



BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

**DESARROLLO DE MOTOR DE CÁLCULO PARA EL ANÁLISIS DE REDES DE  
ALCANTARILLADO SANITARIO Y PLUVIAL EN CONDUCTOS DE SECCIÓN  
CIRCULAR.**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIATURA EN INGENIERIA EN CIENCIAS  
DE LA COMPUTACIÓN

PRESENTA:

FERNANDO RODRÍGUEZ MENDIETA

ASESOR 1: DRA. ETELVINA ARCHUNDIA SIERRA

ASESOR 2: ING. ALEJANDRO VERULO CASTRO ORTÍZ

PUEBLA PUE., MÉXICO MARZO 2022

## INDICE GENERAL

Dedicatoria.....	1
Agradecimientos .....	2
Resumen.....	3
Capítulo 1. Introducción .....	4
1.1. Planteamiento del problema .....	4
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo principal .....	5
1.2.2. Objetivos específicos .....	5
1.3. Metodología.....	5
1.4. Estructura de la tesis .....	7
Capítulo 2. Antecedentes y estado del arte .....	8
2.1. Estado del arte .....	8
2.2. Alcantarillado .....	10
2.3. Conceptos hidráulicos necesarios para el diseño.....	11
2.4. Fórmulas para el diseño.....	13
2.5. Casos de uso .....	15
Capítulo 3. Análisis y diseño del Motor de cálculo .....	17
3.1. Requerimientos del Motor de cálculo.....	17
3.2. Diagrama y descripción detallada de clases .....	19
3.3. Estructura.....	22
3.4. Datos necesarios para el diseño hidráulico.....	25
3.5. Algoritmos para la obtención de metadatos necesarios para el cálculo hidráulico.....	26
3.5.1. Preparación de la red.....	26
3.5.2. Recorridos .....	27
3.5.3. Algoritmo de prediseño de red.....	30

3.5.4.	Tipos de alineación .....	31
3.6.	Calculo sanitario.....	32
3.6.1.	Calculo por densidad de población .....	32
3.6.2.	Calculo por áreas tributarias .....	32
3.6.3.	Calculo por Unidades drenadas.....	32
3.6.4.	Calculo por gastos puntuales.....	33
3.6.5.	Cálculo de gasto tributario y acumulado.....	33
3.6.6.	Cálculo de coeficiente de Harmon .....	34
3.6.7.	Cálculo de Gastos de diseño .....	34
3.6.8.	Cálculo de Relación de Gastos.....	35
3.7.	Calculo pluvial.....	36
3.7.1.	Método Racional .....	36
3.7.2.	Curvas IDTr .....	39
3.7.3.	Variables regionales.....	40
3.7.4.	Modelo de Cheng-Lung Chen.....	41
3.7.5.	Modelo de F. C. Bell.....	41
3.8.	Optimización de la red.....	41
3.8.1.	Flujo en sección parcialmente llena.....	42
3.8.2.	Velocidades máximas y mínimas permisibles .....	42
3.8.3.	Pendientes .....	43
3.8.4.	Diámetros.....	43
3.8.5.	Algoritmos de alineación y optimización .....	43
Capítulo 4. Resultados de la implementación y evaluación del sistema .....		48
4.1.	Memoria de cálculo .....	48
4.2.	Interfaz para pruebas .....	50
4.3.	Ejecución de pruebas.....	51
4.4.	Análisis comparativo y evaluación.....	53

Capítulo 5. Conclusiones y mejoras a futuro .....	56
Capítulo 6. Referencias .....	58
Anexos .....	60
Lista de Tablas .....	68
Lista de figuras.....	69

# Dedicatoria

*A mis padres Fernando Rodríguez y Alicia Mendieta*

*Por ustedes fue posible.*

# Agradecimientos

*A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por permitirme formarme en algo que me apasiona y vivir una de las mejores etapas de mi vida.*

*A mis profesores quienes sentaron las bases de para poder crecer profesionalmente.*

*A la Doctora Etelvina Archundia por su tiempo, paciencia, y siempre estar pendiente para que este trabajo fuera posible.*

*Al ing. Alejandro Castro por instruirme en esta área, por su paciencia y amistad.*

*A toda la área de ingeniería de Termoplus por ayudarme a crecer profesionalmente y a la vez generar un ambiente de amistad: Arq. Pilar, Ing. Rebeca, Ing. Elizabeth, Ing. David.*

*A mis amigos que durante toda mi etapa universitaria (y lo que va de laboral) confiaron en mí, por ayudarme, por todos los momentos: Adriana, Alberto, Alejandra, Anallely, Antonio, Christian, Helaman, Luis.*

*A mis tíos y primos por siempre estar al pendiente.*

*A mis padres Fernando y Alicia y mis hermanas Carolina y Andrea por todo.*

# Resumen

En este trabajo de tesis se propone realizar un motor de cálculo de redes de alcantarillado sanitario y pluvial, el objetivo principal del motor es facilitar, tanto a desarrolladores como a personas ajenas a las ciencias de la computación (en este caso profesionales de la construcción) una herramienta robusta que, al ser alimentada por los datos especificados, es capaz generar propuestas de diseño de redes de drenaje en zonas urbanas y facilitar revisión de proyectos ya creados mediante memorias de cálculo, aplicando las normativas dadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ya sea para uso personal o didáctico, que además tendrá consideraciones para reducir los volúmenes de obra reduciendo costos de construcción.

Se plantea la conducción de aguas residuales a través de canales de sección circular abiertos y para su medición de gastos se utiliza la fórmula de Manning y para calcular el caudal máximo de descarga se utiliza el Método Racional.

Para representar las redes de alcantarillado se utilizaron grafos dirigidos, al igual que las listas y arreglos de datos para la organización y almacenamiento estos mismos.

El software puede ser dividido en 3 fases la primera es la fase de alimentación de datos, la segunda incluye tanto a la generación de la propuesta de diseño y/o la revisión de esta y por último la salida de datos donde puede tanto acceder a los resultados mediante getters como generar una memoria de cálculo.

El desarrollo de esta herramienta fue realizado en el IDE Visual Studio y el lenguaje de programación C# por su compatibilidad con herramientas externas a las que complementaria este desarrollo.

# Capítulo 1. Introducción.

## 1.1. Planteamiento del problema

Actualmente México se encuentra dentro de las naciones más pobladas del mundo, y aunque su territorio es relativamente grande, el grueso de la población se concentra en las grandes urbes del país y a medida que aumenta la densidad de población la necesidad de extracción de recursos naturales, como es el caso del agua, aumenta acompañada de la impurificación de esta y a su vez del subsuelo, esto conlleva a la destrucción del ecosistema y genera un problema grave de salud pública.

La ingeniería es capaz de utilizar estructuras y acciones para la conducción, almacenamiento y descarga de aguas residuales y pluviales, a lo anterior se le conoce como drenaje urbano, y su uso es imprescindible para la planificación de la urbanización, para el óptimo desarrollo de la población, la protección de su patrimonio, así como para mitigar el daño ecológico y en medida de lo posible devolver a su estado natural el vital líquido.

A lo largo de los años diversos especialistas en hidráulica han estudiado, aportado y cimentado las bases para el drenaje urbano, utilizando modelos matemáticos que toman en cuenta tanto a variables poblacionales como a las que tiene que ver con la geografía del sitio.

En nuestro país la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es el organismo encargado, entre otras cosas, a formular y aplicar lineamientos técnicos y administrativos para el correcto desarrollo de obras hidráulicas, y ha provisto del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS), también se encarga de autorizar los proyectos de infraestructura hidráulica.

Para cumplir los requerimientos que pide CONAGUA los proyectistas utilizan una gama de herramientas disponibles, aunque muchas veces se ven frenados por altísimos costos y la poca flexibilidad que presentan así que optan por construir las suyas, donde ellos al ser ajenos a el área de la programación no les resulta fácil poder implementar estructuras para poder manipular de manera correcta los datos, o al contratar a especialistas en tecnologías de la información se enfrentan a esperar un tiempo considerable para ser programado, a esto común mente se le conoce como curva de aprendizaje, y supone un problema para ingenieros independientes y estudiantes ya que el uso de recursos muchas veces es limitado.

El desarrollo de una herramienta de motor de cálculo para el análisis de redes de alcantarillado sanitario y pluvial en conductos de sección circular que cumpla con las normativas pedidas por el organismo regulador, donde solo sea necesario implementar una interfaz (tan simple o compleja de acuerdo con las necesidades y capacidades del usuario) será de ayuda en el proceso de desarrollo de obras hidráulicas.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo principal

- Desarrollar e implementar un motor de cálculo para la elaboración y análisis de redes de alcantarillado que se adapte a cualquier tipo de herramienta afín.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Estudio de las necesidades de los usuarios finales para la generación de una herramienta verdaderamente útil, tanto en casos generales y particulares.
- Análisis y diseño de una estructura robusta y escalable para representar correctamente un sistema de alcantarillado y procesar de manera óptima la información.
- Aplicar el método basado en MAPAS para el diseño y cálculo del sistema de alcantarillado.
- Diseñar de métodos de fácil configuración para facilitar la conexión entre el motor de cálculo y la interfaz implementada por el usuario.
- Generar memorias de cálculo adecuadas para la revisión del proyecto.

## 1.3. Metodología

- Identificación y análisis de una necesidad

La utilización de herramientas tecnológicas especializadas para la resolución de problemas del mundo real es casi imprescindible en el mundo de hoy en día, y en un campo como la hidráulica, donde la optimización de tiempos es muy importante, y muchas herramientas son de alto costo y las que son gratuitas se no se adaptan a las necesidades de los usuarios, se abre un nicho de oportunidad para crear o complementar herramientas que si satisfacen las necesidades de los usuarios.

- Investigación del estado del arte

Investigar en diversos medios (libros, artículos de revistas especializadas, blogs y personal capacitado) información relevante para entender las necesidades y como son afrontadas actualmente.

- Definición de alcances de proyecto

A partir del estado del arte podremos definir los alcances reales que puede tener el proyecto y así atacar los problemas ya focalizados. En México según la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo, ENOE del 2019 existen 381,245 personas con formación de ingenieros civiles de los cuales el 70% forman parte de la población económicamente activa, todos ellos pueden ser beneficiados con este avance.

- Selección de herramientas

La selección de herramientas es fundamental ya que el motor de cálculo deberá permitir una fácil integración con la mayoría de los sistemas ya existentes en el mercado especializado, con los cuales ya está familiarizado el usuario. Se optó por usar C#.NET por la compatibilidad con herramientas de hojas de cálculo, CATs y GIS.

- Diseño de estructuras de datos

Se optó por implementar una estructura principal basada en grafos, ya que sus características nos permiten obtener los metadatos necesarios para calcular la red.

- Desarrollo de algoritmos

En la primera fase se generarán setters para la alimentación de la red.

La segunda fase constituye la implementación de los modelos matemáticos para el cálculo de gastos en la red.

La tercera incluye tanto setters para la obtención de la información y la creación de métodos que generen memorias de cálculo en formato XLSX.

- Pruebas y resultados

Ya integrado el sistema completo se realizarán diversos ejercicios para la revisión y corrección de los resultados.

## 1.4. Estructura de la tesis

- Capítulo 1. Introducción

Este capítulo muestra la definición de la problemática a resolver, metodología, y objetivos.

- Capítulo 2. Antecedentes y estado del arte

En este capítulo se revisará la situación actual en el país en el proceso de generación de proyectos de infraestructura hidráulica y de cómo esta es abordada, además se describirán los aspectos técnicos más importantes como los tipos de drenaje, también se presentará una introducción de los modelos matemáticos para el cálculo de caudales en conductos de sección circular.

- Capítulo 3. Desarrollo

En desarrollo mostraremos la concepción de la estructura para modelar las redes de alcantarillado, el proceso de implementación de los modelos matemáticos y obtención de metadatos necesarios para poder generar el cálculo y por último revisaremos la utilización de hojas de cálculo para la revisión de resultados.

- Capítulo 4. Resultados y evaluación del sistema

Aquí mostraremos los resultados obtenidos del desarrollo del sistema, y la comparación con una aplicación.

- Capítulo 5. Conclusiones

Para finalizar se muestran las conclusiones y se revisaran las opciones de mejoras y complementos que se podrían agregar en el futuro.

# Capítulo 2. Antecedentes y estado del arte

## 2.1. Estado del arte

El constante crecimiento de las ciudades y la creación de nuevos asentamientos humanos han sumado grandes retos para la ingeniería civil, el uso de nuevas tecnologías ya es un factor de peso para generar proyectos a la velocidad requerida.

En nuestro país otra de las problemáticas fue (y sigue siendo) la falta de coordinación en el país para la planeación y construcción infraestructura hidráulica, hoy en día la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) mediante el Manual de Agua Potable y Alcantarillado (MAPAS) busca homologar mediante recomendaciones y lineamientos las obras de construcción hidráulicas.

El uso de desarrollos de software (de los que hablaremos un poco más adelante) se ha generalizado, aunque la realidad de muchos ingenieros independientes y pequeñas empresas no pueden llegar a aspirar conseguir una licencia de estos, ya que sus elevados costos lo impiden, otras veces recurren a otros desarrollos de uso gratuito pero, ya sea por falta de flexibilidad u otro motivo, no cumplen con sus necesidades.

Muchas veces ellos mismos se generan sus métodos de cálculo utilizando hojas de cálculo, pero su falta de flexibilidad y termina siendo “un traje a medida” que solo es utilizado para algún proyecto en específico.

La comunidad de profesionistas de la construcción ha realizado muchos trabajos de investigación para dar solución a esta problemática, por ejemplo, Miguel Ángel Vicente López presentó su tesis Diseño de una red de drenaje pluvial. Comparación de metodologías (López, 2019), donde analiza una zona de Guerrero utilizando los lineamientos indicados en los manuales de la CONAGUA, después utilizando software Storm Water Management Model (SWMM) revisa y compara las ventajas y desventajas de cada una.

Evaluación, diseño y modelamiento del sistema del drenaje pluvial de la ciudad de Juliaca con la aplicación del software SWMM (Rojas Naira & Humpiri Pari, 2016) fue la tesis presentada por Paolo Cesar Rojas Naira y Vladimir Humberto Humpiri Pari en la Universidad Nacional del Antiplano, realiza un estudio hidrológico y diseña una solución de drenaje pluvial a partir también de SWMM.

Durante los últimos años se han desarrollado varios trabajos interdisciplinarios de computación en conjunto con el área de ingeniería civil, por ejemplo, Pamela Iskra Mejía Estrada publicó su tesis titulada Realización del software PRyDA (Iskra Mejía, 2012) para el diseño o revisión de un tramo de alcantarillado con base en sus condiciones de operación donde se revisa el comportamiento hidráulico a gravedad en un tramo de tubería a partir de descargas sanitarias

Juan Antonio Chompa Abarca de la UNAM publica en el 2018, para obtener su título de Maestro en Ingeniería, publica Diseño de una red de drenaje pluvial mediante un algoritmo de optimización y la revisión de su funcionamiento hidráulico (Chompa Abarca, 2018) donde se utiliza MATLAB para crear un nuevo algoritmo para la optimización de pendientes y diámetros para la disminución de costes.

