



FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**CUANTIFICACIÓN DE LA CARGA LAVADA Y DE MATERIAL DE LECHO  
HASTA UN SITIO DE EMBALSE Y COMPARACIÓN CON VALORES  
REPORTADOS POR BATIMETRÍAS.**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR:

Juresa González, Omar Stjpan.

Ovalles Esposito, Fernando Gabriele.

PROFESOR GUÍA:

Ing. Martínez, Juan Carlos.

FECHA:

Caracas, octubre de 2017.

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

CUANTIFICACIÓN DE LA CARGA LAVADA Y DE MATERIAL DE LECHO HASTA  
UN SITIO DE EMBALSE Y COMPARACIÓN CON VALORES REPORTADOS POR  
BATIMETRÍAS.

Este jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo, ha evaluado su contenido con el resultado: \_\_\_\_\_.

JURADO EXAMINADOR

Nombre: \_\_\_\_\_ Nombre: \_\_\_\_\_ Nombre: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_

## DEDICATORIA

A mi mamá que ya no está a mi lado, pero sé que me da todas las fuerzas para seguir adelante y poder cumplir con mi objetivo de ser Ingeniero Civil.

A mi prometida y futura esposa por el apoyo incondicional en estos momentos del desarrollo del presente trabajo especial de grado.

A mi padre porque siempre ha estado a mi lado.

A mis hermanos por el apoyo con cada decisión que he tomado en transcurso de la carrera.

A mis amigos, que siempre están presentes en ese momento de despejar la mente.

*Omar Stipan Juresa González*

## DEDICATORIA

A mi mamá y mi nonna por llenar mi vida de cariño y ciencia, por la hora de la comida y mucha risa, por el amor gigante que me han dado desde que nací hasta hoy.

A mi padre, por su apoyo incondicional durante los años de mi carrera universitaria, por enseñarme a darle la vuelta a los problemas que trae la vida.

A mis hermanos, Stefano, Giancarlo y Romina por no dejarme caer. Sobre todo, estos últimos dos años. Por estar a mi lado y a mis espaldas. Son mi fuerza más grande, mi motivo para lograrlo todo en la vida (ustedes también, papá y mamá), les dedico mi esfuerzo.

A los muchachos, ellos saben quiénes son, brothers from another mothers, esto también es para ustedes.

A mi compañero en este trabajo, Omar, por soportar mi compañía toda la carrera y por haberse emocionado cuando le hice la propuesta. A Mónica, su prometida, por el apoyo durante la elaboración del trabajo y haberme regalado a Omar sin chistar durante todo este tiempo.

A la profesora, Ing. María Viana, por estar pendiente todo el tiempo de nosotros y nuestro trabajo.

A Beatriz Manrique y Leopoldo Rey, por darme herramientas para vivir.

A Johana Delgado, por escucharme hablar de vigas y columnas todos los días.

A todo ingeniero amante de la hidráulica en todas sus ramas, por llenar de sueños la cabeza de dos muchachos.

Le dedico esto a todos ustedes, son simplemente geniales y les doy las gracias por existir.

*Fernando Gabriele Jesús Ovalles Esposito*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, a nuestro tutor para este trabajo, Juan Carlos Martínez, por ser nuestro padre de la hidrología, por confiar en nosotros en todo momento y darnos la oportunidad de desarrollar este gran tema, por ser un gran maestro y atendernos incluso domingos por la noche. Tus enseñanzas y tu apoyo han sido incondicionales y por eso te damos las gracias.

Al profesor Ahmed Irazábal por ser nuestro padre de la hidráulica, por enseñarnos tanto, por ofrecernos su guía de clases de post grado para estudiar las bases de nuestro trabajo.

Agradecimientos especiales a la Ingeniero Ximena O. Mariño E, Jefe de División de Operación de Embalses del Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas, por su apoyo total con nosotros dentro de la oficina de Coordinación de Embalses en el Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas, de verdad gracias, muchas de las cosas que hicimos fueron posibles por ti.

A Kenny Guevara, encargado de la operación del embalse Cumaripa, y a Carlos González, por presentarnos en la División de Gestión Ecosocialista de Agua y por ser nuestros guías durante la visita de campo en el embalse, gracias por su amabilidad y atención.

A Juan Álvarez, técnico jefe encargado de los embalses en el estado Yaracuy, por contestarnos todas las dudas que teníamos sobre la operación del embalse, por su amabilidad y atención con nosotros.

A Wilmer Becerra, consultor ambiental, por ayudarnos a conseguir e interpretar la información de la geología que se encuentra en la cuenca de Cumaripa.

Atentamente,

Juresa y Ovalles.

## ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Alcance y limitaciones.....	3
1.3.1 Alcance.....	3
1.3.2 Limitaciones.....	3
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo general.....	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Erosión.....	4
2.1.1 Erosión natural.....	4
2.1.2 Erosión inducida.....	5
2.2 Concentración de sedimento.....	5
2.3 Carga total de sedimento.....	6
2.4 Producción de sedimentos.....	6
2.4.1 Ecuación Universal de Perdida de Suelos Modificada (MUSLE).....	7
a) Volumen de escurrimiento superficial $Q$ .....	7
b) Gasto máximo del hidrograma $q_p$ .....	7
c) Factor de erodabilidad del suelo $K$ .....	8

d) Factor topográfico LS .....	9
e) Factor de cobertura vegetal C .....	10
f) Factor de prácticas de conservación de los suelos P .....	11
g) Aspectos fundamentales de la MUSLE .....	11
2.5 Transporte de material de fondo .....	11
2.5.1 Carga de material de fondo ( <i>bed material load</i> ) .....	12
a) Carga de fondo sobre el lecho ( <i>bed load</i> ) .....	12
b) Métodos de transporte de carga de fondo ( <i>bed load</i> ) .....	13
- Shields (1936) .....	13
- Einstein (1950) .....	15
- Rottner (1959) .....	19
c) Carga suspendida de material de fondo ( <i>suspended bed material load</i> ) .....	20
- Velocidad terminal de caída .....	20
d) Métodos de transporte de carga suspendida de material de fondo ( <i>suspended bed material load</i> ) .....	20
e) Carga total de material fondo ( <i>bed material load</i> ) .....	24
f) Métodos de transporte de carga total de material de fondo ( <i>bed material load</i> ) .....	24
- Einstein (1950) .....	24
- Laursen (1958) .....	24
- Graf (1968) .....	25
- Engelund y Hansen (1972) .....	26

- Ackers y White (1973) .....	26
- Yang (1979).....	28
- Karim (1998) .....	29
2.6 Carga media anual total de sedimento .....	29
2.7 Eficiencia de atrape de los sedimentos .....	30
2.8 Variación del peso unitario seco .....	31
2.9 Curva de elevación-área-capacidad .....	32
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO .....	33
3.1 Tipo de investigación.....	33
3.2 Delineación de la investigación .....	33
3.3 Selección del embalse a ser objeto de estudio .....	33
3.4 Fisiografía de la cuenca del río Yaracuy hasta el embalse de Cumaripa.....	34
3.5 Características generales de la presa Ing. Francisco C. Amelinck .....	35
3.6 Características generales del embalse de Cumaripa .....	37
3.6.1 Obra de toma .....	38
3.6.2 Aliviadero.....	38
3.7 Información recopilada.....	41
3.7.1 Climatológica .....	41
3.7.2 Cartográfica.....	42
3.7.3 Estudios batimétricos .....	42
3.8 Parametrización de subcuencas.....	45

3.9 Estimación de láminas de lluvias extremas .....	46
3.10 Hietograma de lluvia Incremental.....	46
3.11 Instrumentación del modelo hidrológico .....	47
3.12 Producción de sedimentos .....	47
3.13 Transporte de carga de material de fondo ( <i>bed material load</i> ).....	48
3.13.1 Visita de campo.....	48
3.13.2 Selección del sitio de toma de material de lecho .....	48
3.13.3 Estudio granulométrico del material de lecho.....	49
3.14 Carga media anual total de sedimentos.....	49
3.15 Comparación de carga total de sedimentos con valores reportados por batimetrías	49
CAPÍTULO 4: DESARROLLO Y RESULTADOS .....	50
4.1 Mapa de cuenca .....	50
4.2 Análisis de lluvias extremas de diferentes duraciones y distintos periodos de retorno	50
4.3 Hietogramas de lluvias totales .....	51
4.4 Distribución espacial de la lluvia en la cuenca .....	53
4.5 Parametrización de subcuencas.....	55
4.6 Valores del número de curva por subcuenca .....	60
4.7 Modelado hidrológico utilizando el HEC-HMS .....	62
4.8 Hidrogramas de crecidas.....	64
4.9 Producción de sedimentos .....	67

4.9.1 Caudales pico, volúmenes de escurrimiento superficial y rendimientos medios anuales líquidos .....	67
4.9.2 Factor de erodabilidad de los suelos K.....	70
4.9.3 Factor de cobertura vegetal C.....	71
4.9.4 Factor topográfico LS.....	71
4.9.5 Factor de prácticas de conservación de suelos P.....	73
4.9.6 Resultado de la producción de la cuenca utilizando la ecuación referenciada por Simons y Şentürk (1992) .....	73
4.10 Transporte de material de fondo ( <i>bed material load</i> ) .....	76
4.10.1 Visita de campo.....	76
4.10.2 Selección del sitio de toma de material de lecho .....	76
4.10.3 Estudio granulométrico .....	77
4.10.4 Modelo hidráulico utilizando el HEC-RAS .....	79
a) Coeficientes de rugosidad de Manning .....	79
b) Caudales generados por las crecidas .....	80
c) Resultados obtenidos con el HEC-RAS .....	81
d) Resultado del cálculo del transporte del material de fondo.....	81
4.11 Carga de sedimentos de acuerdo a batimetrías .....	83
4.11.1 Peso unitario seco.....	83
4.11.2 Eficiencia de atrape del embalse .....	85
4.12.3 Resultado de la carga total de sedimentos aportados al embalse .....	86
4.12 Comparación de resultados.....	86

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES .....	88
5.1 Con respecto a la estimación de eventos de crecidas para diferentes frecuencias .....	88
5.2 Con respecto a la carga lavada ( <i>wash load</i> ) .....	88
5.3 Con respecto al transporte de sedimentos ( <i>bed material load</i> ) .....	88
5.4 Con respecto a las batimetrías disponibles .....	89
5.5 Conclusiones generales: .....	89
CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES .....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Cuenca del río Yaracuy hasta embalse Cumaripa.....	2
Figura 2 Proceso de erosión .....	7
Figura 3 Tipos de movimiento en transporte.....	13
Figura 4 Curva elevación-área-capacidad típica .....	32
Figura 5 Fisiografía de la cuenca en sectores cercanos al vaso de almacenamiento.....	35
Figura 6 Presa Ing. Francisco C. Amelinck observada desde la carretera Nirgua-Chivacoa.....	36
Figura 7 Cresta de la presa Ing. Francisco C. Amelinck .....	36
Figura 8 Niveles y volúmenes característicos del embalse .....	37
Figura 9 Entorno donde se encuentra ubicado el aliviadero.....	39
Figura 10 Aliviadero en funcionamiento.....	40
Figura 11 Pozo disipador tipo USBR II.....	40
Figura 12 Zona de levantamiento batimétrico del año 2004 .....	45
Figura 13 Láminas máximas en 24 horas de cada estación para diferentes frecuencias .....	51
Figura 14 Cuenca del río Yaracuy hasta el embalse Cumaripa.....	63
Figura 15 Hidrogramas de crecidas afluentes y descargas por alivio para distintas frecuencias .....	65
Figura 16 Gastos máximos planteados en papel de probabilidades de Gumbel .....	67
Figura 17 Sitio de toma de muestras (mirando hacia aguas arriba).....	76
Figura 18 Esquema de la sección transversal del cauce .....	80
Figura 19 Distribución de sedimentos en un embalse en función de la gestión de sedimentos que se efectúa.....	91

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Factor de erodabilidad K según la textura del suelo.....	8
Tabla 2 Valores para el parámetro m para distintas pendientes .....	10
Tabla 3 Factor de cobertura vegetal C.....	10
Tabla 4 Valores de $Y_0$ y K según Miller y Trask .....	32
Tabla 5 Niveles y volúmenes del embalse Cumaripa en etapa de proyecto.....	37
Tabla 6 Estaciones pluviográficas .....	41
Tabla 7 Estación Central Matilde. Coeficientes de las ecuaciones de lámina de lluvia (mm) contra tiempo (min) para diferentes frecuencias .....	52
Tabla 8 Influencia (%) de cada estación en cada subcuenca.....	53
Tabla 9 Parametrización de cuenca y tiempo de viaje.....	56
Tabla 10 Tiempos de concentración superficial, total, retardo y constante de almacenamiento K.....	58
Tabla 11 Número de curva por subcuenca .....	60
Tabla 12 Gastos picos, volúmenes máximos y descargas por alivio del embalse Cumaripa.....	66
Tabla 13 Caudales pico, volúmenes de escurrimiento superficial y rendimientos medios anuales líquidos .....	69
Tabla 14 valores por subcuenca de los factores de la MUSLE .....	71
Tabla 15 Carga lavada para diferentes eventos de lluvia y valor medio anual para cada subcuenca.....	74
Tabla 16 Fracciones de la muestra y media geométrica.....	79
Tabla 17 Coeficientes de rugosidad de Manning .....	80

Tabla 18 Carga de material de fondo transportada en (t) y carga media anual de transporte .....	83
Tabla 19 Peso unitario seco para 1989 .....	85
Tabla 20 Resultados de carga total anual de sedimento .....	86
Tabla 21 Comparación de resultados de carga total de sedimento con valores reportados por la batimetría de 1989 .....	87
Tabla 22 Comparación de volúmenes depositados con valores reportados por la batimetría de 1989 .....	87

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfico 1 Diagrama de Shields.....	14
Gráfico 2 Curva para cálculo de $R^*$ , según Vanoni-Brooks (1957) .....	16
Gráfico 3 Factor de corrección de la distribución de velocidades $x$ .....	17
Gráfico 4 Factor de corrección de presiones $Y$ .....	17
Gráfico 5 Factor de corrección de efectos viscosos $\xi$ .....	18
Gráfico 6 Relación entre intensidad de corte $\psi^*$ y la intensidad de transporte $\phi^*$ .....	19
Gráfico 7 Integral $I_1$ en el método de Einstein .....	22
Gráfico 8 Integral $I_2$ en el método de Einstein .....	23
Gráfico 9 Función $U^* \omega_i$ en el método de Laursen.....	25
Gráfico 10 Estimación de la capacidad de atrape.....	31
Gráfico 11 Curva de descarga del aliviadero.....	41
Gráfico 12 Curva elevación-área-capacidad de proyecto (1971) .....	42
Gráfico 13 Curva elevación-área-capacidad batimetría (1989).....	43
Gráfico 14 Curva elevación-área-capacidad (2004).....	43
Gráfico 15 Estación Central Matilde. Hietogramas para tormentas con duración de un día.....	52
Gráfico 16 Curvas granulométricas para diferentes muestras .....	77
Gráfico 17 Curva granulométrica utilizada .....	78
Gráfico 18 Gasto sólido en (kg/s) en función del gasto líquido ( $m^3/s$ ) que pasa por la sección principal del río Yaracuy .....	82
Gráfico 19 Registros históricos de movimiento del embalse de Cumaripa cada 5 días.....	84

## NOTACIÓN Y UNIDADES

<b>A<sub>s</sub>:</b>	carga media anual total de sedimentos (t/año).	<b>d<sub>65</sub>:</b>	tamaño de partícula para la cual el 65% del sedimento es más fino que.
<b>C<sub>p</sub>:</b>	Concentración de sedimentos (ppm).	<b>d<sub>i</sub>:</b>	diámetro de la partícula de suelo asociado a una fracción de grano (m).
<b>C<sub>ti</sub>:</b>	concentración total de sedimento para cada partícula de diámetro "d <sub>i</sub> ", expresada en ppm por peso, sin incluir a la carga de lavado.	<b>f(U*/w<sub>i</sub>):</b>	función asociada a la carga en suspensión en el método de Laursen.
<b>C<sub>v</sub>:</b>	concentración total de sedimento por volumen.	<b>F:</b>	factor que depende del diámetro de la partícula de suelo en la velocidad terminal de caída.
<b>C<sub>w</sub>:</b>	concentración total de sedimento por peso.	<b>g:</b>	aceleración de la gravedad (m/s <sup>2</sup> ).
<b>d:</b>	diámetro de la partícula de material de lecho (m).	<b>I<sub>1</sub>:</b>	valor de la integral de Einstein para carga en suspensión.
<b>D:</b>	profundidad media del flujo en el cauce (m).	<b>I<sub>2</sub>:</b>	valor de la integral de Einstein para carga en suspensión.
<b>d<sub>35</sub>:</b>	tamaño de partícula para la cual el 35% del sedimento es más fino que.	<b>PE:</b>	parámetro de transporte total.
<b>d<sub>50</sub>:</b>	tamaño de partícula para la cual el 50% del sedimento es más fino que.	<b>p:</b>	fracción de la muestra.
		<b>q:</b>	gasto unitario líquido (m <sup>3</sup> /s/m).

<b>Q<sub>A</sub></b> : volumen de escorrentía medio anual (m <sup>3</sup> ).	<b>x</b> : factor de corrección de la distribución logarítmica de velocidades.
<b>q<sub>bw</sub></b> : peso de sedimento como carga de fondo por unidad de tiempo y ancho (kg/s/m).	<b>X</b> : tamaño característico de los granos de la mezcla (m).
<b>Q<sub>s</sub></b> : caudal sólido que pasa una sección de un río (kg/s).	<b>Y</b> : factor de corrección de presión en transición suave-rugosa.
<b>qt</b> : carga total de sedimento en peso por unidad de ancho y tiempo (kg/s/m).	<b>Y<sub>T</sub></b> : carga de sedimentos asociada a cada período de retorno "T" (t). Por ejemplo: Y <sub>100</sub> , Y <sub>50</sub> , Y <sub>25</sub> , Y <sub>10</sub> , Y <sub>2,33</sub> .
<b>Q<sub>T</sub></b> : volumen de agua asociado a cada período de retorno "T" (m <sup>3</sup> ). Por ejemplo: Q <sub>100</sub> , Q <sub>50</sub> , Q <sub>25</sub> , Q <sub>10</sub> , Q <sub>2,33</sub> .	<b>Z</b> : exponente de distribución suspendida, determinada con la constante de Karman 0,40 y la velocidad cortante U*.
<b>R</b> : radio hidráulico (m).	<b>β</b> : función logarítmica.
<b>R'</b> : radio hidráulico asociado al grano (m).	<b>βx</b> : función logarítmica.
<b>S</b> : pendiente de la línea de energía en el cauce.	<b>δ</b> : espesor de la subcapa laminar (m).
<b>U*</b> : velocidad cortante (m/s).	<b>Δ</b> : rugosidad aparente del fondo (m).
<b>U'*</b> : velocidad de corte asociada al grano (m/s).	<b>v</b> : viscosidad cinemática del fluido (m <sup>2</sup> /s).
<b>V</b> : velocidad media del flujo (m/s).	<b>ξ</b> : factor de corrección de efectos viscosos.
<b>V<sub>c</sub></b> : velocidad crítica (m/s)	<b>ρ</b> : densidad del agua (kg s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ).
<b>W<sub>a</sub></b> : Peso del agua (kg).	<b>ρ<sub>s</sub></b> : Densidad del sedimento (kg s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ).
<b>W<sub>s</sub></b> : Peso del sedimento (kg).	<b>ρ<sub>s</sub></b> : Densidad del sedimento(kg s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ).

$\tau$ : esfuerzo cortante actuante ( $\text{kg/m}^2$ ).

$\tau_c$ : esfuerzo cortante crítico ( $\text{kg/m}^2$ ).

$\tau_{ci}$ : es el esfuerzo cortante crítico para cada tamaño  $d_i$  calculado según el diagrama de Shields ( $\text{kg/m}^2$ ).

$\Upsilon$ : peso específico del agua ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\Upsilon_s$ : peso específico del suelo o sedimento ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\Phi^*$ : intensidad de transporte para un tamaño de grano individual.

$\Phi_A$ : intensidad de transporte.

$\psi^*$ : intensidad de corte asociada a la fracción de grano.

$\psi'$ : intensidad de corte de una partícula representativa.

$\psi_A$ : parámetro de intensidad de corte.

$\omega$ : velocidad terminal de caída ( $\text{m/s}$ ).

$\omega_i$ : velocidad terminal de caída para partículas de diámetro con tamaño " $d_i$ " ( $\text{m/s}$ ).

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

En la etapa de diseño de una presa de embalse es necesario determinar entre otros aspectos, el volumen de sedimentos que se irán depositando en el vaso a medida que transcurra el tiempo, ya que ello es relevante para elegir la cota mínima a partir de la que se ubicará la obra de toma, a los efectos de prevenir problemas durante la operación y explotación del reservorio.

Debido a su ubicación geográfica, en Venezuela, se presentan dos temporadas relativamente bien marcadas usualmente denominadas verano e invierno; por lo que se tienen aproximadamente seis meses de lluvia al año, durante los que se incrementan los procesos de erosión del suelo y transporte de sedimentos. La predicción de la erosión y de la cantidad de sedimentos que se producen en una cuenca es fundamental para cuantificar la intensidad de los procesos erosivos, medir los efectos resultantes de la acción del hombre y evaluar el resultado de la aplicación de acciones de control y protección.

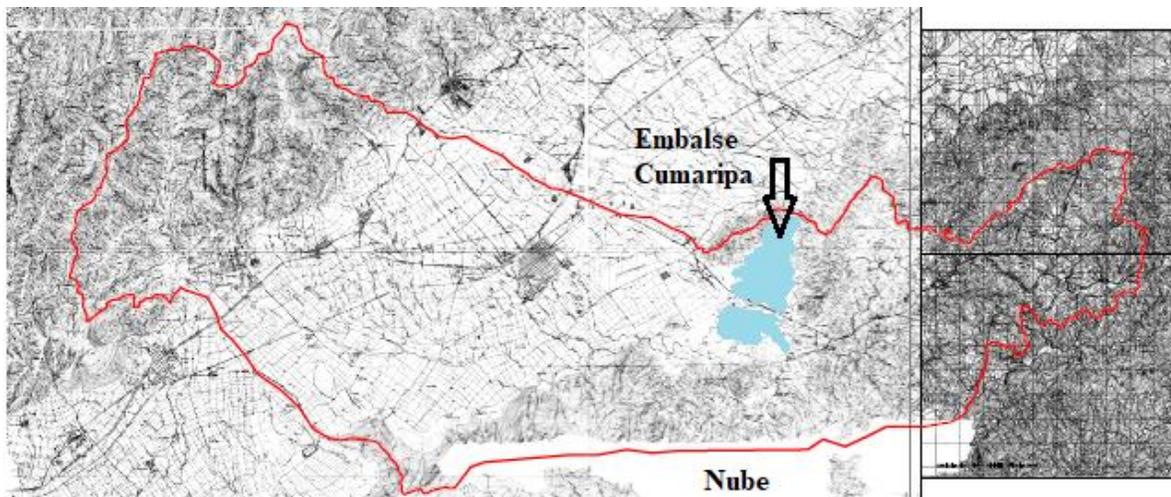
Sin embargo, se entiende que los procesos de erosión y movimientos del suelo son complejos, por lo tanto, es esperable que la predicción de la producción de sedimentos también lo sea. Las pérdidas económicas y los efectos ambientales de la erosión han motivado al desarrollo de procedimientos de medición in situ y modelos de predicción de pérdidas de suelo cada vez más sofisticados.

En el presente Trabajo Especial de Grado (TEG), a efectos de simular el proceso de producción de sedimento en cuencas, se utilizará la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) en su forma modificada (MUSLE), la cual arroja resultados de carga lavada, según la propuesta de Williams y Berndt (1975).

A efectos de estimar la capacidad de transporte de sedimento que posee un cauce dado, existen diferentes metodologías, algunas capaces de discernir entre la cantidad de sedimento que es transportado en suspensión, de la cantidad transportada por el fondo, mientras que, otros métodos, reportan valores totales (carga en suspensión más carga de fondo). En ambos enfoques la fuente del material es la misma: material propio del cauce (*bed material*). Los métodos que se utilizaron en este TEG son los siguientes: Shields (1936), Einstein (1950), Laursen (1958), Rottner (1959), Graf et al (1968), Engelund y Hansen (1972), Ackers y White (1973), Yang (1979) y Karim (1998).

La suma de lo aportado por la cuenca, que recibe el nombre de carga de lavado (*wash load*), con la carga de material de fondo (*bed material load*) resulta en la carga total de sedimento (*sediment yield*) aportado hasta un sitio dado, como puede ser un embalse.

Para el embalse de Cumaripa, seleccionado como parte de los alcances del presente estudio, se estimó la carga total de sedimento aportada por la cuenca del río Yaracuy, y esta fue objeto de comparación con los volúmenes de sedimento retenidos en el vaso, entre batimetrías consecutivas. En la Figura 1, se muestra una imagen cartográfica fuera de escala, con la línea divisoria de cuenca hasta el embalse de Cumaripa a modo de referencia:



**Figura 1** Cuenca del río Yaracuy hasta embalse Cumaripa  
Fuente: Elaboración propia

## 1.2 Antecedentes

Londoño. F y Zapata. S (2013) desarrollaron como trabajo de grado la “Variabilidad espacial de los sedimentos en la cuenca del embalse La Fe”. Se concluyó que, en el embalse durante los últimos 4 años, la producción de sedimentos fue de 62.940 toneladas y en la zona más crítica de 160 ton/ha/año mediante el uso de la ecuación MUSLE.

Martínez. A , Conesa. C , García. R y Pérez.P (2014), realizaron el siguiente trabajo especial de grado, “Estimación de aportes sedimentarios a embalses de pequeñas cuencas mediante GeoWEPP” El cual demostró ser un buen instrumento para estimar la producción de sedimentos, que resultan ser inferiores a la tasa estimada mediante las ecuaciones de la USLE y RUSLE.

Estos trabajos fueron ambos realizados en España.

## 1.3 Alcance y limitaciones

### 1.3.1 Alcance

- Estimar la carga total de sedimento hasta un sitio de embalse y compararla con los volúmenes retenidos según resultados de batimetrías.

### 1.3.2 Limitaciones

- Carencia de registros de gastos líquidos y de concentración de sedimento en suspensión. Debe señalarse que desde hace muchos años las labores de aforos en ríos venezolanos son inexistentes con la excepción de las cuencas de los ríos Caroní, Caura, y otras estudiados por la antigua Edelca.
- Insuficiencia de batimetrías y las disponibles, frecuentemente no reportan la granulometría de los depósitos de sedimento.
- Carencia de información topográfica detallada o de secciones transversales en el cauce del río Yaracuy.
- No disponibilidad del estudio hidrológico de crecidas.
- No disponibilidad de la memoria descriptiva del proyecto original.
- Carencia de mapas de distribución de suelos según sus texturas en la cuenca, así como investigaciones pertinentes a los suelos de la zona.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Comparar los volúmenes de sedimento retenidos en un embalse en servicio, con valores estimados mediante la adición de la carga de lavado y la asociada a material de fondo.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Estimación de eventos de crecidas con frecuencias de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años.
- Estimación de la carga lavada (*wash load*) con la MUSLE.
- Estimación de la capacidad de transporte de material de fondo (*bed material*) con diferentes ecuaciones hidráulicas.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se encontrará al principio la teoría de erosión, a forma de ejemplificar cómo se forman los sedimentos y de dónde vienen. Luego serán explicados los procesos de producción y transporte de sedimentos en una cuenca, en conjunto con los métodos encontrados en diversas literaturas, para calcular dichos procesos. Presentamos la ecuación de Simons y Sentürk que sirve para ponderar los procesos de producción y transporte, y obtener la producción media anual de sedimentos. Por último, el proceso de la variación del peso unitario de los sedimentos depositados y la curva de elevación-área-capacidad para comprender mejor el concepto de batimetría.

### 2.1 Erosión

Es un proceso mecánico de desgaste en la corteza terrestre, donde los factores climatológicos como viento, agua, y temperatura, actuando como elementos independientes o combinados en dicho proceso abrasivo, rompen las partículas de suelo, generando sedimentos que podrían ser movilizados hacia cotas inferiores. La lluvia, origina un proceso de desgaste cuando cae sobre la superficie de suelo, donde los granos de suelo son desprendidos y arrastrados por el agua. Efecto similar lo constituye el viento, el cual dependiendo de su velocidad suspende granos de arena, arcillas, limos y si son vientos muy fuertes, tamaños más grandes de suelo, que actúan en forma abrasiva por el impacto sobre superficies rocosas. De igual forma, actúan las corrientes de agua en las partículas de suelo en suspensión, cuyo impacto sucesivo con las bancas en el cauce, actúan como elementos abrasivos. La fuente de sedimentos producidos por el proceso de erosión, puede ser natural o inducida.

#### 2.1.1 Erosión natural

Es producto de los procesos físicos y químicos en los suelos de la cuenca, y, en cursos de agua, debido al constante movimiento de esta en contacto con el fondo del cauce y sus bancas.

- **Erosión hídrica**

Según Ellison (1947), ésta comprende tres fases:

- Separación: disgregación de las partículas de suelo propensas a ser transportadas.
- Transporte: movimiento, arrastre de las partículas sobre el suelo según el relieve y, arrastre de partículas de suelo dentro del cauce de los ríos, deslizándose, rodando, saltando o en suspensión.

- **Sedimentación:** depósito de partículas al reducirse la capacidad de transporte del agente causante: agua o viento. Las partículas depositadas podrán ser movidas nuevamente en otro evento.

En la erosión hídrica los factores que causan los procesos indicados están asociados a las formas como el agua puede afectar al terreno:

- **Precipitación:** rompe y disgrega el material de la superficie.
- **Agua en la masa de suelo o roca:** reduce la resistencia del suelo, lava y disuelve materiales y acelera el proceso erosivo y puede conducir al colapso de la masa de suelo.
- **Agua en movimiento sobre la superficie del suelo:** el escurrimiento superficial, produce esfuerzo cortante sobre el terreno, el cual desprende y arrastra a las partículas de suelo.

