



# Boletín Ambiental

Modelo reducido río Pozo  
Fuente:GTAIHA

Instituto de Estudios Ambientales -IDEA- Sede Manizales

**165**

Marzo de  
2020

## Pendiente de equilibrio de un río de montaña: teórica y experimental

## Pendiente de equilibrio de un río de montaña: teórica y experimental

Luisa Fernanda Parra Gómez - [lfparrag@unal.edu.co](mailto:lfparrag@unal.edu.co)  
Angélica Betancourth Arias - [abetancourtha@unal.edu.co](mailto:abetancourtha@unal.edu.co)  
Jorge Julián Vélez Upegui - [jjvelezu@unal.edu.co](mailto:jjvelezu@unal.edu.co)  
Joan Nathalie Suárez Hincapié - [jnsuarezh@unal.edu.co](mailto:jnsuarezh@unal.edu.co)  
Jhoan Sebastián Pantoja Cárdenas - [jspantojac@unal.edu.co](mailto:jspantojac@unal.edu.co)  
Juan Vicente Guzmán Mercado - [jvguzmanm@unal.edu.co](mailto:jvguzmanm@unal.edu.co)  
Grupo de Trabajo Académico de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GTAIHA)  
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Para descargar el boletín:

 [Http://idea.manizales.unal.edu.co/boletin-ambiental.html](http://idea.manizales.unal.edu.co/boletin-ambiental.html)

## RESUMEN

En esta investigación se construyó un modelo físico de un tramo de un río de montaña (río Pozo) a escala 1:75, en donde se estudió la implementación de una bocatoma mixta, lateral y de fondo, la cual favorece el desequilibrio en la dinámica fluvial, ya que esta retiene aguas arriba el sedimento de mayor tamaño generando un fenómeno de aguas hambrientas aguas abajo. Para recuperar el estado del río se propuso la construcción de diques que retengan material y representen una pendiente de equilibrio en la zona, obteniendo como resultado un acercamiento a las condiciones de régimen del canal. Adicionalmente, se calculó la pendiente de equilibrio teórica, con lo que se realizó la comparación entre ambas pendientes para evaluar la pertinencia en el ambiente andino tropical de las ecuaciones internacionalmente utilizadas, las cuales fueron desarrolladas en condiciones diferentes a las que se presentan en este estudio. También, es importante reconocer las ventajas que otorga la realización de un modelo físico, especialmente de zonas de montaña con morfología sensible a la erosión y a la agradación, que

permite la experimentación con diferentes configuraciones de las estructuras hidráulicas.

Palabras clave: diques, modelo físico, cuencas de alta pendiente, impacto antrópico.

## 1. INTRODUCCIÓN

La geomorfología del río está relacionada con la dinámica de los sedimentos en las cuencas; la carga sólida de los cauces naturales varía ampliamente tanto en el espacio como en el tiempo (Blom, Arkesteijn, Chavarrías, & Viparelli, 2017). Por esta razón, la dinámica fluvial es altamente sensible a los cambios que se generen dentro las cuencas de los ríos, su estudio debe ser riguroso y tener en cuenta diferentes aspectos como son la cobertura, el régimen hidrológico, la vocación de la cuenca, entre otros.

A pesar de la importancia de los ríos existe una evidencia de su creciente degradación; el mundo se encuentra en medio de una importante transición en el desarrollo, manejo y uso de los recursos hídricos. La construcción de

infraestructura masiva dominó “la Agenda del Agua del Siglo XX”; con su implementación se mejoraron algunos aspectos de la calidad de vida, pero los cuerpos hídricos sufrieron cambios invasivos, lo que generó elevados costos sociales, económicos y ambientales, que a menudo fueron imprevistos o no cuantificados en su totalidad, dada su complejidad (Gleick Wolff, G., 2002).

La cantidad de artículos científicos, proyectos y noticias en periódicos relacionados con la restauración de ríos ha tenido un aumento exponencial en las últimas décadas, lo que refleja el creciente interés de la comunidad científica y la concientización de la sociedad respecto al tema (Bernhardt et al., 2005).

