CORPORACION UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

SOLICITUD DE APROBACION DE PROPUESTA DE TRABAJO DE GRADO

Barranquilla, 26 de febrero de 2015

Ingeniero
PEDRO ROMERO
DIRECTOR DEL PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
Barranquilla

Por medio de la presente estamos sometiendo a su consideración la solicitud para la aprobación del trabajo de grado titulado:

CREACIÓN DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD NORMAL Y CRÍTICA COMO PARÁMETROS DE DISEÑO DE CANALES ABIERTOS

Como requisito parcial para optar el título de Ingeniero Civil en la Facultad de Ingeniería de la Corporación Universidad de la Costa.

Adjuntamos con la presente la información requerida debidamente diligenciada para su estudio.

Cordialmente;

Kevin García Alvarado

KEVIN DAVID GARCIA ALVARADO
C.C 1140864617 de Barranquilla

V.B

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

CORPORACION UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

ESPACIO RESERVADO PARA LA FACULTAD

Línea de Investigación en la cual se ubica el trabajo:

Programa Clave: Subprograma Clave:

Solicitud aprobada: ☐ ☐ Fecha:

VoBo:

DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA
Ing. FAIRUZ OSPINO VALDIRIZ

DIRECTOR PROGRAMA INGENIERIA CIVIL
Ing. PEDRO ROMERO LEIRO

Barranquilla, 26 de Febrero de 2015

Estudiante:

GARCIA ALVARADO KEVIN DAVID

Reciba un caluroso saludo.

Les informo que en sesión de Comité curricular realizado el 26 de febrero del 2015 se estudió el diseño y la propuesta de su investigación titulada "Desarrollo de una aplicación informática para la obtención de parámetros de diseño de canales abiertos".
Objetivo general: "Desarrollar una herramienta asistida por computadora (programa informático) para el cálculo de parámetros de diseños de canales abiertos fundamentado en el uso de las ciencias básicas y computacionales y la hidráulica de canales abiertos"
Grupo de Investigación: GINICUC
Línea de investigación: Hidrometeorologia y aprovechamiento de los recursos hídricos de la región Caribe Colombia.

Los miembros del comité curricular:

Al considerar:

1. Que el estudiante está matriculado en la institución y ha cursado y aprobado como mínimo el 70% de los créditos académicos establecidos en su plan de estudio.
2. Que el documento cumple con la Norma NTC 1486 de Icontec
3. Que en la propuesta se especifica el grupo de Investigación al que se vinculará el trabajo de grado y la línea de investigación en la que se enmarca.
4. Que la propuesta presenta un cronograma y un presupuesto que garantiza el cumplimiento de los términos establecidos y la disponibilidad de los recursos de los estudiantes para la realización de la investigación.
5. Que la calidad de la propuesta, la relevancia científica, social y pertinencia se desarrollan dentro de las líneas de investigación Institucional.

Procedieron a:

Emitir concepto favorable para la aprobación de la propuesta de su trabajo de grado. De igual forma, los miembros del comité curricular establecieron que en cumplimiento del acuerdo No 237 del 28 de septiembre del 2011 del Consejo Directivo, los estudiantes están obligados a:

1. Realizar y entregar el trabajo de grado, como equipo de trabajo, tal como fue presentada la propuesta inicial.
2. Desarrollar el anteproyecto en línea bajo la Plataforma INDEX TG Virtual
3. Finalizar el anteproyecto en un tiempo máximo de seis (6) meses y máximo un (1) año calendario para la realización total de su trabajo de grado, tiempos contados a partir de la fecha de entrega de este comunicado.
4. Presentar un (1) ensayo con base en el trabajo de grado. Este ensayo recibirá asesoría por parte del asesor para su elaboración.
5. Cumplir las demás disposiciones establecidas en el acuerdo No 237 del 28 de septiembre del 2011 emanado por el Consejo Directivo.

Para la realización de este proyecto se asignó como asesor a los ingenieros: **CAMILO OSORIO GARCIA** asesor principal y Matem. **JUAN ROCHA FLOREZ** como co - asesor quien aprobaran el anteproyecto enviándole un

informe al Director de Programa. De esta manera se oficializará la iniciación de la etapa de la ejecución del Proyecto. Los asesores deberán enviar al Director de Programa un informe final donde señalará que ha hecho sus 40 sesiones de trabajo con el estudiante.

Deseándoles éxito en todas las actividades conducentes a la entrega satisfactoria de su trabajo de grado.

Atte.

Pedro Romero Leiro
Director de Programa de Ingeniería Civil

Copia:

Consejo de Facultad
Líder del grupo de investigación GINICUC
Asesores de trabajo de grado

Recibe:

Kevin David García Alvarado

GARCIA ALVARADO KEVIN DAVID

UNIVERSIDAD DE LA COSTA
1970

CORPORACION UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA XXX

APROBACION DE PROYECTO POR PARTE DE ASESORES

Barranquilla 29, de junio de 2016

Ingeniero
PEDRO ROMERO LEIRO
DIRECTOR PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
Ciudad

Los abajo firmantes asesores del trabajo de grado titulado:

Kevin David García Alvarado

KEVIN DAVID GARCIA ALVARADO

Certificamos que este ha sido evaluado, lográndose los alcances establecidos en la propuesta.

Cordialmente.

ASESORES TECNICOS Y METODOLÓGICO

GERALD MESTRA RODRIGUEZ

ACTA DE SUSTENTACIÓN Y APROBACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

El día 29 de julio de 2016 se da aprobación al trabajo de grado evaluado por los jurados Ingenieros Civil, M.Sc Armando Fontalvo Lascano Docente Investigador de la Universidad de la Costa CUC y M.Sc Camilo Osorio García.
Presentado por el estudiante relacionado a continuación:

Trabajo de grado	Estudiantes	Identificación	Tutores
CREACIÓN DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD NORMAL Y CRÍTICA COMO PARÁMETROS DE DISEÑO DE CANALES ABIERTOS	**KEVIN DAVID GARCIA ALVARADO**	1140864617	GERALD MESTRA RODRIGUEZ

Certificamos que el **PROYECTO** ha sido evaluado, y ha obtenido la calificación de:

__4.5__ y ha cumplido técnica y metodológicamente, teniendo en cuenta las siguientes escalas:

Meritoria _____

Aprobada ___x____

Reprobada _____

Se firma el presente en la ciudad de Barranquilla, a los 29 días del mes Abril de 2016.

Atentamente;

ARMANDO FONTALVO LASCANO
Jurado 1

CAMILO OSORIO GARCIA
Jurado 2

CREACIÓN DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD NORMAL Y CRÍTICA COMO PARÁMETROS DE DISEÑO DE CANALES ABIERTOS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

KEVIN DAVID GARCIA ALVARADO, 1140864617

ASESOR

GERALD LEONIDAS MESTRA RODRIGUEZ

INGENIERIA CIVIL

UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC

INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

BARRANQUILLA

2016

A Dios le doy gracias por haberme dado la sabiduría y la motivación para terminar este proyecto. Él ha sido el autor de todo lo bueno en mi vida, y sin duda alguna, este trabajo de grado es una de sus bondades.

A mis padres Jaime García y Monika Alvarado. Gracias por amarme, apoyarme y sustentarme hasta terminar mi pregrado en ingeniería civil. Su apoyo ha sido trascendental.

El apoyo y dirección de mi profesor de hidráulica y asesor de proyecto de grado. Su guía en este proceso ha sido valiosa.

Kevin García Alvarado

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 8
2 PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA 9
3 JUSTIFICACIÓN 11
4 OBJETIVOS 13
GENERAL 13
ESPECÍFICOS 13
5 MARCO TEÓRICO 14
CLASIFICACIÓN DEL FLUJO 14
ESTADO DEL FLUJO 16
ELEMENTOS GEOMETRICOS DE UN CANAL 18
FLUJO NORMAL 21
5.1.1 Determinación de la velocidad en un flujo uniforme 22
5.1.2 Ecuación de Chézy 22
5.1.3 Fórmula de Chézy con el coeficiente de Manning 23
ECUACIÓN PARA FLUJO UNIFORME 25
CALCULO DE LA PROFUNDIDAD NORMAL EN CANALES UNIFORMES 26
5.1.4 Canal Triangular 26
5.1.5 Canal Rectangular 27
5.1.6 Canal Trapezoidal 31
5.1.7 Canal Circular 32
FLUJO CRÍTICO 34
CALCULO DE LA PROFUNDIDAD CRÍTICA EN CANALES UNIFORMES 35
5.1.8 Canal Rectangular 36
5.1.9 Canal Triangular 37
5.1.10 Canal Trapezoidal 38
5.1.11 Canal Circular 42
ENERGÍA ESPECÍFICA 44
5.1.12 Cálculo de la profundidad en cambio de sección en planta en canales rectangulares 46
5.1.13 Método Cardano 48
6 ESTADO DEL ARTE 52
7 DISEÑO METODOLOGICO 55
TIPO DE INVESTIGACIÓN 55
METODO DE ESTUDIO 55
HERRAMIENTA INFORMATICA 55
8 RECURSOS DISPONIBLES 57
9 Referencias 58
ANEXO 1. COEFICIENTES PARA LA ECUACIÓN DE MANNING 59
ANEXO 2. DESARROLLO DEL ALGORITMO 64
ANEXO 3. PROGRAMA EN VBA 75

Lista de Tablas

Ilustración 1 Clasificación del Flujo (Fuente: Elaboración Propia) 16
Ilustración 2 Geometría de un canal circular.....32
Ilustración 3 Principio de energía para flujo uniforme. Fuente: (Akan, 2006, pág. 29) 44
Ilustración 4 Cabeza de energía total, cabeza de energía hidráulica y energía específica. Fuente: (Akan, 2006, pág. 30) 46
Ilustración 5. Cambio de sección en planta en canales rectangulares.....46

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1 Número de Reynolds.....17
Ecuación 2 Número de Froude.....18
Ecuación 3 Expresión de Chezy para la velocidad.....22
Ecuación 4 Expresión de Manning para la velocidad.....24
Ecuación 5 Velocidad para el flujo uniforme.....25
Ecuación 6 Caudal para el flujo uniforme.....25
Ecuación 7 Profundidad normal para canales triangulares.....27
Ecuación 8 Expresión del método de Newton-Raphson, en y.....28
Ecuación 9 Expresión general para la profundidad normal en flujo normal con el método de Newton-Raphson.....30
Ecuación 10 Profundidad normal en canales de sección rectangular, con Newton-Raphson.....31
Ecuación 11 Profundidad normal en canales de sección rectangular, con Newton-Raphson.....31
Ecuación 12 Profundidad en un canal circular según su geométrica.....33
Ecuación 13 Profundidad normal para sección circular derivando en $\mathbf{y}$, con Newton-Raphson.....34
Ecuación 14 Profundidad normal para sección circular derivando en $\boldsymbol{\theta}$, con Newton-Raphson.....34
Ecuación 15 Número de Froude, para un canal abierto.....35
Ecuación 16 Profundidad crítica en un canal rectangular.....37
Ecuación 17 Profundidad crítica en un canal triangular.....38
Ecuación 18 Expresión general para la profundidad crítica en flujo normal con el método de Newton-Raphson.....41
Ecuación 19 Profundidad crítica para sección trapezoidall, con Newton-Raphson42
Ecuación 20 Profundidad crítica para sección circular derivando en $\mathbf{y}$, con Newton-Raphson.....43
Ecuación 21 Profundidad crítica para sección circular derivando en θ, con Newton-Raphson.....43
Ecuación 22 Energía Específica.....45
Ecuación 23 Ecuación cúbica para la profundidad de flujo en cambio de sección en plante en canales rectangulares.....48
Ecuación 24 Parámetros de la Formula de Cardano.....49
Ecuación 25 Formula de Cardano.....49
Ecuación 26 Formula de Cardano según solución trigonométrica.....50
Ecuación 27 Parámetros de la ecuación cúbica de la energía específica, con el M. Cardano.....50

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Clasificación del Flujo (Fuente: Elaboración Propia) 16
Ilustración 2 Geometría de un canal circular.....32
Ilustración 3 Principio de energía para flujo uniforme. Fuente: (Akan, 2006, pág. 29) 44
Ilustración 4 Cabeza de energía total, cabeza de energía hidráulica y energía específica. Fuente: (Akan, 2006, pág. 30) 46
Ilustración 5. Cambio de sección en planta en canales rectangulares.....46

1 INTRODUCCIÓN

El auge de los avances tecnológicos es reciente en comparación con los inicios de la ingeniería. Antes para el análisis del diseño de un proyecto, era necesario varias horas de complejos cálculos matemáticos, extensas verificaciones, tablas y nomogramas. Hoy en día, con el uso de la computadora, es posible agilizar casi que todos los procesos que el ser humano efectúa, incluyendo el diseño y verificación en la ingeniería.

Por ello, el uso de la tecnología dentro del campo del diseño en la ingeniería cada vez es más necesario y hace que está progrese velozmente en comparación al pasado. Así, la tarea del ingeniero se facilita y al mismo tiempo se vuelve más crítica. Ya no le corresponderá realizar cálculos tan tediosos y extensos, sino verificar que los resultados sean coherentes de acuerdo a las necesidades del proyecto y que éstos estén dentro de los parámetros comúnmente aceptados en la ingeniería y la academia.

En base lo anterior, se requieren herramientas para facilitar y hacer más eficiente el desarrollo de los conocimientos adquiridos a lo largo del pregrado. Con el avance de la tecnología, esto es posible, ejecutando procesos exactos y precisos. Así, surgió la idea de sistematizar una sección de la materia teórica de hidráulica, en el área de diseño de canales abiertos, para hacer un proceso de acompañamiento al que se realiza en clase.

Para ello, un software o programa informático se ideó para ser usado en la academia, que se adaptará a las necesidades de enseñanza y será auxiliar al diseño de canales abiertos. Así se corroborará el trabajo manual con los resultados del programa, con la posibilidad de mostrar de manera breve y esquemática la obtención de parámetros de diseño de un canal abierto.

2 PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA

En el proceso de aprendizaje, las entidades educativas planean y diseñan estrategias para que sus estudiantes adquieran las competencias en cada área de conocimiento. Hoy en día, los espacios destinados para ellos son las aulas, y con el auge de la tecnología, se hace necesario usar más herramientas tecnológicas, para lograr tal fin.

Dentro de las primeras etapas para el diseño de canales abiertos, se hace necesario el uso de procesos matemáticos repetitivos, a tablas y nomogramas que tienen correlaciones entre varias variables (éstos dos últimos, en algunos casos se usan cuando los modelos matemáticos son tan complejos, que su realización a mano no es práctica). En el primer caso el proceso se vuelve tedioso, extenso, en el segundo caso, el proceso queda sujeto a percepciones subjetivas del diseñador. De cualquier modo, siempre se corre el riesgo de que se generen inexactitudes y poca precisión en los resultados, debido a factores típicos humanos.

