

DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE CAUDALES Y NIVELES DE SEDIMENTACIÓN

Bernardo Rivera, Diana M. Tangarife, Hernán Rojas¹

Universidad de Caldas, Departamento de Sistemas de Producción
Grupo de Investigación en Análisis de Sistemas de Producción ASPA

RESUMEN

La dinámica que ha alcanzado en Latinoamérica el desarrollo metodológico para el análisis de sistemas de producción, no ha tenido el mismo grado de desarrollo para la caracterización de la disponibilidad y uso de los recursos naturales. El objetivo de la investigación fue identificar metodologías sencillas, para estimar la producción de caudales y niveles de sedimentación a nivel de cuenca, de tal manera que estimule su incorporación a los procesos rutinarios de caracterización de los sistemas de producción. La investigación se llevó a cabo en una subcuenca del río La Miel, donde actualmente se construye un importante complejo hidroeléctrico, cuya viabilidad depende de la disponibilidad del agua y de los niveles de sedimentación.

Para la determinación del caudal se tomaron medidas de profundidad cada 5 cm en la lámina de agua, y se estableció una base fija para realizar mediciones diarias de altura, durante un año. El área del cauce se determinó, a partir de la altura diaria del nivel del río. La velocidad del cauce se determinó mediante el método del cuerpo flotante doble o subsuperficial, realizando regresiones de velocidad por altura del río. Para determinar el nivel de sedimentación, se midió la concentración de sólidos totales en muestras de agua tomadas diariamente, utilizando el método del turbidímetro. Los resultados indican un caudal promedio de 7.2 m³/s y un nivel de sedimentación de 48.61TM/ha.año, niveles que se ajustan a las estimaciones realizadas por otros métodos. La propuesta metodológica de medición de caudales, utilizando el flotador doble o subsuperficial, y la medición del área del cauce a partir de una regresión con la altura del nivel del río, resulta confiable, económica y de fácil acceso y

¹ Contribución de la Línea de Investigación en Desarrollo metodológico para el análisis de sistemas. Departamento de Sistemas de Producción, Universidad de Caldas. Bernardo Rivera. Profesor de Sistemas de Producción, Universidad de Caldas. Calle 65 No. 26-10, Manizales. brivera@cumanday.ucaldas.edu.co; Diana M. Tangarife, Grupo de investigación Análisis de sistemas de producción (ASPA); Hernán Rojas, Profesor de suelos y agua, Universidad Nacional, Palmira

aplicabilidad. La determinación indirecta de sedimentos, mediante la utilización del turbidímetro, aunque dependa de la disponibilidad de equipo, resultó económica y fácil de realizar.

INTRODUCCIÓN

La dinámica que ha alcanzado en Latinoamérica el desarrollo metodológico para la caracterización de sistemas de producción, se manifiesta en conceptos, métodos y herramientas que permiten entender la racionalidad de los productores en la conformación de sus sistemas productivos y en la toma de decisiones sobre el uso de los recursos disponibles en la finca (Berdegú y Ramírez 1995). Sin embargo, la metodología para la caracterización de la disponibilidad y uso de los recursos naturales no ha tenido el mismo grado de desarrollo, no obstante el enorme interés de las sociedades contemporáneas por la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales, en especial el agua, el suelo y la biodiversidad. En el caso de la pérdida de suelo, se dispone de metodologías bastante precisas a nivel de cultivo, como las parcelas de escorrentía, por ejemplo (Morales, 1996), pero en general, son costosas y exigentes en personal calificado para su manejo. Igualmente, para la estimación de caudales se dispone de metodologías que requieren aparatos sofisticados y costosos que las hacen de difícil aplicación para los investigadores y agentes de desarrollo que trabajan en análisis de sistemas de producción agropecuaria y que dificultan su incorporación a los procesos rutinarios de caracterización de sistemas.

