente.

6. Utilizando la curva de transporte de TS derivada con GStars, se procedió a estimar la descarga total promedio anual de TS en la sección 9A. Este valor provee una aproximación de la cantidad de TS que fluye por el tramo de la Actividad hacia el Embalse Dos Bocas. Este estimado de TS generado con GStars puede compararse con el estimado obtenido de TS obtenido en la estación 50024950 operada por el USGS en la vecindad de la sección 9A (ver sección 4.2.4). Estos cálculos se resumen en la Tabla 6. La descarga promedio anual de TS derivada por este procedimiento es de aproximadamente 457,600 toneladas por año. Este valor compara muy favorablemente con el cálculo de TS

obtenido con los datos del USGS (ver sección 4.4.7), que fue de 474,400 toneladas por año.

Tabla 6. Estimados de la descarga de sedimentos totales (TS) obtenidos con GSTars en la sección 9A del tramo de la Actividad en el RGA.

INTERVALO DE RECURRENCIA, años	DESCARGA DE AGUA, pies cúbicos por segundo (pcs)	PORCIENTO DEL TIEMPO (DECIMAL) FLUJO ES IGUALADO O EXCEDIDO	DIAS EQUIVALENTES	DESCARGA DE SEDIMENTOS TOTALES POR DIA (TS), toneladas por día (t/d)	DESCARGA DE SEDIMENTOS TOTALES ANUALES (TS), toneladas por año (t/a)
<1	1	1	1	0	0
<1	30	1	7.7	1	8
<1	100	0.9	164	45	7,380
<1	1,000	0.8	189	260	49,140
1	9,820	0.7	1	4,829	4,829
2	10,922	0.6	0.84	7,000	5,880
10	17,000	0.3	0.7	30,780	21,546
25	28,585	0.08	0.56	68,200	38,192
50	42,671	0.04	0.42	315,200	132,384
100	48,494	0.02	0.28	379,500	106,260
>100	67,700	0.01	0.14	657,000	91,980
				TOTAL TS	457,599

4.3.4 ***Evaluación de posibles impactos en el fondo del canal***: El fondo natural del canal del tramo del RGA donde se propone la Actividad no sufriría cambios debido a la extracción propuesta, ya que dicho fondo está formado por rocas que se afectan en forma mínima por las escorrentías y el transporte de sedimentos. Aún así, utilizando a GStars, se evaluaron posibles cambios en el fondo del canal donde existen depósitos de gravas, arenas, y cienos sobre el fondo rocoso. Las evaluaciones se llevaron a cabo en la vecindad de las secciones transversales 9, 9A, y 10, en cuya vecindad se tomaron muestras para analizar el tamaño de las partículas en el fondo del canal. Las

evaluaciones incluyeron las siguientes condiciones:

1. En condiciones de equilibrio se estimó el cambio en volumen en el lecho del río para las crecientes de 5, 10, 25, 50 y 100 años (Tabla 5) en la estación USGS 024950 representada por la sección 9A entre las secciones 9 y 10 obtenidas de los trabajos de agrimensura.
2. Para cada recurrencia se desarrollaron las condiciones de contorno para las corridas en las secciones 1 y 12.
3. Para la sección 12 la condición de contorno fue aguas arriba. En ambas corridas la sección 9A se utilizó como punto de referencia.
3. Se simuló con GStars las condiciones del canal sin remoción o sin alteración del lecho del río, y se tabuló el cambio en volumen para cada recurrencia en las secciones 1, 9A y 12.
4. Luego de la simulación se corroboró el transporte de sedimento con datos del USGS.
5. Se repitió este procedimiento, ahora restando un (1) metro (3.281 pies) a cada punto de agrimensura en las secciones indicadas, correspondiente a una sección en el cauce del río con una descarga de aproximadamente 174 pcs. La sección de agrimensura y el nivel de agua en la misma proyectada a la sección 9A se utilizó para verificar el dato de descarga. Lo mismo se analizó con la sección 12.
6. Luego de restar la elevación de 3.281 pies, se editaron los datos