Es de importancia acotar que la lluvia es más erosiva que el escurrimiento superficial, es decir, la erosión por salpicadura es de mayor magnitud a la erosión por arrastre.

### **2.1.2 Erosión inducida**

Puede entenderse como un proceso “no natural” o como el “incremento de la tasa natural de erosión”, que ocurre en un suelo al someterlo a cambios en su condición física como puede ser su uso, cobertura, relieve, entre otros, haciéndolo más vulnerable. La erosión inducida es acelerada, produce deterioro ambiental significativo y sus efectos se manifiestan en ambientes, incluso remotos, al punto de ocurrencia.

### **2.2 Concentración de sedimento**

La concentración de sedimento es la relación entre el peso seco de sedimento y peso total de la mezcla fluida. Dicha relación se puede establecer mediante varias propiedades, como lo son volumen, peso, gravedad específica y entre otras.

La concentración  $C_V$  de sedimentos, expresada en relación de volúmenes se plantea en la siguiente ecuación:

$$C_V = \frac{V_s}{V_s + V_a} \quad \text{Ec. 1}$$

La concentración ( $C_w$ ) de sedimentos, expresada en relación de pesos se plantea de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C_w = \frac{W_s}{W_s + W_a} \quad \text{Ec. 2}$$

La concentración en partes por millón se calcula como un millón de veces el peso seco de sedimento sobre el peso de mezcla fluida:

$$C_{ppm} = 10^6 C_w \quad \text{Ec. 3}$$

### 2.3 Carga total de sedimento

Se define como la cantidad total de sedimento que pasa por una sección dada de un cauce. Tan pronto las partículas del suelo son movidas e incorporadas a la masa de agua se genera en el flujo una carga de sedimentos. Estos sedimentos se moverán con el agua, en forma continua, pero en magnitud variable, mientras dure la acción que los moviliza y según el tipo de partícula. Dependiendo de su uso, la carga total de sedimento puede ser dividida de la siguiente manera:

- De acuerdo al mecanismo de movimiento:

Carga total de sedimento = carga de fondo + carga suspendida

- De acuerdo a la posibilidad de realizar mediciones:

Carga total de sedimento = carga medida + carga no medida

- De acuerdo al método de cálculo:

Carga total de sedimento = carga lavada + carga de material de fondo

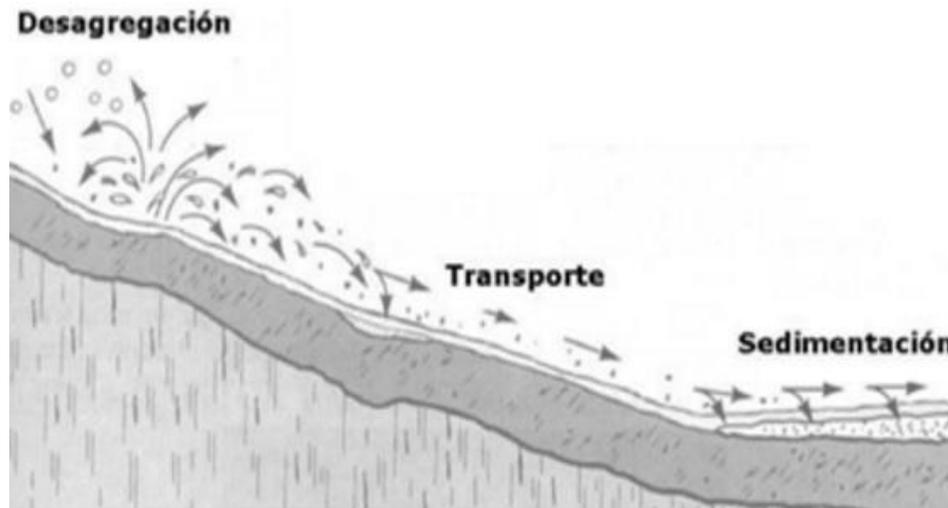
Carga de material de fondo = carga suspendida de material de fondo + carga de fondo

Carga suspendida = carga lavada + carga suspendida de material de fondo

### 2.4 Producción de sedimentos

Después del proceso de erosión en las laderas de la cuenca, se forma un material que eventualmente logra alcanzar el cauce definido de un río o quebrada, a este se le conoce como carga lavada (*wash load*). Además, es la parte de la carga total de sedimentos que está compuesta por tamaños de grano más finos a los que se encuentran en el lecho y está

determinado por el aporte disponible de la cuenca y de las márgenes del cauce, como se puede apreciar en la Figura 2.



**Figura 2 Proceso de erosión**

Fuente: Erosión hídrica: ¿cómo afecta el ambiente?, Aapresid.org.ar

#### **2.4.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada (MUSLE)**

En el presente estudio, se utilizó la ecuación propuesta por Williams y Berndt (1975) para determinar la carga lavada, la cual permite calcular la producción de sedimentos de una cuenca, por la acción de un evento climático de tormenta. La expresión de la MUSLE viene dada por:

$$Y_T = 11,8 (Q q_p)^{0,56} K L S C P \quad \text{Ec.4}$$

Donde, las variables que componen la ecuación serán presentadas y explicadas a continuación.

##### **a) Volumen de escurrimiento superficial Q**

Es el área bajo la curva del hidrograma de crecida, sin tomar en cuenta el flujo base de este.

##### **b) Gasto máximo del hidrograma $q_p$**

Es el gasto pico del hidrograma de crecida.

### c) Factor de erodabilidad del suelo K

El factor de erodabilidad K expresa la susceptibilidad de los suelos a ser erosionados. Se puede interpretar como un índice que integra las propiedades inherentes al suelo, como su resistencia a la erosión, de acuerdo al tipo de suelo, además de otras características físicas y químicas propias de los suelos. Para poder determinar dichas propiedades es fundamental saber el tipo de estructura del suelo, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de suelos finos, actividad biológica en el suelo, cohesión, acción cementante entre partículas, entre otras.

La erodabilidad representa la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosión y se expresa en:  $(\frac{Mg}{ha}) / (Mj \frac{mm}{ha} h)$ .

En la Tabla 1, se presentan los valores de K, en función de la textura de los suelos y la cantidad de materia orgánica que se encuentran en este:

**Tabla 1 Factor de erodabilidad K según la textura del suelo**

Textura (USDA)	Valor estimado de K		
	% de materia orgánica		
	<0,5%	2%	4%
<b>Arena</b>	0,007	0,004	0,003
<b>Arena fina</b>	0,021	0,018	0,013
<b>Arena muy fina</b>	0,055	0,047	0,037
<b>Arena franca</b>	0,016	0,013	0,011
<b>Arena fina franca</b>	0,032	0,026	0,021
<b>Arena muy fina franca</b>	0,058	0,05	0,04
<b>Franco arenoso</b>	0,036	0,032	0,025
<b>Franco arenoso fino</b>	0,046	0,04	0,032
<b>Franco arenoso muy fino</b>	0,062	0,054	0,043
<b>Franco</b>	0,05	0,045	0,038
<b>Limo franco</b>	0,063	0,055	0,043
<b>Limo</b>	0,079	0,068	0,055
<b>Franco areno arcilloso</b>	0,036	0,033	0,028
<b>Franco arcilloso</b>	0,037	0,033	0,028
<b>Franco arcillo limoso</b>	0,049	0,042	0,034
<b>Arcilla arenosa</b>	0,018	0,017	0,016
<b>Arcilla limosa</b>	0,033	0,03	0,025
<b>Arcilla</b>	0,017 a 0,038		

Fuente: Kirkby and Morgan, 1980

#### d) Factor topográfico LS

Expresa la participación en la pérdida de suelo de la inclinación del relieve y la longitud de recorrido de la escorrentía sobre el terreno siguiendo la línea de máxima pendiente. Siendo así la ecuación:

$$LS = LS \quad \text{Ec. 5}$$

Para calcular S se puede usar la relación propuesta por Williams y Berndt, para pendientes menores de 9%:

$$S = \frac{(0,43+0,30s+0,043s^2)}{6,613} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde,

- S: factor de pendiente
- s: pendiente de la ladera o terreno en consideración en %

Para pendientes mayores al 9%, McCool et al (1987) propone el uso de la siguiente expresión:

$$S = 16,8 * Sen(\alpha) - 0,5 \quad \text{Ec.7}$$

Donde,

- $\alpha$ : ángulo de la pendiente en grados

Para calcular L se usa una relación con la parcela “estándar” usada en la MUSLE:

$$L = \left( \frac{l}{22,13} \right)^m \quad \text{Ec.8}$$

Donde,

- L: factor de longitud
- l: longitud de la ladera o terreno en consideración en metros
- m = exponente que varía con la pendiente del terreno, como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2 Valores para el parámetro m para distintas pendientes**

m	Pendiente (%)
0,6	> 10
0,5	10 > S > 5
0,4	5 > S > 3
0,3	3 > S > 1
0,2	< 1

Fuente: Técnicas de control de erosión y socavación, Ing. Ahmed Irazábal

**e) Factor de cobertura vegetal C**

Este factor indica la pérdida de suelo que ocurre para una determinada cobertura vegetal. El valor de C es igual a 1, cuando el suelo está desnudo (no posee cobertura vegetal). Este factor se obtiene de tablas (con valores obtenidos en pruebas o mediciones de campo), y varía según el tipo de vegetación y el grado de cobertura efectiva del suelo. A continuación, se muestra en la Tabla 3, los valores tabulados para el factor de cobertura vegetal, en función al porcentaje de cubrimiento de los suelos y el tipo de cubierta vegetal:

**Tabla 3 Factor de cobertura vegetal C**

Tipo y altura de la cubierta vegetal	Cobertura en contacto con el suelo	Tipo	Porcentaje de cubrimiento del suelo					
			0	20	40	60	80	95-100
Cubierta inapreciable		G	0,45	0,2	0,1	0,042	0,013	0,003
		W	0,45	0,24	0,15	0,09	0,043	0,011
Dosel asociado a maleza altas o bajas (0,50 m)	25	G	0,36	0,17	0,09	0,038	0,012	0,003
		W	0,36	0,2	0,13	0,082	0,041	0,011
	50	G	0,26	0,13	0,07	0,035	0,012	0,003
		W	0,26	0,16	0,11	0,075	0,039	0,011
	75	G	0,17	0,1	0,06	0,031	0,011	0,003
		W	0,17	0,12	0,09	0,067	0,038	0,011
Matorral (2 m)	25	G	0,4	0,18	0,09	0,04	0,013	0,003
		W	0,4	0,22	0,14	0,085	0,042	0,011
	50	G	0,34	0,16	0,085	0,038	0,012	0,003
		W	0,34	0,19	0,08	0,036	0,012	0,003
	75	G	0,28	0,14	0,08	0,036	0,012	0,003
		W	0,28	0,17	0,12	0,077	0,04	0,001
Árboles sin gramíneas (4 m)	25	G	0,42	0,19	0,1	0,041	0,013	0,003
		W	0,42	0,23	0,14	0,087	0,042	0,011
	50	G	0,39	0,18	0,09	0,04	0,013	0,003
		W	0,39	0,21	0,14	0,085	0,042	0,011
	75	G	0,36	0,17	0,09	0,039	0,012	0,003
		W	0,36	0,2	0,13	0,083	0,041	0,011

Fuente: Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de erosión

#### **f) Factor de prácticas de conservación de los suelos P**

El factor P de prácticas de conservación, indica el tipo de manejo que se hace en la cuenca con el objetivo de disminuir el proceso de escurrimiento superficial, incentivando la infiltración de las aguas de lluvia en el suelo con el consecuente resultado de disminuir la cantidad de sedimento que pueda ser transportado ladera abajo. Además, es un factor adimensional y se define como la relación de pérdida de suelo con la práctica de soporte específica a la pérdida de suelo correspondiente con el suelo trabajado en sentido de la pendiente.

#### **g) Aspectos fundamentales de la MUSLE**

- Es la respuesta de los suelos de la cuenca frente a un evento de lluvia.
- A diferencia de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS) La lluvia no interviene en forma directa sino el escurrimiento superficial y el gasto máximo del hidrograma que ella genera.
- Los parámetros de escurrimiento superficial y el gasto máximo del hidrograma, que intervienen en la ecuación, reflejan la energía requerida para la toma de la partícula desde su sitio original, así como para su transporte a través de la red de drenaje.
- A diferencia de la EUPS, la MUSLE no requiere de factor de entrega alguno, sino que reporta la cantidad de material transportado hasta un sitio de interés.
- Los parámetros de escurrimiento superficial y el gasto máximo del hidrograma, que intervienen en la ecuación, reflejan en la energía requerida para la toma de la partícula desde su sitio original, así como para su transporte a través de la red de drenaje.
- Debe señalarse que los coeficientes 11,8 y 0,56 que aparecen en la ecuación de la MUSLE son para unidades métricas. Además, se consideró que estos coeficientes pueden ser usados en este estudio, a pesar de que requiera una calibración con datos disponibles en el embalse para lo cual se requeriría información de la granulometría de los depósitos de sedimento presentes en el embalse.

### **2.5 Transporte de material de fondo**

Se define como el proceso mediante el cual las partículas de sedimento que se encuentran en el lecho del río son movilizadas a través del agua, ya sea de forma suspendida o deslizándose sobre el lecho, debido a que ciertas condiciones generadas por la corriente, por ejemplo, la

velocidad o el esfuerzo cortante, superan las fuerzas que mantienen el estado de equilibrio del grano y empezar a desplazarlo, este proceso es conocido como movimiento incipiente.

Kramer (1935) planteó los siguientes casos:

- **Movimiento débil:** pocas partículas de arenas muy finas se encuentran en movimiento, en cantidades tan pequeñas que pueden ser contadas.
- **Movimiento medio:** partículas de grano medio en movimiento, en un número que no pueden ser contadas, pero dicho movimiento no es lo suficientemente grande como para afectar las configuraciones del fondo.
- **Movimiento general:** corresponde a la condición a la cual los granos de arena de mayor tamaño pueden entrar en movimiento, este movimiento ocurre en todas partes, y en todo momento.

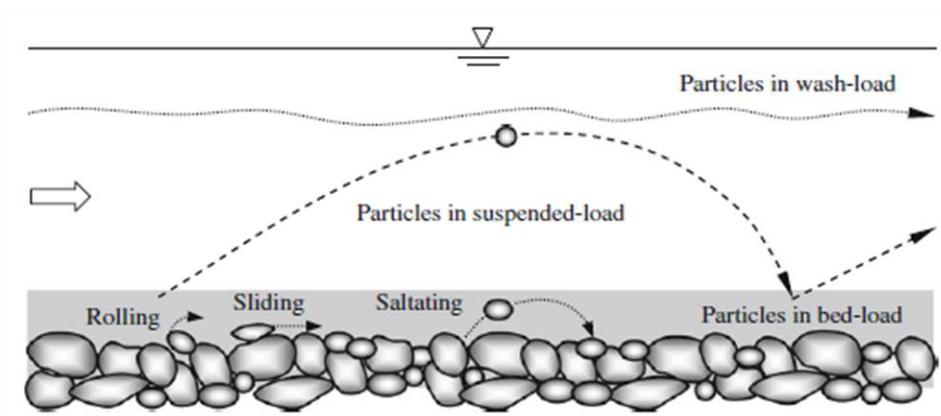
### **2.5.1 Carga de material de fondo (*bed material load*)**

La carga de material de fondo es la tasa total de transporte de aquellas partículas de sedimento que son propias del fondo del cauce. Esta carga puede dividirse en la carga suspendida de material de fondo (*suspended bed material load*) y en la carga de fondo sobre el lecho (*bed load*). El término carga de sedimento es utilizado para indicar la tasa de transporte de partículas sólidas y dimensionalmente puede ser expresada en términos de peso por unidad de tiempo o volumen por unidad de tiempo.

La carga de material de lecho, depende de las características físicas e hidráulicas del cauce y, por tanto, es descrita por ecuaciones de transporte de sedimentos, las cuales serán presentadas más adelante.

#### **a) Carga de fondo sobre el lecho (*bed load*)**

Es la tasa partículas de sedimento en movimiento en el cauce, ya sea rodando (*rolling*), deslizándose (*sliding*), o saltando (*saltation*) sobre el lecho, que es cuando las fuerzas turbulentas del flujo pueden arrancar las partículas del fondo para luego devolverlas a éste y seguir desplazándose de nuevo de cualquiera de las tres formas mencionadas. En la Figura 3, se presenta de forma ilustrativa el movimiento de los granos sobre el lecho, debido a la fuerza ejercida por la corriente sobre estos. Además, se observan partículas en suspensión, que pueden formar parte de las partículas de material de lecho en suspensión y además carga lavada (*wash load*). Los movimientos de partículas en suspensión serán aclarados más adelante en este estudio.



**Figura 3 Tipos de movimiento en transporte**

Fuente: Subhashish Dey, Fluvial Hydrodynamics. Springer (2014)

#### b) Métodos de transporte de carga de fondo (*bed load*)

A continuación, se presentan algunos de los métodos de transporte que se desarrollaron exclusivamente para calcular carga de fondo. Los métodos que se utilizaron en este estudio son el método de Shields (1936), Einstein (1950) y Rottner (1959).

##### - Shields (1936)

Basado en el esfuerzo crítico, la ecuación de Shields permite determinar la carga de material de lecho por unidad de tiempo y ancho (kg/s/m). La ecuación es dimensionalmente homogénea y viene dada por:

$$q_{bw} = 10 \frac{\gamma^2 q S}{(\gamma_s - \gamma)^2 d_{50}} (\tau - \tau_c) \quad \text{Ec.9}$$

Donde,

- ✓  $\gamma$ : peso específico del agua (kg/m<sup>3</sup>).
- ✓  $\gamma_s$ : peso específico del sedimento (kg/m<sup>3</sup>).
- ✓  $q$ : caudal unitario (m<sup>3</sup>/s/m).
- ✓  $S$ : pendiente de la línea de energía
- ✓  $\tau$ : esfuerzo cortante actuante (kg/m<sup>2</sup>).
- ✓  $\tau_c$ : esfuerzo cortante crítico (kg/m<sup>2</sup>).
- ✓  $d_{50}$ : diámetro mediana (m).

Procedimiento de cálculo:

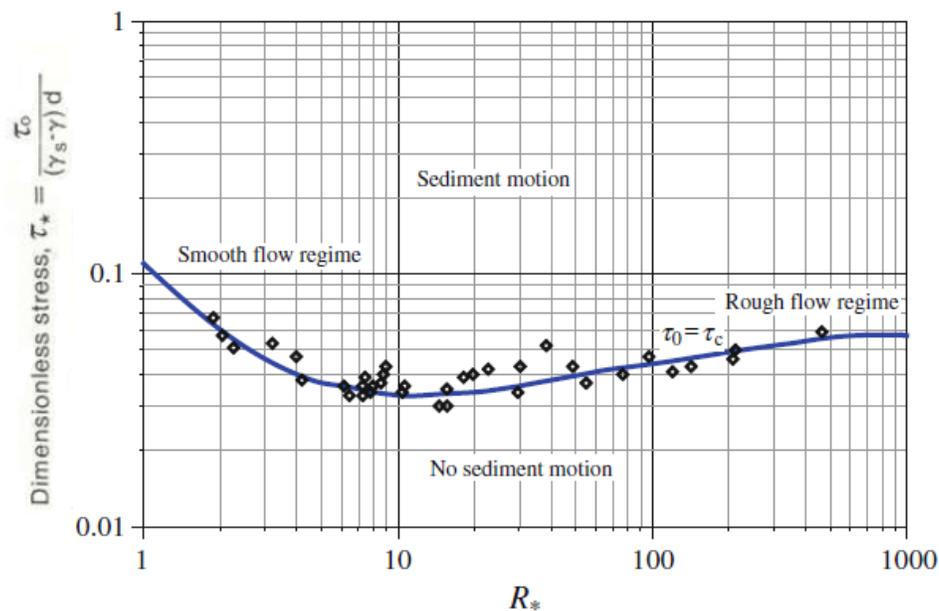
- Se calcula un valor con la desarrollada por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, Vanoni, 1977):

$$\frac{d}{\nu} \sqrt{0,10 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g d} \quad \text{Ec.10}$$

Donde,

- ✓ d: diámetro de la partícula de suelo (m).
  - ✓  $\nu$ : viscosidad del agua ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).
  - ✓ g: aceleración gravitacional ( $\text{m}/\text{s}^2$ ).
- Con el valor anterior se intercepta la curva de condición incipiente mostrada en el Gráfico 1. Y desde allí se lee a la izquierda al esfuerzo cortante adimensional, ese va a ser el  $\tau_*$

**Gráfico 1 Diagrama de Shields**



Fuente: Subhashish Dey, Fluvial Hydrodynamics. Springer (2014)

- Se calcula el valor del esfuerzo cortante crítico  $\tau_c$  a partir de la ecuación de corte adimensional:  $\tau_* = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}}$  Ec.11

- Se calcula el valor del esfuerzo cortante actuante  $\tau$  la ecuación:  $\tau = \gamma R S$  Ec.12, donde R es el radio hidráulico (m).
  - Conocidos los valores q, S y  $d_{50}$ , se utiliza la Ec. 1, para obtener la carga de fondo  $q_{bw}$  (kg/s/m)
- **Einstein (1950)**

Einstein estableció un método de enfoque probabilístico, el cual permite determinar la carga de material de fondo que se transporta sobre el lecho por unidad de ancho y tiempo (kg/s/m). A continuación, se presenta la ecuación que permite el cálculo de la carga de fondo:

$$\phi_* = \frac{q_{bw}}{P_i \gamma_s} \sqrt{\frac{\rho}{(\gamma_s - \gamma) d_i^3}} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde,

- ✓  $\rho$ : densidad del agua ( $\text{kg s}^2/\text{m}^4$ )
- ✓  $P_i$ : fracción de la muestra de suelo (%)
- ✓  $d_i$ : diámetro de la partícula de suelo asociada a una fracción de grano (m)
- ✓  $\phi_*$ : intensidad de la corriente.

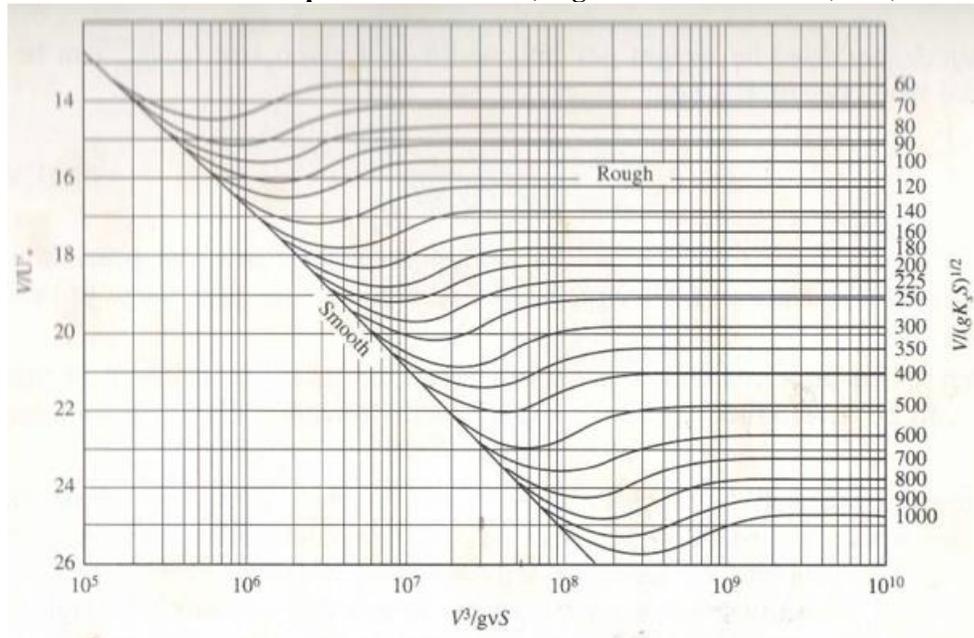
Procedimiento de cálculo:

- Se calculan  $\frac{V^3}{g \nu S}$  y  $\frac{V}{\sqrt{g} d_{65} S}$ , Ecs.15 y 16 respectivamente. Con esos valores se ingresa en Gráfico 2, para obtener la relación entre la velocidad y la velocidad de corte asociada al grano  $\frac{V}{U_*}$ .

Donde,

- ✓ V: velocidad del flujo (m/s).
- ✓  $d_{65}$ : diámetro de la partícula para el cual el 65% de sedimento es más fino que.

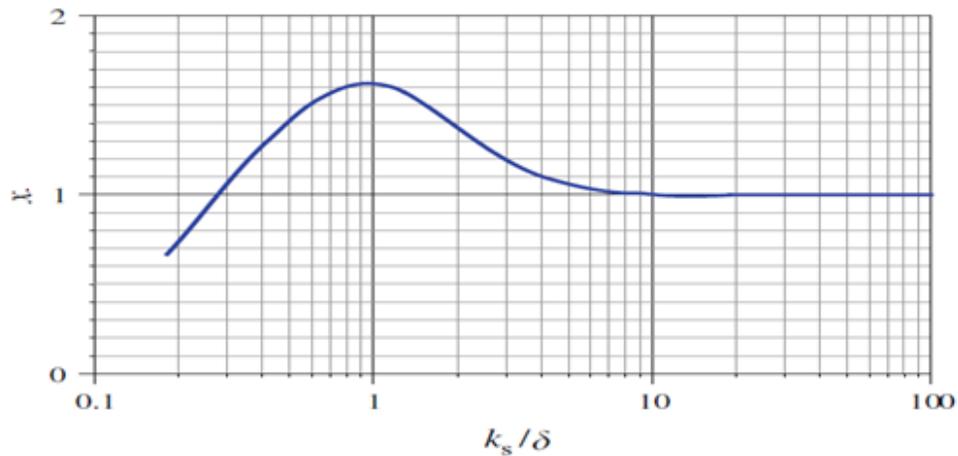
Gráfico 2 Curva para cálculo de R', según Vanoni-Brooks (1957)



Fuente: *Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams*. 1957

- Se calcula R' asociado al grano, utilizando de la fórmula:  $U'_* = \sqrt{g R' S}$  Ec. 17
- Se calcula el espesor de la subcapa laminar (m) según la fórmula:  $\delta = \frac{11,6 \nu}{U'_*}$  Ec. 18
- Se debe obtener el valor de  $\frac{k_s}{\delta}$  Ec.19, luego se ingresa al Gráfico 3 y se obtiene el factor de corrección de la distribución de velocidades x, tomando en cuenta que el valor  $k_s$  para este método es igual a  $d_{65}$ .

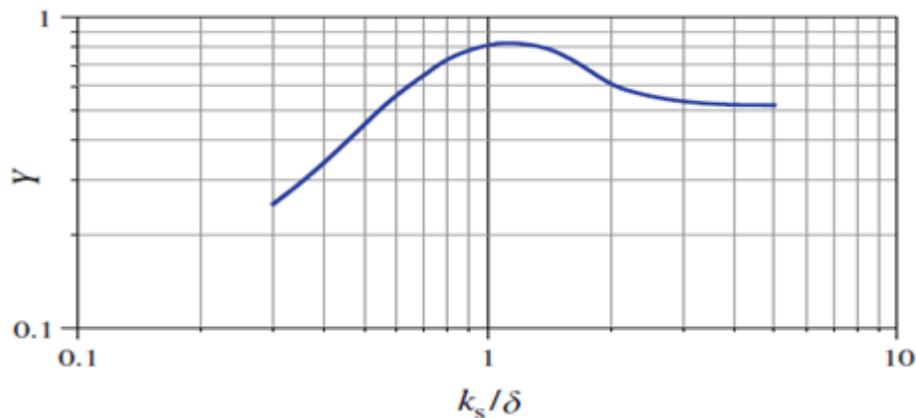
**Gráfico 3 Factor de corrección de la distribución de velocidades x**



Fuente: Subhashish Dey, Fluvial Hydrodynamics. Springer (2014)

- Se calcula la rugosidad aparente del fondo  $\Delta = \frac{d_{65}}{x}$  Ec. 20 expresada en metros, con la cual se ingresa al Gráfico 4 y se obtiene el factor de corrección de presiones Y.

**Gráfico 4 Factor de corrección de presiones Y**



Fuente: Subhashish Dey, Fluvial Hydrodynamics. Springer (2014)

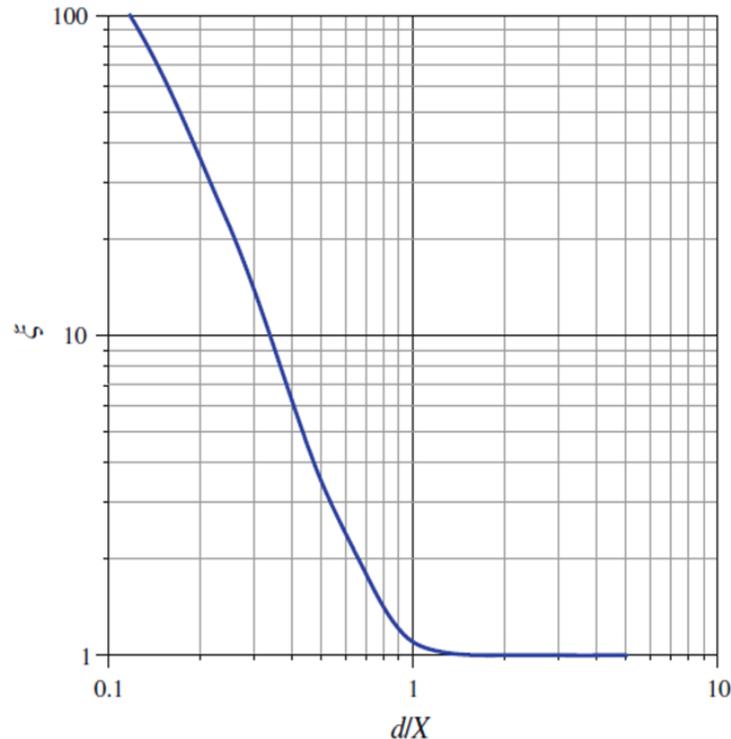
- Posteriormente se realiza el cálculo de  $\frac{\Delta}{\delta}$  Ec. 21, y se hace el análisis correspondiente para obtener el valor de X, el cual representa el tamaño característico de grano de la

$$\text{mezcla (m): } X = \begin{cases} 0,77 \frac{d_{65}}{x} & \text{cuando } \frac{d_{65}}{x \delta} > 1,8 \\ 1,398 \delta & \text{cuando } \frac{d_{65}}{x \delta} < 1,8 \end{cases}$$

Ec. 22 y Ec. 23 respectivamente.