Actualmente en el mercado existen varios desarrollos, tanto de pago como libres, que están orientados a profesionales de la instrucción, y que además ya están sobre plataformas de dominio común, aquí nombraremos algunos:

El software de pago SewerGEMS® desarrollado por Bentley Systems una empresa de desarrollo enfocada en CAD para construcción, un sistema muy completo que incluye estructuras para análisis de drenaje sanitario y pluvial para usuarios de todo el mundo, que fue desarrollado para tanto para AutoCAD, Bricscad® e inclusive generaron su propio entorno de trabajo independiente.

ADS con su programa ADS PRO® el cual fue desarrollado para la plataforma AutoCAD y se podían utilizar la gama de sus productos.

Otro desarrollo es CivilCAD®, creado por ARQCOM también sobre la plataforma AutoCAD, ZWCAD y Bricscad® PRO, fue creado para el mercado hispano y cuenta con módulos de alcantarillado pluvial y sanitario, así como también de topografía.

Todos los programas anteriormente mencionados ofrecen memorias de cálculo para la revisión del proyecto.

## 2.2. Alcantarillado

Podemos definir el alcantarillado como el conjunto de acciones y estructuras diseñadas para el manejo de aguas residuales y pluviales para su tratamiento y su posterior vertido, y está dividido en 2 grupos: los métodos convencionales y los no convencionales. Dentro de los métodos no convencionales podemos encontrar el alcantarillado simplificado, alcantarillado condominal y alcantarillado a presión, aunque en este trabajo nos centraremos en los métodos convencionales, los cuales son los siguientes:

- Alcantarillado separado: evacua por conductos diferentes a las aguas pluviales y servidas.
- Alcantarillado combinado: las aguas residuales y pluviales son conducidas simultáneamente.

A pesar de ser actualmente una normativa el alcantarillado separado en nuestro país, el combinado sigue siendo la opción más rentable como una solución a corto plazo, no así para el tratamiento del vital líquido y el crecimiento poblacional (Comisión Nacional del Agua, 2009).

En los siguientes segmentos revisaremos más detalladamente los conceptos necesarios para poder llevar a cabo el análisis de alcantarillado.

Existen 2 maneras de conducir líquidos, mediante canales abiertos y cerrados, la principal diferencia es que en canales cerrados el líquido es transportado por presión hidráulica y los conductos deben de estar completamente llenos, mientras que los abiertos deben tener una parte libre de su sección y trabajan por influencia de la presión atmosférica. (Chow, 1994)

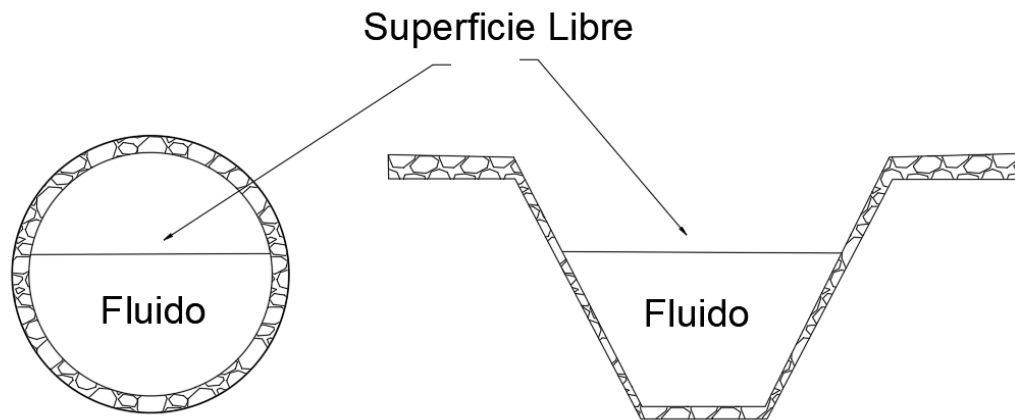
El diseño hidráulico para la conducción es analizado bajo el sistema de superficie libre, y las tuberías seguirán el patrón de pendientes de acuerdo con el terreno en medida de lo posible.

## 2.3. Conceptos hidráulicos necesarios para el diseño

En este apartado revisaremos brevemente los conceptos básicos que se utilizan para el proceso de cálculo.

- Caudal

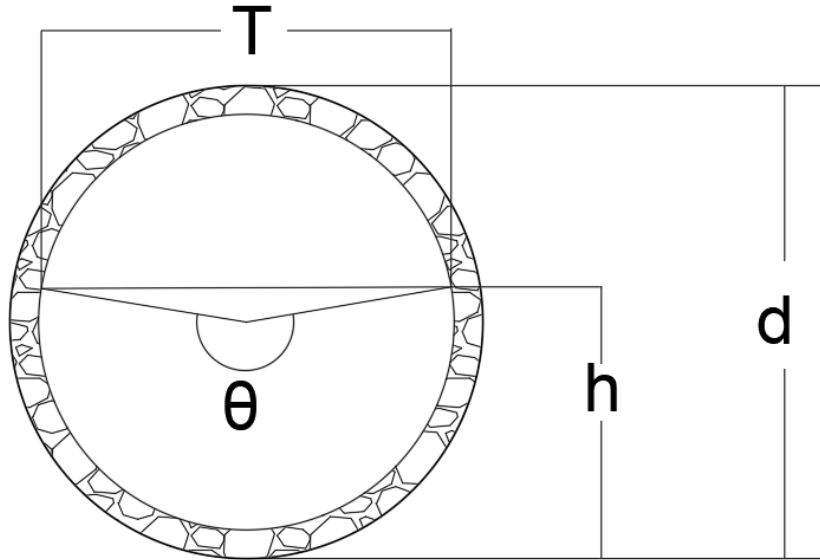
Se denomina caudal al volumen de agua que atraviesa una superficie en un momento determinado, generalmente el volumen del líquido se mide en litros y el tiempo en segundos.



*Figura 1. Canales a superficie libre*

- Canal abierto

Un canal abierto es un conducto por el cual el agua fluye con una superficie libre, de acuerdo a su origen este puede ser natural o artificial, otra forma de clasificar a los canales es mediante la forma que se obtiene al realizar un “corte perpendicular al sentido del flujo” generalmente los canales naturales son de forma irregular (no prismático) a diferencia de los artificiales que suelen ser diseñados de acuerdo a figuras geométricas regulares (prismático), dentro de estas figuras podemos encontrar: trapezoidales, rectangulares, triangulares, parabólicos y circulares, siendo en este último el que utilizaremos para el diseño de este programa. A continuación, revisaremos los elementos de los canales de sección circular.



*Figura 2 Corte transversal de un canal de sección circular*

- a) Tirante de agua (h): también denominado profundidad de flujo es la distancia entre la superficie del agua y el fondo del conducto.
- b) Coeficiente de rugosidad  $n$ : Factor determinado por el material de construcción del canal y representa el grado de resistencia que ofrece en canal.
- c) Área hidráulica: Superficie que es ocupada por el agua en un corte transversal ( $m^2$ ).
- d) Perímetro mojado: Perímetro de la superficie del área hidráulica
- e) Ancho de superficie (T): También llamado espejo de agua es la línea expresada en metros del espejo de agua.
- f) Tirante medio: Es el área hidráulica dividida entre el ancho de superficie libre
- g) Velocidad media: Velocidad con la cual transita el agua por el canal, está expresada en  $m^3/s$ .

## 2.4. Fórmulas para el diseño

Para simplificar el diseño se consideran condiciones de flujo continuo.

- Formula de la continuidad de para flujo continuo

$$Q = V * A$$

Donde:

- $Q$  es el gasto en  $m^3/s$ .
- $V$  es la velocidad en  $m/s$ .
- $A$  es el área transversal del flujo.

- Formula de Manning

$$V = \frac{1}{n} * r_h^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

- $V$  es la velocidad en  $m/s$ .
- $r_h$  es el radio hidráulico, en  $m$ .
- $S$  es la pendiente del gradiente hidráulico de la tubería adimensional.
- $n$  es el coeficiente de fricción.

- Fórmulas para el cálculo de elementos geométricos de sección circular abiertas

$$\theta = 2 * \text{Cos}^{-1} \left( 1 - \frac{d}{r} \right)$$

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

$$P_m = \pi * D * \frac{\theta}{360}$$

$$r_h = r \left( 1 - \frac{360 * \text{sen}(\theta)}{2\pi\theta} \right)$$

$$A = r^2 * \left[ \frac{\pi * \theta}{360} - \frac{\text{sen}(\theta)}{2} \right]$$

Donde:

- $d$  es el tirante hidráulico, en m.
- $D$  es el diámetro interior del tubo, en m.
- $A$  es el área de la sección transversal del flujo, en m<sup>2</sup>
- $P_m$  es perímetro mojado, en m.
- $r_h$  es el radio hidráulico, en m.
- $H$  es el ángulo en grados.

## 2.5. Casos de uso

Durante las etapas de la construcción de software, independientemente de la metodología aplicada, es la comunicación de con el cliente un aspecto fundamental para la definición de los requerimientos del software.

Uno de los estándares de visualización, construcción, especificación y documentación de software, es el Lenguaje de Modelado Unificado (UML) que al ser visual simplifica y facilita la comunicación con el usuario.

Dentro de UML podremos encontrar diversos diagramas para la representación y visualización de un sistema y podemos dividirlos en 2 categorías los diagramas de comportamiento y los de estructura. Los diagramas de casos de uso son diagramas de comportamiento donde se describen las interacciones de que puede realizar el usuario con el sistema desde el punto de vista del usuario, dentro de los diagramas de casos de uso podemos encontrar varios elementos que revisaremos brevemente a continuación (Rumbaugh, Jacobson, & Booch, 2000).

- Actor

Un actor es la idealización de una persona o proceso que de manera externa interactúa con nuestro sistema, en tiempo de ejecución un usuario puede estar limitado a los actores múltiples del sistema, y también diferentes usuarios pueden estar ligados al mismo actor, por tanto pueden ser representados casos múltiples por el mismo actor.

Cada actor puede participar en uno o más casos de uso, su implementación no es relevante ya que es ajeno al sistema, los actores pueden ser definidos por medio de roles y en el diagrama son representados por un dibujo simple de una persona hecha a base de trazos lineales con su nombre indicado en la parte inferior.

- Caso de uso

Un caso de uso puede ser definido como una abstracción de una funcionalidad del sistema externamente visible, esta puede ser expresada por un conjunto de mensajes con otro caso de uso y con otros actores, el propósito de esta es la de definir una función del sistema sin profundizar en el proceso interno de la misma. La definición de un caso de uso incluye las posibles variaciones en el comportamiento del sistema al igual que sus excepciones.

El funcionamiento del caso de uso debe de ser representado de forma independiente de los demás casos de uso, aunque existen casos de dependencias implícitas entre ellas, la funcionalidad de cada caso de uso puede ser especificada por diagramas de secuencia, estado, colaboración o descripciones informales de texto.

Recordemos que un caso de uso define las funcionalidades del sistema, no la construcción del mismo, pero si puede corresponder con las acciones de las clases del sistema, por ende puede asociarse o colaborar con otros casos de uso y con diferentes actores.

Un caso de uso es representado por una elipse en línea recta con su nombre dentro.

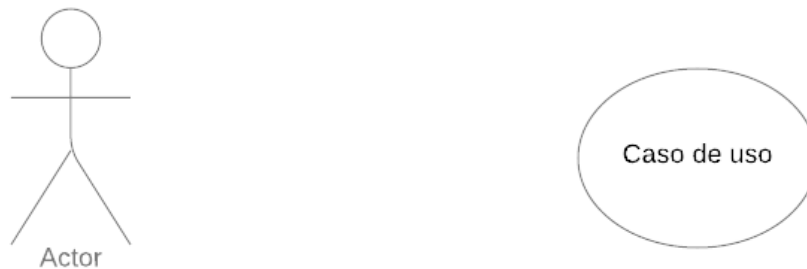


Figura 3. Representación de Actor y caso de uso.

- Tipos de relaciones de casos de uso

Las relaciones entre actores y casos de usos son representadas por una línea simple, para las relaciones que se realizan entre casos de uso se utilizan etiquetas para *incluir* o *extender*.

- *Incluir*: indica un comportamiento adicional al ya indicado en el caso de uso base, donde el comportamiento se describe explícitamente.
- *Extensión*: Al igual que *Incluir* también indica comportamiento adicional, pero en este caso no es necesario que el caso de uso relacionado tenga conocimiento sobre él.
- *Generalización de casos de uso*: Esta relación indica herencia y añade propiedades al caso de uso señalado.
- *Asociación*: Unión de comunicación entre un actor y un caso de uso.

# Capítulo 3. Análisis y diseño del Motor de cálculo

## 3.1. Requerimientos del Motor de cálculo

Para la definición del Motor de cálculo se optó por Casos de uso ya que de manera sencilla se pueden obtener los requerimientos sin confundir al experto en el campo con términos técnicos, describiendo las funcionalidades del sistema con elementos simples como lo son el sistema, el actor, el caso de uso y sus relaciones.

Podemos resumir los casos de uso del Motor de cálculo de la siguiente manera:

- Inicializar el Motor de cálculo.
- Configurar parámetros de la red.  
*Este caso consta de varios métodos para configurar los parámetros necesarios para agregar, eliminar, configurar y revisar la red.*
- Ejecutar cálculo.
- Recuperar resultados del cálculo.  
*Este caso también contiene diversos métodos para obtener los resultados de los diferentes elementos de la red.*
- Generar tablas de calculo
- Recuperar los parámetros de la red.

Con los métodos contenidos en este caso podremos guardar configuraciones y elementos del estado actual de la red.

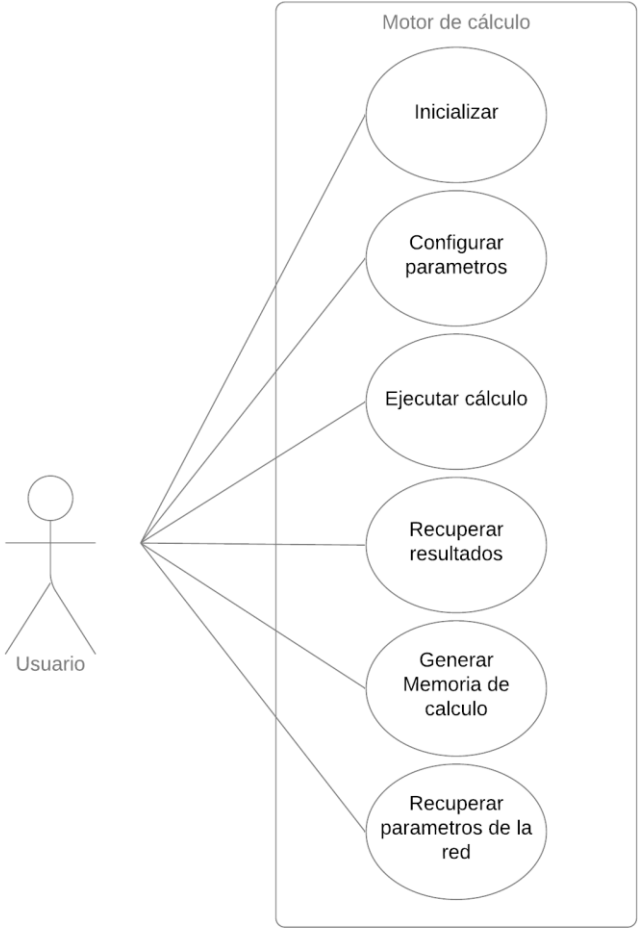


Figura 4. Diagrama de casos de uso (simplificado)

### 3.2. Diagrama y descripción detallada de clases

A continuación, se presenta un diagrama de clases simplificado dada la extensión del documento, en el apartado Anexos se podrá ver el contenido completo de las clases aquí descritas.