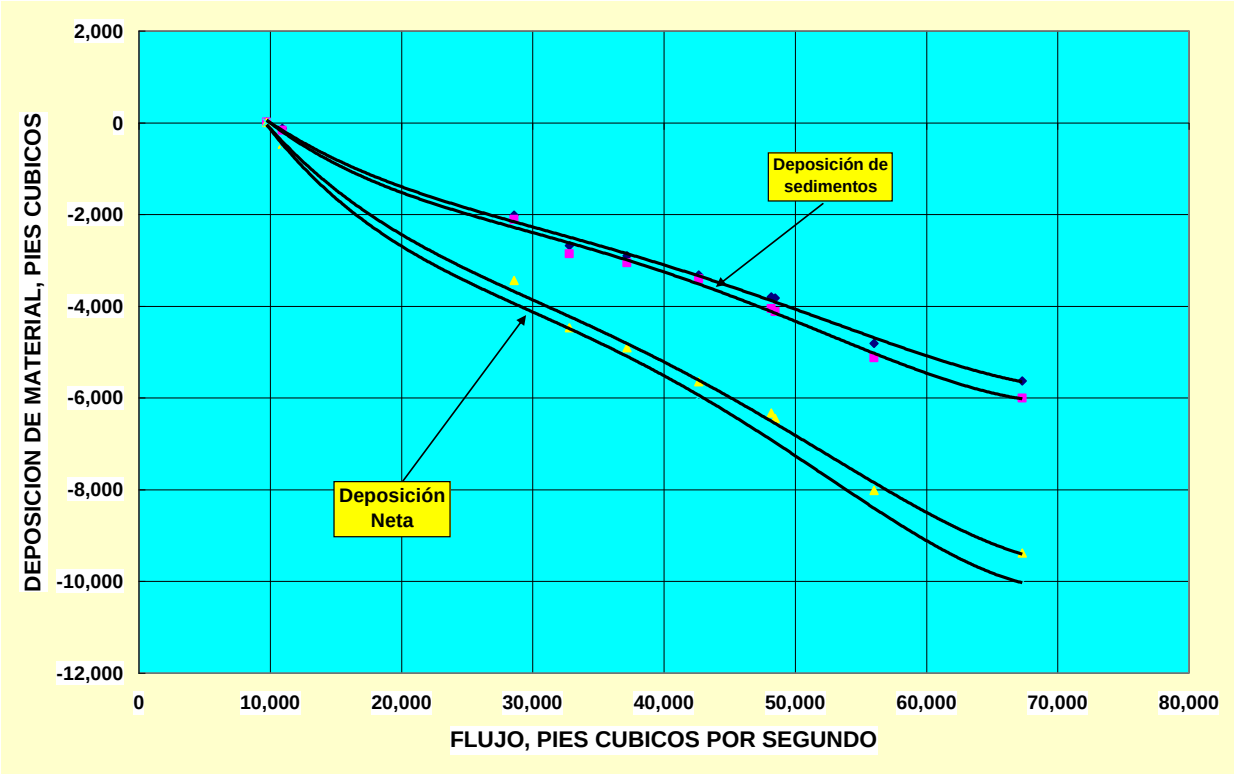
para cada sección y se procesaron con GSTAR utilizando la hoja de trabajo (*worksheet) denominada "Geometry"* en el Apéndice 3. Solo se restó esta cantidad a la parte inundada de agua y no a la sección de agrimensura completa según en los planos de la agrimensura.

7. Para cada intervalo recurrencia se desarrollaron las condiciones de contorno para las corridas en las secciones 1 y 12.
    a. Para la sección 1 la condición de contorno fue aguas abajo de la sección calibrada, mientras que
    b. para la sección 12 la condición de contorno fue aguas arriba. En ambas la sección 9A se utilizó como punto de referencia.
8. Los resultados de estas simulaciones se resumen en las Figura 19 y 20 para la sección 9A. Estas figuras comparan los niveles del canal antes y después de la remoción de un metro (3.281 pies) de material en dicha sección. Los datos ilustran una deposición negativa (remoción) que aumenta con la magnitud del flujo.

    a. El cambio en volumen en la sección 9A en condiciones de equilibrio sin remoción de sedimentos en el lecho del río se ilustra en la Figura 19. Las dos curvas en la parte superior de la gráfica indican la remoción natural de sedimentos del lecho del río (material): la primera de arriba hacia abajo es el cambio en volumen de sedimento de forma acumulativa mientras que la

segunda curva es el cambio total en volumen en el lecho. Las dos curvas en la parte inferior de la Figura 19 ilustran el cambio neto en el volumen de sedimentos en el banco y el lecho del río: la primera curva el cambio en forma acumulativa y la segunda curva el cambio neto total. Estos cambios señalan a que una porción significativa del total de transporte de sedimento del río es reemplazada por el sedimento acumulativo: por ejemplo, para una descarga de 9,750 pcs el cambio acumulativo es de 13 pies cúbicos (p^3), mientras que el cambio en sedimentación neta es de solo 5 p^3. La cantidad o diferencia es transporte dinámico de sedimentos es utilizada por GSTAR en secciones a 1,500 pies y 3,000 pies aguas abajo de esta sección.

