ANALISIS INTEGRADO DEL RIO NEGRO: UN CAUCE DE GRAN ANCHO EN COLOMBIA MEDIANTE TRAZADORES Y EL MODELO FLUVIAL CLASICO DE LEOPOLD-MADDOCK

INTEGRATED ANALISYS OF "RIO NEGRO" A WIDER STREAM IN COLOMBIA BY MEANS OF TRACERS AND CLASSICAL FLUVIAL MODEL OF LEOPOLD-MADDOCK

Constaín Aragon, Alfredo José[1,]; Peña-Guzman, Carlos[2]

Resumen

El uso combinado de nuevas técnicas de trazador y las potentes formulaciones desarrolladas por L.B. Leopold y otros investigadores del USGS a mediados del siglo pasado, permiten un análisis muy congruente y preciso de ríos anchos o grandes en los que otras técnicas convencionales quedan cortas dada la gran magnitud del flujo. En este artículo se detallan las condiciones de desarrollo del método, las que se aplican a caracterizar el Rio Negro, un cauce muy ancho en la región central de Colombia.

Palabras clave: Análisis, ríos anchos, método.

Abstract

The combined use of new tracer techniques and the powerful formulations developed by L.B. Leopold and other researchers of USGS in middle past century, allow a very congruent and precise analysis of wider or larger streams where other current techniques remain behind, given the big size of flow. In this article is detailed the development conditions of method, which is applied to describe the Rio Negro stream, a wider flow in central region of Colombia.

Key words: analysis, wild rivers, method.

1. INTRODUCCION

El análisis de los parámetros que definen a un cauce natural muchas veces se hace de forma inconexa entre diversas partes, es decir sin una relación de congruencia entre la hidráulica, el transporte de masa y la geomorfología, perdiéndose la oportunidad de conectar los diferentes datos en forma óptima, virtud muy deseable en el desarrollo de los diversos modelos de calidad del agua. En este artículo se desarrolla una presentación "integrada" de estos parámetros, enlazando técnicas ya clásicas como el modelo de Leopold-Maddock y nuevas técnicas de trazador.

2. ANTECEDENTES: EL MODELO DE CAUCE EN "EQUILIBRIO DINÁMICO"

L. Leopold y T. Maddock, (Leopold L, Maddock, 1953) propusieron su modelo potencial, suponiendo una geometría simple para la sección transversal del flujo, con W como ancho medio, *h* como profundidad media, *U* como velocidad media, *Sb* como pendiente y *n* como Número de Manning. (Christofoletti, A., 1981). De acuerdo con este esquema simple (sin considerar taludes) el caudal será el producto de los parámetros geométricos

$$Q = W \times h \times U \qquad [1]$$

Ellos desarrollaron las siguientes definiciones de potencias sobre el caudal, basados en numerosas observaciones que realizaron en su extensa experimentación.

$$W \approx a\, Q^b \qquad [2]$$

$$h \approx c\, Q^f \qquad [3]$$

$$U \approx k\, Q^m \qquad [4]$$

$$S_b = p\, Q^z \qquad [5]$$

$$n \approx q\, Q^y \qquad [6]$$

Los parámetros *a, c, k p* y *q* son valores a hallar mediante los datos experimentales. Normalmente se determinan a través de los datos Caudal-nivel de la oficina gubernamental de hidrología (en

1 Fluvia Tech, Bogotá, Colombia alfredoconstain@fluvia.co

2 Universidad Autónoma de Colombia, Bogotá, Colombia

Recibido: 27/04/2015
Aceptado: 08/06/2015

Colombia el IDEAM), de los datos de trazador y de las observaciones. Las identidades que se cumplen para que las ecuaciones anteriores sean válidas son:

$$k \times c \times a = 1 \quad [7]$$

$$m + f + b = 1 \quad [8]$$

$$k = p^{\frac{1}{2}} \times c^{\frac{2}{3}} \times q^{-1} \quad [9]$$

$$m = \frac{2f}{3} + \frac{z}{2} - y \quad [10]$$

Las observaciones de Leopold apuntan a unos valores muy aproximados de los exponentes de la siguiente forma: *f≈1/2 >m≈1/3>b≈1/4, y z≈-1/2.* Las anteriores franjas de valor aproximado nos dice que el nivel *(h)* es el parámetro que más varía, seguido de la velocidad *(U)* y el que menos varía es la anchura *(W)*.

