

Algoritmo de la metodología de Pacheco Ceballos para el cálculo de transporte de sedimentos en ríos aluviales

Revista Tekhnê: ISSN 1692-8407. 2013, Vol. 10, Núm. 1, Pág. 38-48

Fecha de recepción: 26 de julio de 2013

Fecha de aceptación: 5 de agosto de 2013

Autores, afiliación, e-mail: 1.) Helen Nathalia Luna Patiño. hnlunap@gmail.com 2.) Jhon Fredy Casanova Carrillo. Ingeniería & Diseño S. A. jcasanova@ingedisa.com 3.) Fernando González Casas. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. fgonzalezc@udistrital.edu.co

Resumen

Transporte de sedimentos se refiere al transporte de material granular (por ejemplo, limos, arenas, gravas, cantos rodados) en ríos y corrientes. El material transportado se denomina carga de sedimentos. Se distingue entre el transporte de fondo y el transporte en suspensión. La carga de fondo se caracteriza por granos que ruedan a lo largo del lecho, mientras que la carga en suspensión se refiere a granos mantenidos en suspensión debido a la turbulencia.

El problema al que se quiere dar respuesta es la dificultad al calcular los volúmenes de sedimento transportados en lechos naturales, pues este cálculo se hace mediante nomogramas y gráficas que retrasan la obtención de datos. Además, la lectura puede variar de una persona a otra. Lo que se quiere lograr con este trabajo es hacer más ágil y productivo el cálculo del volumen de sedimentos en lechos naturales, mediante fórmulas analíticas que permiten tener resultados más precisos y acordes a la zona que se analiza. Para resolver este problema se creó una aplicación de Visual Basic y Excel, que permite el cálculo de transporte de sedimentos según el método del ingeniero Raúl Pacheco Ceballos.

Esta aplicación se validó mediante la comparación de resultados de cálculo con el trabajo “Estudio sedimentológico del río Magdalena”, documento desarrollado por el ingeniero Raúl Pacheco Ceballos.

Se comparan los resultados obtenidos en este estudio y los calculados con Hydra_flu 1.0; se obtuvieron diferencias mínimas que permiten analizar los factores que influyen para que en estos cálculos se presenten diferencias.

Palabras clave: hidráulica fluvial, transporte de sedimentos

Algorithm for Pacheco Ceballos methodology for calculating sediment transport in alluvial rivers

Abstract

Sediment transport is the term used for transporting granular material (eg, silt, sand, gravel, boulders) in rivers and streams. The conveyed material is known as sediment load. We distinguish background transport and suspension transport. Background load is characterized by grains which roll along the bed while suspended load refers to grain held in suspension by the turbulence. For the study of sediment transport, the problem we want to address is the difficulty that is presented to calculate the volumes of sediment transported in natural beds, particularly since this calculation is done by delaying nomograms and graphic data collection, and the reading from one person to another can vary. What you want to achieve with this degree of work is make more agile and productive the calculation of the volume of sediment in natural beds with analytical formulas that allow more accurate and consistent results to the area being analyzed. In order to solve this problem was created a Visual Basic and Excel, which allows the calculation of sediment transport by the method of calculation of the Engineer Raul Pacheco Ceballos.

This application was validated by comparing the calculation results with the job named “Magdalena River sedimentological study”. This document was developed by engineer Raul Pacheco Ceballos. Chapter 4 compares the results obtained in this study and those calculated with Hydra_flu 1.0, minimal differences were obtained to analyze the factors that influence in these calculations differ.

Key words: river hydraulics, sediment transport

Descripción del problema

Esta investigación está encaminada al estudio del transporte de sedimentos. El problema al que se quiere dar respuesta es la dificultad que se presenta al calcular los volúmenes de sedimento transportados en lechos naturales, pues la mayoría de metodologías usadas actualmente son de tipo empírico y esto hace más dispendioso e impreciso el cálculo, ya que los valores pueden variar dependiendo de la persona que realiza el cálculo.

En 1989 fue publicado por la International Association for Hydraulic Research el artículo “Transporte de sedimentos: soluciones analíticas”, escrito por el ingeniero colombiano Raúl Pacheco Ceballos. En este documento se hace el planteamiento de un método que no fue calibrado empíricamente, lo que genera el cálculo del volumen de sedimentos de tipo analítico. Esto permite una solución al cálculo de transporte de sedimentos; no obstante, el cálculo resulta dispendioso por la cantidad de información que debe ser procesada.

Ante esta problemática cabe preguntarse: ¿cómo crear un algoritmo en Visual Basic que permita optimizar el cálculo de la cuantificación del volumen de sedimentos transportados por un río, mediante el método de Raúl Pacheco Ceballos?

Desarrollo del programa Hidra_flu 1.0

El uso y el desarrollo de programas es un componente fundamental para simplificar labores repetitivas, optimizar el tiempo en la realización de cálculos complejos y agilizar grandes tareas. Actualmente se cuenta con una gran variedad de herramientas de cálculo, lenguajes de programación, plantillas de diseño, etc., que permiten computarizar particularmente un procedimiento o función.

