



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**GUÍA TÉCNICA PARA EL ESTUDIO Y
CÁLCULO HIDROLÓGICO DE LA
ESCORRENTÍA**

Autor: César Vela

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (máster) – Fax: (0241) 871



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA INGENIERIA CIVIL**

**GUÍA TÉCNICA PARA EL ESTUDIO Y CÁLCULO HIDROLÓGICO DE
LA ESCORRENTÍA.**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL**

Autor: César Jesús Vela Conde
C.I: 24.495.919

Tutor: Ing. Emerly Castillo S.
C.I: 4.464.524

San Diego, Abril de 2018



Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-CV-046-2018-1

Valencia, 25 de Enero de 2018,

Ciudadano:
Vela Cesar
C.I. 24.495.919
Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 1-2018 de fecha 25/01/2018 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado "GUÍA TÉCNICA PARA EL ESTUDIO Y CÁLCULO HIDROLÓGICO DE LA ESCORRENTÍA" presentado por usted como requisito para optar al título de Ingeniero Civil.

Se ratifica la designación de la Ing. Emerly Castillo C.I. 4.464.524 y la Ing. Alicia Yanez de Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutores Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,


Prof. Zulay Salcedo
Decana de la Facultad de Ingeniería



c. c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

ZS/f



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Emerly Castillo S. titular de la cédula de identidad N° 4.464.524, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el ciudadano Vela Conde Cesar J; titular de la cédula de identidad 24.495.919 titulado **“GUÍA TÉCNICA PARA EL ESTUDIO Y CÁLCULO HIDROLÓGICO DE LA ESCORRENTÍA.”**, presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 2 días del Mes de Abril del año 2018.



Ing. Emerly Castillo S.
C.I: 4.464.524



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

San Diego, Abril de 2018

ACTA DE REVISIÓN METODOLÓGICA DEL TRABAJO DE GRADO

Quienes suscriben esta Acta, dejan constancia que el Proyecto de Trabajo de Grado: **“GUÍA TÉCNICA PARA EL ESTUDIO Y CÁLCULO HIDROLÓGICO DE LA ESCORRENTÍA”**, ha sido revisado y, cumpliendo con los requisitos exigidos para su aprobación, recomiendan su tramitación ante el organismo académico correspondiente.

Ing. Emerly Castillo S.	_____	_____
Tutor Académico	Firma	Fecha
Ing. Alicia de Pizzella	_____	_____
Tutor Metodológico	Firma	Fecha

INDICE

CONTENIDO	pp.
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN INFORMATIVO.....	x
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO

I EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema	5
1.3 Objetivos de la investigación.....	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Justificación del problema	6
1.5 Alcance y limitación	6

II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes	7
2.2 Bases teóricas.....	9
2.2.1 Escorrentía.....	9
2.2.1.1 Escorrentía Hipodérmica o Sub superficial.....	9
2.2.1.2 Escorrentía Subterránea.....	10
2.2.1.3 Escorrentía Superficial	10
2.2.1.4 El ciclo de la Escorrentía.....	11
2.2.1.5 Efectos del Escurrimiento Superficial	16
2.2.2 Métodos Directos de Estimación.....	19
2.2.2.1 Correntímetro	19
2.2.2.2 Estaciones Limnimétricas.....	23
2.2.3 Métodos Indirectos de Estimación	23

2.2.3.1 Método Racional	23
2.2.3.2 Método de Clark	29
2.2.3.3 Método del Hidrograma del SCS	30
2.2.3.4 Método de las Simulaciones	32
2.3 Términos Básicos.....	33

III MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de la Investigación.....	34
3.2 Diseño de la Investigación.....	34
3.3 Nivel de la Investigación	35
3.4 Población y Muestra	35
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	36
3.6 Fases Metodológicas.....	37

IV RESULTADOS

4.1 Encuesta	39
4.2 Describir y explicar las variables que afectan el fenómeno de la escorrentía y dar a conocer los distintos métodos de cálculo existentes...46	46
4.3 Definir los diferentes métodos de cálculos de escorrentía.....46	46
4.4 Generar ejercicios utilizando data real y resolverlos de una Manera explicativa para que el estudiantado aprenda cómo abordar Problemas relacionados a la escorrentía, en el marco de la Sustentabilidad ambiental, utilizando herramientas virtuales.....47	47
4.5 Diseñar ejercicios propuestos para hacer que el estudiantado pueda resolverlos de una manera sencilla utilizando los conocimientos adquiridos en la guía técnica	47
4.6 Ensamblar la guía técnica de Hidrología sobre el tema de la escorrentía	47

V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones	48
5.2 Recomendaciones	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	50

VI GUÍA TÉCNICA

6.1 Introducción a la guía técnica	51
6.2 Guía técnica	52

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO

FIGURA	pp.
1 Periodo sin precipitaciones	12
2 Inicio de las precipitaciones.....	13
3 Precipitaciones máximas.....	14
4 Fase posterior a la precipitación	15
5 Evolución temporal de algunos componentes del Ciclo Hidrológico....	16
6 Correntímetro electromagnético FlowSens	20
7 Correntímetro tradicional F1	20
8 Mini Correntímetro M1	21
9 Correntímetro AquaDopp	22
10 Tabla de coeficiente de escorrentía de Prevert	24
11 Tabla de coeficiente de escorrentía de Nadal	25
12 Coeficiente de escorrentía de Kepler	25
13 Tc según Kirpich.....	28
14 Tc según C.C.P	28
15 Tc según F.A.A.....	28
16 Curvas Numéricas.....	31



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA

**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**GUÍA TÉCNICA PARA EL ESTUDIO Y CÁLCULO
HIDROLÓGICO DE LA ESCORRENTÍA**

Autor(es): Vela C., Cesar J.

Tutor: Emerly Castillo S.

Fecha: Octubre de 2017

RESUMEN

La presente investigación consiste en la elaboración de una guía técnica que permita conocer el fenómeno de la escorrentía, el cual forma parte del ciclo hidrológico, analizar sus causas, posibles afectaciones tanto al medio ambiente como a las obras civiles, y determinar por medio de fórmulas y análisis matemáticos su intensidad, duración y afectación. Dicha guía servirá como ayuda a los estudiantes universitarios para profundizar sus conocimientos en la materia hidrológica, además, se ubicará en un nivel documental, puesto que a partir de recopilar información teórica y práctica referente a la escorrentía se desarrollará un instrumento de apoyo al aprendizaje de la hidrológica en la escuela de Ingeniería Civil, que permitirá la solución de la falta de material de estudio aplicado a la especialidad. En tal sentido, se analizarán investigaciones previas sobre la escorrentía y los métodos de cálculo existentes, lo cual permitirá formular de manera más práctica y didáctica dichas formas de cálculo para que el estudiantado de Ingeniería Civil, Ingeniería Hidrológica, Eco Hidrología, Licenciatura Geo Hidrológica o estudios afines a la hidrológica pueda entender con mayor facilidad el tema y llegue a conocer los distintos métodos de cálculo de uso más difundido, de esta manera podrá aplicar dichos conocimientos a sus respectivas carreras.

Descriptorios: Escorrentía, caudal, obras, cálculo

INTRODUCCIÓN

Actualmente la escorrentía es conocida como la porción de la precipitación que fluye por la superficie terrestre hacia los arroyos, canales, ríos, lagos u océanos como corriente superficial.

El escurrimiento superficial es sólo una parte de la precipitación, ya que el resto puede ser interceptado por la vegetación (retención superficial), puede ser almacenada, infiltrarse o ser retenida por el suelo, o puede evaporarse; el escurrimiento superficial en el terreno sigue caminos variables debidos principalmente a depresiones y vegetación. Por lo tanto no es factible definir un procedimiento puramente determinístico. Por lo que se adoptan aproximaciones al fenómeno y se idealiza a éste como una superficie de agua cubriendo uniformemente la superficie del terreno con una lámina delgada, la escorrentía cuenta con diferentes factores que pueden alterar su magnitud, ya que dependiendo del factor que afecte la escorrentía, este puede reducir y/o aumentar la cantidad de caudal que escurre en una superficie.