Las dinámicas antrópicas en las cuencas generan grandes desequilibrios en los patrones relacionados con los sistemas fluviales, donde se evidencia que la cobertura del suelo juega un papel primordial, pues la erosión del suelo está influenciada por las técnicas y manejos que se dan en las zonas agrícolas, la cobertura expuesta puede llegar a ser removida más fácilmente en terrenos donde la capa vegetal es menor (Kwaad, 2016).

Por este motivo, cuencas altamente intervenidas y mal manejadas suelen presentar transformaciones en sus dinámicas típicas fluviales, generando reajustes en el proceso geomorfológico de los cauces; los ríos tienden a llegar a características estables bajo las nuevas condiciones del flujo y sedimento. Este tema es ampliamente estudiado, es de gran importancia ya que se busca construir obras civiles más armónicas respecto a la dinámica del río, por lo que se encuentran diferentes formulaciones que permiten representar las condiciones del flujo y los sedimentos.

En este documento se presenta el análisis de la pendiente de equilibrio de un tramo de un río de montaña andino, donde el caso de estudio es el río Pozo en Pácora, Colombia; para este se realizó una modelación física de un tramo del cauce. Los suelos que se encuentran en la cuenca de este río son altamente desprotegidos debido a las actividades agropecuarias

y mineras que se presentan en la región, exacerbando los desequilibrios en la dinámica de los sedimentos.

En esta zona se propone la construcción de una bocatoma con un azud en el cual se retienen los sedimentos de mayor tamaño, por lo cual se produce el fenómeno de aguas hambrientas. Aguas abajo de la estructura propuesta se encuentra una zona de erosión donde el flujo desarrolla altas velocidades debido al encajonamiento del río y una mayor pendiente, lo que facilita el transporte de material y socavación.

En búsqueda del equilibrio dinámico se plantean estructuras que permitan controlar zonas de degradación; en la restauración de ríos y en proyectos de ingeniería fluvial se utilizan a menudo estructuras dentro de los ríos que permitan su estabilización, redirección y disipación de energía, proporcionando servicios ecosistémicos y geomorfológicos (Bernhardt et al., 2005).

Dentro de este estudio se construyó un modelo físico a escala reducida, 1:75, cuyo lecho es fijo, en donde se representa la topografía de la zona, la cual corresponde a un tramo de un kilómetro aproximadamente; este modelo se encuentra en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. La construcción del modelo está enmarcada en un proyecto de extensión realizado para SIE Ingeniería, donde se estudió el comportamiento de un azud para la toma de agua en un tramo del río Pozo.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Zona de estudio

El río Pozo es la divisoria geográfica de los límites de Pácora, Salamina y La Merced (Figura 1); cuenta con una longitud de 28 km, nace en el suroccidente del municipio de Pácora a una altura de 3802 ms.n.m. en un punto cercano de la cordillera Cimitarra. Este río fluye en sentido oriente-occidente, entrega sus aguas al río Cauca, a una altitud de 679 ms.n.m. (Asociación Turística Empresarial de Caldas, 2014).

La cuenca del río Pozo cuenta con un área de 65.6 ha, sus afluentes son los ríos Chamberí, Pocito y San Lorenzo; cuenta con una pendiente media de 48.4 %, esta alta pendiente favorece la movilización de sedimentos. La precipitación media anual de la cuenca es de 1920 mm al año y una temperatura media de 20 °C con predominio de clima templado y crecientes con gran capacidad de arrastre del cauce principal (SIE Ingeniería, 2018).



Figura 1. Localización tramo de estudio

Dentro del río Pozo se encuentran tres tramos, en el primero, que corresponde desde el nacimiento hasta media cuenca aproximadamente, el cauce es empinado. Desde este punto hasta la unión con el río Chamberí el cauce se encuentra encajonado. Desde este último punto hasta la desembocadura en el río Cauca se encuentra un río trenzado donde se presenta depositación significativa de sedimentos, ya que se tiene una disminución de la pendiente (IDEA, 2018).