- Teniendo el valor de  $X$  se obtiene en el Gráfico 5 el factor de corrección por el efecto viscoso de las partículas  $\xi$ .

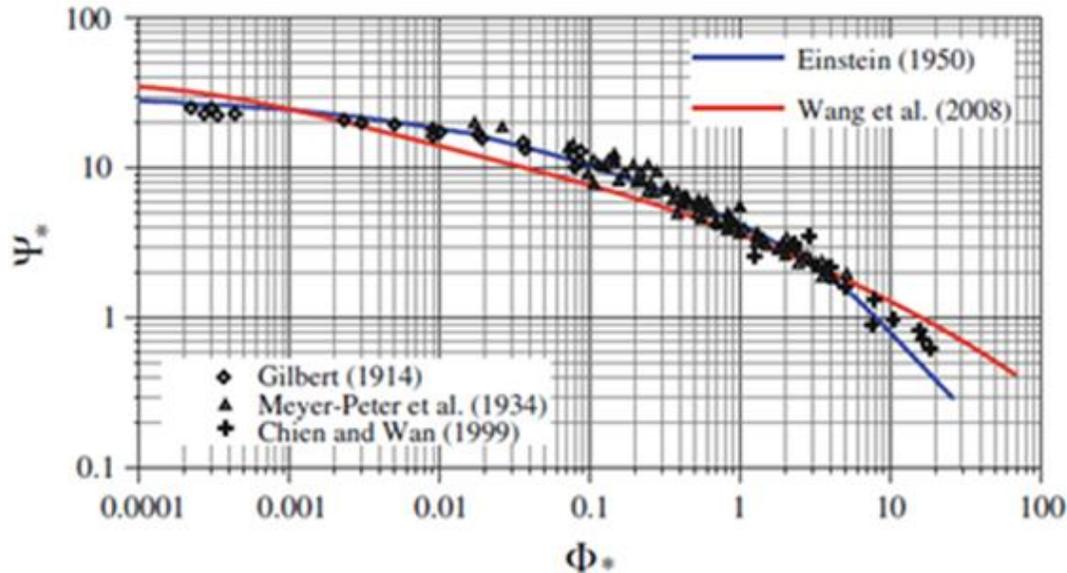
**Gráfico 5 Factor de corrección de efectos viscosos  $\xi$**



Fuente: Subhashish Dey, Fluvial Hydrodynamics. Springer (2014)

- Se calcula el valor de  $\beta_x$  con la fórmula:  $\beta_x = \log \frac{10,6 X}{\Delta}$  Ec.24
- Se obtiene el valor de  $\left(\frac{\beta}{\beta_x}\right)$ , sabiendo que:  $\beta = \log(10.6)$  Ec.25
- Se calcula  $\psi'$  para cada fracción de material de fondo:  $\psi' = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d}{R' S}$  Ec.26
- Se calcula  $\psi_*$  para cada fracción de material de fondo:  $\psi_* = \xi Y \left(\frac{\beta}{\beta_x}\right)^2 \psi'$  Ec.27
- Con el valor  $\psi_*$ , se ingresa en el Gráfico 6 y se obtiene el valor de  $\phi_*$
- Con el valor  $\phi_*$ , se utiliza la Ec. 13 deducida por Einstein, y se obtiene el valor de  $q_{bw}$ .

**Gráfico 6 Relación entre intensidad de corte  $\psi_*$  y la intensidad de transporte  $\phi_*$**



Fuente: Subhashish Dey, Fluvial Hydrodynamics. Springer (2014)

- **Rottner (1959)**

Rottner determinó una ecuación para calcular la carga de fondo en términos de parámetros de flujo basados en consideraciones dimensionales y coeficientes de regresión. Usando información recopilada por Johnson (1943), Rottner aplicó un análisis de regresión para determinar el efecto relativo del parámetro de rugosidad relativa ( $d_{50}/D$ ). La ecuación de Rottner es dimensionalmente homogénea, por lo tanto, se puede usar cualquier sistema consistente de unidades. En su desarrollo, los efectos de forma de lecho y bancas fueron excluidos, y no debería ser usada cuando se muevan pequeñas cantidades de material de fondo. La ecuación es la siguiente:

$$q_{bw} = \gamma_s \left[ \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) g D^3 \right]^{1/2} \left\{ \frac{V}{\sqrt{\left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) g D}} \left[ 0,667 \left( \frac{d_{50}}{D} \right)^{2/3} + 0,14 \right] - 0,778 \left( \frac{d_{50}}{D} \right)^{2/3} \right\}^3 \quad \text{Ec. 28}$$

Donde,

- ✓ D: tirante de agua (m).
- ✓  $q_{bw}$ : carga de sedimentos como carga de fondo por unidad de tiempo y ancho (kg/s/m).

**c) Carga suspendida de material de fondo (*suspended bed material load*)**

Corresponde a la carga de partículas de sedimento propias del material de fondo, que son soportadas de manera permanente por el movimiento turbulento de la corriente. La carga suspendida corresponde a la tasa de partículas de sedimento que se mueven entre el tope de la capa de fondo y la superficie libre del agua. Para poder desarrollar los métodos de transporte que incluyen suspensión de partículas, debe conocerse el concepto de velocidad terminal de caída, ya que esta se correlaciona con el proceso de sedimentación de las partículas suspendidas hacia el lecho.

**- Velocidad terminal de caída**

La velocidad de caída de una partícula, se define como el promedio de las velocidades de caída de una partícula individual de sedimento cayendo en agua destilada en reposo y de extensión infinita, a una temperatura de 24°C. En el presente estudio se calcula mediante la ecuación de Rubey (1933).

Rubey planteo una fórmula para calcular la velocidad de caída de gravas, arenas y limos, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\omega = F \sqrt{d g \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde,

- ✓  $\omega$ : velocidad terminal de caída (m/s)
- ✓ F: factor que depende del tamaño de la partícula.

Para diámetros mayor a 1 mm el valor  $F = 0,79$ , para diámetros menores a 1 mm el valor F se calculó con la siguiente ecuación:

$$F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 v^2}{g d^3 (G_s - 1)}} - \sqrt{\frac{36 v^2}{g d^3 (G_s - 1)}} \quad \text{Ec. 30}$$

**d) Métodos de transporte de carga suspendida de material de fondo (*suspended bed material load*)**

En el presente estudio, se presenta el método desarrollado por Einstein, para transporte de carga de material de fondo que es transportada en suspensión.

Einstein (1950), obtuvo la tasa de transporte de la carga suspendida de material de fondo  $q_{sw}$ , mediante la integración del producto de la concentración de sedimentos y la velocidad del flujo.

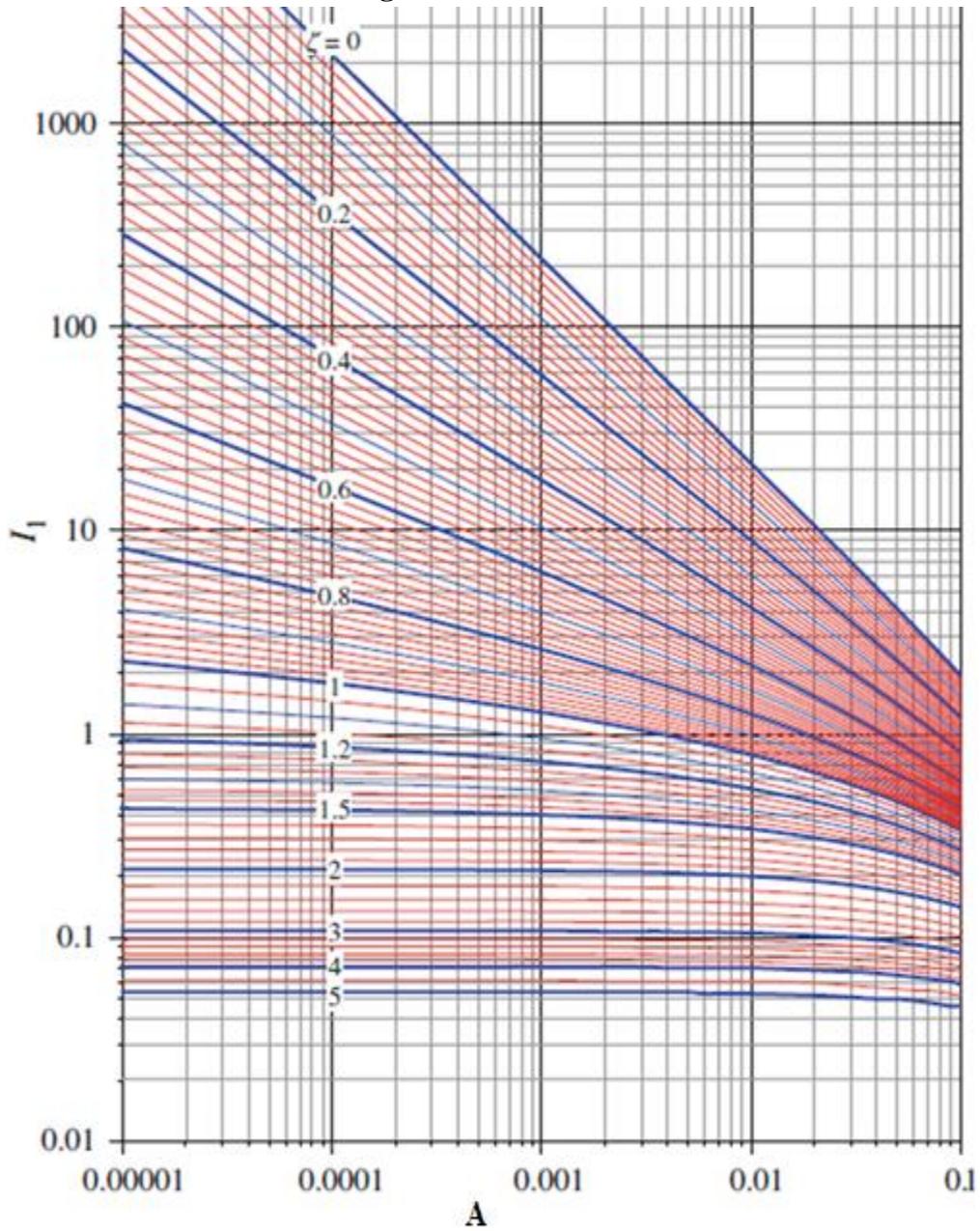
La ecuación planteada por Einstein, asocia el transporte de carga de fondo con el transporte de carga en suspensión de material de fondo para todas las fracciones de tamaño, para las que existe la función de carga de fondo. Los valores de  $I_1$  e  $I_2$ , llamados integrales de Einstein, fueron dados por él mismo de forma gráfica en términos de  $Z$  (exponente de distribución suspendida).

$$q_{sw} = q_{bw} (P_E I_1 + I_2) \text{ Ec.31}$$

Procedimiento de cálculo:

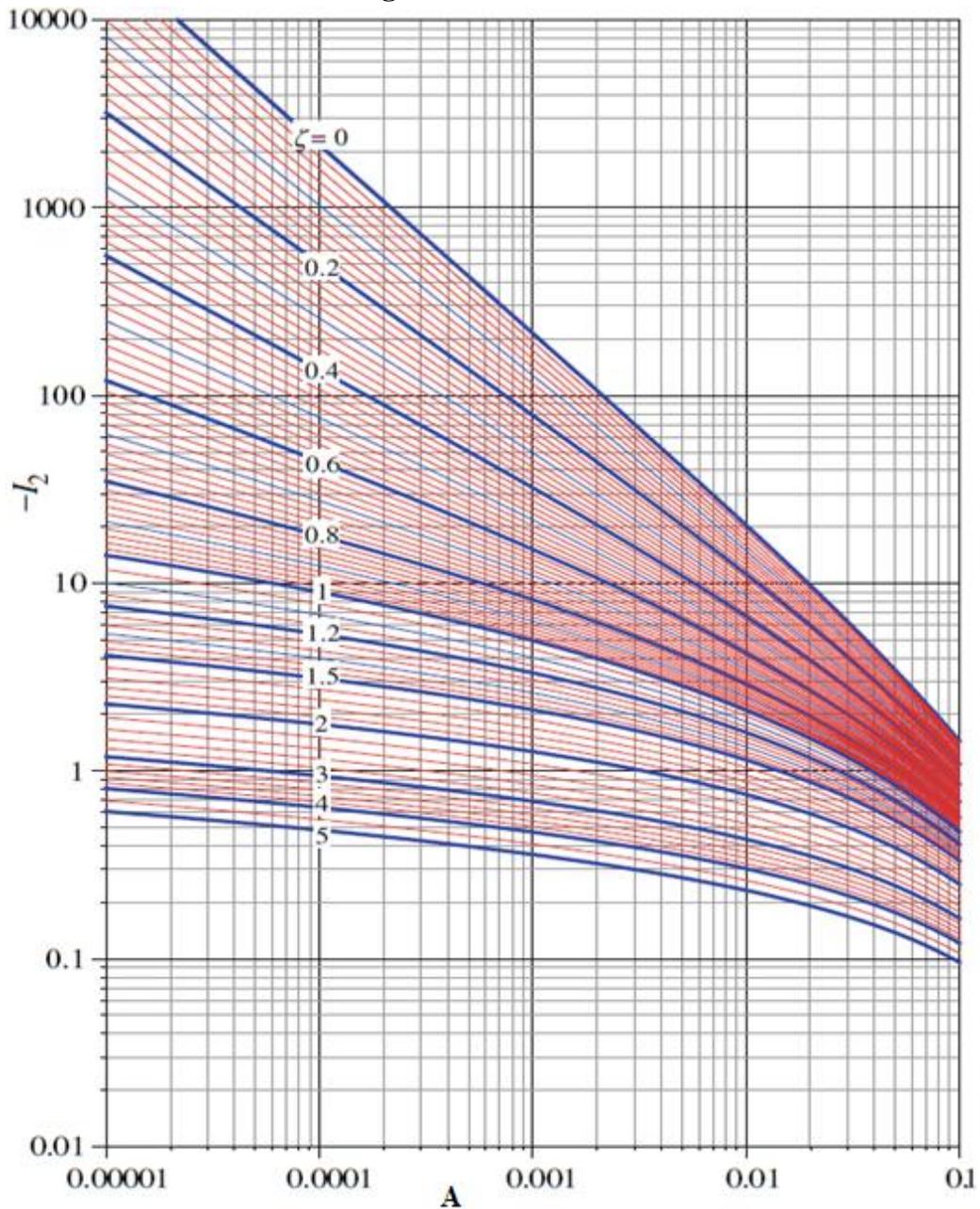
- Se calcula para cada fracción de grano, la velocidad terminal de caída  $\omega$  con la Ec. 29, formulada por Rubey.
- Conocido el valor de la profundidad  $D$ , se calcula para cada fracción de grano el parámetro:  $A = \frac{2d}{D}$  Ec.32
- Se calcula para cada fracción de grano el término asociado al exponente de distribución suspendida  $Z$ , usando la ecuación mostrada, donde  $U'_*$  se obtuvo en el método de Einstein para carga de fondo:  $Z = \frac{w_i}{0,40 U'_*}$  Ec.33
- Con los valores obtenidos de  $A$  y  $Z$  se utilizan los Gráficos 7 y 8, para obtener los valores de  $I_1$  e  $I_2$ .
- Se calcula el parámetro de transporte total  $PE$ , donde:  $P_E = 2,303 \log \frac{30,2 D}{\Delta}$  Ec. 34
- Se calcula la descarga de sedimentos de material de fondo  $q_{sw}$  en suspensión usando la Ec. 31, deducida por Einstein.

Gráfico 7 Integral  $I_1$  en el método de Einstein



Fuente: Subhashish Dey, Fluvial Hydrodynamics. Springer (2014)

Gráfico 8 Integral  $I_2$  en el método de Einstein



Fuente: Subhashish Dey, Fluvial Hydrodynamics. Springer (2014)

**e) Carga total de material fondo (*bed material load*)**

Como se indicó, la carga de material de fondo es la tasa total de transporte de aquellas partículas de sedimento que son propias del fondo del cauce.

El movimiento de esas partículas se encuentra asociado a las condiciones del flujo y al material de lecho. De esta manera esa carga se calcula a partir de ecuaciones de transporte de sedimento.

**f) Métodos de transporte de carga total de material de fondo (*bed material load*)**

A continuación, se presentan algunos de los métodos de transporte que se desarrollaron para carga total de fondo. Los métodos que se utilizaron en este estudio son el método de Einstein (1950), Laursen (1958)

**- Einstein (1950)**

La descarga de material de fondo en el presente método se expresa como la suma de carga de fondo (*bed load*) y carga en suspensión de material de fondo (*suspended bed material load*), de los métodos previamente descritos en el presente estudio.

**- Laursen (1958)**

Laursen planteó una ecuación que permite calcular la concentración total de sedimentos expresada en peso por unidad de volumen en un cauce para cada diámetro de partícula  $d_i$ , y fue expresada de manera dimensionalmente homogénea en la forma desarrollada por la ASCE (1971):

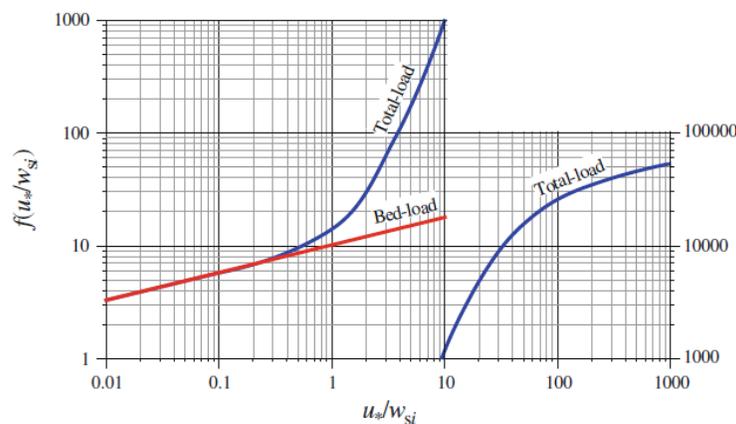
$$C_t = 0,01 \gamma \sum_i p_i \left(\frac{d_i}{D}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_c} - 1\right) f\left(\frac{U_*}{\omega}\right) \quad \text{Ec. 35}$$

El parámetro  $\tau'/\tau_c - 1$  es importante en la estimación de la carga de fondo mientras que el parámetro  $U_*/\omega$  se asocia con la carga en suspensión. La relación funcional  $f(U_*/\omega)$  es mostrada en el Gráfico 9.

Procedimiento de cálculo:

- El esfuerzo cortante asociado a la rugosidad de grano  $\tau'$  fue deducido por Laursen a partir de las ecuaciones de Manning y Strickler:  $\tau' = \frac{\rho V^2}{58} \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{1/3}$  Ec. 36
- El esfuerzo cortante crítico  $\tau_c$  puede determinarse con el diagrama de Shields (Gráfico 1), de acuerdo al método de Shields.
- Se calcula la velocidad de corte  $U_* = \sqrt{g R S}$  Ec.37
- Se calcula para cada fracción de grano la velocidad terminal de caída  $\omega$  con la Ec. 29, determinada por Rubey.
- Se calcula la relación  $U^*/\omega_i$  y con los valores obtenidos se entra en el Gráfico 9, y se obtiene la relación funcional  $f(U^*/\omega_i)$ .
- Se calcula  $C_t$  con la ecuación propuesta por Laursen.
- Se calcula el  $Q_s$  (kg/s) como el producto de  $Q_s = C_t Q_l$  Ec.38, siendo  $Q_l$ : el gasto líquido.

**Gráfico 9 Función  $(U^*/\omega_i)$  en el método de Laursen**



Fuente: Subhashish Dey, Fluvial Hydrodynamics. Springer (2014)

#### - Graf (1968)

Graf, propuso un modelo que ha sido exitosamente verificado para determinar el transporte total de sedimentos, tanto en canales abiertos como en conductos cerrados. Las variables

dependientes del flujo fueron agrupadas en un parámetro  $\Psi_A$ , denominado parámetro de intensidad de corte y en base a los criterios de potencia disponibles, dedujeron un parámetro  $\Phi_A$ , denominado parámetro de transporte en función de  $\Psi_A$ , y de la ecuación se obtiene el resultado de la concentración volumétrica de sedimentos.

Procedimiento de cálculo:

- Conocidos los valores de R y S, se calcula el parámetro:  $\psi_A = \frac{(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}) d_{50}}{R S}$  Ec.39
  - Se calcula el parámetro  $\Phi_A$ , mediante la siguiente fórmula:  $\Phi_A = 10,39 \psi_A^{-2,52}$  Ec.40
  - Se despeja la concentración en términos de volumen por medio de la ecuación propuesta por Graf:  $\Phi_A = \frac{C_v V R}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_{50}^3}}$  Ec.41
  - Se aplica la ecuación Ec.1, para determinar la carga de sedimento en ( $m^3/s/m$ ).
- **Engelund y Hansen (1972)**

Basados en el criterio de la potencia de la corriente, Engelund y Hansen permiten determinar la carga total de material de fondo en peso por unidad de ancho y tiempo ( $kg/s/m$ ), para partículas mayores que 0,15 mm. Luego de la simplificación de las ecuaciones planteadas en el trabajo original de Engelund y Hansen, se presenta la expresión que sirvió de herramienta de cálculo en el presente estudio:

$$q_t = 0,05 \gamma_s V^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s - 1}{\gamma}\right)}} \left[ \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right]^{3/2} \text{ Ec.42}$$

- **Ackers y White (1973)**

Ackers y White utilizaron análisis adimensionales para estudiar la movilidad y tasas de transporte de sedimento en función de algunos parámetros adimensionales. Ellos postularon que solo una parte del esfuerzo cortante actuante en el fondo del cauce es responsable del movimiento de las partículas más grandes mientras que en el caso de las partículas finas, la carga en suspensión predomina y que el esfuerzo cortante actuante es efectivo causando el movimiento del sedimento.

Ellos expresaron además el tamaño de los sedimentos mediante un diámetro adimensional:

$$d_{gr} = d_{50} \left[ \frac{g \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}{v^2} \right]^{1/3} \quad \text{Ec.43}$$

El número de movilidad del sedimento es:

$$F_{gr} = U_*^n \left[ g d_{50} \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \right]^{-1/2} \left[ \frac{v}{\sqrt{32} \log(\alpha D / d_{50})} \right]^{1-\eta} \quad \text{Ec.44}$$

A partir de las ecuaciones anteriores propusieron una función adimensional para transporte de sedimento:

$$G_{gr} = \frac{C_w D}{d_{50} \gamma_s / \gamma} \left( \frac{U_*}{v} \right)^n \quad \text{Ec.45}$$

La función generalizada adimensional puede expresarse también de la siguiente manera:

$$G_{gr} = C \left( \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad \text{Ec.46}$$

Los valores de A, C, m y n fueron determinados por Ackers y White (1973) basados en los mejores ajustes de curva en ensayos de laboratorio para partículas con tamaño mayor a los 0,04 mm y número de Froude menores que 0,80.

El procedimiento para utilizar las mejores relaciones se resume a continuación:

Para la zona en transición con  $1 < d_{gr} \leq 60$ :

$$n = 1,00 - 0,56 \log d_{gr} \quad \text{Ec.47}$$

$$A = 0,23 d_{gr}^{-1/2} + 0,14 \quad \text{Ec.48}$$

$$m = \frac{9,66}{d_{gr}} + 1,34 \quad \text{Ec.49}$$

$$\log C = 2,86 \log d_{gr} - (\log d_{gr})^2 - 3,53 \quad \text{Ec.50}$$

Para sedimento grueso con  $d_{gr} > 60$ :

$$n = 0,00 \quad m = 1,50$$

$$A = 0,17 \quad C = 0,025$$

Procedimiento de cálculo:

- Se calcula el valor de  $d_{gr}$ , con la Ec.43, a partir de los valores de  $d_{50}$ ,  $g$ ,  $\gamma_s/\gamma$  y  $\nu$ .
- Se calculan los valores de  $n$ ,  $A$ ,  $m$  y  $C$ , según sea el caso, asociados con el valor derivado de  $d_{gr}$ .
- Se calcula el valor de la movilidad de la partícula  $F_{gr}$ , con la Ec.44.
- Se determina el valor de  $G_{gr}$  con la Ec.46 el cual representa una aproximación gráfica de la nueva función de transporte.
- Se convierte  $G_{gr}$  con la Ec. 48, a la concentración de sedimentos  $C_w$ , y se multiplica por el caudal que pasa por el lecho para obtener el caudal sólido que fluye por una sección.
- Se determina  $Q_s$  con la Ec.2

- **Yang (1979)**

Yang, basa su estudio en la potencia unitaria de la corriente de manera de obtener una ecuación para el transporte, en la cual, se da el resultado de la concentración total de sedimento (expresada en ppm por peso) sin incluir a la carga de lavado, la ecuación desarrollada por Yang para un material de lecho arenoso, es la siguiente:

$$\log C_p = 5,165 - 0,153 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0,297 \log \frac{U_*}{\omega} + \left(1,780 - 0,360 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0,480 \log \frac{U_*}{\omega}\right) \log \left(\frac{VS}{\omega}\right) \quad \text{Ec.51}$$

Procedimiento de cálculo:

- Para cada fracción de grano, se calcula la velocidad terminal de caída  $\omega$  con la Ec. 27, determinada por Rubey.
- Se determina la velocidad de corte  $U_*$  con la Ec. 37.
- Se calcula para cada fracción de grano, la concentración  $C_p$  con la Ec.50.
- La concentración total para un material no uniforme se calculará como:

$$C_t = \sum_i^N p_i C_p \quad \text{Ec.52}$$

- Donde  $N$  corresponde al número de fracciones en la que se divide al material de fondo,  $p_i$  es el porcentaje de cada fracción de material.

- **Karim (1998)**

El método de Karim – Kennedy permite determinar la carga total de material de fondo por unidad de peso, ancho y tiempo (kg/s/m). Para efectos del presente estudio se desarrolló el cálculo con las ecuaciones planteadas por el mismo Karim en 1998, la cual tiene la siguiente expresión:

$$\frac{q_t}{\sqrt{gRd_{50}^3}} = Pi \ 0,00139 \left( \frac{v}{\sqrt{gRd_{50}}} \right)^{2,97} \left( \frac{U_*}{\omega_i} \right)^{1,47} \quad \text{Ec.53}$$

Procedimiento de cálculo:

- Se calcula para cada fracción de grano la velocidad terminal de caída  $\omega_i$  con la ecuación de Rubey.
- Se calcula la velocidad de corte  $U^*$  con la Ec.37.
- Se calcula la carga total de material de fondo  $q_t$  para cada fracción.

## 2.6 Carga media anual total de sedimento

Para determinar la carga media anual de sedimento, se utiliza la ecuación explicada en el libro “*Sediment Transport Technology, Daryl B. Simons, Fuat Şentürk 1992*”, expresada de la siguiente manera:

$$A_s = \frac{Q_A (0,01 Y_{100} + 0,01 Y_{50} + 0,02 Y_{25} + 0,06 Y_{10} + 0,33 Y_{2,33})}{0,01 Q_{100} + 0,01 Q_{50} + 0,02 Q_{25} + 0,06 Q_{10} + 0,33 Q_{2,33}} \quad \text{Ec.54}$$

Donde,

- ✓  $A_s$ : carga media anual total de sedimentos (t/año).
- ✓  $Q_A$ : rendimiento anual del embalse ( $m^3$ /año).
- ✓  $Q_T$ : volumen de agua para cada período de retorno ( $m^3$ ).
- ✓  $Y_T$ : carga de sedimentos para cada período de retorno ( $m^3$ ).

La ecuación descrita por Simons y Şentürk, permite ponderar los resultados de la producción y transporte de sedimentos en una cuenca. La carga lavada (*wash load*) y la carga total de material de fondo (*bed material load*), obtenidas para las distintas frecuencias de 2,33, 10, 25, 50 y 100 años, son ponderadas de acuerdo a su probabilidad de ocurrencia incremental, permitiendo obtener, una carga asociada a una tormenta promedio ponderada.

Para la producción de sedimentos, la carga media anual se obtiene multiplicando la carga lavada ponderada por la relación del volumen medio anual escurrido sobre la esorrentía de ocurrencia incremental ponderada para los eventos de crecida considerados.

De forma similar, para el transporte de material de fondo, la carga media anual se obtiene multiplicando la carga total de material de lecho ponderada por la relación del volumen medio anual sobre el volumen generado por los hidrogramas de crecidas de ocurrencia incremental, que fluye únicamente sobre el lecho, es decir, despreciando el porcentaje de volumen de inundación que queda en las bancas y las planicies.

Por último, se puede obtener la carga media anual total de sedimento, mediante la adición de la carga media anual derivada de la producción y el transporte de sedimentos, obtenidas con la Ec. 53.

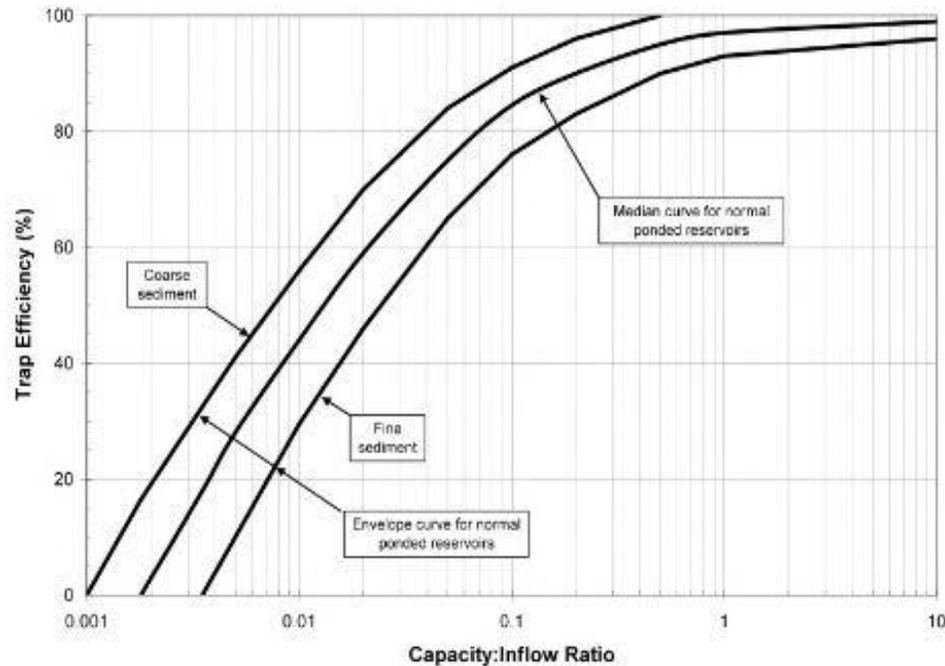
## **2.7 Eficiencia de atrape de los sedimentos**

La eficiencia de atrape de los sedimentos, principalmente en suspensión, depende del tipo de operación del embalse y del tiempo de permanencia de las aguas. Si el embalse es de regulación interanual, la permanencia será suficientemente larga, para que la eficiencia de captación sea del 100 %. Para determinar la eficiencia de atrape de los sedimentos en el presente estudio se utilizó el método de Brune.