Otro factor dentro del diseño de canales abiertos que juega un papel preponderante es el tiempo. El hecho de que los procesos matemáticos, sean repetitivos y en muchos casos se deba acudir a tablas y nomogramas de correlaciones, en primer lugar es desgastante para quien lo hace y luego, consume bastante de este recurso tan valioso, que se vuelve valioso y tiene consecuencias económicas directas. Una de las funciones del diseñador es analizar y considerar si los resultados obtenidos del proceso son coherentes, responden de manera adecuada a la necesidad del proyecto y están en norma y de acuerdo con las comunidades académicas y profesionales. Todo este proceso conduce a cansancio, fatiga y puede influir en el criterio del diseñador de manera que no convenga al proyecto, volviéndose menos eficiente.

Teniendo en cuenta lo anterior, se desearía obtener resultados en menor tiempo, con mayor exactitud y precisión, y ya que hoy en día la educación va de la mano

con la tecnología, se plantea el proyecto de crear un software o programa informático en el área de la hidráulica teórica para ser de asistencia al diseño de canales abiertos.

Se desea calcular parámetros de diseño de canales abiertos, y el uso de la hidráulica y las ciencias básicas, es fundamental. Los modelos matemáticos, físicos y de carácter hidráulico que describen el comportamiento del flujo del agua, muchas veces requieren procesos iterativos que pueden ser automatizados mediante el uso de herramientas informáticas.

En este sentido ¿Cómo desarrollar una herramienta informática, que mediante la profundización de las ciencias básicas y modelos hidráulicos, permita la obtención de parámetros de diseño de canales abiertos de manera rápida, en la materia de hidráulica teórica de la Universidad de la Costa?

3 JUSTIFICACIÓN

La idea del programa informático surgió debido a que en la materia teórica de hidráulica, para la obtención de parámetros en el diseño de canales abiertos, se evidenciaba la necesidad de usar un método que optimizara el proceso, reduciendo los tiempos y aumentando la exactitud y precisión.

El desarrollo de la hidráulica ha sido posible en parte, gracias al desarrollo de otras disciplinas. El cálculo, las matemáticas, la física y los métodos numéricos han sido vitales para poder explicar los fenómenos físicos que describen el flujo del agua en los canales abiertos. El ingeniero se vale de ellas – y algunas otras – para crear soluciones innovadoras, que permitan el desarrollo y crecimiento en la sociedad.

Sin duda alguna el desarrollo de este proyecto permitirá el perfeccionamiento y la profundización de las ciencias básicas para ser aplicadas al diseño de canales abiertos. Además, podrá ser utilizada como una herramienta didáctica en clase, donde los estudiantes de hidráulica de canales abiertos puedan poner en práctica los conocimientos adquiridos, ya sea comparando resultados, obteniendo parámetros de diseño o verificando condiciones existentes de canales abiertos.

Con respecto a la obtención de parámetros de diseño de canales abiertos, la hidráulica ofrece una serie de modelos matemáticos que permiten estimar las características del flujo. Se necesita recurrir a procesos iterativos, pudiendo llegar a ser laboriosa su solución si se realiza de forma manual. El uso de métodos y programación numérica es necesaria. Las computadoras ofrecen una solución veloz a estos problemas. Con la puesta en marcha de este proyecto, se puede automatizar estos procesos mediante el uso de herramientas de sistemas dependientes de lenguajes de programación. Estas tareas pueden realizarse de manera ágil y rápida, disminuyendo significativamente los tiempos de cálculo y la eficiencia en el análisis de resultados.

La creación de rutinas permite obtener resultados más consistentes y exactos, obviando aquellas tareas que de otra forma serían tediosas, facilitando la labor al ingeniero en la obtención de los parámetros necesarios para el diseño de canales abiertos.

El software estará en la capacidad de recibir datos para el análisis y calcular según sea el caso, profundidad normal, crítica y la profundidad en cambios de sección en planta de canales rectangulares.

4 OBJETIVOS

GENERAL

Desarrollar una herramienta asistida por computadora (un programa informático) para el cálculo de parámetros de diseño de canales abiertos fundamentado en el uso de las ciencias básicas, computacionales y la hidráulica de canales abiertos.

ESPECÍFICOS

- Delimitar modelos hidráulicos necesarios para el programa informático
- Desarrollar los modelos matemáticos a partir del modelo hidráulico
- Crear los códigos en el lenguaje apropiado para el funcionamiento del software
- Crear una interfaz para manipular fácilmente el software y obtener los parámetros resultados de la modelación hidráulica.
- Proveer a los estudiantes de ingeniería civil una herramienta para su desarrollo académico y profesional

5 MARCO TEÓRICO

Los canales abiertos son estructuras de transporte, naturales o artificiales, normalmente abiertos en la parte superior. Pueden ser ríos, arroyos o riachuelos y estuarios. Una característica importante del flujo de canales abiertos es que tienen una superficie libre a presión atmosférica. Los canales abiertos pueden encontrarse en conductos cerrados, como tuberías y alcantarillas, siempre y cuando en el conducto este fluyendo parcialmente lleno. Por ejemplo, los alcantarillados sanitarios y pluviales tienen una superficie libre, y por ello se clasifican como flujo de canal abierto. (Akan, 2006, pág. 1)

El flujo de agua en un conducto puede ser flujo en canal abierto o flujo en tubería. Estas dos clases de flujo son similares en muchos aspectos pero se diferencian en un aspecto importante. El flujo en canal abierto debe tener una superficie libre, en tanto que el flujo en tubería no la tiene, debido a que en este caso el agua debe llenar completamente el conducto. Una superficie libre está sometida a la presión atmosférica. El flujo en tubería al estar confinado en un conducto cerrado, no está sometido a presión atmosférica de manera directa, sino sólo a la presión hidráulica. (Chow, 1994, pág. 3)

CLASIFICACIÓN DEL FLUJO

El flujo de canales abiertos se clasifica de varias formas. La clasificación se hace teniendo en cuenta los parámetros hidráulicos (velocidad, profundidad de flujo, caudal), la siguiente se hace de acuerdo al cambio de profundidad del flujo con respecto al tiempo y al espacio.

Según el criterio de espacio:

- **Flujo uniforme:** la profundidad del flujo es la misma en cada sección del canal. El flujo de líquidos en canales de sección constante y gran longitud se considera uniforme.

- **Flujo variado:** la profundidad del flujo cambia a lo largo del canal. Se presenta en controles de canales, cambios de pendiente, compuertas, presas.

Según el criterio del tiempo:

- **Flujo permanente:** la profundidad del flujo no cambia con respecto a un intervalo de tiempo. Muchas situaciones pertenecen a este tipo de flujo: transporte de líquidos bajo altura de carga constante.
- **Flujo no permanente:** la profundidad del flujo cambia con el tiempo. Puede ser uniforme o variado.

Se puede presentar las siguientes combinaciones, cuando la profundidad cambia o no de acuerdo con el tiempo y/o el espacio.

- **Flujo Uniforme Permanente:** la profundidad se mantiene constante en el espacio y tiempo. Es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos.
- **Flujo Uniforme No Permanente:** se clasificaría un flujo dentro de esta categoría si la profundidad del flujo se mantiene constante en una sección del canal pero no en el tiempo. Tendría que suceder que la superficie de líquido cambie mientras permanece constante al fondo del canal. Es casi imposible encontrar esto en la práctica, se considera raro. Para que suceda, el cambio en el tiempo tendría que suceder a lo largo de todo el canal para así permanecer constante la profundidad.
- **Flujo variado permanente:** la profundidad cambia con respecto al espacio pero no al tiempo. Es decir, la profundidad cambia a lo largo del canal. Puede darse de manera **gradual** o **rápida**. Si la profundidad cambia de manera gradual o rápidamente en distancias relativamente cortas. En la práctica, un flujo rápidamente variado se conoce con el

nombre de fenómeno local, por ejemplo, el resalto hidráulico y la caída hidráulica.

- **Flujo variado no permanente:** la profundidad cambia con respecto al espacio y al tiempo. Este tipo de flujo no es muy recurrente y prácticamente no existe. Las olas y las mareas en flujo libre son ejemplos de este tipo de flujo.

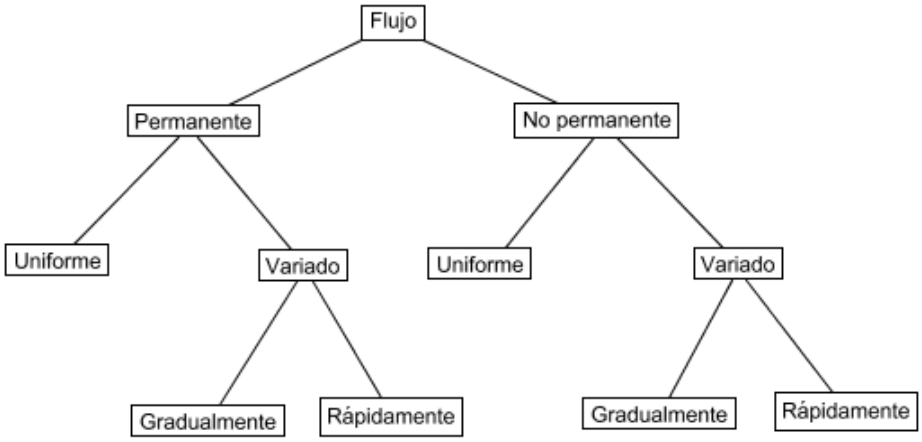


Ilustración 1 Clasificación del Flujo (Fuente: Elaboración Propia)

ESTADO DEL FLUJO

El estado o comportamiento del flujo en canales abiertos está condicionado por la gravedad y viscosidad con respecto a las fuerzas inerciales.

- **Efecto de la viscosidad**

  La relación fuerzas viscosas e inerciales se expresan en un término adimensional llamado número de Reynold (Re). Se expresa de la siguiente manera:

$$R_e = \frac{VL}{v} = \frac{VL\rho}{\mu}$$

Ecuación 1 Número de Reynolds

Donde

V = Velocidad media, m/s

L = Longitud característica (radio hidráulico del conducto), m

v = Viscosidad cinemática del fluido, m^2/seg

ρ = Densidad del fluido, Kg/m^3

μ = Viscosidad dinámica, $Kg/m \cdot seg$

Dependiendo al valor que tome el número de Reynolds, el estado del flujo puede ser:

- Laminar: las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación con las fuerzas inerciales. Así, la viscosidad es preponderante para determinar el comportamiento del fluido. Para $R_e < 500$, las partículas se mueven en trayectorias paralelas, suaves y bien definidas.
- Transicional o Mixto: es el estado que se encuentra entre el flujo laminar y turbulento.
- Turbulento: las fuerzas viscosas son débiles en comparación a las fuerzas inerciales. Las partículas de agua se mueven en trayectorias irregulares, no son paralelas, ni suaves ni bien definidas, aunque en conjunto, representan un movimiento hacia adelante. Corresponde a un valor del número de Reynolds muy grande, se ha comprobado cuando $R_e > 12500$

Es importante recalcar que los límites entre un estado del flujo y otro no son precisos. En condiciones de laboratorio, el flujo laminar para el número de

Reynolds es menor a 500. De cualquier modo, el la mayoría de los canales abiertos, el flujo es turbulento

- **Efecto de la gravedad:**

  La relación entre las fuerzas inerciales y las gravitacionales se expresan en un término adimensional llamado número de Froude, así:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

Ecuación 2 Número de Froude

Donde

V = Velocidad media del flujo, m/s

g = Aceleración de la gravedad, m/seg^2

L = Longitud característica, m

La longitud característica L, en canales abiertos se hace igual a la profundidad hidráulica D. Dependiendo del valor que tome el número de Froude, el estado del flujo puede ser:

- Subcrítico: $F_r < 1$
- Critico: $F_r = 1$
- Supercrítico: $F_r > 1$

El comportamiento hidráulico del flujo de un canal abierto, varía significativamente dependiendo si el flujo es crítico, subcrítico o supercrítico.

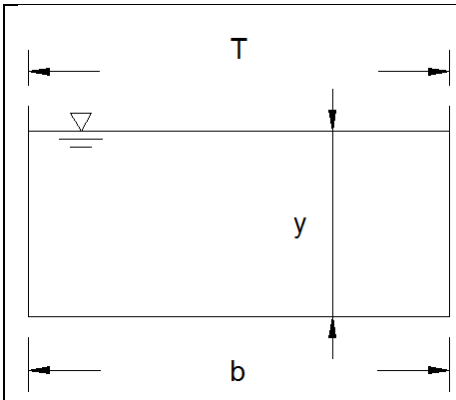
ELEMENTOS GEOMETRICOS DE UN CANAL

- **Canal prismático:** aquel construido con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante.
- **Sección del canal:** sección transversal de la canal, tomada en forma perpendicular a la dirección del flujo.

- **Elementos geométricos:** propiedades de una sección del canal que pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad del flujo. Son importantes y se usan en el cálculo del flujo.

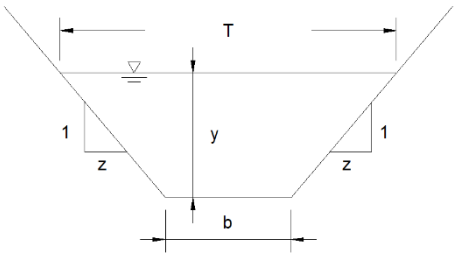
Profundidad de flujo	y	Distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre
Profundidad de flujo de la sección	d	Profundidad del flujo perpendicular a la dirección de éste, o la altura de la sección del canal que contiene el agua. La relación entre d y y es $d = y\cos(\theta)$. Para la mayoría de canales naturales y artificiales, $\cos(\theta) = 1$. Entonces $y = d$
Ancho superficial	T	Ancho de la sección del canal en la superficie libre.
Área mojada	A	Área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección del flujo.
Perímetro mojado	P	Longitud de la línea de intersección de la superficie del canal con el agua.
Radio hidráulico	R	Relación entre el área mojada con el perímetro mojado. $R = \frac{A}{P}$
Profundidad hidráulica	D	Relación entre el área mojada y el ancho de superficie. $R = \frac{A}{T}$
Factor de sección para el cálculo del flujo crítico	Z	Es el producto del área mojada y la raíz cuadrada de la profundidad hidráulica, $Z = A\sqrt{D} = A\sqrt{\frac{A}{T}}$

Tabla 1 Elementos geométricos de un canal. Fuente: (Akan, 2006, pág. 1)



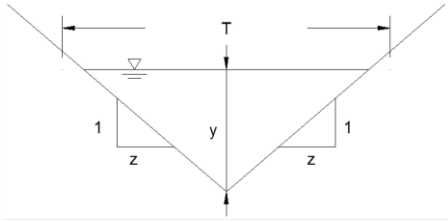
Área	A	by
Perímetro mojado	P	$b + 2y$
Radio hidráulico	$R = \frac{A}{P}$	$\frac{by}{b + 2y}$
Ancho superficial	T	b
Profundidad hidráulica	$D = \frac{A}{T}$	y
Factor de sección	$Z = A\sqrt{D}$	$by^{\frac{3}{5}}$

Tabla 2 Elementos geométricos de un canal rectangular. Fuente: (Akan, 2006, pág. 2)