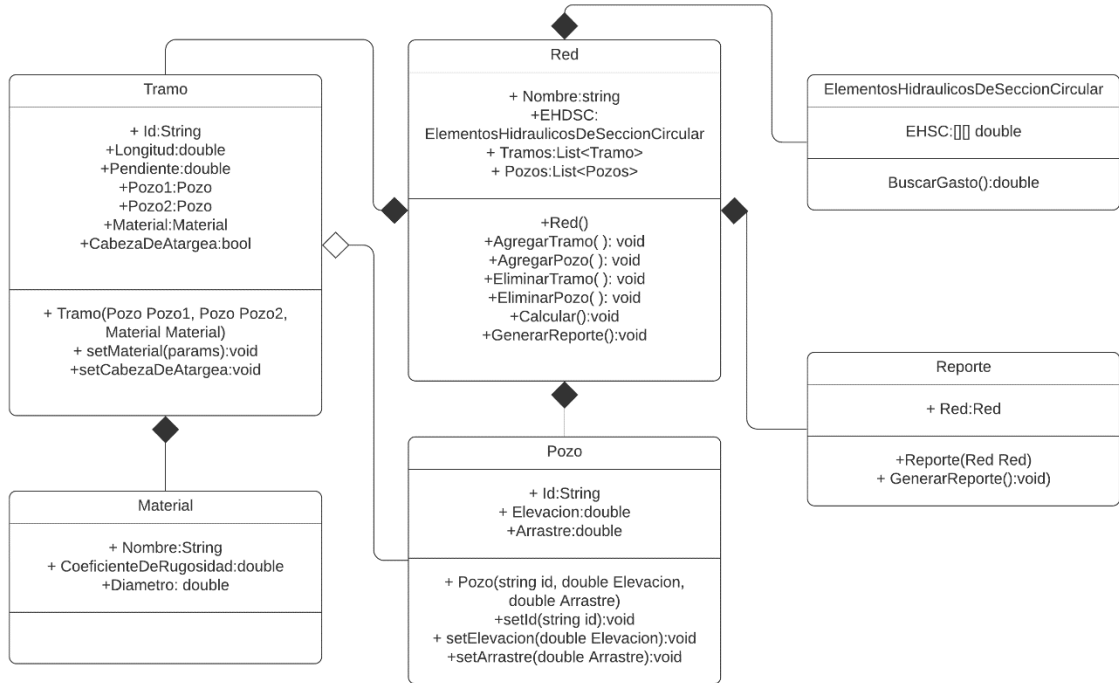


Figura 5. Diagrama de clases (simplificado)

#### Descripción de clases

Nombre Clase	Red
Descripción	Clase que representa una Red Sanitaria que está compuesta por tramos y pozos.
Atributos	Pozos: Lista<Pozo> Tramos: Lista<Tramo>
Métodos	<b>Red(): void</b> Constructor de la clase <b>AgregarPozo(): void</b> Asocia un pozo creado con la red <b>AgregarTramo(): void</b>

	<p>Inserta un nuevo tramo a la red</p> <p><b>EliminarPozo(): void</b></p> <p>Función que elimina un pozo de la red, teniendo varias restricciones.</p> <p><b>EliminarTramo(): void</b></p> <p>Función que elimina un tramo, tomando en cuenta todas las posibles relaciones entre Pozo y Tramo.</p>
--	---

<b>Nombre Clase</b>	<b>Pozo</b>
<b>Descripción</b>	Clase que representa un pozo en una red.
<b>Atributos</b>	<p>Id: int</p> <p>Arrastre: double</p> <p>Elevacion: double</p> <p>Profundidad: double</p>
<b>Métodos</b>	<p><b>Pozo()</b></p> <p>Constructor de la clase</p> <p><b>setElevacion():void</b></p> <p><b>setArrastre():void</b></p>

<b>Nombre Clase</b>	<b>Tramo</b>
<b>Descripción</b>	Clase que representa un tramo en una red sanitaria.
<b>Atributos</b>	<p>Pozo1: Pozo</p> <p>Pozo2: Pozo</p> <p>Longitud: double</p> <p>Pendiente: double</p> <p>Material: Material</p>
<b>Métodos</b>	<p><b>Tramo()</b></p> <p><b>setMaterial(): void</b></p> <p><b>setCabezaDeAtargea():void</b></p>

<b>Nombre Clase</b>	<b>Reporte</b>
<b>Descripción</b>	Clase que genera memoria de cálculo del sistema

<b>Atributos</b>	Red
<b>Métodos</b>	<b>Reporte()</b> Constructor de la clase <b>GenerarReporte()</b> Genera memoria de cálculo del sistema

<b>Nombre Clase</b>	<b>ElementosHidraulicosDeSeccionCircular</b>
<b>Descripción</b>	Clase que representa un tramo en una red sanitaria.
<b>Atributos</b>	EHSC: [[]] double
<b>Métodos</b>	<b>ElementosHidraulicosDeSeccionCircular ()</b> Constructor de la clase. <b>BuscarGasto(): void</b> Devuelve el factor de acuerdo con el gasto usado

### 3.3. Estructura

La finalidad principal de una red de drenaje es la de transportar agua, para llevar esto a cabo utiliza (entre otros) dos elementos principales los cuales son *Pozos de visita* y *Tramos*.

- Pozos de visita

Los *Pozos de visita* son estructuras que se encuentran en los crucesos de la red es decir donde convergen dos o más tramos, permiten los cambios de dirección, la pendiente y diámetro de las tuberías, sirven como ventilación permiten acceso para el mantenimiento de la red, esta estructura tiene forma de chimenea vertical y su acceso debe de colocarse a la altura del piso.

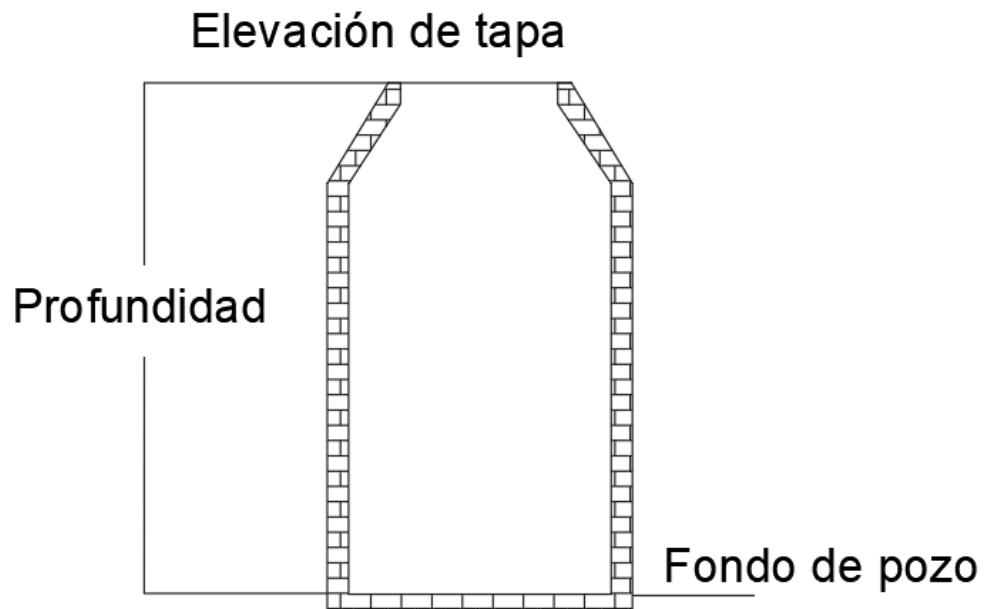


Figura 6. Pozo de visita

- Tramos

Los *Tramos* son las tuberías de sección circular y podríamos definirlos como los segmentos lineales de la red. Su función es la de transportar el agua, existen diferentes diámetros y materiales que de acuerdo a sus características nos permitirán modelar el comportamiento de la red.

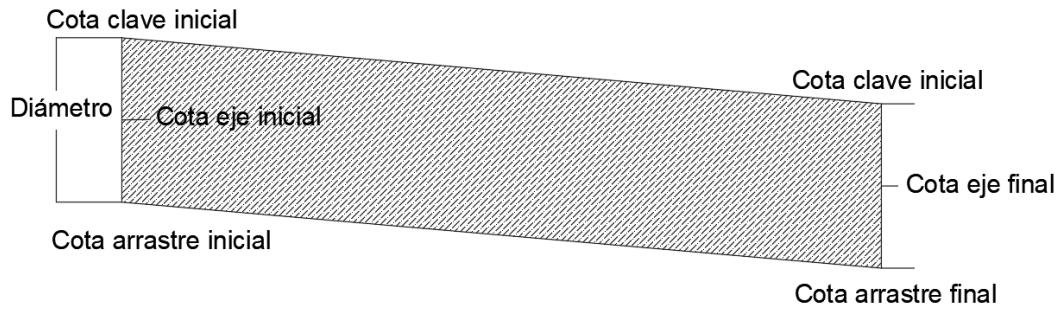


Figura 7. Tramo

Dentro de los tramos podríamos agregar una característica importante llamada cabeza de atarjea, que marcaría un reinicio de acumulación de gastos de ese tramo (pudiendo dar al pozo la propiedad de descarga), estas pueden ser indicadas por el usuario como propiedad o calculadas internamente por el motor de cálculo para evitar ciclos dentro de la red ya que por característica este software contempla una sola salida por pozo de visita, es decir que a pesar de que de un nodo emanen N tramos solo uno podrá continuar con la acumulación del gasto vertido en el pozo.

Existen otros elementos accesorios como las uniones, tapas, albañales, brocales, entre otros, aunque no son tomados en cuenta para la construcción de la estructura ya que no tienen gran impacto en el cálculo de la red, aunque si en los volúmenes de obra (véase Mejoras en el capítulo 5).

Es muy fácil percibir la similitud de una red de drenaje con un grafo dirigido, su equivalencia entre los Vértices - Pozos de visita y Aristas – Tramos nos permiten representar el problema de manera adecuada y analizarlo con la teoría de grafos, a continuación revisaremos solo las características utilizadas para el diseño de la estructura de la red ya que el tema es muy extenso.

- Teoría de grafos

Podríamos definir a un grafo (G) como un par de conjuntos de vértices y aristas expresado de la siguiente manera (A. Duán, 2008):

$$(V(G), E(G))$$

Donde:

V(G) Conjunto finito de vértices del grafo

$E(G)$  Conjunto de Pares no ordenados de vértices.

Decimos que  $G$  es un dígrafo o grafo dirigido si las aristas están dadas por un conjunto de pares ordenados de vértices,

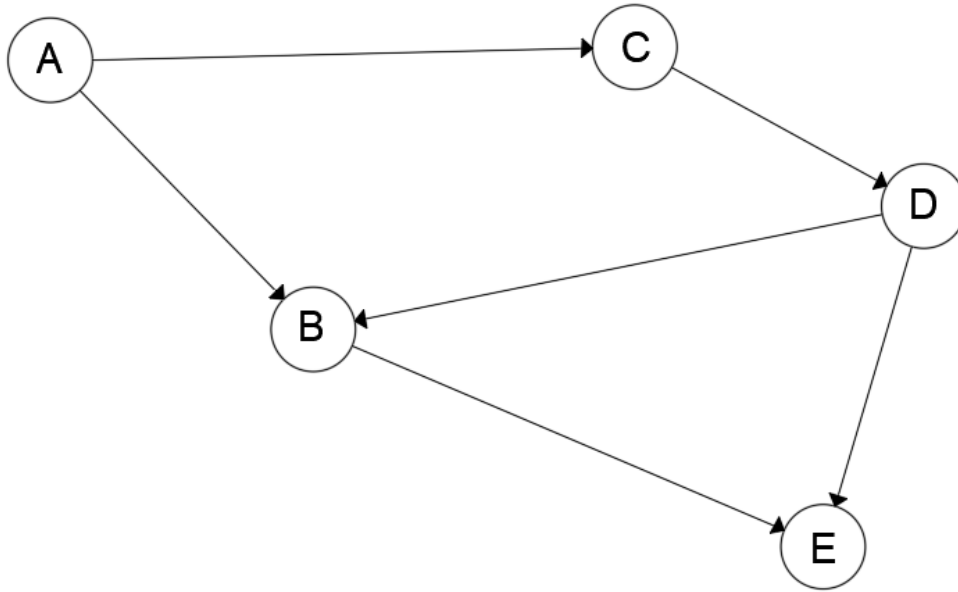


Figura 8. Ejemplo de grafo dirigido

El vecindario de un vértice  $v$  en un grafo  $G$  es el conjunto  $N_G(v)$  que consiste en todos los vértices adyacentes a  $v$

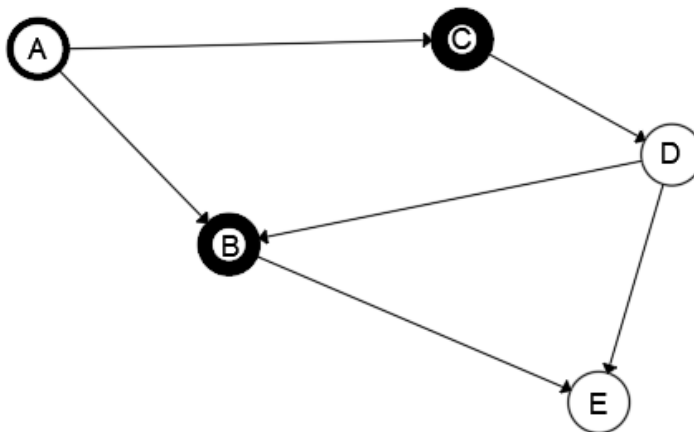


Figura 9. Nodos vecinos a nodo A

Grafo conexo

Se le conoce como grafo conexo al grafo donde todos sus vértices están unidos por alguna arista.

Distancia

Un camino es una secuencia de vértices distintos

$$P = v_1, v_2, \dots, v_k$$

Donde:

$$(v_i, v_{i+1}) \in E(G)$$

La longitud de un camino se mide por la cantidad de aristas que lo componen, la distancia entre dos vértices  $v$  y  $w$  en  $G$  es la longitud del camino más corto entre  $v$  y  $w$  en  $G$  y se denota

$$d_G(v, w)$$

### 3.4. Datos necesarios para el diseño hidráulico

El proceso de cálculo hidráulico, como podemos ver en la Figura 10. Diagrama de flujo para el cálculo (Comisión Nacional del Agua, 2009) el primer paso es la determinación de datos básicos, sin profundizar mucho en el tema podemos resumir en 4 partes los datos básicos:

- Población del proyecto

El número de habitantes para el cual se diseñará la red, generalmente se utilizan métodos para realizar un estimado del número de habitantes que habrá a  $N$  años y sobre él se diseñará la red.

- Dotación

La dotación es la cantidad de agua potable que utiliza un habitante, dependiendo de la zona y región socioeconómica esta puede variar.

- Aportación

La aportación es un porcentaje de la dotación, diversos autores hablan de entre el 70 y 75 por ciento de dotación de agua potable, ya que no toda el agua consumida va a llegar a las atarjeas.