Es bien conocido que las obras civiles pueden tener un gran efecto en los procesos hidrológicos, tales como los patrones de escorrentía de superficie. En un entorno natural la tierra en una cuenca junto a una corriente es como una esponja (más precisamente, como capas de esponjas de diferentes porosidades) que se inclinan hacia arriba, alejándose de la corriente. Cuando llueve un poco de agua se absorbe en la esponja (infiltración) y algunos se escapan de la superficie de la esponja en la corriente (escurrimiento). Una obra civil suele generalmente cambiar el tipo de suelo de uno natural a uno asfáltico, el cual altera totalmente los procesos de escurrimiento e infiltración del agua, al alterar dichos procesos se altera de forma proporcional el caudal de escurrimiento causando una grave alteración a la cuenca, dichos cambios si no son previstos pueden causar graves fallas en las obras civiles.

Por eso es necesario calcular dichos caudales de escurrimiento, ya que pueden provocar erosiones en los suelos, deslaves e inundaciones, para las obras civiles pueden provocar sub presiones en la estructuras, pueden actuar como una

carga, generan humedad y moho en estructuras de concreto y corrosión en estructuras de acero.

Actualmente no se cuenta con el suficiente material actualizado tanto didáctico como teórico que permita conocer de manera más fácil dichos cálculos de escorrentía.

De esta manera el presente estudio consistirá en la elaboración de una guía técnica que permita conocer el fenómeno de la escorrentía y estimarlo por distintos métodos para que de esta forma el estudiantado le sea más fácil comprender el fenómeno de la escorrentía y la cuantificación de sus efectos.

De tal manera, la presente investigación se encuentra estructurada de la siguiente forma:

Capítulo I El Problema: Planteamiento del problema, formulación del problema, objetivo general, objetivos específicos, justificación del problema, alcance y limitaciones.

Capítulo II Marco Teórico: Antecedentes de la investigación y bases teóricas

Capítulo III Marco Metodológico: Tipo de Investigación, diseño de la investigación, nivel de investigación, población y muestra y fases metodológicas.

Capítulo IV Resultados: Resultados de la encuesta y resultados de los objetivos

Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones: Aprendizaje obtenido al realizar la propuesta y recomendaciones a considerar para futuras investigaciones.

Capítulo VI Guía técnica: Guía técnica con sus respectivos capítulos.

CAPÍTULO 1

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

La escorrentía es uno de los procesos del ciclo hidrológico el cual es conocido como el flujo de agua que se genera cuando existe un exceso de agua remanente del fenómeno de la precipitación que fluye por la superficie de la tierra debido a la saturación del suelo o a una baja permeabilidad del mismo, el escurrimiento superficial forma parte del ciclo hidrológico, se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real, el volumen interceptado por la vegetación, almacenamiento en depresiones y la infiltración del sistema suelo.

La escorrentía o escurrimiento superficial es generada por lluvias, ya que el agua pasa de ser el vapor de agua contenido dentro de las masas de aire de la atmósfera, para luego convertirse en precipitación o lluvia. A su vez, el agua se evapora directamente desde el suelo, o es liberada en forma de vapor a través de las plantas, otro tipo de escorrentía superficial no muy común es la generada por nevadas o por el derretimiento de la nieve que ocurre solamente en áreas lo suficientemente frías para que éstas se formen y con una elevación de temperatura de forma considerable el agua pasaría de estado sólido a estado líquido.

En el mismo contexto Ocampo y Vélez (2013) expresan que “la producción de escorrentía involucra una compleja interacción de procesos físicos y químicos que operan a diferentes escalas espaciales y temporales. Estas interacciones han sido estudiadas en las regiones tropicales y permiten comprender la importancia de la estimación de la escorrentía a partir de modelos hidrológicos de simulación continua. Estos modelos hidrológicos son frecuentemente clasificados en tres tipos: empíricos o de caja negra donde la solución se basa en parámetros empíricos, calculados por la identificación de relaciones estadísticamente significativas entre ciertas variables. Teóricos que están descritos por ecuaciones

diferenciales y siguen las leyes de la física y/o procesos químicos. Y conceptuales que son representaciones simplificadas de los procesos físicos, en términos matemáticos y simulan procesos complejos basándose en parámetros clave conceptuales”.

Cabe destacar que la escorrentía es el principal causante de la erosión del suelo y dependiendo de la calidad del suelo o nivel de contaminación presente en él, también se podría decir que la escorrentía puede causar contaminación del agua al arrastrar consigo materiales contaminados, dicha contaminación generalmente ocurre debido a la influencia humana en el medio ambiente.

A nivel de ingeniería civil la escorrentía afecta de manera directa las obras civiles debido a los riesgos que dicho fenómeno pueda causar si no es tomado en cuenta o si es subestimado ya que puede generar inundaciones y posibles daños estructurales al generar humedad y moho en estructuras de concreto y corrosión en estructuras de acero además de actuar como posibles cargas o fuerzas adicionales a las estructuras.

A nivel académico este proceso del agua es estudiado en la rama de hidrología puesto que es necesario un estudio profundo de sus causas, afectaciones, los parámetros que intervienen, métodos para su estimación y diseño de obras en base a los cálculos hidrológicos obtenidos.

Actualmente, en varios temas de hidrología, no se cuenta con material suficiente que pueda ser usado académicamente, el estudiante universitario necesita poder contar con fuentes de información que le permitan conocer de manera más profunda el tema de la escorrentía para así poder entender dicho fenómeno y todas las posibles variables que intervienen en el de manera directa e indirecta, además de poder contar con data de previos estudios hidrológicos en cuencas reales y cálculos ya realizados previamente para poder tener una mejor capacidad de aprendizaje con respecto a este tema.

Según Reyna (2008) “En diversas ramas de la ingeniería como en otras ciencias y especialidades la determinación de la infiltración y consecuentemente del escurrimiento superficial, permitirá avanzar o mejorar el conocimiento de un sinnúmero de procesos y tareas, la principal incertidumbre asociada a las

metodologías que se emplean en la actualidad, para la estimación de la escorrentía directa, radica en la variabilidad asociada a la humedad antecedente en el suelo (SCS, 1971). La falta de otras metodologías de fácil aplicación que supongan una alternativa clara, han planteado una problemática importante”.

Contar con dicha información, además de ejercicios propuestos y resueltos de manera explicativa, basados en data de cuencas existentes permitiría al estudiante universitario contar con una mayor facilidad a la hora de entender la escorrentía y así poder aplicar de manera exacta sus conocimientos adecuadamente a la hora de ejercer su carrera.

1.2 Formulación del problema

¿Es posible mejorar la comprensión de la Hidrología para los estudiantes de Ingeniería Civil, mediante el desarrollo de guías técnicas que incluyan el uso de herramientas digitales para la resolución de ejercicios de aplicación práctica en el marco de la sustentabilidad ambiental, en el estudio del fenómeno de la escorrentía?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Elaborar una guía técnica que permita conocer el fenómeno de la escorrentía para que el estudiantado de Ingeniería Civil comprenda y analice dicho tema mediante el uso de herramientas digitales en el marco de la sustentabilidad ambiental.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Describir y explicar las variables que afectan el fenómeno de la escorrentía y dar a conocer los distintos métodos de cálculo existentes.
2. Definir los diferentes métodos de cálculo de la escorrentía.
3. Generar ejercicios utilizando data real y resolverlos de una manera explicativa para que el estudiantado aprenda cómo abordar problemas relacionados a la escorrentía, en el marco de la sustentabilidad ambiental, utilizando herramientas virtuales.

4. Diseñar ejercicios propuestos para hacer que el estudiantado pueda resolverlos de manera sencilla utilizando los conocimientos adquiridos en la guía técnica.
5. Ensamblar la guía técnica de Hidrología sobre el tema de la escorrentía.

1.4 Justificación del problema

Considerando la problemática actual, la importancia que merece y la responsabilidad que se tiene como ingeniero a la hora de aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera, el presente trabajo de grado se convertirá en un aporte académico a la Universidad José Antonio Páez y será de gran ayuda a otras universidades en las cuales se estudien los fenómenos hidrológicos.