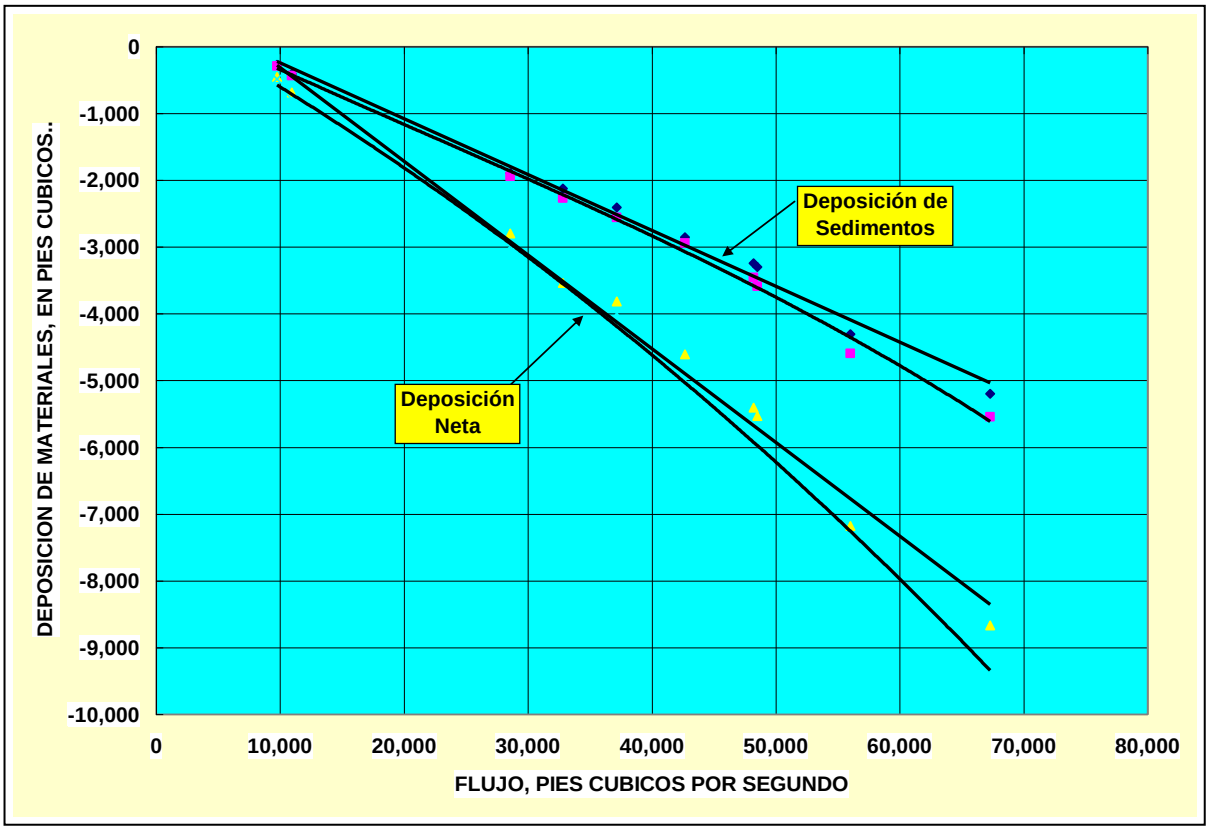
Figura 19. Resultados de las simulaciones con GStars de las condiciones en el canal del RGA ilustrando el cambio en volumen en la sección 9A en condiciones de equilibrio sin remoción de sedimentos en el lecho del río.



b. El cambio en volumen en la sección 9A cuando se remueve un (1) metro (3.281 pies) de sedimentos del lecho del río se ilustra en la Figura 20. Las dos curvas en la parte superior de la gráfica indican la remoción natural de sedimentos del lecho del río (material): la primera de arriba hacia abajo es el cambio en volumen de sedimento de forma acumulativa mientras que la segunda curva es el cambio total en volumen en el lecho. Las dos curvas en la parte inferior indican el cambio neto en el

volumen de sedimento en el banco y el lecho del río: la tercera curva de forma acumulativa y la cuarta curva la neta total.