En el desarrollo del programa Hidra_flu 1.0 (figura 1), cuyo objeto es resolver ágilmente el planteamiento formulado por el ingeniero Raúl Pacheco Ceballos para el cálculo del transporte de sedimentos, se emplea un lenguaje de programación dirigido por eventos conocido como Visual Basic.



Figura 1. Portada Hidra_flu 1.0

Fuente: elaboración propia.

Este programa está integrado a las aplicaciones de Microsoft Office tanto para Windows como para Mac; permite programar macros que extienden y automatizan funcionalidades de Microsoft Excel, con el cual se elaboran, por medio de hojas de cálculo, tablas y formatos que incluyan cálculos matemáticos mediante fórmulas.

El sistema de unidades escogido para la realización de los cálculos es el sistema métrico conocido por su sigla SI (Sistema Internacional de Unidades, del francés Le Système International d'Unités) (tabla 1).

Tabla 1. Sistema Internacional de Unidades (SI)

Magnitud física básica	Símbolo dimensional	Unidad básica	Símbolo de la unidad
Longitud	L	metro	m
Tiempo	T	segundo	s
Masa	M	kilogramo	kg
Temperatura	Θ	Celsius	C

Programación de Hidra_flu 1.0

Inicialmente el desarrollo de la aplicación Hidra_flu 1.0 se dirigió a la realización de una herramienta que permitiera realizar todos los cálculos propuestos en la metodología formulada por el ingeniero Raúl Pacheco Ceballos, evitando el empleo de diversos nomogramas

y desarrollando de manera anexa complementos para la obtención de los datos de entrada.

Empleando Microsoft Excel se pone a prueba cada uno de los resultados entregados en el ejemplo del documento “Transporte de sedimentos. Soluciones analíticas” con el uso de las hojas de cálculo, donde, de acuerdo con las ecuaciones encontradas y las condiciones a evaluar en esta metodología, se inicia la exploración para resolver por medio de este programa cada uno de estos planteamientos.

Es necesario, para la organización y el desarrollo de los cálculos, el uso de macros, las cuales son una serie de instrucciones que se almacenan para que se puedan ejecutar de manera secuencial mediante una sola llamada u orden de ejecución, lo que permite la automatización de tareas repetitivas. Así es como inicia el uso de Visual Basic en este proyecto: mostrando de manera fácil la forma y detalle de cada una de las variables a emplear y la obtención de los resultados calculados.

Para cada uno de los formularios planteados por medio de Visual Basic se simplifica y organiza de manera gráfica cada una de las variables que intervienen en los cálculos para el transporte de sedimentos, de la siguiente forma:

Como se muestra en la figura 2, es relevante la información del punto de la toma de datos de aforo, ya que es donde se identifica particularmente el lugar de medición de acuerdo con la estación, abscisa, corriente, número de la muestra y el nombre del profesional responsable.

Información Punto de la Toma de Datos

Profesional Responsable

Estación Abscisa

Corriente N° Muestra

Figura 2. Información del punto de la toma de datos de aforo
Fuente: elaboración propia.

Así mismo, se han organizado en tres grandes grupos las variables de entrada con la intención de mostrar la información requerida para la ejecución del programa (figura 3).

Por favor, elegir en orden numérico cada opción para dar Inicio a la entrada de datos:

1. Características del Flujo 2. Características del Grano 3. Características de la Sección

Nota: Antes de continuar Verificar que todos los Datos estén Completos.

Figura 3. Grupos de las variables de entrada
Fuente: elaboración propia.

Para el paso 1 se debe completar sin excepción cada una de las variables solicitadas correspondientes a las características del fluido, como se muestra en la figura 4.

Paso 1. Características del Flujo

Constante Gravitacional (g) [m / s²]

Densidad del agua (p) [kg / m³]

Temperatura (T) [°C]

Viscosidad Cinemática del agua (v) [m² / s]

Densidad de la Mezcla "agua - sedimento" (pm) [kg / m³]

Figura 4. Características del fluido
Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, se anexa una herramienta (figura 5) con el fin de poder orientar y mostrar el valor de referencia, en caso de no contar con alguno de los valores de entrada.

Datos Aproximados Características del Agua

Ingrese el Valor de la Temperatura entre 0 y 100°C

Realizar el Cálculo Aceptar

Peso Especifico [kN / m³]

Peso Especifico [N / m³]

Densidad [g / cm³]

Densidad [kg / m³]

Viscosidad dinámica [Pa*s]

Viscosidad cinemática [m²/s]

Nota: Los valores obtenidos son de referencia (como ayuda). Una vez realizado el calculo de los datos escribirlos en la celda correspondiente.

Figura 5. Datos aproximados de características del agua
Fuente: elaboración propia.

Paso 2: cada uno de los valores referentes a las características de los sedimentos que se emplean en la metodología desarrollada se debe completar sin excepción en cada una de las casillas de la figura 6.

Paso 2. Características del Sedimento

Densidad Relativa del Grano (s) [adim]

D50 del Material de Fondo (D50f) [m]

D50 del Material en Suspensión (D50s) [m]

Velocidad media (V) [m / s]

Figura 6. Características del sedimento
Fuente: elaboración propia.

Las características que definen los procesos de suspensión, transporte y posterior depósito del sedimento dependen no solo de las condiciones del flujo, sino también de las propiedades del sedimento. Estas propiedades del material en un tramo de un río se determinan por los promedios de varias muestras tomadas en diferentes partes de la sección longitudinal y transversal del cauce en la zona de estudio¹.

