

ARTÍCULO ORIGINAL / ORIGINAL ARTICLE

Estudios Hidrométricos en la cuenca alta del Río Tebicuary- Paraguay Oriental

Hydrometric studies at the Upper Basin of Tebicuary River- Eastern Paraguay

Fabio Cáceres Dueñas¹, Venancio Parra¹, Patrocínio Alonso¹, Juan F. Facetti Masulli^{1,2}
¹ Hydroconsult SRL. Asunción, Paraguay.

² Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ingeniería. San Lorenzo, Paraguay.

Autor de correspondencia: facadu@hotmail.com

Recibido: 20/12/16. Aceptado: 26/07/17.

Resumen: Se presentan los resultados de estudios hidrométricos realizados en el primer tramo del Río Tebicuary en el Departamento de Itapúa. Se basan en lecturas limnimétricas diarias en un lapso de 18 meses así como en 18 campañas mensuales de determinaciones batimétricas y de aforo directo conducentes a establecer su régimen hidrométrico. La fórmula $h-Q_L$ obtenida alcanza una elevada correlación del 99,6%. Su régimen hidrométrico señala que el río en el tramo estudiado es de tipo regular es decir las crecidas y bajantes de las aguas no muestran alteraciones bruscas en el tiempo debido a la gran sección que tiene el cauce para conducir las crecidas y se suceden en forma gradual. Así mismo fue estudiado el transporte de sólidos; la ecuación $h-Q_S$ correspondiente también alcanza un alto grado de correlación.

Palabras clave: Río Tebicuary. Itapúa, aforo, régimen hidrométrico, caudal sólido.

Abstract: The results of hydrometric studies carried out in the first section of Tebicuary River in the Department of Itapúa are presented. They are based on daily of hydrometers readings in a period of 18 months as well as 18 monthly campaigns of bathymetric determinations and direct gauging leading to establish their hydrometric regime. The formula $h-Q_L$ obtained reaches a high correlation of 99.6%. Its hydrometric regime indicates that the river in the studied section is of a regular type, that is to say, the floods and descents of the waters do not show abrupt changes in time mainly due to the large section that the channel has to conduct the floods and they occur gradually. The transport of solids was also studied and the corresponding $h-Q_S$ equation also reaches a high degree of correlation.

Key words: Tebicuary River, Itapúa, flow gauging, hydrometric regime, solids transport.



INTRODUCCIÓN

El río Tebicuary es uno de los principales afluentes del Río Paraguay en el que desemboca aproximadamente a coordenadas S 26°36'10" y W 58°11'35". Tiene una longitud de 360Km y su caudal medio es de $\sim 506\text{m}^3/\text{s}$ (1). Es un importante componente de los profusos recursos hídricos del Departamento de Itapúa (1, 5). Se origina en el abanico que presentan sus cabeceras. Al sur de Tavaí, ($\sim \text{S}26^{\circ}13' \text{ W}55^{\circ}33'$ y ~ 143 msnm) conforma un cauce más o menos definido y alimentado por diversos cuerpos de agua con variación de cotas en sus nacientes (~ 395 a 405 msnm). Discurre por los departamentos de Caazapá, Itapúa, Misiones, Paraguari, Ñeembucú, enriquecido en su discurrir por las descargas de numerosos cuerpos de agua que así presentan una amplia gama de caudales. A la altura de coordenadas $\sim \text{S}26^{\circ}32'30''$ y $\text{W}56^{\circ}50'54''$, recibe las aguas del Río Tebicuary-mi que se considera su brazo norte y cuyos regímenes hidrológico y de calidad de agua fueron publicados en esta Revista (6, 7).

No se conocen publicaciones de estudios realizados en el tramo superior (cuenca alta) de unos 196Km, comprendido desde sus nacientes hasta la desembocadura del Tebicuary-mi. Dicho trecho provee las aguas de empleo para diversos fines; particularmente importante su utilización en el cultivo de arroz. Sin embargo, su régimen hidrológico hasta ahora no ha sido estudiado. Por ello tampoco puede darse una administración adecuada de su uso.

