

**FLUJO EN CANALES ABIERTOS: CARACTERIZACIÓN EN CURSOS DE LA
PROVINCIA DE SANTA FE, REPÚBLICA ARGENTINA.**

Graciela Viviana Zucarelli y María del Valle Morresi

Departamento de Hidrología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas,
Universidad Nacional del Litoral. Paraje "El Pozo", 3000 - Argentina. Te: + 54 (342)
575242
e-mail: vivi@fich1.unl.edu.ar

RESUMEN

El flujo en canales abiertos puede clasificarse en los siguientes cuatro tipos de regímenes: laminar-subcrítico, turbulento-subcrítico, laminar-supercrítico y turbulento-supercrítico. Los números tradicionalmente empleados para realizar dicha clasificación son: el número de Reynolds y el número de Froude. Para indicar la condición de flujo de acuerdo a la estabilidad de la superficie libre, se utiliza el número de Vedernikov y para clasificarlo en función de las fuerzas preponderantes en el movimiento existen expresiones de Ponce & Simons (1979) que permiten distinguir las ondas cinemáticas, ondas difusivas y ondas dinámicas. El objetivo del presente trabajo es clasificar cuatro tramos pertenecientes a tres cursos de agua de la provincia de Santa Fe, República Argentina, de acuerdo a los diferentes criterios existentes en la literatura, como parte de la caracterización de los mismos desde un punto de vista hidráulico.

INTRODUCCIÓN

El flujo en canales abiertos puede clasificarse en los siguientes cuatro tipos de regímenes: laminar-subcrítico, turbulento-subcrítico, laminar-supercrítico y turbulento-supercrítico. Los números empleados para realizar dicha clasificación son: el número de Reynolds y el número de Froude. El número de Reynolds $R_e = u \cdot d / \nu$ (u es la velocidad media, d es la profundidad de flujo y ν es la viscosidad cinemática) se usa para caracterizar el flujo laminar o turbulento. Valores de $R_e < 1000$ indican flujo laminar y valores superiores a los 3000, flujo turbulento. El número de Froude $F = u / (g \cdot d_o)^{1/2}$ se utiliza para caracterizar el flujo subcrítico o supercrítico, si $F < 1$ el flujo es subcrítico y si $F > 1$ es supercrítico. El valor 1 corresponde al estado de flujo crítico.

La clasificación del flujo como estable o inestable depende de la tendencia de la perturbación (onda) a atenuarse o amplificarse en el tiempo. A su vez, Ponce & Simons (1978) presentan la clasificación del flujo en función de las fuerzas preponderantes en el movimiento. De acuerdo a esta clasificación, es posible distinguir las siguientes ondas de agua: (i) ondas cinemáticas, si los términos de

inercia y de presión pueden ser despreciados, (ii) ondas difusivas, si los términos de inercia pueden ser despreciados y (iii) ondas dinámicas, cuando todos los términos de la ecuación de cantidad de movimiento de Saint Venant son importantes.

Ponce (1979) realiza un tratamiento de estos criterios y propone que, mientras los números de Froude y Vedernikov son relaciones de velocidades o celeridades, los números de Reynolds y Ponce & Simons son relaciones de difusividades (relaciona difusividades del canal correspondiente al tirante normal con la difusividad espectral). Ponce & Simons (Tucci, 1993) dedujeron diversos criterios de aplicabilidad de los modelos de Onda Cinemática O.C., Onda Difusiva O.Dif. y Onda Dinámica O.D. para representar el flujo en canales abiertos. Los autores derivaron un espectro, mostrando regiones de validez para O.C. y O.Dif.. A resultados similares arribaron Menendez y Norscini (1982).

Sobre la base de las investigaciones de Ponce, dichos criterios fueron evaluados para cuatro tramos pertenecientes a tres cursos de agua de la provincia de Santa Fe, República Argentina, a efectos de analizar sus resultados.

METODOLOGÍA

Velocidad en canales

Es posible distinguir tres velocidades del flujo en canales abiertos: (i) velocidad media de las partículas, (ii) velocidad de la onda inercial y (iii) velocidad de la onda cinemática. La velocidad de las partículas, u , varía con la profundidad del flujo. La velocidad de la onda inercial c_{rd} es debida a las fuerzas de presión y de inercia, también se llama celeridad de la onda dinámica. Su expresión es:

$$c_{rd} = \sqrt{g \cdot d_0} \quad (1)$$

La celeridad de la onda cinemática c_{rk} es aquella de la onda gobernada por la fricción y la gravedad, con exclusión de las fuerzas de inercia. La onda cinemática también está representada por la celeridad de Kleitz-Seddom (Ponce, 1979), cuya expresión es:

$$c_k = \beta \cdot u \quad (2)$$

en la cual β es el exponente del área A [m^2] en la relación caudal-área para el estado estacionario.

$$Q = \alpha \cdot A^\beta \quad (3)$$

donde Q es el caudal [m³/seg], A es el área de la sección transversal [m²] y α un coeficiente. La celeridad relativa de la onda cinemática es:

$$c_{rk} = (\beta - 1) \cdot u \quad (4)$$

Difusividad en flujos en canales abiertos

Según Ponce (1979), existen tres niveles de difusividades representativas del flujo en canales abiertos: (i) difusividad molecular, (ii) difusividad del canal y (iii) difusividad espectral. La difusividad molecular D_m puede ser expresada como:

$$D_m = \nu = \frac{u \cdot L_m}{2} \quad (5)$$

en la cual $L_m [m] = 2 \nu / u$ es la longitud molecular característica.

La difusividad del canal, D_o , también llamada "difusividad hidráulica" se define como:

$$D_o = \frac{u \cdot L_o}{2} \quad (6)$$

donde $L_o [m] = d_o / S_o$ es la longitud característica del canal.

La difusividad espectral D , se define como:

$$D = \frac{u \cdot L}{2} \quad (7)$$

en la cual $L [m]$ es la longitud de onda espectral de una onda superficial sinusoidal.

El número de Froude: flujo subcrítico, crítico y supercrítico

El estado del flujo en canales abiertos está gobernado por los efectos de viscosidad y gravedad relativa a las fuerzas de inercia del flujo. El efecto de la gravedad se representa por una relación de las fuerzas de inercia a las fuerzas de

gravedad. Esta relación se define por el número de Froude y es el cociente entre la velocidad media y la celeridad relativa de la onda dinámica:

$$F = \frac{u}{c_{rd}} = \frac{u}{\sqrt{g \cdot d}} \quad (8)$$

Mediante este número se clasifica al flujo en subcrítico si $F < 1$ y supercrítico para $F > 1$. Si el $F = 1$, se habla de flujo crítico.

El número de Reynolds: flujo laminar, intermedio o turbulento

El efecto de la viscosidad relativo al de inercia, puede representarse por el número de Reynolds, que se define como:

$$R_e = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (9)$$

Valores pequeños de R_e se utilizan para describir el flujo laminar, mientras que valores mayores corresponden a flujo turbulento. El rango intermedio corresponde a flujo en transición. En general, $1000 < R_e < 3000$ indican la condición de este último.

Una modificación del número de Reynolds (Ponce, 1979) se presenta como:

$$R_* = \frac{D_o}{D_m} = \frac{L_o}{L_m} \quad (10)$$

También puede escribirse como:

$$R_* = \frac{R_e}{2 \cdot S_o} \quad (11)$$

El número de Vedernikov: flujo estable, neutral o inestable

La ecuación básica que caracteriza la condición de flujo de acuerdo a la estabilidad de la superficie libre, es la que expresa el número de Vedernikov (Chow, 1959).

$$V = \chi \cdot \gamma \cdot F \quad (12)$$

donde χ es el parámetro de fricción de borde, γ es el parámetro de forma de la sección transversal y F es el número de Froude, definido como $F = u / (g \cdot d_o)^{1/2}$, donde u = velocidad media del flujo [m/s], g es la aceleración de la gravedad [m/s^2] y d_o es la profundidad del flujo [m].

Empleando ciertas aproximaciones de Saint Venant, Vedernikov desarrolló un criterio para evaluar la inestabilidad del flujo uniforme. Posteriormente, Craya, citado por Chow (1983) y Ponce (1979) demostraron que el número de Vedernikov es la relación entre la celeridad relativa de la onda cinemática y la celeridad de la onda dinámica, cuya expresión es la siguiente:

$$V = \frac{c_{rk}}{c_{rd}} \quad (13)$$

De acuerdo a este criterio, si la celeridad de la onda cinemática es mayor que la celeridad de la onda dinámica, el flujo es inestable, en caso contrario, es estable. En este contexto, el flujo es estable si $V < 1$ e inestable para $V > 1$. Para el caso en que $V = 1$, se dice que el flujo es neutralmente estable y ocurre cuando las celeridades son iguales. Por su parte, Chen (1995) y Ponce (1997) presentan otra expresión equivalente para el número de Vedernikov:

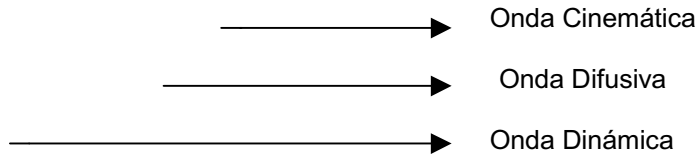
$$V = \frac{F}{F_s} \quad (14)$$

En las expresiones anteriores χ es el parámetro de fricción, γ es el parámetro de forma de la sección transversal y F_s es el número de Froude para la condición de flujo neutralmente estable. Chen (1995) propone expresiones de F_s para diferentes regímenes de flujo que obedecen a las diferentes distribuciones de velocidad en cada uno de ellos. De esta manera, si el flujo es laminar $F_s = 0.5$, si el flujo es turbulento hidráulicamente liso, $F_s = 2/(1+3m)$ y para flujo turbulento completamente rugoso, $F_s = 2/(1+2m)$, donde, de acuerdo a Manning, $m = 1/6$ puede ser usado para flujo turbulento liso y rugoso.

El criterio de Ponce-Simons: onda cinemática, difusiva o dinámica

La ecuación que gobierna el movimiento del flujo en canales abiertos es la ecuación de cantidad de movimiento de Saint Venant y de la interpretación de sus términos surgen los distintos tipos de ondas.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (15)$$



donde y es la profundidad del canal [m], S_0 es la pendiente del fondo, S_f es la pendiente de fricción, (x, t) son las variables independientes espacio y tiempo respectivamente. Ponce & Simons (1978) sugieren un número adimensional σ para caracterizar tres tipos de ondas de aguas poco profundas: (i) ondas cinemáticas, en las cuales los términos de inercia y de presión son despreciados, (ii) ondas difusivas, que consideran despreciables los términos de inercia y (iii) ondas dinámicas, donde la totalidad de los términos de la ecuación de Saint Venant tienen importancia. La expresión de σ es:

$$\sigma = \left(\frac{2\pi}{L} \right) L_o \quad (16)$$

Ponce et al. (1978) introducen un número adimensional con el período de onda normalizado respecto del número de Froude, definido como:

$$\frac{\tau}{F_o} = T_o S_o \sqrt{\frac{g}{d_o}} \quad (17)$$

en la cual T [seg] es el período de la onda y F_o es el número de Froude correspondiente al tirante d_o y τ es el período de onda adimensional, normalizado con respecto al número de Froude. Otra forma de definir el número adimensional de Ponce et al. es:

$$P = \frac{D_o}{D} = \frac{L_o}{L} \quad (18)$$

De donde se observa:

$$P = \frac{\sigma}{2\pi} \quad (19)$$

Ponce & Simons (Tucci, 1993) dedujeron diversos criterios de aplicabilidad de los modelos de Onda Cinemática O.C., Onda Difusiva O.Dif. y Onda Dinámica O.D. para representar el flujo en canales abiertos. Los autores derivaron un espectro, mostrando regiones de validez para O.C. y O.Dif.. A resultados similares arribaron Menendez y Norscini (1982). Basado en la propagación de las líneas características de una perturbación sinusoidal Ponce (1989) concluyó que para el 95 % de precisión el modelo O.C. es aplicable cuando se verifica la siguiente desigualdad:

$$\frac{T \cdot S_o \cdot u}{d_o} \geq 171 \tag{20}$$

En relación con el modelo de O Dif. el autor estableció la relación:

$$T * S_o \cdot \sqrt{\frac{g}{d_o}} \geq 30 \tag{21}$$

Resumiendo, la Tabla 1 presenta los cuatro criterios de clasificación del régimen de flujo en canales abiertos.

Tabla 1. Clasificación del régimen de flujo en canales abiertos.

Número Adim.	Régimen	Régimen	Régimen
Froude F=u/c _{rd}	<i>Subcrítico</i> F<1	<i>Crítico</i> F=1	<i>Supercrítico</i> F>1
Reynolds R _e =ud/ν	<i>Laminar</i> R* < 1000	<i>Transición</i> 1000 < R* < 3000	<i>Turbulento</i> R* > 3000
Reynolds modificado R* = R _e /2S _o	<i>Laminar</i> R* < 1000	<i>Transición</i> 1000 < R* < 3000	<i>Turbulento</i> R* > 3000
Vedernikov V=c _{rk} /c _{ri} V=F/F _s	<i>Estable</i> V<1	<i>Neutral</i> V=1	<i>Inestable</i> V>1
Ponce-Simons P=D _o /D	<i>Cinemático</i> P pequeño	<i>Dinámico</i> P intermedio	<i>Inercial</i> P grande

APLICACIÓN

Caracterización Fisiográfica de la Provincia de Santa Fe

La Provincia de Santa Fe, República Argentina (Figura 1), posee una superficie de 133.007 Km², en ella la distribución de las lluvias varía en el sentido de los meridianos, disminuyendo de Este a Oeste desde 1000 mm a 750 mm. Hacia el sur las lluvias presentan mayor regularidad. Es posible observar tres tipos de clima: a) al Norte de la isoterma media anual de 20° C y al Este de la isohieta de 1000 mm: clima cálido subtropical sin estación seca; b) al Norte de dicha isoterma y al Oeste: tropical con estación seca; c) resto de la provincia: templado húmedo. El relieve corresponde a la llanura Chaco-Pampeana. El valle del río Salado es el eje de asimetría que divide el ámbito de las grandes llanuras morfológicamente diferenciadas: la llanura chaqueña (baja) al Norte y la llanura pampeana (elevada) al Sur.

El desarrollo de la red de drenaje permite distinguir tres sectores: uno nivelado en el centro de la provincia; otro ligeramente ondulado, surcado por abundantes ríos de orientación Suroeste-Noreste que desagúan en el Paraná, y un tercer sector más bajo, que abarca el Suroeste de la provincia, caracterizado por la indefinición del drenaje con formación de lagunas y bañados (Bertoni, 1998).

Mattioli y Mussetti (1992) distinguieron seis unidades geomorfológicas en la provincia: 1) Domo Occidental, con drenaje insuficiente y dirección del escurrimiento hacia el Este; 2) Área Central Inundable, de difícil avenamiento y drenaje deficiente; 3) Domo Oriental, con inundación y encharcamiento y dirección del flujo hacia el Sur-Este; 4) Área Aluvial Paranaense, de relieve vinculado al Río Paraná y dirección del flujo hacia el Sur; 5) Llanura Ondulada del Sur-Este, con exceso de agua y dirección del flujo hacia el Nor-Este; 6) Área de Modelamiento Eólico Post-pampeano, con áreas cóncavas anegables y dirección de las aguas hacia el Sur-Este.

Tramos de Cursos Considerados para Evaluar los Criterios

Dada la disponibilidad de informaciones geométricas e hidráulicas asociadas a 4 tramos pertenecientes a 3 cursos (Tabla 2), se procedió a analizar sobre los mismos el tipo de régimen según los criterios descritos previamente. El Arroyo Los Amores (Villa Ocampo) sobre Ruta Provincial 42 se encuentra en la zona Norte de la provincia, mientras que los otros dos tramos considerados corresponden a la zona Sur: el Arroyo Pavón, con sección de aforos en Ruta 178S y el Saladillo sobre Ruta Provincial 16, ambos afluentes del Río Paraná.

Tabla 2. Características geométricas e hidráulicas medias de los tramos analizados.

Tramo	Long. [m]	Caudal [m ³ /s]	Tirante [m]	Area [m ²]	Ancho [m]	S ₀ [m/m]	Veloc. [m/s]
Pavón Superior	17500	96.49	3.90	130.35	39.350	1.2 E-03	0.74
Pavón Inferior	1963	1002.62	11.65	524.00	156.97	2.6 E-03	1.91
Saladillo	14800	703.32	8.69	322.60	55.60	6.6 E-04	2.18
Los Amores	36250	63.54	4.70	119.30	32.75	1.0 E-04	0.53

Los datos de caudal, área, tirante, ancho y velocidad corresponden a valores medios de "bankfull" entre las dos secciones del tramo considerado. Estas características fueron obtenidas mediante la utilización del programa computacional XSPRO (U.S.D.A.; Forest Service, U.S.D.I. Bureau of Land Management, 1992).

La longitud indicada corresponde a la del tramo medida entre dos secciones.

RESULTADOS OBTENIDOS

De un trabajo anterior presentado por las mismas autoras (1998) se extrajeron los parámetros α y β de la relación caudal-área para los cursos analizados, lo que permitió evaluar las celeridades dinámica y cinemática, como se observa en la Tabla 3. El valor de $\nu=0.000001$ m²/seg (Chow, 1994) fue empleado en los cálculos.

Tabla 3. Resumen relativo a las celeridades de ondas.

Tramo considerado	α	β	C _{rd}	C _{rk}
Pavón Superior	0.0783	1.7181	6.18	0.53
Pavón Inferior	0.0783	1.7181	10.69	1.37
Saladillo	0.0706	1.6677	9.22	1.45
Los Amores	0.0796	1.5102	6.79	0.27

Por su parte, la Tabla 4 presenta los órdenes de magnitud de cada uno de los criterios evaluados para los tramos adoptados y la Tabla 5 la aplicabilidad de los criterios de O.C. y O. Dif..

Tabla 4. Evaluación de diferentes criterios para determinar el régimen de flujo.

Tramo Considerado	Froude u/c_{rd}	Reynolds ud/ν	Reynolds modificado $R_e/2S_o$	Vederniko $\frac{v}{c_{rk}/c_{rd}}$	Vederniko $\frac{v}{F/F_s}$
Pavón Superior	0.119	2.90 E6	1.20 E9	0.081	0.079
Pavón Inferior	0.178	2.2 0E7	4.20 E8	0.128	0.118
Saladillo	0.236	1.89 E7	1.43 E9	0.157	0.157
Los Amores	0.078	2.49 E6	1.24 E9	0.039	0.037

Tabla 5. Evaluación de criterios de aplicabilidad de O.C. y O.Dif.

Tramo Considerado	$T.S_o \cdot u/d_o > 171$ $T \text{ mínimo (hs)}$	$T.S_o \cdot (g/d_o)^{1/2} > 30$ $T \text{ mínimo (hs)}$
Pavón Superior	206.4	4.32
Pavón Inferior	11.36	3.36
Saladillo	286.8	11.76
Los Amores	4200	57.6

CONCLUSIONES

Las expresiones de los números adimensionales de Froude, Reynolds y Vedernikov han sido aplicadas a tres cursos de la provincia de Santa Fe, República Argentina demostrando que los flujos de los mismos son subcríticos y turbulentos, de acuerdo a la magnitud de los números de Froude y de Reynolds y son estables, conforme la clasificación de Vedernikov.

Por su parte, los modelos de tipo difusivo aproximan mejor las condiciones imperantes en cursos naturales frente a otros más simplificados (como la Onda Cinemática), debido a que los primeros tienen en cuenta el término de presión de la ecuación de Saint Venant, es decir, la Onda Difusiva permite simular condiciones de remanso. En los cursos analizados en este trabajo, dicho término no puede despreciarse.

Además, en estos cursos, el criterio de Ponce demuestra con claridad la aplicabilidad de la Onda Difusiva ya que los valores de los períodos de onda obtenidos son posibles de ocurrir de acuerdo a las características de los tramos considerados.

AGRADECIMIENTOS

A la DPOH-Sta. Fe y a EVARSA, por el suministro de informaciones utilizadas en el desarrollo del trabajo.

LISTA DE SÍMBOLOS

c_{rd} : celeridad de la onda dinámica [m/seg]
 c_{rk}, C_k : celeridad de la onda cinemática [m/seg]
 d_o : profundidad del flujo [m].
 D_m : difusividad molecular
 D_o : difusividad hidráulica
 D : difusividad espectral
 F : Número de Froude
 g : aceleración de la gravedad [m/s^2]
 L_m : la longitud molecular característica [m]
 L_o : la longitud característica del canal [m]
 L : longitud de onda espectral [m]
 P : Número de Ponce
 Q : caudal [m^3/s]
 R_e : Número de Reynolds
 S_o : pendiente de fondo del tramo [adimensional]
 S_f : es la pendiente de fricción [adimensional]
 T : período de la onda [hs]
 u : velocidad media del flujo [m/s]
 V : Número de Vedernikov
 α : coeficiente [adimensional]
 β : el exponente del área A [m^2] en la relación caudal-área para el estado estacionario [adimensional]
 σ : número de onda de Ponce-Simons [adimensional]
 τ : período de onda [adimensional]
 χ : parámetro de fricción de borde
 γ : parámetro de forma de la sección transversal

BIBLIOGRAFÍA

Bertoni, J. C.; Zucarelli, G. V.; Morresi, M.; Rodriguez, D. (1998) "Aspectos fisiográficos e hidráulicos asociados a la red de drenaje santafesina". Aceptado para el XVII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Conosur. 3-7 de Agosto de 1998. Santa Fe. Argentina.

- Chen, C. (1995), "*Free-Surface Stability Criteion As Affected By velocity Distribution*", Journal of Hydraulic Engineering. 736-743.
- Chow, V.T, Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1983), *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Inc., 565 p.
- Chow, V.T, Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1994), *Hidrología Aplicada*, McGraw-Hill Inc., 584 p.
- Mattioli, M.; Mussetti, M. (1992), *Necesidades de Uso y manejo de los Suelos en la Provincia de Santa Fe*. Min. Agric., Gan., Ind. y Com., Subs. Rec. Nat. Prov. Santa Fe.
- Menendez, A.N. and Norscini, R. (1982), "*Spectrum of Shallow Water Waves: An Analysis*", J. Hydraul. Div. Am. Assoc. civ. Engin., 108 Nro. HY1, 75-93.
- Morresi, M.; Zucarelli, G. (1998), "*Relaciones hidráulicas observadas en nueve secciones de cursos santafesinos. Resultados preliminares*". Aceptado para el XVII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Conosur. 3-7 de Agosto de 1998. Santa Fe. Argentina.
- Ponce, V. M.; LI, R.; Simons, D. (1978), "*Aplicability of Kinematic and Difusion Models*", Journal of the Hydraulics Division, 353-360.
- Ponce, V. M. (1979), "*On the clasification of open channel flow regimes*", River Basin Manage Conference, 4th, Proc, Vancouver, BC.
- Ponce, V.M. (1989), *Engineering Hydrology: Principles and Practices*, Prent.- H. Inc., 628 p.
- Ponce, V. M.; Porrás, P. J. (1997), "*Free-Surface Stability Criterion As Affected by Velocity Distribution*", (Discussion) Journal of Hydraulic Engineering. 666-667.
- Tucci, C.E.M. (1993), "*Fundamentos del escurrimiento nao-permanente*". Cap. 10 in: Tucci, C.E.M. (Organiz.): *Hidrología: Ciência e Aplicação*, Coleção ABRH- UFRGS- Brasil, 913 p.

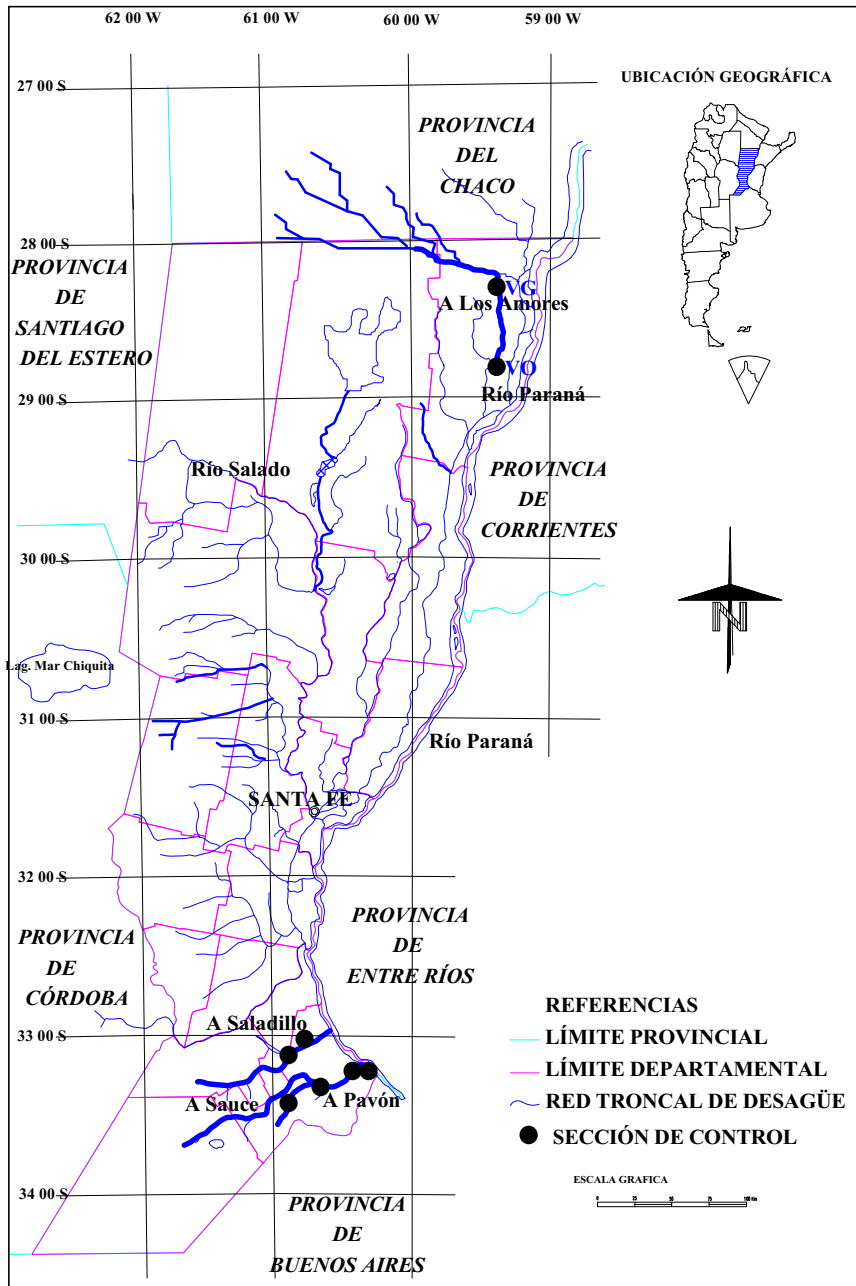


FIGURA 1. Ubicación de los cursos analizados.