- Elevaciones de terreno

Se deben conocer las elevaciones de terreno en cada pozo de visita, estas guiarán el recorrido de la red, utilizando la pendiente natural del terreno, y en dado caso que se diseñe en contra pendiente se utilizarán las variables de pendiente mínima para la optimización de la red.

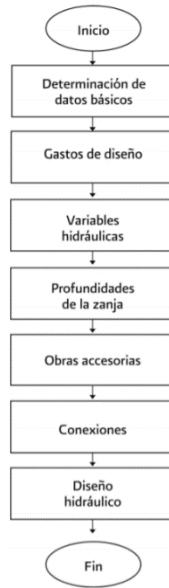


Figura 10. Diagrama de flujo para el cálculo hidráulico

### 3.5. Algoritmos para la obtención de metadatos necesarios para el cálculo hidráulico

#### 3.5.1. Preparación de la red

La representación de una red de drenaje urbano es representada por un grafo dirigido, pero con características particulares, cada vértice representa a un pozo y cada arista a un tramo, podemos dividir a los pozos en 3 categorías para efectos del cálculo, la primera son los pozos iniciales y se caracterizan por ser el inicio de la red, las uniones que solo son cruces o puntos de convergencia y las descargas aunque un mismo pozo puede comportarse de las 3 formas dependiendo del tramo al que se refiera.

Al ser un grafo dirigido cada tramo o arista solo tiene un sentido teniendo, así un pozo inicial y un pozo final.

La principal función de la red es llevar agua de un punto *A* a un punto *B*, podemos llamar a *A* inicio y a *B* descarga, el agua puede recorrer uno o más tramos para llegar a una descarga, para poder identificar una descarga hay 2 formas, la primera es muy intuitiva ya que es un vértice al cual llegan o convergen varios tramos pero inicia ninguno y la segunda es que a pesar de que si emanen de él otros tramos todos ellos posean la característica de cabeza de atarjea.

Para reconocer los inicios de la red, al igual que las descargas también poseen 2 características con las que los podemos identificarlos, la primera es que ningún tramo apunta hacia él y la segunda es que a pesar de que exista alguna convergencia sea una cabeza de atarjea.

A diferencia de una red de agua potable una red de drenaje no puede contener ciclos dentro de la misma, como anteriormente se mencionó se utilizan las cabezas de atarjea para poder evitar la duplicación de gastos en los tramos. Si en un pozo existieran dos o más salidas y no estuviesen indicadas las cabezas de atarjea internamente se asignarán teniendo como principal criterio de diferencia la pendiente de los tramos, tomando como salida aquel tramo que tenga la mayor pendiente.

### 3.5.2. Recorridos

En la Figura 11. *Representación de una red* podemos observar varios de los elementos que conforman una red, representados como círculos podemos encontrar a los pozos, las líneas que los unen las llamamos tramos, podemos identificar otras figuras como las flechas que solo nos indican el sentido del flujo del agua.

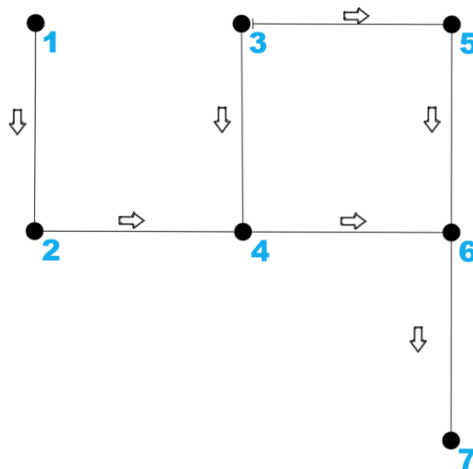


Figura 11. Representación de una red

Analizando la red podemos observar que los nodos 1 y 3 son nodos iniciales ya que ningún tramo apunta hacia ellos y en el tramo  $3 \rightarrow 5$  está indicada una cabeza de atarjea, también podemos ver que solo el pozo número 7 es el de descarga. El recorrido aguas abajo es muy simple, partiendo de los pozos iniciales serían los siguientes:

$1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 7$  y  $3 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7$

Para el recorrido aguas arriba utilizaremos el recorrido de grafos en profundidad, utilizando los sentidos inversos de los tramos, es decir sus anteriores, este algoritmo nos será de especial utilidad para realizar acumulaciones que revisaremos más adelante.

El árbol generado se puede expresar de esta manera:

$7 \rightarrow 6$

Después del 6 tenemos 2 ramas que expresamos de esta manera:

$6 \rightarrow 5 \rightarrow 3$

$6 \rightarrow 4$

A partir de este punto se vuelve a dividir de la siguiente forma:

$4 \rightarrow 3$

$4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$

Recorriendo así en su totalidad la red.

- Ejemplos de los diferentes casos de pozos y su comportamiento

Es muy importante en el diseño de la red el identificar los pozos iniciales, y en el caso más común, como mencionamos anteriormente, solo es necesario revisar que ningún pozo apunte hacia ellos, pero existen también las cabezas de atarjea, que pueden funcionar tanto como pozos iniciales y descargas según sea el caso.

En la siguiente figura podemos observar que los pozos 1, 9, 5 no son apuntados por ningún otro pozo, y que los pozos 3 y 4 tienen indicada una cabeza de atarjea por lo tanto todos ellos serían pozos iniciales.

El hecho de tener indicada una cabeza de atarjea también puede considerarse como una descarga o salida de la red, como es el caso de el pozo numero 4 ya que en el terminan los tramos  $3 \rightarrow 4$  y  $5$

→ 4 pues no tienen otra salida y el tramo 4 → 6 solo acumulara los gastos que sean asignados sobre él.

El caso del pozo numero 3 es distinto, ya que a pesar de tener asignada una cabeza de atarjea solo funciona como pozo inicial (en el tramo 3 → 4) y normal en el resto de los casos, pues en el tramo 3 → 7 tiene salida.

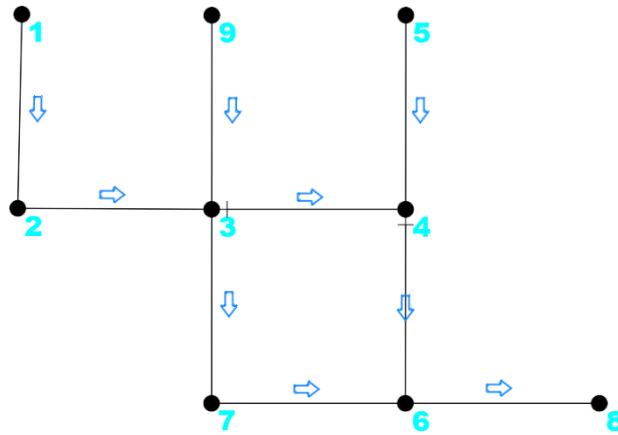


Figura 12. Ejemplo de Red con cabezas de atarjea

### 3.5.3. Algoritmo de prediseño de red

Antes de procesar los datos y poder generar el diseño de la red primero debemos de realizar un prediseño, que utilizando las variables de *pendiente mínima* y *colchón mínimo* podemos realizar, este prediseño podemos describirlo como el recorrido óptimo de la red, y le agregamos el *pre* por no tomar en cuenta los gastos, diámetros de tubería y las alineaciones de la misma.

Podemos describir mejor este algoritmo como la creación de una línea imaginaria en la cual se basará el algoritmo de optimización y el de diseño para sus resultados.

EL primer paso será la asignación del colchón mínimo (profundidad mínima a la que debe de insertarse un tubo) a todos los pozos de visita, después se calculará la pendiente con el siguiente nodo, si la pendiente es igual o mayor a la pendiente mínima se continua, si no se calcula el siguiente punto que cumpla con la pendiente mínima. Para ejemplificar esto utilizaremos una pendiente mínima de 10 m/km (se exagera para fines ilustrativos), un colchón mínimo de 90 centímetros y 4 tramos de 5 metros de longitud, los pozos tendrán la siguiente elevación expresada en metros sobre el nivel del mar:

- 1 - 100 msnm.
- 2 - 99 msnm.
- 3 - 99 msnm.
- 4 - 101 msnm.
- 5 - 98 msnm.

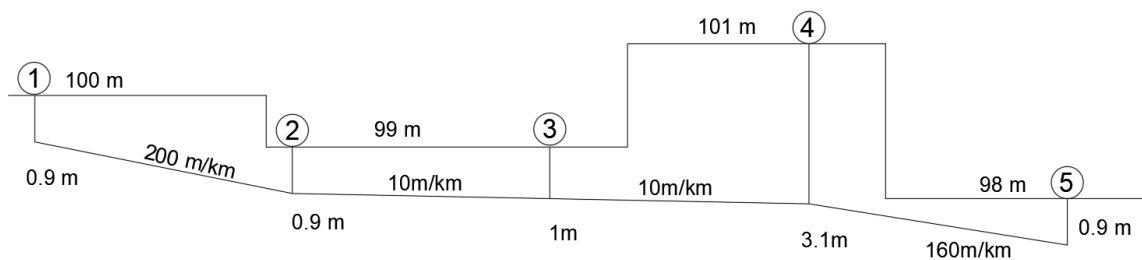


Figura 13. Corte Horizontal de red

En tramo 1→2 existe una pendiente de 200m/km gracias a terreno natural, dado que esta es mayor a los 10m/km que se requieren como mínima no es necesario profundizar el pozo número 2 y se queda solo con los 90 centímetros del colchón mínimo.

En el tramo 2→3 la pendiente de terreno es de 0m/km y aquí calculamos una profundidad de 10cm más el colchón mínimo dando como resultado 1 metro de profundidad y así se cumpla con la mínima.

Muy parecido al caso anterior encontramos el tramo 3→4 ya que esta vez encontramos una pendiente negativa en el terreno y la profundidad del nodo 4 deberá de ser de 3.10 metros.

Y en el último caso la pendiente del terreno no es necesario profundizar ya lleva una pendiente de 160m/km y esta cumple con la condicional.

### 3.5.4. Tipos de alineación

Existen tres tipos diferentes de alineación de tuberías que dependiendo con que parte coincidan se llaman de diferente manera, la parte superior interna del tubo se le conoce como clave, a la central como eje y a la inferior se le llama arrastre, como se muestra en la Figura 14.

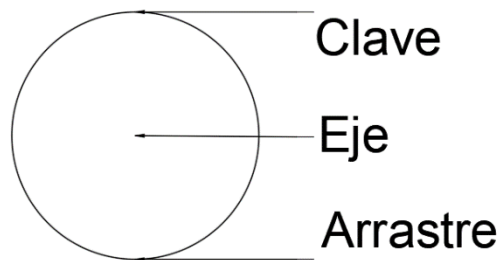


Figura 14. Corte frontal de tubería

La alineación por Arrastre es la alineación más usual en el diseño de drenajes, ya que nos permite evitar algunas caídas de agua, la alineación por clave reduce los volúmenes de obra del diseño, pero incrementa las caídas en los pozos de visita, la alineación por eje es el punto medio de las 2 anteriores. Podemos observarlas en la siguiente figura.

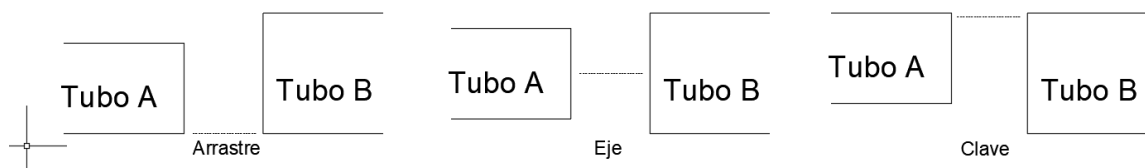


Figura 15. Tipos de Alineación

## 3.6. Calculo sanitario

### 3.6.1. Calculo por densidad de población

Este modo de cálculo se basa en la idea de tomar la población del proyecto para después dividirla entre la longitud total del mismo y a sí tendríamos la densidad por metro, ahora para cada tramo de la tubería se le asignaría la población equivalente a su longitud, aunque este método es válido en la vida real no coincide con la asignación de la población, difiriendo con los diámetros de tuberías necesarios con los calculados.

Después de la asignación de la población en los tramos la convertiremos a gasto, para ello necesitamos conocer la dotación de agua potable (generalmente ~200 l/h/d varia por zona, nivel socioeconómico, uso), también la aportación (~80%) ya que no todo el consumo de agua por habitante va a dar a las alcantarillas, y un coeficiente de seguridad dado por el usuario (~1.5).

Ahora para conocer el gasto solo es necesario multiplicar la población asignada por la dotación, el coeficiente de seguridad y la aportación, dando como resultado el gasto en litros por segundo y calcularlo para todos los tramos.

### 3.6.2. Calculo por áreas tributarias

El cálculo por áreas tributarias permite calcular el gasto en los tramos de acuerdo con las aportaciones de áreas asignadas a ellos, estas áreas según su uso y magnitud variaran su aportación.

Para calcular la aportación de cierta área es necesario conocer su área en metros cuadrados, su coeficiente de seguridad dado por el usuario y el coeficiente de Harmon también dado por el usuario, después solo se asignará su producto a el tramo, cabe resaltar que puede tener más de un área tributaria asociada a él o no tener ninguna.

### 3.6.3. Calculo por Unidades drenadas

Este cálculo es muy similar al de población por longitud, pero la asignación de población se lleva a cabo por el usuario ya que debe de conocer el número de casas que descargarán en cada tramo de tubería, también conocer el número de habitantes promedio en las casas (generalmente se puede obtener del INEGI). Ahora convertiremos a población multiplicando el número de unidades drenadas por el número de habitantes por unidad drenada y después, al igual que en el cálculo por densidad de población, la multiplicaremos por la aportación, el coeficiente de seguridad y el de Harmon y obtendremos el gasto.

### 3.6.4. Calculo por gastos puntuales

En realidad, en este caso como su nombre lo dice el usuario asignará en tramos o pozos directamente el gasto que el mismo ha calculado, por lo tanto no hay que realizar conversiones, pero es importante destacar su uso como medio de flexibilidad al usuario y como herramienta útil para la revisión de proyectos.

### 3.6.5. Cálculo de gasto tributario y acumulado

Para cada tramo y tipo de gasto diferente existen además del propio un gasto tributario y un gasto acumulado, el gasto acumulado hace referencia al apartado 3.5.2 Recorridos ya que se utiliza el recorrido a lo profundo para conocerlo, utilizando recursividad se llamara al método partiendo desde los pozos descarga que se enviarán como parámetro, este método buscara los tramos que apunten a su pozo inicial sumando el acumulado de los mismos, después volverá a llamarse el método con los pozos iniciales de esos tramos, hasta que encuentre un pozo de inicio de red, al encontrarlo regresará la totalidad de la suma de los gastos que se han acumulado en el trayecto de descarga. Para conocer el gasto tributario solo es necesario restarle el gasto del tramo al gasto acumulado.