El presente trabajo tiene por objetivo describir los estudios hidrométricos así como algunos aspectos sedimentológicos del río Tebicuary en su cuenca alta. Forma parte de una serie de trabajos conducentes a la evaluación de los regímenes hidrométricos y otros estudios básicos de ríos y arroyos desarrollados en el país y que son imprescindibles para la planificación seria y responsable de las políticas y estrategias sobre los recursos hídricos y su administración.

METODOLOGÍA

Para evaluar el régimen hidrométrico, fueron realizados trabajos de campo según la metodología convencional.

Estación de colecta de datos Limnómetros y Registros

Para la obtención de los registros hidrométricos, la estación de aforo fue ubicada en las cercanías del puente de la ruta 8 que cruza el río; sus correspondientes coordenadas son $26^{\circ}42'54,96''$ S y $56^{\circ}16'55,86''$ W.

En ella fueron instaladas reglas hidrométricas calibradas a escala métrica. Su instalación se realizó conforme a los criterios técnicos establecidos: curso tranquilo, sección regular y en tramo de trayectoria recta. Dichos hidrómetros fueron instalados y referidos instrumentalmente al punto fijo o Nivel de Referencia (NR) con empleo de un Nivel

Optico Kolidá-KL 32 y eventualmente con un teodolito Wild T-16. Fueron leídos diariamente durante dos turnos para el registro estadístico del comportamiento altimétrico de las aguas, Las lecturas y registros obran en los repositorios de Hydroconsult. En las campañas de aforo las mediciones batimétricas se ejecutaron en los segmentos verticales establecidos (Figura 1); las lecturas con empleo de Nivel fueron siempre referidas al NR. Los datos de las lecturas hidrométricas fueron analizados y contrastados estadísticamente con las mediciones directas de caudales para la determinación de la relación nivel-caudal.

Batimetría y Aforo Delimitación de la sección

Para la medición de los caudales, en cada punto de control se demarcó la sección del río y se realizó la correspondiente batimetría, midiendo el ancho del curso y sus profundidades. A partir del ancho del río se procedió a subdividirlo en partes iguales (8) para realizar en cada uno de estos puntos la medición de velocidad de flujo tanto para caudales líquidos como sólidos. La (Figura 1) ejemplifica la sección en ocasión (25/04/2011) de una batimetría y aforo; ancho 74,10m, profundidad media $2,47 \pm 0,22$ m; sub-secciones: 25 de 2,50m; remanente en márgenes. El nivel de las estacas en las márgenes izquierda y derecha da una idea de sus alturas relativas.

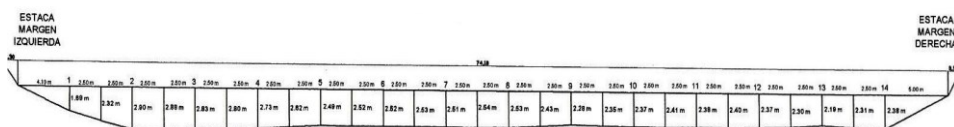


Figura 1: Sección transversal de estación de aforo – Río Tebicuary.

Campañas de campo

Las tareas de mediciones y aforo se ejecutaron en el período de 18 meses con las lecturas y sus registros diarios y con 18 campañas mensuales de aforo directo concomitantes.

Aforo: trabajo de campo

Para el aforo fueron realizadas (9, 10) las mediciones de batimetría, nivelación y correntometría procediéndose a la determinación de la velocidad de flujo instrumentalmente (correntómetro digital HORIZON y un molinete SIAP. MH 1.).