Los estudiosos de la problemática rural reconocen, que para resolver los conflictos de pobreza, se requiere identificar nuevas estrategias de producción, entre las que la conservación de los recursos de suelo y agua aparece como prioritarias (Reardon, 1998; Schejtman, 1998). Los argumentos anteriores indican la urgente necesidad de incorporar en los procesos de caracterización de los sistemas de producción, variables relacionadas con la disponibilidad, uso y manejo de los recursos de suelo y agua, a niveles jerárquicos superiores a la parcela y la finca (microcuenca, cuenca, microrregión, etc.).

El objetivo de la investigación desarrollada fue identificar metodologías sencillas para estimar la producción de caudales y niveles de sedimentación a nivel de cuenca, de tal manera que estimule su incorporación a los procesos de caracterización de los sistemas de producción agropecuaria. La presente contribución ilustra la metodología, su funcionamiento y los resultados obtenidos en la determinación del caudal y la sedimentación en una cuenca piloto.

METODOLOGÍA

La investigación se llevó a cabo en la subcuenca del río San Antonio (3.972 ha), desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Moro. Ambos ríos hacen parte de la cuenca del río La Miel, donde actualmente se construye uno de los complejos hidroeléctricos más eficientes del mundo (Rivera y Estrada, 1998). La pertinencia del trabajo, se refleja en la importancia que tiene para la represa la caracterización de la disponibilidad del agua y los niveles de sedimentación. La zona está localizada en el corregimiento de Florencia, municipio de Samaná (Caldas), entre los 800 y los 2.200 msnm.

- **Determinación del caudal del río San Antonio**

Para la estimación del caudal del río en el sitio de su desembocadura al río Moro, se empleó la siguiente fórmula:

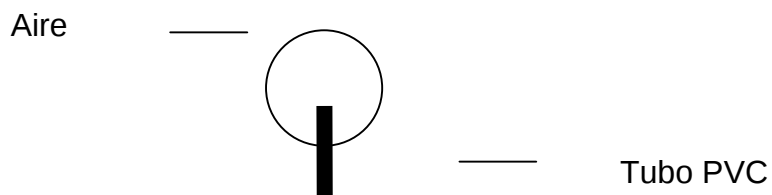
$$Q = A * V$$

donde:

Q = Caudal (m^3 / s)
A = Area del canal (m^2)
V = Velocidad (m/s)

Para la determinación del área del canal y la velocidad del cauce, se ubicó un sitio adecuado, por su facilidad de acceso y por disponer de un tramo de 20 metros en forma recta, como mínimo. Se tomaron medidas de profundidad cada 5 cm en la lámina de agua y 4 metros adicionales en cada una de las orillas. Se estableció dentro del canal una base fija donde se tomaron las medidas diarias de altura a las 12:30 p.m., durante un año. El área del cauce se determinó, a partir de la altura diaria del nivel del río, utilizando una regresión lineal entre altura y área, para cada uno de los tres sectores en que fue dividido el cauce: orilla izquierda, orilla derecha y centro.

Para determinar la velocidad del cauce se compararon inicialmente dos métodos del cuerpo flotante: un flotador simple o de superficie (trozo de madera) y otro doble o subsuperficial. Este último consiste en 2 esferas, una rellena de arena y otra vacía, unidas por un tubo que le permite flotar cerca a la vertical del cauce y obtener una velocidad igual a la real (diagrama 1). Se utilizaron dos longitudes del tubo (10 y 30 cm) para ser cambiadas según el volumen de agua del río; cuando el nivel del río era alto se utilizaba la longitud mayor y viceversa.



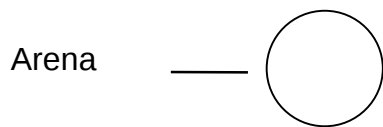


Diagrama 1. Esquema del flotador doble o subsuperficial, con dos esferas, una con arena y otra con aire, unidas por un tubo de PVC.

