

[Con el ratón afuera: **Froude**; con el ratón adentro: **Vedernikov**]

FROUDE Y VEDERNIKOV: PILARES DE LA HIDRÁULICA DE CANALES

Víctor M. Ponce

Profesor Emérito de Ingeniería Civil y Ambiental

Universidad Estatal de San Diego, California

22 de enero de 2025

RESUMEN. Hemos demostrado que sólo hay tres velocidades características en el flujo en canal abierto, a través de una amplia gama de aplicaciones en flujo estable e inestable, incluyendo el diseño de canales, control de flujo, enrutamiento de inundaciones, e inestabilidad del flujo superficial. Éstas son: (1) la velocidad media de flujo u , (2) la celeridad relativa de la onda cinemática v , y (3) la celeridad relativa de la onda dinámica w . Estas tres velocidades dan lugar a *sólo dos* números adimensionales independientes: (1) el número de Froude $\mathbf{F} = u/w$, y (2) el número de Vedernikov $\mathbf{V} = v/w$. La tercera relación, v/u , propiamente \mathbf{V}/\mathbf{F} , es igual a $(\beta - 1)$, siendo β el exponente de la curva caudal-área de flujo ($Q = \alpha A^\beta$). Por lo tanto, el exponente β encapsula ambos números de Froude y Vedernikov, al mismo tiempo que describe las propiedades de fricción y de sección transversal del canal en consideración. De hecho, los números de Froude y Vedernikov constituyen los dos pilares sobre los que se sustenta toda la hidráulica de canales abiertos.

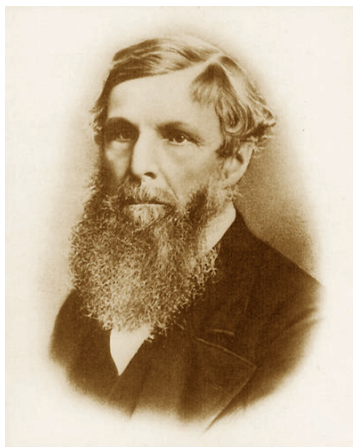
1. INTRODUCCION

A principios del siglo XX, la ingeniería hidráulica, una rama de la ingeniería civil, comenzó a experimentar un acelerado ritmo de desarrollo. La población mundial estaba aumentando, y se estaba volviendo claro que las sociedades humanas tenían que confiar en el en ese entonces novedoso método científico para la utilización y gestión de los recursos hídricos. A principios del Siglo XX, el uso del número de Froude, desarrollado en Inglaterra en la década de 1860, se estableció firmemente en la práctica de la ingeniería hidráulica.

El número de Froude define el umbral en el que la velocidad media del flujo es igual a la velocidad relativa, es decir, la celeridad relativa, de una pequeña perturbación superficial. Varias décadas después, específicamente a mediados del siglo XX (1945-46), surgió el concepto de número de Vedernikov en la Unión Soviética. Este último comparaba la celeridad de una pequeña perturbación, impulsada por gradientes de energía, con la de una perturbación de mayor tamaño, impulsada por gradientes de masa.

En este artículo, demostramos que las tres velocidades que definen estos dos conceptos básicos (los números de Froude y Vedernikov) son las únicas velocidades fácilmente identificables en la hidráulica de canales abiertos. Este hecho hace que estos dos conceptos fundamentales se contituyan en los pilares sobre los que se apoya *toda* la hidráulica de canales. El sesgo histórico con el que presentamos el tema mejora significativamente la teoría y logra eficazmente la aclaración de conceptos básicos. Tenemos la certeza que la práctica de la profesión debe mejorar gracias a ello.

2. WILLIAM FROUDE: UNA BREVE BIOGRAFÍA



William Froude fue un distinguido ingeniero de nacionalidad británica, especialista en hidrodinámica y arquitectura naval. Nació en Dartington, en Devon, Inglaterra, el 28 de noviembre de 1810. Falleció de un derrame cerebral a los 69 años durante un crucero a Simon's Town, Sudáfrica.