Área	A	$(b + zy)y$
Perímetro mojado	P	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$
Radio hidráulico	$R = \frac{A}{P}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$
Ancho superficial	T	$b + 2zy$
Profundidad hidráulica	$D = \frac{A}{T}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2zy}$
Factor de sección	$Z = A\sqrt{D}$	$\frac{((b+zy)y)^{\frac{3}{2}}}{b + 2zy}$

Tabla 3 Elementos geométricos para un canal trapezoidal. Fuente: (Akan, 2006, pág. 2)



Área	A	zy^2
Perímetro mojado	P	$2y\sqrt{1 + z^2}$
Radio hidráulico	$R = \frac{A}{P}$	$\frac{zy}{2y\sqrt{1 + z^2}}$
Ancho superficial	T	$2zy$
Profundidad hidráulica	$D = \frac{A}{T}$	$\frac{1}{2}y$
Factor de sección	$Z = A\sqrt{D}$	$\frac{zy^{\frac{3}{2}}}{2^{\frac{1}{2}}}$

Tabla 4 Elementos geométricos para un canal triangular. Fuente: (Akan, 2006, pág. 2)

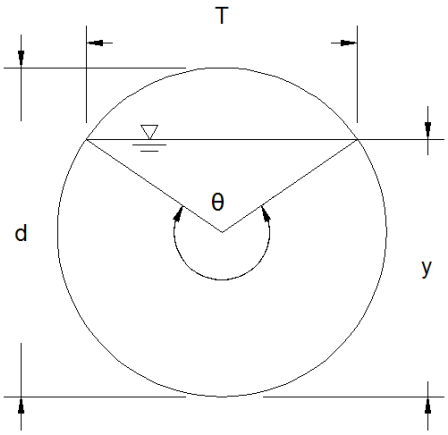
	Área	A	$\frac{1}{8}(\theta - \sin\theta)d^2$
	Perímetro mojado	P	$\left(\frac{1}{2}\theta\right)d$
	Radio hidráulico	$R = \frac{A}{P}$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}\right)d$
	Ancho superficial	T	$\left(\sin\left(\frac{1}{2}\theta\right)\right)d = 2\sqrt{y(d-y)}$
	Profundidad hidráulica	$D = \frac{A}{T}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \sin\theta}{\sin\frac{1}{2}\theta}\right)d$
	Factor de sección	$Z = A\sqrt{D}$	$\frac{1}{8^{\frac{3}{2}}}\frac{(\theta - \sin\theta)^{\frac{1}{2}}}{\left(\sin\frac{1}{2}\theta\right)^{\frac{1}{2}}}d^{\frac{5}{2}}$

Tabla 5 Elementos geométricos para un canal circular. Fuente: (Akan, 2006, pág. 2)

FLUJO NORMAL

Principales características del flujo uniforme:

1) La profundidad, el área mojada, la velocidad y el caudal en cada sección del canal son constantes
2) La línea de energía, la superficie del agua y el fondo del canal son paralelos, es decir, sus pendientes son todas iguales.

$$S_f = S_w = S_o = S$$

Para propósitos prácticos, se considera que el flujo posee una velocidad media constante. Es decir, el flujo posee una velocidad constante en cada punto de la sección del canal dentro del tramo del flujo uniforme. De igual manera, se considera que el flujo uniforme es sólo permanente, pues el flujo uniforme no permanente prácticamente no existe. Y aunque el flujo uniforme permanente es raro en condiciones naturales, se asume esa condición para el cálculo de flujo en corriente natural, obteniendo resultados aproximados que ofrecen soluciones prácticas y satisfactorias. Se debe también tener en cuenta que el flujo uniforme no puede

ocurrir a velocidades altas, pues cuando lo haga, atrapará aire y se volverá muy inestable.

5.1.1 Determinación de la velocidad en un flujo uniforme

Para los cálculos hidráulicos la velocidad media de un flujo uniforme turbulento en canales abiertos por lo general se expresa aproximadamente por la llamada ecuación de flujo uniforme. La mayor parte de las ecuaciones prácticas de flujo uniforme pueden expresarse de la siguiente manera:

$$V = CR^x S^y$$

- V = Velocidad media, en pies/s
- C = Factor de resistencia al flujo, que varía con la velocidad media, el radio hidráulico, la rugosidad del canal, la viscosidad y muchos otros factores.
- R = Radio hidráulico, en pies
- S = Pendiente de energía
- x, y = Exponentes

Para propósitos prácticos, puede suponerse que el flujo en un canal natural es uniforme bajo condiciones normales, es decir, no existen flujos de crecientes o flujos notablemente variados por irregularidades en el canal. Aun así, al aplicar una ecuación de flujo uniforme a una corriente natural, se entiende que el resultado es muy aproximado, por eso se ha desarrollado y publicado una gran cantidades de ecuaciones prácticas de flujo uniforme. Las ecuaciones mejor conocidas y más ampliamente usadas son las ecuaciones de Chézy y de Manning.

5.1.2 Ecuación de Chézy

$$V = CR^{\frac{1}{2}} S^{\frac{1}{2}} = C\sqrt{RS}$$

Ecuación 3 Expresión de Chezy para la velocidad

V = Velocidad media, en pies/s

C = Factor de resistencia al flujo, conocido como C de Chézy. Tiene dimensiones de $(\text{longitud})^{1/2}/\text{tiempo}$

R = Radio hidráulico, en pies

S = Pendiente de energía

Si se analizan las unidades en la fórmula, se deduce fácilmente que al coeficiente C le corresponden las unidades de $\frac{(\text{pies})^{1/2}}{\text{seg}}$

Esta ecuación la propuso el ingeniero Antonie Chézy en el año 1769, basado en dos fundamentos:

- El principio de Brahms propuesto en el año 1754 establece que "la componente efectiva de la fuerza de gravedad causada por el flujo debe ser igual a la fuerza total de la resistencia"
- "La fuerza que resiste el flujo por unidad de área del conducto es proporcional al cuadrado de la velocidad"

A pesar de que la ecuación para flujos turbulentos en canales abiertos, introducida por Chézy en 1769, parece ser simple, tiene un uso limitado en la práctica porque el coeficiente de Chézy depende de las condiciones de flujo tanto como de la rugosidad del canal, y éstas son difíciles de evaluar.

5.1.3 Fórmula de Chézy con el coeficiente de Manning

El coeficiente de Manning está definido como:

$$C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{N}$$

La ecuación de Chézy: $V = C\sqrt{RS} = CR^{\frac{1}{2}}S^{\frac{1}{2}}$

Reemplazando:

$$V = \left(\frac{R^{\frac{1}{6}}}{N}\right)\sqrt{RS}$$

$$V = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{N} \cdot R^{\frac{1}{2}} S^{\frac{1}{2}}$$

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}}{N}$$

Ecuación 4 Expresión de Manning para la velocidad

La fórmula anterior tiene como unidades:

V = En m/s

R = Radio hidráulico, m

S = Pendiente del conducto, m/m

N = Coeficiente de Manning, adimensional

Robert Manning presentó la fórmula en 1889, por lo cual cabe resaltar que únicamente en su aplicación se tienen en cuenta las condiciones de la superficie y el radio hidráulico; sin embargo, es la más utilizada en flujo libre y uniforme con buenos resultados, además de contar con la ventaja de un alto número de datos en cuanto al tipo de superficie se refiere. En el caso del coeficiente N de Manning, algunos autores suponen un coeficiente N adimensional; por consiguiente, su aplicación es igual en cualquier sistema de unidades.

En el sistema de unidades inglesas está definida como:

$$V = \frac{1.49}{N} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

V = En $pies/seg$

R = Radio hidráulico, $pies$

S = Pendiente del conducto, adimensional

N = Coeficiente de Manning, adimensional

En el Anexo 1 se muestran los coeficientes para la ecuación de Manning

ECUACIÓN PARA FLUJO UNIFORME

La fórmula de Manning es la más común para la ecuación de resistencia de flujo para el cálculo de flujo de canales abiertos. El flujo uniforme hace referencia al flujo permanente de canales abiertos en los que la profundidad del flujo, el área y la velocidad permanecen constantes a lo largo de cada sección del canal.

$$V = \frac{k_n}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 5 Velocidad para el flujo uniforme

O

$$Q = \frac{k_n}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 6 Caudal para el flujo uniforme

Donde $k_n = 1.0 \frac{m^{\frac{1}{3}}}{seg} = 1.49 \frac{pies^{\frac{1}{3}}}{seg}$, y n es el coeficiente de Manning. En la práctica, dado un canal, el coeficiente de Manning se asume constante con las condiciones de flujo.

Se pueden encontrar dos tipos de problemas en el análisis de canales bajo condiciones normales de flujo. El primero involucra el cálculo de la velocidad y caudal para el flujo normal, conociendo la profundidad normal y las características del canal. Este tipo de problemas es simple de resolver. En primer lugar se calcula el área y el radio hidráulico usando las expresiones de los elementos geométricos de las tablas 2 a la 5, y se determina la velocidad y el caudal de las ecuaciones 5 y 6. El segundo tipo de problema involucra la determinación de la profundidad del flujo normal conociendo el caudal y las características del canal. Este segundo tipo de

problema es el más difícil de resolver, porque requiere procedimientos de prueba y error.

CALCULO DE LA PROFUNDIDAD NORMAL EN CANALES UNIFORMES

La profundidad normal es la profundidad del flujo que satisface las ecuaciones 5 y 6. La profundidad normal se denota por y_n**.** Generalmente se necesita calcular la profundidad normal dado el caudal y las propiedades del canal. Para canales uniformes, que son canales prismáticos hechos de un material uniforme, se puede asumir el coeficiente de rugosidad de Manning constante (Ver Anexo 1. Coeficientes para la ecuación de Manning). Así, para los mismos canales, las relaciones de los elementos geométricos del canal se encuentran en las Tablas 2 a la 5.

5.1.4 Canal Triangular

Una expresión explicita se puede desarrollar para calcular la profundidad normal en canales triangulares. Teniendo la misma pendiente lateral (o talud) en ambos lados. El procedimiento se demuestra a continuación:

Según la Tabla 5, se sustituye el área y el radio hidráulico en la ecuación 6 y se tiene:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot [zy^2] \cdot \left[\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}\right]^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = \frac{1}{n} \cdot zy^2 \cdot \frac{z^{\frac{2}{3}} y^{\frac{2}{3}}}{\left[2\sqrt{1+z^2}\right]^{\frac{2}{3}}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = \frac{1}{n} \cdot \frac{z^{\frac{5}{3}} y^{\frac{8}{3}}}{\left[2\sqrt{1+z^2}\right]^{\frac{2}{3}}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

$$y^{\frac{8}{3}} = \frac{Q \cdot n \cdot \left[2\sqrt{1+z^2}\right]^{\frac{2}{3}}}{S^{\frac{1}{2}} \cdot z^{\frac{5}{3}}}$$

$$y = \left[\frac{Q \cdot n \cdot \left[2\sqrt{1+z^2}\right]^{\frac{2}{3}}}{S^{\frac{1}{2}} \cdot z^{\frac{5}{3}}}\right]^{3/8}$$

Entonces

$$y_n = \left[\frac{Q \cdot n}{S^{\frac{1}{2}}}\right]^{\frac{3}{8}} \cdot \frac{\left[2\sqrt{1+z^2}\right]^{\frac{1}{4}}}{z^{\frac{5}{8}}}$$

Ecuación 7 Profundidad normal para canales triangulares

5.1.5 Canal Rectangular

Según la Tabla 2, se sustituye el área y el radio hidráulico en la ecuación 6, obteniendo:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot by \cdot \left[\frac{by}{b+2y}\right]^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = \frac{1}{n} \cdot by \cdot \frac{b^{\frac{2}{3}} y^{\frac{2}{3}}}{[b+2y]^{\frac{2}{3}}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = \frac{1}{n} \cdot \frac{b^{\frac{5}{3}} y^{\frac{5}{3}}}{[b+2y]^{\frac{2}{3}}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

Como puede observarse, no se puede dar una solución explicita para calcular la profundidad normal en un canal de sección rectangular. Se puede recurrir a procedimientos de prueba y error, asignando valores a y hasta llegar a una buena aproximación. Este método se explica de manera amplia en los libros de hidráulica.

Aquí, se ha elegido usar los métodos numéricos para darle solución a este problema. A continuación se detalla el método de Newton-Raphson (método bien difundido en libros académicos, por lo cual no se explicará), para calcular la profundidad normal en canales rectangulares.

El método de Newton-Raphson establece para una función:

$$y_{i+1} = y_i - \frac{F[y]}{F'[y]}$$

Ecuación 8 Expresión del método de Newton-Raphson, en y

Se desea que el caudal calculado Q_i (o teórico) sea igual al caudal inicialmente conocido (o real) Q_{real}

$$F(y) = Q_i - Q_{real} = 0 \quad \text{ó} \quad y = Q_i - Q_{real} = 0$$

$$F'(y) = Q_i' - Q_{real}' = 0 \quad \text{ó} \quad \frac{dy}{dy} = \frac{d[Q_i]}{dy} - \frac{d[Q_{real}]}{dy} = 0$$

$$F'(y) = Q_i' - Q_{real}' = 0 \quad \text{ó} \quad \frac{dy}{dy} = \frac{d[Q_i]}{dy} - 0 = 0$$

$$Q_i = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot A$$

$$\frac{d}{dy} Q_i = \frac{d}{dy}\left[\frac{R^{\frac{2}{3}}}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot A\right]$$

$$\frac{d}{dy} Q_i = \frac{1}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{d}{dy}\left[R^{\frac{2}{3}} \cdot A\right]$$

$$\frac{d}{dy} Q_i = \frac{1}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{d}{dy}\left[R^{\frac{2}{3}} \cdot A\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = \frac{1}{n}\cdot S^{\frac{1}{2}}\cdot\frac{d}{dy}\left[R^{\frac{2}{3}}\cdot A\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = \frac{1}{n}\cdot S^{\frac{1}{2}}\cdot\left[\frac{2}{3}\cdot\frac{1}{R}\cdot\frac{d}{dy}[R]+\frac{1}{A}\cdot\frac{d}{dy}[A]\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = \frac{1}{n}\cdot S^{\frac{1}{2}}\cdot\left[\frac{2}{3}\cdot\frac{1}{[A/P]}\cdot\frac{d}{dy}\left[\frac{A}{P}\right]+\frac{1}{A}\cdot\frac{d}{dy}[A]\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = \frac{1}{n}\cdot S^{\frac{1}{2}}\cdot\left[\frac{2}{3}\cdot\frac{P}{A}\cdot\frac{d}{dy}\left[\frac{A}{P}\right]+\frac{1}{A}\cdot\frac{d}{dy}[A]\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = \frac{1}{n}\cdot S^{\frac{1}{2}}\cdot\left[\frac{2}{3}\cdot\frac{P}{A}\cdot\frac{d}{dy}\left[\frac{A}{P}\right]+\frac{1}{A}\cdot\frac{d}{dy}[A]\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = \frac{1}{n}\cdot S^{\frac{1}{2}}\cdot\left[\frac{2}{3}\cdot\frac{P}{A}\cdot\left[\frac{P\cdot\frac{d}{dy}[A]-A\cdot\frac{d}{dy}[P]}{P^2}\right]+\frac{1}{A}\cdot\frac{d}{dy}[A]\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = \frac{1}{n}\cdot S^{\frac{1}{2}}\cdot\left[\frac{2}{3}\cdot\frac{P}{A}\cdot\frac{1}{P^2}\cdot\left[P\cdot\frac{d}{dy}[A]-A\cdot\frac{d}{dy}[P]\right]+\frac{1}{A}\cdot\frac{d}{dy}[A]\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = \frac{1}{n}\cdot S^{\frac{1}{2}}\cdot\left[\frac{2}{3}\cdot\frac{P}{A}\cdot\frac{1}{P^2}\cdot P\cdot\frac{d}{dy}[A]-\frac{2}{3}\cdot\frac{P}{A}\cdot\frac{1}{P^2}\cdot A\cdot\frac{d}{dy}[P]+\frac{1}{A}\cdot\frac{d}{dy}[A]\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = \frac{1}{n}\cdot S^{\frac{1}{2}}\cdot\left[\left[\frac{2}{3}+1\right]\cdot\frac{1}{A}\cdot\frac{d}{dy}[A]-\frac{2}{3}\cdot\frac{1}{P}\cdot\frac{d}{dy}[P]\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = \frac{R^{\frac{2}{3}}}{n}\cdot S^{\frac{1}{2}}\cdot A\cdot\left[\frac{5}{3}\cdot\frac{1}{A}\cdot\frac{d}{dy}[A]-\frac{2}{3}\cdot\frac{1}{P}\cdot\frac{d}{dy}[P]\right]$$