Las medidas se hicieron dejando caer el flotador antes del punto inicial, buscando que al iniciar la medición, el cuerpo flotante ya hubiese alcanzado una velocidad estable. Al final de los 20 m, se consignó el tiempo que tarda el flotador en hacer el recorrido. Para la estimación de la velocidad del río, se aplicó la fórmula de French (citado por De Acevedo y Acosta, 1984):

$$V = E/t$$

donde:

E = espacio recorrido (20 m)

t = tiempo gastado

Esta velocidad fue convertida posteriormente a velocidad puntual media, con base en la fórmula de Francis (citada por De Acevedo y Acosta, 1984):

$$V_{\text{media}} = V_{\text{obs.}} (1.02 - 0.16 \sqrt{1 - L/H})$$

donde:

V obs: velocidad observada

H: profundidad del canal

L: extensión del tubo

El análisis estadístico indicó mayor confiabilidad ($CV = 18\%$ y $R^2 = 94.6$) del método doble o subsuperficial, razón por la cual se prefirió este método al del trozo de madera, para las mediciones siguientes.

Las mediciones de velocidad se realizaron en cada uno de los tres sectores en que fue dividido el cauce. Con la información de 15 días de observación se realizaron regresiones de velocidad por altura del río, para cada sector. A partir de las regresiones, se estimó la velocidad diaria en cada sector, utilizando la altura diaria del río.

- **Determinación de niveles de sedimentación**

Durante un año se tomaron muestras diarias de agua del río San Antonio, en el mismo sitio donde se realizó la medición de altura del río, en el punto medio de la altura y aproximadamente a 1.5 m de la orilla.

Para determinar el nivel de sedimentación, se midió la concentración de sólidos totales en las muestras de agua, utilizando el método del turbidímetro, en razón a lo dispendiosos del método tradicional por evaporación.

Se prepararon soluciones, cada una con tres réplicas, diluyendo en 1 l de agua destilada, desde 0.5 g hasta 10g, cada 0.5g, de una muestra de suelo, previamente secada, obtenida en diferentes cultivos y en diferentes sitios de la cuenca. Las diluciones fueron leídas en un turbidímetro HACH modelo 2100A, previamente calibrado a 10, 100 y 1000 Unidades Nefelométricas (NTU).

Con la información de dilución y lectura del turbidímetro, se realizó una regresión lineal sin intercepto, a partir de la cual se calculó la concentración de sólidos totales en las muestras de agua que se tomaron diariamente. El nivel de sedimentación anual de la cuenca se calculó, sumando las concentraciones diarias de sólidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- **Determinación del área del cauce**

En la tabla 1 se presenta el cálculo del área del cauce, utilizando diferentes intervalos de medición de la altura del nivel del río. El error se calculó como el % de la diferencia entre el área del cauce calculada a intervalos de 5 cm y las demás áreas. El % del error, en relación con la medición que se puede considerar más precisa (cada 5 cm), fue de sólo 3.7%, tratándose de un río con un ancho de lámina de agua de 20 m. Es probable que cuando se trate de ríos más pequeños, la precisión de la estimación cada dos metros sea diferente. Con base en la información anterior, el área diaria del cauce se calculó utilizando las mediciones de profundidad cada 2 m.

Tabla 1. Área del cauce (m²) y error de la estimación (%) utilizando distintos intervalos de medición de la altura del río

Intervalo de medición de la altura del río (m)	Área del Cauce (m²)	Error %
0.05	18.6	0.0

0.10	18.5	0.5
0.15	18.5	0.5
0.20	18.5	0.5
1.00	18.3	1.6
1.50	18.1	2.6
2.00	17.9	3.7