El periodo de monitoreo de las 18 campañas mensuales se verificó de abril de 2011 a setiembre de 2012.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Limnimetría y Aforo

Las observaciones hidrométricas realizadas durante las dieciocho campañas de control, indican que el régimen hidrométrico que presenta el río es de tipo regular, es decir las crecidas y bajantes de las aguas no muestran alteraciones bruscas en el tiempo y se suceden en forma gradual. Esto se debe al volumen de agua que tramita el río y a la gran sección que tiene el cauce para conducir las crecidas cuestiones también importantes ante eventuales efectos de los fenómenos del Niño/Niña (11, 12).

Registros hidrométricos

Para determinar el régimen hidrométrico, fueron analizadas las lecturas de las reglas limnimétricas y contrastadas con los datos de medición con instrumental en las 18 campañas de determinación directa de caudales. Este análisis permite establecer una ley del comportamiento hidrométrico de las aguas durante el período de mediciones; a partir del mismo, se puede realizar estimaciones y proyecciones de eventos en función a los niveles de agua registrados.

Los datos limnimétricos indican que entre los meses de abril y noviembre de 2011 se presentaron los mayores caudales, registrándose los valores más altos en el mes de julio. Los niveles más bajos se han producido entre los meses de diciembre a marzo, registrándose los caudales mínimos en los meses de febrero y marzo de 2012. Debe señalarse que en dichos meses podría haberse potenciado el uso de sus aguas en los cultivos de arroz y parte de esa bajante podría atribuirse a dichos efectos. Los mismos han sido considerados en su análisis estadístico (*vide Infra*).

Los valores más resaltantes de dichos registros se indican en el **Cuadro 1**:

Cuadro 1: Registros limnimétricos resaltantes

Estación	h Promedio General	h Máximo Absoluto *	h Mínimo Absoluto *
Río Tebicuary	1,02 m	4,53 m (23-jul-11)	0,31 m (24-Mar-12)

(*) Se consideró el primer valor histórico registrado en este trabajo.

Aforos

Los resultados para las 18 campañas de aforo directo se presentan en la **Tabla 1a**.

Tabla 1a: Niveles hidrométricos y Caudales Río Tebicuary Caudal registrado

N° Camp.	Fecha de colecta	(m ³ .seg ⁻¹)	Lect Hidrom (m)
1	25/04/2011	202,34	2,70
2	29/05/2011	36,78	0,71
3	26/06 /2011	187,86	2,51
4	23/07/2011	549,41	4,53
5	20/08/2011	87,43	1,30
6	22/09/2011	58,15	0,90
7	27/10/2011	107,37	1,70
8	23/11/2011	139,03	1,95
9	16/12/2011	20,22	0,57
10	19/01/2012	16,01	0,53
11	20/02/2012	5,12	0,32
12	21/03/2012	5,12	0,31
13	24/04/2012	25,78	0,67
14	25/05/2012	13,29	0,50
15	25/06/2012	72,85	1,30
16	25/07/2012	21,80	0,67
17	20/08/2012	40,45	0,86
18	20/09/2012	18,07	0,57

Las variaciones nivel-caudal se muestran en la (Figura 2). La ley de su comportamiento hidrométrico presenta (*Excell Statistic*) una línea de tendencia polinómica.

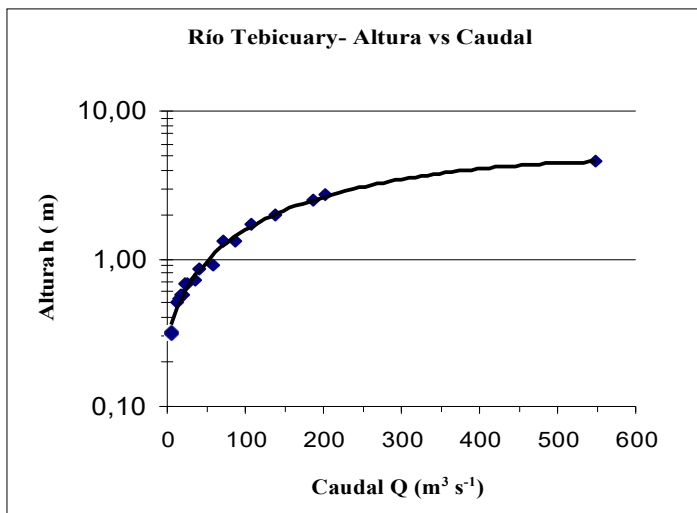


Figura2: Variación del caudal Q vs altura de nivel h

La curva ajustada polinealmente alcanza un excelente grado de correlación del 99,6%, lo cual acredita el buen nivel de confianza de la fórmula. La misma se indica a continuación:

$$h = -1 \text{ E-}05Q^2 + 0,139Q + 0,2826 \quad (1) \quad R^2 = 0,996$$

Por practicidad, para el cálculo del Caudal Q en base a una lectura de h se puede usar:

$$Q = 20,34h^2 + 27,838h - 0,4892 \quad (1') \quad R^2 = 0,995$$

En relación a las campañas¹ de aforo de caudales realizados, los valores máximos y mínimos corresponden a los registros establecidos por las mediciones directas con el instrumental; el promedio de 49,1 m³/s es el estimado a partir del valor de h_{prom} . Estos caudales máximos, mínimos y promedio se presentan en el **cuadro 2**.

¹ Atendiendo que en los registros de febrero y marzo /2012 podría haber tenido influencia el uso del agua en el cultivo de arroz, si se omiten ambos registros, la curva ajustada polinómicamente para los 16 valores de caudal alcanza un excelente grado de correlación del 99,5% y la ecuación es: $Q = 20,977h^2 + 24,362h + 3,00$, en cuyo caso el valor promedio calculado es $Q_{\text{prom}} = 49,7 \text{ m}^3/\text{s}$, con escasa diferencia lo cual señala que la fórmula (1) abarca también satisfactoriamente caudales bajos.

Cuadro 2- Valores de caudales resaltantes

Estación	Q Promedio Estimado m ³ seg ⁻¹	Q Máximo Registrado m ³ seg ⁻¹	Q Mínimo Registrado m ³ seg ⁻¹
Río Tebicuary	49,1	549,41 (23-07-11)	5,12 (21-03-12)

Es de interés señalar que en su brazo norte o Río Tebicuary-mi, en el punto de aforo ubicado en Itapé- Tupasy Paso (S 25°50'49,0'' W 56°37'34,8''), en un trabajo anterior (6), el caudal medio calculado resultó $Q_m = 45,0\text{m}^3/\text{s}$.

Aspectos sedimentológicos

Características hidrológicas y edáficas de la cuenca y cauce

A partir de la cartografía nacional disponible, se han identificado las cuencas y sus características propias y de los cauces. Las características más importantes definidas son: *Área de la cuenca; longitud del curso principal de agua; cota máxima de cuenca (naciente); cota mínima o punto de descarga; Punto de aforo; Pendiente media del cauce principal; tipos de suelos componentes de la cuenca (taxonomía), Clase de capacidad de uso de los suelos con superficie de cobertura.*

Cuenca del Río Tebicuary

Área de la cuenca:	25.375 Km ² .
Longitud del cauce principal:	360 Km.
Cota máxima de la cuenca:	460 msnm.
Cota mínima o de descarga:	50 msnm.
Cota de aforo:	87 msnm.
Coordenadas	26°42'54,96''S y 56°16'55,86''W
Pendiente general de la cuenca:	11,61 %

Suelos

Los mapas de Reconocimiento de Suelos de la Región Oriental del Paraguay (13, 14) y de Usos de la Tierra del Paraguay (15, 16) fueron empleados en la evaluación. Imágenes provenientes de Landsat 7 (Escala 1:25.000) contribuyeron a la interpretación de las unidades de vegetación y de uso de la tierra, el análisis de las geo-formas y sus posibles relaciones con las unidades reconocidas en las observaciones de campo. *In situ* fueron colectadas muestras de los primeros horizontes para determinaciones físicas como textura al tacto, color del suelo (17).

La cuenca por su extensión comprende variados suelos como: Derivados de basalto en la cabecera este de las nacientes de agua. Derivados de areniscas como los suelos de lomadas. Derivados de sedimentos arcillo-arenosos de los llanos hasta su desembocadura en el río

Paraguay.

Entre los suelos de importancia por su extensión en la cuenca se citan los siguientes: **Suelo 1:** U 2.3 Lls/A4n = Typic Paleaquult, de llano, drenaje lento. Ocupa: 10% del área. *Capacidad de uso:* Vwd/Vwi, con exceso de agua y parcialmente inundable.

Suelo 2: U 1.3. Lls/A5n = Typic Albaquult de llano, drenaje muy lento e inundable. Ocupa 10%; *Capacidad de uso:* Vwd/Vwi, con exceso de agua y parcialmente inundable **Suelo 3:** A 7.4/ A 6.4 Lls/A4n = Aquic Paleudalf y Albaquic Paleudalf, arcillosos, de llanos. Ocupa el 40%. *Capacidad de uso:* Vwd/Vwi, con exceso de agua y parcialmente o totalmente inundable.

Suelo 4: U10.4 La/B2n = Rhodic Paleudult, francosa fina, de lomada, rojo. Ocupa el 20% del área. *Capacidad de uso:* IIse/IIIset, con moderada a alta erodabilidad y baja fertilidad.

Suelo 5: A 9.2 La/B2n = Arenic Paleudalf, franco, de lomada, rojo. Ocupa el 10% del área. *Capacidad de uso:* II/IIIse, moderada fertilidad, alta erodabilidad.

Suelo 6: E 8.3. Sa/C2n = Lithic Udorthent, francosa gruesa, de serranía, color rojo. Ocupa el 10% del área. *Capacidad de uso:* III est, suelo de alta erodabilidad, baja fertilidad.

Caudal sólido

Para la determinación del transporte de sólidos en el cuerpo de agua estudiado, se utilizó la misma división en segmentos verticales que fueron empleados para la batimetría, la medición de velocidades y el cálculo del caudal líquido. En cada una de dichos segmentos fueron colectadas muestras de agua y enviadas al laboratorio para la determinación de sólidos totales y en disolución que se realizó por gravimetría. Con dichos valores se determinó el caudal sólido de cada curso.

La (Tabla n° 2) presenta los valores registrados del caudal sólido (Q_s) y los correspondientes líquidos (Q_L) por campaña.

Tabla N° 2: Caudal sólido determinado

Campañas	Q_L m ³ /s	Q_s Kg/s	Campañas	Q_L m ³ /s	Q_s Kg/s
1	202,34	21,43	10	16,01	1,75
2	36,78	3,02	11	5,12	0,41
3	187,86	19,73	12	5,12	1,13
4	549,41	31,37	13	25,78	5,7
5	87,43	10,5	14	13,29	1,08
6	58,15	5,35	15	72,85	7,89
7	107,37	7,84	16	21,8	1,16
8	139,03	10,39	17	40,45	3,8
9	20,22	1,62	18	18,07	2,03

La ecuación (2) relaciona satisfactoriamente, $R^2 = 0,962$, el caudal sólido con el líquido.

$$Q_s = 0,0001 Q^2 + 0,1169Q - 0,3116 \quad (2)$$

Con respecto a la relación Nivel h -Caudal Sólido Q_s en el cuerpo de agua la ecuación que las relaciona con buen nivel de confianza es como sigue:

$$h = 0,0009Q^2 + 0,0999Q - 0,3885 \quad (3) \quad R^2 = 0,962$$

Ella permite estimar el transporte de sólidos por el río Tebicuary en el punto de aforo.