En el siguiente pseudocodigo podemos ver con más claridad lo anterior mente mencionado, se hace referencia a *Gasto\_X* ya que aplica para todos los gastos antes mencionados.

```
double GastoAcumulado (Tramo TramoAct)
Inicio
double Suma = 0;
double SumaFinal = 0;

Lista<Tramo> TramosAnteriores = BuscarTramosAnteriores(TramoAct.PozoInicial);

paraCada Tramo en TramosAnteriores hacer
    Si Tramo.PozoInicial es PozoInicioDeRed hacer
        Suma = Tramo.Gasto_X + Suma;
    Si No
        Suma = GastoAcumulado(Tramo) + Tramo.Gasto_X + Suma;
    FinSi
    Tramo.Gasto_X_Acumulado = Suma;
    Tramo.Gasto_X_Tributario = Suma – Tramo.Gasto_X;

    SumaFinal = SumaFinal +Suma;
    Suma = 0;
finParaCada
Regresa SumaFinal;
Fin
```

### 3.6.6. Cálculo de coeficiente de Harmon

El coeficiente de Harmon se calcula de acuerdo con la población contemplada en el proyecto, si la población del proyecto y la población de unidades drenadas se suman obtenemos la población total y si esta no rebasa los 1000 habitantes utilizaremos el valor definido 3.8, si sobrepasa los 100,000 habitantes entonces su valor será de 2, en cualquier otro caso el valor se calculará con la siguiente fórmula:

$$\text{Coeficiente de Harmon.} = 1 + \frac{14}{4 * \sqrt{\frac{\text{Poblacion Total}}{1000}}}$$

### 3.6.7. Cálculo de Gastos de diseño

A partir de tener calculados los gastos acumulados podremos obtener los gastos de diseño que se describen a continuación:

- Gasto Medio

El gasto medio es el valor del caudal total aportado al sistema en un día promedio del año, por tanto, dividiremos el producto de la población total, dotación y aportación entre 86,400 y sumándole si fuera el caso el gasto por áreas tributarias y gastos puntuales, si esta no alcanza 1.5 se utilizará este valor predefinido.

- Gasto Mínimo

Este gasto representa el mínimo escurrimiento en la tubería, se basa en el gasto medio, y solo se tiene que dividir entre dos, con la condición de usar 1.5 si es que la división no llegase a este valor.

- Gasto Mínimo Instantáneo

Para calcular este gasto debemos comparar el producto de población total, la dotación y la aportación y dividirlo entre 86400, si este valor no llega a 1.5 entonces se utilizará 1.5 y se multiplicará por el coeficiente de Harmon, si fuera el caso se agregará el gasto por áreas tributarias multiplicada por el coeficiente de Harmon y también se sumará el gasto puntual total.

- Gasto Máximo Extraordinario

El gasto máximo extraordinario contempla el máximo de descargas que podrían saturar el sistema, y es en este que recae la selección de la tubería a utilizarse, ya brinda un margen de seguridad para la prevención de excesos evitando así la saturación de la red.

Al igual que en los cálculos anteriores se realizará una comparación del producto de población total, la dotación y su aportación utilizando 1.5 si no se alcanzara este mínimo, después lo multiplicamos por el coeficiente de seguridad, el coeficiente de Harmon y agregamos también si fuera el caso el gasto de áreas tributarias multiplicado por su coeficiente de seguridad y el de Harmon y al final los gastos puntuales.

### 3.6.8. Cálculo de Relación de Gastos

Para iniciar calcularemos las sumatorias del total de gastos de Áreas tributarias (SumAT), Gastos puntuales (SumGP) y unidades drenadas (SumUD) si son requeridas por él usuario, buscaremos el coeficiente de Harmon, con estos datos calcularemos las relaciones como se muestra a continuación:

- Relación de gasto medio

Para iniciar multiplicamos la población total, la dotación, la aportación y 0.000011574 a esto agregamos la sumatoria de áreas tributarias y sumatoria de gastos puntuales

$$RGM = (Poblacion\ Total * Dotacion * Aportacion * 0.000011574) + SumAT + SumGP$$

- Relación de gasto máximo instantáneo

Multiplicamos la población total, la dotación, la aportación, 0.000011574 y el coeficiente de Harmon, después añadimos los gastos puntuales y el producto de áreas tributarias por su coeficiente de Harmon

$$RGM = (Pob\ T * Dot.* Ap.* 0.000011574 * Harmon) + SumGP + (SumAT * HarmonAT)$$

- Relación de gasto máximo extraordinario

También buscaremos el producto de la población total, la dotación, la aportación, 0.000011574, el coeficiente de Harmon y el coeficiente de seguridad (Coef. Seg.) a esto sumaremos el producto de la sumatoria de áreas tributarias, el coeficiente de Harmon de Áreas tributarias y su coeficiente de seguridad y al final agregamos la sumatoria de gastos puntuales.

$$RGM = (Pob T * Dot.* Ap.* 0.000011574 * Harmon * Coef.Seg.) + (SumAT * HarmonAT * Coef.Seg.AT) + SumGP$$

- Relación de gasto mínimo

Para calcular la relación de gasto mínimo dividimos la relación de gasto medio entre 2 y si esta no superara el 1.5 quedaría definida por 1.5 en caso contrario utilizaría su valor.

## 3.7. Calculo pluvial

### 3.7.1. Método Racional

El método racional es un modelo de relación lluvia escurrimiento, se base en estudiar lluvia uniforme durante cierto tiempo sobre un área determinada, de manera que se tenga un gasto constante de descarga, este método permite determinar el gasto máximo provocado por una tormenta (Comisión Nacional del Agua, 2007).

La fórmula racional es la siguiente:

$$Q = 0.278 CiA$$

Donde:

$Q$  es el gasto pico en metros cúbicos por segundo

$C$  es el coeficiente de escurrimiento

$i$  es la intensidad media de la lluvia en el tiempo de concentración en milímetros por hora

$A$  es el área de la cuenca

0.278 el factor de corrección

El tiempo de concentración se define como el tiempo mínimo que se necesita para que todos los puntos de una cuenca estén aportando gasto de forma simultánea a un punto de salida, es decir que se rige por el punto más alejado del punto de descarga, así cuando este punto este aportando gasto a la salida lo estarán haciendo simultáneamente todos los puntos generando así un gasto máximo constante.

$$T_c = T_{cs} + T_t$$

Donde:

$T_c$  es el tiempo de concentración.

$T_{cs}$  es el tiempo de concentración de la superficie.

$T_t$  es el tiempo de traslado a través de los colectores.

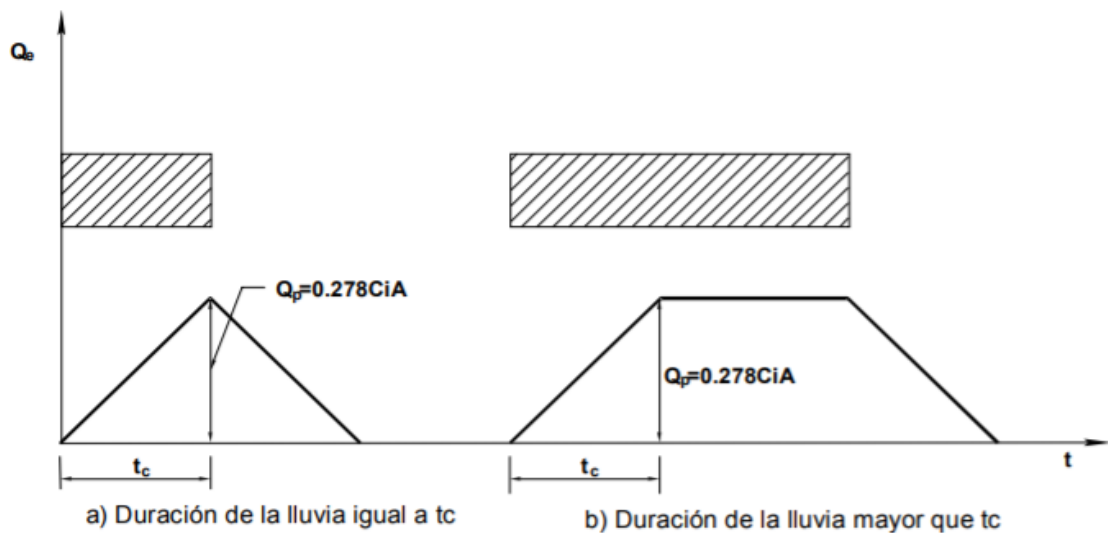


Figura 16. Representación gráfica del método racional

Para calcular el tiempo de concentración se utiliza la fórmula de Kirpich

$$T_{cs} = 0.0003245 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$$

Donde:

$T_{cs}$  es el tiempo de concentración.

$L$  es la longitud del cauce principal.

$S$  es la pendiente media del cauce principal

La pendiente media debe de ser proporcionada por el usuario.

Para determinar el tiempo de traslado se utiliza la fórmula de Manning

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

Donde:

$V$  es la velocidad media de traslado en metros por segundo.

$n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning

$R$  es el radio hidráulico en metros

$S$  La pendiente hidráulica del tramo

El coeficiente de rugosidad de Manning está determinado por la superficie del conducto como podemos ver en la siguiente tabla

Material	Coficiente de Rugosidad
Acero	0.011
Concreto simple	0.012
Concreto reforzado	0.012
Poliéster reforzado con revestimiento de fibra de vidrio	0.009
PVC	0.009
Fibrocemento	0.010
Polietileno de alta densidad	0.012

*Tabla 1. Coficientes de rugosidad*

El tiempo de traslado es determinado por la siguiente formula:

$$Tt = \frac{l}{V}$$

Donde:

$Tt$  es el tiempo de traslado en segundos.

$l$  la longitud del tramo

$V$  la velocidad media de traslado en metros sobre segundo.

### 3.7.2. Curvas IDTr

Las curvas de intensidad – duración – periodo de retorno (IDTr) son construidas en base a la información pluvial de las estaciones meteorológicas, estas tienen como objetivo el estimar la cantidad de lluvia en periodos cortos y así diseñar las obras hidráulicas en la zona de acuerdo a escurrimientos que nos permitirán conocer un gasto de diseño.

Las curvas IDTr se definen mediante 3 variables:

-La magnitud que es la altura de la lluvia en milímetros.

-La duración de la tormenta expresada en minutos.

-La frecuencia o periodo de retorno es una medida de la probabilidad de que un evento de determinada magnitud sea igualado o incluso excedido por lo menos una vez en un año. (Guichard, Aguilar, Muciño, & Pérez F, 2018)

Por ejemplo, la precipitación calculada con periodo de retorno de 100 años tendrá la probabilidad de 1/100 de que se presente un evento de estas características. El diseñar obras con un mayor tiempo de retorno nos brinda un mayor margen de diseño, pero elevando los costos de la obra, en cambio el realizarlos con uno menor disminuye el costo, pero incrementa el riesgo.

Desde la página de la Comisión Nacional del Agua podemos obtener los registros de las estaciones meteorológicas (ubicación, elevación, precipitación por fecha, etc.) y a partir de ellos se obtendrá el promedio de las precipitaciones, su desviación estándar, la media de sus logaritmos, así como también la desviación estándar de los logaritmos. (Conde Rivera, Vita Garza, Castro Ortíz, & López Mejía, 2014)

Las diferentes distribuciones probabilísticas que ocupamos son *Exponencial con  $\beta$* , *Exponencial con  $\beta$  y  $X_0$* , *Gumbel*, *Nash*, *Normal*, *Log Normal2*, *Gamma2* y de acuerdo a la que menor error estándar tenga será la que mejor se ajuste a nuestros datos como podemos ver en la siguiente tabla

Distribución	Formula
Exponencial con $\beta$	$\hat{P}_{Tr} = -\left(\frac{1}{\beta}\right) \text{Ln}[1 - F(P)]$
Exponencial con $\beta$ y $X_0$	$\hat{P}_{Tr} = \bar{X}_0 - \beta \text{Ln}[1 - F(P)]$
Gumbel	$\hat{P}_{Tr} = \hat{\mu} - \alpha \text{LnLn}\left[\frac{1}{F(P)}\right]$
Nash	$\hat{P}_{Tr} = \hat{\mu} + \alpha X = \hat{\mu} + \hat{\alpha} \left[\frac{1}{F(Q)}\right]$
Normal	$\hat{P}_{Tr} = \hat{\mu} + U_T \hat{\sigma}$
Log Normal2	$\hat{P}_{Tr} = \exp(\hat{\mu}_y + U_T \hat{\sigma}_y)$
Gamma 2	$\hat{P}_{Tr} = \hat{\alpha} \hat{\beta} \left[1 - \frac{1}{9\hat{\beta}} + U_T \sqrt{\frac{1}{9\hat{\beta}}}\right]^3$

Tabla 2. Distribuciones probabilísticas

### 3.7.3. Variables regionales

Para obtener las variables regionales y poder calcular la precipitación y su intensidad necesitamos obtener las siguientes precipitaciones según la distribución seleccionada

$$P_{2 \text{ años}}^{1h} = \text{Precipitación de de una hora y 2 años}$$

$$P_{10 \text{ años}}^{1h} = \text{Precipitación de de una hora y 10 años}$$

$$P_{10 \text{ años}}^{24h} = \text{Precipitación de de 24 horas y 10 años}$$

$$P_{100 \text{ años}}^{24h} = \text{Precipitación de de 24 horas y 100 años}$$

$$RP = \text{Relación de precipitaciones de 1 h con respecto a la de 24h} * 100$$

Y a raíz de estos valores podremos obtener las variables regionales de la siguiente manera:

$$a = -0.000004166 * (RP^4) + 0.00052777 * (RP^3) - 0.01625 * (RP^2) + 0.6662 * (RP) - 1.5$$

$$b = -0.0000027083 * (RP^4) + 0.00041527 * (RP^3) - 0.02477 * (RP^2) + 0.9551 * (RP) - 11.25$$

$$C = -0.00012 * (RP^2) + 0.019 * (RP) + 0.1628$$

$$F = \frac{P_{10 \text{ años}}^{24h}}{P_{100 \text{ años}}^{24h}}$$

$$P2 = P_{2 \text{ años}}^{1h}$$

$$P6010 = P_{10 \text{ años}}^{1h}$$

### 3.7.4. Modelo de Cheng-Lung Chen

La metodología propuesta por Cheng Lung Chen es la siguiente:

Para la intensidad expresada en milímetros/hora:

$$I = \frac{a * p_{60}^{10} * LOG(10^{2-F} * Tr^{F-1}) * D}{60 * (D + b)^c * \frac{d}{60}}$$

Para la precipitación expresada en milímetros

$$HP = \frac{a * p_{60}^{10} * LOG(10^{2-F} * Tr^{F-1}) * D}{60 * (D + b)^c}$$

### 3.7.5. Modelo de F. C. Bell

Las ecuaciones propuestas por Bell son las siguientes:

Para la intensidad expresada en milímetros/hora:

$$I = \frac{(0.35 * LN(Tr) + 0.76) * ((0.54 * D^{0.25}) - 0.5) P_{60}^2}{\frac{d}{60}}$$

Y la precipitación expresada en milímetros quedaría de la siguiente forma:

$$HP = (0.35 * LN(Tr) + 0.76) * ((0.54 * D^{0.25}) - 0.5) P_{60}^2$$

## 3.8. Optimización de la red

Uno de los temas más importantes que podemos encontrar es la optimización de la propuesta del diseño, la ya que tiene un impacto en el ahorro del tiempo del proyectista que solo revisará y ajustará cambios que quedan fuera del alcance del programa, y por otra parte nos ayuda a reducir costos de materiales y de volumen de obra.

Para lograr optimizar la red es necesario conocer, a parte de los gastos de diseño, son las características del sitio del proyecto, el hecho de contar con elevaciones extraídas de un levantamiento topográfico nos ayudará enormemente a poder generar mejor una propuesta de diseño, ya que influye tanto en la construcción como en la selección de materiales adecuados para cada caso como veremos a continuación.