Brune (1953), elaboró las curvas mostradas en el Gráfico 10, el cual permite estimar la eficiencia de atrape del embalse. Es de importancia hacer notar que el gráfico es válido para embalses convencionales, tipo lago, en los que el agua permanece almacenada por periodos largos y los niveles varían poco y lentamente. Además, se puede acotar que la envolvente superior del grafico corresponde a sedimentos gruesos y la inferior a sedimentos finos.

Para entrar al Gráfico 10 utilizando el eje de las abscisas, se debe calcular la relación de la capacidad útil del embalse, entre el volumen medio anual de aporte al embalse.

Gráfico 10 Estimación de la capacidad de atrape



Fuente: Brune, GM 1953

## 2.8 Variación del peso unitario seco

Las densidades de las mezclas de sedimentos se obtienen al extraer muestras en embalses. Como la composición granulométrica, química y física varía con el tiempo, estos valores también lo harán. Debe tenerse en cuenta que los sedimentos que entran al embalse, se van depositando y consolidando con el transcurrir de los años, y esto implica que el valor del peso unitario seco de los sedimentos aumenta conforme a los años que se mantienen depositados en este. Se puede obtener el peso unitario seco ( $\text{kg/m}^3$ ) luego de un período de tiempo, utilizando la fórmula de Miller y Trask:

$$Y_{SE} = Y_0 + 0,4343 K \left[ \frac{t}{t-1} (\ln t) - 1 \right] \quad \text{Ec.55}$$

Donde  $t$  representa los años transcurridos entre dos batimetrías,  $K$  una constante que depende del tipo de operación del embalse y  $Y_0$  peso unitario seco inicial ( $\text{kg/m}^3$ ).

En la Tabla 4, se muestran los valores de  $K$  y  $Y_0$  determinados por Miller y Trask, los cuales se ven alterados debido a la operación del embalse, donde puede ocurrir diferentes escenarios,

como: el sedimento está sumergido o casi sumergido, el embalse sufre desecaciones de normales a moderadas, el embalse sufre desecaciones frecuentes y el embalse se encuentra generalmente vacío.

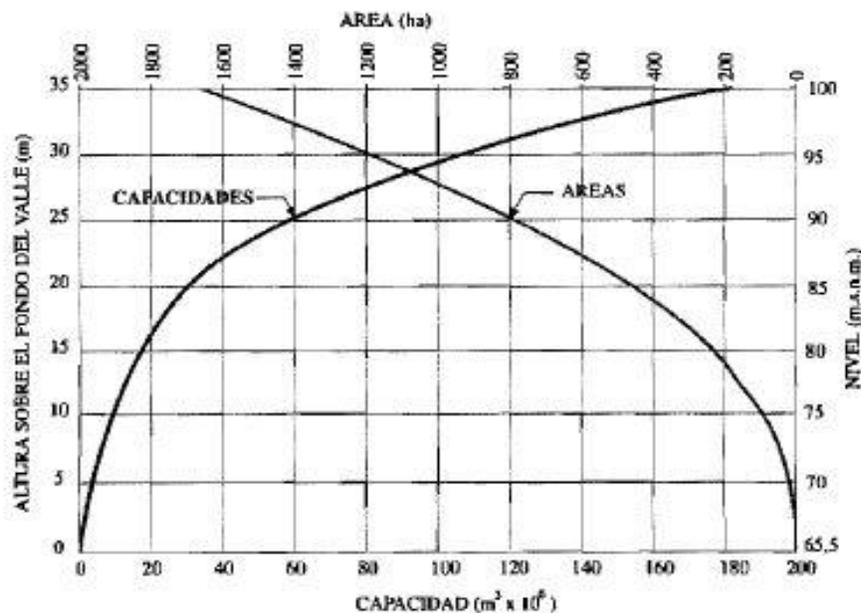
**Tabla 4 Valores de  $\Upsilon_0$  y  $K$  según Miller y Trask**

Tipo de operación de embalse		Arena		Limo		Arcilla	
		$\Upsilon_0$ (kh/m <sup>3</sup> )	$K_s$	$\Upsilon_0$ (kh/m <sup>3</sup> )	$K_m$	$\Upsilon_0$ (kh/m <sup>3</sup> )	$K_c$
1	Sedimentos siempre sumergidos o casi sumergidos	1550	0	1120	91	415	256
2	Embalse sufre desecaciones normales a moderadas	1550	0	1140	29	561	135
3	Embalse sufre desecaciones frecuentes	1550	0	1150	0	641	0
4	Embalse generalmente vacío	1550	0	1170	0	961	0

Fuente: Diseño de presas pequeñas, Bureau of Reclamation (1987)

## 2.9 Curva de elevación-área-capacidad

En el balance de un embalse, es indispensable conocer la variación de las áreas inundadas y de los volúmenes disponibles en función de los niveles de agua. Normalmente se resume dicho análisis en la curva de elevación-área-capacidad, cuya forma se asemeja a la de la Figura 4; la cual es la representación gráfica de las elevaciones sobre el valle del río contra las áreas y capacidades disponibles.



**Figura 4 Curva elevación-área-capacidad típica**

Fuente: J J Bolinaga

## CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

### 3.1 Tipo de investigación

Este Trabajo Especial de Grado, de acuerdo con lo expresado en el “Manual de Tesis de Grado, Especialización, Maestría y Tesis Doctorales de la Universidad Pedagógica Libertador” (2003), se enmarcó dentro de un proyecto factible, ya que a través de la investigación documental y de campo, planteamiento teórico, procedimiento metodológico, actividades y recursos necesarios, se logró identificar, analizar y caracterizar los factores hidrológicos e hidráulicos del embalse, permitiendo conocer la situación actual de la cuenca.

### 3.2 Delineación de la investigación

Este estudio se delimita a la selección de un embalse a ser objeto de estudio, la estimación de crecidas para distintas frecuencias, la estimación de la carga lavada para distintos períodos de retorno con la MUSLE y cargas totales asociadas a material de fondo con distintas ecuaciones de transporte de sedimentos, la estimación de pesos unitarios secos con el método de Miller y Trask y la comparación de los volúmenes retenidos en el embalse con los estimados con los métodos antes indicados.

### 3.3 Selección del embalse a ser objeto de estudio

Los factores que se consideraron para la selección del embalse a estudiar fue que se tuviera un mínimo de información de disponibilidad de archivos de operación de embalse para varios años, disponibilidad de información batimétrica para generar curvas elevación-área-capacidad del embalse, información sobre los suelos y vegetación de la cuenca, dado que el presente TEG requería del análisis comparativo con los volúmenes obtenidos a través de las batimetrías, por otro lado, de forma ideal se consideró la cercanía a la ciudad de Caracas y la accesibilidad al embalse.

En primera instancia, ya con la información que se recabó el Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas (MINEA), se pensó en seleccionar el embalse Dos Cerritos en la cuenca del río Tocuyo, el cual posee cuatro batimetrías, pero la ubicación era desfavorable al estar en el estado Lara. Se contempló la posibilidad del embalse de Agua Fría ubicado en El Jarillo, estado Miranda, por información suministrada por el MINEA; el sitio fue rechazado por la alta inseguridad de la zona. Luego, se discutió la posibilidad del embalse de Guataparo, ubicado en Valencia, el cual posee dos batimetrías, pero la información de operación del embalse la maneja HIDROVEN, donde se le solicitó formalmente a la

presidenta de HIDROVEN con una carta firmada por el rector de la UCAB, José Virtuoso, la información de operación de embalse, pero se rechazó la solicitud de forma verbal. Por último, por ser el embalse que disponía de más información (tres batimetrías disponibles) y fácil acceso al tramo aguas arriba del cauce para la toma de muestras de suelo, se seleccionó el embalse de Cumaripa, ubicado en el estado Yaracuy.

Se solicitó al MINEA, específicamente en la “Coordinación de Operación de Embalses”, y a otras entidades, la información básica que se presenta en la lista a continuación:

- Registros disponibles de operación de embalse (niveles, volúmenes diarios almacenados y entregas para acueductos, riego, ecológicos, alivios, entre otros.)
- Mapas cartográficos de la cuenca, disponibles en el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB).
- Ubicación de las estaciones pluviográficas (Guarabao, Urachiche, Central Matilde, Campo Elías, Los Cogollos), en las oficinas del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).
- Registros de lluvias medias y máximas de las estaciones antes mencionadas en las oficinas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH).
- Estudio de vegetación y suelos, suministrada por el Departamento de Unidad de Suelos del MINEA.

### **3.4 Fisiografía de la cuenca del río Yaracuy hasta el embalse de Cumaripa**

La cuenca del río Yaracuy, se encuentra localizada en la parte central del estado Yaracuy, con un área aproximada de 435 km<sup>2</sup> hasta la presa Ing. Francisco C. Amelinck, la cual genera el embalse de Cumaripa.

Las elevaciones más altas en la cuenca alcanzan los 1.300 msnm, en áreas de muy difícil acceso debido a lo abrupto de la topografía y la densa vegetación. En las zonas inmediatamente vecinas al embalse la topografía predominante corresponde con áreas planas pertenecientes al valle del río Yaracuy, con presencia de colinas, bosques húmedos tropicales y pastizales como se puede ver en la siguiente figura:



**Figura 5 Fisiografía de la cuenca en sectores cercanos al vaso de almacenamiento**

Fuente: Elaboración propia (2017)

El embalse de Cumaripa está ubicado en condiciones de clima tropical lluvioso de sabana. El período lluvioso para la región se inicia en el mes de abril y se prolonga hasta octubre, siendo agosto el de mayor precipitación, ascendiendo la lluvia media anual a 1.450 mm. La temperatura media anual es 25,4°C.

El embalse de Cumaripa tiene como principales tributarios al río Yaracuy y al río Sarare, además de otros ríos tributarios al río Yaracuy como el Urachiche, Quebrada la Virgen, Yamaro, los Zanjones Mata Caballo, Beliza, Infierno, Morrocoyal, Quebrada los Reyes, Quebrada Cocorotico, entre otros.

### **3.5 Características generales de la presa Ing. Francisco C. Amelinck**

La presa Ing. Francisco C. Amelinck se encuentra en el sitio denominado “El Voladero”, situado 4 km aguas abajo del puente Cumaripa (que forma parte de la carretera Chivacoa-Nirgua y que permite el tránsito sobre el embalse). Es de importancia saber, que la presa que forma el embalse de Cumaripa, se construyó entre los años 1967 y 1971, y en este último año inició su operación. En la Figura 6 se puede observar la presa desde la carretera Nirgua-Chivacoa.



**Figura 6 Presa Ing. Francisco C. Amelinck observada desde la carretera Nirgua-Chivacoa**  
Fuente: Elaboración propia

La presa es de tipo zonificada de tierra con espaldones  $2\frac{1}{2}:1$  aguas arriba y  $2:1$  aguas abajo, con una cresta de 8,00 m de ancho y 187 m de longitud, el ancho en el fondo del cañón es de 120 m, la cota de la cresta está ubicada a 207,5 msnm y posee un volumen total de tierra de  $400.000 \text{ m}^3$ . La presa esta provista de un dentellón de 15 metros de ancho en la base y 20 metros de profundidad máxima medidos a partir de la línea de excavación. La altura máxima del terraplén es de 29,00 metros medidos desde el fondo del río y unos 45 metros desde el fondo del dentellón. Se puede apreciar en la Figura 7 la presencia de vegetación sobre el cuerpo de la presa.

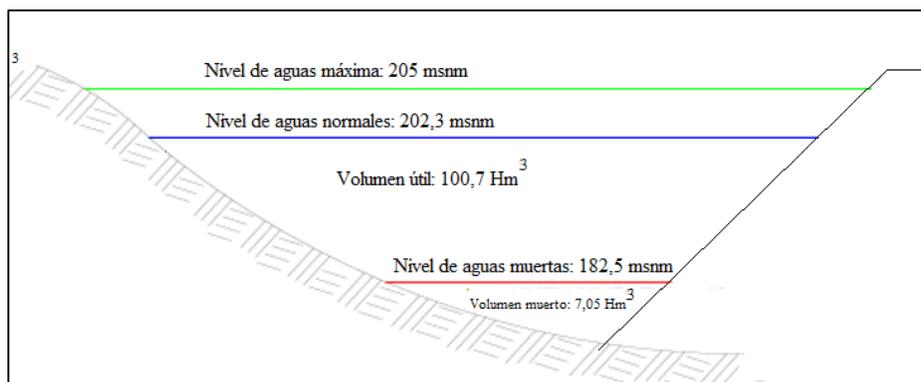


**Figura 7 Cresta de la presa Ing. Francisco C. Amelinck**  
Fuente: Elaboración propia

### 3.6 Características generales del embalse de Cumaripa

El embalse de Cumaripa tenía como propósito principal, en la etapa de proyecto, el control de inundaciones del alto Yaracuy, el riego de 10.600 ha, el control de sedimentos y recreación. En la actualidad, mediados de 2017, el embalse tiene como finalidad el abastecer a una población promedio de 390.000 personas distribuidas en los municipios San Felipe, Independencia, La Trinidad, Sucre, Arístides Bastidas, Cocorote, además de cumplir con el gasto ecológico aguas abajo de la presa habiéndose suprimido el aporte de agua para riego.

A continuación, en la Figura 8 se presentan los valores de niveles y volúmenes característicos del embalse Cumaripa y en la Tabla 5 se indican los niveles y volúmenes de la etapa de proyecto.



**Figura 8 Niveles y volúmenes característicos del embalse**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5 Niveles y volúmenes del embalse Cumaripa en etapa de proyecto**

Niveles y volúmenes		Año
		1971
Nivel de fondo del río	(msnm)	178,30
Nivel mínimo de operación	(msnm)	187,00
Nivel de aguas muertas	(msnm)	182,50
Nivel de aguas normales	(msnm)	202,30
Nivel de Aguas máximas	(msnm)	205,00
Volumen muerto calculado	(Hm <sup>3</sup> )	7,05
Volumen a nivel de aguas normales	(Hm <sup>3</sup> )	107,75
Volumen a nivel de aguas máximas	(Hm <sup>3</sup> )	147,00

Fuente: Elaboración propia. Datos suministrados por el MINEA

De acuerdo a los cálculos realizados en la etapa de proyecto se estimó un volumen de aporte de sedimento de  $7,05 \text{ Hm}^3$  durante la vida útil del proyecto la cual se estableció en 100 años. El referido volumen, equivale a un gasto sólido anual de  $70.500 \text{ m}^3$  y un módulo de  $162 \text{ m}^3/\text{año}/\text{km}^2$ . Los valores indicados consideran el atrape de la totalidad de la carga sólida por el embalse.

### **3.6.1 Obra de toma**

La obra de toma del embalse es de tipo sumergida y se ubica en el estribo izquierdo de la presa Francisco Amelinck, cruzando su eje bajo el del aliviadero mediante un túnel. La obra de toma regula un gasto constante de 530 lps y consta de las siguientes partes:

- Estructura de rejillas de sección rectangular.
- Un túnel de 270 metros de longitud con 2 tipos de sección, sección circular sencilla de 2,70 metros de diámetro entre el portal de entrada y la chimenea de control, y sección doble circular de 1.80 metros de diámetro entre la chimenea de control y el portal de salida.
- Una estructura de control, en la cual están ubicados los mecanismos de emergencia y servicio para control del gasto en la toma.
- Un tramo corto de conducto circular doble de 1.80 metros de diámetro con bifurcación, entre el portal de salida y los disipadores de energía.
- El sistema de control de válvulas se ubica en el estribo izquierdo, en la casa de máquinas instalada al lado del aliviadero, y dispone de cuatro válvulas, dos para suministro de agua a la población tomando en cuenta la de emergencia, y dos para el control del gasto ecológico. Cabe destacar que la válvula que suministra a la población, se encuentra 100% abierta por problemas mecánicos.

### **3.6.2 Aliviadero**

El aliviadero está ubicado hacia el estribo izquierdo de la presa, tiene un ancho constante de 20 metros, una longitud de 108 metros y un gasto de diseño de  $190 \text{ m}^3/\text{s}$ , la carga sobre la cresta está diseñada para 2,70m y la cota de la cresta tiene una elevación de 202,3 msnm.

El aliviadero está formado por:

- Un canal de aproximación de sección trapezoidal, excavado en roca con taludes  $\frac{1}{2}: 1$  y 50 metros de longitud.
- Una sección de control de perfil Ogee, la cual tiene 20 m de ancho. La sección de control se une al canal de acceso mediante muros que forman una transición cilíndrica de directriz circular y generatrices verticales.
- La descarga se efectúa a través de un rápido de 75 metros de longitud y 20 metros de ancho.
- Un pozo disipador del tipo U.S.B.R. II de 33 metros de longitud.
- Transición de salida enrocada en contrapendiente 6:1 y canal de descarga hasta el río.

En las siguientes figuras se puede apreciar el entorno donde está ubicado el aliviadero, una imagen de éste operando y a modo ilustrativo, se muestra el Gráfico 11, donde se observa la curva de descarga del aliviadero.



**Figura 9 Entorno donde se encuentra ubicado el aliviadero**



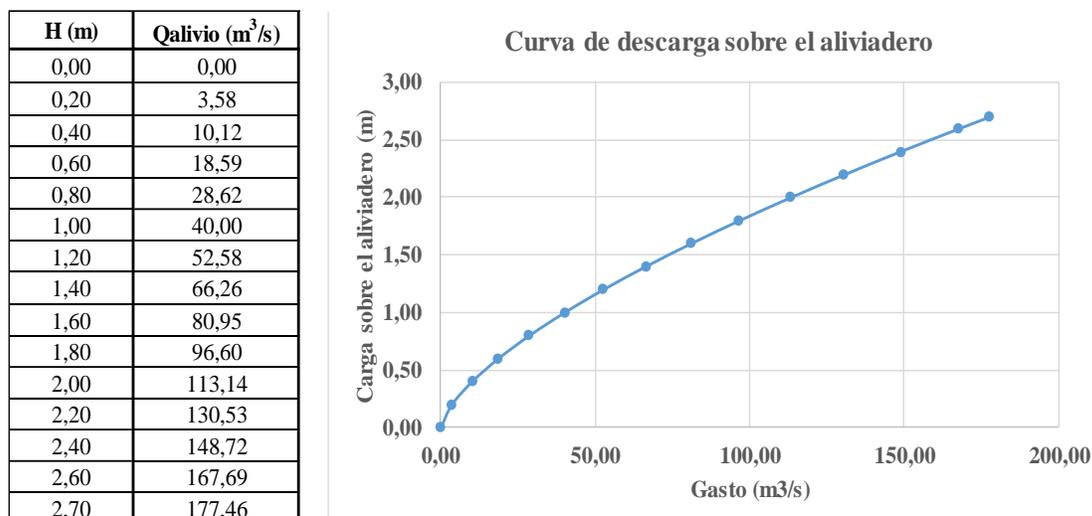
**Figura 10 Aliviadero en funcionamiento**



**Figura 11 Pozo disipador tipo USBR II**

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 11 Curva de descarga del aliviadero**



Fuente: Elaboración propia.

### 3.7 Información recopilada

#### 3.7.1 Climatológica

En el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), se recabó información referente a lluvias en la cuenca, en el periodo comprendido entre los años 1962 – 1999. El nombre de las estaciones utilizadas en el presente estudio y la ubicación de cada una se presentan en la Tabla 6:

**Tabla 6 Estaciones pluviográficas**

Estación pluviográfica	Serial	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Guarabao	1354	10°14'54"	68°48'11"	260
Campo Elías	1362	10°13'17"	68°54'34"	460
Urachiche	1371	10°08'48"	68°00'39"	435
Central Matilde	1381	10°08'39"	68°52'11"	235
Los Cogollos	6357	10°09'19"	68°41'38"	590

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recabados en el INAMEH

### 3.7.2 Cartográfica

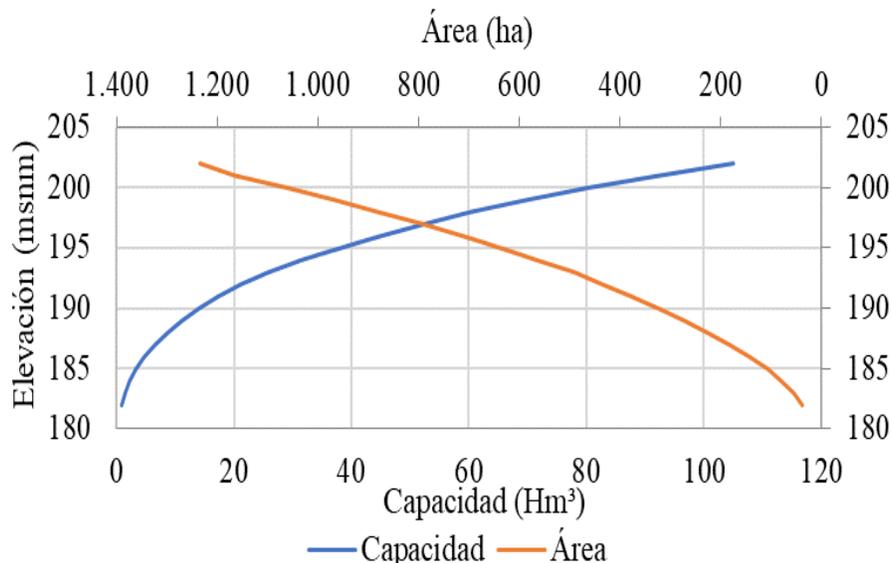
Se recopilaron en las oficinas del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB) los siguientes mapas en escala 1:25.000: 6446-III-NE, 6446-III-NO, 6446-III-SE, 6446-III-SO, 6446-II-NO y 6446-I-SO.

Dichos mapas se mandaron a rectificar para posteriormente ser usados dentro de la herramienta de dibujo AutoCAD. Esto fue necesario para poder trazar la divisoria de aguas hasta la presa Ing. Francisco Amelinck y dividir la cuenca del embalse Cumaripa, en subcuencas, para realizar los análisis hidrológicos pertinentes

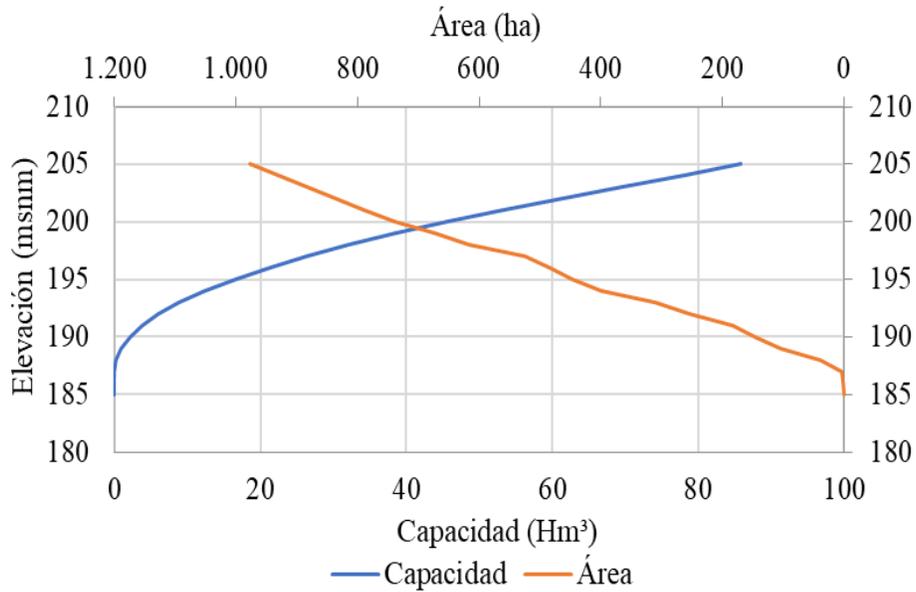
### 3.7.3 Estudios batimétricos

En el MINEA, se recabó información referente a las batimetrías disponibles para el embalse de Cumaripa, y se obtuvo los datos referentes a la topografía original y dos batimetrías. Luego se procesaron los datos y se generaron las curvas de elevación-área-capacidad del proyecto original en el año 1971, y las de las batimetrías realizadas en los años 1989 y 2004, las cuales se muestran a continuación:

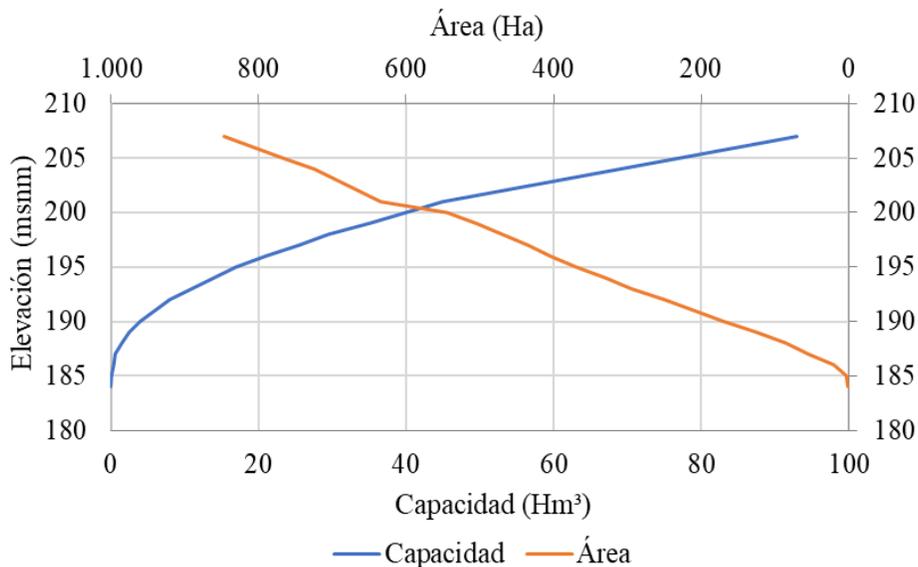
**Gráfico 12 Curva elevación-área-capacidad de proyecto (1971)**



**Gráfico 13 Curva elevación-área-capacidad batimetría (1989)**



**Gráfico 14 Curva elevación-área-capacidad (2004)**



Fuente: MINEA

- **Comentario respecto la batimetría del año 1989**

De acuerdo a lo hablado con la directora de la oficina de Coordinación de Operación de Embalses del MINEA, este estudio batimétrico fue realizado para toda el área del embalse por el MARN en aquél momento.

- **Comentario respecto la batimetría del año 1999**

En el MINEA se presentaba disponible otra batimetría, la cual fue realizada en el año 1999. Después de un análisis detallado de dicho levantamiento, se pudo observar que la metodología realizada para la elaboración de la curva elevación-área-capacidad fue por medio de una estimación de volúmenes de sedimentos depositados en una parte del embalse, en la cual se hizo un análisis de la reducción de la capacidad del embalse a partir de los perfiles batimétricos levantados con respecto a la topografía original en escala 1:50.000, usada para la elaboración de la curva original.

En el informe se explicó que a partir de 43 perfiles batimétricos transversales al eje de río Yaracuy y de los perfiles de la topografía original se computo el volumen de sedimentos acumulados en el fondo del embalse desde su inicio de operaciones hasta la fecha del año 1999. Estos resultados arrojaron un volumen de sedimentos de aproximadamente 10 millones de metros cúbicos para un área del vaso de 400 hectáreas y se hizo una extrapolación de ese resultado para las 600 hectáreas restantes donde se estimó que tendrían una cantidad acumulada de 15 millones de metros cúbicos sumando un total de 25 millones de metros cúbicos.

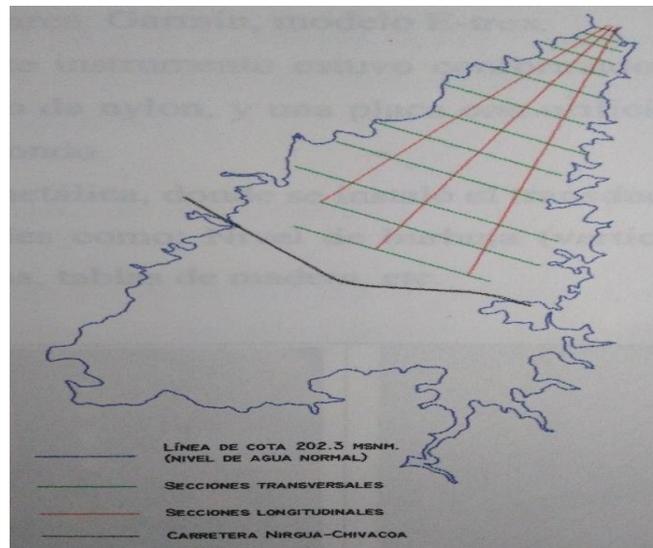
Entonces se puede concluir que, la elaboración de una curva actualizada de elevación-área-capacidad no es posible, ya que solo se tomó en cuenta una parte del embalse y se dibujó la curva asumiendo que para la cota 202 msnm, existe una reducción del volumen neto de almacenamiento de 25 millones de metros cúbicos, esto quiere decir que la curva realizada reporta valores erróneos.