3. MARCO TEORICO:

3.1. Un nuevo método de trazadores

En anteriores artículos los autores han propuesto una función inédita de la siguiente forma, relacionando dos velocidades, una la de dispersión del trazador, Vdisp, de naturaleza irreversible y medida por su desplazamiento Random Walk y la otra la de advección, U, como factor integrante. Aquí Δ y τ son parámetros característicos de desplazamiento y fase del movimiento Gaussiano mono-dimensional de la pluma de trazador. (Constaín A. y Lemos R., 2011).

$$\phi = \frac{V_{disp}}{U} = \frac{\left(\frac{\Delta}{\tau}\right)}{U} = \frac{\left(\frac{\sqrt{2E\tau}}{\tau}\right)}{U} = \frac{\sqrt{\frac{2E}{\tau}}}{U} \quad [11]$$

La naturaleza especial de Φ se puede caracterizar diciendo que es una función de estado del sistema, definida mediante la siguiente ecuación:

$$\oint_C d\phi = 0 \quad [12]$$

De la Ec. [11] se puede establecer una definición para la velocidad media advectiva:

$$U = \frac{1}{\phi}\sqrt{\frac{2E}{\tau}} \quad [13]$$

Esta ecuación tiene la misma estructura matemática que la ecuación de Chezy, Ec. [14]. Donde *C* es el factor de resistencia de Chezy, *R* el Radio hidráulico y *Sb* la pendiente.

$$U = C\sqrt{R \times S_b} \quad [14]$$

Despejando *a E* de la Ec. [13]:

$$E(t) = \frac{\phi^2 \, U^2 \, \tau}{2} \quad [15]$$

Debe notarse aquí que τ es diferente a la variable independiente *t*. La relación entre ambos tiempos se puede establecer mediante una dinámica del tipo Poisson-Svedberg (Constaín A., Peña-Guzmán C., Mesa D. & Acevedo P., 2014)

$$\beta = \frac{\tau}{t} = e^{-1.54} \approx 0.215 \quad [16]$$

3.2. Una descripción ampliada de la pluma de trazador

La descripción de la pluma de soluto se hace clásicamente por la ecuación clásica de Fick, con *M* la masa de soluto y *A* la sección transversal del flujo. (Fischer H.B., 1967).

$$C(x,t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi \, E \, t}} e^{-\frac{(X - U\,t)^2}{4E\,t}} \quad [17]$$

Sin embargo, dicha descripción es exacta solo si el coeficiente *E* es una función del tiempo, tal como se describe en la ecuación [15]. Ahora reemplazando el valor de la Ecuación [13] en la Ec. [17] se tiene con: √2πβ ≈1.16. La variable *QL* es el caudal "local" correspondiente al tubo de corriente.

$$C(x,t) = \frac{M}{Q_l \, \phi \, t \, 1.16} e^{-\frac{(X - U_x t)^2}{2\beta \phi^2 U_x^2 \, t^2}} \quad [18]$$

La particularidad de esta ecuación (fórmula modificada de Fick) es que reproduce bastante bien las curvas experimentales de trazador.

3.3. La ecuación de Elder como función del tiempo

En 1959 J.W. Elder (Elder, 1959) propuso una ecuación simple para determinar el Coeficiente Longitudinal de dispersión, en función de la pendiente, teniendo en cuenta los fenómenos de turbulencia en un flujo natural.

$$E \approx 5.93 \times h \times \sqrt{h \times g \times S_b} \quad [19]$$

Ahora, si se tiene en cuenta en 1.2.1 esta definición debe también ser función del tiempo, pues corresponde a la *misma* entidad que define la Ec. [15]

3.4. Concepto de "tubo de corriente de trazador"

Se define de manera elemental como el cilindro ideal dentro del fluido que contiene las partículas de trazador a partir del punto de inyección hasta el punto en donde se mide su evolución. El trazador paulatinamente se va extendiendo longitudinalmente y se va ampliando a lo ancho.

Cuando el trazador llena uniformemente el área de la sección transversal del tubo, se dice que el trazador cumple con "Mezcla completa" en dicho tubo. La distancia correspondiente se denomina "Longitud de mezcla" para el tubo considerado y se puede mostrar que ocurre a Φ≈0.38 para el desarrollo de la pluma.