Con el propósito de explicar detalladamente la escorrentía el presente trabajo de grado se encargará de dar a conocer mediante ecuaciones y métodos de cálculo ya establecidos, los temas referentes a la escorrentía, entre ellos tenemos:

- Variables que afectan directa e indirectamente la escorrentía.
- Posibles riesgos y afectaciones a las obras civiles.
- Alteraciones al medio ambiente.
- Alteraciones generadas por el hombre y sus efectos ambientales.
- Mitigación y tratamiento de la escorrentía.
- Medición y modelación matemática de la escorrentía.

1.5 Alcance y limitación

En este proyecto de origen documental pretende recopilar y analizar material de información referente al tema de la escorrentía.

Para el desarrollo de esta propuesta de proyecto, se desarrollará una guía técnica que sirva de ayuda para los estudiantes de ingeniería civil a la hora de cursar la materia del pensum de estudio conocida como hidrología.

Se pretende con el desarrollo del contenido propuesto cubrir lo referente al componente de superficie del fenómeno de la escorrentía tomando en cuenta los aspectos teóricos, resolución de ejercicios sobre situaciones reales y diseño de ejercicios propuestos, haciendo uso de herramientas digitales, en el marco de la sustentabilidad ambiental.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

Según Sabino (1996) “El marco teórico, marco referencial o marco conceptual tiene el propósito de dar a la investigación un sistema coordinado y coherente de conceptos y proposiciones que permitan abordar el problema. Se trata de integrar al problema dentro de un ámbito donde éste cobre sentido, incorporando los conocimientos previos relativos al mismo y ordenándolos de modo tal que resulten útil a nuestra tarea. El fin que tiene el marco teórico es el de situar a nuestro problema dentro de un conjunto de conocimientos, que permita orientar nuestra búsqueda y nos ofrezca una conceptualización adecuada de los términos que utilizaremos”.

2.1 Antecedentes

Los antecedentes de la investigación tienen como objetivo exponer los estudios previos realizados con el propósito de sustentar el tema de investigación.

Tomando en consideración lo mencionado anteriormente, se presentan a continuación los siguientes trabajos de grado:

García, A. (2013) en su trabajo de grado titulado **“Análisis de distribuciones estadísticas alternativas a las tradicionales para la optimización de los caudales de cálculo empleados en los estudios hidrológicos”**, Realizado en la Universidad de Extremadura, España; tuvo como objetivo estudiar el comportamiento de nuevas distribuciones estadísticas nunca empleadas en hidrología. Realizando un exhaustivo estudio comparando los ajustes de bondad y los caudales arrojados por las distribuciones estadísticas clásicas, Gumbel, SQRT-ET máx, Log Pearson tipo 3 con otras distribuciones estadísticas más recientemente aplicadas en otros campos de la ciencia como por ejemplo la distribución de Burr, Dagum, y Pearson 5 perteneciente a la familia de distribuciones Pearson, y la distribución Log-Logistic propuesta por Shoukri en Canadá para los estudios hidrológicos. Además de mediante el uso de las nuevas

tecnologías y programas informáticos, poder modelar de manera más precisa los tipos de flujos y estimar de manera más avanzada los caudales.

El aporte del trabajo de grado para la investigación, será los conocimientos relacionados al uso de nuevas tecnologías para el cálculo de modelos hidráulicos para cauces naturales.

Así mismo, Tarzona, H. (2016) en su trabajo de grado titulado **“Modelamiento hidrológico de la cuenca del río Ica con fines de prevención de inundaciones en la ciudad de Ica”**, Realizado en la Universidad Agraria Nacional La Molina, Perú; presentó como objetivos determinar las áreas de inundación, precipitaciones máximas, caudales máximos y las zonas de riesgo de desborde del valle del río Ica, como una medida de prevención frente a estos eventos, se propone la aplicación de una metodología que ayude a la identificación de las zonas vulnerables a inundaciones, dicha metodología va aplicada al uso de distintos tipos de modelos hidrológicos, variables estadísticas, métodos de estimación directa e indirecta de caudales, información cartográfica, topográfica, pluviométrica, hidrométrica, equipos y software.

El aporte del trabajo de grado a la presente investigación será los métodos de cálculo de los tiempos de concentración, el método del número de curva, las curvas IDF, análisis de frecuencia y precipitación máxima en función del tiempo de retorno.

Por último Floreano, A. (2014) en su trabajo de grado titulado **“Diseño a nivel de ingeniería y su impacto ambiental para la construcción del canal de coronación en la evacuación de aguas pluviales de la localidad de Levanto - Chachapoyas”**, Realizado en la Universidad Privada Atenor Orrego, Perú; tuvo como objetivo mediante estudios hidrológicos basados en la estimación de la intensidad de lluvia, área de la cuenca y el coeficiente de escorrentía, calcular un posible caudal máximo de escorrentía para así poder dar una solución para evacuar las aguas pluviales, permitiendo a la población de la localidad de Levanto satisfacer sus necesidades más elementales, planteando un Canal de Coronación, Implementación de una Unidad de Mantenimiento del Servicio, Capacitación al

personal, permitiendo mejorar la calidad de vida de los pobladores de la Localidad de Levanto.

El aporte del trabajo de grado a la presente investigación se tomará como referencia para poder establecer criterios a la hora de plantear posibles soluciones a la realización de canales abiertos una vez estimados los caudales de escorrentía de los ejercicios propuestos en la elaboración de la guía técnica.

2.2 Bases teóricas

Con la finalidad de explicar el presente trabajo de investigación de una forma didáctica al lector, tomando en cuenta que la investigación será usada para el estudio por parte de personas con diferentes niveles educativos, será presentado a continuación una serie de términos, fórmulas y tablas que permitirán conocer mejor el tema de investigación.

De acuerdo a Arias (1999), constituyen: “Un conjunto de conceptos y proposiciones que constituyen un punto de vista o enfoque determinado, dirigido a explicar el fenómeno o problema planteado”. Pueden subdividirse de acuerdo a su naturaleza en psicológicas, filosóficas, pedagógicas, legales, entre otras. Su desarrollo debe iniciarse con una breve introducción donde se indique el tema a estudiar, el concepto de bases teóricas debidamente citado y la mención de las teorías relacionadas con el trabajo.

Las bases teóricas de la presente investigación se estructuran de la siguiente manera:

- a. Escorrentía**
- b. Métodos directos de estimación**
- c. Métodos indirectos de estimación**

2.2.1 Escorrentía

2.2.1.1 Escorrentía Hipodérmica o Subsuperficial

Es el agua de precipitación que, habiéndose infiltrado en el suelo, se mueve sub horizontalmente por los horizontes superiores a muy poca profundidad sin llegar a infiltrarse en el nivel freático, hasta que aflora a la superficie al encontrar un canal de flujo, formando parte de la escorrentía superficial poco tiempo después de la lluvia, y no llega a alimentar el flujo de agua subterránea.

2.2.1.2 Escorrentía subterránea

Es la precipitación que por el fenómeno de percolación infiltra hasta el nivel freático, desde donde circula hasta alcanzar la red de drenaje formando un flujo de agua conocido como agua subterránea, el agua subterránea representa una fracción importante de la masa de agua presente en los continentes, y se aloja en los acuíferos bajo la superficie de la Tierra. El volumen del agua subterránea es mucho más importante que la masa de agua retenida en lagos o circulante, y aunque menor al de los mayores glaciares, las masas más extensas pueden alcanzar un millón o más de kilómetros cuadrados

2.2.1.3 Escorrentía superficial

La Escorrentía Superficial o Directa es la precipitación que no se infiltra en ningún momento y llega a la red de drenaje moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de la gravedad. Corresponde a la precipitación que no queda tampoco detenida en las depresiones del suelo, y que escapa a los fenómenos de evapotranspiración. El proceso que describe el agua cuando se inicia un aguacero depende de las características del terreno, la primera lluvia caída se invierte en llenar la capacidad de retención de la parte aérea de las plantas y en saturar el suelo. Cuando la capacidad de infiltración es inferior a la intensidad de la lluvia, el agua comenzará a moverse por la superficie del terreno. Se forma, entonces, una capa delgada de agua. Ésta se mueve por la acción de la gravedad según la pendiente del terreno y es frenada por las irregularidades del suelo y por la presencia de vegetación hasta incorporarse a la red de drenaje, donde se junta con los otros componentes que constituyen la escorrentía total.

La escorrentía superficial es una de las principales causas de erosión a nivel mundial. Suele ser particularmente dañina en suelos poco permeables, como los arcillosos, y en zonas con una cubierta vegetal escasa.