- **Comentario respecto la batimetría del año 2004**

De acuerdo con en el trabajo especial de grado "Evaluación de la sedimentación del embalse Cumaripa. Soluciones posibles", en el que se realizó un levantamiento batimétrico del embalse en el año 2004, se detectó que dicho estudio tenía el alcance de realizar un

levantamiento batimétrico en la zona comprendida entre la carretera Nirgua-Chivacoa y el sitio de presa, ya que aguas arriba del embalse por incidencia del viaducto se genera un efecto de amortiguación del agua, permitiendo que los sedimentos se depositen con mayor facilidad, generando un excesivo volumen de sedimentos, limitando la accesibilidad en la zona y eliminando la posibilidad de usar los equipos para realizar la batimetría.

En la Figura 12 se observa el alineamiento del viaducto, la superficie ocupada por el embalse y un conjunto de líneas, correspondiente cada una a las transectas a lo largo de las que se tomaron puntos del fondo del vaso. Se aprecia que el levantamiento se enfocó, por las razones ya señaladas, al área comprendida entre el puente y la presa.



**Figura 12 Zona de levantamiento batimétrico del año 2004**

Fuente: Evaluación de la sedimentación del embalse de Cumaripa. Soluciones posibles (2004)

En este estudio, debido a lo señalado en los comentarios de la batimetría disponible, se descartó el uso de las batimetrías de los años 1999 y 2004, siendo objeto de comparación para nuestros resultados únicamente la batimetría realizada en el año 1989.

### 3.8 Parametrización de subcuencas

Sobre los mapas disponibles en escala 1:25.000, se procedió a trazar la divisoria de aguas, del río Yaracuy hasta el sitio de presa del embalse de Cumaripa. Dicha cuenca alcanza una superficie aproximada de 435 km<sup>2</sup>, y esta fue posteriormente dividida en 72 subcuencas a los

efectos de estudiar la variación espacial de las características físicas de la cuenca, como son el relieve, la pendiente del fondo del cauce, textura y uso de los suelos, y vegetación principalmente. En el presente estudio, la parametrización se realizó para hacer el análisis hidrológico más detallado de la cuenca. Los parámetros que se tomaron en cuenta en este proceso, son los siguientes:

- Longitud, área y pendiente de los elementos de escurrimiento superficial.
- Longitud, y pendiente de los cauces principales.
- Estimación de tiempo de concentración superficial y de viaje para cada subcuenca, con el fin de determinar el tiempo de concentración total y por consiguiente el tiempo de retardo el cual se estima como el 60 % del tiempo de concentración total.
- Estimación de coeficiente de almacenamiento K, para el tránsito de crecidas mediante el método de Muskingum.
- Estimación del número de curva.
- Según la ubicación de las estaciones pluviográficas, se utilizó el método de los polígonos de Thiessen para así obtener la influencia (en %) de la lluvia en cada subcuenca, como se puede observar en el Anexo 1.

### **3.9 Estimación de láminas de lluvias extremas**

De acuerdo a la información recabada con datos de las estaciones pluviográficas y se llevó a cabo la estimación de las láminas de lluvia mediante la aplicación del método de distribución de valores extremos de Gumbel.

### **3.10 Hietograma de lluvia Incremental**

Se determinaron los hietogramas acumulados de lluvias totales con valores de lluvias máximas para diferentes períodos de retorno, donde se consideran intervalos de cinco minutos entre lluvias consecutivas. A tal efecto, se realizó una regresión a la estación Central Matilde de la siguiente manera:

$$\ln(I) = \ln(a) - c \cdot \ln(t + b) \text{ Ec. 55}$$

Donde,

- I: Intensidad de lluvia (mm/h).
- a, b, c: Coeficientes de regresión.
- t: Duración de lluvia (min).

Para cada periodo de retorno y a partir de las láminas de lluvia acumuladas desde 5 hasta 1.440 minutos, se calcularon hietogramas de lluvia total, los cuales muestran la distribución temporal de la lluvia. Esos hietogramas se elaboraron mediante la utilización del método de los bloques alternos.

### 3.11 Instrumentación del modelo hidrológico

Para lograr los objetivos del presente trabajo, es necesario crear un modelo hidrológico, en donde se le ingresan los datos necesarios como; número de curva, constante de almacenamiento K, tiempo de retardo, entre otros. El cual permite el cálculo de hidrogramas de crecidas y, por consiguiente, los volúmenes y gastos picos de escorrentías asociado a cada periodo de retorno. Para crear el modelo matemático, se utilizó el programa HEC-HMS en su versión 4.2.1, desarrollado por el *US Army Corps of Engineers*.

### 3.12 Producción de sedimentos

El método utilizado para la producción de sedimentos en la cuenca, es el propuesto por Williams y Berndt en el año 1975 llamado MUSLE, donde cada uno de sus parámetros fueron obtenidos de la siguiente manera:

- El factor de erodabilidad del suelo K se determinó en función de la información disponible de la textura de los suelos, y, de la materia orgánica presente en ellos mediante el uso de la Tabla 1.
- El factor topográfico LS: el término L se calculó con la fórmula indicada en el marco teórico (Ec.8). El parámetro S se determinó de acuerdo al valor de la pendiente que presenta una subcuenca, tomando en cuenta que, para pendientes mayores que 9% se aplicó la ecuación propuesta por McCool (1987) (Ec. 7), y en caso de pendientes menores al 9% se aplicó la ecuación propuesta por Williams y Berndt (Ec.6).

- Factor de cobertura vegetal C: se estimó la distribución del tipo de cobertura vegetal, luego se estimó el factor con la Tabla 3 para cada cobertura presente en la distribución y se realizó el promedio ponderado acorde a la distribución.
- Factor de prácticas de conservación de suelos P: se utilizó un valor constante de 1, tomando en cuenta suelos donde no se aplican prácticas de conservación.
- Para el cálculo de los valores de volumen de escurrimiento superficial y el caudal pico, se dio de apoyo del modelo hidrológico (HEC-HMS), en base a la teoría del método del hidrograma unitario adimensional del *Soil Conservation Service*.

### **3.13 Transporte de carga de material de fondo (*bed material load*)**

Para determinar la carga total de material de fondo se realizó el cálculo matemático de cada uno de los métodos de transporte de sedimentos indicados en el marco teórico, siendo los de carga de fondo los métodos de Shields (1936), Einstein (1950) y Rottner (1959). Para carga en suspensión de material de fondo, fue empleado el método de Einstein (1950) y, por último, para carga total de material de fondo los métodos de Einstein (1950), sumando carga de fondo más carga de material de fondo en suspensión, Laursen (1958), Graf (1968), Engelund y Hansen (1972), Ackers y White (1973), Yang (1979) y Karim (1998). Para poder utilizar cada uno de los cálculos de los métodos presentados anteriormente, se requería del material del lecho y estudios granulométricos del mismo, por lo que se es necesario realizar una visita de al sitio estudiado.

#### **3.13.1 Visita de campo**

Para efectos del presente estudio, se visitó la cuenca alta del río Yaracuy y de manera específica al sitio de presa y el embalse de Cumaripa con el fin de obtener una mejor perspectiva del relieve, la vegetación y las dimensiones de los cauces, además de obtener muestras de material de fondo (*bed material*) en el lecho del río.

#### **3.13.2 Selección del sitio de toma de material de lecho**

En la selección del sitio de toma de muestras de lecho para este estudio, se tomaron en consideración diferentes aspectos, entre ellos, la accesibilidad, que los niveles de agua en el río no fueran tan altos como para poder ingresar en él y, por último, que el sitio de la toma de muestras no podía estar ubicado cerca de la cola del vaso de almacenamiento, ya que en esa zona se presenta el efecto de amortiguación de la crecida por la presencia del embalse.

Este punto es importante, puesto que, la carga lavada que viaja en suspensión puede empezar a sedimentarse por el efecto de amortiguación, lo que ocasiona que en esa zona el material de fondo posea un exceso de material fino que originalmente no tendría, lo que haría que se tomara en consideración una carga, como carga lavada, en vez de como un material propio del lecho del río.

### **3.13.3 Estudio granulométrico del material de lecho**

El estudio granulométrico del material de fondo se realizó respecto a la norma establecida por la ASTM, de acuerdo al ensayo ASTM-D422 (*Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils*).

### **3.14 Carga media anual total de sedimentos**

Para determinar la carga media anual total de sedimentos, se utilizó la ecuación propuesta por Simons y Şentürk (1992) para ponderar los valores obtenidos de los cálculos de los procesos de producción de sedimentos y transporte de material de fondo, siendo la carga media anual total la suma de los valores ponderados de dichos procesos.

### **3.15 Comparación de carga total de sedimentos con valores reportados por batimetrías**

Este estudio tiene como finalidad la comparación de la carga total de sedimentos aportada al embalse a través de los procesos de producción y transporte de sedimentos, con la carga de sedimentos depositada en el embalse, la cual se calculó a partir de los volúmenes útiles obtenidos de la diferencia entre dos batimetrías, que posteriormente fue convertido en peso.

Para ello, se multiplicó dicho volumen con el peso unitario seco del material depositado en el embalse calculado con la ecuación planteada por Miller y Trask (Ec.55), en donde sus parámetros de peso unitario seco inicial y su constante K se presentan en la Tabla 4, obtenida del libro "*Design of small dams, Bureau of Reclamation, 1987*".

La carga depositada al ser relacionada con la eficiencia de atrape del embalse, permitió determinar la carga total de sedimentos aportados al vaso de almacenamiento.

## CAPÍTULO 4: DESARROLLO Y RESULTADOS

### 4.1 Mapa de cuenca

En el plano del Anexo 0, entregado en forma digital en el CD-ROM, se muestra la cuenca del río Yaracuy hasta el embalse de Cumaripa, donde se han resaltado por su importancia para el presente estudio, los siguientes elementos:

- Ubicación del embalse de Cumaripa.
- Ubicación relativa de las diferentes estaciones pluviográficas cuya data fue utilizada.
- Polígonos de Thiessen trazados para la estimación de la influencia de cada estación de lluvia sobre cada cuenca.
- Delimitación de cada una de las subcuencas consideradas (72) que conforman la cuenca del río Yaracuy hasta el embalse Cumaripa.

**NOTA:** los archivos entregados en este anexo son de formato .dwg los cuales se pueden abrir utilizando el programa AutoCAD de Autodesk, en sus versiones desde la 2013 en adelante.

### 4.2 Análisis de lluvias extremas de diferentes duraciones y distintos periodos de retorno

Los resultados del análisis de lluvias máximas, para diferentes períodos de retorno, y para duraciones de 5, 10, 15, 30, 60, 180, 360, 540, 720 y 1.440 minutos de las cinco estaciones pluviográficas incluidas en el estudio, se encuentran en el Anexo 2. En ese mismo anexo se encuentran las curvas profundidad-duración-frecuencia (PDF) e intensidad-duración-frecuencia (IDF).

En la Figura 13 se muestra la relación de las láminas máximas para una duración de 24 horas, estimados en cada estación para los diferentes periodos de retorno.

T (años)	Láminas máximas en 24 h de duración por estaciones (mm)				
	Los Cogollos	Central Matilde	Campo Elías	Guarabao	Urachiche
2,33	58,3	68,8	70,8	73,7	83,4
5	72,3	85,7	88,2	94,7	107,7
10	83,6	99,4	102,3	111,7	127,6
25	98	116,7	120,2	133,3	152,7
50	108,6	129,6	133,4	149,3	171,3
100	119,2	142,4	146,6	165,2	189,7

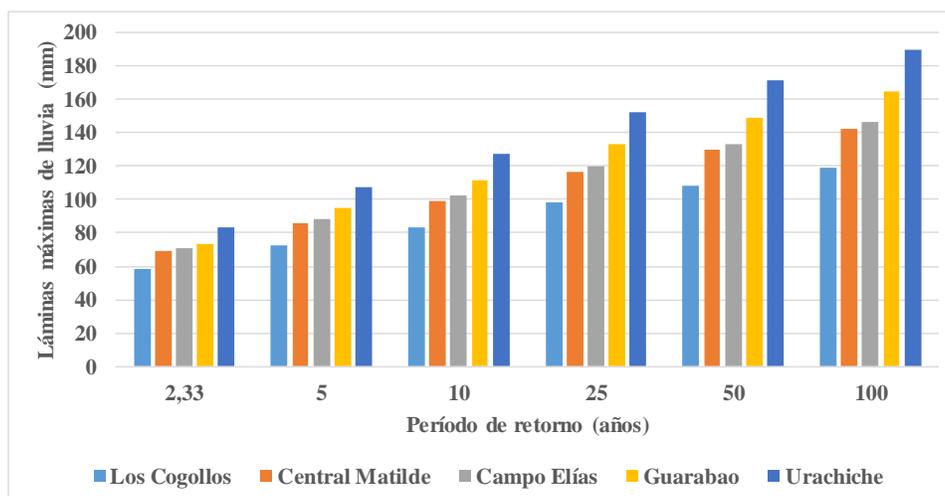


Figura 13 Láminas máximas en 24 horas de cada estación para diferentes frecuencias

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3 Hietogramas de lluvias totales

En la Tabla 7 se encuentran los valores de los coeficientes de regresión obtenidos para la estación Central Matilde para los distintos períodos de retorno considerados. Con las ecuaciones de regresión es posible determinar láminas acumuladas de lluvias totales cada cinco minutos.

Mientras que en el Gráfico 15 se presentan los hietogramas de lluvias totales de la estación Central Matilde para los eventos de lluvia con periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Es importante resaltar que, por razones de presentación en la referida figura, solo se han colocado los bloques de lluvia correspondientes a las máximas láminas las cuales ocurren en los alrededores de las 12 horas.

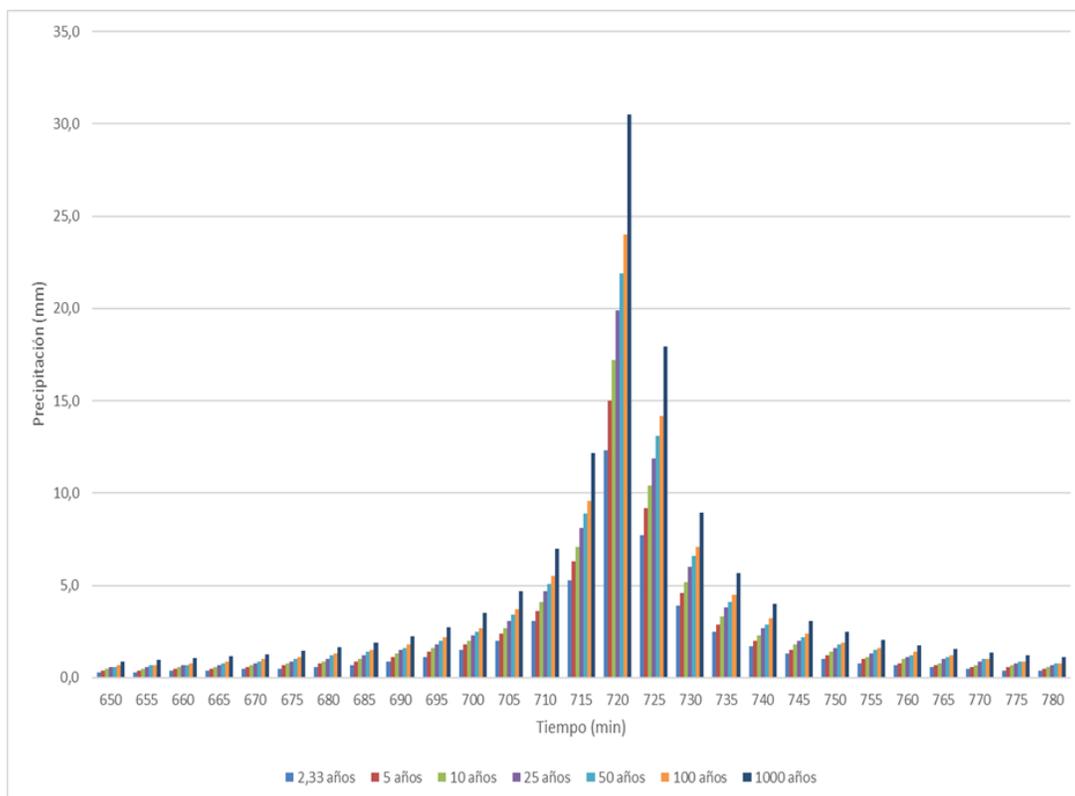
**Tabla 7 Estación Central Matilde. Coeficientes de las ecuaciones de lámina de lluvia (mm) contra tiempo (min) para diferentes frecuencias**

Periodo de retorno	a	b	c	r <sup>2</sup>
2,33	2245,932	14,5	-0,91514	0,999
5	2446,444	13,3	-0,89672	0,999
10	2658,975	12,8	-0,88789	0,999
25	2929,044	12,3	-0,87915	0,998
50	3130,517	12,0	-0,87394	0,998
100	3320,530	11,7	-0,86906	0,998
1000	4028,722	11,3	-0,86003	0,996

r<sup>2</sup>: correlación que determina la calidad del ajuste

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 15 Estación Central Matilde. Hietogramas para tormentas con duración de un día**



Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 Distribución espacial de la lluvia en la cuenca

El análisis de la distribución espacial de la lluvia se realizó con el método de los polígonos de Thiessen, el método permite ponderar el área de influencia de cada estación en el cálculo de la variabilidad espacial de la precipitación en la cuenca. Los polígonos de Thiessen se encuentran trazados sobre el mapa de la cuenca que se encuentra en el Anexo 1. Los resultados del análisis de la variación espacial de la lluvia sobre la cuenca se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8 Influencia (%) de cada estación en cada subcuenca**

Subcuenca	Área Km <sup>2</sup>	Estaciones				
		Urachiche	Central Matilde	Campo Elias	Guarabao	Los Cogollos
Buenos Aires 1	5,59	100,0				
Buenos Aires 2	17,92	98,6		1,4		
Canape 1	18,20		25,0	75,0		
Canape 2	22,80		73,0	27,0		
Comunare 1	16,80	100,0				
Comunare 2	4,31	100,0				
Comunare 3	2,38	79,8	20,2			
Comunare 4	5,66	96,3		3,7		
Comunare 5	5,59	100,0				
Comunare 6	0,05	100,0				
Cumaripa	1,92		99,0	1,0		
El Calichito 1	6,55		24,4			75,6
El Calichito 2	2,23		83,7			16,3
El Calichito 3	2,63		100,0			
El Calichito 4	5,48		100,0			
El Calichito 5	0,46					100,0
El Charo	6,19		79,0	21,0		
El Limonero 1	2,75					100,0
El Limonero 2	4,94				31,8	68,2
Guasopo	4,21		100,0			
Las Corazas 1	4,38					100,0
Las Corazas 2	4,41		0,1			99,9

• **Continuación Tabla 8 Influencia (%) de cada estación en cada subcuenca**

Subcuenca	Área Km <sup>2</sup>	Estaciones				
		Urachiche	Central Matilde	Campo Elias	Guarabao	Los Cogollos
Las Corazas 3	2,10		87,6			12,4
Las Delicias 1	6,80		39,7		24,9	35,4
Las Delicias 2	7,20		84,6		15,4	
Los Caracoles 1	6,11					100,0
Los Caracoles 2	1,53					100,0
Los Caracoles 3	1,97					100,0
Los Cogollos 1	15,34					100,0
Los Cogollos 2	12,92					100,0
Los Cogollos 3	3,01					100,0
Los Cogollos 4	2,28					100,0
Los Horcones	4,28		95,3		4,7	
Mata Caballo 1	19,74	38,9	25,8	35,3		
Mata Caballo 2	10,27	7,3		92,7		
Mata Caballo 3	1,39		27,3	72,7		
Mata Caballo 4	4,43		99,9	0,1		
Medina 1	4,85					100,0
Medina 2	4,38					100,0
Medina 3	1,26					100,0
Medina 4	0,61					100,0
Medina 5	0,10					100,0
Medina 6	1,05					100,0
Mulitas 1	4,38					100,0
Mulitas 2	0,43					100,0
Quibayo 1	40,63	61,5	39,5			
Quibayo 2	19,80		100,0			
Quibayo 3	1,61		100,0			
Quibayo 4	8,40		100,0			
Quibayo 5	7,00		100,0			
Quibayo 6	4,35		100,0			
Urachiche 1	35,56	100,0				
Urachiche 2	4,88	100,0				

**Continuación Tabla 8 Influencia (%) de cada estación en cada subcuenca**

Subcuenca	Área Km <sup>2</sup>	Estaciones				
		Urachiche	Central Matilde	Campo Elias	Guarabao	Los Cogollos
Las Corazas 3	2,10		87,6			12,4
Las Delicias 1	6,80		39,7		24,9	35,4
Las Delicias 2	7,20		84,6		15,4	
Yaracuy 1	0,93	100,0				
Yaracuy 2	0,27	100,0				
Yaracuy 3	7,15	100,0				
Yaracuy 4	0,30	100,0				
Yaracuy 5	0,69	55,1	44,9			
Yaracuy 6	0,70		100,0			
Yaracuy 7	1,40		100,0			
Yaracuy 8	2,82		16,3	83,7		
Yaracuy 9	4,68		100,0			
Yaracuy 10	2,85		100,0			
Yaracuy 11	0,14		100,0			
Yaracuy 12	0,51		100,0			
Yaracuy 13	4,05		100,0			
Yaracuy 14	0,24		100,0			
Yaracuy 15	0,43		100,0			
Yaracuy 16	0,76		100,0			
Yaracuy 17	5,04		100,0			
Yaracuy 18	6,59		100,0			
Yaracuy 19	0,34		100,0			

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5 Parametrización de subcuencas

En la Tabla 9 se presentan los resultados de la parametrización de las subcuencas, de acuerdo a la metodología anteriormente indicada, así como el cálculo del tiempo de viaje para cada subcuenca.

**Tabla 9 Parametrización de cuenca y tiempo de viaje**

Subcuenca	Superficie		Elevación (msnm)		Desnivel (m)	Lcp (m)	S (%)	tv (min)
	km <sup>2</sup>	ha	Arriba	Abajo				
Buenos Aires 1	5,59	559	820	460	360	4.694	7,67	35,20
Buenos Aires 2	17,92	1792	1.520	440	1.080	10.665	10,13	59,49
Canape 1	18,20	1820	680	280	400	10.270	3,89	83,48
Canape 2	22,80	2280	415	215	200	10.834	1,85	115,96
Comunare 1	16,80	1680	1.040	300	740	9.458	7,82	59,90
Comunare 2	4,31	431	1.310	620	690	3.408	20,25	18,93
Comunare 3	2,38	238	340	275	65	3.280	1,98	44,97
Comunare 4	5,66	566	700	310	390	7.809	4,99	61,44
Comunare 5	5,59	559	620	310	310	6.992	4,43	59,07
Comunare 6	0,05	5	310	300	10	420	2,38	8,61
Qda. Cumaripa	1,92	192	275	245	30	2.536	1,18	44,99
El Calichito 1	6,55	655	620	250	370	4.884	7,58	36,46
El Calichito 2	2,23	223	250	230	20	1.104	1,81	20,13
El Calichito 3	2,63	263	230	200	30	1.007	2,98	15,48
El Calichito 4	5,48	548	660	200	460	3.473	13,25	22,61
El Calichito 5	0,46	46	340	280	60	1.305	4,60	15,99
El Charo	6,19	619	370	245	125	6.916	1,81	82,75
El Limonero 1	2,75	275	380	348	32	3.522	0,91	64,13
El Limonero 2	4,94	494	480	348	132	4.975	2,65	55,39
Guasopo	4,21	421	230	215	15	5.514	0,27	144,09
Las Corazas 1	4,38	438	460	340	120	3.729	3,22	41,18
Las Corazas 2	4,41	441	348	250	98	4.197	2,34	51,04
Las Corazas 3	2,10	210	310	230	80	1.889	4,24	21,95
Las Delicias 1	6,80	680	480	200	280	6.807	4,11	59,56
Las Delicias 2	7,20	720	360	200	160	2.446	6,54	22,65
Los Caracoles 1	6,11	611	620	370	250	7.602	3,29	70,68
Los Caracoles 2	1,53	153	440	370	70	1.842	3,80	22,44
Los Caracoles 3	1,97	197	370	360	10	2.191	0,46	58,01
Los Cogollos 1	15,34	1534	900	680	220	8.565	2,57	85,21
Los Cogollos 2	12,92	1292	820	680	140	7.959	1,76	93,17
Los Cogollos 3	3,01	301	760	440	320	3.023	10,59	22,15
Los Cogollos 4	2,28	228	680	440	240	2.899	8,28	23,58
Los Horcones	4,28	428	380	200	180	1.061	16,97	8,25
Mata Caballo 1	19,74	1974	1.080	260	820	14.113	5,81	91,42
Mata Caballo 2	10,27	1027	1.520	655	865	6.474	13,36	36,41
Mata Caballo 3	1,39	139	430	335	95	3.456	2,75	41,27
Mata Caballo 4	4,43	443	315	255	60	3.966	1,51	57,75

*Cuantificación de la carga lavada y de material de lecho hasta un sitio de embalse y comparación con valores reportados por batimetrías.*

**Continuación Tabla 9 Parametrización de cuenca y tiempo de viaje**

Subcuenca	Superficie		Elevación (msnm)		Desnivel (m)	Lcp (m)	S (%)	tv (min)
	km <sup>2</sup>	ha	Arriba	Abajo				
Medina 1	4,85	485	660	420	240	3.949	6,08	33,70
Medina 2	4,38	438	680	440	240	3.405	7,05	28,40
Medina 3	1,26	126	460	360	100	2.080	4,81	22,51
Medina 4	0,61	61	420	360	60	1.276	4,70	15,58
Medina 5	0,10	10	440	360	80	793	10,09	8,05
Medina 6	1,05	105	360	340	20	1.706	1,17	33,27
Mulitas 1	4,38	438	580	360	220	4.651	4,73	42,09
Mulitas 2	0,43	43	360	348	12	838	1,43	17,82
Quibayo 1	40,63	4063	355	240	115	12.672	0,91	171,97
Quibayo 2	19,80	1980	940	200	740	9.501	7,79	60,21
Quibayo 3	1,61	161	380	205	175	1.819	9,62	15,54
Quibayo 4	8,40	840	560	210	350	2.361	14,82	16,09
Quibayo 5	7,00	700	980	230	750	1.429	52,48	6,72
Quibayo 6	4,35	435	880	225	655	2.489	26,32	13,43
Urachiche 1	35,56	3556	1.260	480	780	11.180	6,98	71,21
Urachiche 2	4,88	488	900	480	420	4.851	8,66	34,45
Yaracuy 1	0,93	93	480	460	20	1.914	1,04	38,00
Yaracuy 2	0,27	27	460	440	20	899	2,22	15,88
Yaracuy 3	7,15	715	440	280	160	7.685	2,08	84,99
Yaracuy 4	0,30	30	300	295	5	965	0,52	29,38
Yaracuy 5	0,69	69	295	275	20	1.406	1,42	26,61
Yaracuy 6	0,70	70	275	260	15	1.366	1,10	28,75
Yaracuy 7	1,40	140	260	240	20	2.844	0,70	60,04
Yaracuy 8	2,82	282	655	335	320	7.396	4,33	62,26
Yaracuy 9	4,68	468	335	255	80	1.712	4,67	19,59
Yaracuy 10	2,85	285	255	240	15	1.712	0,88	37,32
Yaracuy 11	0,14	14	240	230	10	1.121	0,89	26,75
Yaracuy 12	0,51	51	225	220	5	2.081	0,24	71,37
Yaracuy 13	4,05	405	280	220	60	4.379	1,37	64,75
Yaracuy 14	0,24	24	220	215	5	1.523	0,33	49,77
Yaracuy 15	0,43	43	215	210	5	2.966	0,17	107,47
Yaracuy 16	0,76	76	210	205	5	1.809	0,28	60,71
Yaracuy 17	5,04	504	205	200	5	4.448	0,11	171,62
Yaracuy 18	6,59	659	245	215	30	3.164	0,95	58,09
Yaracuy 19	0,34	34	215	200	15	805	1,86	15,61

L<sub>cp</sub>: longitud de cauce principal, S: pendiente del cauce principal, tv: tiempo de viaje

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la Tabla 10 se presentan los valores del tiempo de concentración superficial, tiempo de concentración total, tiempo de retardo y del coeficiente de almacenamiento K para el tránsito con el método de Muskingum. En el Anexo 9 se presentan en detalle los cálculos del tiempo de concentración superficial.