3.5 Estimación de la velocidad "local" por la pluma de trazador

La distribución lateral de velocidades para un flujo natural se puede dar aproximadamente mediante una curva normalizada para un flujo turbulento confinado en un tubo rugoso, tal como se muestra en la Figura 1.

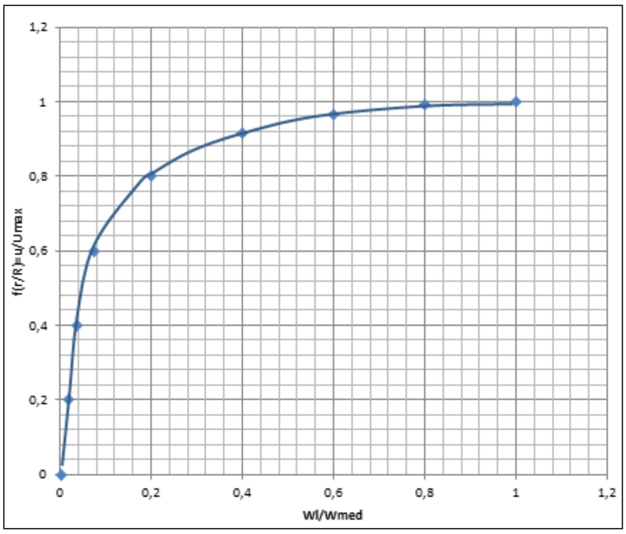

Figura 1. Distribución lateral de velocidades normalizadas en función de la razón *Wl/Wmed*.

Esta distribución define la razón de la velocidad "local" de la pluma de trazador a la "velocidad máxima" en el centro del flujo, *UL/Umax*, en función de la razón del ancho "local" (de la pluma) al semi-ancho del flujo (*WL=W/2*). La pluma de trazador se ubica desarrollándose adyacente en la orilla, Figura 2.

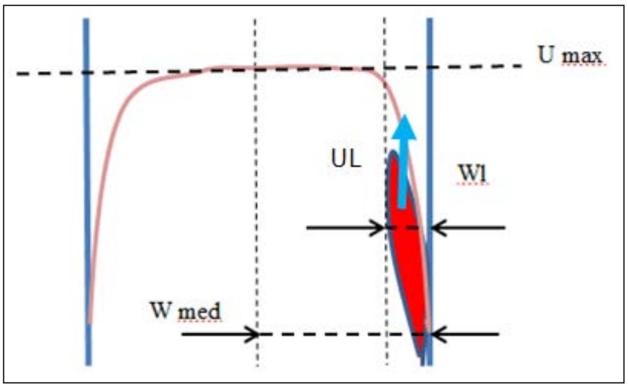

Figura 2. Distribuciones transversales de velocidades longitudinales y la pluma de trazador

Conociendo la velocidad máxima es posible calcular la velocidad media mediante la siguiente relación aproximada.

$$U \approx 0.93 \times U_{\max} \quad [20]$$

Es claro ahora que para conocer la velocidad "local" de la pluma de trazador se debe conocer el ancho "local". Para este cálculo se usa la relación de Ruthven que enlaza la distancia longitudinal con parámetros transversales. Aquí εy el Coeficiente transversal de difusión.

$$X \approx \frac{0.31 \times U \times W_l^2}{\varepsilon_y} \quad [21]$$

Por lo tanto el ancho "local" de la pluma de trazador, a un tiempo *t*, se puede establecer como en la Figura 3 y la siguiente ecuación.

$$W_l \approx \sqrt{3.22 \times \varepsilon_y \times t} \quad [22]$$

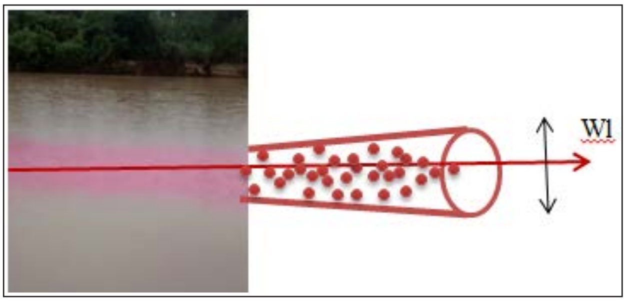

Figura 3. Estimación del ancho de la pluma por los trazadores

El Coeficiente transversal de difusión se calcula usualmente con una segunda ecuación de Elder, una vez se conozca la pendiente *Sb*, y la profundidad, *h*. La aceleración de la gravedad es *g*.