Respecto de los sedimentos en suspensión, su posible origen estaría en los suelos de lomada/serranía tipo 4,5 y 6 y alta erodibilidad que hacen respectivamente ~ un 20, 10 y 10% de la cuenca del trecho en estudio.

CONCLUSIÓN

Se trata de un cuerpo de agua superficial de sección importante y buena capacidad de conducción de caudales; es un río de tipo regular. Las curvas de relación nivel caudal (líneas de tendencia polinomial) ajustaron satisfactoriamente presentando un coeficiente de correlación elevado que indica el buen nivel de confiabilidad de la fórmula dentro del rango de validez que delimitan los niveles máximos y mínimos medidos en las diez y ocho campañas. Estos valores obtenidos resultan contribuciones fundamentales para estudios de cuenca, microcuencas, calidad de agua, obras hidráulicas, deforestación/forestación, biodiversidad etc, así como para la administración de sus aguas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dirección de Meteorología e Hidrología. Balance Hídrico Superficial del Paraguay. Oficina Regional de UNESCO para América Latina y el Caribe; 1992.
2. UNESCO. Programa Hidrológico Internacional. Mapa Hidrogeológico de América del Sur y Texto explicativo; 1996.
3. Dirección de Meteorología e Hidrología, Organización de las Naciones Unidas. Mapa Hidrogeológico-Proyecto PAR/83/005; 1986.
4. Dirección del Servicio Geográfico Militar. Cartas Nacionales SG 21-2; SG21-4, Escala 1:250.000,5472, 5572,5571, 5671 Escala 1:100.000; 1993.
5. Cáceres DF, Parra V, Alonso P, Facetti MJF. Estudios Hidrológicos en los Arroyos Syryryka, Yukyrya y Bobi, Paraguay Oriental. Rev. Soc. cient. Parag. 2017;22(1): 47-60.
6. Cáceres DF, Parra V, Alonso P, Facetti MJF. Estudio Hidrométrico en el río Tebicuary-mi. Rev. Soc. cient. Parag. 2005;17(1): 9-19.
7. Facetti MJF, Lozano AF, Urbieta A, Delgado M, Dávalos A. Calidad de Agua en el río

Tebicuary-mi. Rev. Soc. cient. Parag. 2006;20(1):12-39.

8. Materón Muñoz H. Hidrología Básica II. Cali: Ed. Universidad del Valle;1985.
9. Linsley R, Kohler M, Paulus J. Hidrología para Ingenieros, 2ª ed. Bogotá. Mc Graw Hill; 1977.
10. Chow VT, Maidment D, Mays LW. Hidrología Aplicada. Bogotá. McGraw-Hill Interam; 1994.
11. Vázquez MA, Vázquez B P. El fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) y su impacto en el régimen de lluvias en Paraguay en el 2015. Rev. Soc. cient. Parag.2017;22(1):87-101.
12. Vázquez MA, Vázquez B P. El Niño/Oscilación del Sur 2015/16 y su impacto sobre el comportamiento de la temperatura media superficial del aire en el Paraguay. Rev. Soc. cient. Parag. 2017. 22(2):159-172.
13. López O, González E, Alonso P. Mapa de reconocimiento de suelos de la Región Oriental del Paraguay. Proyecto Reconocimiento Uso de la Tierra del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Asunción: GTZ, 1995.
14. Department of Agriculture, USA. Keys to Soil Taxonomy. 6ª ed. U.S. Washington: Government Printing Office;1994.
15. López O, González E, Alonso P. Mapa de reconocimiento de suelos de la Región Oriental del Paraguay. Proyecto Reconocimiento Uso de la Tierra del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Asunción: GTZ, 1994.
16. Facultad de Ingeniería Agronómica. Uso de la Tierra y Deforestación en la Región Oriental del Paraguay. FIA: San Lorenzo- Paraguay;1994.
17. Munsell AH. Soil Color Chart. Baltimore: Macbeth;1990.