**Tabla 10 Tiempos de concentración superficial, total, retardo y constante de almacenamiento K**

Subcuenca	T <sub>cs</sub> (min)	T <sub>c</sub> (min)	T <sub>lag</sub> (min)	K (h)
Buenos Aires 1	1,4	36,6	21,9	0,57
Buenos Aires 2	2,9	62,4	37,4	0,90
Canape 1	11,1	94,6	56,8	1,10
Canape 2	9,7	125,6	75,4	1,43
Comunare 1	2,7	62,6	37,5	0,90
Comunare 2	1,9	20,9	12,5	0,27
Comunare 3	7,2	52,1	31,3	0,70
Comunare 4	8,3	69,7	41,8	0,90
Comunare 5	2,1	61,1	36,7	0,90
Comunare 6	7,3	16,0	9,6	0,25
Cumaripa	14,0	59,0	35,4	0,70
El Calichito 1	3,8	40,3	24,2	0,57
El Calichito 2	3,8	24,0	14,4	0,27
El Calichito 3	1,7	17,1	10,3	0,27
El Calichito 4	1,6	24,2	14,5	0,43
El Calichito 5	3,3	19,3	11,6	0,27
El Charo	16,7	99,5	59,7	1,10
El Limonero 1	1,0	65,1	39,1	0,93
El Limonero 2	6,2	61,6	37,0	0,83
Guasopo	8,1	152,2	91,3	1,67
Las Corazas 1	3,6	44,7	26,8	0,70
Las Corazas 2	1,0	52,0	31,2	0,83
Las Corazas 3	3,9	25,8	15,5	0,43
Las Delicias 1	4,0	63,5	38,1	0,90
Las Delicias 2	2,6	25,2	15,1	0,43
Los Caracoles 1	2,0	72,7	43,6	1,00
Los Caracoles 2	1,1	23,5	14,1	0,43
Los Caracoles 3	2,1	60,1	36,1	0,90
Los Cogollos 1	0,9	86,1	51,6	1,10
Los Cogollos 2	0,9	94,1	56,4	1,27
Los Cogollos 3	4,3	26,4	15,9	0,43
Los Cogollos 4	4,9	28,4	17,1	0,43
Los Horcones	1,9	10,2	6,1	0,25
Mata Caballo 1	8,1	99,5	59,7	1,20
Mata Caballo 2	5,6	42,0	25,2	0,57
Mata Caballo 3	9,6	50,9	30,5	0,70
Mata Caballo 4	13,4	71,1	42,7	0,90

Continuación Tabla 10 Tiempos de concentración superficial, total, retardo y constante de almacenamiento K

Subcuenca	T <sub>cs</sub> (min)	T <sub>c</sub> (min)	T <sub>lag</sub> (min)	K (h)
Medina 1	1,3	35,0	21,0	0,57
Medina 2	3,6	32,0	19,2	0,50
Medina 3	2,4	25,0	15,0	0,43
Medina 4	1,8	17,4	10,4	0,27
Medina 5	1,4	9,4	5,6	0,25
Medina 6	2,6	35,9	21,5	0,57
Mulitas 1	3,0	45,1	27,1	0,70
Mulitas 2	2,5	20,4	12,2	0,27
Quibayo 1	5,8	177,8	106,7	1,92
Quibayo 2	5,4	65,6	39,4	0,90
Quibayo 3	5,3	20,9	12,5	0,27
Quibayo 4	2,9	19,0	11,4	0,27
Quibayo 5	7,1	13,8	8,3	0,25
Quibayo 6	6,6	20,0	12,0	0,25
Urachiche 1	3,3	74,5	44,7	1,00
Urachiche 2	1,6	36,0	21,6	0,57
Yaracuy 1	4,3	42,3	25,4	0,57
Yaracuy 2	9,8	25,6	15,4	0,27
Yaracuy 3	9,4	94,4	56,6	1,10
Yaracuy 4	12,2	41,6	25,0	0,50
Yaracuy 5	25,4	52,0	31,2	0,43
Yaracuy 6	22,3	51,1	30,6	0,50
Yaracuy 7	13,0	73,0	43,8	0,90
Yaracuy 8	9,9	72,1	43,3	0,90
Yaracuy 9	10,7	30,3	18,2	0,27
Yaracuy 10	13,2	50,6	30,3	0,57
Yaracuy 11	6,7	33,4	20,1	0,43
Yaracuy 12	10,2	81,5	48,9	1,13
Yaracuy 13	9,6	74,4	44,6	0,93
Yaracuy 14	14,8	64,6	38,8	0,77
Yaracuy 15	23,7	131,2	78,7	1,55
Yaracuy 16	20,6	81,3	48,8	0,90
Yaracuy 17	10,2	181,8	109,1	1,92
Yaracuy 18	16,4	74,5	44,7	0,90
Yaracuy 19	24,0	39,6	23,8	0,27

T<sub>cs</sub>: tiempo de concentración superficial, T<sub>c</sub>: tiempo de concentración, T<sub>lag</sub>: tiempo de retardo  
K: constante de almacenamiento

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6 Valores del número de curva por subcuenca

Los valores del número de curva se presentan en la Tabla 11, mientras que su metodología de cálculo para cada subcuenca se presenta en el Anexo 4. Dicho número se calculó tomando en cuenta la capacidad de drenaje del suelo y haciendo ponderaciones para cada subcuenca según el tipo del uso del suelo en ellas, ya que, por ejemplo, una misma subcuenca puede presentar grandes extensiones ocupadas por gamelote y otras gramíneas, árboles, zonas residenciales, terrenos de cultivo, etc. Se estimó para la cuenca del río Yaracuy hasta el embalse de Cumaripa un número de curva promedio ponderado de 63.

**Tabla 11 Número de curva por subcuenca**

Subcuenca	Suelos	Vegetación	NC
	Textura		
<b>Buenos Aires 1</b>	Franco Arenoso	TC, P, VR, DP	64
<b>Buenos Aires 2</b>	Franco Arenoso	TC, P, VR, DP	67
<b>Canape 1</b>	Franco Arenoso	TC, P, VR, B, DP, R	77
<b>Canape 2</b>	Franco Arenoso	TC, VR; DP, R, CC	63
<b>Comunare 1</b>	Franco Arenoso	TC, P, B, DP	70
<b>Comunare 2</b>	Franco Arenoso	P, B	56
<b>Comunare 3</b>	Franco Arenoso	TC, VR	69
<b>Comunare 4</b>	Franco Arenoso	TC, P, VR, B	75
<b>Comunare 5</b>	Franco Arenoso	TC, P, VR, B	67
<b>Comunare 6</b>	Franco Arenoso	TC, P, VR, B	67
<b>Qda. Cumaripa</b>	Franco Arenoso	TC, VR	68
<b>El Calichito 1</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57
<b>El Calichito 2</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57
<b>El Calichito 3</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57
<b>El Calichito 4</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57
<b>El Calichito 5</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57
<b>El Charo</b>	Franco Arenoso	TC, VR	57
<b>El Limonero 1</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	65
<b>El Limonero 2</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	70
<b>Guasopo</b>	Franco Arenoso	TC, P, VR	61
<b>Las Corazas 1</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57
<b>Las Corazas 2</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57
<b>Las Corazas 3</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57

**Continuación Tabla 11 Número de curva por subcuenca**

<b>Las Delicias 1</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57
<b>Las Delicias 2</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57
<b>Los Caracoles 1</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57
<b>Los Caracoles 2</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57
<b>Los Caracoles 3</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	57
<b>Los Cogollos 1</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	63
<b>Los Cogollos 2</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	67
<b>Los Cogollos 3</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	67
<b>Los Cogollos 4</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	67
<b>Los Horcones</b>	Franco Arenoso	P, VR, B, CC	60
<b>Mata Caballo 1</b>	Franco Arenoso	TC, P, VR, DP, CC	71
<b>Mata Caballo 2</b>	Franco Arenoso	P, B	56
<b>Mata Caballo 3</b>	Franco Arenoso	TC, P, VR	60
<b>Mata Caballo 4</b>	Franco Arenoso	TC, VR, DP	72
<b>Medina 1</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	58
<b>Medina 2</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	47
<b>Medina 3</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	47
<b>Medina 4</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	47
<b>Medina 5</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	67
<b>Medina 6</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	67
<b>Mulitas 1</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	56
<b>Mulitas 2</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	56
<b>Quibayo 1</b>	Franco Arenoso	TC, P, VR	77
<b>Quibayo 2</b>	Franco Arenoso	VR, B	55
<b>Quibayo 3</b>	Franco Arenoso	P, VR, B	54
<b>Quibayo 4</b>	Franco Arenoso	TC, VR, B	56
<b>Quibayo 5</b>	Franco Arenoso	TC, VR, B	56
<b>Quibayo 6</b>	Franco Arenoso	VR, B	55
<b>Urachiche 1</b>	Franco Arenoso	P, B, DP	62
<b>Urachiche 2</b>	Franco Arenoso	P, B	65

**Continuación Tabla 11 Número de curva por subcuenca**

<b>Yaracuy 1</b>	Franco Arenoso	TC, VR	63
<b>Yaracuy 2</b>	Franco Arenoso	TC, VR	51
<b>Yaracuy 3</b>	Franco Arenoso	TC, VR	65
<b>Yaracuy 4</b>	Franco Arenoso	VR	58
<b>Yaracuy 5</b>	Franco Arenoso	TC, VR	70
<b>Yaracuy 6</b>	Franco Arenoso	TC, VR	77
<b>Yaracuy 7</b>	Franco Arenoso	TC, VR	77
<b>Yaracuy 8</b>	Franco Arenoso	P, VR, DP	73
<b>Yaracuy 9</b>	Franco Arenoso	TC, VR	65
<b>Yaracuy 10</b>	Franco Arenoso	TC, VR	77
<b>Yaracuy 11</b>	Franco Arenoso	VR	71
<b>Yaracuy 12</b>	Franco Arenoso	TC, VR	75
<b>Yaracuy 13</b>	Franco Arenoso	TC, VR, DP	81
<b>Yaracuy 14</b>	Franco Arenoso	TC, VR	78
<b>Yaracuy 15</b>	Franco Arenoso	TC, P, VR	74
<b>Yaracuy 16</b>	Franco Arenoso	TC, VR	52
<b>Yaracuy 17</b>	Franco Arenoso	TC, VR	61
<b>Yaracuy 18</b>	Franco Arenoso	TC, VR, DP	70
<b>Yaracuy 19</b>	Franco Arenoso	TC, VR	67

B: bosque, P: pastizales, TC: tierra cultivada, VR: vegas de ríos, DP: sectores poblados, CC: calles y carreteras.

Fuente: Elaboración propia

#### **4.7 Modelado hidrológico utilizando el HEC-HMS**

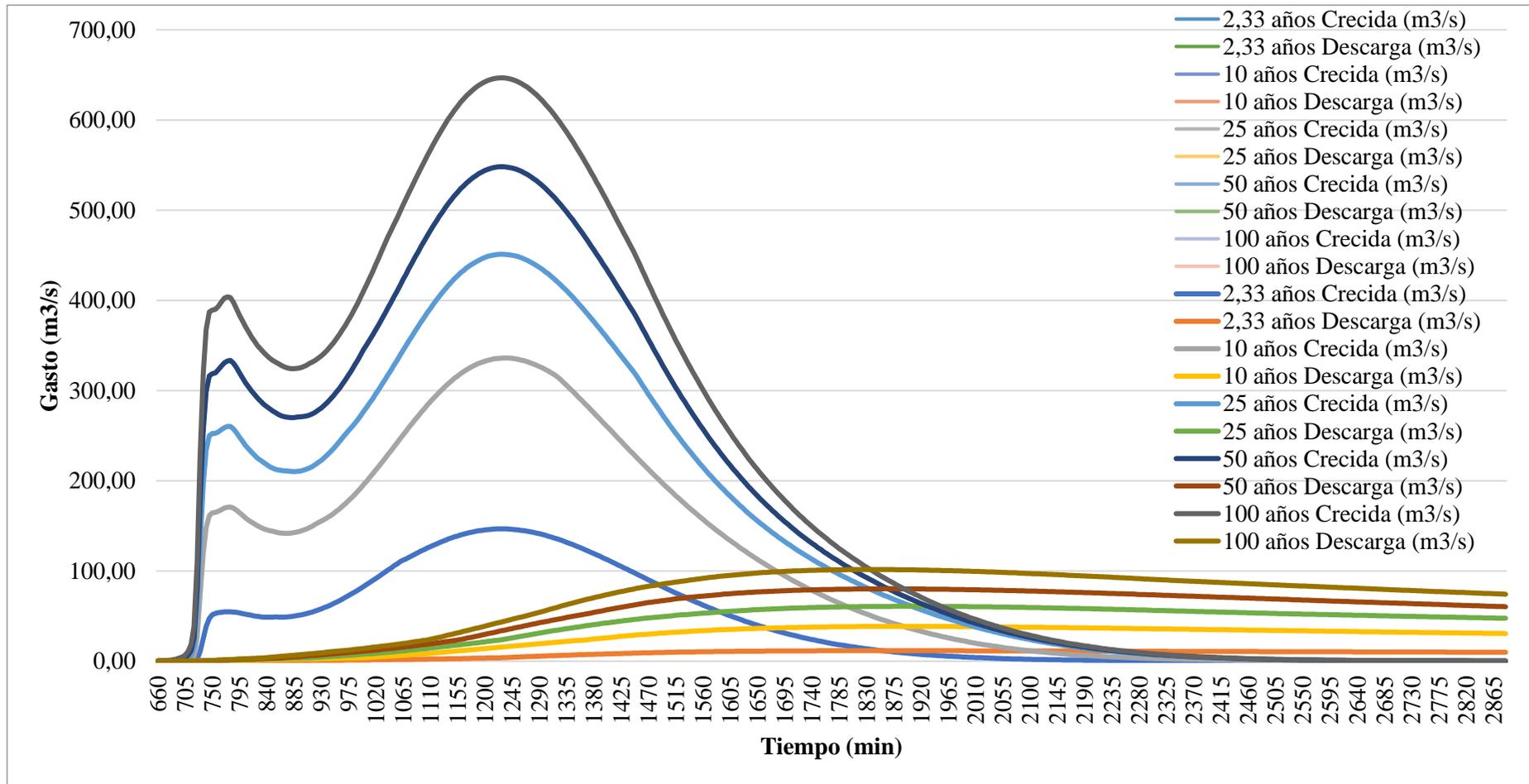
En la Figura 19 se muestra la idealización de la cuenca del río Yaracuy hasta el embalse de Cumaripa. La idealización consta de setenta y dos (72) subcuencas, veintiocho (28) tramos de tránsito y un embalse.



#### 4.8 Hidrogramas de crecidas

El paquete de programas del HEC-HMS permitió el cálculo de los hidrogramas de crecidas afluentes al embalse de Cumaripa para diferentes frecuencias, los cuales se muestran en la Figura 20. Es importante acotar que los hidrogramas tienen dos picos, característica que tiene su origen, en el hecho, de que la cuenca del río Yaracuy está fraccionada en dos sectores bien diferenciados que contribuyen con caudal líquido al embalse, que son el propio río Yaracuy por el oeste, y el río Sarare por el sur-oeste, además de otros ríos tributarios que aportan de manera directa al embalse.

Los sectores de la cuenca, localizados hacia el este de la misma, se caracterizan por tener pendientes fuertes, ciertamente tan altas como las existentes cerca del poblado de Urachiche (oeste de la cuenca), aguas arriba del río Yaracuy; pero a efectos comparativos, dicho sector se encuentra más cerca del embalse, por lo que el tiempo en el que el escurrimiento superficial alcanza el cauce y luego es transitado hasta el embalse, lo hace más rápidamente que aquellos caudales provenientes del río Yaracuy. En la Figura 14 se puede apreciar cómo se encuentra sectorizado el aporte hacia el embalse, tomando en cuenta que el río Sarare tiene su nacimiento en el río El Calichito (más cerca del embalse), mientras que el río Yaracuy lo tiene en el río Urachiche (lejos del embalse).



**Figura 15 Hidrogramas de crecidas afluentes y descargas por alivio para distintas frecuencias**

Fuente: Elaboración propia

*Cuantificación de la carga lavada y de material de lecho hasta un sitio de embalse y comparación con valores reportados por batimetrías.*

#### 4.8.1 Caudales picos afluentes y descargas por alivio del embalse Cumaripa

En la Tabla 12 se presentan los caudales picos de los diferentes hidrogramas de crecida afluentes, así como los descargados por el aliviadero, los volúmenes máximos asociados a cada uno y los niveles máximos alcanzados por el agua en el embalse para cada periodo de retorno.

**Tabla 12 Gastos picos, volúmenes máximos y descargas por alivio del embalse Cumaripa**

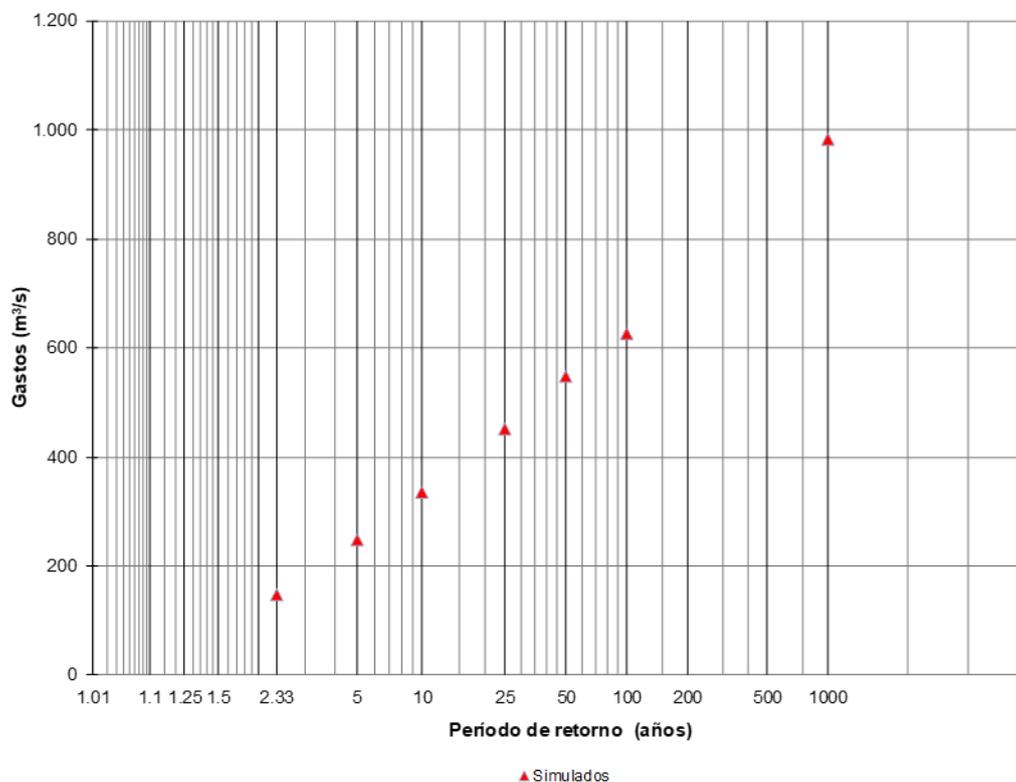
T (años)	Crecida		Descarga		Niveles
	Qp (m <sup>3</sup> /s)	Vmáx (m <sup>3</sup> )	Qp (m <sup>3</sup> /s)	Vmáx (m <sup>3</sup> )	N (msnm)
<b>2,33</b>	147	5.464.900	12	1.046.400	202,7
<b>5</b>	249	9.714.500	23	2.148.500	203
<b>10</b>	336	13.741.700	38	3.472.500	203,3
<b>25</b>	451	19.375.800	61	5.481.200	203,6
<b>50</b>	548	23.577.000	80	7.236.100	203,9
<b>100</b>	647	27.820.900	102	9.086.000	204,2
<b>1000</b>	984	42.972.700	186	16.448.200	205,1

Fuente: Elaboración propia

Dado que no se contó con el estudio hidrológico de crecidas del proyecto de la presa, y tampoco disponer de la memoria descriptiva de proyecto del embalse de Cumaripa realizado por FUDECO (1971) se procedió a simular la crecida milenaria y comparar la magnitud descargada por el aliviadero, con el gasto y carga de agua reportado en la revista El Agua Tomo I-Edición Especial (1995) donde se indican los valores de 190 m<sup>3</sup>/s y 2,70 metros, respectivamente.

De acuerdo a la simulación realizada, considerando la ocurrencia de una tormenta simple con frecuencia de 1.000 años, se obtuvo que el gasto pico descargado por el aliviadero asciende a 186 m<sup>3</sup>/s y carga de agua de 2,80 metros. Ambos valores son similares a los reportados en la publicación citada. Obviamente, dado que no se cuenta con el estudio hidrológico del proyecto, es una suposición afirmar que en efecto la obra de alivio fue diseñada con un evento con periodo de retorno de 1.000 años.

Otra metodología para corroborar la crecida milenaria fue a través de un análisis de gastos máximos en papel Gumbel, graficando el conjunto de caudales asociados a su periodo de retorno, donde se ve una tendencia recta, lo que representa la confiabilidad en los resultados obtenidos de acuerdo a una distribución de Gumbel. Los gastos máximos ploteados en papel de probabilidades Gumbel para las crecidas en diferentes frecuencias se observan en la Figura 16.



**Figura 16 Gastos máximos ploteados en papel de probabilidades de Gumbel**  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.9 Producción de sedimentos

Partiendo de la ecuación propuesta por Williams y Berndt (1975), a continuación, se presentan los resultados asociados a cada uno de los parámetros que intervienen en la MUSLE, además los valores estimados para de la carga lavada para los eventos de lluvia con frecuencias de 2,33, 10, 25, 50 y 100 años.

##### 4.9.1 Caudales pico, volúmenes de escurrimiento superficial y rendimientos medios anuales líquidos

En la Tabla 13 se muestran los valores de caudales pico, volúmenes de escurrimiento superficial, así como de los rendimientos medios anuales líquidos, asociados a cada una de las subcuencas, para los diferentes periodos de retorno. Los valores de los caudales y volúmenes fueron resultado del modelo hidrológico realizado con el HEC-HMS.

Por otra parte, el cálculo del rendimiento medio anual líquido por subcuenca, se obtuvo estableciendo la relación que hay entre rendimiento total de la cuenca sobre el área que ocupa una subcuenca.

Para determinar el rendimiento total de la cuenca, se realizó la operación de embalse, que consta en la diferencia del volumen que hubo entre días consecutivos más los aportes ocurridos en el primer día, más la lluvia directa en el vaso y posteriormente eliminando el volumen de agua por efectos de la evaporación y de la extracciones controladas (obra de toma) y no controladas (alivio), el resultado de dicho balance es el rendimiento diario del embalse, que posteriormente fue promediado con el conjunto de aportes de todos los días de todos los años, a manera de obtener el rendimiento anual del embalse.

A efectos del presente estudio se trabajó con la metodología establecida por el MINEA, en la cual, para determinar los aportes diarios al embalse, se considera un factor que permite la estimación del escurrimiento de una manera más cercana a la realidad. Dicho factor toma en cuenta es que cuando la resolución de la operación de embalse fuese negativa, se considera en ese día que su valor es cero. Por ello se puede considerar que el valor de  $105,65 \text{ Hm}^3$  es el rendimiento medio anual líquido afluente al embalse a efectos de dicha metodología.

**Tabla 13 Caudales pico, volúmenes de escurrimiento superficial y rendimientos medios anuales líquidos**

T	2,33 años		10 años		25 años		50 años		100 años		Q <sub>A</sub> (m <sup>3</sup> )
	Q (m <sup>3</sup> )	q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> )	q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> )	q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> )	q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> )	q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	
Buenos Aires 1	91.100	22,6	237.000	58,3	335.100	81,3	412.600	101,4	492.600	122,1	1.393.255
Buenos Aires 2	331.200	60,7	823.800	146,4	1.149.500	200,9	1.405.400	248,7	1.668.200	298,0	4.466.391
Canape 1	411.400	59,6	840.500	114,5	1.110.200	147,5	1.304.900	174,5	1.504.300	202,2	4.536.178
Canape 2	299.400	32,8	758.500	79,8	1.066.800	110,8	1.269.700	133,6	1.480.000	157,1	5.682.685
Comunare 1	374.300	70,8	876.400	158,2	1.201.000	212,5	1.453.700	259,4	1.711.600	307,4	4.187.242
Comunare 2	33.500	8,6	115.400	33,5	175.500	52,7	224.800	70,0	276.800	88,1	1.074.227
Comunare 3	44.900	9,4	109.700	22,1	152.200	30,1	184.200	36,8	217.000	43,6	593.193
Comunare 4	163.600	29,9	350.600	60,2	467.500	77,9	557.300	93,2	648.200	108,7	1.410.702
Comunare 5	103.800	19,3	258.300	46,5	360.500	64,0	440.800	79,1	523.100	94,7	1.393.255
Comunare 6	900	0,3	2.300	0,9	3.200	1,2	3.900	1,5	4.700	1,8	12.462
Qda. Cumaripa	20.400	3,7	57.200	10,2	82.600	14,6	155.700	28,7	114.900	20,9	478.542
El Calichito 1	14.400	2,0	66.200	11,3	108.200	19,4	141.300	26,9	177.300	35,5	1.632.526
El Calichito 2	24.800	5,6	31.200	7,4	50.700	12,9	63.900	16,9	78.000	21,3	555.806
El Calichito 3	8.700	1,9	39.800	11,1	64.600	19,2	80.800	24,9	98.000	31,0	655.503
El Calichito 4	18.100	3,5	83.000	20,2	134.600	34,6	168.300	45,0	204.300	56,2	1.365.838
El Calichito 5	900	0,1	4.000	0,9	6.500	1,6	8.700	2,3	11.000	3,1	114.651
El Charo	22.200	2,3	94.900	10,1	152.000	16,5	191.100	21,5	233.100	26,9	1.542.799
El Limonero 1	23.100	2,0	84.100	7,0	129.800	10,8	158.900	13,6	189.800	16,5	1.049.303
El Limonero 2	8.300	1,1	37.900	5,9	62.100	10,2	82.600	14,5	105.100	19,4	1.091.674
Guasopo	8.300	1,0	38.200	5,5	62.500	9,4	83.200	13,3	105.900	17,8	1.099.151
Las Corazas 1	6.100	0,8	28.100	4,1	45.600	6,9	57.400	9,0	70.000	11,4	491.004
Las Corazas 2	89.500	16,0	220.700	38,3	308.300	52,6	370.600	63,9	435.200	76,0	1.694.836
Las Corazas 3	89.200	26,6	236.900	70,3	337.000	98,5	398.800	118,5	462.700	139,0	1.794.532
Las Delicias 1	25.200	4,2	61.600	10,0	86.300	14,0	105.900	17,5	126.500	21,3	685.412
Las Delicias 2	56.400	10,0	137.700	23,9	192.500	32,9	235.700	41,1	280.800	49,6	1.231.248
Los Caracoles 1	11.500	1,2	52.900	6,2	86.600	10,6	115.200	14,9	146.700	19,8	1.522.860
Los Caracoles 2	2.900	0,5	13.200	2,7	21.700	4,9	28.900	7,1	36.700	9,5	381.338
Los Caracoles 3	3.700	0,4	17.000	2,2	27.900	3,8	37.200	5,4	47.300	7,2	491.004
Los Cogollos 1	70.000	8,5	218.500	26,6	328.000	40,1	417.500	52,8	513.600	66,9	3.823.350
Los Cogollos 2	90.300	23,9	241.400	67,4	347.400	97,2	432.500	125,6	522.600	155,8	3.220.188
Los Cogollos 3	21.000	5,4	56.200	15,0	80.900	21,8	100.800	27,9	121.800	34,3	750.214
Los Cogollos 4	15.900	3,9	42.600	10,8	61.300	15,8	76.300	20,3	92.200	25,1	568.268
Los Horcones	20.500	5,6	80.200	27,8	126.000	45,0	163.700	60,6	204.100	78,2	1.066.750
Mata Caballo 1	359.400	48,3	837.600	107,4	1.149.500	145,0	1.379.900	175,9	1.616.700	207,7	4.920.009
Mata Caballo 2	184.000	44,2	399.300	92,2	538.500	121,3	646.800	146,7	758.600	173,0	2.559.701
Mata Caballo 3	29.500	6,5	61.500	12,9	81.800	16,6	96.400	19,7	111.400	22,8	346.444
Mata Caballo 4	63.400	10,6	160.300	26,0	224.700	35,8	264.100	42,5	304.900	49,5	1.104.136
Medina 1	10.900	1,7	46.100	8,4	74.100	14,3	97.800	20,0	123.700	26,6	1.208.817
Medina 2	9.900	1,6	41.600	7,9	66.900	13,5	88.300	19,1	111.700	25,5	1.091.674
Medina 3	2.800	0,5	12.000	2,5	19.300	4,4	25.400	6,2	32.100	8,3	314.043
Medina 4	1.400	0,3	5.800	1,4	9.300	2,5	12.300	3,5	15.600	4,7	152.037
Medina 5	700	0,3	1.900	0,7	2.700	1,0	3.300	1,4	4.000	1,7	24.924
Medina 6	7.300	1,6	19.600	4,4	28.200	6,4	35.100	8,3	42.500	10,2	261.703
Mullitas 1	6.800	0,8	34.400	5,1	57.400	9,0	77.000	13,1	98.700	17,7	1.091.674
Mullitas 2	700	0,1	3.400	0,7	5.600	1,3	7.600	1,9	9.700	2,6	107.173
Quibayo 1	1.107.600	99,2	2.368.200	199,4	3.155.400	259,5	3.714.600	307,5	4.280.900	355,3	10.126.644
Quibayo 2	47.800	5,5	256.300	34,4	428.400	59,8	541.900	78,8	664.200	99,8	4.934.963
Quibayo 3	3.200	0,5	19.200	4,5	32.600	8,1	41.500	11,1	51.100	14,5	401.277
Quibayo 4	31.900	7,1	136.900	37,8	219.100	64,4	272.300	83,4	329.100	103,6	2.093.621
Quibayo 5	19.900	4,1	98.200	28,3	161.600	50,5	203.100	67,7	247.800	86,4	1.744.684
Quibayo 6	10.500	1,9	56.300	13,8	94.100	25,0	119.100	33,7	145.900	43,2	1.084.196
Urachiche 1	467.100	71,5	1.312.400	197,9	1.895.500	284,6	2.361.400	361,3	2.845.200	441,6	8.862.995
Urachiche 2	74.200	18,3	197.800	48,6	281.600	68,5	348.100	85,9	416.700	103,8	1.216.294

*Cuantificación de la carga lavada y de material de lecho hasta un sitio de embalse y comparación con valores reportados por batimetrías.*

**Continuación Tabla 13 Caudales pico, volúmenes de escurrimiento superficial y rendimientos medios anuales líquidos**

T	2,33 años		10 años		25 años		50 años		100 años		Q <sub>A</sub> (m <sup>3</sup> )
	Q (m <sup>3</sup> )	q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> )	q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> )	q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> )	q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> )	q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	
Yaracuy 1	13.200	2,9	36.000	8,0	51.600	11,3	64.000	14,3	76.900	17,3	231.794
Yaracuy 2	1.200	0,2	5.200	1,2	8.400	2,1	11.100	2,9	13.900	3,8	67.295
Yaracuy 3	116.500	15,7	303.200	39,7	428.600	55,3	527.800	69,1	630.000	83,3	1.782.070
Yaracuy 4	2.800	0,6	9.000	1,9	13.400	2,9	17.000	3,7	20.800	4,6	74.772
Yaracuy 5	12.100	2,5	29.800	6,0	41.500	8,2	49.800	10,0	58.400	11,8	171.976
Yaracuy 6	13.900	3,1	31.500	6,6	42.700	8,7	49.500	10,1	56.500	11,5	174.468
Yaracuy 7	27.800	4,8	63.000	10,4	85.500	13,7	99.000	15,9	112.900	18,2	348.937
Yaracuy 8	50.800	8,6	110.200	17,9	148.500	23,6	177.100	28,3	206.600	33,3	702.858
Yaracuy 9	38.400	9,2	118.700	30,2	176.000	45,2	212.000	55,7	249.600	66,7	1.166.446
Yaracuy 10	56.700	12,6	128.300	27,0	174.000	35,6	201.600	41,3	229.800	47,2	710.336
Yaracuy 11	1.900	0,5	4.800	1,3	6.800	1,7	8.000	2,1	9.300	2,4	34.894
Yaracuy 12	8.900	1,4	21.100	3,2	29.000	4,3	33.800	5,0	38.700	5,8	127.113
Yaracuy 13	50.200	8,0	133.300	20,6	189.600	29,1	224.300	34,8	260.300	40,8	1.009.424
Yaracuy 14	5.100	1,0	11.300	2,0	15.200	2,6	17.500	3,1	19.900	3,5	59.818
Yaracuy 15	7.100	0,8	17.000	1,8	23.500	2,4	27.500	2,8	31.600	3,3	107.173
Yaracuy 16	1.000	0,1	7.500	0,8	13.300	1,5	17.200	2,1	21.400	2,7	189.423
Yaracuy 17	27.700	2,1	100.700	7,3	155.400	11,3	190.300	14,1	227.200	17,1	1.256.172
Yaracuy 18	81.600	12,9	216.900	33,5	308.500	47,2	365.000	56,5	423.500	66,2	1.642.495
Yaracuy 19	3.300	0,7	9.600	2,2	14.000	3,1	16.700	3,8	19.600	4,5	84.742

Fuente: Elaboración propia

#### 4.9.2 Factor de erodabilidad de los suelos K

Una de las limitantes para este trabajo, fue la no disponibilidad de datos respecto al tipo de textura de los suelos en la cuenca, ya que en las sedes del MINEA, tanto de Caracas como en San Felipe, no se dispone de esta información.