$$\varepsilon_y \approx 0.23 \times h \times \sqrt{h \times g \times S_b} \quad [23]$$

Como existe una relación definida entre el Coeficiente longitudinal de dispersión, *E*, función del tiempo, y el coeficiente transversal de difusión (también función del tiempo), a veces se prefiere calcular el segundo a partir del primero, obviando el conocimiento directo de la pendiente.

$$\varepsilon_y(t) \approx \frac{E(t)}{25.8} \qquad [24]$$

4. METODOLOGIA:

4.1. Fundamentos

Los trazadores en el método analizado en este artículo se van a utilizar fundamentalmente para describir la distribución lateral de velocidades que es válida para un experimento dado. En concreto, a partir del ancho “local” y velocidad “local” de la riada de soluto en el punto de medición se calcula la velocidad media del cauce. De allí, a partir de las relaciones potenciales de Leopold-Maddock, Ec.[4] y Ec [3], cuyas constantes de definición se hallan con los datos del IDEAM, se determinan el caudal y nivel reales.

En una segunda fase se calculan los constantes para los modelos potenciales de geomorfología y a partir de ellos, más la observación directa de la rugosidad superficial, se calcula la pendiente. Este valor se constata mediante el cálculo alterno por medio de la Ecuación de Elder, usando los datos correspondientes de trazador.

4.2. Aplicación específica de la metodología a un cauce ancho en la región central de Colombia.

Se aplica la metodología al Rio Negro en la región de Cundinamarca en Colombia. Las condiciones encontradas en el cauce para el día de la medición (primeros días de agosto) corresponden a las de estiaje. De acuerdo con los datos del IDEAM para la estación hidrometeorológica “Guaduero” (23067050) el mes de agosto es tradicionalmente el más seco, con caudal mensual medio *de Q=31, 3 m3 y mínimo de Q=6.3 m3/s*. Su curso es de anchura variable (*100m-30m*) con una media estimada de *W≈60 m*. Figura 4

Figura 4. Aspectos del Rio Negro en “Guaduero”

5. RESULTADOS:

5.1. Experimentos de trazador

Dadas las condiciones del cauce, se procuró hacer unos vertimientos a relativa larga distancia, *X1= 365 m* y *X2= 500 m*, con gran masa de trazador, de forma que la pluma cubriera una anchura significativa del cauce y representar aproximadamente bien la velocidad de transporte. Además se trató de hacer vertimientos en la parte central del cauce para que el trazador cubriera zonas amplias en el flujo.

Se utilizaron masas de Rodamina significativas para poder hacer visible el movimiento de las plumas. La Figura 5 muestra el avance de la pluma en diversos lugares, incluido el de la medición, aguas abajo. Nótese que la estrategia en este cauce muy ancho fue verter una gran cantidad de rodamina WT y dejar que evolucione en un tramo muy largo, de tal manera que la mancha cubra una porción significativa de semi-ancho y caracterice adecuadamente la distribución lateral de velocidades, condición necesaria para evaluar la velocidad media de todo el flujo en el tramo.

5.2. Resultados de los experimentos con trazador

Figura 5. Avance de la pluma de trazador en varios puntos, incluido el de medición.

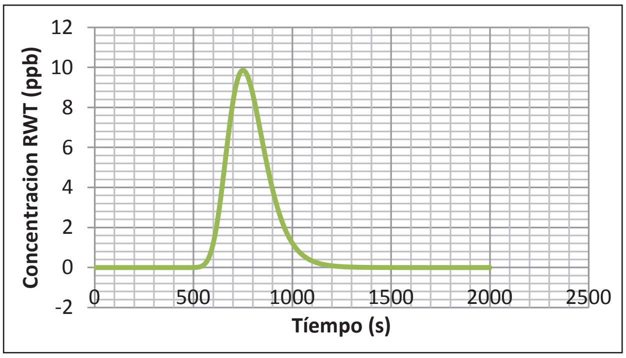

Figura 6. Curva de trazador modelada

A partir de los datos del equipo IDF con un vertimiento aguas arriba y una distancia *X= 365 m* y con una masa de 42 gramos aproximadamente de RWT se muestra la curva de modelación correspondiente. Figura 6.