Sustituyendo el resultado anterior en la Ecuación 8 para el método numérico de Newton Raphson, se tiene:

$$y_{i+1} = y_i - \frac{F[y]}{F'[y]}$$

$$y_{i+1} = y_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{\frac{d[Q_i]}{dy} - \frac{d[Q_{real}]}{dy}}$$

$$y_{i+1} = y_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{\frac{d[Q_i]}{dy} - 0}$$

$$y_{i+1} = y_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{\frac{d[Q_i]}{dy}}$$

$$y_{i+1} = y_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{\frac{R^{\frac{2}{3}}}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot A \cdot \left[\frac{5}{3} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{d[A]}{dy} - \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{P} \cdot \frac{d[P]}{dy}\right]}$$

$$y_{i+1} = y_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{Q_i \cdot \left[\frac{5}{3} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{d[A]}{dy} - \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{P} \cdot \frac{d[P]}{dy}\right]}$$

Ecuación 9 Expresión general para la profundidad normal en flujo normal con el método de Newton-Raphson

La Ecuación 9, se convierte en la ecuación general para calcular la profundidad normal en flujo uniforme en la sección trapezoidal, rectangular y circular. Para cada sección, solo se debe hallar la derivada de la función que describe el área y el perímetro mojado para cada sección y luego reemplazarlas en la ecuación 9. Así, se procede para la sección rectangular, como se muestra:

	ÁREA	**PERÍMETRO MOJADO**
	A	**P**
S. RECTÁNGULAR	by	$b + 2y$
	Derivadas	
	$\frac{d}{dy}A$	$\frac{d}{dy}P$
	b	2

Tabla 6 Derivada del área y perímetro mojado en la sección rectangular

Se reemplazan los resultados obtenidos de la Tabla 6, en la ecuación 9, así:

$$y_{i+1} = y_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{\frac{R^{\frac{2}{3}}}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot A \cdot \left[\frac{5}{3} \cdot \frac{1}{A} \cdot [b] \; - \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{P} \cdot [2]\right]}$$

$$y_{i+1} = y_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{Q_i \cdot \left[\frac{5b}{3A} - \frac{4}{3P}\right]}$$

Ecuación 10 Profundidad normal en canales de sección rectangular, con Newton-Raphson

5.1.6 Canal Trapezoidal

Realizando el mismo procedimiento, según los elementos geométricos de un canal trapezoidal, como se muestra en la Tabla 3, se deriva el área y el perímetro mojado para una sección trapezoidal, como se muestra a continuación:

	ÁREA	**PERÍMETRO MOJADO**
	A	**P**
S. TRAPEZOIDAL	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$
	Derivadas	
	$\frac{d}{dy}A$	$\frac{d}{dy}P$
	$2yz + b$	$2\sqrt{z^2 + 1}$

Tabla 7 Derivada del área y perímetro mojado en la sección trapezoidal

Los resultados de la Tabla 7 se reemplazan en la ecuación 9, obteniéndose:

$$y_{i+1} = y_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{Q_i \cdot \left[\frac{5(2yz + b)}{3A} - \frac{4\sqrt{z^2 + 1}}{3P}\right]}$$

Ecuación 11 Profundidad normal en canales de sección rectangular, con Newton-Raphson

5.1.7 Canal Circular

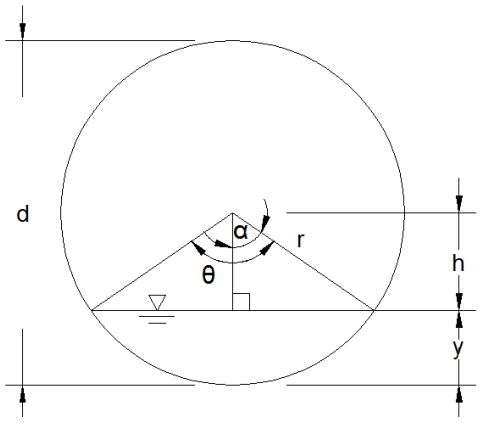


Ilustración 2 Geometría de un canal circular

Algunas deducciones matemáticas a partir de la geometría de la Ilustración 2

1) $r = \frac{d}{2} = h + y$
2) $h = \frac{d}{2} - y = r - y$
3) $\theta = 2\alpha$
4) $\cos\alpha = \frac{h}{r}$

Despejando h de (1) y α de (4), y teniendo en cuenta (3) se tiene:

5) $\theta = 2\cos^{-1}\left(\frac{r-y}{r}\right) = 2\cos^{-1}\left(1 - 2\left(\frac{y}{d}\right)\right)$

Despejando h en (1) y (3), e igualando posteriormente se tiene que

6) $r - y = r\cos\alpha$

Despejando y, y teniendo en cuenta (5), se obtiene la siguiente expresión

$$y = r(1 - \cos\alpha) = \frac{d}{2}(1 - \cos[\theta]) = \frac{d}{2}\left(1 - \cos\left[2\cos^{-1}\left(1 - 2\left(\frac{y}{d}\right)\right)\right]\right)$$

Ecuación 12 Profundidad en un canal circular según su geométrica

Teniendo en cuenta la ecuación 9, se realiza el mismo procedimiento: se deriva el área y el perímetro mojado para una sección circular y se reemplaza en la ecuación 12. En el caso del canal con sección circular, existen dos posibilidades: derivar con respecto a y (que se constituye como la profundidad normal) o con respecto a θ (el ángulo imaginario que se forma entre la superficie del agua y el centro de la circunferencia). En todo caso se realizan ambos procedimientos, como se indica en la Tabla 8 y luego, de acuerdo a la ecuación 9, se reemplaza según la derivada de y o θ:

	ÁREA	**ANCHO SUPERFICIAL**
	$\mathbf{A}$	$\mathbf{P}$
S. CIRCULAR	$\frac{1}{8}(\theta-\sin\theta)d^2$	$\left(\frac{1}{2}\theta\right)d$
	DERIVADAS	
	$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{dy}}\mathbf{A}$	$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{dy}}\mathbf{P}$
	$\frac{-\cos\left(2\cos^{-1}\left(1-\frac{2y}{d}\right)\right)+1}{2\sqrt{1-\left(1-\frac{2y}{d}\right)^2}}d$	$\frac{2}{\sqrt{-\left(-\frac{2y}{d}+1\right)^2+1}}$
	$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d\theta}}\mathbf{A}$	$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d\theta}}\mathbf{P}$
	$\frac{d^2(-\cos(\theta)+1)}{8}$	$\frac{d}{2}$

Tabla 8 Derivada del área y perímetro mojado en la sección circular

- **Con respecto a y**

$$y_{i+1} = y_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{Q_i \cdot \left[\frac{5}{3A} \cdot \left(\frac{-\cos\left(2\cos^{-1}\left(-\frac{2y}{d}+1\right)\right)+1}{2\sqrt{-\left(-\frac{2y}{d}+1\right)^2+1}} d\right) - \frac{4}{3P \cdot \sqrt{-\left(-\frac{2y}{d}+1\right)^2+1}}\right]}$$

Ecuación 13 Profundidad normal para sección circular derivando en **y**, con Newton-Raphson

- **Con respecto a θ:**

$$\theta_{i+1} = \theta_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{Q_i \cdot \left[\frac{5}{3A} \cdot \left(\frac{d^2(-\cos(\theta)+1)}{8}\right) - \frac{d}{3P}\right]}$$

Ecuación 14 Profundidad normal para sección circular derivando en **θ**, con Newton-Raphson

Es evidente que el proceso matemático sería más sencillo derivando y calculando los parámetros hidráulicos con respecto a θ. Si se calcula mediante la segunda opción, el valor obtenido se reemplaza en la ecuación 12 para calcular la profundidad normal.

FLUJO CRÍTICO

El flujo crítico, es un tipo especial de flujo en canales abiertos, ocurre en ciertas condiciones. Es un tipo de flujo de sección transversal. En otras palabras, el flujo crítico no se mantiene a lo largo de una longitud de un canal.

La siguiente, es una lista de condiciones asociadas al flujo crítico:

- El número de Froude es igual a la unidad
- La energía específica es mínima para un caudal determinado
- El caudal es máximo para una determinada energía específica
- La fuerza específica es mínima para un caudal determinado
- El caudal es máximo para una fuerza específica determinada

- **El Número de Froude**

El número de Froude, es un número adimensional, es un tipo de flujo de sección transversal y se caracteriza como:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}} = \frac{V}{\sqrt{g(A/T)}} = \frac{Q}{\sqrt{g(A^3/T)}}$$

Ecuación 15 Número de Froude, para un canal abierto

Donde

F_r = Número de Froude
V = Velocidad media del flujo, m/seg
Q = Caudal, m^3/seg
g = Aceleración de la gravedad, m/seg^2
D = Profundidad hidráulica
A = Área mojada, m^2
T = Ancho superficial, m

La expresión $\sqrt{gD}$, representan la velocidad con que las ondas gravitacionales se propagan en canales abiertos. Dependiendo del valor que tome el número de Froude, el estado del flujo puede ser subcrítico si $F_r < 1$, critico si $F_r = 1$, y supercrítico si $F_r > 1$.

CALCULO DE LA PROFUNDIDAD CRÍTICA EN CANALES UNIFORMES

La profundidad crítica, denotado por y_c, es la profundidad de flujo en una sección donde el flujo es crítico. En un canal abierto dado, la corriente crítica puede no ocurrir en absoluto. Sin embargo, la profundidad crítica se calcula todavía como un

primer paso en el tratamiento de la mayoría de los problemas de flujo de canal abierto. Por ejemplo, la profundidad crítica ayudará a clasificar la pendiente de un canal como suave o pronunciada en los cálculos longitudinales perfil de la superficie del agua. También, como el número de Froude, la propia profundidad crítica se puede utilizar para identificar si el flujo en una sección es subcrítico o supercrítico. El flujo es subcrítico si la profundidad de flujo es mayor que la profundidad crítica, es decir, si $y > y_c$. El flujo es supercrítico si $y < y_c$.

Se puede calcular la profundidad crítica para un caudal dado, Q, en la sección de un canal dado, mediante la expresión de A y T en la ecuación 15 en términos de y, según las Tablas 2 a 5, y estableciendo que $F_r = 1$ y resolviendo para la profundidad del flujo.

5.1.8 Canal Rectangular

Teniendo en cuenta la ecuación 15, y la expresión del área y ancho superficial para canales rectangulares según la Tabla 2, se tiene:

$$F_r = \frac{Q}{\sqrt{g\left(\frac{(by)^3}{b}\right)}}$$

$$F_r = \frac{Q}{\sqrt{g\left(\frac{b^3y^3}{b}\right)}}$$

$$F_r = \frac{Q}{\sqrt{gb^2y^3}}$$

Cuando se tiene un una profundidad crítica, y_c , el número de Froude es igual a la unidad, $F_r = 1$. Igualando a la unidad y despejando y se tiene:

$$1 = \frac{Q}{g^{\frac{1}{2}}by^{\frac{3}{2}}}$$

$$y^{\frac{3}{2}} = \frac{Q}{g^{\frac{1}{2}}b}$$

En este caso, se obtiene una expresión explicita para el canal rectangular, así:

$$y_c = \left[\frac{Q}{g^{\frac{1}{2}}b}\right]^{\frac{2}{3}} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}}$$

Ecuación 16 Profundidad crítica en un canal rectangular

5.1.9 Canal Triangular

Para un canal de sección triangular, con pendiente lateral z (1 vertical sobre z horizontal), y reemplazando el área y ancho superficial según la Tabla 4, en la ecuación 15, se tiene:

$$F_r = \frac{Q}{\sqrt{g\left(\frac{(zy^2)^3}{2zy}\right)}}$$

$$F_r = \frac{Q}{\sqrt{g\left(\frac{z^3y^6}{2zy}\right)}}$$

$$F_r = \frac{Q}{\sqrt{\frac{gz^2y^5}{2}}}$$

Cuando se tiene un una profundidad crítica, y_c , el número de Froude es igual a la unidad, $F_r = 1$. Igualando a la unidad y despejando y se tiene:

$$1 = \frac{Q}{\sqrt{\frac{gz^2y^5}{2}}}$$

$$y^{\frac{5}{2}} = \frac{2^{\frac{1}{2}}Q}{g^{\frac{1}{2}}z}$$

En este caso, se obtiene una expresión explicita para el canal triangular, así:

$$y_c = \left[\frac{2^{\frac{1}{2}}Q}{g^{\frac{1}{2}}z}\right]^{\frac{2}{5}} = \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{gz^2}}$$

Ecuación 17 Profundidad crítica en un canal triangular

5.1.10 Canal Trapezoidal

Para un canal de sección trapezoidal, con pendiente lateral z (1 vertical sobre z horizontal), para una profundidad crítica, se puede establecer que $F_r = (F_r)^2 = 1.0$

$$F_r{}^2 = \frac{Q^2}{g \cdot \left(\frac{A^3}{T}\right)}$$

$$F_r{}^2 = \frac{Q^2}{g \cdot \left(\frac{A^3}{T}\right)}$$

Reemplazando $F_r = 1$, y el área y ancho superficial según la Tabla 5, así:

$$1 = \frac{Q^2}{g \cdot \frac{A^3}{T}} = \frac{T \cdot Q^2}{g \cdot A^3} = \frac{(b + 2zy) \cdot Q^2}{g \cdot (b + zy)^3 y^3}$$

$$1 = \frac{(b + 2zy) \cdot Q^2}{g \cdot (b + zy)^3 y^3}$$

Observando la expresión anterior, se concluye que no se obtiene una expresión explicita para calcular y_c en canales trapezoidales. Entonces, se necesita aplicar

procedimientos de prueba y error para determinar la profundidad crítica en canales trapezoidales.