Este inconveniente se resolvió, recurriendo a diferentes estudios geológicos de la zona, los cuales son “Pedogénesis de una cronosecuencia de suelos en la región de Yaritagua y Guama, estado Yaracuy-Venezuela, 2007” y el “Informe Geoambiental ESTADO YARACUY, 2011”, donde se indica en ambos casos que las formaciones geológicas de la zona están formadas por rocas metamórficas, cuarzo y caliza, areniscas cuarzo-micáceas de grano medio a grueso, entre otras, que cuando se meteorizan dan como resultado a distintas texturas de suelos, cuyo tamaño dominante es dominado por la fracción arenosa, por lo que la clase textural de los mismos es la franco-arenosa debido a la presencia de minerales resistentes a la meteorización, principalmente cuarzo y mica moscovita.

Por otro lado, se encuentran limos en menor proporción, y, en las zonas más meteorizadas de la cuenca, pequeñas cantidades de arcilla, las cuales no permiten establecer una diferenciación clara entre los grupos de suelo.

Esta información a su vez fue corroborada en entrevistas con profesionales en la materia, quienes a su vez conocían la zona por haber hecho algún trabajo de campo.

Para efectos de este estudio, estimar el valor de K afecta los resultados de la MUSLE pues, depende de la textura de los suelos y del porcentaje de materia orgánica. Por otra parte, el peso unitario seco de los suelos de la cuenca también se ve afectado, pues debe ser ponderado de acuerdo a su distribución textural. Esto será tratado más adelante.

De acuerdo a la información recabada de los suelos en la cuenca, y mediante el uso de la tabla 1 ubicada en el marco teórico, se determinó el valor de K para cada una de las subcuencas, el cual se puede observar en la Tabla 14.

#### 4.9.3 Factor de cobertura vegetal C

El cálculo del factor de cobertura vegetal C, se presenta en el Anexo 5 de acuerdo con lo indicado en el apartado 3.12 del marco metodológico. De manera resumida, se presenta el valor de C en la Tabla 14.

#### 4.9.4 Factor topográfico LS

Siguiendo el procedimiento indicado en el marco teórico, en el Anexo 6 se encuentran los cálculos, para determinar el factor topográfico LS. Los valores de dicho factor para cada subcuenca, se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14 valores por subcuenca de los factores de la MUSLE**

Subcuenca	Suelos		Tipo y altura de cubierta vegetal	K	LS	C
	% M <sub>0</sub>	Textura				
<b>Buenos Aires 1</b>	Bajo	Franco Arenoso	CI, MA, M	0,036	22,537	0,164
<b>Buenos Aires 2</b>	Bajo	Franco Arenoso	CI, MA, M	0,046	36,977	0,144
<b>Canape 1</b>	Alto	Franco Arenoso	CI, MA, M, A	0,046	0,846	0,123
<b>Canape 2</b>	Alto	Franco Arenoso	CI, M	0,036	0,400	0,114
<b>Comunare 1</b>	Alto	Franco Arenoso	CI, MA, M, A	0,040	29,060	0,084
<b>Comunare 2</b>	Bajo	Franco Arenoso	MA, A	0,036	22,723	0,067
<b>Comunare 3</b>	Moderado	Franco Arenoso	CI, M	0,046	3,526	0,037
<b>Comunare 4</b>	Moderado	Franco Arenoso	CI, MA, M, A	0,032	2,738	0,135
<b>Comunare 5</b>	Moderado	Franco Arenoso	CI, MA, M, A	0,040	22,872	0,129
<b>Comunare 6</b>	Moderado	Franco Arenoso	CI, MA, M, A	0,040	0,618	0,134
<b>Qda. Cumaripa</b>	Moderado	Franco Arenoso	CI, M	0,032	0,359	0,074
<b>El Calichito 1</b>	Moderado	Franco Arenoso	MA, M, A	0,032	13,581	0,151
<b>El Calichito 2</b>	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	13,536	0,151
<b>El Calichito 3</b>	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	9,050	0,151
<b>El Calichito 4</b>	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	9,360	0,151
<b>El Calichito 5</b>	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	10,474	0,151
<b>El Charo</b>	Alto	Franco Arenoso	CI, M	0,032	0,390	0,062
<b>El Limonero 1</b>	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,046	9,360	0,127
<b>El Limonero 2</b>	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,046	4,868	0,127

Continuación Tabla 14 Valores por subcuenca de los factores de la MUSLE

Subcuenca	Suelos		Tipo y altura de cubierta vegetal	K	LS	C
	% M <sub>o</sub>	Textura				
Guasopo	Alto	Franco Arenoso	CI,MA,M	0,046	1,391	0,110
Las Corazas 1	Moderado	Franco Arenoso	MA, M, A	0,032	11,714	0,140
Las Corazas 2	Moderado	Franco Arenoso	MA, M, A	0,032	9,050	0,035
Las Corazas 3	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	9,135	0,035
Las Delicias 1	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	5,888	0,127
Las Delicias 2	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	13,099	0,127
Los Caracoles 1	Moderado	Franco Arenoso	MA, M, A	0,032	18,922	0,135
Los Caracoles 2	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	15,356	0,125
Los Caracoles 3	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	13,358	0,141
Los Cogollos 1	Moderado	Franco Arenoso	MA, M, A	0,040	15,163	0,087
Los Cogollos 2	Moderado	Franco Arenoso	MA, M, A	0,040	15,211	0,111
Los Cogollos 3	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	11,714	0,138
Los Cogollos 4	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	16,213	0,123
Los Horcones	Moderado	Franco Arenoso	MA, M, A	0,032	15,114	0,127
Mata Caballo 1	Bajo	Franco Arenoso	CI, MA, M	0,036	2,757	0,147
Mata Caballo 2	Bajo	Franco Arenoso	MA, A	0,036	25,459	0,054
Mata Caballo 3	Bajo	Franco Arenoso	CI, MA, M	0,036	0,952	0,113
Mata Caballo 4	Bajo	Franco Arenoso	CI, M	0,036	0,485	0,102
Medina 1	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	15,163	0,062
Medina 2	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	12,070	0,062
Medina 3	Moderado	Franco Arenoso	MA, M, A	0,032	13,271	0,151
Medina 4	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	24,319	0,151
Medina 5	Moderado	Franco Arenoso	MA, M, A	0,032	15,114	0,151
Medina 6	Moderado	Franco Arenoso	MA, M, A	0,032	6,945	0,151
Mulitas 1	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,036	18,298	0,075
Mulitas 2	Moderado	Franco Arenoso	MA, M, A	0,032	7,296	0,075
Quibayo 1	Bajo	Franco Arenoso	CI, MA, M	0,036	2,007	0,083
Quibayo 2	Bajo	Franco Arenoso	M, A	0,036	12,144	0,055
Quibayo 3	Bajo	Franco Arenoso	MA, M, A	0,046	17,613	0,076
Quibayo 4	Bajo	Franco Arenoso	CI, M, A	0,046	19,826	0,073
Quibayo 5	Bajo	Franco Arenoso	CI, M, A	0,046	16,351	0,077
Quibayo 6	Bajo	Franco Arenoso	M, A	0,046	11,611	0,028
Urachiche 1	Bajo	Franco Arenoso	MA,A	0,036	25,356	0,140
Urachiche 2	Bajo	Franco Arenoso	MA,M	0,036	19,214	0,138
Yaracuy 1	Bajo	Franco Arenoso	CI, M	0,036	10,102	0,082
Yaracuy 2	Moderado	Franco Arenoso	CI, M	0,040	2,757	0,101
Yaracuy 3	Alto	Franco Arenoso	CI, M	0,032	0,462	0,115
Yaracuy 4	Alto	Franco Arenoso	M	0,032	0,439	0,001
Yaracuy 5	Alto	Franco Arenoso	CI, M	0,032	0,342	0,079
Yaracuy 6	Bajo	Franco Arenoso	CI, M	0,046	0,368	0,079
Yaracuy 7	Alto	Franco Arenoso	CI, M	0,032	0,413	0,097
Yaracuy 8	Bajo	Franco Arenoso	MA, M	0,046	0,941	0,102
Yaracuy 9	Alto	Franco Arenoso	CI, M	0,032	0,741	0,095
Yaracuy 10	Bajo	Franco Arenoso	CI, M	0,046	0,763	0,079
Yaracuy 11	Moderado	Franco Arenoso	M	0,032	0,811	0,001
Yaracuy 12	Moderado	Franco Arenoso	CI, M	0,032	0,475	0,095
Yaracuy 13	Bajo	Franco Arenoso	CI, M	0,046	0,443	0,073
Yaracuy 14	Moderado	Franco Arenoso	CI, M	0,040	0,407	0,061
Yaracuy 15	Moderado	Franco Arenoso	CI, MA, M	0,040	0,350	0,088
Yaracuy 16	Moderado	Franco Arenoso	CI, M	0,040	0,320	0,129
Yaracuy 17	Alto	Franco Arenoso	CI, M	0,032	0,682	0,080
Yaracuy 18	Alto	Franco Arenoso	CI, M	0,032	0,352	0,067
Yaracuy 19	Alto	Franco Arenoso	CI, M	0,032	0,374	0,129

%M<sub>o</sub>: porcentaje de materia orgánica

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que el valor de LS para cada subcuenca, se encuentra distanciado en orden de magnitud, lo cual se debe a que dicho factor depende de una de las variables de mayor peso, que es el relieve que posee cada subcuenca, esto quiere decir que en las zonas más montañosas los valores de LS serán mayores que los calculados en el valle de la cuenca.

#### **4.9.5 Factor de prácticas de conservación de suelos P**

A efectos del presente estudio se consideró el factor P de prácticas de cultivo, o de protección del suelo, o de conservación del suelo, un valor de 1, lo que implica la presencia de suelos sin prácticas de conservación.

#### **4.9.6 Resultado de la producción de la cuenca utilizando la ecuación referenciada por Simons y Şentürk (1992)**

Los resultados de la producción de sedimentos calculada con la MUSLE, para los períodos de retorno incremental de 2,33, 10, 25, 50 y 100 años, y a su vez, la carga lavada media anual obtenida de la ponderación de los datos de dicho análisis con la ecuación propuesta por Simons y Şentürk, se muestran a continuación para cada subcuenca:

**Tabla 15 Carga lavada para diferentes eventos de lluvia y valor medio anual para cada subcuenca**

Subcuenca	Carga lavada (t)						As (t/año)
	2,33 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	
Buenos Aires 1	5.389	10.520	15.651	22.891	29.107	35.668	88.723
Buenos Aires 2	35.545	66.703	96.939	139.473	175.907	214.268	509.547
Canape 1	776	1.242	1.669	2.247	2.703	3.179	8.823
Canape 2	159	299	441	642	786	938	3.212
Comunare 1	16.540	29.523	41.782	58.802	73.170	88.175	194.294
Comunare 2	738	1.872	3.159	5.149	6.934	8.862	28.129
Comunare 3	100	184	266	380	474	571	1.398
Comunare 4	778	1.292	1.764	2.394	2.920	3.464	6.938
Comunare 5	4.708	8.831	12.835	18.499	23.312	28.379	67.162
Comunare 6	1	2	3	4	5	6	14
Qda.Cumaripa	5	21	17	26	53	38	139
El Calichito 1	243	801	1.508	2.687	3.747	4.970	36.154
El Calichito 2	658	460	875	1.568	2.077	2.643	15.504
El Calichito 3	134	438	842	1.500	1.967	2.478	13.290
El Calichito 4	293	964	1.837	3.255	4.274	5.395	28.999
El Calichito 5	8	36	66	119	172	232	1.743
El Charo	4	11	20	35	46	58	325
El Limonero 1	264	651	1.099	1.786	2.276	2.801	13.406
El Limonero 2	55	176	332	595	850	1.146	9.409
Guasopo	13	42	79	141	201	271	2.234
Las Corazas 1	72	227	423	742	980	1.250	7.200
Las Corazas 2	335	622	905	1.304	1.612	1.944	6.736
Las Corazas 3	505	1.002	1.503	2.212	2.696	3.203	10.949
Las Delicias 1	207	383	555	809	1.028	1.268	6.005
Las Delicias 2	1.175	2.176	3.154	4.551	5.774	7.076	27.324
Los Caracoles 1	201	640	1.184	2.106	2.990	4.015	33.557
Los Caracoles 2	48	155	289	532	769	1.035	8.312
Los Caracoles 3	48	162	291	522	746	1.003	8.236

**Continuación Tabla 15 Carga lavada para diferentes eventos de lluvia y valor medio anual para cada subcuenca**

Subcuenca	Carga lavada (t)						As (t/año)
	2,33 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	
Los Cogollos 1	1.067	2.381	3.822	6.038	8.063	10.338	65.045
Los Cogollos 2	2.809	5.756	8.706	13.104	17.101	21.451	111.091
Los Cogollos 3	465	939	1.430	2.162	2.807	3.503	18.325
Los Cogollos 4	409	829	1.256	1.906	2.479	3.105	16.141
Los Horcones	494	1.455	2.601	4.388	6.002	7.833	32.721
Mata Caballo 1	1.950	3.451	4.900	6.921	8.543	10.245	28.033
Mata Caballo 2	4.327	7.317	10.078	13.894	17.126	20.536	62.810
Mata Caballo 3	42	68	92	124	150	176	505
Mata Caballo 4	39	73	107	155	186	220	713
Medina 1	98	297	538	945	1.332	1.782	13.778
Medina 2	71	215	391	688	976	1.309	10.031
Medina 3	44	132	243	436	616	826	6.288
Medina 4	46	133	241	435	614	827	6.289
Medina 5	17	32	48	72	97	121	644
Medina 6	75	151	230	348	455	568	2.963
Mulitas 1	72	259	504	923	1.342	1.825	15.761
Mulitas 2	2	8	16	30	44	60	498
Quibayo 1	2.253	3.726	5.097	6.937	8.359	9.813	21.316
Quibayo 2	308	1.114	2.199	3.997	5.321	6.806	41.426
Quibayo 3	45	197	422	790	1.078	1.407	8.578
Quibayo 4	783	2.427	4.518	7.924	10.344	12.987	66.207
Quibayo 5	385	1.414	2.775	5.073	6.794	8.706	47.498
Quibayo 6	45	174	351	653	880	1.133	6.591
Urachiche 1	24.642	50.860	77.719	117.030	151.280	187.898	508.604
Urachiche 2	3.063	6.103	9.164	13.535	17.301	21.275	54.328
Yaracuy 1	130	264	401	596	767	946	2.483
Yaracuy 2	3	10	18	31	44	58	217
Yaracuy 3	65	125	185	271	345	423	1.056
Yaracuy 4	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,31
Yaracuy 5	3	6	9	13	16	19	50
Yaracuy 6	6	11	15	21	25	28	81
Yaracuy 7	11	19	27	38	45	52	147
Yaracuy 8	75	126	175	241	294	351	1.083
Yaracuy 9	34	78	124	194	243	294	1.167
Yaracuy 10	62	107	150	208	246	285	809
Yaracuy 11	0,01	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,28
Yaracuy 12	3	6	9	12	14	17	50
Yaracuy 13	24	47	71	105	127	151	520
Yaracuy 14	1	2	3	4	5	6	17
Yaracuy 15	2	3	5	7	8	9	29
Yaracuy 16	0	1	3	5	7	9	66
Yaracuy 17	10	24	40	65	82	101	485
Yaracuy 18	21	41	62	91	111	132	453
Yaracuy 19	1	3	5	7	9	11	40

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los cálculos elaborados se ha estimado para la cuenca del río Yaracuy hasta el embalse de Cumaripa una carga lavada media anual de 2.292.698 toneladas.

#### 4.10 Transporte de material de fondo (*bed material load*)

La aplicación de los métodos dirigidos a estimar la carga de transporte de material de fondo, requirió la realización de las siguientes actividades: una visita de campo en la que se tomaron muestras de material de lecho del río Yaracuy, la realización del ensayo granulométrico de dichas muestras y el cálculo para cada crecida, de los valores de distintos parámetros hidráulicos como son radio hidráulico, tirante de agua, velocidad media del flujo, entre otros para lo cual se utilizó programa HEC-RAS desarrollado por *US Army Corps of Engineers*.

##### 4.10.1 Visita de campo

El día 20 de septiembre de 2017, se realizó la visita al embalse de Cumaripa, donde se tuvo la oportunidad de apreciar la presa Ing. Francisco Amelinck, el aliviadero en operación, la zona de descarga de caudal ecológico, el sitio de medición de nivel de aguas en el embalse, la casa de máquinas donde se opera las válvulas de caudal ecológico y de regulación de agua a la población, y por último el sitio donde funcionarios de la oficina regional del MINEA toman muestras de agua para posterior análisis de la calidad. Ese sitio se encuentra en coordenadas Regven, N:1.120.011 y E:515.785.

##### 4.10.2 Selección del sitio de toma de material de lecho

El lugar seleccionado, coincidió con el sitio que usa el MINEA para sus aforos, el cual presentaba en ese momento un nivel aceptable de agua para entrar en el río y tomar las muestras, sin embargo, debe destacarse que para acceder al mismo es indispensable la utilización de un vehículo rústico. En la Figura 17, se muestra visual del sitio donde se tomaron las muestras de material de fondo.



**Figura 17 Sitio de toma de muestras (mirando hacia aguas arriba)**

Fuente: Elaboración propia

En el sitio de toma de muestras se pudo apreciar que el ancho medio del lecho era de 14 metros, el talud de la banca izquierda presentaba pendientes de 2:1, mientras que para la banca derecha

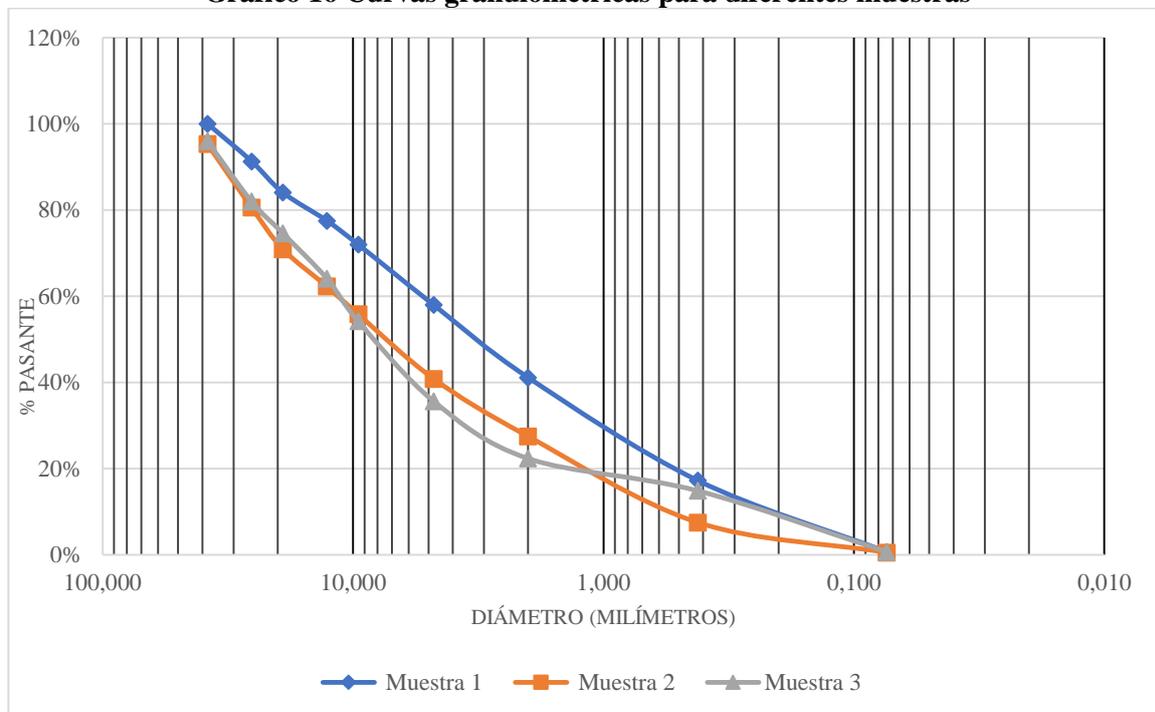
era de 1:1 aproximadamente. También se pudo establecer que las bancas tienen unos 10 metros de largo, con respecto al borde del lecho.

#### 4.10.3 Estudio granulométrico

El estudio granulométrico del material de fondo del río Yaracuy, se realizó según la norma establecida por la ASTM, de acuerdo al ensayo ASTM-D422 (*Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils*).

Luego de efectuar el ensayo del estudio granulométrico, en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica Andrés Bello, donde se elaboraron las curvas granulométricas para cada una de las muestras, las cuales se muestran en el siguiente Gráfico 16:

**Gráfico 16 Curvas granulométricas para diferentes muestras**

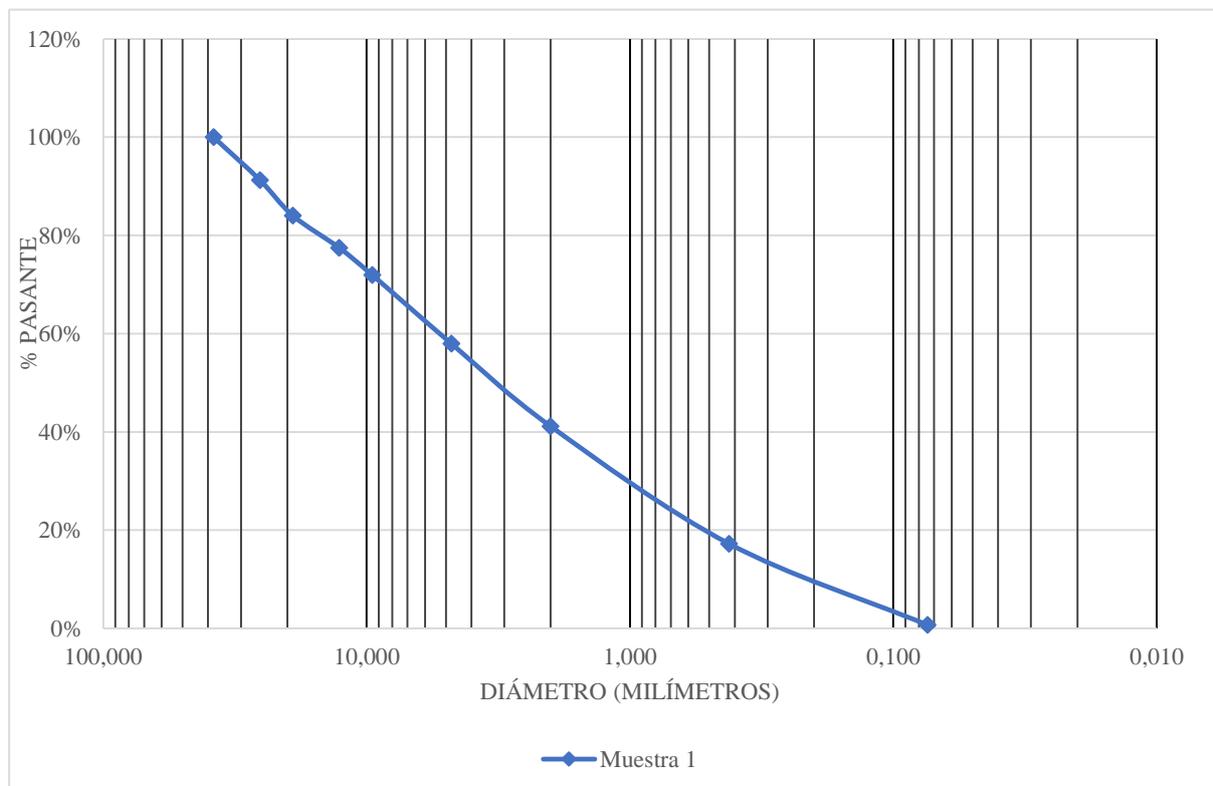


Fuente: Elaboración propia

A efectos del presente estudio se consideró que la curva granulométrica que más se ajusta al tipo de material de fondo, es la curva de la muestra uno, ello debido a la metodología utilizada para tomar las muestras, ya que en el proceso se utilizó una pala, la cual permitió extraer material de lecho, pero, por efectos de la velocidad del flujo en las zonas de mayor profundidad donde se recolectó, el porcentaje más fino de material era lavado por el agua al momento de sacarlo de ella, por lo que, en definitiva, el material recogido eran las partículas más gruesas.

La muestra 1 no está muy perturbada, ya que el material se extrajo en una zona no tan profunda, dentro del río y cerca de la orilla, con un tirante de agua aproximadamente de 8 cm y se consideró que la pérdida de material más fino no se vería mayormente afectada. En cambio, en las muestras 2 y 3, el grado de perturbación y pérdida eventual de material fino es mayor, debido a la distancia que tenía que recorrer la pala desde el fondo hasta fuera de la superficie, en tirantes de agua aproximados a 50 cm. En definitiva, en el Gráfico 17 se presenta la curva granulométrica con la que se trabajó en cada uno de los métodos de transporte de sedimentos.

**Gráfico 17 Curva granulométrica utilizada**



Fuente: Elaboración propia

Los datos del estudio granulométrico con los que se elaboraron, los Gráficos 16 y 17 se presentan en el Anexo 7. Del Gráfico 17 se obtuvieron los diámetros característicos  $d_{65}$  igual a 7,00 mm, y  $d_{50}$  igual a 3,20 mm, los cuales fueron utilizados en los métodos de transporte de sedimentos.

Chien y Wan (1983) recomiendan al  $d_5$ , como el indicador para separar al material asociado a la carga de lavado de aquel que forma parte de la carga de material de fondo. Por lo que se trabajará con el 95 % más grueso de la muestra seleccionada. En este estudio, el  $d_5$  es igual a 0,12 mm.

Debido a que algunos métodos de transporte de sedimentos, como el de Einstein (1950), Yang (1979) y Laursen (1958), basan su cálculo de transporte en la división del material en fracciones (intervalos entre tamaños de grano), en la Tabla 16 se presenta el porcentaje de material para cada fracción de la muestra obtenidos del estudio granulométrico mediante la diferencia del porcentaje de pasante en un intervalo seleccionado, así como la media geométrica para cada fracción de grano.

**Tabla 16 Fracciones de la muestra y media geométrica**

Tamaño de grano (mm)	Fracciones en la muestra (%)	Tamaño (mm)
> 38,1	0	-
38,1 - 19,05	15,96%	26,94
19,05 - 9,52	12,07%	13,47
9,52 - 2,00	30,82%	4,36
2,00 - 0,012	36,14%	0,38
< 0,012	5,00%	-

Fuente: Elaboración propia

#### 4.10.4 Modelo hidráulico utilizando el HEC-RAS

Para realizar el cálculo del transporte de sedimentos se necesitan valores de un conjunto de parámetros como el radio hidráulico, tirante de agua, caudal que fluye sobre el lecho, pendiente de la línea de energía, entre otros, por lo que se utilizó el programa HEC-RAS como herramienta para determinar los perfiles hidráulicos.

Debido a la carencia de información precisa de la topografía del cauce del río Yaracuy en el tramo en estudio de secciones en el canal principal del río Yaracuy, se utilizó la visita de campo como una manera de tener una referencia en cuanto al ancho del cauce del río y forma de las bancas, además de la información que ofrecen los mapas cartográficos en escala 1:25.000 y las imágenes del programa *Google Earth*, para determinar las planicies de inundación, además de estimar la pendiente longitudinal del cauce, de forma de poder crear un conjunto de secciones transversales que se pudieran ingresar en el programa, considerando una sección trapezoidal.

##### a) Coeficientes de rugosidad de Manning

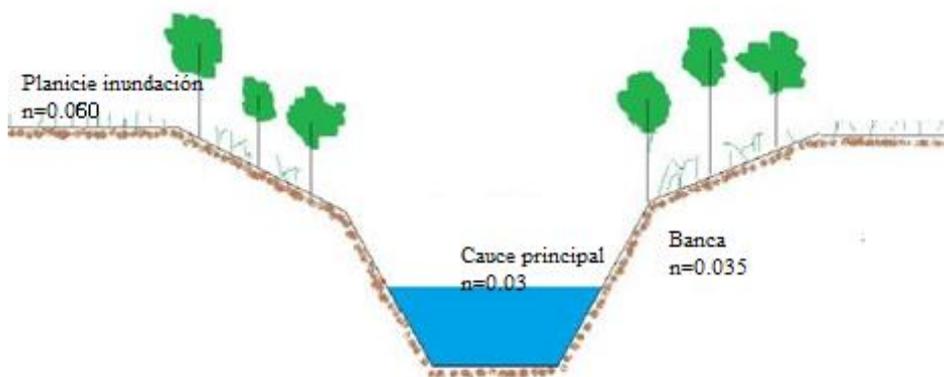
El parámetro de rugosidad es sin duda uno de los más importantes en el flujo con superficie libre. Para el caso de modelos de inundación desarrollados para grandes extensiones de terreno, se pueden cuestionar ampliamente los resultados a la hora de establecer dicho parámetro; sin embargo, la observación de imágenes aéreas y la visita de campo, hacen posible objetar una aproximación válida de este parámetro.