Las regresiones lineales entre altura del nivel del río y el área del cauce, fueron:

$$Y = 0.28 + 5.49 X \text{ (R}^2 = 0.99\text{)}$$

$$Y = -1.84 + 7.84 X \text{ (R}^2 = 0.98\text{)}$$

$$Y = -1.50 + 4.90 X \text{ (R}^2 = 0.99\text{)}$$

para cada uno de los tres sectores en que fue dividido el cauce (orilla derecha, centro y orilla izquierda, respectivamente), donde,

$$Y = \text{área del cauce (m}^2\text{)}$$

$$X = \text{altura del nivel del río (m)}$$

- **Determinación de la velocidad del cauce**

El mejor ajuste de la relación entre velocidad del cauce y la altura del nivel del río, se encontró utilizando las siguientes regresiones cuadráticas:

$$Y = 4.73 - 12.86 X + 10.01 X^2 \text{ (R}^2 = 0.65\text{)}$$

$$Y = 7.84 - 21.67 X + 16.69 X^2 \text{ (R}^2 = 0.58\text{)}$$

$$Y = 12.43 - 33.77 X + 24.09 X^2 \text{ (R}^2 = 0.59\text{)}$$

para cada uno de los tres sectores en que fue dividido el cauce (orilla derecha, centro y orilla izquierda, respectivamente), donde,

$$Y = \text{velocidad del cauce (m/s)}$$

$$X = \text{altura del nivel del río (m)}$$

- **Determinación del caudal del río**

Utilizando las regresiones anteriores, se estimaron el área (A_1 , A_2 , A_3) y la velocidad diaria del cauce (V_1 , V_2 , V_3), para cada sección, y a partir de ellas el caudal diario:

$$Q = A_1 * V_1 + A_2 * V_2 + A_3 * V_3$$

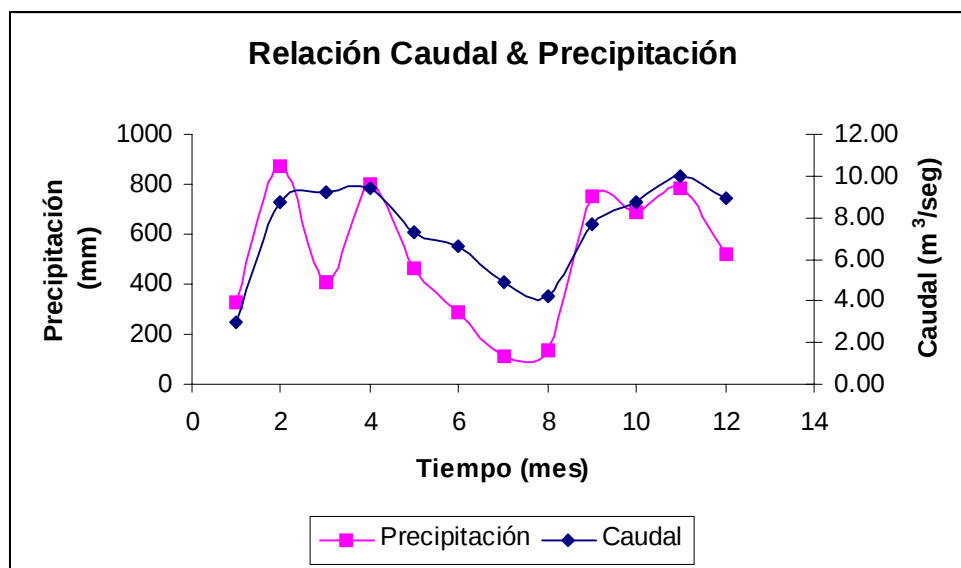
El caudal promedio del río, durante el año de observación, fue 7.3 m³/s. Considerando que durante el mismo período la precipitación en la cuenca fue 7.350 mm, y que el tamaño de la cuenca es de 3.972 ha, se puede calcular una producción anual de agua de 292 millones de m³. Rivera y Estrada (1998) estimaron que la cobertura actual de la cuenca consume para su crecimiento y producción 28.1 millones de m³. En consecuencia, se estarían aportando al cauce del río 263.9 millones de m³ por año, es decir, 8.4 m³/s, sin considerar el consumo doméstico, el que hacen los animales, y las pérdidas de agua por percolación profunda. Una divergencia de 1.1 m³/s (13%) es probablemente de escaso significado práctico, pero además, si los autores referenciados (Rivera y Estrada, 1998) hubiesen incorporado los aspectos mencionados, la diferencia entre ambas formas de estimación de caudales sería todavía más pequeña.