La proporción de agua que sigue cada uno de estos caminos depende de factores como el clima, el tipo de roca o la pendiente del terreno. De modo similar, en lugares en los que hay abundantes materiales sueltos o muy porosos, es muy alto el porcentaje de agua que se infiltra.

La escorrentía que se produce en la superficie del suelo antes de llegar a un canal se denomina también fuente no puntual. Si una fuente no puntual contiene contaminantes artificiales o formas naturales de contaminación (tales como hojas podridas), la escorrentía se denomina contaminación de fuentes no puntuales. Una zona de tierra que produce la escorrentía que drena a un punto común se llama una cuenca de drenaje.

Cuando la escorrentía fluye a lo largo del suelo, puede recoger contaminantes del suelo incluyendo petróleo, pesticidas o fertilizantes que se convierten en descarga o contaminación de fuentes no puntuales. Además de causar la erosión y la contaminación del agua, la escorrentía superficial en las áreas urbanas es una causa primaria de las inundaciones urbanas que pueden dar lugar a daños materiales, humedad y moho en los sótanos e inundaciones en la calle.

El escurrimiento superficial puede ser generado por lluvias, nevadas o por el derretimiento de la nieve, o por los glaciares. La nieve y la fusión del glaciar ocurren solamente en áreas lo suficientemente frías para que éstas se formen permanentemente. Por lo general, la fusión de nieve alcanzará su punto máximo en la primavera y la fusión de los glaciares en el verano, lo que dará lugar a pronunciados máximos de flujo en los ríos afectados por ellos. El factor determinante de la velocidad de fusión de la nieve o los glaciares es tanto la temperatura del aire como la duración de la luz solar. En las regiones de alta montaña, los arroyos a menudo se elevan en días soleados y caen sobre los turbios por esta razón.

En las zonas donde no hay nieve, la escorrentía vendrá de la lluvia. Sin embargo, no todas las precipitaciones producirán escurrimiento porque el almacenamiento de los suelos puede absorber duchas ligeras.

2.2.1.4 El ciclo de la escorrentía

Los componentes de la Escorrentía evolucionan según un ciclo que distingue cuatro fases en relación con el ritmo de las precipitaciones tomando en cuenta inicio de las precipitaciones, precipitaciones máximas, final de las precipitaciones y periodos de sequía.

- Primera fase: Período sin precipitaciones (Ver Figura 1). Después de un período sin precipitaciones la evapotranspiración tiende a agotar la humedad existente en las capas superficiales y a extraer agua de la franja capilar. Las aguas subterráneas alimentan a las corrientes superficiales descendiendo progresivamente su nivel piezométrico.

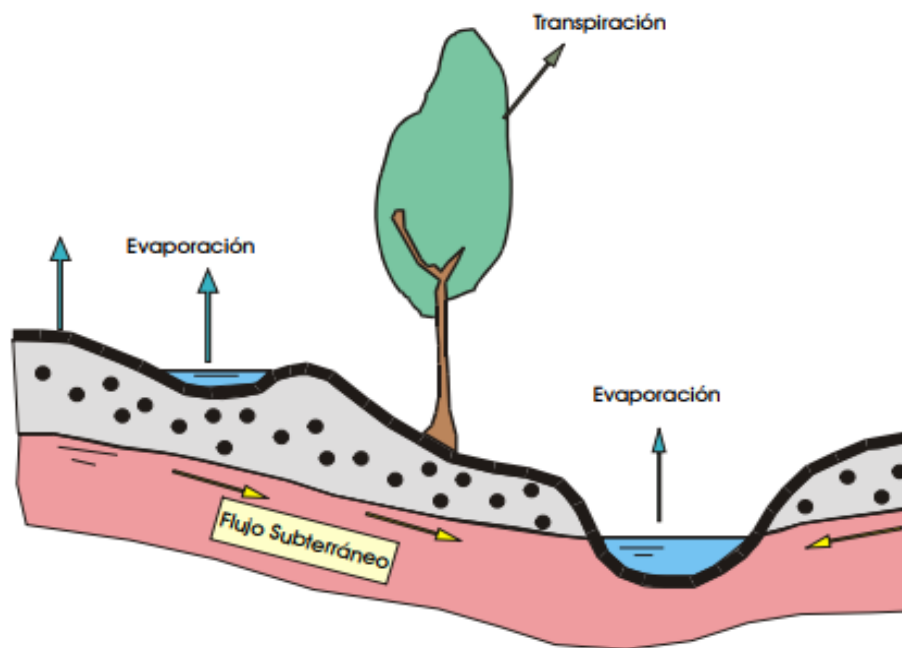


Figura 1: Periodo sin precipitaciones

Fuente: Universidad de la Coruña

- Segunda fase: Iniciación de la Precipitación (Ver Figura 2). La Evapotranspiración cesa. Las aguas meteóricas son interceptadas por la vegetación, las superficies de agua libre, los cursos de agua y el suelo. En éste se infiltra una cantidad importante de agua que abastece su capacidad de almacenamiento; el excedente se mueve superficialmente en forma de escorrentía Directa que alimenta débilmente los cursos de agua. Continúan las aportaciones de las corrientes subterráneas a los cursos superficiales, no interrumpiéndose el descenso de los niveles piezométricos de la capa freática.

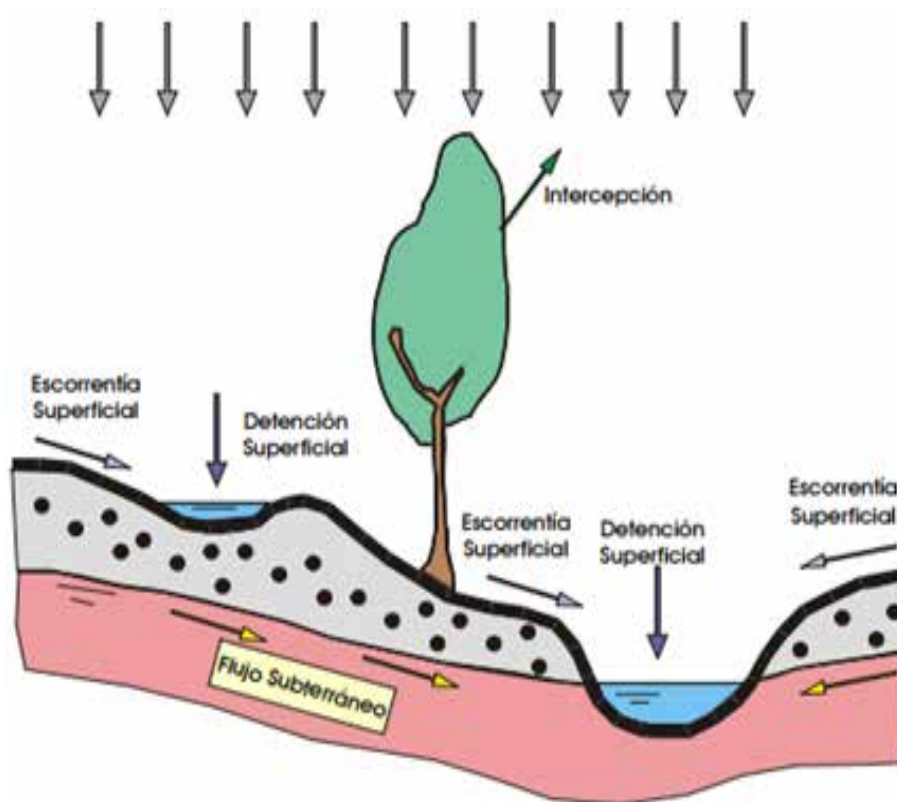


Figura 2: Inicio de las precipitaciones

Fuente: Universidad de la Coruña

- Tercera fase: Precipitación máxima (Ver Figura 3). Después de una cierta duración de la Precipitación, la cubierta vegetal apenas intercepta agua y prácticamente la totalidad de la Precipitación alcanza el suelo. Las capas superficiales del suelo están saturadas. Parte de las precipitaciones se infiltran, alimentando a la Escorrentía Hipodérmica, y a los acuíferos, originándose en éstos una elevación del nivel piezométrico. La Precipitación que no se infiltra origina Escorrentía Superficial que en esta fase alcanza su valor máximo. La Escorrentía Subterránea aumenta ligeramente. La escorrentía total alcanza igualmente su máximo valor, apareciendo las posibles crecidas que puedan ocurrir en dicha fase.