Los análisis granulométricos con tamices se usan para determinar las fracciones de material grueso, como gravas, arenas y métodos hidrométricos; estos se emplean para obtener las fracciones de materiales finos, como limos y arcillas. En los cauces se realiza con dos objetivos complementarios que son la determinación de la rugosidad del cauce asociada a la gradación de los sedimentos presentes en el lecho y la distribución granulométrica del material transportado y disponible según las muestras recopiladas en los aforos sólidos².

Por estos motivos se implementa el siguiente anexo, donde solamente si se poseen los datos obtenidos en campo de la muestra y se establecen los valores de peso retenido en cada tamiz, es decir, su granulometría, es posible realizar el cálculo de los valores de Dx tanto para las partículas de fondo como para las de suspensión.

Desea realizar por su cuenta el Cálculo Granulométrico

Sólo si posee los datos para realizar el cálculo Granulométrico, y así determinar los valores de D50 de la muestra, pulse la tecla "Aceptar"

Nota: Una vez realizado el cálculo de los datos escríbelos en la celda correspondiente.

Figura 7. Cálculo granulométrico
Fuente: elaboración propia.

Una vez se halla activado por medio del botón Aceptar, es posible ingresar los valores de peso retenido en cada tamiz y presionar el botón Calcular para tomar el dato correspondiente al valor calculado para el D50; se evita así el uso convencional del método gráfico (figura 8).

Las mallas o tamices se denominan de acuerdo con el tamaño del agujero. El sistema de nomenclatura de mallas más corriente en Colombia es el US Standar. El número del tamiz indica la cantidad de agujeros por pulgada de longitud de la malla; por ejemplo, la malla 200 tiene 200 agujeros por pulgada de longitud³.

Es más común identificar el tamaño del sedimento según la proporción (en peso o en volumen) en que se encuentre la muestra, bien sea del lecho o en suspensión; por ejemplo, D50 = 0.355 mm significa que el 50 % (en peso) de la muestra tiene un tamaño menor que 0.355 mm.

Anexo 2.1 Cálculo Granulométrico Recuerde que para realizar el cálculo no debe dejar ninguna celda en blanco.

TAMIZ ASTM	PESO RETENIDO [g]	% PESO RETENIDO	% PESO ACUMULADO	% PESO PASANTE
3"	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2"	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
1 1/2"	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
1"	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3/4"	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3/8"	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Nº 4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Nº 10	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Nº 20	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Nº 40	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Nº 60	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Nº 100	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Nº 200	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
< Nº 200	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

SUMA PESO TOTAL [g]

Cálculo del D50 del Cuadro de Análisis Granulométrico

$$D_x = \left\{ \left[\frac{(a-c)}{(b-d)} \right] \times (X-b) \right\} + a$$

Dx X a b c d

Valor Cálculado D50 [mm]

Figura 8. Cálculo granulométrico para determinar el valor de D50
Fuente: elaboración propia.

1 www.artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/T_TRANSPORTE_SEDIMENTOS.pdf

2 www.artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/T_TRANSPORTE_SEDIMENTOS.pdf

3 www.artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/T_TRANSPORTE_SEDIMENTOS.pdf

D_n = diámetro tal que el n por ciento de la muestra en peso tiene partículas menores que D_n^4 .

Finalmente, se pueden exportar los cálculos obtenidos en la aplicación anterior, para la presentación de los resultados por medio del informe “Cálculo de los porcentajes de pesos retenido, acumulado y pasante” y su correspondiente gráfica, generados por el programa Hidra_flu 1.0 (figuras 9 y 10).

En el paso 3 se toman las variables correspondientes a las características de la sección a evaluar; del mismo modo se debe completar sin excepción las casillas que se muestran en la figura 11.

Una vez ingresada toda la información requerida en los pasos 1 al 3, el programa Hidra_flu 1.0, a partir del paso 4, generará cada uno de los resultados obtenidos solo pulsando el botón generar datos o calcular parámetros.

En la figura 13 se presenta un ejemplo de lo escrito en el párrafo anterior, donde, una vez ingresadas todas las variables, se pueden realizar más de cinco cálculos simultáneos solamente presionando un botón y visualizar los datos obtenidos antes de ir al informe de resultados.

De acuerdo con los planteamientos propuestos por el ingeniero Raúl Pacheco Ceballos, para realizar los cálculos mostrados en la figura 13 se deben emplear las ecuaciones de la figura 14.