En esta cuenca se desarrollan diferentes actividades que generan grandes desequilibrios en los procesos sedimentológicos de la cuenca, como la explotación minera, además, de los inadecuados usos como pastoreo y malas prácticas agrícolas; por este motivo, dentro de la cuenca se encuentra una sobreoferta de sedimentos. Pero en algunas zonas dadas las altas pendientes y condiciones propias del río se generan procesos de erosión, especialmente, en zonas donde el lecho del río es encajonado.



Fotografía 1. Río Pozo, Pácora, Caldas  
Fuente: (IDEA, 2018)

## 2.2 Pendiente de equilibrio

La estabilidad de un canal es alcanzada cuando algunas características del río son estables, como el flujo, el tamaño de los sedimentos, el ancho del canal, la trayectoria y el perfil, entre otros (Rosgen & Silvey, 1996). Se debe tener en cuenta que la depositación y la erosión local pueden ocurrir, pero a largo plazo las características generales se mantienen (Sindelar, Schobesberger, & Habersack, 2017). Siendo el exceso o la ausencia de sedimentos transportados por el sistema fluvial lo que genera el desbalance, como se encuentra en la teoría propuesta por Lane (1955). Cuando se estudian los estados de equilibrio fluvial se asume que los procesos de transformación del río se dan en una escala temporal muy amplia, por este motivo se puede entender que el caudal formador del cauce es el que determina las condiciones de equilibrio del río (Bouza Badenes, 2003). Se entiende por caudal dominante el cual moldea la geomorfología típica del cauce, en estas condiciones el transporte de sedimentos está más cerca de las condiciones de equilibrio (Carling, 1988).

Para realizar el cálculo de la pendiente de equilibrio se utiliza la teoría de régimen (esta expresión es empírica), la cual busca encontrar la sinergia estable entre el caudal sólido, el caudal líquido y la geometría hidráulica; las ecuaciones que se desarrollan a partir de esta teoría relacionan las características mencionadas anteriormente de manera generalmente simple (Knighton, 1984).

Dentro de los estudios realizados por SIE Ingeniería se encuentra, además de modelaciones computacionales, información recopilada en campo, aforos líquidos y sólidos; a partir de estos datos se tiene la información para obtener la pendiente de equilibrio, como se muestra en la Tabla 1.



Tabla 1. Datos necesarios cálculo pendiente

PARÁMETRO			VALOR
$T_r$	Período de retorno	<i>años</i>	2.33
$R_h$	Radio hidráulico	$m^2$	9.059
$D_m$	Diámetro medio	$m$	0.057
$Y_m$	Calado medio	$m$	0.752
$B_m$	Ancho del cauce	$m$	14.422
$Q$	Caudal dominante	$m^3/s$	11.280
$C$	Concentración sedimentos suspendidos	<i>ppm</i>	439
$n$	Rugosidad		0.032
$\nu$	Viscosidad agua + sedimento	$Ns/m^2$	0.0057

Esta Ecuación 1 se obtiene de una recopilación de información de canales estables de India e Inglaterra realizada por Gerald Lacey en 1927 (Simons, 1957). La expresión que se presenta en este estudio es la modificada por Maza para utilizar el Sistema Métrico (Bouza Badenes, 2003). Esta ecuación presenta las siguientes restricciones:

- Material de fondo no cohesivo.
- Diámetros medio del material de fondo entre 0.15 mm y 0.4 mm.
- Ondulaciones en el fondo.
- Transporte del material del fondo inferior a 500ppm.
- Caudal dominante entre 1.4m<sup>3</sup>/s y 280m<sup>3</sup>/s.

$$i = \frac{0.0002032 f^{3/2} Y_m^{1/2}}{R_h}$$

Ecuación 1. Pendiente de equilibrio Lacey (1958)

Donde:

- $f_m$ :  $50.60 D_m^{1/2}$
- $D_m$ : Diámetro medio del material de fondo [m]
- $y_m$ : Profundidad media del agua [m]
- $R_h$ : Radio hidráulico [m]
- $i$ : Pendiente de equilibrio [m/m]