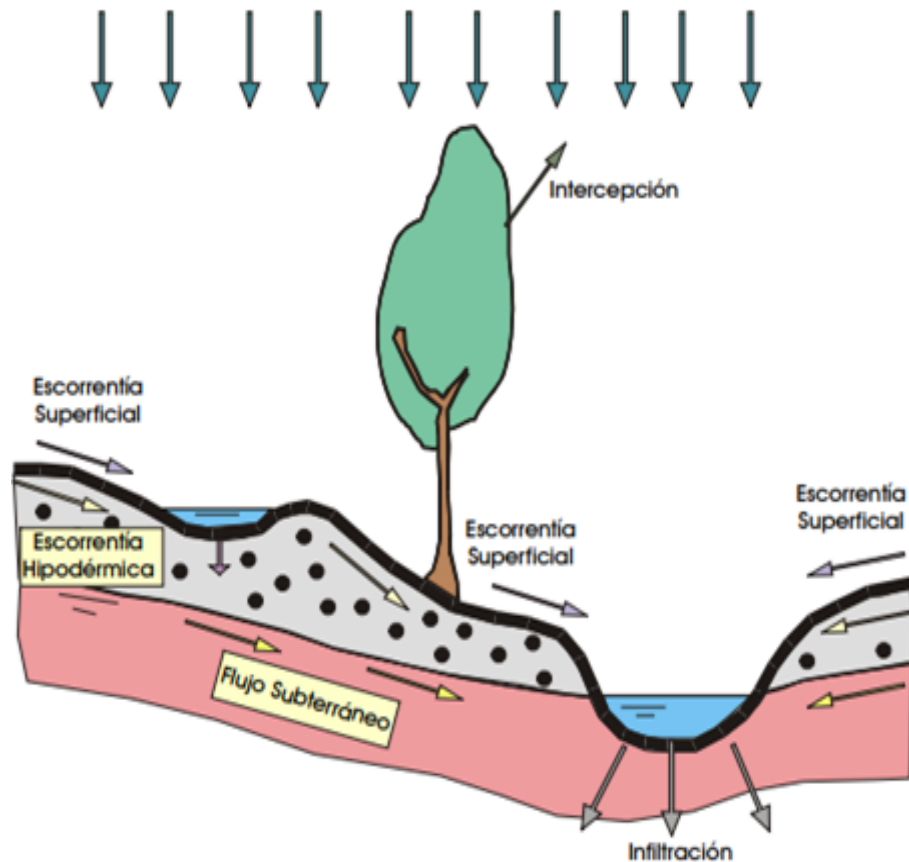


Figura 3: Precipitaciones máximas

Fuente: Universidad de la Coruña

- Cuarta fase: La última fase conocida como el periodo posterior a la Precipitación (Ver Figura 4). La lluvia cesa su totalidad. La escorrentía superficial desaparece rápidamente ya que el agua se queda de manera estática en depresiones en la superficie o se infiltra a las capas más profundas del suelo. El suelo y subsuelo alcanzan su nivel máximo de saturación. Continúa la infiltración de agua que está estancada o retenida en depresiones superficiales alimentando a la humedad del suelo, contribuyendo a la escorrentía hipodérmica y a las aguas subterráneas. Una vez ocurrido toda esta fase aparecen de nuevo los procesos de evapotranspiración. Los cursos de agua, alimentados únicamente por las escorrentías hipodérmica y subterránea entran en régimen de decrecida.

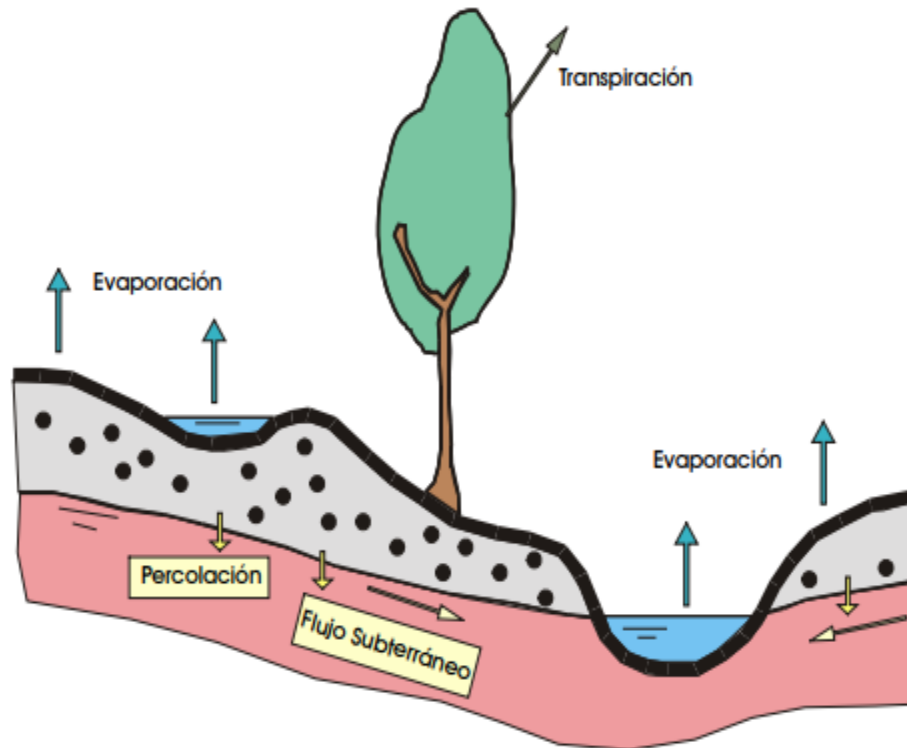


Figura 4: Fase posterior a la precipitación

Fuente: Universidad de la Coruña

Para visualizar de manera más directa los 3 tipos de escorrentía mencionados anteriormente y el volumen que representa cada uno de ellos es necesario considerar la suma de los 3 como la escorrentía total y la suma de la escorrentía sub superficial o hipodérmica y la escorrentía subterránea como la infiltración total, siendo generalmente el volumen de escorrentía superficial el más grande de todos debido generalmente a las condiciones del suelo, seguido de la escorrentía sub superficial o hipodérmica y por último pero no menos importante el volumen de escorrentía subterránea. Por ende se procede a estimar la evolución temporal de alguno de sus componentes (Ver figura 5). Con respecto a él cauce en el que ocurre el escurrimiento, los valores de la intensidad de la lluvia generalmente expresados en milímetros sobre hora, los fenómenos de interceptación, detención superficial y humedad del suelo