Froude estudió matemáticas en Oxford. En 1832, inmediatamente después de su graduación, trabajó para Isambard Kingdom Brunel, el reconocido impulsor de ferrocarriles, como topógrafo en el Ferrocarril *Great Western*, en Inglaterra. En 1857, Brunel le consultó sobre el comportamiento del

barco *Great Eastern* en altamar. En base a las recomendaciones de Froude, Brunel modificó el diseño del casco del barco para minimizar la posibilidad de volteo.

A partir de 1859, utilizando sus propios recursos, Froude construyó el primer tanque de remolque (*tow tank*), en el cual realizó experimentos con modelos a escala reducida, primero en su casa de Paignton, en el condado de Devon, Inglaterra, y luego más tarde en su otra casa, llamada Chelston Cross, en la cercana ciudad de Torquay.

En 1861, Froude escribió un artículo sobre el diseño de la estabilidad de los barcos, publicado en las Actas de la Institución de Arquitectos Navales (*Proceedings of the Institution of Naval Architects*). Entre 1863 y 1867, demostró la relación existente entre el modelo y el prototipo, afirmando que la resistencia por fricción era igual en ambos cuando la velocidad V era proporcional a la raíz cuadrada de la longitud del barco L . A este concepto Froude denominó la *Ley de Comparación*:

$$V = k L^{1/2} \quad (1)$$

en la cual k es una constante aplicable tanto al modelo como al prototipo. La Ecuación 1 se conoce como la ley de Froude.

Froude fue el primero en identificar la forma más eficiente para el casco de los barcos, así como en predecir la estabilidad de los mismos en base a modelos a escala reducida (Fig. 1). En la hidráulica de canales abiertos, la ley de Froude se expresa como el reconocido número de Froude, definido de la siguiente manera:

$$F = V / (gD)^{1/2} \quad (2)$$

en la cual V = velocidad media del flujo, D = profundidad hidráulica, y g = aceleración gravitacional. En teoría, el denominador de la Ec. 2 es la celeridad relativa de la onda dinámica (Ponce, 2023a).

A diferencia de la constante k en la ley de Froude (Ec. 1), el número de Froude F en la Ec. 2 es adimensional. En la hidráulica de canales abiertos, la longitud del barco L (una cantidad medida en dirección horizontal) ha sido reemplazada por la profundidad hidráulica D (una medida vertical) con el fin de tomar en cuenta adecuadamente la fuerza de gravitación.



William M Connolley (Wikipedia)

Fig. 1 Los cascos de Swan (arriba) y Raven (abajo) en exposición en el Museo de Ciencias de Londres. Estos modelos fueron contruidos por Froude con el fin de establecer leyes de resistencia y escala aplicables al diseño de los cascos de los barcos.

3. VALENTIN V. VEDERNIKOV: UNA BREVE BIOGRAFÍA



Valentin Valentinovich Vedernikov, doctor en ciencias técnicas (terminología ruso/soviética; un nivel por encima del doctorado en el mundo occidental), se graduó en el Instituto Politécnico del Don (ciudad de Novocherkask, región del óblast de Rostov) en 1928. Trabajó en el Instituto Estatal de Recuperación de Tierras Agrícolas, así como en varias organizaciones de gestión del agua de la región del Cáucaso Norte y el Turkestán, ubicada actualmente en Asia Central.

En 1934, Vedernikov publicó un libro titulado *Filtración desde canales*, en el que utilizó un método de imágenes conformes para el movimiento estable sin presión de agua subterránea en un plano vertical. En este libro utilizó, por primera vez, el método de Vedernikov-Pavlovskiy. Este último se basa en imágenes conformes de regiones de flujo en el plano del potencial complejo de velocidad de filtración y la función compleja de Zhukovkiy.

En 1935, Vedernikov obtuvo el doctorado sin defender su tesis; en 1938, defendió su tesis y recibió el título de Doctor en Ciencias Técnicas. Los hallazgos de Vedernikov fueron resumidos en el libro

titulado *Teoría de la filtración y su uso en los campos de irrigación y drenaje*, publicado en 1939.