Estas ecuaciones requieren cinco datos de entrada y la ejecución doble de la ecuación para desarrollar el cálculo de la velocidad de asentamiento dependiendo

HIDRA_FLU 1.0 CALCULO DE LOS PORCENTAJES DE PESOS RETENIDO, ACUMULADO Y PASANTE

Profesional Responsable: JHONFREY CASANOVA CARRILLO Fecha: 06-09-20

Dirección: SANTANA
Cuerpo: MAGDALENA
Alcance: 90+000
Nº Muestra: 1

TAMAÑO MALLA (mm)	TAMIZ ASTM	PESO RETENIDO (g)	% PESO RETENIDO	% PESO ACUMULADO	% PESO PASANTE
75	3"	546	2,27	2,27	97,73
50	2"	321	1,34	3,61	96,39
37,5	1 1/2"	31	0,13	3,74	96,26
25	1"	32	0,13	3,87	96,13
19	3/4"	2	0,01	3,88	96,12
3,5	3/8"	1	0,00	3,88	96,12
4,75	Nº 4	2	0,01	3,89	96,11
2	Nº 10	6156	25,63	29,52	70,48
0,85	Nº 20	3123	13,00	42,52	57,48
0,425	Nº 40	3121	12,39	55,51	44,49
0,25	Nº 60	2131	8,87	64,39	35,61
0,15	Nº 100	3121	12,39	77,36	22,62
0,075	Nº 200	3123	13,00	90,38	9,62
0	< Nº 200	2311	9,62	100,00	0,00
PESO INICIAL (g)		24027,00	935,90	100,00	
(P. INICIAL - % P. RETENIDO)		23091,10			

FORMULA

$$D_x = \left[\left(\frac{(x-c)}{(b-d)} \right)^{1/n} \cdot (X-b) \right]^{1/n}$$

D_x	VALOR (z)	a	b	c	d
D10	10	0,150	22,622	0,075	3,621
D16	16	0,150	22,622	0,075	3,621
D30	30	0,250	35,615	0,150	22,622
D50	50	0,850	57,479	0,425	44,486
D60	60	2,000	70,480	0,850	57,479
D65	65	2,000	70,480	0,850	57,479
D84	84	4,750	96,108	2,000	70,480

D_x	(mm)
D10	0,0752
D16	0,1198
D30	0,2068
D50	0,6054
D60	1,073
D65	1,5153
D84	3,4508

Figura 9. Informe “Cálculo de los porcentajes de pesos retenido, acumulado y pasante”

Fuente: elaboración propia.

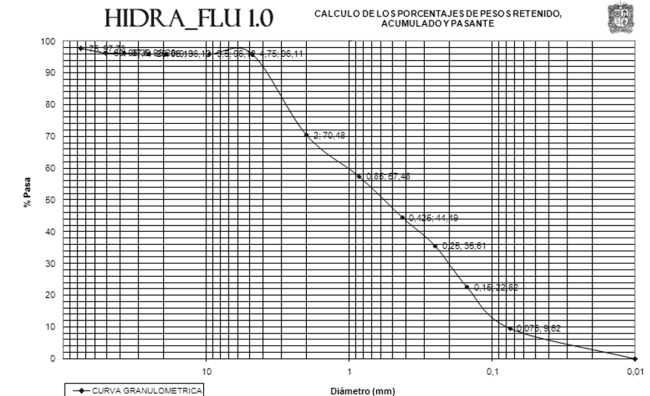


Figura 10. Cálculo de los porcentajes de pesos retenido, acumulado y pasante

Fuente: elaboración propia.

Paso 3. Características de la Sección

Pendiente Media del Lecho (S) [adim]

Profundidad Promedio del Agua (h) [m]

Base o ancho del Canal (b) [m]

Radio Hidráulico (Rh) [m]

Figura 11. Características de la sección

Fuente: elaboración propia.

Una vez halla completado la información Preliminar
Presione el siguiente botón para continuar

4. Iniciar Cálculo Transporte de Sedimentos

Figura 12. Botón para el inicio del cálculo de transporte de sedimentos

Fuente: elaboración propia.

4 www.artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/T_TRANSPORTE_SEDIMENTOS.pdf

de si es fondo o suspensión. Así mismo, la hoja de cálculo actualiza sus celdas con los últimos valores ingresados. Entonces, si se requiere realizar el cambio de un valor, antes o después de ejecutar el cálculo el programa Hidra_flu 1.0 permite realizar el cambio o volver al punto de donde se requiere ingresar un nuevo valor de la variable.

Por otra parte, de manera ágil, eficaz y sin error se describen valores condicionales, por ejemplo, para el cálculo de los diferentes valores del parámetro de Shields, donde se encuentra gran cantidad de condiciones de acuerdo con el valor obtenido D_* , como se muestra en la figura 15.

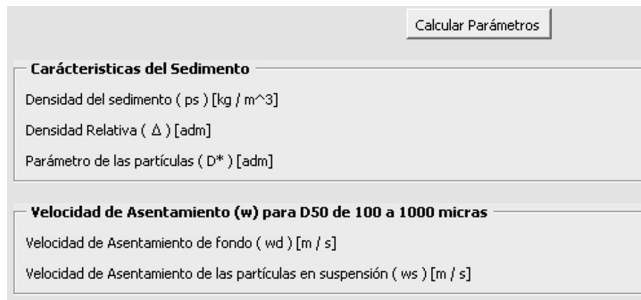


Figura 13. Ejemplo de visualización de datos calculados Fuente: elaboración propia.