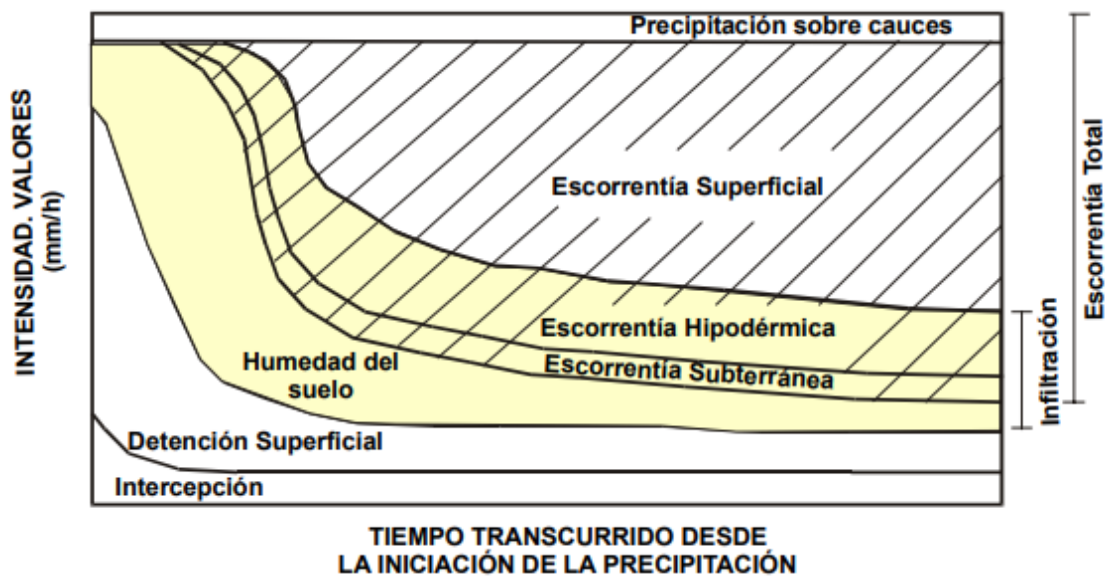


Figura 5: Evolución temporal de algunos componentes del Ciclo Hidrológico

Fuente: Universidad de la Coruña

2.2.1.5 Efectos del escurrimiento superficial

- **Erosión y deposición**

El escurrimiento superficial puede causar la erosión de la superficie de la Tierra; el material erosionado puede ser depositado a una distancia considerable. Hay cuatro tipos principales de erosión del suelo por el agua: erosión por salpicaduras, erosión por laminado, erosión por acanaladura y erosión por barrancos. La erosión del chapoteo es el resultado de la colisión mecánica de gotas de lluvia con la superficie del suelo: las partículas de suelo que son desalojadas por el impacto luego se mueven con la escorrentía superficial. La erosión de la capa es el transporte terrestre de sedimentos por escurrimiento sin un canal bien definido. Las causas de la rugosidad superficial del suelo pueden hacer que el escurrimiento se concentre en caminos de flujo más estrechos: a medida que estos incisos, los canales pequeños pero bien definidos que se forman se conocen como aristas. Estos canales pueden ser tan pequeños como un centímetro de ancho o tan grandes como varios metros. Si la escorrentía continúa los arroyuelos pueden llegar a convertirse

en barrancos. La erosión del barranco puede transportar grandes cantidades de material erosionado en un período de tiempo pequeño.

La productividad reducida de los cultivos suele ser el resultado de la erosión, y estos efectos se estudian en el campo de conservación del suelo. Las partículas de suelo transportadas en la escorrentía varían en tamaño desde aproximadamente 0,001 milímetros hasta 1,0 milímetro de diámetro. Las partículas más grandes se asientan sobre distancias de transporte cortas, mientras que las partículas pequeñas pueden ser transportadas a largas distancias suspendidas en la columna de agua. La erosión de los suelos limosos que contienen partículas más pequeñas genera turbidez y disminuye la transmisión de luz, lo que perturba los ecosistemas acuáticos.

- **Efectos ambientales**

Los principales problemas ambientales asociados con el escurrimiento son los impactos a las aguas superficiales, subterráneas y subsuperficiales o hipodérmicas a través del transporte de contaminantes del agua a estos sistemas. En última instancia, estas consecuencias se traducen en el riesgo para la salud humana, la perturbación del ecosistema y el impacto estético en los recursos hídricos. Algunos de los contaminantes que crean el mayor impacto en las aguas superficiales derivadas de la escorrentía son sustancias de petróleo, herbicidas y fertilizantes. La absorción cuantitativa por escurrimiento superficial de plaguicidas y otros contaminantes se ha estudiado desde la década de 1960, y temprano el contacto de los plaguicidas con el agua se sabe que mejora la fitotoxicidad. En el caso de las aguas superficiales, los impactos se traducen en contaminación del agua, ya que los arroyos y ríos han recibido escorrentía transportando diversos productos químicos o sedimentos. Cuando las aguas superficiales se utilizan como suministros de agua potable, pueden verse comprometidas con respecto a los riesgos para la salud y la estética del agua potable, es decir, el olor, el color y los efectos de turbiedad. Las aguas superficiales contaminadas pueden alterar los procesos metabólicos de las especies acuáticas que albergan; estas alteraciones pueden conducir a la muerte, como las muertes de peces, o alterar el equilibrio de las poblaciones

presentes. Otros impactos específicos son el apareamiento de animales, y la productividad de las plantas. Algunas investigaciones muestran que el escurrimiento superficial de plaguicidas, como el DDT, puede alterar el género de las especies de peces genéticamente, lo que transforma a los machos en pescados femeninos.

El escurrimiento superficial que ocurre dentro de los bosques puede suministrar a los lagos con altas cargas de nitrógeno mineral y fósforo que conducen a la eutrofización. Las aguas de escorrentía dentro de los bosques de coníferas también están enriquecidas con ácidos húmicos y pueden conducir a la humificación de los cuerpos de agua. Además, las islas de alto nivel y jóvenes de los trópicos y subtropicales pueden sufrir altas tasas de erosión del suelo y también contribuir con grandes flujos materiales al océano costero. Esta escorrentía derivada de sedimentos, carbono y contaminantes puede tener grandes impactos en los ciclos biogeoquímicos globales y en los ecosistemas marinos y costeros.

En el caso de las aguas subterráneas, el principal problema es la contaminación del agua potable, si el acuífero se extrae para uso humano. Con respecto a la contaminación del suelo, las aguas de escorrentía pueden tener dos vías importantes de preocupación, en primer lugar, el agua de escorrentía puede extraer contaminantes del suelo y llevarlos en forma de contaminación del agua a hábitats acuáticos aún más sensibles. En segundo lugar, la escorrentía puede depositar contaminantes en suelos prístinos, creando consecuencias sanitarias o ecológicas.

· **Inundaciones**

Las inundaciones ocurren cuando un curso de agua es incapaz de transmitir la cantidad de escorrentía que fluye aguas abajo. La frecuencia con la que esto ocurre se describe por un período de retorno. Las inundaciones son un proceso natural, que mantiene la composición y los procesos del ecosistema, pero también puede ser alterado por cambios en el uso de la tierra, como la ingeniería fluvial. Las inundaciones pueden ser beneficiosas para las sociedades o causar daños. La agricultura a lo largo de la llanura de inundación del Nilo aprovechó la

inundación estacional que depositó nutrientes beneficiosos para los cultivos. Sin embargo, a medida que aumenta el número y la susceptibilidad de los asentamientos, las inundaciones se convierten cada vez más en un peligro natural. En las zonas urbanas, la escorrentía superficial es la causa principal de las inundaciones urbanas, conocidas por su repetitivo y costoso impacto en las comunidades. Los impactos adversos afectan la pérdida de vidas, los daños materiales, la contaminación del suministro de agua, la pérdida de cultivos, la dislocación social y la falta de vivienda temporal. Las inundaciones se encuentran entre las más devastadoras de las catástrofes naturales.

2.2.2 Métodos directos de estimación

Los métodos directos de estimación de escorrentía nos permiten conocer con completa exactitud la dirección y velocidad del caudal de escorrentía, exclusiva y únicamente al momento de tomar la medición utilizando instrumentos de precisión.

2.2.2.1 Correntímetros

El Correntímetro es un instrumento utilizado para medir la velocidad de corrientes en cursos de agua, en los ríos, arroyos, estuarios, puertos, modelos físicos en laboratorio, entre otras.

Existen modelos que registran la dirección, profundidad e inclinación respecto de la vertical, temperatura del agua, la presión y conductividad.

- **Correntímetro electromagnético FlowSens**

El Correntímetro electromagnético FlowSens (Ver figura 6). Es un sensor el cual se ha desarrollado especialmente para el uso en canales abiertos, donde existen depósitos originados por la maleza o en aguas residuales que pueden resultar un problema. Al FlowSens no le afectan los cambios en la conductividad del fluido y se puede usar en un amplio rango de aplicaciones para medir fluidos en los que se incluye el agua potable, residual, salada o de manantial. La electrónica de control que incorpora el instrumento, da lecturas de velocidad en tiempo real y en promedio. El FlowSens tiene una precisión de +/- 0,5 % del valor

de lectura, un ancho rango de medida de ± 5 m/s y se puede usar en calados de 5 cm de columna de agua.



Figura 6: Correntímetro electromagnético FlowSens

Fuente: Compañía SEBA Hidrometrie

· **Correntímetro tradicional F1**

El correntímetro universal tipo F1 (Ver figura 7). Posee hélices para medidas de caudal tradicionales. Fabricado en acero inoxidable con eje y rodamientos muy robustos. Este molinete está diseñado para determinar la velocidad del agua en arroyos, ríos, canales y en el mar. Puede ser usado sobre una barra-soporte o bien suspendido de un cable trasbordador, y permite mediciones de 0,025 m/s hasta 10 m/s.