Figura 20. Resultados de las simulaciones con GStars de las condiciones en el canal del RGA ilustrando el cambio en volumen en la sección 9A cuando se remueve un (1) metro (3.281 pies) de sedimentos del lecho del río.



c. La interpretación de los resultados de ambas figuras permite concluir que del total de transporte de sedimentos en el tramo del RGA analizado, una porción significativa es reemplazada por el sedimento acumulativo. Por ejemplo, para una descarga de 9,750 pcs, el cambio acumulativo es de -273 p^3, mientras

que el cambio en sedimentación neta es de solo -291 p^3. La cantidad o diferencia es transporte dinámico de sedimentos es utilizada por GSTAR en secciones a 1,500 p y 3,000 pies aguas abajo de esta sección. Al comparar ambas curvas en la Figura 18, se concluye que el cambio en volumen es acelerado por el efecto de ahondar el cauce, pero el cambio neto en el volumen de sedimentos proviene mayormente del banco del río y no del lecho del río. Este banco a ser afectado es formado por los depósitos de grava, arena y cienos transportados de forma significativa durante eventos con recurrencia mayor de 10 años.

5.0 Análisis de los Resultados

Los análisis de datos existentes y la calibración de GStars permitieron obtener dos estimados independientes de la cantidad de sedimentos que transporta el RGA en el tramo propuesto para la Actividad.

5.1 Resultados de los Datos de la Estación del USGS: Los datos de flujo y concentración de sedimentos suspendidos (SS) obtenidos por el USGS en la estación 50024950 (ubicada en el tramo de la Actividad) permiten obtener un estimado de la descarga promedio anual de sedimentos totales (TS) descargada hacia el Embalse Dos Bocas.

1. El promedio anual de SS es de aproximadamente 440,200 ton/año, en base a siete (7) años de datos de descargas promedios diarias de sedimentos.
2. Utilizando los datos de granulometría de los sedimentos en el cauce del tramo, y los valores empíricos de Maddock (1975) se estimó que el arrastre ("bedload", BL) es aproximadamente el 20 % del total de sedimentos descargados hacia Dos Bocas. La naturaleza del material en el cauce y las altas velocidades durante crecientes permite que la mayor parte de las partículas se suspendan en la columna de agua (el 80 % tiene un diámetro menor de 2 mm (Figura 17), y los datos de la Figura 13 confirman concentraciones de sedimentos suspendidos de hasta 10,000 miligramos por litro (mg/L) durante crecientes). Utilizando estos datos y las guías de Maddock, se asume el porciento indicado (20 %), lo que resulta en un promedio anual de BL de 34,000 ton/año.
3. La cantidad total promedio de sedimentos (TS) descargadas anualmente a Dos Bocas desde el tramo de la Actividad es entonces de aproximadamente 474,200 ton/año.

4. Los datos de la estación del USGS establecen que para crecientes de gran magnitud (como la del 22 de septiembre de 1998), la descarga promedio diaria de sedimentos suspendidos (SS) puede alcanzar hasta 678,000 toneladas (Figura 15). Los sedimentos transportados por esta creciente representaron el 70 % de la descarga anual del RGA hacia el Embalse Dos Bocas.

5.2 Estimados Obtenidos con GStars: El análisis numérico con GStars y las descargas de flujos para los intervalos de recurrencia indicados en la Tabla 5 permiten concluir lo siguiente:

1. La descarga anual promedio de sedimentos totales (TS) es de aproximadamente 457,600 ton/año. Este valor compara favorablemente con los estimados de 474,200 ton/año de TS calculados de los datos de la estación hidrográfica 50024950 operada por el USGS.
2. La remoción de un metro de materiales del fondo del canal del RGA en el tramo propuesto para la Actividad no resultará en socavación de dicho canal o sus bancos, debido a que están formados de rocas induradas volcánicas. Aún así, simulaciones con GStars en la sección 9A (cercana a la estación del USGS), demuestran que la remoción neta de materiales para crecientes de diferentes magnitudes no aumenta significativamente.