De manera similar al cálculo de la profundidad normal, se aplica el método numérico Newthon-Raphson, para obtener una expresión general para el cálculo de la profundidad crítica.

Sabiendo que cuando la profundidad es crítica, el número de Froude es igual a 1, así:

$$F_r = 1\ ;$$

$$1 = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot \left(\frac{A^3}{T}\right)}};$$

$$Q = \sqrt{g \cdot \left(\frac{A^3}{T}\right)} = g^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{A^{\frac{3}{2}}}{T^{\frac{1}{2}}}$$

El método de Newton Raphson establece, según la ecuación 8:

$$y_{i+1} = y_i - \frac{F(y)}{F'(y)}$$

Se desea que el caudal calculado Q_i (o teórico) sea igual al caudal inicialmente conocido (o real) Q_{real}

$$F(y) = Q_i - Q_{real} = 0 \quad \therefore \quad y = Q_i - Q_{real} = 0$$

$$F'(y) = Q_i' - Q_{real}' = 0 \quad \therefore \quad \frac{dy}{dy} = \frac{d(Q_i)}{dy} - \frac{d(Q_{real})}{dy} = 0$$

$$F'(y) = Q_i' - Q_{real}' = 0 \quad \therefore \quad \frac{dy}{dy} = \frac{d(Q_i)}{dy} - 0 = 0$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = \frac{d}{dy}\left[g^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{A^{\frac{3}{2}}}{T^{\frac{1}{2}}}\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = g^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{d}{dy}\left[\frac{A^{\frac{3}{2}}}{T^{\frac{1}{2}}}\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = g^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{T^{\frac{1}{2}}\frac{d}{dy}\left[A^{\frac{3}{2}}\right] - A^{\frac{3}{2}}\frac{d}{dy}\left[T^{\frac{1}{2}}\right]}{T^{\frac{1}{2}}}\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = g^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\frac{3}{2} \cdot A^{\frac{3}{2}-1} \cdot T^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{d}{dy}[A] - \frac{1}{2} \cdot T^{\frac{1}{2}-1} \cdot A^{\frac{3}{2}}\frac{d}{dy}[T]}{\left[T^{\frac{1}{2}}\right]^2}\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = g^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\frac{3}{2} \cdot A^{\frac{1}{2}} \cdot T^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{d}{dy}[A] - \frac{1}{2} \cdot T^{-\frac{1}{2}} \cdot A^{\frac{3}{2}}\frac{d}{dy}[T]}{T}\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = g^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\frac{3}{2} \cdot A^{\frac{1}{2}} \cdot T^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{d}{dy}[A] - \frac{1}{2} \cdot T^{-\frac{1}{2}} \cdot A^{\frac{3}{2}}\frac{d}{dy}[T]}{T}\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = g^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\frac{3}{2} \cdot A^{\frac{1}{2}} \cdot T^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{d}{dy}[A]}{T} - \frac{\frac{1}{2} \cdot T^{-\frac{1}{2}} \cdot A^{\frac{3}{2}}\frac{d}{dy}[T]}{T}\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = g^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{T^{\frac{1}{2}}}{T} \cdot A^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{d}{dy}[A] - \frac{1}{2} \cdot \frac{T^{-\frac{1}{2}}}{T} \cdot A^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{d}{dy}[T]\right]$$

$$\frac{d}{dy}Q_i = g^{\frac{1}{2}} \cdot \left[T^{\frac{1}{2}-1} \cdot \frac{3}{2} \cdot A^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{d}{dy}[A] - T^{-\frac{1}{2}-1} \cdot A^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dy}[T]\right]$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}\mathrm{Q_i} = \mathrm{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\mathrm{T}^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \mathrm{A}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}[\mathrm{A}] - \mathrm{T}^{-\frac{3}{2}} \cdot \mathrm{A}^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}[\mathrm{T}]\right]$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}\mathrm{Q_i} = \mathrm{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\mathrm{A}^{\frac{3}{2}}}{\mathrm{T}^{\frac{1}{2}}} \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot [\mathrm{A}^{-1}] \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}[\mathrm{A}] - \frac{1}{2} \cdot [\mathrm{T}^{-1}] \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}[\mathrm{T}]\right]$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}\mathrm{Q_i} = \mathrm{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\mathrm{A}^{\frac{3}{2}}}{\mathrm{T}^{\frac{1}{2}}} \cdot \left[\frac{3}{2\mathrm{A}} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}[\mathrm{A}] - \frac{1}{2\mathrm{T}} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}[\mathrm{T}]\right]$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}\mathrm{Q_i} = \mathrm{Q_i} \cdot \left[\frac{3}{2\mathrm{A}} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}[\mathrm{A}] - \frac{1}{2\mathrm{T}} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}[\mathrm{T}]\right]$$

Se reemplazan los resultados obtenidos en las siguientes dos expresiones:

$$\mathrm{y_{i+1}} = \mathrm{y_i} - \frac{\mathrm{Q_i} - \mathrm{Q_{real}}}{\frac{\mathrm{d}(\mathrm{Q_i})}{\mathrm{dy}} - 0}$$

$$\mathrm{y_{i+1}} = \mathrm{y_i} - \frac{\mathrm{Q_i} - \mathrm{Q_{real}}}{\frac{\mathrm{d}(\mathrm{Q_i})}{\mathrm{dy}}}$$

Y se obtiene una expresión general para calcular la profundidad crítica, $\mathrm{y_c}$, como se muestra a continuación:

$$\mathrm{y_{i+1}} = \mathrm{y_i} - \frac{\mathrm{Q_i} - \mathrm{Q_{real}}}{\mathrm{Q_i} \cdot \left[\frac{3}{2\mathrm{A}} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}[\mathrm{A}] - \frac{1}{2\mathrm{T}} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dy}}[\mathrm{T}]\right]}$$

Ecuación 18 Expresión general para la profundidad crítica en flujo normal con el método de Newton-Raphson

Así, para el cálculo de la profundidad crítica en canales de sección trapezoidal, se deriva el área el ancho superficial con respecto a y, así:

	ÁREA	ANCHO SUPERFICIAL
	$\mathbf{A}$	$\mathbf{T}$
S. TRAPEZOIDAL	$(b + zy)y$	$b + 2zy$
	DERIVADAS	
	$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{dy}}\mathbf{A}$	$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{dy}}\mathbf{T}$
	$2yz + b$	$2z$

Tabla 9 Derivada del área y ancho superficial en la sección trapezoidal

Reemplazando los resultados obtenidos en la Tabla 9, y reemplazándolos en la ecuación 18, se obtiene:

$$y_{i+1} = y_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{Q_i \cdot \left[\frac{3}{2A} \cdot [2yz + b] - \frac{1}{2T} \cdot [2z]\right]}$$

Ecuación 19 Profundidad crítica para sección trapezoidall, con Newton-Raphson

5.1.11 Canal Circular

Se realiza el mismo procedimiento: se deriva el área y el ancho superficial para una sección circular y se reemplazan los resultados en la ecuación 18. En el caso del canal con sección circular, existen dos posibilidades: derivar con respecto a y (que se constituye como la profundidad crítica) o con respecto a θ (el ángulo imaginario que se forma entre la superficie del agua y el centro de la circunferencia). En todo caso se realizan ambos procedimientos, como sigue a continuación:

	ÁREA	ANCHO SUPERFICIAL
	$\mathbf{A}$	$\mathbf{T}$
S. CÍRCULAR	$\frac{1}{8}(\theta - \sin\theta)d^2$	$\left(\sin\left(\frac{1}{2}\theta\right)\right)d = 2\sqrt{y(d-y)}$
	DERIVADAS	
	$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{dy}}\mathbf{A}$	$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{dy}}\mathbf{T}$

	$\frac{-\cos\left(2\cos^{-1}\left(1-\frac{2y}{d}\right)\right)+1}{2\sqrt{1-\left(1-\frac{2y}{d}\right)^2}}d$	$\frac{4\sin\left(\frac{1}{2}\right)}{\sqrt{1-\left(1-\frac{2y}{d}\right)^2}} = \frac{d-2y}{\sqrt{y(d-y)}}$
	$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d\theta}}\mathbf{A}$	$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d\theta}}\mathbf{T}$
	$\frac{d^2(-\cos(\theta)+1)}{8}$	$\frac{d\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2}$

Tabla 10. Derivada del área y ancho superficial mojado en la sección circular

Por lo tanto, para aplicar el método de Newton-Raphson, se tienen dos opciones, como se muestra a continuación:

- **Con respecto a y**

$$y_{i+1} = y_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{Q_i \cdot \left[\frac{3}{2A}\cdot\left[\frac{-\cos\left(2\cos^{-1}\left(1-\frac{2y}{d}\right)\right)+1}{2\sqrt{1-\left(1-\frac{2y}{d}\right)^2}}d\right] - \frac{1}{2T}\cdot\left[\frac{d-2y}{\sqrt{y(d-y)}}\right]\right]}$$

Ecuación 20 Profundidad crítica para sección circular derivando en $\mathbf{y}$, con Newton-Raphson

- **Con respecto a θ:**

$$\theta_{i+1} = \theta_i - \frac{Q_i - Q_{real}}{Q_i \cdot \left[\frac{3}{2A}\cdot\left[\frac{d^2(-\cos(\theta)+1)}{8}\right] - \frac{1}{2T}\cdot\left[\frac{d\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2}\right]\right]}$$

Ecuación 21 Profundidad crítica para sección circular derivando en θ, con Newton-Raphson

Como ocurre en la profundidad normal para sección circular, es evidente que el proceso matemático sería más sencillo derivando y calculando los parámetros hidráulicos con respecto a θ. Si se calcula mediante la segunda opción, el valor obtenido se reemplaza en la ecuación 12 para calcular la profundidad normal.

ENERGÍA ESPECÍFICA

Del principio de la energía se puede deducir la siguiente expresión, asumiendo $\alpha = 1.0$ (coeficiente de energía), por razones de simplificación, en un canal aguas arriba de sección U y aguas debajo de sección D, como sigue a continuación:

$$\left(z_{bU} + y_U + \frac{V_U^2}{2g}\right) = \left(z_{bD} + y_D + \frac{V_D^2}{2g}\right) + h_L$$

Donde:

z_b	=	Elevación del fondo del canal con respecto al datum horizontal
y	=	Profundidad de flujo
V	=	Velocidad promedio en la sección transversal
g	=	Aceleración de la gravedad
h_L	=	Perdida de energía por unidad de peso entre ambas secciones.

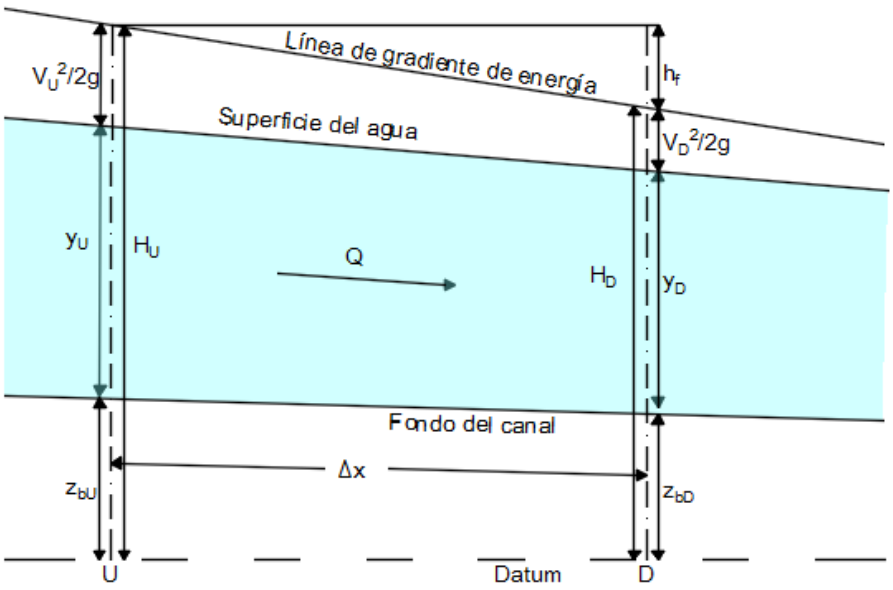


Ilustración 3 Principio de energía para flujo uniforme. Fuente: (Akan, 2006, pág. 29)

Observaciones:

- h_L incluye perdidas debido a la resistencia del flujo y a los cambios de la sección transversal.
- Generalmente, z_b se conoce como cabeza de elevación, y como cabeza de presión y $V^2/2g$ como cabeza de velocidad. La suma de estos tres términos se conoce como cabeza total de energía y se denota por H. En otras palabras:

$$H = z_b + y + \frac{V^2}{2g}$$

- La línea que conecta la cabeza de energía a varias secciones a lo largo del canal se llama línea de gradiente de energía, o simplemente línea de energía. La suma de la cabeza de elevación y de presión se conoce como cabeza hidráulica o cabeza piezométrica, y se denota por h. Esto es:

$$h = z_b + y$$

- La línea que conecta la cabeza hidráulica a varios puntos a lo largo de la sección del canal se llama línea de gradiente hidráulico o línea piezométrica. Para la mayoría del flujo de canales abiertos, la elevación del agua arriba del datum es la misma que la cabeza hidráulica, y la superficie del agua por sí misma representa la línea de gradiente hidráulico.
- La energía específica, denotada por E, se define como la cabeza de energía relativa al fondo del canal. Por lo tanto, a cualquier sección del canal, se tiene:

$$E = y + \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 22 Energía Específica

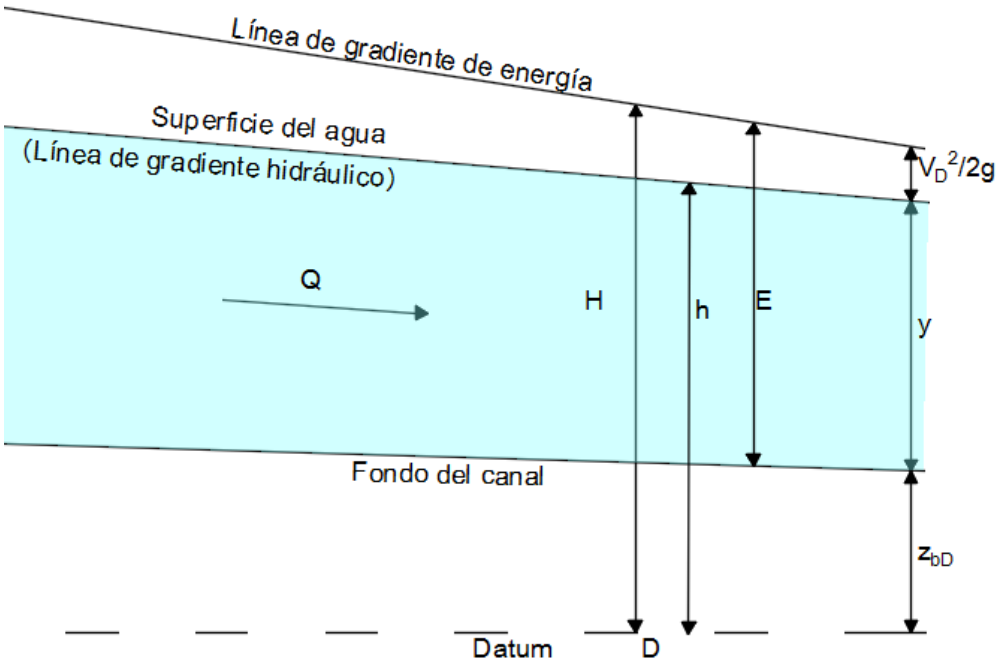


Ilustración 4 Cabeza de energía total, cabeza de energía hidráulica y energía específica. Fuente: (Akan, 2006, pág. 30)