Densidad de sedimento	(ρ_s)	kg/m ³
$\rho_s = \rho \times s$		
Densidad relativa	(Δ)	adim
$= \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho}$		
Parámetro de las partículas	(D_*)	adim
$D_* = D_{50F} \sqrt[3]{\frac{\rho \times g}{v^3}}$		
Velocidad de asentamiento (w) para D50 de 100 a 1000 micras		
$w = 10 \times \frac{v}{D_{50}} \left(\sqrt{1 + \frac{0.01 \times \rho \times g \times D_{50}^3}{v^2}} - 1 \right)$		
Velocidad de asentamiento de fondo	(w_d)	m/s
Velocidad de asentamiento de las partículas en suspensión	(w_s)	m/s

Figura 14. Ecuaciones programadas Fuente: elaboración propia.

Y por medio de la aplicación de Visual Basic se generan los siguientes códigos:

```
Private Sub CommandButton2_Click()
Range("C22").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=ROUND(IF(GESTEP(R[-7]
C,1)*AND(GESTEP(10,R[-7]C),4*R[-4]C/R[-7]
C,IF(R[-7]C>10,0.4*R[-4]C,"D*<1")),4)"
Range("C22").Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Range("C21").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = " =ROUND((R[1]C^2)/(R[-14]
C*R[-18]C*R[-12]C),4)"
Range("C21:C22").Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
```

Hidra_flu

Parámetro de Shields

Parámetro de Shields crítico para iniciar el movimiento de suspensión (θ_{cr}) adim

Entonces 1^{ro} (V_{cr}) m/s

$$\frac{V_{cr}}{W_d} = \frac{4}{D} \xrightarrow{\text{para}} 1 \leq D_* \leq 10 \qquad \frac{V_{cr}}{W_d} = 0.40 \xrightarrow{\text{para}} D_* > 10$$

$$\theta_{cr} = \frac{V_{cr}^2}{g \times D_{50F}}$$

Parámetro de Shields calculado por Van Rijn (θ_c) adim

$$\theta_c = r_c = \left\{ \begin{array}{l} 0.24 \times (D_*)^{-1} \xrightarrow{\text{para}} D_* \leq 4 \\ 0.14 \times (D_*)^{-0.64} \xrightarrow{\text{para}} 4 < D_* \leq 10 \\ 0.04 \times (D_*)^{-0.1} \xrightarrow{\text{para}} 10 < D_* \leq 20 \\ 0.013 \times (D_*)^{-0.29} \xrightarrow{\text{para}} 20 < D_* \leq 150 \\ 0.055 \xrightarrow{\text{para}} D_* > 150 \end{array} \right\}$$

Parámetro de Shields Inicial (θ) adim

$$\theta = \frac{R_H \times S}{D_{50F}}$$

Figura 15. Ejemplo de valores condicionales resueltos en Hidra_flu 1.0 Fuente: elaboración propia.

```
Range("C24").Select
Application.CutCopyMode = False
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=ROUND(IF(GESTEP(4,R[-9]C),0.24*(R[-9]C^(-
1)),IF(GESTEP(10,R[-9]C)*AND(R[-9]C>4),0.14*(R[-9]
C^(-0.64)),IF(GESTEP(20,R[-9]C)*AND(R[-9]
C>10),0.04*(R[-9]C^(-0.1)),IF(GESTEP(150,R[-9]
C)*AND(R[-9]C>20),0.013*(R[-9]C^(0.29)),IF(R[-9]
C>150,0.55,"Error"))))))),4)"
```

Estos códigos pueden generar una respuesta casi inmediata, de acuerdo con los parámetros programados para la obtención de los resultados o la valoración del rango para el uso de una ecuación (figuras 16 y 17).

Hidra_flu

Profundidad de la capa de fondo (a) m

$$a = \left(\frac{\theta - \theta_c}{\theta_{cr} - \theta_c} \right)^{3/2} \times 2 \times D_{50F} \xrightarrow{\text{para}} (2 \times D_{50F}) \leq a \leq R_H$$

Figura 16. Ejemplo de parámetros condicionales para el uso de una ecuación resuelto con Hidra_flu 1.0
Fuente: elaboración propia.

Hidra_flu

Cálculo Transporte de Sedimentos - Soluciones Analíticas

Presione el botón "Generar Datos" para calcular los valores de transporte de sedimentos

Generar Datos del 1. al 5.

1. Cálculo Parámetro de Shields Crítico para iniciar el movimiento de suspensión " θcr "

Valor (Vcr) [m / s]

Valor (θcr) [adim]

2. Cálculo Parámetro de Shields por expresiones analíticas propuestas por Van Rijn (1984) " θc "

Valor (θc) [adim]

3. Parámetro de Shields " θ "

Valor (θ) [adim]

4. Profundidad de la Capa de Fondo " a "

Valor (a) [m] para 2xD50f <= a < Rh

5. Distancia inferior para el límite de integración del fondo " E "

Valor (E) [adim]

Figura 17. Cálculos generados por Hidra_flu 1.0
Fuente: elaboración propia.

Donde se comprueba el dato obtenido para "a" mostrando "OK".

Para realizar el cálculo de los valores de concentración de los sedimentos se plantea la integral definida de Einstein. Para obtener el valor de esta variable se debe resolver por medio del método de integración numérica conocida como "regla del trapecio" (figuras 18 y 19).

Promedio de la concentración (C)

Promedio de la concentración de sedimentos en suspensión (Ca)

Promedio de concentración cerca del fondo (Ca)

Entonces 1º (C/Ca) adim

$$I_1 = 0.216 \times \left(\frac{E^{(z-1)}}{(1-E)^z} \right) \times \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^z \delta_y$$

$$\frac{\bar{C}}{C_a} = \frac{I_1 \times E}{0.216}$$

Figura 18. Ecuaciones para el cálculo de la concentración de los sedimentos
Fuente: elaboración propia.

$$\int_E^1 \left[\frac{(1-y)}{y} \right]^z \delta_y$$

Figura 19. Integral de Einstein
Fuente: elaboración propia.

Se considera que la forma de mejorar la precisión de la regla del trapecio es dividir el intervalo de la integración en pequeños segmentos y aplicar el método a cada uno de ellos. Para ello se ha dividido en 50 000 segmentos (figura 20).

Las áreas de los segmentos se suman de manera automática para obtener la integral en todo el intervalo como se muestra en la celda I = 1.296960.

Luego se resuelven, de acuerdo con las ecuaciones mostradas en la figura 18, los valores de I₁ y C/Ca. Cabe resaltar que existen nomogramas para la obtención del valor C/Ca tal como se muestra en la figura 21, pero el programa debería parar en este punto y solicitar el dato para poder continuar. Además, de acuerdo con los valores de z y E, se debe interpolar o extrapolar, lo cual implica tener un valor apreciativo de acuerdo con el esquema a utilizar.

Calcular la Integral	I= 1,296960		
Usando la regla trapezoidal	I ₁ = 0,801542		
Valor de "z"	0,6569	C/Ca = 0,1919	
límite inferior "E"	0,0517		
límite superior "1"	1,0000		
No. Segmentos	50000		
h= 1,897E-05			
x	f(x)		
0	0,0517	6,760	
1	0,0517	6,759	0,000128199
2	0,0517	6,757	0,000128166
49994	0,9999	0,003	5,12656E-08
49995	0,9999	0,002	4,59248E-08
49996	0,9999	0,002	4,02339E-08
49997	0,9999	0,002	3,40793E-08
49998	1,0000	0,001	2,72594E-08
49999	1,0000	0,001	1,9325E-08
50000	1,0000	0,000	7,50247E-09

Figura 20. Solución integral de Einstein
Fuente: elaboración propia.

Finalmente, Hidra_flu 1.0 genera dos tipos de informe, donde cada uno de los resultados obtenidos se organiza y muestra como "Informe de resultados" y adicionalmente se entrega un "Informe de metodología" donde se describe la metodología planteada por el ingeniero civil Raúl Pacheco Ceballos para el cálculo del transporte de sedimentos en ríos aluviales por medio de soluciones analíticas.

Validación del programa Hidra_flu 1.0 respecto al "Estudio sedimentológico del río Magdalena - Himat"

La validación de cada uno de los datos mostrados a continuación, se realiza de modo académico con la finalidad de poder mostrar que es posible realizar la cuantificación de volumen de sedimentos, de una manera analítica tal como es planteada por el ingeniero Pacheco Ceballos.

Con nuestra investigación de tipo explicativo y por medio de una metodología experimental se ha recolectado, seleccionado, organizado y analizado información que

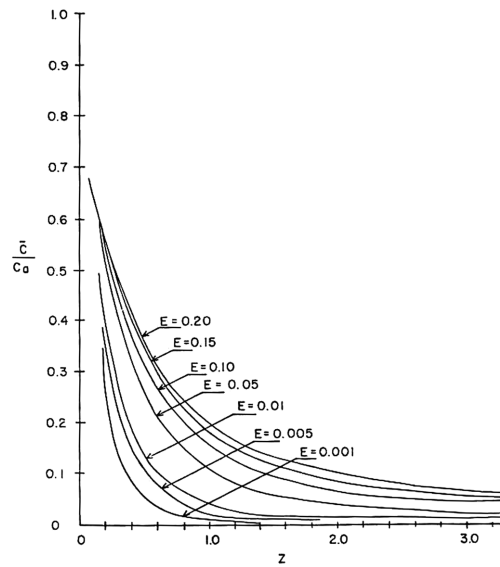


Fig. 3. Values of \bar{C}/C_a versus Z.
Valeurs de \bar{C}/C_a en fonction de Z.

Figura 21. Nomograma para la obtención del "C/Ca" vs. "z"
Fuente: Pacheco (1984, p. II-25).

ha permitido la comparación de los resultados mostrados en este capítulo.

Para validar los resultados obtenidos por el programa Hidra_flu 1.0 se hizo necesaria la búsqueda de información específica de los datos de aforo obtenidos para el río Magdalena y del informe "Estudio sedimentológico del río Magdalena" de 1984 presentado al Himat por el ingeniero Pacheco Ceballos, donde se presentó el desarrollo de un nuevo método analítico para predecir el cálculo de sedimentos transportados por el río Magdalena y los datos de siete estaciones de aforo con sus respectivos cálculos del transporte total aforado " Q_t " y la concentración total de sedimentos " C_t ".

Este documento se encuentra en la Biblioteca Física del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), anteriormente conocido como Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierra (Himat).

Los nombres de las estaciones para la toma de los datos de aforo son los siguientes:

- Estación Vijagual,
- Estación Calamar,

- Estación San Roque (brazo Mompós),
- Estación Armenia (brazo de Loba),
- Estación Barbosa,
- Estación Tres Cruces (río Cauca) y
- Estación Incora 7 (Canal del Dique).

No es posible realizar la comparación para las variables de K y K” por la falta de información en cada una de las estaciones y la limitación que presentan las planillas para la toma de datos de aforo, donde no se presentan los valores de radio hidráulico, cálculos granulométricos, temperatura, viscosidad cinemática y densidad de la mezcla (agua-sedimento), requeridos para llevar a cabo la metodología propuesta por el ingeniero civil Pacheco Ceballos para el cálculo del transporte de sedimentos en río aluviales por medio de soluciones analíticas (tabla 2).

En la figura 22 se presenta gráficamente la diferencia entre los datos calculados vs. información de estaciones Himat.

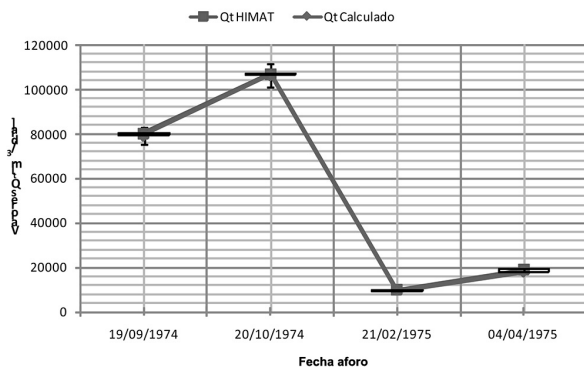


Figura 22. Validación transporte total aforado estación Calamar

Fuente: elaboración propia.

Ejemplo: validación del programa Hidra_flu 1.0 respecto a la estación Calamar. Tabla de resultados datos de aforo

Tabla 2. Datos comparados estación Calamar

Estación de aforo	Fecha toma de datos de aforo	Himat	Calculados	Himat	Calculados
		Qt [m³/día]	Qt [m³/día]	Ct [adim]	Ct [adim]
Calamar	19/09/1974	80 200.00	79 283.14	336.45	330.35
	20/10/1974	106 996.00	106 476.34	305.29	298.73
	21/02/1975	9 980.00	9 483.52	84.96	83.80
	04/04/1975	19 157.00	18 030.34	131.23	123.25

Fuente: elaboración propia.

Se encuentra una diferencia del orden de 0.49 % hasta 5.88 % entre los datos validados para los valores del transporte total aforado (figura 23).

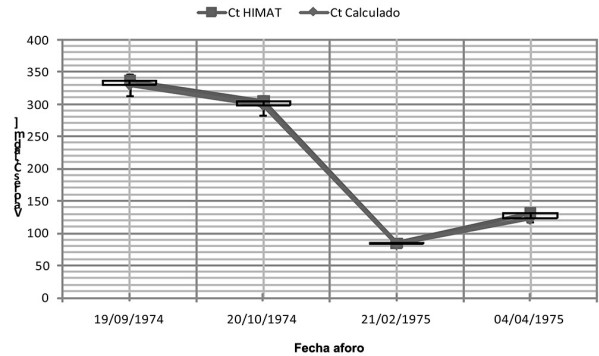


Figura 23. Concentración total de sedimentos estación Calamar

Fuente: elaboración propia.

Se encuentra una diferencia del orden de 1.37 % hasta 6.08 % entre los datos validados para los valores de la concentración total de sedimentos (tabla 3).

Se determina el porcentaje de error como:

$$\%Error = \frac{(D_i - D_o)}{D_o} \times 100\% \quad (1)$$

Donde D_i es el dato tomado del cálculo y D_o el dato de referencia del Himat.

Haciendo un promedio con los datos obtenidos en la tabla 3, se puede observar que el porcentaje de error promedio para el transporte total aforado “Qt” es 3.88 % y para la concentración total de sedimentos “Ct” es 2.81 %.

Tabla 3. Porcentaje de error promedio

Estación de aforo	Fecha toma de datos aforo	Himat	Calculados	Error	Error promedio	Himat	Calculados	Error	Error promedio
		Qt [m ³ /día]	Qt [m ³ /día]	[%]	[%]	Ct [adim]	Ct [adim]	[%]	[%]
Vijagual	03/08/1975	46 250.00	45 043.84	2.61 %	5.23 %	343.53	333.55	2.90 %	4.88 %
	27/08/1975	56 800.00	53 343.95	6.08 %		389.81	370.50	4.95 %	
	27/10/1975	121 600.00	113 108.79	6.98 %		570.52	531.84	6.78 %	
Calamar	19/09/1974	80 200.00	79 283.14	1.14 %	3.12 %	336.45	330.35	1.81 %	2.85 %
	20/10/1974	106 996.00	106 476.34	0.49 %		305.29	298.73	2.15 %	
	21/02/1975	9 980.00	9 483.52	4.97 %		84.96	83.80	1.37 %	
	04/04/1975	19 157.00	18 030.34	5.88 %		131.23	123.25	6.08 %	
San Roque (brazo Mompós)	05/11/1974	11 051.00	10 687.35	3.29 %	4.85 %	241.17	232.81	3.47 %	4.20 %
	08/03/1975	7 348.00	7 279.85	0.93 %		407.07	398.72	2.05 %	
	20/02/1975	95.00	85.17	10.35 %		17.57	16.33	7.09 %	
Armenia (brazo de Loba)	01/10/1974	47 780.00	47 605.52	0.37 %	1.17 %	462.38	458.44	0.85 %	1.26 %
	04/03/1975	23 038.00	23 491.71	1.97 %		324.96	319.52	1.67 %	
Barbosa	21/07/1974	56 260.00	53 647.16	4.64 %	2.96 %	338.89	323.46	4.55 %	2.47 %
	28/02/1975	34 751.00	33 434.90	3.79 %		306.96	301.44	1.80 %	
	27/09/1974	61 830.00	61 554.17	0.45 %		297.38	294.21	1.07 %	
Tres Cruces (río Cauca)	30/10/1974	55 198.00	45 732.11	17.15 %	6.59 %	393.49	388.76	1.20 %	1.48 %
	01/12/1974	56 650.00	56 453.25	0.35 %		528.79	519.97	1.67 %	
	02/03/1975	26 400.00	25 796.59	2.29 %		490.47	482.74	1.58 %	
Incora 7 (canal del Dique)	20/09/1974	4 164.00	4 060.73	2.48 %	3.25 %	312.77	309.05	1.19 %	2.48 %
	21/10/1974	6 660.00	6 454.73	3.08 %		325.90	318.29	2.34 %	
	20/02/1974	181.00	173.41	4.19 %		55.92	53.72	3.93 %	
					Promedio Qt			Promedio Ct	2.81 %
					3.88 %				

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Como resultado de esta investigación se creó un algoritmo en Visual Basic que trabaja en Microsoft Excel, el cual permite el cálculo de transporte de sedimentos por medio de las fórmulas analíticas planteadas en la metodología del ingeniero Raúl Pacheco Ceballos.

Por medio de este programa es posible realizar la cuantificación del volumen de sedimentos transportados en ríos aluviales de una manera ágil y analítica por la versatilidad que se tiene al trabajar con Visual Basic y Microsoft Excel.

Por consiguiente, se puede cuantificar el volumen de sedimentos de acuerdo con la metodología programada; esta es una herramienta para el análisis de problemas

ambientales producidos por la acumulación de sedimentos en los ríos, tales como la erosión y la colmatación.

La erosión y la colmatación de sedimentos en los ríos, generada por el transporte de materiales pétreos y materia orgánica disuelta, son nocivas para los seres vivos que dependen del recurso hídrico, puesto que las zonas afectadas sufren la alteración de sus ecosistemas por el agua turbia y poco oxigenada y quedan además inservibles para actividades humanas como la pesca o el turismo.

Por medio de un lenguaje claro y explicativo, se mostró cada uno de los principios básicos formulados por Pacheco Ceballos en su metodología para el cálculo del transporte de sedimentos por medio de soluciones analíticas.

Así mismo, se expuso el procedimiento de cálculo empleado para la creación del programa Hidra_{flu} 1.0.

Esta aplicación permite la automatización de los parámetros empleados en la resolución de la integral de Einstein para flujo gradualmente variado. Además, permite el cálculo analítico del parámetro de Shields como lo planteó Van Rijn. Se omite así el cálculo por gráfica de este parámetro.

En este artículo se muestra un ejemplo de comparación entre los resultados obtenidos por el ingeniero Raúl Pacheco Ceballos, en el Estudio sedimentológico del río Magdalena, y los que se obtuvieron con Hidra_flu 1.0 utilizando los aforos tomados por el Himat en las siguientes estaciones: Vijagual, Calamar, San Roque (brazo Mompós), Armenia (brazo de Loba), Barbosa, Tres Cruces (río Cauca) e Incora 7 (canal del Dique).

En 1974 y 1975 se calcularon los mismos parámetros que el ingeniero Raúl Pacheco Ceballos; se obtuvieron diferencias en todos los valores obtenidos, del orden del 0.37 % al 17.15 %. Esto se debe a que no está claro, en el estudio sedimentológico, cuáles son los datos omitidos en el cálculo, por haber sido considerados como no confiables. Sin embargo, es posible concluir que estos nuevos valores, calculados de acuerdo con la metodología desarrollada en este proyecto, no son tan distantes de los datos iniciales; se logró un margen máximo entre algunos datos del 18 %.

Referencias

- Chanson, H. (2002). *Hidráulica del flujo en canales abiertos*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Einstein, H. A. (1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. *Technical Bulletin 1026*, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington D. C.
- Martín Vide, J. P. (2000). *Ingeniería fluvial*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ochoa, T. (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Bogotá: Ecoe.
- Pacheco Ceballos, R. (1984). *Estudio sedimentológico del río Magdalena*. Bogotá: Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras.
- Pacheco Ceballos, R. (1991). *Transporte de sedimentos: soluciones analíticas*. Bogotá: International Association for Hydraulic Research.
- Tamayo, M. (2003). *Proceso de la investigación científica*. México: Limusa.
- Universidad Distrital. (2010). *Optimización de la metodología de Einstein para el transporte de sedimentos en canales abiertos aplicativo Calc_hid 1.0*. Bogotá.