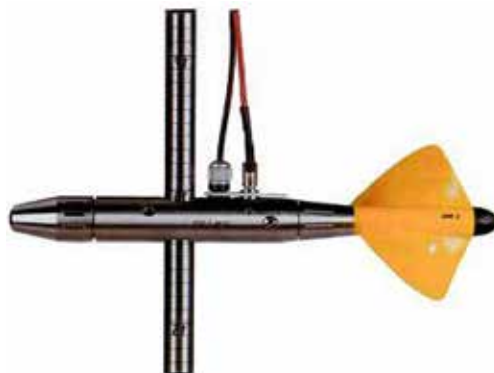


Figura 7: Correntímetro tradicional F1

Fuente: Compañía SEBA Hidrometrie

- **Mini Correntímetro tipo M1**

El Mini Correntímetro M1 (Ver figura 8). Sirve para medir la velocidad de la corriente de agua en laboratorios, modelos, arroyos, ríos y canales con reducido nivel de agua, así como en tuberías de pequeño diámetro.



Figura 8: MiniCorrentímetro M1

Fuente: Compañía SEBA Hidrometrie

- **Correntímetro Aquadopp**

El Correntímetro Aquadopp (Ver figura 9). Es probablemente el correntímetro mono punto más versátil del mercado. Es económico, robusto y tiene un amplio rango de aplicaciones. La electrónica del sistema integra una precisa medida de la velocidad Doppler con sensores adicionales como temperatura, presión, inclinómetro y brújula. El Aquadopp es fácil de mantener, no tiene partes móviles, no necesita recalibración y no presenta deriva con el tiempo. El instrumento se puede utilizar en aplicaciones a tiempo presente (real time como dicen los ingleses), pero también permite registrar datos en memoria interna -mediante baterías- gracias a una sofisticada gestión del consumo, lo que le convierte en una excelente elección para fondeos autónomos.

El Aquadopp dispone de un completo software para Windows XP, o posterior, para la adquisición de datos en tiempo presente o para la programación de fondeos autónomos.

También se puede integrar con una controladora externa mediante la interface RS232/RS422 (binaria o ASCII), salidas analógicas o desde un ordenador Windows® con controles ActiveX.

El Aquadopp puede medir la altura, periodo, y dirección del oleaje utilizando el método llamado PUV (ver el apartado ¿Iniciándose en olas?). Brevemente, se trata de medir las dos componentes horizontales de la corriente 2D (componentes U y V) a 1 Hz, junto con el sensor de presión (P) y procesar esta tripleta con el software QuickWave de Nortek o rutinas Matlab que pueden ser descargadas del foro de Nortek, como sensor de oleaje.

En canales, ríos o puertos el Aquadopp puede instalarse adosado a una pared e invertido para evitar sedimentación sobre el cabezal. En este caso, los haces acústicos son proyectados horizontalmente hacia el flujo. Las corrientes se pueden medir a 5 m del instrumento operando como un sensor 2D, midiendo sólo las dos componentes horizontales de la velocidad.



Figura 9: Correntímetro Aquadopp

Fuente: Compañía Nortek

2.2.2.1 Estaciones Limnimétricas

La estación Limnimétrica es donde se ubica un punto para análisis y estudio de la corriente, donde el observador encargado de dicha estación realiza lecturas directas de las miras o también llamados Limnímetros.

En dichas estaciones se estiman los caudales mediante una curva de gasto, la curva de gasto (altura - caudal) hay que generarla por los métodos de aforo directo. Con estos métodos se obtienen puntos que correlacionan el caudal medido directamente (Q) y la altura de la lámina de agua para ese caudal (H). Esta nube de puntos se representa en diagrama H - Q y por métodos de ajuste matemáticos se deduce la línea de tendencia que representa la curva de ajuste o de gasto de la estación Limnimétrica. Una vez obtenida dicha curva, es decir ajustada o calibrada a la estación de aforo indirecto, obtendremos los caudales Q deducidos de la altura de la lámina de agua H.

2.2.3 Métodos indirectos de estimación

Los métodos indirectos son aquellos métodos que se basan en la información de precipitación que se pueda obtener de una cuenca a lo largo de los años para así poder estimar mediante fórmulas, los caudales de escorrentía para eventos los cuales su probabilidad de ocurrencia sea extremadamente baja y por ende proceder a diseñar distintos tipos de obras civiles en base a los cálculos y criterios obtenidos al utilizar dichos métodos.

2.2.3.1 Método Racional

El método racional es una forma de calcular el caudal de escorrentía exclusiva y únicamente en cuencas con un área menor a 200 hectáreas, lo cual es equivalente a 2.000.000 metros cuadrados.

En base a 3 sencillos criterios se procede a calcular dicho caudal de escorrentía: coeficiente de escorrentía, intensidad de la lluvia y área de la cuenca.

· Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía es uno de los parámetros fundamentales de la Hidrología superficial, pues representa la porción de la precipitación que se convierte en caudal, es decir, la relación entre el volumen de escorrentía superficial y el de precipitación total sobre un área (cuenca) determinada,

Para referirse a el coeficiente de escorrentía es necesario darse cuenta del hecho de que no toda el agua que pasa por un área determinada escurre por la superficie, la cantidad de escorrentía superficial depende del tipo de precipitación, humedad del suelo, tipo de terreno, tipo de cobertura superficial y la pendiente del terreno.

En pocas palabras el coeficiente de escorrentía es el porcentaje de agua que escurre en la superficie de un terreno, en relación al total de agua que pudo haber escurrido en el terreno, por ende no es un factor constante, pues varía de acuerdo a la magnitud de la lluvia y particularmente con las condiciones fisiográficas de la cuenca hidrográfica (Cobertura vegetal, pendientes, tipo de suelo), por lo que su determinación es aproximada. En general, los cálculos de este coeficiente se efectúan a partir de los valores anuales de precipitación y caudal, generalmente dichos valores están estipulados en distintos tipos de tablas ya que las condiciones del terreno no son iguales para cada región.

Por lo general las tablas y fórmulas más usadas son las de Prevert (Ver figura 10). Nadal (Ver figura 11). Y Kepler (Ver figura 12).

Uso del suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo		
		Arenoso – limoso Limoso - arenoso	Limoso Limoso - arenoso	Arcilloso
Bosque	0 – 5	0.10	0.30	0.40
	5 – 10	0.25	0.35	0.50
	10 – 30	0.30	0.40	0.60
	>30	0.32	0.42	0.63
Pastizal	0 – 5	0.15	0.35	0.45
	5 – 10	0.30	0.40	0.55
	10 – 30	0.35	0.45	0.65
	>30	0.37	0.47	0.68
Cultivo agrícola	0 – 5	0.30	0.50	0.60
	5 – 10	0.40	0.66	0.70
	10 – 30	0.50	0.70	0.80
	>30	0.53	0.74	0.84

Figura 10: Tabla de coeficiente de escorrentía de Prevert

Fuente: Prevert (1986)

Esta tabla permite conocer directamente el coeficiente de escorrentía en base al uso del suelo, pendiente del terreno y la textura del suelo.

Extensión		Lluvia media anual		Características	
Km ²	K ₁	mm	K ₂	Cuenca	K ₃
10	2.60	200	0.25	Llana y permeable	0.5 – 0.7
20	2.45	300	0.50	Ondulada	0.5 – 1.2
40	2.15	400	0.75	Montañosa e impermeable	1.2 – 1.5
100	1.80	500	1.0		
200	1.70	600	1.1		
500	1.40	700	1.17		
1000	1.30	800	1.25		
5000	1.0	900	1.32		
10000	0.90	1000	1.40		
20000	0.87	1200	1.50		

Figura 11: Tabla de coeficiente de escorrentía de Nadal

Fuente: Nadal (1986)

Completamente distinta a la tabla de Prevert (1986), dicha tabla se basa en 3 criterios

K1 = factor de la extensión de la cuenca.

K2 = factor de la lluvia media anual.

K3 = factor de la pendiente y de la permeabilidad del suelo.