5.1.12 Cálculo de la profundidad en cambio de sección en planta en canales rectangulares

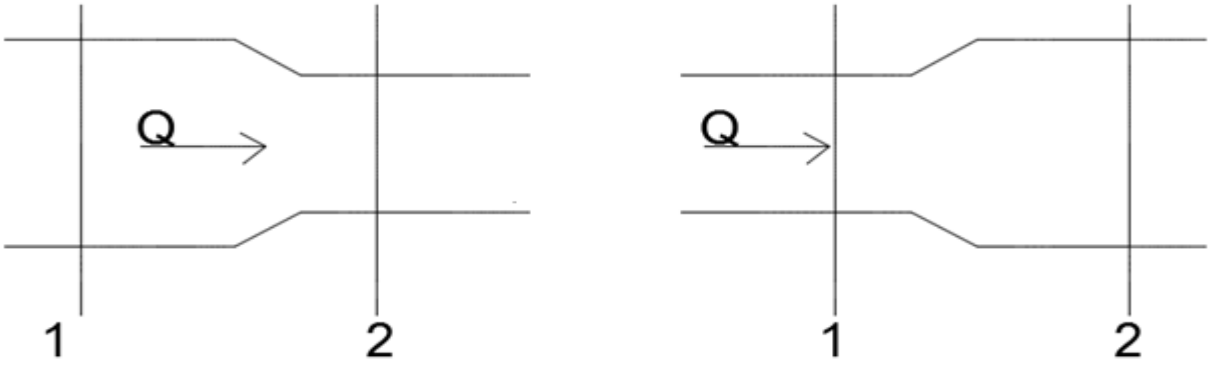


Ilustración 5. Cambio de sección en planta en canales rectangulares

Las reducciones y ampliaciones en planta, pueden ser diseñadas aplicando el principio de energía. La energía específica en la sección 1 es igual a la energía específica en el puto 2, como sigue a continuación:

$$E_1 = E_2$$

Considerando que se tiene un canal de sección rectangular, en donde el caudal dado es constante, se tiene:

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$y_1 + \frac{Q^2}{2A_1^2 g} = y_2 + \frac{Q^2}{2A_2^2 g}$$

Reemplazando el área mojada de una sección rectangular en la expresión anterior, según la Tabla 2, se tiene:

$$y_1 + \frac{Q^2}{2b_1^2 y_1^2 g} = y_2 + \frac{Q^2}{2b_2^2 y_2^2 g}$$

El primer término de la ecuación anterior se conoce y corresponde a la energía específica en el punto 1. En el segundo miembro de la ecuación, el término desconocido es la profundidad y_2

$$E_1 = y_2 + \frac{1}{y_2^2} \cdot \frac{Q^2}{2b_2^2 g}$$

$$E_1 - y_2 = \frac{1}{y_2^2} \cdot \frac{Q^2}{2b_2^2 g}$$

$$y_2^2(E_1 - y_2) = \frac{Q^2}{2b_2^2 g}$$

$$y_2^2(E_1 - y_2) = \frac{Q^2}{2b_2^2 g}$$

$$E_1 y_2^2 - y_2^3 = \frac{Q^2}{2b_2^2 g}$$

$$y_2^3 - E_1 \cdot y_2^2 + \frac{Q^2}{2b_2^2 g} = 0$$

Ecuación 23 Ecuación cúbica para la profundidad de flujo en cambio de sección en plante en canales rectangulares

Esta expresión resulta general para calcular la profundidad alcanzada en un cambio de sección en planta (reducción o ampliación) en canales rectangulares.

Se ha hallado el método cardano para resolver una ecuación cúbica. El siguiente apartado, se describe el proceso matemático.

5.1.13 Método Cardano

La fórmula cúbica es la solución de forma cerrada para una ecuación cúbica, es decir, las raíces de un polinomio cúbico. Una ecuación cúbica general es de la forma

$$x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 = 0$$

Se puede tomar el coeficiente a_3 de x^3 como 1 sin afectar la solución, al dividir la ecuación completa por a_3. La solución de la ecuación cúbica fue publicada por Gerolamo Cardano (1501-1576) en su Tratado *Ars Magna*. Sin embargo, Cardano no fue el descubridor original de estos resultados, sino Niccolò Tartaglia. (Weisstein, s.f.)

Para dar solución a esta ecuación, se definen las siguientes variables:

$$Q = \frac{3a_1 - a_2^2}{9}$$

$$R = \frac{9a_2 a_1 - 27a_0 - 2a_2^3}{54}$$

$$D = Q^3 + R^2$$

$$S = \sqrt[3]{R + \sqrt{D}}$$

$$T = \sqrt[3]{R - \sqrt{D}}$$

Ecuación 24 Parámetros de la Formula de Cardano

Donde D es el discriminante del polinomio. Entonces las raíces para la ecuación cúbica están dadas por

$$X_1 = -\frac{a_2}{3} + (S + T)$$

$$X_2 = -\frac{a_2}{3} - \frac{(S + T)}{2} + \frac{i\sqrt{3}(S - T)}{2}$$

$$X_3 = -\frac{a_2}{3} - \frac{(S + T)}{2} - \frac{i\sqrt{3}(S - T)}{2}$$

Ecuación 25 Formula de Cardano

Estas tres ecuaciones, por las que se obtienen las raíces de una ecuación cúbica, son generalmente llamadas la Formula de Cardano. S y T son casi siempre números complejos. Si se desea determinar cuáles raíces son reales y cuales son complejas, solo basta con analizar el discriminante del polinomio, así:

Si $D > 0$, entonces existe una raíz real y dos son conjugadas complejas

Si $D = 0$, entonces todas las raíces reales y al menos dos son iguales.

Si $D < 0$, entonces todas las raíces son reales y diferentes.

Si se tiene que $D < 0$, se puede dar solución en forma trigonométrica, de la siguiente manera:

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{R}{\sqrt{-Q^3}}\right)$$

Así, las soluciones reales son:

$$x_1 = 2\sqrt{-Q}\,\cos\left(\frac{\theta}{3}\right) - \frac{a_2}{3}$$
$$x_2 = 2\sqrt{-Q}\,\cos\left(\frac{\theta + 2\pi}{3}\right) - \frac{a_2}{3}$$
$$x_3 = 2\sqrt{-Q}\,\cos\left(\frac{\theta + 4\pi}{3}\right) - \frac{a_2}{3}$$

Ecuación 26 Formula de Cardano según solución trigonométrica

Ahora es posible resolver la ecuación cúbica (Ecuación 23), aplicando las nuevas ecuaciones del modelo matemático de Cardano con el modelo hidráulico de la energía específica en cambios de secciones en planta para canales rectangulares, así:

$$x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 = 0$$

Teniendo en cuenta la ecuación 23 :

$$y_2^3 - E_1 \cdot y_2^2 + \frac{Q^2}{2b_2^2g} = 0$$

Teniendo en cuenta los parámetros de la Formula de Cardano, según la ecuación 24, se tiene:

$$\begin{aligned} a_2 &= -E_1 = -\left(y_1 + \frac{Q^2}{2b_1^2y_1^2g}\right) \\ a_1 &= 0 \\ a_0 &= \frac{Q^2}{2b_2^2g} \end{aligned}$$

Ecuación 27 Parámetros de la ecuación cúbica de la energía específica, con el M. Cardano

Luego, teniendo en cuenta los resultados anteriores, se calculan los demás valores según lo muestran las ecuaciones 24 y 26.

Es evidente que la solución a una ecuación cúbica arrojará tres soluciones matemáticas posibles, para las cuales, satisface la ecuación. Así, se hace necesario comprender éstas tres soluciones desde un punto de vista hidráulico. Se debe considerar:

- Esta aplicación de la energía específica en cambio de sección en planta para canales rectangulares, se realiza teniendo en cuenta que no existen adiciones o pérdidas de caudal. Es decir, el caudal se considera constante, antes y después de la reducción o ampliación.
- El estado de flujo, según el número de Froude, debe permanecer constante. Éste depende de la relación entre las fuerzas inerciales y gravitacionales. Al analizar la ecuación 15, ésta depende de tres variables, a decir: el caudal, la gravedad y el ancho del canal, las cuales son constantes.
- En base a los dos puntos anteriores, en primer lugar la energía en ambos puntos de estudio, permanece constante. En segundo lugar, el estado de flujo (definido por el número de Froude), también permanece constante.

Se determina entonces que la solución hidráulica para esta aplicación, es aquella que sigue teniendo el mismo estado de flujo en la sección previa a la ampliación o reducción. Es decir, si en la sección 1, el estado era Subcrítico, en la sección 2, también lo será. Si en la sección 1 el estado era supercrítico, por consiguiente, permanecerá de la misma manera.

6 ESTADO DEL ARTE

El diseño de canales abiertos se ha ido automatizando con el tiempo. Hoy en día existe un sinnúmero de software, páginas web y hojas de cálculo en la capacidad de asistir y facilitar el desempeño de este tipo de prácticas. En esta revisión se pudo encontrar estas herramientas dedicadas al diseño de estructuras y obras hidráulicas, al diseño de canales abiertos y a la obtención de parámetros de diseño.

Se tiene el software Hcanales V 3.0, desarrollado por el ingeniero peruano, Máximo Villón Béjar. En su libro lo define como un “Software para el diseño de canales y estructuras hidráulicas. Constituye una herramienta muy poderosa de cálculo, fácil de utilizar” (Béjar, 2007, pág. 253)

También está HiCalc V2.0.1, fue creado en 1999 y se actualiza periódicamente por sus creadores (Istec Ingeniería, empresa Uruguaya, que presta servicios de ingeniería). Se define como una “calculadora de hidráulica de canales abiertos para asistir a ingenieros o estudiantes de ingeniería hidráulica en el diseño de canales de agua.” (ISTEC INGENIERIA, 2010)

Flow Pro es otro programa que es “una solución potente y precisa para los problemas de diseño hidráulico comunes”. Se usa para diseñar fácilmente los cursos de agua libre en los canales, alcantarillas, canales de riego, sluiceways”. (ProSoft App, 2016)

Hidryaulic Toolbox, fue desarrollado por la Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration, en inglés), en cooperación con Aquaveo. Es un conjunto de herramientas hidráulicas, que “incluye una serie de calculadoras utilizadas para analizar canales, presas, canaletas y ensenadas, cuencas de retención, y gradaciones de partículas. Hidryaulic Toolbox también incluye herramientas de análisis hidrológico, como el método racional” (Federal Highway Administration, 2016), (AQUAVEO, 2016)

FlowMaster es un programa desarrollado por Bently y “ayuda a realizar cálculos hidráulicos para muchos tipos de elementos: para tuberías a presión, cunetas, canales abiertos, presas y vertederos” (Bently, 2016)

LMNO Engineering es una página web, perteneciente a Ken Edwards, Ph.D., P.E, en la cual se pude realizar cálculos relacionados con el “Flujo en tuberías, canales abiertos, la hidrología, las aguas subterráneas. Líquido, gas, agua, aire. Venturi, boquilla, caudalímetros de orificio. Aliviaderos, canales de flujo. Redes de tuberías, golpe de ariete. Bernoulli, Manning, Moody. Diseño de la alcantarilla, sifón invertido. Presión, flujo, caudal, dimensionamiento. Fuerza de arrastre. Volumen de tanques, el volumen de la tubería, la conversión de unidades…” (Edwards, 2016)

Por ser software dedicados a características generales en las prácticas de diseño en la hidráulica, estos programas no cumplen con las necesidades específicas que se ha propuesto este proyecto.

La mayoría de programas y/o herramientas informáticas solo pueden obtenerse por un tiempo de prueba. También hay muchas herramientas independientes diseñadas por personas y/o instituciones interesadas en llevar a cabo este tipo de prácticas, no obstante no llegan a ser comercializados y, por ende, no es posible acceder a ellos.

Teniendo en cuenta la revisión del estado del arte y analizando los pro y los contra de los software referenciados, se desarrolló una herramienta informática propia que se adecuará a las necesidades de la clase teórica de hidráulica, enfocada a canales abiertos de la Universidad de la Costa, cumpliendo, a su vez, con lo establecido.

Este software está en la capacidad de identificar las entradas para el análisis, que son los datos de caudal las propiedades físicas del canal, requeridas para los procedimientos de la herramienta informática académica.

Luego, se calculan los valores de profundidad normal, crítica y aquella para los cambios de sección en planta de canales con sección rectangular. Finalmente se muestran los resultados obtenidos con el cálculo de los elementos geométricos referidos a esa profundidad.

7 DISEÑO METODOLOGICO

TIPO DE INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta que el conocimiento está dado, y lo que se pretende es facilitar el aprendizaje del mismo en los estudiantes de la materia de hidráulica teórica de ingeniería civil, se puede decir que el tipo de estudio es descriptivo, pues se busca que el estudiante investigue los temas de la hidráulica de canales abiertos que puedan ser traducidos en el lenguaje computacional de VBA. También se pude decir que es un tipo de investigación de carácter aplicativo, pues se basa en la aplicación de los modelos del cálculo diferencia, programación y métodos numéricos, física, para desarrollar conceptos y aplicaciones en la hidráulica de canales abiertos.

METODO DE ESTUDIO

El método a utilizar es el deductivo, pues se parte de unos conocimientos generales de cálculo diferencial, programación y métodos numéricos y de la hidráulica de canales abiertos, los cuales se irán adaptando y aplicando para el desarrollo y comprensión de la respuesta o resultados de los parámetros para diseñar un canal abierto.

HERRAMIENTA INFORMATICA

Para el desarrollo del software académico que permitirá obtener parámetros de diseño de canales abiertos, en la materia de hidráulica de la Universidad de la Costa, se utilizará Microsoft Visual Basic para Aplicaciones y el lenguaje de macros de Microsoft Excel versión 4.0.

Para cumplir con lo planteado, se lleva a cabo los siguientes procesos:

- El usuario elige el módulo que requiere.
- Entrada de datos de la geometría de los canales y/o características del flujo de agua.