5.3. Datos básicos del trazador

En el tramo escogido del Rio Negro, se hizo un vertimiento de RWT a una distancia de *X=365 m* y con *m=42 gramos* de RWT. Los datos correspondientes a las modelaciones logradas se muestran en el Cuadro 1. Pese a la gran variación del ancho un valor representativo es cercano a *W≈60 m.*

X=365 m	*to*= 762 s.
M (masa)= 42 g (RWT)	*W*(Ancho medio estimado)≈60 m
U(velocidad media)=0.48 m/s	*Φ*=0.27

Cuadro 1. Resumen de datos básicos del trazador

5.4. Análisis de los datos de series históricas de la estación limnimetrica del IDEAM: Correlaciones potenciales (Leopold-Maddock) para Q-h (nivel- caudal) y Q-U (velocidad- caudal)

Se parte de la distribución cruda de pares (nivel-Caudal) debidamente clasificados. Se obtiene en seguida una curva potencial de regresión aproximada (R^2= 0.8503) que relaciona analíticamente los datos estudiados. Figura 7. La ecuación de la curva correspondiente es:

$$\bar{h} \approx 0.4227 \times Q^{0.3127} (m) \quad [25]$$

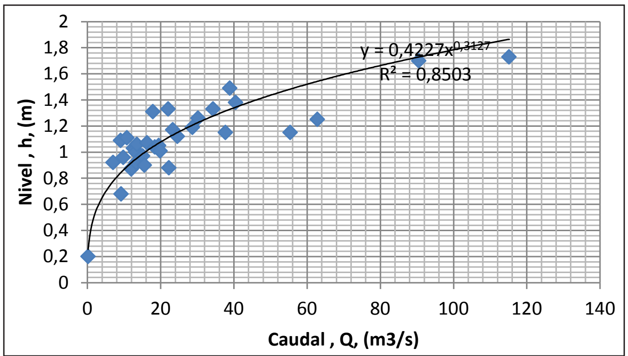

Figura 7. Distribución experimental y curva aproximada de correlación (h-Q)

Por lo tanto los parámetros potenciales correspondientes son: *c≈0.4227* y *f≈0.3127*

Para desarrollar esta expresión aproximada se usa la distribución anterior (Nivel- Caudal) introduciendo la semi-anchura (ya que la velocidad varía simétricamente de una orilla al centro) y se modifica de acuerdo con la siguiente ecuación para obtener la distribución deseada (*U-Q*) asumiendo que el semi-Ancho aproximado del tramo es *W/2=30 m*.

$$U \approx \frac{Q}{h \times W / 2} \quad [26]$$

A partir de esta definición se puede hallar la segunda regresión potencial aproximada (R^2= 0.9487), la cual se muestra en la Figura 8. Su expresión potencial queda, con los parámetros potenciales correspondientes como *k≈0.062 y m≈0.7643*:

$$U \approx 0.062 \times Q^{0.7643} \quad [27]$$

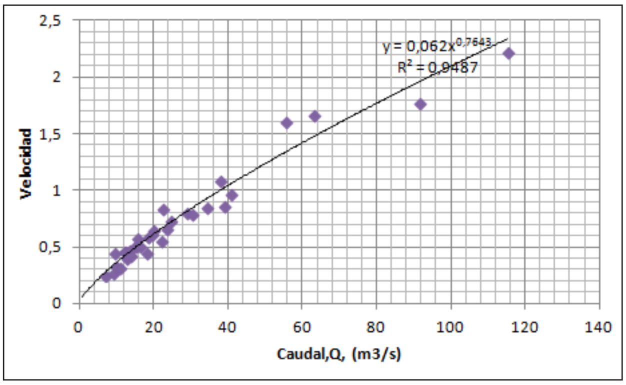

Figura 8. Distribución y curva de regresión correspondiente (U-Q)

5.5. Cálculo de la velocidad media en función del ancho de la pluma de trazador en el punto de medición

Se calcula inicialmente el Coeficiente Longitudinal de dispersión en el sitio indicado, asumiendo que la velocidad media es la dada por el trazador.

$$E \approx \frac{\phi^2 \times U^2 \times 0.215 \times t}{2} \approx \frac{(0.27)^2 \times (0.48)^2 \times 0.215 \times 762}{2} \approx 1.38\, m^2 / s \quad [28]$$