La tabla 2 presenta el cálculo del caudal del cauce, simulando diferentes intervalos de tiempo para tomar las mediciones. El error se calculó como el % de la diferencia entre el caudal calculado diariamente y los demás caudales. En relación con la medición diaria, que se puede considerar la más precisa, las mediciones con intervalos hasta de 20 días, estimarían el caudal con un margen de error inferior al 10%. Los cálculos realizados utilizando medias móviles, cada 2 y 4 datos, no mejoró la precisión de la estimación, dado que el error continuó siendo alto, a intervalos de 30 días, 17.8 y 21.7%, respectivamente.

En términos generales, se observó una correlación estrecha entre la precipitación y el caudal del río, medidos a intervalos mensuales (Gráfica 1). Sin embargo, llama la atención las mediciones realizadas en marzo, mes en el cual ocurre una reducción en la precipitación pero los caudales mantienen el nivel de los meses anteriores.

Tabla 2. Caudal del cauce (m³/s) y error de la estimación (%) utilizando distintos intervalos tiempo para las mediciones.

Frecuencia para la medición de caudal (días)	Caudal (m³/día)	Error (%)
1	7.3	0.0
5	7.2	1.2
10	6.7	7.9
20	6.8	7.0
30	6.1	15.0
45	6.4	12.4
60	5.8	19.5
90	6.0	17.6



Gráfica 1. Relación entre la información mensual de precipitación (mm) y caudal observado (m³/s).

- **Determinación de niveles de sedimentación**

A partir de las diluciones de concentración conocida y la correspondiente lectura del turbidímetro, se obtuvo la siguiente ecuación de regresión :

$$Y: 0.2372 * X + 0.0443 \quad (R^2 = 0.96)$$

donde,

Y: gramos de suelo disueltos en un litro de agua
X: Turbidez en NTU

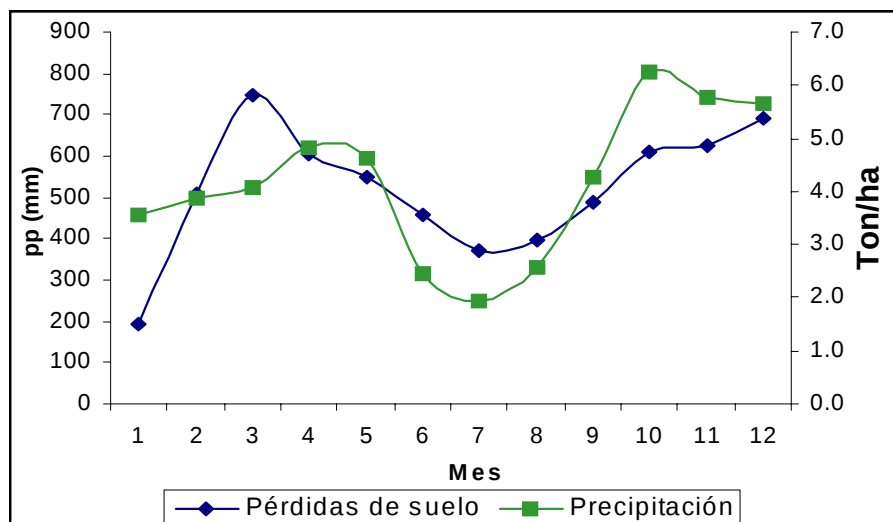
Utilizando la regresión, se obtuvo la cantidad de suelo disuelta en un litro de agua, a partir de la lectura de la turbidez de la muestra diaria de agua. Esta cantidad, multiplicada por el valor del caudal diario en litros, permitió estimar la cantidad de suelo (en g), que circuló cada día en el cauce. La suma de las concentraciones diarias, dividida por el número de hectáreas de la cuenca aportante, dio como resultado un nivel anual de sedimentación de 48.5 TM/ha (Tabla 3). En relación con la medición diaria, que se puede considerar la más