- Se usarán los modelos matemáticos e hidráulicos para los cálculos solicitados
- El software está en la capacidad de hallar la profundidad normal, crítica, en los canales de sección rectangular, triangular, trapezoidal y triangular y las profundidades en cambios de sección en planta de canales rectangulares.
- El programa mostrará en una interfaz los resultados obtenidos.

8 RECURSOS DISPONIBLES

Los recursos disponibles se dividen en talento humano, recurso institucional y recurso financiero

TALENTO HUMANO

Se cuenta con el integrante Kevin David García Alvarado. Para la realización de este proyecto se cuenta a los ingenieros: GERALD MESTRA RODRIGUEZ.

INSTITUCIONALES

La biblioteca de la Corporación Universitaria de la Costa, la colaboración de los profesores de la misma y la ayuda del servicio de Internet que la universidad tiene para los estudiantes.

FINANCIEROS

Para la realización del proyecto se cuenta con recursos suministrados por los integrantes del proyecto. La siguiente tabla muestra el presupuesto necesario para el desarrollo del proyecto

Descripción	Valor
Transporte	100.000
Fotocopias e Impresiones	50.000
Acceso a la Web	100.000
TOTAL	250.000

9 Referencias

Akan, A. O. (2006). *Open Channel Hydraulics.* Oxford: ELSEVIER.

AQUAVEO. (2016). *Hydraulic Toolbox*. Obtenido de http://www.aquaveo.com/software/wms-hydraulic-toolbox

Béjar, M. V. (2007). *HIDRÁULICA DE CANALES.* Lima, Perú: Editorial Villón.

Bently. (2016). *FlowMaster*. Obtenido de Hydraulic Calculator Software: https://www.bentley.com/en/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/flowmaster

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos.* Santa Fé de Bogotá: McGraw, Hill.

Edwards, K. (2016). *LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd.* Obtenido de The fluid flow calculations website: http://www.lmnoeng.com/

Federal Highway Administration. (2016). *FHWA Hydraulic Toolbox, Version 4.20*. Obtenido de http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/software/toolbox404.cfm

ISTEC INGENIERIA. (2010). *HiCalc - Software para resolver flujos de agua en canales abiertos*. Obtenido de http://www.istec.com.uy/hicalc-software-para-resolver-flujos-de-agua-en-canales-abiertos/ct_174/es/

ProSoft App. (2016). *Flow Pro 2.1*. Obtenido de http://www.prosoftapps.com/flowpro.htm

Weisstein, E. W. (s.f.). *"Cubic Formula"*. Obtenido de From MathWorld--A Wolfram Web Resource: http://mathworld.wolfram.com/CubicFormula.html

ANEXO 1. COEFICIENTES PARA LA ECUACIÓN DE MANNING

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
A. Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos			
A-1. Metal			
a. Latón, liso	0.009	0.010	0.013
b. Acero			
1. Estriado y soldado	0.010	0.012	0.014
2. Ribeteado y en espiral	0.013	0.016	0.017
c. Hierro Fundido			
1. Recubierto	0.010	0.013	0.014
2. No recubierto	0.011	0.014	0.016
d. Hierro Forjado			
1. Negro	0.012	0.014	0.015
2. Galvanizado	0.013	0.016	0.017
e. Metal corrugado			
1. Subdrenaje	0.017	0.019	0.021
2. Drenaje de aguas lluvias	0.021	0.024	0.030
A-2. No metal			
a. Lucita	0.008	0.009	0.010
b. Vidrio	0.009	0.010	0.013
c. Cemento			
1. Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
d. Concreto			
1. Alcantarilla, recta y libre de basuras	0.010	0.011	0.013
2. Alcantarilla con curvas, conexiones y algo de basura	0.011	0.013	0.014
3. Bien terminado	0.011	0.012	0.014
4. Alcantarillado de aguas residuales, con pozos de inspección, entradas, etc., recto	0.013	0.015	0.017
5. Sin pulir, formaleta o encofrado metálico	0.012	0.013	0.014
6. Sin pulir, formaleta o encofrado en madera lisa	0.012	0.014	0.016
7. Sin pulir, formaleta o encofrado en madera rugosa	0.015	0.017	0.020
e. Madera			
1. Machihembrada	0.010	0.012	0.014
2. Laminada, tratada	0.015	0.017	0.020
f. Arcilla			
1. Canaleta común de baldosas	0.011	0.013	0.017
2. Alcantarilla vitrificada	0.011	0.014	0.017
3. Alcantarilla vitrificada con pozos de inspección, entradas, etc.	0.013	0.015	0.017
4. Subdrenaje vitrificado con juntas abiertas	0.014	0.016	0.018
g. Mampostería en ladrillo			
1. Barnizada o lacada	0.011	0.013	0.015
2. Revestida con mortero de cemento	0.012	0.015	0.017
h. Alcantarillados sanitarios recubiertos con limos y babas de aguas residuales, con curvas y conexiones	0.012	0.013	0.016

i. Alcantarillado con batea pavimentada, fondo liso	0.016	0.019	0.020
j. Mampostería de piedra, cementada	0.018	0.025	0.030

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
B. Canales revestidos o desarmables			
B-1. Metal			
a. Superficie lisa de acero			
1. Sin pintar	0.011	0.012	0.014
2. Pintada	0.012	0.013	0.017
b. Corrugado	0.021	0.025	0.030
B-2. No metal			
a. Cemento			
1. Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
b. Madera			
1. Cepillada, sin tratar	0.010	0.012	0.014
2. Cepillada, creosotada	0.011	0.012	0.015
3. Sin cepillar	0.011	0.013	0.015
4. Láminas con listones	0.012	0.015	0.018
5. Forrada con papel impermeabilizante	0.010	0.014	0.017
c. Concreto			
1. Terminado con llana metálica (palustre)	0.011	0.013	0.015
2. Terminado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
3. Pulido, con gravas en el fondo	0.015	0.017	0.020
4. Sin pulir	0.014	0.017	0.020
5. Lanzado, sección buena	0.016	0.019	0.023
6. Lanzado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
7. Sobré roca bien excavada	0.017	0.020	
8. Sobre roca irregularmente excavada	0.022	0.027	
d. Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de			
1. Piedra labrada, en mortero	0.015	0.017	0.020
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.017	0.020	0.024
3. Mampostería de piedra cementada, recubierta	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería de piedra cementada	0.020	0.025	0.030
5. Piedra suelta o riprap	0.020	0.030	0.035
e. Fondo de gravas con lados de			
1. Concreto encofrado	0.017	0.020	0.025
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.020	0.023	0.026
3. Piedra suelta o riprap	0.023	0.033	0.036
f. Ladrillo			
1. Barnizado o lacado	0.011	0.013	0.015
2. En mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g. Mampostería			
1. Piedra partida cementada	0.017	0.025	0.030
2. Piedra suelta	0.023	0.032	0.035
h. Bloques de piedra labrados	0.013	0.015	0.017
i. Asfalto			

3. Liso	0.013	0.013	
4. Rugoso	0.016	0.016	
j. Revestimiento vegetal	0.030	……..	0.500

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
C. Excavado o dragado			
a. En tierra, recto y uniforme			
1. Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de exposición a la intemperie	0.018	0.022	0.025
3. Con gravas, sección uniforme, limpio	0.022	0.025	0.030
4. Con pastos cortos, algunas malezas	0.022	0.027	0.033
b. En tierra, serpenteante y lento			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pastos, algunas malezas	0.025	0.030	0.033
3. Malezas densas o plantas acuáticas en cañales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Fondo en tierra con lados en piedra	0.028	0.030	0.035
5. Fondo pedregoso y bancas con malezas	0.025	**0.035**	0.040
6. Fondo en cantos rodados y lados limpios	0.030	0.040	0.050
c. Excavado con pala o dragado			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Matorrales ligeros con las bancas	0.035	0.050	0.060
d. Cortes en roca			
1. Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2. Afilados e irregulares	0.035	0.040	0.050
e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar			
1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120
2. Fondo limpio, matorrales en los lados	0.040	0.050	0.080
3. Igual, nivel máximo de flujo	0.045	0.070	0.110
4. Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140
D. Corrientes naturales			
D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies			
a. Corrientes en planicies			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes ý secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080

8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			

Tipo de canal y descripción	**Mínimo**	**Normal**	**Máximo**
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
d. Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 1OO pies). Ei valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen residencia menos efectiva			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025	……	0.060
b. Sección irregular y rugosa	0.035	……	0.100

Tabla 11 Coeficientes de rugosidad de Manning Fuente: (Chow, 1994, págs. 108-111)

ANEXO 2. DESARROLLO DEL ALGORITMO

SECCIÓN CUADRADA - Yn

```
SECCIÓN CUADRADA - Yn

Function Yn(Qreal, b, n, S, g, Tol)

Dim contador, Yi, Yii, Error, A, P, R, Qi, Factor

Yi = 1

contador = 0

While (contador = 0)

   A = b * Yi

   P = b + 2 * Yi

   R = A / P

   Qi = (1 / n) * (R ^ (2 / 3)) * (S ^ (1 / 2)) * (A)

   Factor = ((5 * b) / (3 * A)) - (4 / (3 * P))

   Yii = Yi - ((Qi - Qreal) / (Qi * Factor))

   Error = Abs(Qi - Qreal)

   If (Error <= Tol) Then

      Yn = Yii

      contador = contador + 1

      Else

         contador = contador + 0

         Yi = Yii

   End If

Wend

End Function
```

SECCION TRIANGULAR - Yn

```
Function Yn(Qreal, z, n, S, g, Tol)
Dim contador, Yi, Yii, Error, A, P, R, Qi, Factor
//No se necesita un proceso iterativo para obtener la profundidad normal en canales triangulares
//Sin embargo aquí se coloca a manera de ejemplo.
Yi = 1
contador = 0
While (contador = 0)
   A = z * Yi ^ 2
   P = 2 * Yi * (1 + z ^ 2) ^ (1 / 2)
   R = A / P
   Qi = (1 / n) * (R ^ (2 / 3)) * (S ^ (1 / 2)) * (A)
   Factor = ((10 * Yi * z ^ 2) / (3 * A)) - ((4 * (z ^ 2 + 1) ^ (1 / 2)) / (3 * P))
   Yii = Yi - ((Qi - Qreal) / (Qi * Factor))
   Error = Abs(Qi - Qreal)
   If (Error <= Tol) Then
      Yn = Yii
      contador = contador + 1
      Else
         contador = contador + 0
         Yi = Yii
   End If
Wend
End Function
```

SECCION TRAPEZOIDAL - Yn

```
Function Yn(Qreal, b, z, n, S, g, Tol)
Dim contador, Yi, Yii, Error, A, P, R, Qi, Factor
Yi = 1
contador = 0
While (contador = 0)
   A = (b + z * Yi) * Yi
   P = b + 2 * Yi * ((1 + (z ^ 2)) ^ (1 / 2))
   R = A / P
   Qi = (1 / n) * (R ^ (2 / 3)) * (S ^ (1 / 2)) * (A)
   Factor = ((5 * ((2 * Yi * z) + b)) / (3 * A)) - ((4 * ((1 + (z ^ 2)) ^ (1 / 2))) / (3 * P))
   Yii = Yi - ((Qi - Qreal) / (Qi * Factor))
   Error = Abs(Qi - Qreal)
   If (Error <= Tol) Then
      Yn = Yii
      contador = contador + 1
      Else
         contador = contador + 0
         Yi = Yii
   End If
Wend
End Function
```

SECCION CIRCULAR – Yn – Con respecto a Y

```
Function Yn(Qreal, d, z, n, S, g, Tol)

Dim Dlleno, contador, Yi, Yii, Error, A, P, R, Qi, Factor, fac, fac1, teta


Dlleno = (((Qreal * n) / (S ^ (1 / 2))) ^ (3 / 8)) * (((4 ^ (5 / 3)) / (4 * Atn(1))) ^ (3 / 8))

Yi = d / 2

If (d <= Dlleno) Then

   Yn = "El conducto no puede contener el flujo. Incremente el diámetro o disminuya el  caudal"

   Else

      contador = 0

      While (contador = 0)

      fac = (1 - 2 * (Yi / d))

      'fac es el angulo interno de teta=2+cos (fac)

      teta = 2 * (Atn(-fac / Sqr(-fac * fac + 1)) + 2 * Atn(1))

      A = (1 / 8) * (teta - Sin(teta)) * d ^ 2

      P = (1 / 2) * teta * d

      R = A / P

      Qi = (1 / n) * (R ^ (2 / 3)) * (S ^ (1 / 2)) * (A)

      Factor = ((5 / (3 * A)) * (((-Cos(teta) + 1) / (2 * Sqr(1 - fac ^ 2))) * d)) - (4 / (3 * P * Sqr(1 - fac ^
2)))

      Yii = Yi - ((Qi - Qreal) / (Qi * Factor))

      Error = Abs(Qi - Qreal)

         If (Error <= Tol) Then

            Yn = Yii

            contador = contador + 1

         Else

            contador = contador + 0
```

```
            Yi = Yii
          End If
        Wend
End If
End Function
Function ArcCos(x As Double) As Double
' Arcocoseno
   ArcCos = Atn(-x / Sqr(-x * x + 1)) + 2 * Atn(1)
End Function
```

SECCION CIRCULAR – Yn – Con respecto a θ

```
Function Yn(Qreal, d, z, n, S, g, Tol)
Dim Dlleno, teta, contador, A, P, dA, dP, Factor, Qi, tetaii, Ea, tetan
            Dlleno = (2 ^ (5 / 4)) * ((Qreal * n) / ((4 * Atn(1)) * (S ^ 0.5))) ^ (3 / 8)
            teta = 4 * Atn(1)
   If (d <= Dlleno) Then
      Yc = "El conducto no puede contener el flujo. Incremente el diámetro o disminuya el  caudal"
      Else
         While (contador = 0)
            A = (1 / 8) * (teta - Sin(teta)) * (d ^ 2)
            P = 0.5 * teta * d
            dA = (1 / 8) * (d ^ 2) * (1 - Cos(teta))
            dP = 0.5 * d
            Factor = ((5 / (3 * A)) * dA) - ((2 / (3 * P)) * dP)
            Qi = (1 / n) * A * ((A / P) ^ (2 / 3)) * (S ^ 0.5)
            tetaii = teta - ((Qi - Qreal) / (Qi * Factor))
            Ea = Abs(tetaii - teta)
```

```
            If (Ea <= Tol) Then
               contador = contador + 1
               tetan = tetaii
            Else
               contador = contador + 0
               teta = tetaii
            End If
         Wend
         Yn = (d / 2) * (1 - Cos(tetan / 2))
   End If
End Function
```

SECCION RECTANGULAR – YC

```
Function Yc(Q, g, b)
Yc = (Q / (b * (g ^ 0.5))) ^ (2 / 3)
End Function
```

SECCION TRIANGULAR – YC

```
Function Yc1(Q, g, b)
Yc1 = ((Q * 2 ^ 0.5) / (Z * g ^ 0.5)) ^ (2 / 5)
End Function
```