Con la información que se tiene en la Tabla 1 y la Ecuación 1, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Pendientes de equilibrio teóricas

PENDIENTE DE EQUILIBRIO	
Método	Pendiente
	[m/m]
Lacey	0.00076

## 2.3 Modelo a escala reducida

Un modelo físico a escala reducida representa un fenómeno, una estructura o una máquina, y cumple ciertas condiciones matemáticas definidas (Vergara S., 1993). Su importancia es clara si se considera que el fenómeno es representado por diferentes ecuaciones formadas por términos no lineales; la estructura de las ecuaciones o las condiciones de perímetro es tan compleja que una solución analítica es posible solo en un número limitado de casos, allí radica la importancia de la utilización de modelos físicos (Adami, 2013, p. 41).

El uso de modelos hidráulicos implica preservar las semejanzas al prototipo, para lo cual deben satisfacerse las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica (Vergara S., 1993). La similitud geométrica se produce cuando las proporciones de todas las dimensiones geométricas del prototipo y el modelo se escalan de manera congruente. La similitud cinemática se produce cuando se modelan longitudes de trayectoria de partículas y los tiempos de viaje ocurren en proporción al prototipo (Vermeulen et al., 2014).

Para garantizar la similitud dinámica se debe representar el conjunto de fuerzas que intervienen en el fenómeno mediante ecuaciones que rigen el comportamiento del flujo de un fluido en un prototipo, cuando solo están presentes las fuerzas de inercia y de gravedad; el modelo es dominado por el criterio de similitud de Froude (Vergara S., 1993), tal como en el caso de estudio desarrollado en este documento, donde se tiene la simulación de un canal a lamina libre. Por ello la relación modelo prototipo está gobernada por las siguientes ecuaciones: (Adami, 2013, pp. 49–50).

$$L_p = L_m \lambda$$

Ecuación 2. Relación de longitudes

$$L_p = L_m \lambda$$

$$V_p = V_m \lambda^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 3. Relación de velocidades

$$Q_p = Q_m \lambda^{\frac{5}{2}}$$

Ecuación 4. Relación de caudales

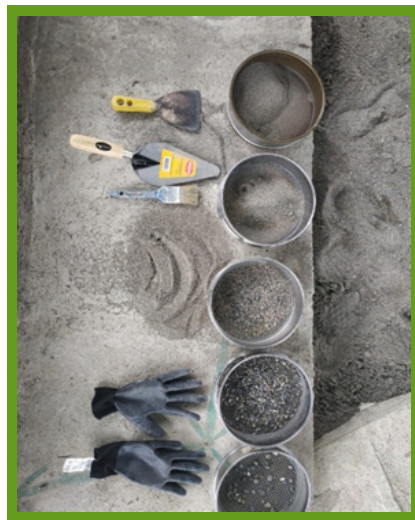
$$T_p = T_m \lambda^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 5. Relación de tiempos

Para realizar este estudio se utilizó un modelo físico a escala reducida 1:75, donde se representa su topografía desde la abscisa k0+000 hasta la abscisa k1+004 y desde la cota 784 ms.n.m. hasta la cota 810 ms.n.m., también se construyó una estructura de toma de agua.



Fotografía 2. Modelo físico a escala reducida río Pozo



Fotografía 3. Tamizado y clasificación de los sedimentos

Para representar los sedimentos del río se utilizó material móvil que fue escalado y clasificado según su tamaño y tipología; posteriormente, se calcularon concentraciones a utilizar. A continuación, se observa el tipo de material utilizado y la curva granulométrica del río estudiado.