precisa, las mediciones con intervalos hasta de 20 días, estimarían el caudal con un margen de error inferior al 10%.

Tabla 3. Sedimentación (t/ha) y error de la estimación (%) utilizando distintos intervalos tiempo para la toma de muestras.

Frecuencia de Medición de Sedimentación (días)	Sedimentación (t/ha)	Error (%)
1	48.5	0
5	51.7	6.6
10	44.1	9.2
20	43.9	9.7
30	41.0	15.5
45	40.2	17.1
60	39.3	19.2
90	34.0	19.9

En la gráfica 2 se observa el ajuste relativo entre la información mensual de sedimentación y la precipitación. En marzo y agosto se siembran en la región los cultivos de pancoger, bajo el sistema tradicional de tumba y quema, períodos en los cuales, la cobertura del suelo se encuentra en valores mínimos y por ende el arrastre de suelo es mayor.



Gráfica 2. Distribución mensual del aporte de sedimentos al río (t/ha), en comparación con la precipitación media mensual.

CONCLUSIONES

Para conseguir que en los procesos cotidianos de caracterización de sistemas productivos se incorporen variables relacionadas con el uso y manejo de los recursos naturales, se requiere un desarrollo metodológico más dinámico y eficiente. La propuesta metodológica de medición de caudales, utilizando el flotador doble o subsuperficial, para estimar la velocidad, y la medición del área del cauce a partir de una regresión con la altura del nivel del río, resulta confiable, económica y de fácil acceso y aplicabilidad. Para estimar caudales, se pueden realizar mediciones a intervalos hasta de 20 días, con un margen de confianza del 90%.

De la misma manera, la determinación indirecta de sedimentos, mediante la utilización del turbidímetro, aunque dependa de la disponibilidad de equipo, resultó económica y fácil de realizar. Un margen aceptable de confianza (90%), para estimar el nivel anual de sedimentación, se obtiene realizando muestreos cada 20 días.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al I.A Jaime Escobar, por su contribución en la toma de información de campo.

BIBLIOGRAFIA

Berdegúe, J.; Ramírez, E. (comp.) 1995. Investigación con enfoque de sistemas en la agricultura y el desarrollo rural. Red Internacional de Metodología de Investigación de Sistemas de producción (RIMISP). Santiago de Chile. 370.

De Acevedo Netto, J.M.; Acosta, G. 1984. Manual de hidráulica. Ed. Hídalú. 578p.

Morales, C. F. 1996. Evaluaciones en la parcela de escorrentía y Erosión. Condesan/Aspaderuc GTZ. 52p.

Reardon, T. 1998. Diversificación del ingreso rural en América Latina y sus consecuencias sobre las estrategias de desarrollo. Tercer Simposio

Latinoamericano sobre Investigación y Extensión en Sistemas Agropecuarios. Lima, agosto 19-21 de 1998.

Rivera, B.; Estrada, R. 1998. Modelo para el empoderamiento de una comunidad local a partir del análisis de los términos de intercambio entre criterios de política. Resúmenes Tercer Simposio Latinoamericano sobre Investigación y Extensión en Sistemas Agropecuarios. Lima, agosto 19-21 de 1998.

Schejtman, A. 1998. Uso múltiple del espacio rural. Tercer Simposio Latinoamericano sobre Investigación y Extensión en Sistemas Agropecuarios. Lima, agosto 19-21 de 1998.