En 1940-1941, Vedernikov fue presidente del Departamento de Hidráulica e Hidromaquinaría en el Instituto Turf de Moscú. En 1941-1942 trabajó en el Instituto de Mecánica de la Academia de Ciencias de la URSS. A partir de 1943, trabajó en la Sección de Investigación Científica en Hidráulica de la Academia Soviética de Ciencias. En 1947 fue nombrado Director del Departamento de Hidráulica del Instituto de Educación de Energía a Distancia de la Unión Soviética.

Entre 1945 y 1947, Vedernikov explicó primero en forma teórica, y luego experimentalmente, el fenómeno del flujo inestable de agua en canales, con la consecuente formación de ondas de rollo, definiendo el criterio de inestabilidad del flujo (Fig. 2). Para llevar a cabo esta tarea, utilizó las ecuaciones de Saint-Venant del flujo inestable en canales abiertos. En la literatura de ingeniería hidráulica, su concepto se conoce como el número de Vedernikov (**Powell, 1948; Chow, 1959**). Las investigaciones de Vedernikov contribuyeron al avance del conocimiento de la teoría de filtración, así como al del diseño y construcción de estructuras hidráulicas y de riego y drenaje.



Cornish (1907)

Fig. 2 Fotografía temprana (1907) de un tren de ondas de rollo en los Alpes suizos.

Esta breve biografía del profesor V. V. Vedernikov fue elaborada a partir de fuentes originales por Aleksandr Gostomelskiy, a petición del profesor Víctor M. Ponce. Se agradece la colaboración del profesor Dmitriy Vyacheslavovich Kozlov, director del Departamento de Hidráulica y Construcción Hidráulica de la Universidad Estatal de Construcción de Moscú. La foto del profesor Vedernikov fue proporcionada por el profesor Kozlov (2021).

4. VELOCIDADES EN FLUJO EN CANAL ABIERTO

Flujo permanente: Velocidad media

Existen tres velocidades claramente definidas en el flujo en canal abierto (**Ponce, 1991**). La primera es la velocidad media del flujo permanente, a la cual hacemos referencia en este artículo como u . Esta velocidad se calcula utilizando las reconocidas ecuaciones de Chezy y/o Manning. La fórmula de Chezy es (**Ponce, 2014: Capítulo 5, Chezy**):

$$u = C (RS)^{1/2} \quad (3)$$

en la cual u = velocidad media del flujo uniforme o en equilibrio, con unidades de L/T (m/s); C = coeficiente de Chezy, con unidades de $L^{1/2}T^{-1}$; R = radio hidráulico, con unidades de L (m); y S = pendiente del canal, o pendiente del fondo, que es la misma que la pendiente de fricción en el flujo permanente, en unidades adimensionales (m/m).

La fórmula de Manning es (**Ponce, 2014: Capítulo 5, Manning**):

$$u = (1/n) (R)^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

en la cual u = velocidad media del flujo uniforme o en equilibrio, en m/s; n = coeficiente de Manning; y R (en m) y S (en m/m) han sido definidos previamente. La fórmula de Manning en unidades habituales de los EE. UU. es:

$$u = (1.486/n) (R)^{2/3} S^{1/2} \quad (5)$$

en la cual R (en pies) y S (en pies/pies).

Si bien la ecuación de Manning suele preferirse en la práctica, la ecuación de Chezy puede expresarse en forma adimensional, lo que constituye una ventaja, en particular para estudios teóricos (**Ponce, 2014: Capítulo 5, Chezy**).