Los valores de rugosidad de Manning, fueron estimados de acuerdo a lo observado en la visita de campo, se pudo ajustar los diferentes valores de rugosidad de Manning, presentados en el manual del programa HEC-RAS según Chow (1959). Se presenta en la Tabla 18, los diferentes valores de rugosidad seleccionados para cada condición de contorno, como pueden ser el lecho, las bancas y las planicies, y en la Figura 18 se presenta un esquema de la sección transversal considerada.

**Tabla 17 Coeficientes de rugosidad de Manning**

Condición	n
Canal	0,030
Bancas	0,035
Planicie de inundación	0,060

Fuente: Elaboración propia



**Figura 18 Esquema de la sección transversal del cauce**

Fuente: Elaboración propia

### b) Caudales generados por las crecidas

Para poder determinar los perfiles hidráulicos y las demás variables hidráulicas, se tomaron como datos los caudales provenientes de hidrogramas de crecidas para cada período de retorno obtenidos del programa HMS. Estos hidrogramas se discretizaron en 21 puntos a lo largo de toda la curva que lo genera y entre cada uno de estos puntos se calculó el gasto medio, a manera de considerar la magnitud completa de la crecida que lo genera y los tiempos en que se desarrollan dichos caudales medios.

Posteriormente, dichos gastos medios fueron ingresados al programa HEC-RAS y utilizando su paquete de herramientas se pudo obtener, los perfiles y variables hidráulicas

De esta forma el gasto sólido que se puede obtener de acuerdo a cada uno de los métodos de transporte, toma en consideración los efectos variables que hay en un hidrograma, como pueden ser el inicio de la escorrentía directa, limbo, el gasto pico, rama descendente y el final de la escorrentía directa.

### **c) Resultados obtenidos con el HEC-RAS**

En el Anexo 8 se presentan tablas con los resultados del cálculo realizado por el HEC-RAS, en ellas, se pueden observar los parámetros que fueron utilizados en los métodos de transporte de sedimentos. Es de suma importancia acotar, que las tablas presentan dos caudales, uno de ellos es el ingresado en el HEC-RAS, según lo explicado en el apartado anterior, y el otro, es resultado del cálculo del programa, ya que para efectos del presente estudio en donde se tiene como objetivo específico, el determinar la carga total de fondo, se requiere de solo el caudal y variables hidráulicas que intervienen directamente sobre el lecho, sin tomar en consideración la fracción del caudal que se desborda sobre las planicies de inundación y aquel que fluye sobre las bancas del río, es decir, cada una de las variables hidráulicas fueron determinadas solamente sobre el lecho.

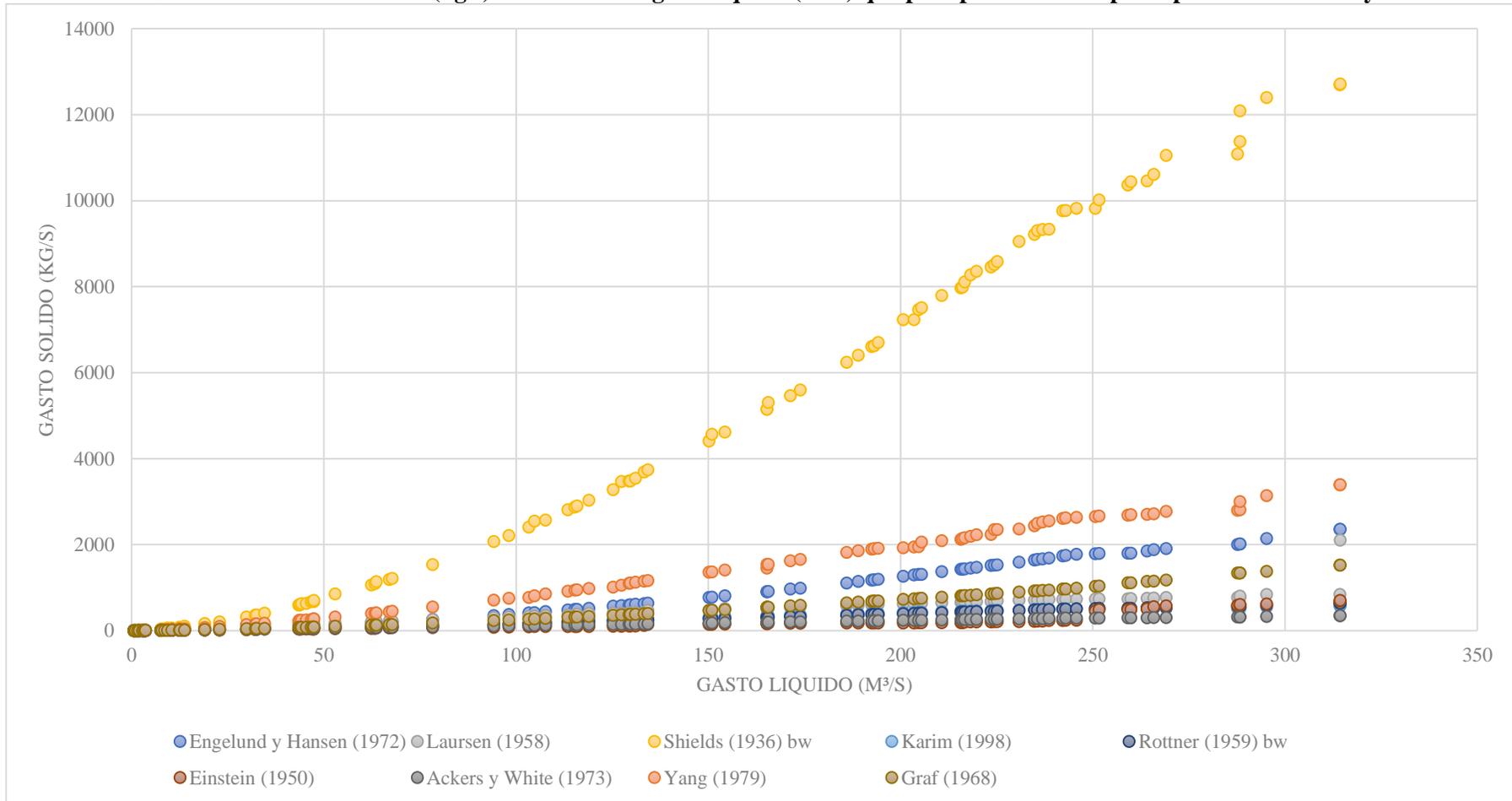
### **d) Resultado del cálculo del transporte del material de fondo**

A continuación, se indican los resultados de los métodos indicados en el presente estudio. En el Gráfico 18, se puede observar para cada uno de los métodos de transporte de material de fondo, la variación del caudal sólido en función del gasto líquido, en el cual se observa lo distinto que pueden ser los resultados de transporte de sedimentos. Por lo tanto, se puede concluir que, no todos los métodos de transporte de sedimentos arrojan resultados similares de carga de material fondo para un mismo río, y más bien, existe la necesidad de tantear entre una amplia variedad de ellos para encontrar el método que mejor se ajuste a las condiciones hidráulicas, y de material de fondo, en el caso en que se requiera obtener una curva como herramienta de calibración de la cantidad de sedimentos que entran al embalse durante la ocurrencia de cualquier gasto.

Es importante destacar que, en el gráfico, se encuentran los diferentes métodos de cálculos desarrollados en el presente estudio; para el cálculo de material de fondo (Rottner, Shields y Einstein), para la carga en suspensión (Einstein) y para el de la carga total de material de fondo (Ackers y White, Graf, Einstein de fondo más Einstein en suspensión, Laursen, Engelund y Hansen, Karim).

Las tablas de cálculo de cada método de transporte de material de fondo como se puede observar en el Anexo 9.

**Gráfico 18 Gasto sólido en (kg/s) en función del gasto líquido (m<sup>3</sup>/s) que pasa por la sección principal del río Yaracuy**



Fuente: Elaboración propia

*Cuantificación de la carga lavada y de material de lecho hasta un sitio de embalse y comparación con valores reportados por batimetrías.*

En la Tabla 18, se presenta el resultado de la carga de material de fondo expresado en toneladas, para cada evento de crecidas y para cada uno de los métodos utilizados. Adicionalmente, se muestran las cargas medias anuales obtenidas de forma similar a la carga lavada, aplicando la ecuación referenciada por Simons y Şentürk.

**Tabla 18 Carga de material de fondo transportada en (t) y carga media anual de transporte**

Métodos de transporte	Tipo	Períodos de retorno (años)					Carga de Material de Fondo (t/año)
		2,33	10	25	50	100	
Shields (1936)	b	76.672	363.039	462.831	689.404	762.016	2.702.319
Einstein (1950)	b + s	3.508	10.873	12.937	17.162	42.228	101.550
Laursen (1958)	t	19.991	38.852	43.106	56.941	58.970	417.596
Rottner (1959)	b	5.540	21.633	26.042	36.686	38.900	167.923
Graf et al (1968)	t	8.730	38.305	49.565	74.469	80.922	294.598
Engelund y Hansen (1972)	t	12.783	63.584	82.614	121.802	132.461	466.375
Ackers y White (1973)	t	1.623	5.330	6.083	8.243	8.603	43.689
Yang (1979)	t	27.142	110.080	134.370	178.949	203.402	841.824
Karim (1998)	t	14.371	38.327	43.194	57.736	60.052	346.445

Tipo de cálculo b: fondo s: suspensión t: total

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, Shields reporta valores más elevados que los otros métodos, solo considerando la carga de material de fondo. Mientras que Laursen, Yang y el de Engelund y Hansen presentan valores con una tendencia similar entre ellos, y, por último, los métodos con valores reportados más bajos son los propuestos por Einstein, Ackers y White, Rottner, Graf y Karim.

#### 4.11 Carga de sedimentos de acuerdo a batimetrías

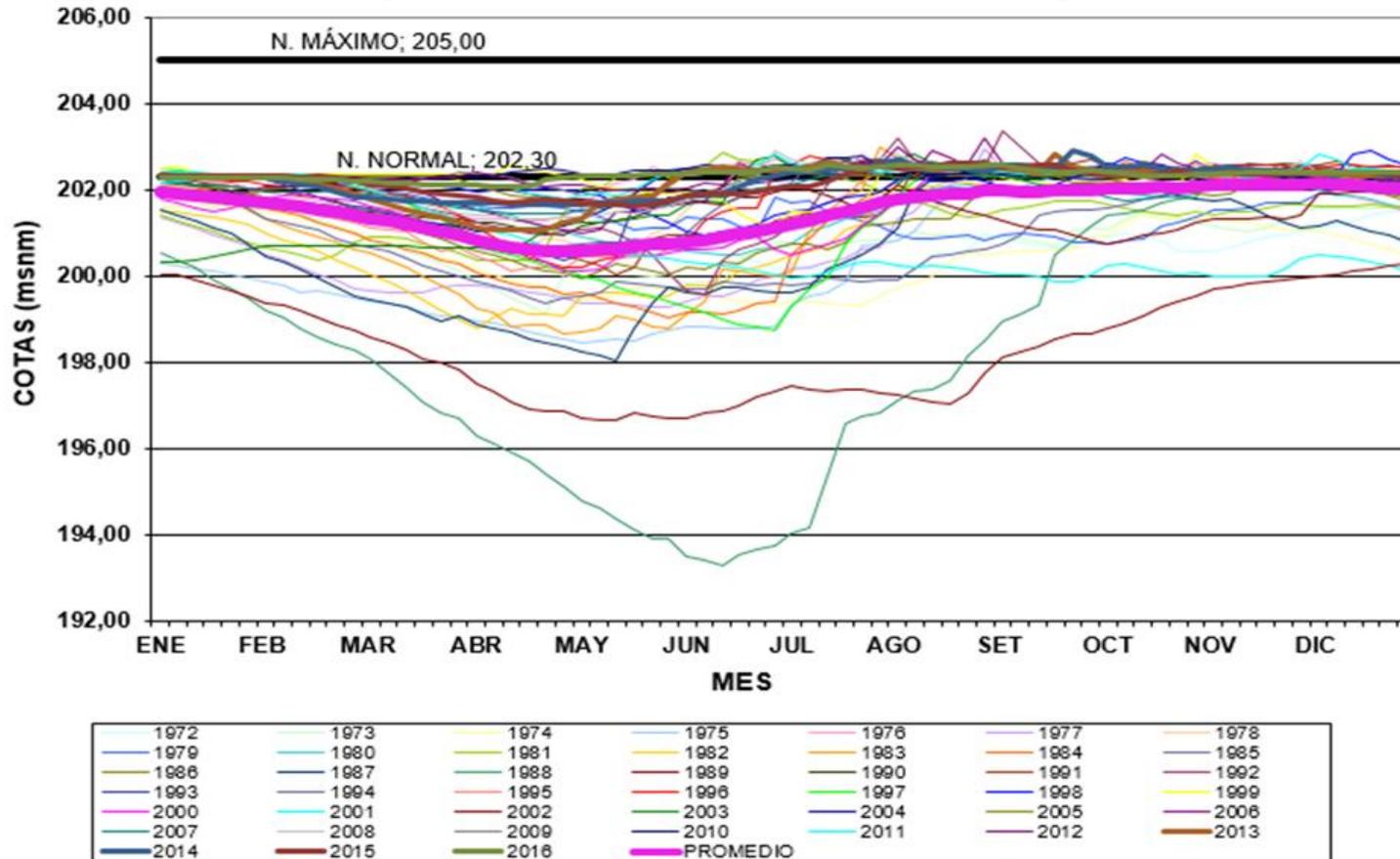
En el presente apartado se presentan los cálculos, dirigidos a determinar la carga total de sedimento que es aportado al embalse de acuerdo a la batimetría del año 1989.

##### 4.11.1 Peso unitario seco

Como los parámetros de peso unitario seco y su constante K, son afectados por la variación de los niveles de agua y el tiempo de residencia de los sedimentos en el embalse, se recabó información de las operaciones anuales del embalse de Cumaripa en el MINEA, para saber en qué escenario de los mencionados en diferentes literaturas sobre diseño de presas se encuentra el embalse.

Se hizo un análisis de los registros históricos de movimientos de embalse cada cinco días y se determinó que, para efectos de este estudio, el embalse de Cumaripa se encuentra con los sedimentos sumergidos todo el tiempo. Para ello, se utilizó el Gráfico 19 donde se pueden ver los movimientos del embalse (1972-2016) y se observa que el nivel promedio de las aguas se mantiene por encima de los 200 msnm, muy cerca del nivel de aguas normales, 202,3 msnm.

Gráfico 19 Registros históricos de movimiento del embalse de Cumaripa cada 5 días



Fuente: MINEA. Coordinación de Embalses

Cuantificación de la carga lavada y de material de lecho hasta un sitio de embalse y comparación con valores reportados por batimetrías.

Debido a que el parámetro K se ve influenciado por la distribución granulométrica del material depositado en el embalse, se le solicitó al MINEA dicha información, la cual, no se encontraba disponible, por lo tanto, se tomó en consideración que el tipo de material depositado en el vaso debe ser similar al encontrado en la cuenca, es decir, franco arenoso, como fue indicado en el presente estudio. Ya que no se tenía un reporte que reflejara la distribución exacta del material depositado, se utilizó el triángulo textural de los suelos, propuesto por el *United States Department of Agriculture* (USDA) y los informes geológicos mencionados anteriormente, para tener una distribución aproximada del material depositado. Dado que las formaciones geológicas de la cuenca están formadas en su mayoría por cuarzos y micas y en función de la textura de los suelos, se utilizó el referido triángulo textural decidiéndose tomar los siguientes porcentajes: 60% para las arenas, 30% para los limos y 10% para las arcillas.

A continuación, en la Tabla 19 se muestran los cálculos y resultados del peso unitario seco al final del período en consideración del material depositado en el embalse Cumaripa en 18 años (1971-1989):

**Tabla 19 Peso unitario seco para 1989**

<b>Tipo de sedimento</b>		
Arena	Limo	Arcilla
1550	1120	416
<b>Fracción (%)</b>		
60	30	10
<b>Peso unitario seco inicial (kg/m<sup>3</sup>)</b>		
1308		
<b>K</b>		
0	91	256
<b>K ponderado</b>		
54		
<b>Peso unitario seco al final de 18 años (kg/m<sup>3</sup>)</b>		
1356,3		

Fuente: Elaboración propia

#### 4.11.2 Eficiencia de atrape del embalse

Se determinó la relación entre el volumen útil y el volumen medio anual aportado al embalse para el año 1989 obteniéndose un valor de 0,95. Con este valor, se utilizó el gráfico de Brune, y se determinó que el embalse de Cumaripa tiene una eficiencia de atrape de 0,97.

Se interceptó la curva del medio en el Gráfico 10, considerando que la operación de embalse no varía de manera abrupta sus niveles de agua, como se puede observar en el Gráfico 19.

#### 4.12.3 Resultado de la carga total de sedimentos aportados al embalse

Tomando en consideración los puntos anteriores, se muestra en la Tabla 20 el procedimiento de cálculo y el resultado de la carga total de sedimentos aportadas al embalse.

**Tabla 20 Resultados de carga total anual de sedimento**

<b>Capacidad a nivel de aguas normales a 202,30 msnm (1971)</b>	107,75	Hm <sup>3</sup>
<b>Capacidad a nivel de aguas normales a 202,30 msnm (1989)</b>	66,81	Hm <sup>3</sup>
<b>Volumen de sedimentos retenidos en el período 1971-1989</b>	40,94	Hm <sup>3</sup>
<b>Peso unitario seco</b>	1.356	kg/m <sup>3</sup>
<b>Carga total de sedimentos retenida en el embalse (1989)</b>	55.526.922	t
<b>Eficiencia de atrape</b>	97	%
<b>Carga total de sedimentos aportada al embalse (1989)</b>	57.244.249	t
<b>Período</b>	18	años
<b>Carga total de sedimentos aportada al embalse (1989)</b>	3.180.236	t/año

Fuente: Elaboración propia

#### 4.12 Comparación de resultados

Se compararon los valores estimados de la producción y transporte de sedimentos de la cuenca de río Yaracuy hasta la presa Ing. Francisco Amelinck con los obtenidos como carga total de sedimentos determinados a partir de los volúmenes reportados por la batimetría de 1989. Dicha comparación se muestra en la Tabla 21, cuyos símbolos (+, -) en la columna de porcentaje de error, se refiere a que la predicción estuvo por encima o por debajo del valor comparado con la batimetría.

Se muestran en la Tabla 22, los valores de los módulos de producción de volumen retenido, obtenidos para cada método de transporte en adición a la carga lavada, y se observa en referencia al volumen, la precisión de los resultados obtenidos por los métodos de transporte utilizados en este trabajo.

**Tabla 21 Comparación de resultados de carga total de sedimento con valores reportados por la batimetría de 1989**

Métodos de transporte	Tipo	Carga de material de fondo (t/año)	Carga lavada (t/año)	Carga total de sedimentos (t/año)	Carga total de sedimentos batimetría 1989 (t/año)	Diferencia (%)
Yang (1979)	t	841.824	2.292.698	3.134.522	3.180.236	-1%
Engelund y Hansen (1972)	t	466.375		2.759.073		-13%
Laursen (1958)	t	417.596		2.710.294		-15%
Karim (1998)	t	346.445		2.639.143		-17%
Graf et al (1968)	t	294.598		2.587.296		-19%
Rottner (1959)	b	167.923		2.460.621		-23%
Einstein (1950)	b + s	101.550		2.394.248		-25%
Ackers y White (1973)	t	43.689		2.336.387		-27%
Shields (1936)	b	2.702.319		4.995.017		+57%

**Tabla 22 Comparación de volúmenes depositados con valores reportados por la batimetría de 1989**

Métodos de transporte	Tipo	Módulo de producción de volumen para material de fondo (m <sup>3</sup> /año/km <sup>2</sup> )	Módulo de producción de volumen para carga lavada (m <sup>3</sup> /año/km <sup>2</sup> )	Módulo de producción de volumen total (m <sup>3</sup> /año/km <sup>2</sup> )	Volumen estimado en 18 años para la cuenca de Cumaripa (Hm <sup>3</sup> )	Volumen retenido en la cuenca de Cumaripa (1989) (Hm <sup>3</sup> )
Yang (1979)	t	1.384,3	3.770,2	5.154,6	40,36	40,94
Engelund y Hansen (1972)	t	766,9		4.537,2	35,53	
Laursen (1958)	t	686,7		4.457,0	34,90	
Karim (1998)	t	569,7		4.340,0	33,98	
Graf et al (1968)	t	484,5		4.254,7	33,31	
Rottner (1959)	b	276,1		4.046,4	31,68	
Einstein (1950)	b + s	167,0		3.937,2	30,83	
Ackers y White (1973)	t	71,8		3.842,1	30,08	
Shields (1936)	b	4.443,8		8.214,1	64,32	

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

### 5.1 Con respecto a la estimación de eventos de crecidas para diferentes frecuencias

- El valor del número de curva promedio ponderado obtenido para la cuenca del río Yaracuy hasta el embalse de Cumaripa se estimó en 63, valor que se considera representativo de las condiciones propias de la cuenca.
- Los gastos máximos de las crecidas simuladas, se ajustan según la distribución Gumbel.
- Al transitar la crecida con frecuencia de 1.000 años en el embalse, se obtuvieron valores para el gasto aliviado y nivel máximo muy similares a los indicados a la revista El Agua (1995) que corresponden con los estimados en el proyecto de la presa.

### 5.2 Con respecto a la carga lavada (*wash load*)

- Se determinó que los suelos predominantes en la cuenca tributaria al embalse corresponden con la clase textural franco arenosa.
- Se estimó que la carga lavada tributada al embalse Cumaripa, asciende a 2.292.698 toneladas anuales, equivalente a un módulo de producción de sedimento de 5.270,6 t/km<sup>2</sup>/año.
- Se estimó que el volumen de sedimentos retenidos en el vaso de almacenamiento, asciende a 1.640.057 m<sup>3</sup> anuales, equivalente a un módulo de producción de volumen de 3.770,2 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año.
- Se estimó que, para el período de 1971-1989, el volumen de sedimentos que se depositan en el embalse sólo por carga lavada es de 29,5 Hm<sup>3</sup>, representando un 73% del volumen retenido total.

### 5.3 Con respecto al transporte de sedimentos (*bed material load*)

- Los tamaños de grano característicos para el material de fondo del cauce principal del río Yaracuy, aguas arriba de la cola del embalse Cumaripa son: d65 7,00 mm, y d50 diámetro mediana 3,20 mm.
- Las cargas de material de fondo estimadas con distintas ecuaciones de transporte difieren de manera sustancial. Esas diferencias se pueden atribuir a las distintas condiciones con las que fueron desarrolladas dichas ecuaciones.
- El método de Yang (1979) deducido para arenas, reporta las cargas totales de material de fondo que, al adicionarlas con la carga lavada, se aproximan más a los volúmenes depositados en el embalse, con una diferencia de error del 1% respecto a la reportada por la batimetría.

#### 5.4 Con respecto a las batimetrías disponibles

- La batimetría de 1989, que abarcó la totalidad del embalse, reporta un volumen de sedimento retenido de  $40,94 \text{ Hm}^3$  en 18 años, por lo que el volumen retenido medio anual asciende a  $2.274.948 \text{ m}^3/\text{año}$ , equivalente a un módulo de  $5.229,8 \text{ m}^3/\text{años}/\text{km}^2$ .
- El módulo de aporte anual de sedimentos retenidos estimado para la fecha de 1989, utilizando el método de Yang (1979) como base para sumarlo a la carga lavada producida por la cuenca del embalse Cumaripa, es de  $5.154,6 \text{ m}^3/\text{años}/\text{km}^2$ .
- El proyecto de la presa estimó un volumen de sedimento de  $7,05 \text{ Hm}^3$  en 100 años, ello equivale a un volumen medio anual de  $70500 \text{ m}^3$ , equivalente a un módulo de  $162,1 \text{ m}^3/\text{año}/\text{km}^2$ .
- Se validó la ecuación reportada en el libro “*Sediment Transport Technology*, (1992), pág 502” de Simons y Şentürk, como propuesta para la estimación a escala anual de la carga lavada, carga de material de fondo y carga total.

#### 5.5 Conclusiones generales:

Compartiendo las conclusiones publicadas en el artículo “*Sedimentación de embalses ¿un tema de poco interés?*” por el Ing. Raúl Herrero (2016), en el blog “eselagua.com”, se tiene:

- Los proyectos de embalses deben contemplar la producción y movilización de sedimentos en las cuencas, con la finalidad de adoptar diseños adecuados para los efectos de la sedimentación en dichos embalses, especialmente en cuencas con tasas significativas de erosión.
- Es necesaria una gestión adecuada de los aportes de sedimentos, tanto en las zonas de origen como en el propio embalse donde se depositan. En cada caso concreto habrá que definir las actuaciones más adecuadas. Existen medidas tanto preventivas como correctivas que pueden contribuir a minimizar los procesos de colmatación de embalses y/o a reducir los efectos ambientales derivados.
- Resulta de gran ayuda conocer las tasas de erosión de las cuencas, localizar las zonas productoras de sedimentos, medir el transporte de sedimentos para conocer la tasa de colmatación, con la finalidad de poder considerar, proyectar y valorar posibles medidas preventivas y/o correctoras frente a la colmatación.

## CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones son generadas con base a los problemas que se presentaron a medida que se desarrollaba este estudio, y se piensa que es importante atenderlas para lograr un importante desarrollo en cuanto a estudios de construcción de presas en el país:

- Con el pasar del tiempo se ha detectado que en Venezuela se han extraviado estudios valiosos de suelos realizados ya hace muchos años, que son de gran importancia para el desarrollo de proyectos de grandes magnitudes, como, por ejemplo, un embalse. Se propone a futuros estudiantes que deseen desarrollar un Trabajo Especial de Grado, e inclusive a los organismos gubernamentales encargados, a realizar estudios de suelos que puedan servir de apoyo a las diferentes entidades del país, ya que en muchos casos es importante conocer la distribución, textura, peso unitario, y otras propiedades del suelo para desarrollar con éxito distintos proyectos.
- Es indispensable para este estudio, conocer la metodología correcta para tomar muestras de material de lecho en el cauce de un río en general. Si el río es intermitente, lo ideal es tomar las muestras de material de fondo en la época del año en el que el río se seca, ya que de esta forma se conserva la integridad de las muestras, sin embargo, si el río es de régimen permanente, se debe disponer de herramientas especializadas cuyo diseño permita tomar una muestra sin distorsiones y evita que se lave o se pierda mientras se extrae a la superficie.
- Se recomienda a los organismos gubernamentales encargados de la operación y mantenimientos de presas y embalses, a instaurar programas de realización de estudios batimétricos en todos los embalses del país, puesto que este tipo de estudio de manera indirecta, ofrece información de la producción de sedimento en la cuenca y de manera directa muestra los volúmenes que han sido ocupados en el vaso de almacenamiento.
- Después de haber realizado la estimación de la producción y transporte de sedimentos a un embalse, se pueden elaborar planes que mitiguen que el embalse pierda su capacidad útil, como, por ejemplo, las citadas por el Ing. Raúl Herrero en su Blog, eselagua.com:
  - En la cuenca tributaria al embalse se pueden realizar actuaciones tales como la restitución de la cubierta vegetal, corrección de torrentes, estabilización y conservación de suelos, construcción de diques de retención, etc.
  - En el caso de presas que estén en etapa de proyecto, se pueden dimensionar los órganos de evacuación preferente de sedimentos (descargas de fondo).

- En embalses más grandes cabe plantearse la posibilidad de construir presas de retención de sedimento como medida para controlar el material preferentemente transportado desde el fondo.

En la siguiente imagen se puede evidenciar cómo sería la correcta distribución de sedimentos en un embalse de acuerdo a la gestión que se efectúa:



**Figura 19** Distribución de sedimentos en un embalse en función de la gestión de sedimentos que se efectúa

Fuente: “Sedimentación de embalses ¿un tema de poco interés?”, eselagua.com

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre.L, Subero.L. *Evaluación de la sedimentación del embalse Cumaripa. Soluciones posibles.* 2004
- Dubhasish, D. *Fluvial Hydrodynamics, Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena.* Springer. 2014
- Einstein, H. A. *The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows.* Soil Conservation Service. 1950
- Engelund, F. and Hansen, E. *A monograph on sediment transport in alluvial streams.* Technical University of Denmark. 1967.
- Gracia S, J. *Sedimentación en Embalses, capítulo 18 del Manual de Ingeniería de Ríos.* UNAM
- Herrero, R. *Sedimentación de embalses ¿un tema de poco interés?.* eselagua.com. 2016
- Instituto Nacional de Estadística. *Informe Geoambiental 2011, ESTADO YARACUY.* 2011
- Irazábal, A. (2013). *Técnicas de control de erosión y de socavación.* En Guía de estudio del curso IAMB-10015(184). UCAB - ING. AMBIENTAL.
- Manning, A. J. *Sediment Transport in Aquatic Eviroments.* InTech. 2011
- Páez, M.L., Fernández, N, Rodríguez, O. *Conservación de suelos y aguas.* Universidad Central de Venezuela. Maracay. 1992.
- Simons, D.B., F. Sentürk. *Sediment transport technology.* Water Resources Publications. 1992.
- United States Bureau of Reclamation. *Design of small dams.* Washington. 1987.
- Vanoni, V. A. and Brooks, N. H. *Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams. Sedimentation Laboratory.* California Institute of Technology, Pasadena, Calif. 1957
- Williams, J.R. y H.D. Berndt. *Sediment yield prediction based on watershed hydrology.* Transactions American Society of Agricultural Engineers. 1977.
- Yang, C.T. *Sediment transport-theory and practice.* Editorial McGraw-Hill. 1996.