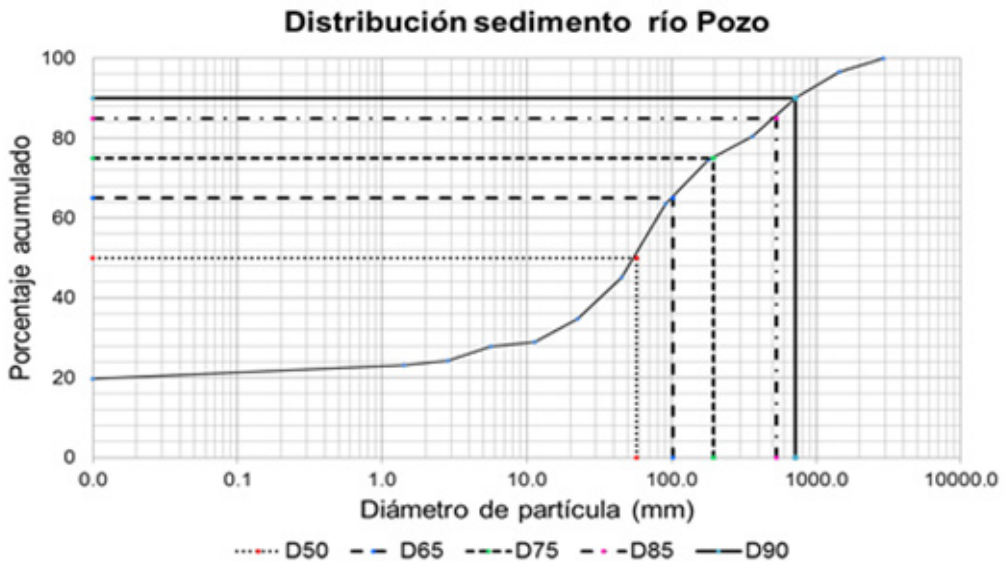


Figura 2. Granulometría río Pozo

## 2.4 Experimentos hidráulicos

Para las pruebas realizadas en el modelo se establecieron dos momentos, en el primero se observó la dinámica de los sedimentos en el río sin estructuras adicionales. En el segundo se analizó el comportamiento del río y sus sedimentos ante dos estructuras transversales.

### 2.4.1 Modelación sin estructuras

Teniendo en cuenta que para observar la pendiente de equilibrio se deben estudiar los flujos dominantes o formativos del cauce, se decidió trabajar con caudales de periodo de retorno igual a 2.33 años y con el caudal medio, cuyos valores en modelo son de  $28.65 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $11.28 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente. Se observó que cuando los caudales eran mayores que los medios no se acumulaban sedimentos.



Fotografía 4. Pruebas 1 sin estructuras

## 2.4.2 Modelación con diques

Para la segunda prueba se colocaron tres diques, dispuestos de tal manera que al aglomerarse los sedimentos en ellos se modificara el perfil del cauce logrando similitud con la pendiente de equilibrio, los diques fueron posicionados en las zonas donde se presentaba mayor erosión y encajonamiento en el río, y el experimento se realizó con caudal de periodo de retorno igual a 2.33 años ( $28.65 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Se obtuvo una pendiente de equilibrio que corresponde a 0.00071; así el cauce se adapta a la pendiente que se desarrolla al contar con las estructuras.



Fotografía 5. Pruebas 2 con diques

### 3. RESULTADOS

Se compara cada una de las pendientes teóricas halladas anteriormente, con lo que se busca entender cuál se ajustó más a las condiciones que se recrearon en el laboratorio. La pendiente obtenida en el laboratorio corresponde a 0.00071 m/m. Con la ecuación de Lacey se tuvo un ajuste satisfactorio, aunque se presentó una sobrestimación del valor de la pendiente de un 7.6 %, siendo este un valor aceptable.

### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se encontró que la ecuación de Blench presenta sobrestimaciones considerables respecto a lo encontrado en laboratorio, por este motivo se debe tener precaución para su implementación.

Los estudios de ríos de montaña andinos deben continuarse, ya que hay aún grandes incógnitas sobre las características de sus dinámicas,



especialmente, en cuencas altamente intervenidas, donde se requiere conocimiento especializado que permita recuperar las características naturales de los lechos.