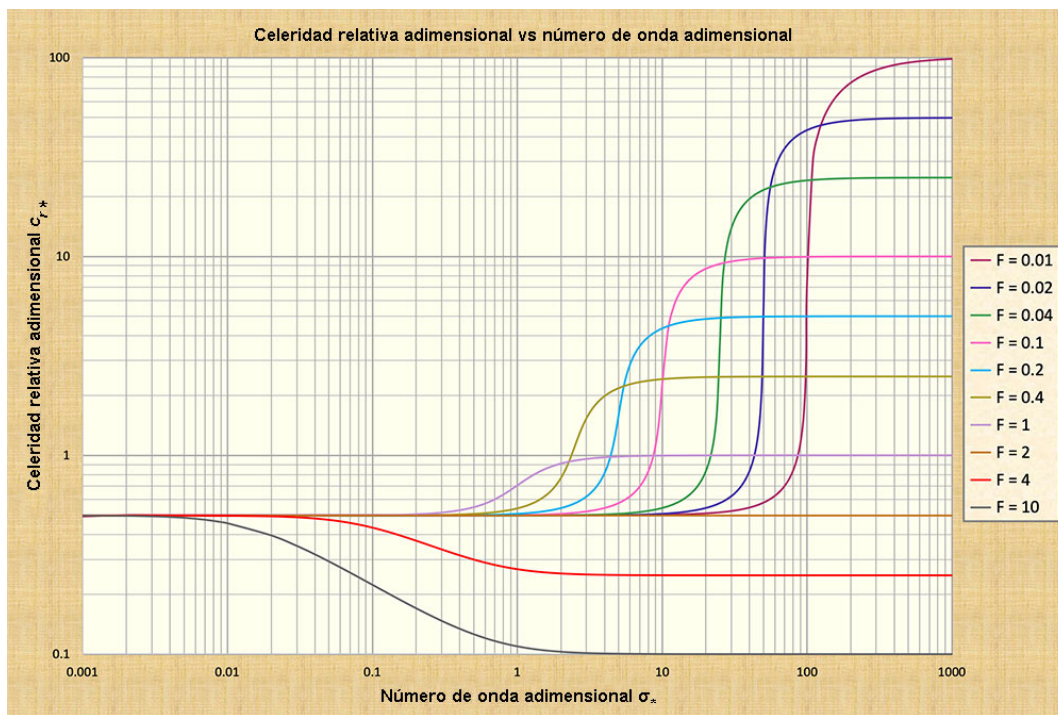
La velocidad media de flujo u se calcula utilizando cualquiera de las reconocidas fórmulas de Manning o Chezy de la hidráulica de canales abiertos.

Las Ecuaciones 3 a 5 calculan la velocidad media u , es decir, la velocidad del flujo uniforme o en equilibrio. El resto de esta sección describirá las otras dos velocidades en el flujo en canal abierto, es decir, las velocidades o, más propiamente, las celeridades que caracterizan el flujo inestable.

Flujo inestable: Dos celeridades de onda

Existen dos celeridades de onda que completan la tríada de velocidad/celeridades en el flujo en canal abierto: (1) la celeridad de la onda cinemática; y (2) la celeridad de la onda dinámica. Una onda cinemática es una perturbación superficial "grande", es decir, una onda que presenta un número de onda adimensional pequeño, en el sentido de **Ponce y Simons (1977)**. Por el contrario, una onda dinámica es una perturbación superficial "pequeña", es decir, una onda que presenta un número de onda adimensional grande.

La diferencia entre ondas cinemáticas y dinámicas está representada admirablemente en el gráfico de celeridades de onda adimensionales relativas vs. números de onda adimensionales (Fig. 3). Las ondas cinemáticas se representan a la izquierda, mientras que las ondas dinámicas se representan a la derecha. Desde una perspectiva histórica, las ondas cinemáticas son las de **Seddon (1900)**; las ondas dinámicas son las de Lagrange (1788). La atenuación de onda, tanto para ondas cinemáticas como dinámicas, es demasiado pequeña o inexistente, porque las celeridades de onda adimensionales relativas (en las ordenadas) en ambos extremos del espectro (izquierdo y derecho) permanecen constantes e independientes del número de onda adimensional (en las abscisas).



Ponce y Simons (1977)

Fig. 3 Celeridad de onda relativa adimensional vs. número de onda adimensional en la propagación de ondas superficiales en el flujo en canal abierto.

La celeridad de la onda cinemática es: $c_k = \beta u$, en la cual β es el exponente de la relación caudal-area de flujo $Q = \alpha A^\beta$ (**Ponce, 2014: Capítulo 10, Ondas cinemáticas**). Por lo tanto, la celeridad de la onda cinemática relativa (es decir, la celeridad relativa a la velocidad media del flujo) es: $c_{rk} = v = \beta u - u = (\beta - 1) u$. La celeridad de la onda cinemática relativa adimensional es: $c_{drk} = c_{rk} / u = v / u = \beta - 1$. El valor de β es una función del tipo de fricción y la forma de la sección transversal (**Ponce, 2014: Capítulo 10, Ondas cinemáticas**). Para el caso de fricción de Chezy en un canal hidráulicamente ancho: $\beta = 1.5$. Por lo tanto, $c_{drk} = 0.5$. Este valor se representa gráficamente en la margen izquierda de la Fig. 3.

La celeridad de la onda cinemática relativa adimensional v se obtiene restando la velocidad media del flujo de la celeridad de la onda cinemática, y luego dividiendo el resultado por la velocidad media del flujo. Esta operación da como resultado: $v = \beta - 1$.

La celeridad de la onda dinámica tiene dos componentes: $c_d = u \pm (gD)^{1/2}$, en la cual g = aceleración gravitacional, y $D = A/T$ = profundidad hidráulica. Por lo tanto, la celeridad relativa de la onda dinámica (es decir, la celeridad relativa a la velocidad media) es: $c_{rd} = w = (gD)^{1/2}$. La celeridad relativa adimensional de la onda dinámica es: $c_{drd} = c_{rd} / u = w / u = 1/F$, en la cual F = número de Froude. La Figura 3 muestra, hacia la margen derecha, la representación gráfica de varios valores de c_{drd} , correspondientes a sus respectivos números de Froude; por ejemplo, para $F = 0.01$: $w = 100$; para $F = 0.1$: $w = 10$; y para $F = 1$: $w = 1$.

La celeridad relativa adimensional de la onda dinámica w se obtiene restando la velocidad media del flujo de la celeridad de la onda dinámica, y luego dividiendo el resultado por la velocidad media del flujo. El valor resultante w es el recíproco del número de Froude: $w = 1/F$.

En resumen, las tres velocidades (una velocidad y dos celeridades) preeminentes en el flujo en canal abierto, incluyendo tanto el flujo permanente como el impermanente, son: (1) u = velocidad media del flujo, (2) v = celeridad relativa de la onda cinemática, y (3) w = celeridad relativa de la onda dinámica. Cabe anotar que los tres valores están definidos apropiadamente en términos de variables hidráulicas (Tabla 1).

Tabla 1. Celeridades en el flujo en canal abierto.			
Tipo de celeridad	Celeridad total	Celeridad relativa	Celeridad relativa adimensional
Cinemática	$c_k = \beta u$	$v = c_{rk} = \beta u - u = (\beta - 1) u$	$c_{drk} = \beta - 1$
Dinámica	$c_d = u \pm (gD)^{1/2}$	$w = c_{rd} = (gD)^{1/2}$	$c_{drd} = (gD)^{1/2}/u = 1/F$

En este artículo demostramos que estas tres velocidades/celeridades (u , v y w) pueden producir sólo dos números adimensionales independientes: (1) el número de Froude, y (2) el número de Vedernikov. De hecho, el tercer valor es efectivamente la relación entre los números de Vedernikov y Froude, concretamente: $V/F = \beta - 1$. Por lo tanto, se confirma que el exponente β es el parámetro más importante en la hidráulica de canales abiertos, encapsulando tanto al número de Froude como al de Vedernikov.

5. EL NÚMERO DE FROUDE

El número de Froude se define como la relación entre la velocidad media del flujo u y la celeridad relativa de la onda dinámica w (Ponce, 1991):

$$\mathbf{F} = u/w \quad (6)$$

En otras palabras, el número de Froude compara la velocidad media del flujo con la celeridad relativa de pequeñas perturbaciones en la superficie. Hay tres situaciones posibles:

- Para $w > u$, entonces $\mathbf{F} < 1$ y el flujo se encuentra en estado *subcrítico*. Como $w > u$, el resultado de $(u - w)$ es menor que 0 y la perturbación puede propagarse aguas arriba, es decir, el flujo puede controlarse sólo desde una localización aguas abajo.
- Para $w = u$, entonces $\mathbf{F} = 1$, y el flujo se encuentra en estado *crítico*. Como $w = u$, el resultado de $(u - w)$ es igual a 0, y la perturbación permanece estacionaria, siendo incapaz de trasladarse ya sea aguas arriba como aguas abajo. En la práctica, un estado de flujo crítico es inusual; su presencia se revela por la aparición de pequeñas perturbaciones superficiales, a menudo con una marcada tendencia a persistir (Fig. 4).
- Para $w < u$, entonces $\mathbf{F} > 1$, y el flujo está en estado *supercrítico*. Como $w < u$, el resultado de $(u - w)$ es mayor que 0, y la perturbación no puede trasladarse aguas arriba. En consecuencia, el flujo puede controlarse sólo desde una localización aguas arriba.

Estas afirmaciones se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Estados de flujo caracterizados por el número de Froude ($\mathbf{F} = u/w$).				
Estado de flujo	Relación entre velocidades	Número de Froude	Dirección de propagación de perturbaciones secundarias	Localización del control de flujo
Subcrítico	$w > u$	$\mathbf{F} < 1$	Aguas arriba	Aguas abajo
Crítico	$w = u$	$\mathbf{F} = 1$	Estacionaria	Indefinida
Supercrítico	$w < u$	$\mathbf{F} > 1$	Aguas abajo	Aguas arriba



Fig. 4 Canal Alimentador de Tinajones, operando cerca al estado crítico, cerca de Chiclayo, Lambayeque, Perú.

6. EL NÚMERO DE VEDERNIKOV

El número de Vedernikov se define como la relación entre la celeridad relativa de las ondas cinemáticas v y la celeridad relativa de las ondas dinámicas w (Ponce, 1991):

$$\mathbf{V} = v/w \quad (7)$$

En otras palabras, el número de Vedernikov compara la celeridad relativa de ondas cinemáticas "grandes" (de pequeño número de onda adimensional), es decir, aquéllas impulsadas por gradientes de masa, con la celeridad relativa de ondas dinámicas "pequeñas" (de gran número de onda adimensional), es decir, aquéllas impulsadas por gradientes de energía (Ponce y Simons, 1977; Ponce, 2023b). Hay tres situaciones posibles:

- Para $w > v$, entonces $\mathbf{V} < 1$ y el flujo está en estado *estable*. Como $w > v$, se deduce que $(w - v) > 0$; en consecuencia, la perturbación de energía, la cual se traslada aguas abajo (con celeridad relativa de onda dinámica w) más rápidamente que la perturbación de masa (con celeridad relativa de onda cinemática v). Por lo tanto, la onda de energía viaja adelante de la onda de masa y el flujo permanece estable, las ondas de rollo estando notablemente ausentes.
- Para $w = v$, entonces $\mathbf{V} = 1$ y el flujo está en un estado *neutralmente estable*. Como $w = v$, se deduce que $(w - v) = 0$; en consecuencia, la perturbación de energía, la cual se traslada aguas abajo (con celeridad relativa de onda dinámica w) a la misma velocidad que la perturbación de masa (con celeridad relativa de onda cinemática v). Por lo tanto, la onda de masa se propaga montada sobre la onda de energía y el flujo se encuentra neutralmente estable, precisamente en el umbral de formación de ondas de rollo.
- Para $w < v$, entonces $\mathbf{V} > 1$ y el flujo está en estado *inestable*. Como $w < v$, se deduce que

$(w - v) < 0$; en consecuencia, la perturbación de energía, la cual se traslada aguas abajo (con celeridad relativa de onda dinámica w) más lentamente que la perturbación de masa (con celeridad relativa de onda cinemática v). Por lo tanto, la onda de masa viaja adelante de la onda de energía y el flujo se vuelve inestable, con presencia manifiesta de ondas de rollo (Fig. 5).

Estas afirmaciones se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Estados de flujo caracterizados por el número de Vedernikov ($V = v/w$).			
Estado de flujo	Relación de velocidades	Número de Vedernikov	Tipo de onda que está adelante
Estable	$w > v$	$V < 1$	Energía, dinámica (w)
Neutralmente estable	$w = v$	$V = 1$	Ondas de energía y masa viajan juntas
Inestable	$w < v$	$V > 1$	Masa, cinemática (v)



Fig. 5 Ondas de rollo en un canal de riego, Cabana-Mañazo, Puno, Perú.

7. EL EXPONENTE DE LA CURVA DE GASTO

La tercera relación de un total de tres, además de (1) $F = u/w$, y (2) $V = v/w$ es: (3) v/u ; efectivamente, la tercera relación es: $v/u = V/F$.

$V/F = v/u$	(8)
-------------	-----

Es de notar que la celeridad de la onda cinemática (Sección 4) es: $c_k = \beta u$, en la cual β es el exponente de la curva de gasto $Q = \alpha A^\beta$. Por lo tanto, la celeridad relativa de la onda cinemática, es decir, la celeridad relativa al flujo, es: $c_{rk} = \beta u - u = (\beta - 1) u$. La celeridad relativa adimensional de la onda cinemática es: $c_{drk} = (\beta - 1)$. De ello se deduce que la tercera relación equivale y se expresa únicamente en términos del exponente β , como sigue:

$$\mathbf{V/F = \beta - 1} \quad (9)$$

En otras palabras, el exponente β de la curva de gasto $Q = \alpha A^\beta$ encapsula los números de Froude y Vedernikov, de modo que $\beta = (\mathbf{V/F}) + 1$. Además, para $\mathbf{V} = 1$, es decir, para flujo neutralmente estable, el número de Froude neutralmente estable es: $\mathbf{F_{ns}} = 1 / (\beta - 1)$. Por ejemplo, para $\beta = 1.5$, es decir, para la fricción de Chezy en un canal hidráulicamente ancho: $\mathbf{F_{ns}} = 2$. Este hallazgo se confirma en la Fig. 3, en la que la línea horizontal, aplicable para $\mathbf{F} = 2$, permanece constante para todos los tamaños de onda, cinemática y dinámica, y no atenúa ni amplifica ($\mathbf{F} = 2$ corresponde al estado neutralmente estable, aplicable para la fricción de Chezy en canales hidráulicamente anchos).

La Tabla 4 muestra la variación del número de Froude neutralmente estable $\mathbf{F_{ns}}$ con el exponente β (Ponce, 2023b). Esta tabla muestra que el número de Froude neutralmente estable $\mathbf{F_{ns}}$ aumenta desde una forma de sección transversal hidráulicamente ancha a una forma triangular. En otras palabras, a medida que la sección transversal del canal cambia de hidráulicamente ancha a triangular, el inicio de la inestabilidad del flujo (una onda de rollo) ocurre con un número de Froude más alto, mejorando así la estabilidad del flujo. Concluimos que la forma de la sección transversal, caracterizada por el parámetro β , es el factor principal para evaluar y controlar la inestabilidad del flujo (Fig. 6) (Ponce y Choque, 2024).

Tabla 4. Variación de $\mathbf{F_{ns}}$ con β para varios tipos de fricción y forma de la sección transversal.				
Tipo de fricción	Forma de la sección transversal	β	$\beta - 1$	$\mathbf{F_{ns}}$
Laminar	Hidráulicamente ancho	3	2	0.5
Manning Turbulento	Hidráulicamente ancho	5/3	2/3	3/2
Chezy turbulento (Fig. 3)	Hidráulicamente ancho	3/2	1/2	2
Turbulent Manning	Triangular	4/3	1/3	3
Turbulent Chezy	Triangular	5/2	1/4	4

Las conclusiones anteriores merecen la elevación del exponente β de la curva de gasto a una posición privilegiada en el campo de la hidráulica de canales abiertos. El exponente β contiene exclusivamente

la relación entre los números de Froude y Vedernikov, al mismo tiempo que describe las propiedades de fricción y de forma de la sección transversal (Tabla 4). Se reconoce que el número de Vedernikov, el cual varía con el tipo de fricción y forma de la sección transversal, constituye el hallazgo original de **Vedernikov (1945, 1946)**, aunque él no lo haya presentado de esta manera [Chow (1959): **Extracto: página 210**].