### 3.8.1. Flujo en sección parcialmente llena

Al hecho de conducirse un flujo en una sección cerrada a superficie libre se le dice que trabaja parcialmente lleno, y se recomienda para el drenaje ya que si trabajara a presión podría el agua brotar de las alcantarillas.

Uno de los requisitos para trabajar con canales abiertos es que trabajen con un porcentaje de llenado máximo del 80% de la tubería, y para poder calcularlo es necesario conocer la relación de la velocidad mínima, relación del tirante mínimo, relación de la velocidad máxima y relación de la velocidad máxima.

### 3.8.2. Velocidades máximas y mínimas permisibles

Esta variable es la que nos indica la velocidad el tránsito del fluido por los conductos, y debe de ser lo suficientemente fuerte para no existan azolves o taponamientos y según el MAPAS debe de ser de 0.3 lt/s para un gasto mínimo de 1 lt/s y el tirante calculado debe de tener al menos 1 cm en caso de pendientes fuertes y de 1.5 en casos normales.

La velocidad máxima es el límite que trata de evitar la erosión de los conductos y estructuras de la red, este factor será determinado de acuerdo con el material seleccionado en los tramos como veremos en la siguiente tabla.

Material	Velocidad Máxima (m/s)	Velocidad Mínima (m/s)
Acero	3	0.3
Concreto reforzado	5	0.3
Concreto simple	5	0.3
Fibrocemento	5	0.3
PEAD	5	0.3
PVC	5	0.3
PRFV	3	0.3

*Tabla 3. Velocidades máximas y mínimas permisibles*

Para calcular las velocidades del tubo se utilizan las siguientes formulas:

$$VelocidadDelTubo = \frac{4 * GastoDeTubo / 1000 / \pi}{Diametro^2}$$

$$Velocidad\ M\acute{in}ima = VelocidadDelTubo * RelacionDeVelocidadDelTuboM\acute{in}ima$$

$$Velocidad\ M\acute{a}xima = VelocidadDelTubo * RelacionDeVelocidadDelTuboM\acute{a}xima$$

### 3.8.3. Pendientes

Como vimos anteriormente las velocidades son algo fundamental en el dise\u00f1o, y estas est\u00e1n directamente relacionadas con la pendiente del terreno. Se recomienda seguir la pendiente natural del terreno si esto fuera posible, en caso de pendientes pronunciadas se recomienda el uso del escalonamiento que no es m\u00e1s que agregar pozos intermedios, si esto no fuera suficiente es necesario utilizar materiales que permitan velocidades de hasta 8 m/s, pero solo en tramos espec\u00edficos y solo en casos extraordinarios

### 3.8.4. Di\u00e1metros

La selecci\u00f3n del di\u00e1metro adecuado parte del gasto de dise\u00f1o, y en el caso de las tuber\u00edas a cielo abierto se debe de cumplir un requisito que es que el gasto que transite en el no rebase el 80% de la tuber\u00eda y la recomendaci\u00f3n de que el di\u00e1metro sea de al menos 20 cm.

Para calcular el porcentaje de llenado de la tuber\u00eda solo basta con dividir el tirante m\u00e1ximo entre el di\u00e1metro de la tuber\u00eda, y para calcular los tirantes utilizaremos las siguientes formulas:

$$TiranteM\acute{a}ximo = Diametro * RelacionDeTiranteM\acute{a}ximo$$

$$TiranteM\acute{in}imo = Diametro * RelacionDeTiranteM\acute{in}imo$$

### 3.8.5. Algoritmos de alineaci\u00f3n y optimizaci\u00f3n

Para realizar la optimizaci\u00f3n y alineaciones como mencionamos en el apartado 3.5.3 se realiza un predise\u00f1o de red donde a partir del terreno natural calculamos los gastos que circularan por las tuber\u00edas, pero al calcular el di\u00e1metro \u00f3ptimo las pendientes pueden cambiar. En la Figura 17 podemos ver como en el tramo 1\u21922 se asigna una pendiente que va de acuerdo con el terreno natural y en el tramo 2\u21923 podemos ver una asignaci\u00f3n de la pendiente m\u00ednima ya que el terreno va a en pendiente negativa.

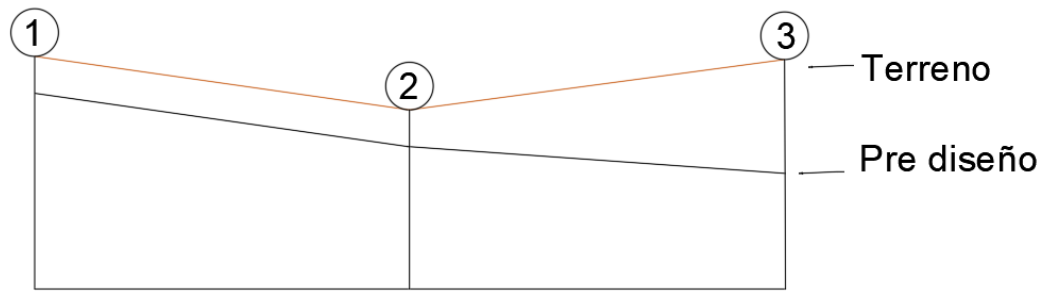


Figura 17. Ejemplo de prediseño de red

Después al realizarse el cálculo y encontrarse los diámetros necesarios pueden haber varios casos en este ejemplo el tubo del tramo 1→2 es menor al del tramo 2→3 como veremos a continuación:

- A) Si la alineación es por clave el tubo se quedará en el lugar que está dejando una ligera caída como podemos ver en la Figura 18.

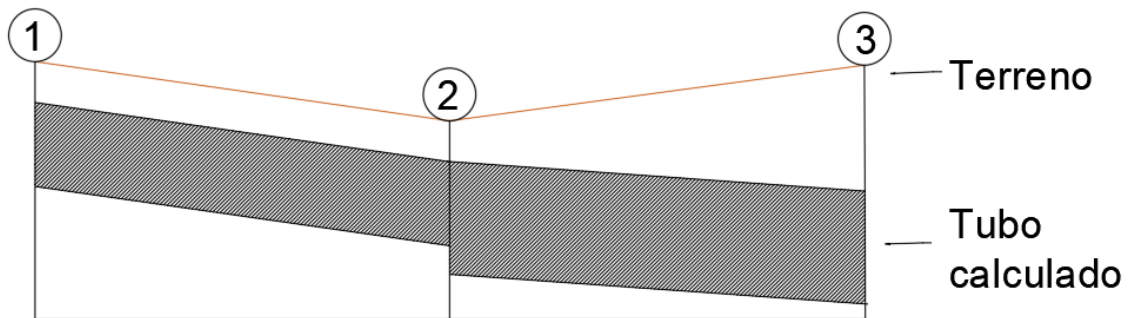


Figura 18. Ejemplo de diseño por cota clave

- B) En caso de que sea elegida la alineación por eje (Figura 19) la pendiente del tubo del tramo 1→2 cambiará su pendiente, hay que tomar en cuenta que el hecho que la alineación sea por eje no implica que (ya sea, por ejemplo el diámetro anterior es mayor al siguiente) la cota arrastre final del primero tramo no puede ser inferior a la cota arrastre inicial del tramo siguiente.

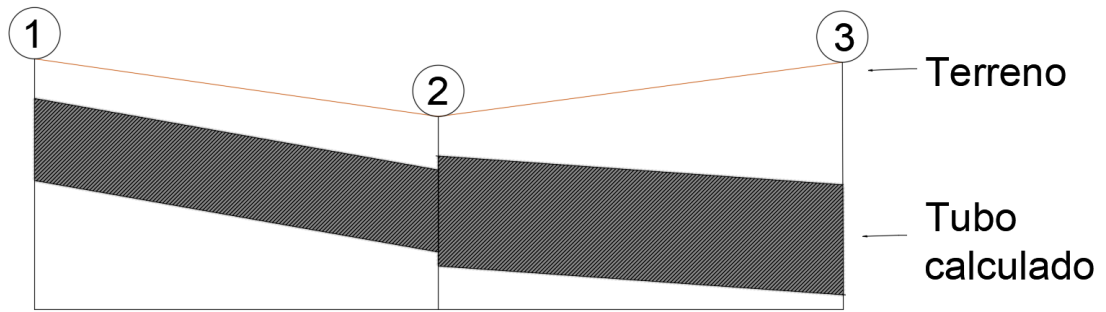


Figura 19. Ejemplo de diseño por cota eje

C) En este caso que el arrastre sea el tipo de alineación seleccionado (Figura 20) la pendiente del primer tramo será mayor mente afectada y probablemente el nivel del tirante será menor pudiendo así utilizar un diámetro menor, aunque debe de ser consciente de las velocidades y sus efectos en las tuberías.

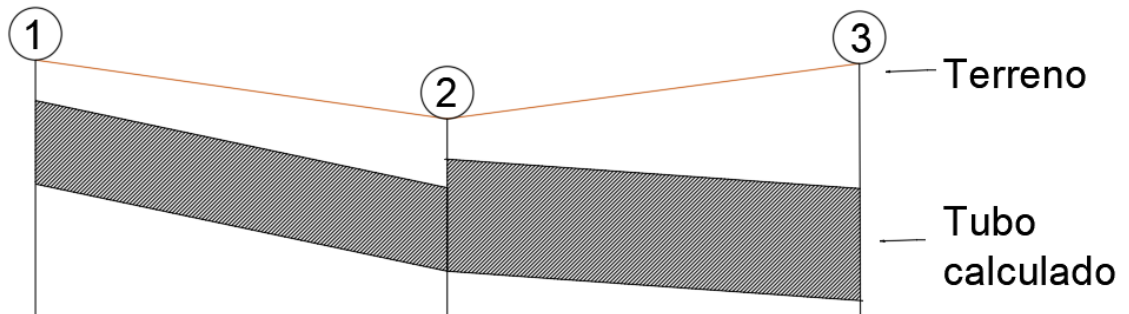
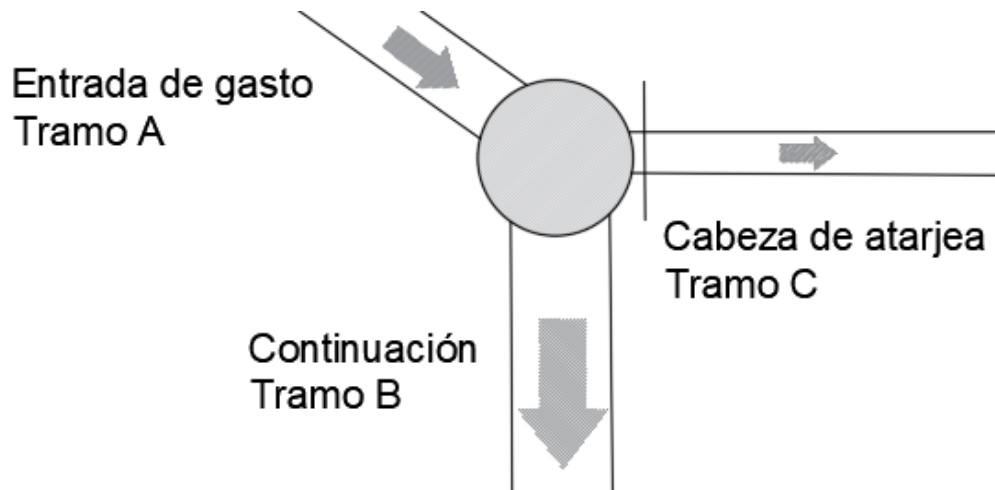


Figura 20. Ejemplo de diseño por cota arrastre

Uno de los cambios importantes que puede sufrir la red después de ser realizado el cálculo de los diámetros ocurre en los pozos donde hay al menos 1 entrada de gasto y al menos una cabeza de atarjea independiente del tramo de descarga como podemos ver en la Figura 21.

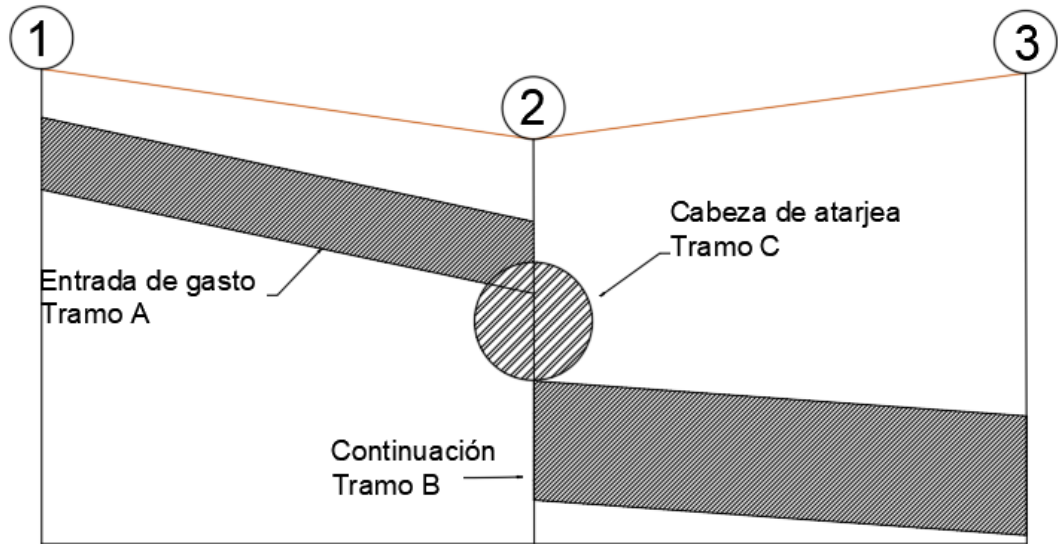


*Figura 21 Intersección con cabeza de atarjea*

Ya que al indicarse en el tramo *C* una cabeza de atarjea el gasto deberá iniciar en cero, así que el gasto que llega desde el tramo *A* al pozo de visita (más los demás si los hubiera) se acumularan en el tramo *B*. El problema llega cuando el tramo *B* y el tramo *C* tienen elevaciones similares ya que (aunque en el cálculo no sea así) el gasto se repartirá entre el tramo *B* y *C*.

Para solucionar este problema el tramo *B* deberá ser desplazado verticalmente hasta la cota arrastre del tramo *C*, y de todos los tramos siguientes a él, hasta llegar a la su descarga o en caso de encontrar algún pozo más profundo ahí para el desplazamiento

En la siguiente figura podemos ver un corte vertical del ejemplo planteado



*Figura 22 Corte vertical de la red*

Cabe destacar que en cualquiera de los casos se toma en cuenta el parámetro de colchón mínimo y en dado caso de no cumplirse se realizará un desplazamiento para cumplir con él.

# Capítulo 4. Resultados de la implementación y evaluación del sistema

## 4.1. Memoria de cálculo

Un requisito indispensable en las dependencias gubernamentales de nuestro país para poder presentar un proyecto es la memoria de cálculo, esta se refiere a la colección de datos descriptivos del proyecto asociado a los gastos de diseño.

Para mostrar de una manera más eficiente los datos se exponen en tablas, estas se dividen en 2 partes la parte de cálculo y la parte de gastos de diseño.

La parte de cálculo muestra en primer lugar el gasto máximo de entrada y a partir de ahí mostramos características de la tubería como por ejemplo las elevaciones de terreno en las tapas del tramo, su longitud, pendiente y diámetro seleccionado en el motor de cálculo, también podremos ver las profundidades, caídas y sus respectivas cotas de elevación.

TRAMO	LONGITUD (m)	GASTOS DE DISEÑO		COTAS TERRENO		PENDIENTE		DIÁMETRO (cm)				COEFICIENTE DE RUGOSIDAD n (Manning)	MATERIAL	TUBO LLENO	
		Qmín (l/s)	Qmext (l/s)	Inicial (msnm)	Final (msnm)	Terreno (m/km)	Propuesta (m/km)	Cálculo (m)	Efectivo (cm)	Nominal (in)	Tubos en Batería			QII (l/s)	VII (m/s)
15 - 16	70.02	1.50	8.55	2357.99	2357.59	5.71	5.71	0.12	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	101.92	1.37
16 - 17	69.87	1.50	8.55	2357.59	2357.19	5.72	5.72	0.12	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	102.03	1.37
17 - 18	70.11	1.50	8.55	2357.19	2356.80	5.56	5.56	0.12	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	100.58	1.35
18 - 19	69.98	1.50	8.55	2356.80	2356.30	7.14	7.14	0.12	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	113.98	1.53
19 - 20	20.81	1.50	8.55	2356.30	2356.15	7.21	7.21	0.12	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	114.50	1.54
20 - 21	50.00	1.50	8.55	2356.15	2356.08	1.67	4.00	0.13	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	85.29	1.14
21 - 9	47.87	1.50	8.55	2356.08	2356.00	1.67	4.00	0.13	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	85.29	1.14
9 - 8	58.60	1.50	8.55	2356.00	2355.95	0.85	4.00	0.13	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	85.29	1.14
8 - 7	56.38	1.50	8.55	2355.95	2355.90	0.89	4.00	0.13	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	85.29	1.14
7 - 6	65.00	1.50	8.55	2355.90	2355.40	7.69	4.00	0.13	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	85.29	1.14
6 - 5	65.00	1.50	8.55	2355.40	2354.90	7.69	4.00	0.13	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	85.29	1.14
5 - 4	61.85	1.50	8.55	2354.90	2354.40	8.08	6.12	0.12	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	105.50	1.42
4 - 3	60.00	1.50	8.55	2354.40	2354.12	4.67	4.67	0.13	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	92.12	1.24
3 - 2	41.32	1.50	8.55	2354.12	2353.80	7.74	7.74	0.11	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	118.67	1.59
2 - 1	56.70	1.50	8.55	2353.80	2353.30	8.82	8.82	0.11	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	126.63	1.70
13 - 12	59.00	1.50	8.55	2357.80	2357.35	7.63	7.63	0.12	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	117.77	1.58
12 - 11	59.00	1.50	8.55	2357.35	2356.90	7.63	7.63	0.12	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	117.77	1.58
11 - 10	59.00	1.50	8.55	2356.90	2356.45	7.63	7.63	0.12	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	117.77	1.58
10 - 9	59.66	1.50	8.55	2356.45	2356.00	7.54	7.54	0.12	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	117.12	1.57
15 - 14	40.00	1.50	8.55	2357.99	2357.85	3.50	4.00	0.13	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	85.29	1.14
14 - 13	41.10	1.50	8.55	2357.85	2357.80	1.22	4.00	0.13	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	85.29	1.14
13 - 22	37.14	1.50	8.55	2357.80	2357.04	20.46	8.55	0.11	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	124.70	1.67
22 - 23	60.00	1.50	8.55	2357.04	2356.32	12.00	12.00	0.11	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	147.72	1.98
23 - 24	60.00	1.50	8.55	2356.32	2355.70	10.33	10.33	0.11	30.80	12.00	1.00	0.01	PEADC	137.06	1.84
...	...	...	...	.....	.....	.....	.....	...	.....	.....	...	...	.....	.....	...

Figura 23. Tabla Cálculo Hidráulico (segmento)

Después de esto podremos revisar el comportamiento hidráulico el gasto a tubo lleno, las relaciones de velocidad, gasto y tirantes tanto como menores como mayores, luego aparecen la velocidad, tirante y llenado de la tubería

En la parte de gastos de diseño podremos observar las acumulaciones de las diferentes aportaciones como la longitudinal, por unidades drenadas, los gastos puntuales sanitarios y pluviales, tanto su aportación como las sumatorias totales y tributarias, al final podremos ver los gastos de diseño los gastos mínimos, medios, máximos instantáneos y los máximos extraordinarios.

TRAMO	LONGITUD (m)	POBLACIÓN TOTAL (hab)	COEFICIENTE DE HARMON (adim)	DISTRIBUCIÓN DE GASTOS POR ÁREA TRIBUTARIA					GASTOS DE DISEÑO			
				Área (m <sup>2</sup> )	Dotación (l/m <sup>2</sup> )	Qmed Tramo (l/s)	Qmed Tribut. (l/s)	Qmed Total (l/s)	Qmed (l/s)	Qmin (l/s)	Qminst (l/s)	Qmext (l/s)
15 - 16	70.02	0.00	3.80	2293.20	91728.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
16 - 17	69.87	0.00	3.80	3438.00	137520.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
17 - 18	70.11	0.00	3.80	3441.60	137664.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
18 - 19	69.98	0.00	3.80	2451.78	98071.20	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
19 - 20	20.81	0.00	3.80	1416.70	56668.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
20 - 21	50.00	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
21 - 9	47.87	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
9 - 8	58.60	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
8 - 7	56.38	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
7 - 6	65.00	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
6 - 5	65.00	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
5 - 4	61.85	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
4 - 3	60.00	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
3 - 2	41.32	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
2 - 1	56.70	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
13 - 12	59.00	0.00	3.80	1579.67	63186.80	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
12 - 11	59.00	0.00	3.80	3445.20	137808.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
11 - 10	59.00	0.00	3.80	2195.14	87805.60	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
10 - 9	59.66	0.00	3.80	1478.38	59135.20	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
15 - 14	40.00	0.00	3.80	2748.38	109935.20	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
14 - 13	41.10	0.00	3.80	1144.80	45792.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
13 - 22	37.14	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
22 - 23	60.00	0.00	3.80	4049.69	161987.60	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55
23 - 24	60.00	0.00	3.80	2289.60	91584.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	5.70	8.55

Figura 24. Tabla Gastos de Diseño (segmento)

## 4.2. Interfaz para pruebas

Para realizar pruebas se implementó una sencilla interfaz donde se podrán realizar 4 acciones básicas, la primera es el poder alimentar el motor con la información necesaria, la segunda poder visualizarla, la tercera el poder revisar que sea coherente y la última iniciar el proceso de cálculo para generar la memoria de calculo

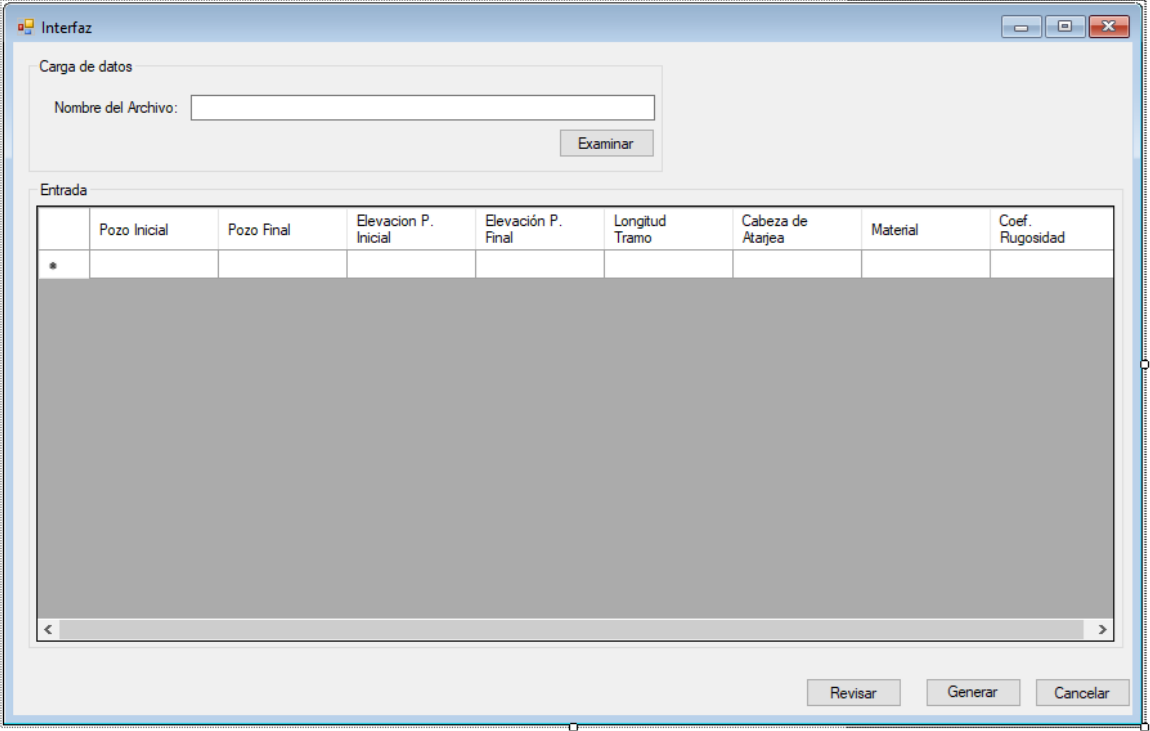


Figura 25. Interfaz

### 4.3. Ejecución de pruebas

Como prueba se realizó un ejemplo sencillo de un fraccionamiento donde se realizó una propuesta para la conducción de residuos sanitarios, como podemos ver en la siguiente figura

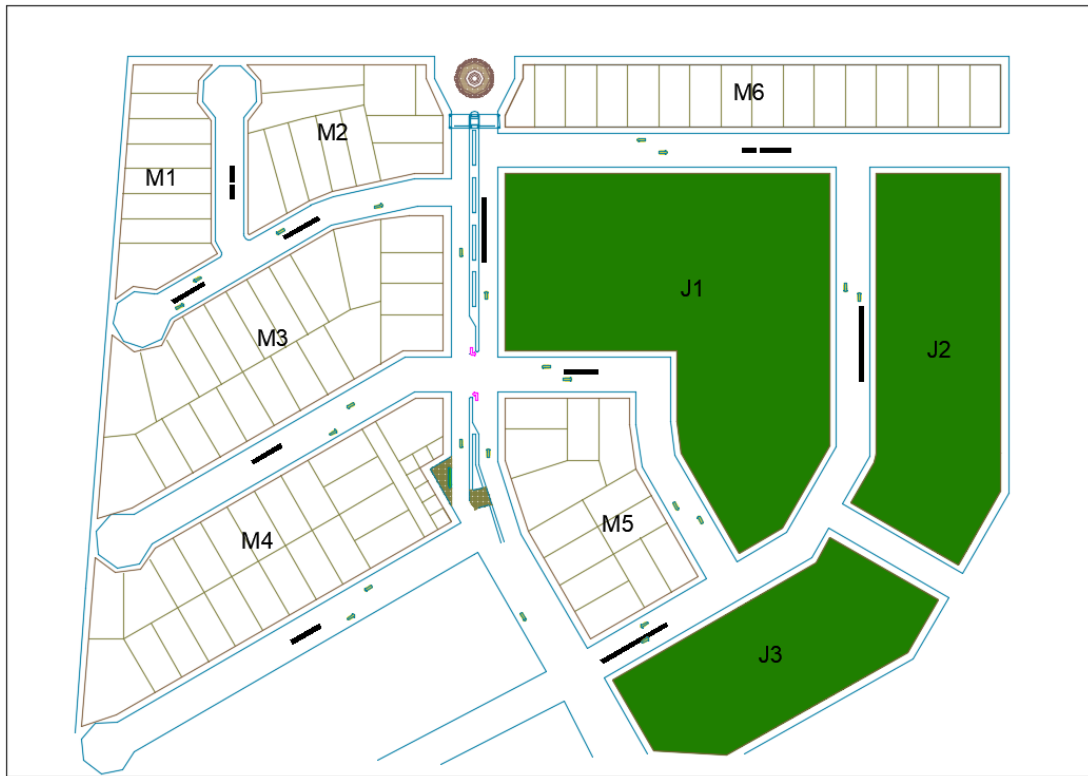


Figura 26. Plano de prueba (Planos Para, 2021)

La comparación se realizó en el software de ARQCOM CivilCAD®, donde se consideró el aporte de 10000 personas y cada persona tiene un consumo de 200 litros al día, la aportación por persona es del 80%, para la prueba solo se toma el colector sanitario, y se realizará con tubería de PEAD que cuenta con un coeficiente de Manning de 0.01 y un diámetro mínimo de 200 milímetros.

Se utilizará la conducción a gravedad mediante conductos de sección circular, la conducción se limitará al 80% máximo en las tuberías y una pendiente mínima del 4%.

Dentro de las configuraciones de terreno utilizaremos una profundidad mínima de 0.9m de la elevación del terreno natural a la cota clave de la tubería, la población fue calculada de acuerdo a la longitud por tramo, para la asignación con los siguientes datos en tramos y pozos:

Pozo	Elevación
1	1,268.25
2	1,268.24
3	1,268.20
4	1,268.18
5	1,268.18
6	1,268.03
7	1,267.99
8	1,267.95
9	1,268.18
10	1,268.52
11	1,268.71
12	1,268.25
13	1,268.35
14	1,268.28
15	1,268.38
16	1,268.48
17	1,268.30

Tabla 4. Elevaciones de terreno

Tramo	Longitud	Población
1 → 2	53.07	671.7533
2 → 3	36.14	457.4884
3 → 4	38.93	492.7966
4 → 5	59.54	753.6032
5 → 6	51.97	657.8099
6 → 7	73.56	931.1210
7 → 8	63.54	804.2930
9 → 5	54.84	694.1070
10 → 9	28.43	359.8468
11 → 10	34.97	442.6009
12 → 5	36.07	456.5743
13 → 12	91.02	1152.0484
14 → 4	19.88	251.6247
15 → 14	57.71	730.4023
16 → 15	53.28	674.3555
17 → 2	37.10	469.5749
<b>TOTAL</b>	<b>790.06</b>	<b>10000.0000</b>

Tabla 5. Longitudes proporcionales

#### 4.4. Análisis comparativo y evaluación

A continuación mostraremos ejemplos comparativos de los diferentes resultados de la red calculada.

- Gastos de diseño

En la Tabla 6 podemos ver que los resultados son técnicamente iguales, variando solo por el redondeo.

Tramo	Población Acumulada		Coeficiente de Harmon	
	Resultado	Resultado CivilCAD	Resultado	Resultado CivilCAD
1 → 2	671.75	672	3.80	3.800
2 → 3	1598.82	1599	3.66	3.659
3 → 4	2091.61	2092	3.57	3.571
4 → 5	4501.60	4502	3.29	3.287
5 → 6	8264.59	8265	3.04	3.036
6 → 7	9195.71	9196	2.99	2.991
7 → 8	10000.00	10000	2.95	2.955
9 → 5	1496.55	1497	3.68	3.680
10 → 9	802.45	802	3.80	3.800
11 → 10	442.60	443	3.80	3.800
12 → 5	1608.62	1609	3.66	3.657
13 → 12	1152.05	1152	3.76	3.760
14 → 4	1656.38	1656	3.65	3.648
15 → 14	1404.76	1405	3.70	3.700
16 → 15	674.36	674	3.80	3.800
17 → 2	469.57	470	3.80	3.800

Tabla 6. Comparación Distribución de población y coeficiente de Harmon

En la Tabla 7. Comparación de Gastos podemos apreciar que el cálculo de gastos es muy parecido variando solo el redondeo.