6.0 Conclusiones y Recomendaciones

Los datos y análisis llevados a cabo permiten concluir lo siguiente:

1. En la zona de la Actividad, el RGA mantiene un cauce estable debido a la naturaleza de las rocas de origen volcánico induradas que forman su lecho. El material transportado por el río desde la parte superior de la cuenca al sur de Utuado y hacia Adjuntas, se acumula en el fondo del cauce en "bancos" de arena de espesor variado. Cada creciente relocaliza una fracción no determinada del material hacia puntos cada vez más aguas abajo, hasta eventualmente descargar los sedimentos al Embalse Dos Bocas. Existe un equilibrio dinámico de deposición y remoción de sedimentos en el tramo de la Actividad, que al presente fluyen hacia el Embalse Dos Bocas, acelerando su sedimentación.
2. Aproximadamente un promedio de 474,200 toneladas de sedimentos totales (TS) fluyen por el tramo de la Actividad anualmente, según derivado de los datos obtenidos de la estación hidrográfica 50024950 operada por el USGS en el tramo de la Actividad (entre las secciones 9 y 10). En años individuales desde 1996 al 2004, la descarga de TS hacia el Embalse Dos Bocas varió desde un mínimo de 125,480 toneladas en 1996-97 hasta diez veces ese total en 1997-98 (1,158,900 toneladas). Los datos de SS obtenidos por el USGS fueron ajustados con estimados de arrastre (BL) para obtener el TS, utilizando información empírica de canales similares generados por otros investigadores.
3. La descarga total de sedimentos (TS) que fluye por el tramo de la Actividad hacia Dos Bocas también fue estimada utilizando el modelo GStars, acoplado a crecientes con intervalos de recurrencia de magnitud variada y los datos de flujo medidos por el USGS en la estación 5002450. Este valor de TS anual estimado con GStars fue de 457,600, lo que compara favorablemente con el valor obtenido con los datos del USGS.
4. La propuesta extracción por ORAMA de hasta 800 metros cúbicos de

material del tramo de la Actividad se supliría de los sedimentos que discurren por el tramo. Esta cantidad de material es equivalente a 128,000 toneladas anuales, la cual se podría suplir del material transportado la mayor parte de los años (Tabla 4). En años de sequías severas, cuando el transporte de sedimentos en el tramo de la Actividad se reduce, la acumulación de material de años anteriores supliría cualquier déficit del año de sequía.

5. GStars fue también utilizado para simular los efectos potenciales de las extracción de hasta un (1) metro de materiales del cauce del RGA en el tramo de la Actividad propuesta. Los resultados de dicha simulación para crecientes de diferentes magnitudes establecen que la remoción del material propuesto no induce cambios significativos en el canal del cauce del RGA.

Las siguientes recomendaciones se derivan del análisis y resultados:

1. Es viable y altamente recomendable autorizar la extracción de materiales del cauce del RGA aguas arriba del Embalse Dos Bocas. La extracción propuesta por ORAMA reduciría la cantidad de sedimentos totales (TS) que descargan hacia el embalse en aproximadamente el 25 % de la tasa actual. Esto redundaría en alargar la vida útil de este importante embalse. El impacto económico beneficioso de reducir la tasa de sedimentación de Dos Bocas representará economías cuantiosas al Gobierno Central de Puerto Rico.
2. La extracción debe limitarse a los bancos de arena depositados en el tramo propuesto por ORAMA, sin extenderse a los bancos naturales fuera de los niveles de las inundaciones con frecuencia de 10 a 25 años. De este modo, se removerá solamente el material depositado periódicamente sin afectar la estabilidad de los bancos más elevados ni la vegetación de los mismos.
3. Luego del primer año de extracciones, una vez se disponga de datos adicionales de flujo de agua y transporte de sedimentos en la estación operada por el USGS, debe revisarse si es posible continuar con la tasa de extracción solicitada. En años de mucha lluvia y escorrentía abundante, la

tasa de extracción propuesta puede mantenerse sin cambios.

4. Durante la operación normal de extracción se recomienda el uso de palas mecánicas que disminuyan el escape de agua al levantarla. De esta forma se disminuirá la suspensión de sedimentos finos.