SECCION TRAPEZOIDAL – YC

```
Function yc(Qreal, b, z, n, S, g, Tol)
Dim y, contador, A, T, dA, dT, Factor, Qi, yii, Ea
         y = 1
         While (contador = 0)
            A = (b + z * y) * y
            T = b + 2 * z * y
```

```
            dA = 2 * z * y + b
            dT = 2 * z
            Factor = ((3 / (2 * A)) * dA) - ((1 / (2 * T)) * dT)
            Qi = (g * ((A ^ 3) / (T))) ^ (1 / 2)
            yii = y - ((Qi - Qreal) / (Qi * Factor))
            Ea = Abs(yii - y)
            If (Ea <= Tol) Then
               contador = contador + 1
               yc = yii
            Else
               contador = contador + 0
               y = yii
            End If
         Wend
End Function
```

SECCIÓN CIRCULAR – Yc – CON RESPECTO A TETA

```
Function Yc(Qreal, d, z, n, S, g, Tol)
Dim Dlleno, teta, contador, A, T, dA, dT, Factor, Qi, tetaii, Ea, teta
            Dlleno = (2 ^ (5 / 4)) * ((Qreal * n) / ((4 * Atn(1)) * (S ^ 0.5))) ^ (3 / 8)
            teta = 4 * Atn(1)
   If (d <= Dlleno) Then
      Yc = "El conducto no puede contener el flujo. Incremente el diámetro o disminuya el  caudal"
      Else
         While (contador = 0)
            A = (1 / 8) * (teta - Sin(teta)) * (d ^ 2)
            T = (Sin(0.5 * teta)) * d
```

```
            dA = (1 / 8) * (d ^ 2) * (1 - Cos(teta))
            dT = 0.5 * d * Cos(teta / 2)
            Factor = ((3 / (2 * A)) * dA) - ((1 / (2 * T)) * dT)
            Qi = (g * ((A ^ 3) / (T))) ^ (1 / 2)
            tetaii = teta - ((Qi - Qreal) / (Qi * Factor))
            Ea = Abs(tetaii - teta)
            If (Ea <= Tol) Then
               contador = contador + 1
               tetac = tetaii
            Else
               contador = contador + 0
               teta = tetaii
            End If
         Wend
         Yc = (d / 2) * (1 - Cos(tetac / 2))
   End If
End Function
```

CAMBIO DE SECCIÓN RECTANGULAR

```
Function Ycs(y_1, Q, b_1, g, b_2)
Dim a_2, a_1, a_0, Q_0, R_0, D_0, x, teta, x_1, x_2, x_3 As Double
Dim F_0, F_1, F_2, F_3 As Double
Dim Estado, Estado_1, Estado_2, Estado_3 As String
F_0 = Q / ((g * (((b_1 * y_1) ^ 3) / (b_1))) ^ (1 / 2))
If F_0 > 1 Then
   Estado = "Supercritico"
   Else
```

```
        If F_0 < 1 Then
            Estado = "Subcritico"
        End If
End If
a_2 = -(y_1 + (Q ^ 2) / (2 * ((b_1) ^ 2) * ((y_1) ^ 2) * g))
a_1 = 0
a_0 = (Q ^ 2) / (2 * ((b_2) ^ 2) * g)
Q_0 = ((3 * (a_1)) - ((a_2) ^ 2)) / (9)
R_0 = ((9 * (a_2) * (a_1)) - (27 * (a_0)) - (2 * (a_2) ^ 3)) / (54)
D_0 = ((Q_0) ^ 3) + ((R_0) ^ 2)
If (D_0 < 0) Then
x = (R_0) / ((-(Q_0) ^ 3) ^ (1 / 2))
teta = Atn(-x / Sqr(-x * x + 1)) + 2 * Atn(1)
x_1 = 2 * ((-(Q_0)) ^ (1 / 2)) * Cos((teta) / 3) - ((a_2) / 3)
x_2 = 2 * ((-(Q_0)) ^ (1 / 2)) * Cos((teta + 2 * (4 * Atn(1))) / 3) - ((a_2) / 3)
x_3 = 2 * ((-(Q_0)) ^ (1 / 2)) * Cos((teta + 4 * (4 * Atn(1))) / 3) - ((a_2) / 3)
If (x_1 > 0) Then
    F_1 = Q / ((g * (((b_2 * x_1) ^ 3) / (b_2))) ^ (1 / 2))
        If F_1 > 1 Then
            Estado_1 = "Supercritico"
                Else
                    If F_1 < 1 Then
                        Estado_1 = "Subcritico"
                    End If
        End If
    Else
```

```
        Estado_1 = "Solución negativa"
End If
If (x_2 > 0) Then
    F_2 = Q / ((g * (((b_2 * x_2) ^ 3) / (b_2))) ^ (1 / 2))
        If F_2 > 1 Then
            Estado_2 = "Supercritico"
            Else
                If F_2 < 1 Then
                    Estado_2 = "Subcritico"
                End If
        End If
    Else
        Estado_2 = "Solución negativa"
End If
If (x_3 > 0) Then
    F_3 = Q / ((g * (((b_2 * x_3) ^ 3) / (b_2))) ^ (1 / 2))
    If F_3 > 1 Then
        Estado_3 = "Supercritico"
        Else
            If F_3 < 1 Then
                Estado_3 = "Subcritico"
            End If
    End If
    Else
        Estado_3 = "Solución negativa"
End If
```

```
If (Estado = Estado_1) Then
   Ycs = x_1
   Else
      If (Estado = Estado_2) Then
         Ycs = x_2
         Else
            If (Estado = Estado_3) Then
               Ycs = x_3
            End If
      End If
End If
Else
   If (D_0 > 0) Then
      Ycs = "Existe una raíz real y dos son complejas"
      Else
         If (D_0 = 0) Then
            Ycs = "Todas las raices son reales y al menos dos son iguales"
         End If
   End If
End If
End Function
```

ANEXO 3. PROGRAMA EN VBA

UNIVERSIDAD DE LA COSTA	NORMAS PARA LA ENTREGA DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO A LA UNIDAD DE INFORMACION	VERSION: 02
		FECHA: Junio 2012
		CODIGO:DOC-VACRE-NETGUDI

ANEXO 1
CARTA DE ENTREGA Y AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO

Barranquilla, Fecha

Marque con una X
Tesis ☐ **Trabajo de Grado** ☒

Yo Kevin David García Alvarado, identificado con C.C. No. 1140264617, actuando en nombre propio y como autor de la tesis y/o trabajo de grado titulado Creación de una herramienta informática para el calculo de la profundidad normal y crítica como parametro de diseño en canales presentado y aprobado en el año 2016 como requisito para optar al título de Ingeniero Civil;

hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (DVD) y autorizo a la UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento.

Y autorizo a la Unidad de información, para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad de la Costa, CUC, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web de la Facultad, de la Unidad de información, en el repositorio institucional y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la institución y Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato DVD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

El AUTOR - ESTUDIANTES, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad ante la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL ESTUDIANTE - AUTOR, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos, la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Barranquilla D.E.I.P., a los 16 días del mes de Agosto de Dos Mil 2016.

EL AUTOR - ESTUDIANTE. Kevin David García Alvarado
FIRMA

...facilitara la ... este rotulado ...

UNIVERSIDAD DE LA COSTA	NORMAS PARA LA ENTREGA DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO A LA UNIDAD DE INFORMACION	VERSION: 02 FECHA: Junio 2012 CODIGO:DOC-VACRE-NETGUDI

ANEXO 2
FORMULARIO DE LA DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS O TRABAJO DE GRADO:

Creación de una herramienta informática para el cálculo de la profundidad normal y crítica como parámetro de diseño de canales abiertos

SUBTÍTULO, SI LO TIENE:

AUTOR AUTORES

Apellidos Completos	Nombres Completos
García Alvarado	Kevin Ed David

DIRECTOR (ES)

Apellidos Completos	Nombres Completos
/	

JURADO (S)

Apellidos Completos	Nombres Completos
OSORIO GARCÍA	CAMILO ARTURO

ASESOR (ES) O CODIRECTOR

Apellidos Completos	Nombres Completos
MESTRA RODRIGUEZ	GERALD LEONIDAS

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA: Pregrado X Especialización ___

NOMBRE DEL PROGRAMA Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD DE LA COSTA	NORMAS PARA LA ENTREGA DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO A LA UNIDAD DE INFORMACION	VERSION: 02 FECHA: Junio 2012 CODIGO:DOC-VACRE-NETGUDI

CIUDAD: Barranquilla **AÑO DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO:** 2016

NÚMERO DE PÁGINAS 75

TIPO DE ILUSTRACIONES:

- [x] Ilustraciones
- [ ] Láminas
- [ ] Retratos
- [x] Tablas, gráficos y diagramas
- [ ] Planos
- [ ] Mapas
- [ ] Fotografías

MATERIAL ANEXO (Vídeo, audio, multimedia o producción electrónica):
Duración del audiovisual: _____ minutos.

Número de casetes de vídeo: _____ Formato: VHS ___ Beta Max ___ ¾ ___ Beta Cam ____

Mini DV ____ DV Cam ____ DVC Pro ____ Vídeo 8 ____ Hi 8 ____

Otro. Cuál? _____

Sistema: Americano NTSC _____ Europeo PAL _____ SECAM _____

Número de casetes de audio: _____

Número de archivos dentro del DVD (En caso de incluirse un DVD diferente al trabajo de grado):

_____

PREMIO O DISTINCIÓN *(En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial)*:

_____

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS: Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. (*En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Unidad de Procesos Técnicos de la Unidad de información en el correo biblioteca@cuc.edu.co, donde se les orientará).*

ESPAÑOL	INGLÉS
Profundidad normal	Normal Depth
Profundidad crítica	Critical Depth
Hidraulica de canales abiertos	Open channel hydraulics

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS:(Máximo 250 palabras-1530 caracteres):

RESUMEN

En este proyecto se crea una herramienta informática en VBA (Excel) para el cálculo de la profundidad normal y crítica en canales abiertos de sección rectangular, triangular, trapezoidal y circular. Así también se desarrolló un módulo para el cálculo de la profundidad normal en un canal de sección rectangular cuando ocurre un cambia de sección en planta. Para ello se recurrió a las ciencias básicas, como es el cálculo diferencial, para obtener las derivadas de cada función generada, a la programación y métodos numéricos, para la solución de ecuaciones matemáticas de grados superiores y creación de un código en el lenguaje de VBA, a través de una interfaz para el ingreso y resultado de datos.

Palabras Claves: canales abiertos, profundidad normal, profundidad crítica, sección rectangular, sección triangular, sección circular.

ABSTRACT

In this project is created computer tool in VBA (Excel) for calculating normal and critical depth in open rectangular, triangular, trapezoidal and circular channels. And a module for calculating normal depth in a rectangular section channel is also developed when a change occurs ground plan section. For this it turned to the basic sciences, such as differential calculus, to obtain the derivative of each function that was generated, the programming and numerical methods for solving mathematical equations of higher degrees and finally, the creatiation code in the language of VBA through an interface for data entry and result.

Keywords: open channels, normal depth, critical depth, rectangular section, triangular section, circular section.

UNIVERSIDAD DE LA COSTA	LICENCIA Y AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA PUBLICAR Y PERMITIR CONSULTA Y USO	VERSION: 01
		FECHA: OCTUBRE 2015
		CODIGO:DOC-VACRE-FLAPCU

LICENCIA Y AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA PUBLICAR Y PERMITIR CONSULTA Y USO

Barranquilla, Fecha: 16 de agosto del 2016

Parte 1. Términos de la Licencia general para publicación de obras en el repositorio institucional

i. La vigencia es a partir de la fecha en que se incluye en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad con una antelación de dos meses antes de la correspondiente prórroga.

ii. El Autor / Los autores:

- Autorizan a la corporación Universidad de la Costa - CUC para publicar la obra en el formato que el repositorio lo requiera (impreso, digital, electrónico o cualquier otro conocido o por conocer) y conocen que dado que se publica en Internet por este hecho circula con un alcance mundial.
- Aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto renuncian a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente Licencia y de la Licencia Creative Commons con que se publica.
- Manifiestan que se trata de una obra original y la realizó o realizaron sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, obra sobre la que tiene (n) los derechos que autoriza (n) y que es él o ellos quienes asumen total responsabilidad por el contenido de su obra ante la CORPORACION UNIVERSIDAD DE LA CUC y ante terceros. En todo caso la CORPORACION UNIVERSIDAD DE LA COSTA se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del AUTOR o AUTORES y la fecha de publicación. Para todos los efectos la CORPORACION UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC, actúa como un tercero de buena fé.
- Autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.
- Aceptan que la Corporación Universidad de la Costa pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

SI EL DOCUMENTO SE BASA EN UN TRABAJO QUE HA SIDO PATROCINADO O APOYADO POR UNA AGENCIA O UNA ORGANIZACIÓN, CON EXCEPCIÓN DE LA COPRPORACION UNIVERSIDAD DELA COSTA - CUC, LOS AUTORES GARANTIZAN QUE SE HA CUMPLIDO CON LOS DERECHOS Y OBLIGACIONES REQUERIDOS POR EL RESPECTIVO CONTRATO O ACUERDO.

Parte 2. Autorización para publicar y permitir la consulta y uso de obras en el Repositorio Institucional de la Corporación Universidad de la Costa - CUC

Con base en este documento, Usted autoriza la publicación electrónica, consulta y uso de su obra por la Corporación Universidad de la Costa - CUC y sus usuarios de la siguiente manera, Usted:

- Otorga una (1) licencia especial para publicación de obras en el repositorio institucional de la CORPORACIÓN UNIVERSIDAD De La COSTA - CUC (Parte 1) que

UNIVERSIDAD DE LA COSTA	LICENCIA Y AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA PUBLICAR Y PERMITIR CONSULTA Y USO	VERSION: 01 FECHA: OCTUBRE 2015 CODIGO:DOC-VACRE-FLAPCU

forma parte integral del presente documento y de la que ha recibido una (1) copia.
Si autorizo X **No autorizo**___.

- Autoriza para que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados por Usted, con la Licencia Creative Commons Reconocimiento - No comercial - Sin obras derivadas 2.5 Colombia cuyo texto completo se puede consultar en http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/ y que admite conocer.
  Si autorizo X **No autorizo**___. Si Usted no autoriza para que la obra sea licenciada en los términos expuestos y opta por una opción legal diferente descríbala:_____

EN CONSTANCIA DE LO ANTERIOR:

Tipo de documento:

Artículo____ Libro____ Capítulo de Libro____ Informe / avance de Investigación____ Tesis X

Ponencia / Conferencia____ Video____ Objeto de Aprendizaje____ Otro____

Título de la obra(s):

Creación de una herramienta informática para el calculo de la profundidad normal y crítica como parámetros de diseño de canales abiertos

Autor (es):

Nombre	Firma	C.C.
Kevin David García Alvarado	Kevin García	1140864617

Datos contacto: (teléfono, correo Dirección)

3005708188, kevindavidgr@hotmail.com calle 45B72B15

Fecha entrega (D/M/A): 16 de agosto del 2016