Tramo	Gasto Mínimo		Gasto Medio		Gasto Máximo	
	Resultado	Resultado CivilCAD	Resultado	Resultado CivilCAD	Resultado	Resultado CivilCAD
1 → 2	1.50	1.500	1.50	1.50	8.55	8.550
2 → 3	1.50	1.500	2.96	2.96	16.25	16.252
3 → 4	1.94	1.937	3.87	3.87	20.75	20.745
4 → 5	4.17	4.169	8.34	8.34	41.10	41.106
5 → 6	7.65	7.652	15.30	15.30	69.71	69.707
6 → 7	8.51	8.515	17.03	17.03	76.39	76.395
7 → 8	9.26	9.259	18.52	18.52	82.07	82.075
9 → 5	1.50	1.500	2.77	2.77	15.30	15.299
10 → 9	1.50	1.500	1.50	1.50	8.55	8.550
11 → 10	1.50	1.500	1.50	1.50	8.55	8.550
12 → 5	1.50	1.500	2.98	2.98	16.34	16.342
13 → 12	1.50	1.500	2.13	2.13	12.03	12.031
14 → 4	1.53	1.534	3.07	3.07	16.78	16.785
15 → 14	1.50	1.500	2.60	2.60	14.44	14.438
16 → 15	1.50	1.500	1.50	1.50	8.55	8.550
17 → 2	1.50	1.500	1.50	1.50	8.55	8.550

Tabla 7. Comparación de Gastos

- Características de tubería

En Tabla 8 podremos notar unas diferencias en la pendiente propuesta en el tramo [10→9] donde el terreno tiene una pendiente de 11.959m/km y CivilCAD® propone la misma en la tubería, a diferencia el resultado del motor propuso una pendiente de 4m/km ya que es posible reducirla gracias a que el terreno lo permite, otra diferencia es el cálculo del diámetro de la tubería pero esta se debe a la información de las tuberías con la que trabaja CivilCAD®.

Tramo	Cota Clave Inicial		Cota Clave Final		Pendiente		Diámetro	
	Resultado	Resultado CivilCAD	Resultado	Resultado CivilCAD	Resultado	Resultado CivilCAD	Resultado	Resultado CivilCAD
1 → 2	1267.58	1267.35	1267.37	1267.14	4.00	4.00	20.00	20.32
2 → 3	1267.37	1267.14	1267.14	1266.99	4.00	4.00	20.00	20.32
3 → 4	1267.14	1266.99	1267.06	1266.84	4.00	4.00	20.00	20.32
4 → 5	1266.89	1266.80	1266.65	1266.56	4.00	4.00	25.10	25.40
5 → 6	1266.71	1267.06	1266.50	1266.85	4.00	4.00	30.80	30.48
6 → 7	1266.50	1266.85	1266.21	1266.56	4.00	4.00	30.80	30.48
7 → 8	1266.21	1266.56	1265.95	1266.30	4.00	4.00	30.80	30.48
9 → 5	1267.35	1267.28	1267.14	1267.06	4.00	4.00	20.00	20.32
10 → 9	1267.14	1267.62	1266.99	1267.28	4.00	12.00	20.00	20.32
11 → 10	1266.99	1267.79	1266.84	1267.62	4.00	5.00	20.00	20.32
12 → 5	1267.40	1267.09	1267.25	1266.94	4.00	4.00	20.00	20.32

13 → 12	1267.35	1267.45	1267.21	1267.09	4.00	4.00	20.00	20.32
14 → 4	1267.21	1266.88	1267.10	1266.80	4.00	4.00	20.00	20.32
15 → 14	1267.10	1267.11	1266.88	1266.88	4.00	4.00	20.00	20.32
16 → 15	1267.45	1267.48	1267.09	1267.11	4.00	7.00	20.00	20.32
17 → 2	1267.09	1267.40	1266.94	1267.25	4.00	4.00	20.00	20.32

Tabla 8. Comparación de características de tubería

A continuación mostramos perfiles de corte horizontal generados a partir de los resultados obtenidos con las 2 aplicaciones.

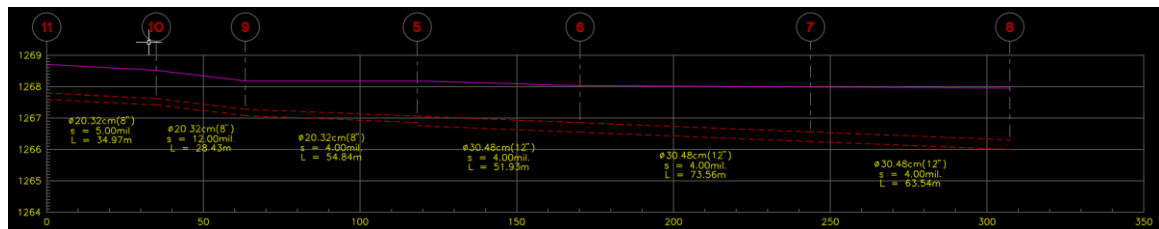


Figura 27. Perfil con información de CivilCAD®

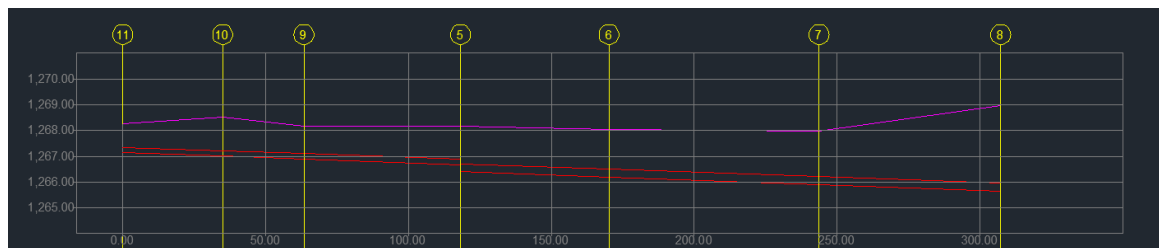


Figura 28. Perfil con información del Motor de cálculo

Como pudimos observar en las 2 figuras anteriores las diferencias entre ambos resultados son mínimas, ya que dependen más del autor y la forma que se utiliza al alinear las tuberías, por ejemplo en el ejercicio hecho con CivilCAD® se alinea mediante cotas clave y en el del Motor se realizó mediante las coincidencias de arrastre para minimizar caídas, ambos resultados son válidos.

## Capítulo 5. Conclusiones y mejoras a futuro

Una de las habilidades más necesarias en la solución de problemas mediante herramientas tecnológicas es tener la capacidad de analizar correctamente un problema que generalmente será ajeno al campo computacional, como el que se presenta en este caso la hidráulica.

El presente trabajo tuvo como finalidad generar una interfaz de programación de aplicaciones que ofrece generar revisiones y propuestas de diseño de drenaje sanitario y pluvial, que sirven de apoyo en la generación de proyectos hidráulicos mediante las normativas que solicita la Comisión Nacional del Agua en México, que además incluye herramientas de apoyo como la construcción de curvas IDTr y la optimización de profundidades y diámetros en las tuberías.

El generar propuestas de diseño de conducción de aguas residuales en un modelo estático podríamos dividirlo en 3 partes la primera es calcular el gasto máximo que pasara por el conducto, la segunda es calcular el diámetro mínimo por donde el flujo podrá cursar mediante presión atmosférica y la última generar la alineación de la tubería.

En este documento pudimos revisar de manera breve todos los elementos utilizados para la generación de la propuesta, desde los métodos de cálculo de gasto poblacionales hasta los generados por aportación determinada por área, también pudimos ver el uso de algoritmos para obtener las acumulaciones en las tuberías mediante grafos y la generación de alineaciones para minimizar los diámetros y profundidades de las tuberías.

La idea principal de la creación del Motor de cálculo es la flexibilidad, ya que no solo tiene la función de generar propuestas de diseño si no también la de revisión, por cual es fundamental el poder representar lo más parecido a la realidad un sistema ya previamente diseñado, otro de los motivos es el que muchas veces el proyecto debe de poder anexarse a sistemas de drenaje ya existentes por lo cual es poder modificar las variables adecuadas para cada proyecto.

Dentro de las limitaciones del Motor podemos destacar que el cálculo se realiza pensando en la máxima concentración de líquidos vertidos en la red, es decir un modelo estático, también podemos incluir el hecho de que las tuberías deberán de trabajar con presión atmosférica.

Para tener una referencia del correcto funcionamiento del motor se realizó un pequeño ejemplo de prueba con CiviCAD® que es un programa de diseño sobre la plataforma AutoCAD ya consolidado en el mercado y mostrando resultados muy parecidos.

Como resultado de la implementación del programa podemos ver una aplicación perfectible y escalable, pudiendo ampliar la simulación estática a dinámica pudiendo modelar estados ya sea por hora e incluso por temporada, ampliar los métodos de optimización como la regularización de velocidades mediante inserción de pozos intermedios, la conducción de aguas residuales mediante presión, ampliación de datos de materiales, generar cálculo de volúmenes de obra así como el de costo de los mismos, el cálculo de tuberías simultaneas de diferente diámetro.

Como trabajo a futuro podemos incluir el compartir el código en plataformas colaborativas y la documentación de software como la de la teoría utilizada en el cálculo.

## Capítulo 6. Referencias

- A. Duán, G. (2008). *Teoría de grafos*. Montevideo: Universidad de la República.
- Asensio Cerver, F. (1992). *Biblioteca Atrium de las instalaciones : Agua*. Barcelona: Ediciones Atrium.
- Chompa Abarca, J. A. (2018). *Diseño de una red de drenaje pluvial mediante un algoritmo de optimización y la revisión de su funcionamiento hidráulico* . Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Illinois, E.U.: McGraw-Hill.
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado sanitario*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conde Rivera, R., Vita Garza, A. L., Castro Ortíz, V. A., & López Mejía, J. R. (2014). *Construcción de curvas I-D-Tr de las estaciones climatológicas de México con la base de los datos SMN-CONAGUA*. Puebla, México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Guichard, D., Aguilar, M. Á., Muciño, J. J., & Pérez F, C. (2018). OBTENCIÓN DE FACTORES DE AJUSTE POR DURACIÓN Y CURVAS I-D-TR , A PARTIR DE PRECIPITACIONES HISTÓRICAS EN LA CUENCA DE CHICOASÉN, PERTENECIENTE A LA RH 30, EN CHIAPAS. *Pakbal*, 1(41), 26-30.
- Iskra Mejía, P. (2012). *Realización del software PRyDA*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- López, M. Á. (2019). *Diseño de una red de drenaje pluvial. Coparacion de metodologias*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Planos Para. (2021). <https://www.planospara.com/>. (PlanosPara.com) Obtenido de <https://www.planospara.com/50054/planos-de-lotificacion-fraccionamiento-canteritas-en-dwg-autocad-mexico-diseno-urbano>

Rojas Naira, P. C., & Humpiri Pari, V. H. (2016). *Evaluación, diseño y modelamiento del sistema del drenaje pluvial de la ciudad de Juliaca con la aplicación del software SWMM*. Puno: Universidad Nacional del Antiplano.

Rumbaugh, J., Jacobson, I., & Booch, G. (2000). *El Lenguaje Unificado de Modelado. Manual de Referencia*. Madrid: Pearson.

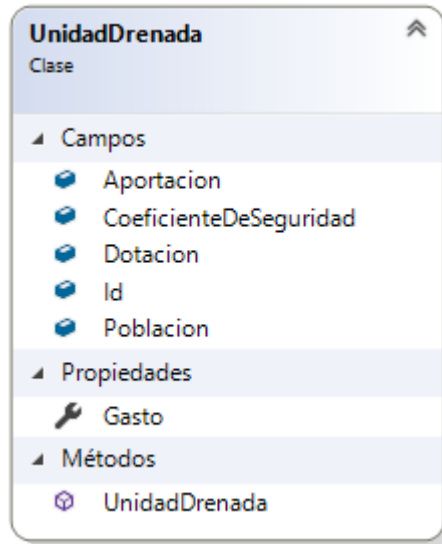
# Anexos

□

*Anexo 1. Campos y propiedades de la clase Red*



*Anexo 3. Campos, propiedades y métodos de la clase Pozo*



*Anexo 4. Campos, propiedades y métodos de la clase UnidadDrenada*

7

*Anexo 5. Campos, propiedades y métodos de la clase AreaTributaria*

1



*Anexo 8. Métodos de la clase Tramo*

Relación del gasto	Relación del tirante	Relación de la velocidad
1.0317E-06	0.001	0.01922401
0.02087782	0.1	0.4011569
0.08757132	0.2	0.61506001
0.19583119	0.3	0.77613529
0.33698777	0.4	0.90217046
0.5	0.5	1
0.6718402	0.6	1.07242205
0.83723766	0.7	1.11977442
0.97746688	0.8	1.13974157
1.06579734	0.9	1.12431101
1.01356203	0.999	1.01361643
1	1	1

*Tabla 9. Elementos hidráulicos de sección circular (sección)*

# Lista de Tablas

Tabla 1. Coeficientes de rugosidad .....	38
Tabla 2. Distribuciones probabilísticas .....	40
Tabla 3. Velocidades máximas y mínimas permisibles .....	42
Tabla 4. Elevaciones de terreno      Tabla 5. Longitudes proporcionales .....	52
<i>Tabla 6. Comparación Distribución de población y coeficiente de Harmon .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 7. Comparación de Gastos .....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 8. Comparación de características de tubería.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 9. Elementos hidráulicos de sección circular (sección) .....</i>	<i>67</i>

# Lista de figuras

Figura 1. Canales a superficie libre.....	11
Figura 2 Corte transversal de un canal de sección circular.....	12
Figura 3. Representación de Actor y caso de uso. ....	16
Figura 4. Diagrama de casos de uso (simplificado).....	18
Figura 5. Diagrama de clases (simplificado).....	19
Figura 6. Pozo de visita.....	22
Figura 7. Tramo.....	23
Figura 8. Ejemplo de grafo dirigido.....	24
Figura 9. Nodos vecinos a nodo A.....	24
Figura 10. Diagrama de flujo para el cálculo hidráulico.....	26
Figura 11. Representación de una red.....	27
Figura 12. Ejemplo de Red con cabezas de atarjea.....	29
Figura 13. Corte Horizontal de red.....	30
Figura 14. Corte frontal de tubería.....	31
Figura 15. Tipos de Alineación.....	31
Figura 16. Representación gráfica del método racional.....	37
Figura 17. Ejemplo de prediseño de red.....	44
Figura 18. Ejemplo de diseño por cota clave.....	44
Figura 19. Ejemplo de diseño por cota eje.....	45
Figura 20. Ejemplo de diseño por cota arrastre.....	45
Figura 21 Intersección con cabeza de atarjea.....	46
Figura 22 Corte vertical de la red.....	47
Figura 23. Tabla Cálculo Hidráulico (segmento).....	48
Figura 24. Tabla Gastos de Diseño (segmento).....	49
Figura 25. Interfaz.....	50
Figura 26. Plano de prueba (Planos Para, 2021).....	51
Figura 27. Perfil con información de CivilCAD®.....	55
Figura 28. Perfil con información del Motor de cálculo.....	55