Se calcula entonces el Coeficiente transversal de difusión, Ec. [24]:

$$\varepsilon_y(t) \approx \frac{E(t)}{25.8} \approx \frac{1.38}{25.8} \approx 0.054\ m2/s \qquad [29]$$

Luego se utiliza la Ec. [22] y los datos del Cuadro 1 de los datos del trazador.

$$W_l \approx \sqrt{3.22 \times \varepsilon_y \times t} \approx \sqrt{(3.22 \times 0.054 \times 762)} \approx 11.5\ m \qquad [30]$$

Por lo tanto, la razón *Wl/(W/2)* es:

$$\frac{W_l}{(W/2)} \approx \frac{11.5}{(60/2)} \approx \frac{11.5}{30} \approx 0.38 \qquad [31]$$

Con este dato concreto se grafica su correspondiente razón *Ul/Umx* en la Figura 9. Por lo tanto la relación de velocidades correspondiente es:

$$\frac{W_l}{(W/2)} \approx 0.38 \Rightarrow \frac{U_l}{U_{\max}} \approx 0.90 \qquad [32]$$

Esto quiere decir que la velocidad máxima es:

$$U_{Mxm} \approx \frac{U_l}{0.90} \approx \frac{0.48}{0.90} \approx 0.53 \qquad [33]$$

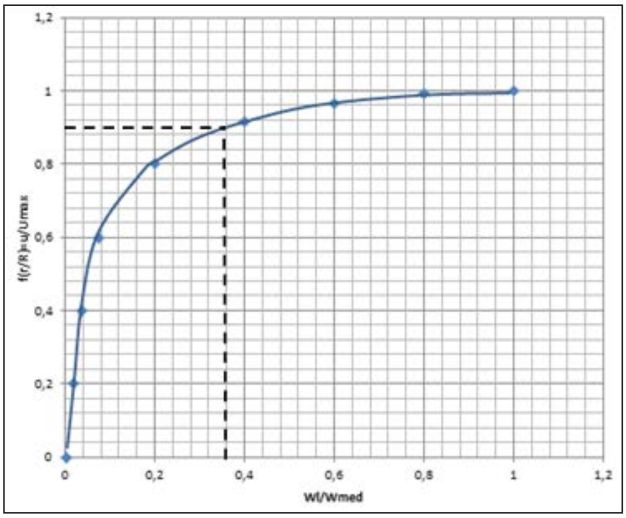

Figura 9. Relación entre las razones de ancho y velocidad para el tramo.

Si se quiere conocer la velocidad media del flujo en el tramo se calcula así:

$$U \approx 0.93 \times 0.53 \approx 0.50\ m/s \qquad [34]$$

Se demuestra de esta forma que cuando la pluma de trazador cubre significativamente el flujo (casi un 40% del semi ancho) y el tubo de corriente por el que avanza el trazador lleva sus partículas llenando uniformemente la sección transversal del mismo (en "mezcla completa ya que $\phi<0.38$) entonces la velocidad media medida por el instrumento IDF (*U=0.48 m/s*) es virtualmente la misma velocidad media del flujo calculada (*U=0.50 m/s*).

5.6. Cálculo del caudal y nivel actuales para el tramo medido

Con este dato de la velocidad media *U=0.50 m/s* en firme se calcula entonces el valor del caudal utilizando la distribución potencial de Leopold-Maddock de la Ec. [27]

$$Q \approx \left(\frac{U}{0.062}\right)^{\frac{1}{0.7652}} \approx \left(\frac{0.50}{0.062}\right)^{1.31} \approx 15.4\ m3/s \qquad [35]$$

Con este dato en firme del caudal real sobre el flujo se calcula ahora el nivel real en ese mismo tramo, Ec. [25]:

$$\bar{h} \approx 0.4227 \times Q^{0.3127}(m) \approx 0.4227 \times (15.4)^{0.3127} \approx 1.0\ m \qquad [36]$$

Para un cauce muy ancho la profundidad (nivel) es el mismo Radio hidráulico:

$$\bar{h} \approx R_h \approx 1.0\ m \qquad [37]$$

5.7. Cálculos de geomorfología (pendiente) en el tramo estudiado a partir de los modelos potenciales y la observación directa de la rugosidad superficial