A pesar de que para esta investigación se empleó un lecho fijo y diques en materiales impermeables, se reconoce que este tipo de estructuras en los cauces generan grandes traumatismos para sus procesos naturales, tanto para caudales líquidos y sólidos, como para la biota asociada; por este motivo se recomienda la construcción de diques porosos, por ejemplo, con piedras de gran tamaño que pueden cumplir la funcionalidad del dique de controlar la pendiente de equilibrio.

## 5. LITERATURA CITADA

Adami, A. (2013). *Physical hydraulic models -Past and Present-*. Venezia: Marcianum Press.

Asociación turística empresarial de Caldas, A. (2014). *Inventario turístico Pácora*. Retrieved from <http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos PDF/informacion de pacora.pdf>.

Bernhardt, E. S., Palmer, M. A., Allan, J. D., Alexander, G., Barnas, K., Brooks, S., ... Sudduth, E. (2005). Synthesizing U.S. River Restoration Efforts. *Science*, 308(April), 636–637. <https://doi.org/10.1126/science.1103788>.

Blom, A., Arkesteijn, L., Chavarrías, V., & Viparelli, E. (2017). The equilibrium alluvial river under variable flow and its channel-forming discharge. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(10), 1924–1948. <https://doi.org/10.1002/2017JF004213>.

Bouza Badenes, B. (2003). *Análisis de la estabilidad del cauce del río Llobregat tras la construcción de la autovía del Baix Llobregat*.

Carling, P. (1988). The concept of dominant discharge applied to two gravel bed streams in relation to channel stability thresholds. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.3290130407>.

Dust, D., & Wohl, E. (2012). Conceptual model for complex river responses using an expanded Lane's relation. *Geomorphology*, 139–140, 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.008>.

Gleick Wolff, G., P. H. (2002). Global Freshwater Resources: Soft-path solutions for the 21st Century. *Science*, 302(November), pp.1524-1528.

Guhl Nannetti, E. (2010). El Agua de los Andes - Un recurso clave para el desarrollo e interacción de la región. 42.

IDEA, I. de E. A. (2018). AFOROS LÍQUIDOS EN RÍOS Y QUEBRADAS DE MANIZALES Y DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS 2018. Manizales.

Knighton, D. (1984). *Fluvial forms and processes*.

Kwaad, F. J. P. M. (2016). Economic Costs of Soil Erosion. 1–22. Retrieved from [http://www.rachel.org/files/document/Environmental\\_and\\_Economic\\_Costs\\_of\\_Soil\\_Erosi.pdf](http://www.rachel.org/files/document/Environmental_and_Economic_Costs_of_Soil_Erosi.pdf).

Lane, E. W. (1955). Importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proceedings (American Society of Civil Engineers)*; v. 81, Paper No. 745.

Rosgen, D., & Silvey, H. L. (1996). Applied river morphology. *Wildland Hydrology*. In Inc. Pagosa Springs, Colorado.

SIE Ingeniería. (2018). SELECCIÓN DE CORRIENTES PARA REALIZACIÓN DE ESTUDIO. Manizales.

Simons, D. B. (1957). *Theory and design of stable channels in alluvial materials*. Colorado State University.

Sindelar, C., Schobesberger, J., & Habersack, H. (2017). Effects of weir height and reservoir widening on sediment continuity at run-of-river hydropower plants in gravel bed rivers. *Geomorphology*, 291, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.007>.

Vergara S., M. A. (1993). Técnicas de modelación en hidráulica.

Vermeulen, B., Boersema, M. P., Hoitink, A. J. F., Sieben, J., Sloff, C. J., & van der Wal, M. (2014). River scale model of a training dam using light-weight granulates. *Journal of Hydro-Environment Research*, 8(2), 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2013.05.004>



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

Instituto de Estudios Ambientales - IDEA -

Teléfono: 8879300 Ext. 50190

Cra 27 #64-60 / Manizales - Caldas

<http://idea.manizales.unal.edu.co>

[idea\\_man@unal.edu.co](mailto:idea_man@unal.edu.co)

**Edición, Diseño y Diagramación:** IDEA Sede Manizales

**Impresión:** Sección de Publicaciones

Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales