

## PROGRAMA PARA LA ESTIMACION DEL CAUDAL CONDUCTIDO EN CANALES PREHISPÁNICOS

**Silvia Mérida<sup>1,2</sup>, William Carrizo<sup>1</sup>, Gerardo Salvioli<sup>1,2</sup> y Oscar Damiani<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>Centro Regional de Agua Subterránea - Instituto Nacional del Agua. José I. de la Roza 125 (Este), Piso 3. Capital. San Juan. Tel: (+54 264 4228595). Email: meridasilvia@yahoo.com.ar

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan. Av. Libertador General San Martín 1109 (Oeste). Capital. San Juan. Tel: (+54 264 4211700 int 272).

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. Av. Ignacio de la Roza y Meglioli. Rivadavia. San Juan.

### RESUMEN

Un análisis exhaustivo de una red o sistema de riego en donde se ponga énfasis en la existencia de técnicas constructivas específicas, forma o geometría de canales, dimensiones y modelo de funcionamiento, entre otros parámetros, será de ayuda a los arqueólogos quienes con sus propias investigaciones sobre elementos culturales, patrones de asentamientos, análisis ecológicos etc. podrán especificar aspectos vinculados al modo de vida, el nivel de organización socio-político y económico de las antiguas sociedades del desierto que habitaron la región andina y áreas aledañas.

Un reto para profesionales y estudiantes con básicos conocimientos de hidráulica, representa la determinación de los probables escurrimientos de las conducciones construidas por estas antiguas culturas, por lo que a modo de facilitar las tareas de campo al querer mapear y clasificar este tipo de obra hidráulica, se elaboró el presente trabajo cuyo objetivo fue el de crear un programa informático que permita ingresar la información relevada (sin necesidad de realizar cálculos previos), tabularla, calcular el caudal y clasificar el régimen de la conducción.

Basado en estudios realizados en el área del Valle de Iglesia, provincia de San Juan, se determinaron las posibles variantes en cuanto a geometría, tipología constructiva y tipos de revestimientos posibles empleados. Para el cargado de los datos se dispuso el ingreso utilizando una planilla de cálculo o aplicación con una secuencia de ventanas con gráficas y aclaraciones que facilitan la comprensión de los datos requeridos y el cargado de forma intuitiva. Finalmente el programa realiza los cálculos y devuelve como resultado el área, perímetro mojado, radio hidráulico, velocidad, caudal y tipo de régimen.

La relevancia de esta primera versión del programa radica en su facilidad de manejo y la posibilidad de adaptación para sistemas de riego fuera del área de estudio.

**Palabras Clave:** rugosidad, riego, conducción, Angualasto

## INTRODUCCION

En nuestro país son escasos los antecedentes existentes en el tema de riego prehispánico en lo referido a la ingeniería hidráulica indígena del dominio andino (Damiani, 2002), a pesar de que existen elementos arqueológicos notables que permiten suponer la existencia de tecnologías con cierto grado de sofisticación y estrategia en las actividades de riego y ocupación de los terrenos para cultivo y asentamiento de pobladores.

El paso del tiempo, la influencia de las condiciones climáticas y/o la intervención del hombre, han deteriorado estas estructuras, en algunos casos al punto de casi desaparecerlas, lo que hace difícil las tareas de relevamiento de campo. Facilitar estas tareas se vuelve una prioridad en el sentido de poder tomar todos los datos necesarios y decidir sobre la certeza de los mismos al momento de la visita al lugar, evitando de esta manera tener que repetir la campaña porque se obviaron datos o porque se obtuvieron datos anómalos que requieren una verificación.

Se planteó entonces realizar una aplicación que permitiera ingresar de forma simplificada los datos de un cauce o canal, los mostrara en forma tabular y efectuara cálculos teniendo en cuenta la forma de la sección y el tipo de revestimiento de la época, entregando resultados tal como la velocidad, caudal y tipo de régimen, permitiendo al profesional, en el momento, mejorar sus mediciones ajustándolas a las condiciones del terreno o replantear el diseño teniendo en cuenta los resultados.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo fue crear un programa o aplicación informática que permita calcular el posible caudal conducido en canales prehispánicos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elaboración del programa o aplicación se empleó un software tipo planilla de cálculo con un entorno de programación integrado que utiliza el lenguaje de programación Visual Basic. El diseño fue planteado con una serie de ventanas encadenadas, que paulatinamente permite la selección o el ingreso de los datos.

### Forma de la sección

Del análisis de los estudios realizados precedentemente sobre el tema (Damiani, 2002) se concluyó que la forma de la sección del canal puede dividirse en dos grupos según su simetría en:

- Asimétricos; siendo el caso, por ejemplo, de aquellas que poseen un talud que está constituido por la roca a la cual cortaron y el otro talud es un terraplén de sedimentos compactados o de bloques de rocas trabadas, asociadas a sedimentos; Figura N°1.
- Simétricos, siendo por ejemplo aquellos que excavaron en un terraplén o directamente sobre el terreno natural sin ningún tratamiento especial, y cuyos taludes son debido a la estabilidad propia de los terrenos, Figura N°2



Figura N°1 Ejemplos de canal asimétrico

Figura

Además, para el ingreso de datos se listó las posibles formas de la sección de los canales indígenas relevadas en el trabajo de Damiani (2002), pudiendo ser las mismas las indicadas en la Figura N°3.

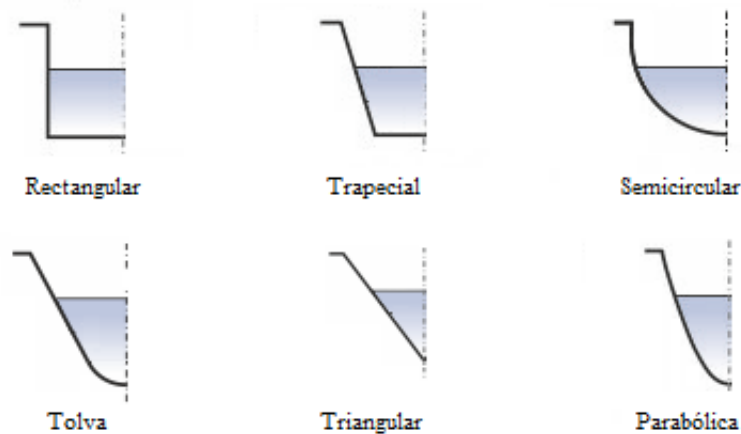


Figura N°3. Formas de la semisección de un canal indígena

### **Material de Construcción del Canal**

Para definir el coeficiente de rugosidad se tuvo en cuenta el tipo de construcción de los canales por parte de la antigua civilización en estudio, esto es: si fueron excavados en terreno natural o en terraplenes construidos especialmente, compactados y que en algunos casos especiales presentaron una estructura endurecida mediante la cocción de arcillas.

Si bien, de los antecedentes obtenidos se labró un listado de posibles materiales, en caso de ser necesario la aplicación permite al usuario el ingreso de este parámetro en forma manual.

### **Pendiente**

Como para la determinación de la pendiente del canal en campo pueden utilizarse diversos métodos, se plantearon cuatro alternativas de ingreso de datos, mostrándose en la Figura N° 4 un esquema con los posibles parámetros a medir.

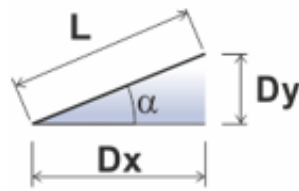


Figura N°4. Parámetros a medir para obtener la pendiente de un canal

La primera alternativa es el ingreso manual de la pendiente en número decimal. La segunda el ángulo de inclinación en grados decimales ( $\alpha$ ), con lo cual la pendiente se estima como la tangente del mismo.

$$S = \tan \alpha \quad (1)$$

La tercera alternativa es, si se cuenta por ejemplo con un plano con curvas de nivel, ingresar la variación de altura ( $Dy$ ) y la distancia horizontal entre los puntos ( $Dx$ ) con lo que la pendiente se calcula como el cociente entre estos valores.

$$S = \frac{Dy}{Dx} \quad (2)$$

La cuarta alternativa es ingresar la variación de altura ( $Dy$ ) y la distancia ( $L$ ); aplicando Pitágoras la pendiente es determinada con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{Dy}{\sqrt{L^2 - Dy^2}} \quad (3)$$

### **Ecuaciones utilizadas para el cálculo del caudal**

Teniendo presente que las conducciones de canales indígenas siempre funcionaba por gravedad, se propuso para el cálculo de la velocidad la ecuación de Chezy-Manning, mostrada a continuación:

$$v = \frac{1}{n} Rh^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Siendo:

$v$ = velocidad del agua[m/s]

$Rh$ = radio hidráulico [m]

$i$ = pendiente del canal o cauce

$n$ = coeficiente de rugosidad de Manning

Para el caudal se emplea la ecuación de continuidad

$$Q = v \times A \quad (5)$$

Siendo:

$Q$ = caudal [ $m^3/s$ ]

$v$ = velocidad del agua [m/s]

$A$ = área de la sección [ $m^2$ ]

El procedimiento seguido en el programa es, finalizado el ingreso de datos, el cálculo del área, perímetro mojado, radio hidráulico y velocidad de cada semisección, independiente si es simétrica o no, determinando luego los valores totales de área y perímetro mojado como la suma de las parciales, la velocidad media como el promedio de la velocidad en cada semisección y el caudal total como el producto del área total y la velocidad media.

El número de Froude (Fr), que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y la fuerza de gravedad que actúan sobre el agua, en canales abiertos nos informa del estado del flujo hidráulico, y se determina con la siguiente expresión:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times D_h}} \quad (6)$$

Siendo:

v = velocidad media de la sección del canal [m/s]

D<sub>h</sub> = Profundidad hidráulica ( A/T ) [m]. Siendo A el área de la sección transversal del flujo y T el ancho de la lámina libre.

g = aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

Según el valor obtenido, el programa colocará una frase indicando el tipo de régimen:

Fr > 1 el régimen del flujo es supercrítico

Fr = 1 el régimen del flujo es crítico

Fr < 1 el régimen del flujo es subcrítico

## RESULTADOS

El resultado final de este trabajo fue la obtención de una aplicación programada en un archivo de planilla de cálculo denominado Aforos CRAS.xlsm.

Una vez abierta la aplicación muestra en la primera hoja denominada “Datos del Canal” un cuadro donde el usuario podrá ingresar los datos generales del proyecto. Esta hoja puede apreciarse en la Figura N°5.

	A	B
1	<b>Datos de canal aforado</b>	<b>Ingresar Aforo</b>
2	<b>Denominación del canal</b>	
3	<b>Proyecto</b>	
4	<b>Responsable de proyecto</b>	
5	<b>Observaciones</b>	
6		

Figura N°5. Hoja de ingreso de datos del proyecto

La hoja cuenta con un botón de comando (“Ingresar Aforo”) que dispara la presentación de la serie de formularios (ventanas) para ingresar los datos del aforo con un simple clic, siendo el primero el que se muestra en la Figura N°6, donde el usuario cargará datos tales como:

- Punto de aforo: identificación del punto, fecha y nombre del operador;
- Georeferencias: sistema de coordenadas, coordenadas x e y, latitud y longitud en grados decimales y altitud.
- Características de la sección en términos de simetría de la forma y revestimiento, estas últimas con un tilde para indicar por defecto un perfil o material de canal simétrico.

Figura N°6. Formulario de ingreso de datos del punto de aforo.

Si se clikea el botón de comando “siguiete”, se abrirá una nueva ventana que pedirá a través de una casilla de selección que se elija uno de los tipos de sección ya establecidos e ingrese los parámetros requeridos acorde a la misma para los posteriores cálculos. Si se quita el tilde para indicar que la sección de canal no es simétrica, se tendrá la posibilidad de indicar los formatos con sus parámetros para cada semisección, derecha e izquierda. Ocurre lo mismo para la indicación de simetría del material de construcción del canal. Esta secuencia se muestra en la Figura N°7.

Figura N°7.Etapas de selección de la forma de la sección

Continuando, en la siguiente ventana se permite ingresar una descripción del material de construcción del canal y el correspondiente coeficiente de rugosidad de Manning. Estos datos se pueden ingresar directamente o seleccionándolos de una tabla. Ver Figura N°8.

Material de construcción del canal:	n:
<input type="radio"/> Arena fina coloidal	0.020
<input type="radio"/> Franco arenoso no coloidal	0.020
<input type="radio"/> Franco limoso no coloidal	0.020
<input type="radio"/> Limos aluviales no coloidales	0.020
<input type="radio"/> Franco consistente normal	0.020
<input type="radio"/> Tierra con curvas sin vegetación.	0.025
<input type="radio"/> Tierra con curvas, pasto y algo de hierba.	0.030
<input type="radio"/> Roca lisa y uniforme.	0.035
<input type="radio"/> Roca angular e irregular	0.040
<input type="radio"/> Ladrillo	0.015
<input type="radio"/> Mampostería	0.025
<input type="radio"/> Cerámico	0.014

Figura N°8.Coefficientes de Manning

La próxima ventana corresponde al ingreso de la pendiente pudiendo, como se explicara anteriormente, cargarla directamente o calcularla según los datos medidos en campo, Figura N°9.

**Pendiente del canal**

**Dx:**

**Dy:**

**L:**

**Ángulo:** 44  
(Ángulo en grados decimales)

**Calcular**

**Pendiente:** 0.965688774807074

Figura N°9. Pendiente del canal

Finalmente se accede a un resumen de los datos ingresados, los cuales se pueden confirmar ejecutando los cálculos y mostrando los resultados obtenidos tales como área, perímetro mojado, radio hidráulico, velocidad, caudal, ancho lamina libre de agua, profundidad hidráulica y número de Froude, Figura N°10.

Figura N°10. Resumen de Datos y Resultados

El programa permite en todo momento volver pasos atrás si se entiende que se ha cometido alguna equivocación en el ingreso; y al final guardar los datos y resultados obtenidos en la hoja denominada “Aforos”, Figura N°11.

	A	B	C	D	E
1	ID_aforo	Fecha	Operador	SRC	X
2					
3					

Figura N°11. Hoja de resumen de los datos y resultados

## CONCLUSIONES

La utilización del programa creado permite:

- El cargado de datos en campo eliminando errores por omisión y la correcta individualización del punto relevado al identificarlo con sus coordenadas.
- Definir tanto la sección como su revestimiento en forma simétrica o asimétrica.
- Mediante una planilla de cálculo mostrar los datos y resultados de todos los puntos que componen un proyecto, permitiendo el análisis correspondiente.
- La observación del número de Froude a lo largo de una conducción facilita detectar entre dos puntos de observación un cambio de régimen con lo que en campaña se puede buscar las posibles causas (cambio de pendiente, caída libre, existencia de un vertedero, estrechamiento o alargamiento de la sección, etc)

Si bien se considera que el programa realizado cumple con las exigencias básicas para poder llevar a cabo un relevamiento de una conducción existente, se espera en una futura versión que



cuenta entre otras cosas con agregado de controles en el proceso tal como delimitación de la pendiente y asegurar la coherencia de los datos ingresados.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Custodio, E. y Llamas, M.** (1983). “Hidrología Subterránea” tomo I. Ediciones Omega. España.
- Damiani, O.** (2002) “Sistemas de riego prehispánico en el valle de Iglesia, San Juan, Argentina”. Universidad Nacional de San Juan, Multequina. ISSN 0327-9375. San Juan, Argentina.
- Damiani, O.** (2011) “Manejo indígena del agua en San Juan: Diseño y funcionamiento del sistema de canales de Zonda”. Universidad Nacional de San Juan, Multequina ISSN 0327-9375, ISSN 1852-7329 on-line. San Juan, Argentina.
- Te Chow, V** (1994) “Hidraulica de canales abiertos”. Editorial McGraw-Hill, Colombia