Para hallar valores aproximados que se ajusten congruentemente se plantean las ecuaciones de Leopold-Maddock para este tipo de parámetros, Ec. [5] y Ec. [6]

$$S_b = p\, Q^z \qquad [38]$$

$$n \approx q\, Q^{y}$$

[39]

Además las siguientes ecuaciones auxiliares, Ec. [9] y Ec. [10]

$$k = p^{\frac{1}{2}} \times c^{\frac{2}{3}} \times q^{-1}$$

[40]

$$m = \frac{2f}{3} + \frac{z}{2} - y$$

[41]

En el desarrollo anterior se aclaro que: *m≈0.7643, k≈0.062, c≈0.4227 y f≈0.3127.* A modo de hipótesis se acepta en principio el valor típico usado por Leopold de z≈-1/2. Por lo tanto el exponente *y* vale:

$$y = \frac{2f}{3} + \frac{z}{2} - m = \frac{2 \times 0.3127}{3} + \frac{-1}{4} - 0.7643 \approx -0.81$$

[42]

Para resolver la Ec. [39] y determinar *q* es necesario determinar la rugosidad por el procedimiento usual reseñado en el texto de V.T. Chow (Chow V., 1983) mediante el siguiente Cuadro 2, que alimenta la siguiente relación de estimación:

$$n \approx m_s (no + n1 + n2 + n3 + n4)$$

[43]

Ítem	Condiciones	Valor
1. Material del lecho	Gran distribución de grava fina y algo de grava gruesa	N0 ≈0.025
2. Grado de irregularidad	suave	N1≈0.005
3. Variaciones de la sección transversal	Frecuentemente alternante	N2≈0.010
4. Efecto relativo de las obstrucciones	Menor	N3≈0.005
5. Vegetación	Baja	N4≈0.005
Suma		Σ=0.050
6. Multiplicador: Grado de efecto por los meandros	Apreciable	1.15
Resultante		N≈0.058

Cuadro 2. Estimación de la rugosidad superficial para el tramo

Por lo tanto:

$$n \approx 0.058 \approx q\, Q^{-0.81}$$

[44]

Y entonces:

$$q \approx 0.058 \times \frac{1}{Q^{-0.81}} \approx 0.058 \times 15.3^{0.81} \approx 0.53$$

[45]

Y finalmente para hallar *p* se tiene:

$$p^{\frac{1}{2}} \approx \frac{k \times q}{c^{\frac{2}{3}}}$$

[46]

O sea:

$$p \approx \left(\frac{k \times q}{c^{\frac{2}{3}}}\right)^2 \approx \left(\frac{0.062 \times 0.53}{(0.4227)^{\frac{2}{3}}}\right)^2 \approx 0.0034$$

[47]

Y la pendiente es:

$$S_b = \frac{0.0034}{\sqrt{15.3}} \approx 8.7 \times 10^{-4}$$

[48]

Se verifica la validez de este valor mediante la ecuación de Chezy-Manning:

$$U \approx \frac{h^{\frac{1}{6}}}{n} \times \sqrt{h \times S_b} \approx \frac{1.0^{\frac{1}{6}}}{0.058} \times \sqrt{1.0 \times 0.00087} \approx 0.51\, m/s$$

[49]

Esta coincidencia entre el cálculo de la velocidad media por el modelo potencial de Leopold-Maddock y la aplicación de la ecuación aproximada de Chezy-Manning con un error del 2% es una primera indicación de la congruencia interna y certeza de los resultados de la aplicación de esta metodología.

5.8. Verificación de la geomorfología según Elder

Hay una forma adicional, directa de verificar este dato de la pendiente hallado a partir de la evaluación de la rugosidad según Manning y el modelo potencia de Leopold-Maddock. Este método alterno es usando la ecuación de Elder. Un primer paso es despejar la pendiente de la ecuación de Elder. Luego se igualan las dos definiciones de la velocidad, Ec. [13] y [14] y de allí se define una función de “estimación optima”, *F*, la cual en el caso ideal debe valer exactamente el Coeficiente numérico de Elder, *F=5.93*

$$S \approx \frac{E^2}{35.2 \times h^3 \times g}$$

[50]

Y

$$F \approx \phi^2 \times 0.215 \times t \times \left(\frac{C^2}{2} \right) \times \sqrt{\frac{S_b}{h \times g}}$$ [51]