7.0 Limitaciones del Estudio

El presente trabajo ha sido realizado utilizando prácticas ampliamente aceptadas en la ingeniería. Los cálculos de transporte de sedimentos suspendidos (SS) utilizando los datos del USGS se basan en medidas de campo de flujos y análisis de muestras de SS, relacionados matemáticamente por dicha agencia. Los estimados del arrastre (BL) en los cómputos de sedimentos totales (TS) se definieron de estimados empíricos. En vista de que la mayor parte de los sedimentos en el RGA son transportados durante crecientes en las cuales la mayor parte del material se suspende debido a las altas velocidades del flujo, errores potenciales en los estimados de BL no afectan significativamente los cálculos de TS usando los datos de SS del USGS.

Los modelos de transporte de sedimentos son mayormente empíricos y solo son recomendables para utilizarse en condiciones similares a aquellas para las cuales fueron desarrolladas o hayan sido probados. GStars representa el modelo más reciente y sofisticado desarrollado por el USBR en el 2006 para condiciones similares a las del tramo del RGA donde ORAMA propone la Actividad. Las regresiones matemáticas para estimar los flujos picos (Q) para las crecientes utilizadas en los cómputos con GStars fueron desarrolladas por el USGS mediante análisis estadísticos de los mejores datos disponibles al momento de su desarrollo. Los errores potenciales de estas regresiones son comparables a los que ocurren cuando los picos de descarga se generan de otros modelos matemáticos tales como HEC-RAS.

8.0 Bibliografía

Briggs, R.P. and J.P. Akers, 1965: "*Hydrogeologic map of Puerto Rico and adjacent islands. U.S. Geological Survey Hydrol. Inv. Atlas HA-197*". San Juan, PR.

C. H. Yang, "*Sediment Transport: Theory and Practice*", McGraw Hill Co., New York, 1996.

Department of the Army, Army Corp of Engineers*, "Hydraulic Design Package for Channels: User's Manual for SAM* ", Vicksburg, Mississippi, March 1998.

Einstein H.A. 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. USDA Tech. Bull. 1026. Washington DC.

Federal Emergency Management Agency*, "Flood Insurance Study for RGA Grande de Manatí Basin, Puerto Rico*" , March 1982.

Huang, J.V., and Breinam, B., 2006, "*User's Manual for GStars 1D, V. 1.1*": US Bureau of Reclamation, 270 p.

Johnson, K.G, Quiñones, F., and Alicea, J., 1982, "*Flood of September 16, 1975 at Utuado, Puerto Rico*": USGS WRI OFR 81-413, 1 pl.

Maddock T. 1975. Table 3.2 in Sediment Engineering, V.A. Vanoni (ed.). ASCE, New York.

National Oceanographic and Atmospheric Admin., 2006, "*Monthly Averages of Temperature and Precipitation for State Climatic Divisions, 1971-2000, Puerto Rico*". National Climatic Center, Asheville, NC.

Ramos-Ginés, O., 1999, "*Estimation of Magnitude and Frequency of Floods for Streams in Puerto Rico: New Empirical Methods*", USGS WRI 99-4142, 31 p.

Soler-López, L.R. and Webb, M.T., 1998*, "Sedimentation Survey of Lago Dos*

Bocas, Puerto Rico: USGS WRI Report 98-4188", 14 p. plus 1 plate.

Soler-López, Luis, 2001, "*Sedimentation survey of Lago Dos Bocas, Puerto Rico, October 1999*": USGS Water-Resources Investigations Report 00-4234, 19 p., 1 pl.

Soler-López, Luis, 2001, "*Sedimentation survey of Lago Caonillas, Puerto Rico, February 2000"*: USGS Water-Resources Investigations Report 01-4043, 25 p., 1 pl.

Torres-Sierra, H., 2002, "*Flood of September 22. 1998 in Arecibo and Utuado, Puerto Rico*": USGS, WRD 01-4247, 23 p. plus plates.

U.S. Geological Survey, 1996, "*Atlas of Ground-Water Resources in Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands*": WRI 94-4198. San Juan, Puerto Rico.

U. S. Geological Survey, 1970-2004, "*Water Resources Data: Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands, Water Years 1970-2004*.

V. T. Chow, "*Open Channel Hydraulics*", McGraw Hill Co., New York, 1959.

U.S. Army Corps of Engineers, 1996, "*ASCE Technical Engineering and Design Guides, River Hydraulics, No. 18*", New York, NY.

9.0 Apéndices

1. Manual Instrucciones GStars
2. Código de GStars
3. Índice de Archivos de la Calibración de GStars y Archivos