El **exponente de la curva de gasto β** puede ser el concepto más importante en la hidráulica de canales abiertos. Si bien se define singularmente en términos únicamente de los números de Froude y Vedernikov, los únicos números adimensionales de amplia aplicabilidad, β también describe la fricción y la forma de la sección transversal, dos componentes básicos de la hidráulica de canales abiertos.



Jorge Molina Carpio

Fig. 6 Ondas en rollo, también conocidas como ondas pulsantes, actuando sobre el canal del río Huayfajahuira, en La Paz, Bolivia, el 11 de diciembre de 2021.

8. COMENTARIOS FINALES

Hemos demostrado que sólo hay *tres* velocidades (más correctamente, *una* velocidad y *dos* celeridades) que caracterizan el flujo en canales abiertos en una amplia variedad de aplicaciones en flujo estable e inestable, incluyendo el diseño de canales, control de flujo, enrutamiento de inundaciones e inestabilidad del flujo. Estas son: (1) la velocidad media del flujo u , (2) la celeridad relativa de las ondas cinemáticas v , y (3) la celeridad relativa de las ondas dinámicas w .

Estas tres velocidades dan lugar a *sólo dos* números adimensionales independientes: (1) el número de Froude $\mathbf{F} = u/w$, y (2) el número de Vedernikov $\mathbf{V} = v/w$. La tercera relación, v/u , propiamente \mathbf{V}/\mathbf{F} , es igual a $(\beta - 1)$, en la cual β es el exponente de la curva de gasto caudal-area de flujo $Q = \alpha A^\beta$. Por lo tanto, se demuestra que β encapsula los números de Froude y Vedernikov, al tiempo que describe las propiedades de fricción y de sección transversal del canal bajo consideración. De hecho, los números de Froude y Vedernikov constituyen *los dos pilares* sobre los que se apoya todo el campo de la hidráulica de canales abiertos.

REFERENCIAS

Chow, V. T. 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, Inc, New York, NY. **Extracto: Página 210.**

Lagrange, J. L. de. 1788. *Mécanique analytique*, Paris, part 2, section II, article 2, 192.

Ponce, V. M. y D. B. Simons. 1977. **Propagación de ondas poco profundas en canales abiertos.** Artículo en línea.

Ponce, V. M. 1991. **Nueva perspectiva del número de Vedernikov.** Artículo en línea.

Ponce, V. M. 2014. **Fundamentos de la hidráulica de canales.** Texto en línea..

Ponce, V. M. 2023a. **Los estados de flujo.** Artículo en línea.

Ponce, V. M. 2023b. **El número de Vedernikov.** Artículo en línea.

Ponce, V. M. y B. Choque Guzman. 2024. **Control de ondas de rollo en ríos canalizados de alta pendiente.** Artículo en línea.

Powell, R. W. 1948. **Vedernikov's criterion for ultra-rapid flow.** *Transactions, American Geophysical Union*, 29(6), 882-886.

Seddon, J. A. 1900. **River Hydraulics.** *Transactions, American Society of Civil Engineers*, XLIII(179-243), June; Extract: pages 218-223.

Vedernikov, V. V. 1945. **Conditions at the front of a translation wave disturbing a steady motion of a real fluid.** *Doklady Akademii Nauk USSR*, 48(4), 239-242.

Vedernikov, V. V. 1946. **Characteristic features of a liquid flow in an open channel.** *Doklady Akademmi Nauk USSR*, 52(3), 207-210.