En el caso presente del Rio Negro, se quiere es verificar el valor de la pendiente (*Sb≈0.0007*) entonces se hace cambio y más bien se calcula el valor correspondiente del Coeficiente Longitudinal de dispersión (que como se sabe no es constante) y con este valor concreto se calcula la función de estimación, la cual debe dar muy cercana al valor ideal de 5.93. Entonces:

$$E \approx \sqrt{(S_b \times 35.2 \times h^3 \times 9.81} \approx \sqrt{(0.00087 \times 35.2 \times 1.0^3 \times 9.81)} \approx 0.55\ m2/s$$ [52]

Se calcula el coeficiente de resistencia de Chezy, necesario para calcular la función de estimación:

$$C = \frac{U}{\sqrt{RS}} \approx \frac{0.50}{\sqrt{1.0 \times 0.00087}} \approx 17.0\ m^{1/2}/s$$ [53]

Se despeja el siguiente factor de la definición de *E*:

$$\phi^2 \times \tau \approx \frac{2E}{U^2} \approx \frac{2 \times 0.55}{0.50^2} \approx 4.40\ s$$ [54]

Se calcula finalmente *F,* la función de estimación para verificar si vale el ideal de 5.93:

$$F \approx \phi^2 \times \tau \times \left(\frac{C^2}{2} \right) \times \sqrt{\frac{S}{h \times g}} \approx 4.40 \times \left(\frac{17.0^2}{2} \right) \times \sqrt{\frac{0.00087}{1.0 \times 9.81}} \approx 5.99$$ [55]

Esta es una aproximación bastante aceptable (1.0%), teniendo en cuenta las aproximaciones en los distintos cálculos, por lo tanto queda mostrada fehacientemente la congruencia de los diferentes valores.

6. CONCLUSIONES:

1.- Se plantea un método de análisis integral de cauces en el que los diversos campos (hidráulica, transporte de masa y geomorfología) son interconectados de manera congruente a partir de los modelos potenciales de cauce (Leopold-Maddock) y un nuevo concepto en la evolución de los trazadores. Se aplica este procedimiento a resolver un cauce muy ancho en la región central de Colombia. Para esto se manipulan los valores estadísticos Nivel-caudal de una estación limnimetrica del IDEAM.

2.- Dentro de las innovaciones conceptuales introducidas en la teoría de trazadores se acepta que los coeficientes de transporte son funciones del tiempo. Usando entonces la ecuación de Elder es posible estimar el valor aproximado de la pendiente mediante su manipulación en el tiempo.

3.- Con los datos de trazador, asumiendo un valor dado para la anchura, se obtiene una distribución aproximada Velocidad media-Caudal. Luego, a partir de los datos de la estación limnimetrica cercana se obtienen los coeficientes potenciales de los parámetros geométricos e hidráulicos del tramo considerado. Estos datos son verificados entonces por los datos de trazador.

4.- La aplicación ordenada de este procedimiento va a permitir caracterizar cauces muy anchos utilizando medios limitados, y lo más importante estos datos serán altamente congruentes, muy útiles a la hora de calibrar modelos hidráulicos o de calidad de agua.

BIBLIOGRAFIA

Christofoletti, A. (1981). La noción de equilibrio en geomorfología fluvial. Revista de Geografía Norte Grande, 8: 69-86.

Constaín, A.J y Lemos R.A. (2011). Una ecuación de velocidad media del flujo en régimen no uniforme, su relación con el fenómeno de dispersión como función del tiempo y su aplicación a los estudios de calidad de agua. Revista Ingeniería Civil, No 164, CEDEX, Pp 114-135.

Constaín, A., Peña, C., Mesa, D. y Acevedo, P. (2014). Svedberg´s number in diffusion processes. 2014 International Conference in hydraulic resources. Santorini.

Fischer, H.B. (1967). The mechanics of dispersion in natural streams. Journal of the Hydraulics division, November, Pp. 187-216.

Elder, W.J. (1959). The dispersion of marked fluid in turbulent shear Flow.Journal of Fluid Mechanics / Volume 5 / Issue 04 / May 1959, pp 544- 560

Leopold, L.B. y Maddock T.(1953).The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. USGS paper 252.

Chow V.T. (1983). Hidráulica de canales abiertos. Editorial Diana, México.