Obtener el coeficiente de escorrentía implica multiplicar dichos valores por una constante de 0,25

Siendo $C = 0,25 * K1 * K2 * K3$

$C = a - \frac{b}{P}$	aplicable para $P > 500 \text{ mm}$
-----------------------	-------------------------------------

Figura 12: Coeficiente de escorrentía de Kepler

Fuente: Kepler (2005)

(a) Es un coeficiente que oscila entre 0.88 y 1. Para cuencas torrenciales se aconseja emplear el valor máximo.

(b) Es un coeficiente que varía entre 350 y 460. En el caso de cuencas torrenciales debe emplearse el valor mínimo.

(p) Es la precipitación anual o módulo pluviométrico.

· Coeficiente de escorrentía promedio

En general las cuencas receptoras presentarán variedad de suelos, con coberturas, pendientes y permeabilidades variables.

En estos casos se recomienda determinar el coeficiente de escorrentía mediante un promedio ponderado de los coeficientes parciales de cada zona. Para ello, se dividirá la cuenca en zonas con características homogéneas de tipo de suelo, cobertura vegetal y pendiente, a las cuales se les asignará el respectivo Coeficiente “parcial”, de acuerdo a la tabla anterior.

Cada coeficiente parcial (C_i) es luego multiplicado por su área (A_i) correspondiente, se suman los productos de cada zona y se divide el resultado entre el área total de la cuenca, para obtener el coeficiente de escorrentía ponderado:

$$\bar{C} =$$

En efecto, un correcto dimensionamiento del drenaje garantizará la vida útil de una carretera, una vía férrea, un aeropuerto, cultivos, etc. El conocimiento de las precipitaciones pluviales extremas y el consecuente dimensionamiento adecuado de los órganos extravasares de las represas garantizará su seguridad y la seguridad de las poblaciones, cultivos y demás estructuras que se sitúan aguas abajo de la misma. El conocimiento de las lluvias intensas, de corta duración, es muy importante para dimensionar el drenaje urbano y rural, de esta manera evitar inundaciones en los centros poblados o cultivos.

Las características de las precipitaciones que deben conocerse para estos casos son principalmente, la intensidad de la lluvia y duración de la lluvia.

Estas dos características están asociadas mediante las curvas IDF(Intensidad, Duración y Frecuencia).

Las precipitaciones pluviales extremas, es decir con tiempos de retorno de 20, 500, 1.000 y hasta 10.000 años, o la precipitación máxima probable, son determinadas para cada sitio particular con procedimientos estadísticos, con base en observaciones de larga duración.

La duración está relacionada con el tiempo de concentración y la frecuencia con el periodo de retorno.

a. Tiempo de concentración

Chow et al (1994) define el tiempo de concentración como: el tiempo requerido por una gota de agua para recorrer desde el punto hidráulicamente más lejano hasta la salida de la cuenca. Transcurrido el tiempo de concentración se considera que toda la cuenca contribuye a la salida. Como existe una relación inversa entre la duración de una tormenta y su intensidad (a mayor duración disminuye la intensidad), entonces se asume que la duración crítica es igual al tiempo de concentración T_c . El tiempo de concentración real depende de muchos factores, como la geometría en planta de la cuenca (una cuenca alargada tendrá un mayor tiempo de concentración). Otro factor es la pendiente, mientras mayor sea, producirá flujos más rápidos y en menor tiempo de concentración. Además influyen; el área, las características del suelo, cobertura vegetal, etc. Las fórmulas

más comunes generalmente incluyen la pendiente, la longitud del cauce mayor desde la divisoria y el área (Ver figuras 13,14 y 15).

$$t_c = 0.01947L^{0.77}S^{-0.385}$$

L= longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida, m.

S= pendiente promedio de la cuenca, m/m

Figura 13: Tc según Kirpich

Fuente: Kirpich (1940)

$$t_c = 0.0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

L= longitud del curso de agua más largo, m.

H= diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, m.

Figura 14: Tc según C.C.P

Fuente: California Culverts Practice (1942)

$$t_c = 0.7035 \frac{(1.1 - C)L^{0.5}}{S^{0.333}}$$

C= coeficiente de escorrentía del método racional.

L= longitud de flujo superficial, m.

S= pendiente de la superficie, m/m.

Figura 15: Tc según F.A.A

Fuente: Federal Aviation Administration (1970)

b. Periodo de retorno

El periodo de retorno se define como el intervalo de recurrencia (T), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad, del m-ésimo evento de los n registros. El valor del período de retorno se determina en función de la posición de la variable aleatoria (P_{máx} o Q_{máx} en su caso). Con base en las siguientes relaciones:

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{n+1}}{\mathbf{m}} \quad \text{Y} \quad \mathbf{P} = \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{n+1}}$$

Donde:

- (m) Es el número de orden de la data de precipitación con orden de la lluvia más intensa a la menos intensa.
- (n) Es el número de años del registro de la data de precipitación.
- (p) Es la probabilidad de ocurrencia del suceso.
- (t) Es el periodo de retorno del suceso en años.

Tomando en cuenta los datos de C, A e I anteriormente mencionados se procede a calcular el caudal de escorrentía como:

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = C * I * A$$

Para un caudal máximo probable

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = (C * I_{\text{max}} * A) / 360$$

Para un volumen medio de escurrimiento

$$V_m = A * P * C$$

Siendo P la precipitación media anual

2.2.3.2 Método de Clark

El método del hidrograma unitario de Clark es uno de los métodos utilizados en hidrología, para la determinación de un caudal producido por una determinada precipitación en una cuenca hidrográfica.

Si fuera posible que se produjeran dos lluvias idénticas sobre una cuenca hidrográfica cuyas condiciones antes de la precipitación también fueran idénticas, sería de esperarse que los hidrogramas correspondientes a las dos lluvias también

fueran iguales. Esta es la base del concepto de hidrograma unitario. En la realidad es muy difícil que ocurran lluvias idénticas, estas pueden variar en: su duración total, el volumen precipitado por evento, su distribución espacial y su intensidad total con respecto a un área de la cuenca.

- a. Primer principio: En una cuenca vertiente, la duración de la escorrentía superficial que corresponda a aguaceros de la misma duración temporal y distribución espacial de la lluvia neta, es prácticamente independiente de la duración del aguacero, siempre y cuando la duración de éste esté comprendida entre 1/3 y 1/5 del tiempo de concentración de la cuenca.
- b. Segundo principio: Las ordenadas homólogas de los hidrogramas de escorrentía superficial correspondientes a aguaceros unitarios con distribución temporal y espacial idénticas son directamente proporcionales a sus intensidades correspondientes.
- c. Tercer principio: El hidrograma de escorrentía superficial correspondiente a aguaceros de larga duración se obtiene representándolo como sucesión de aguaceros unitarios y sumando las ordenadas correspondientes a una misma abscisa.

2.2.3.3 Método del Hidrograma del Servicio de Conservación de Suelos

Este método, desarrollado por el SCS, también llamado del “número de curva” consta de dos partes. En la primera de ellas se hace una estimación del volumen de escorrentía resultante de una precipitación - escurrimiento directo, en la segunda se determina el tiempo de distribución del escurrimiento, incluyendo el caudal de punta. La estimación del escurrimiento correspondiente a una lluvia, se hace con el siguiente procedimiento: Los datos de lluvia más generalmente disponibles son los totales medidos en pluviómetros y para tales datos se ha desarrollado la relación lluvia - escorrentía. Esos datos son los totales de una o más tormentas que ocurren en un día del calendario, y nada se sabe acerca de su distribución en el tiempo, por eso es que la relación excluye al tiempo como la variable explícita.

$$Q = (P - 0,20 S)^2 / (P + 0,8 S) \qquad S = (25400 / CN) - 254$$

Donde:

Q = Escurrimiento medio (mm).

P = Precipitación por evento (mm).

S = Retención máxima potencial (mm).

CN = Curvas numéricas (adimensional)

Las curvas numéricas (Ver figura 16). Son similares al coeficiente de escurrimiento y fueron obtenidas por el Servicio de Conservación de Suelos basados en la observación de hidrogramas procedentes de varias tormentas en diferentes cuencas de los Estados Unidos. Estas curvas dependen del tipo de suelo, condición hidrológica de la cuenca, uso del suelo y manejo y la condición de humedad antecedente.

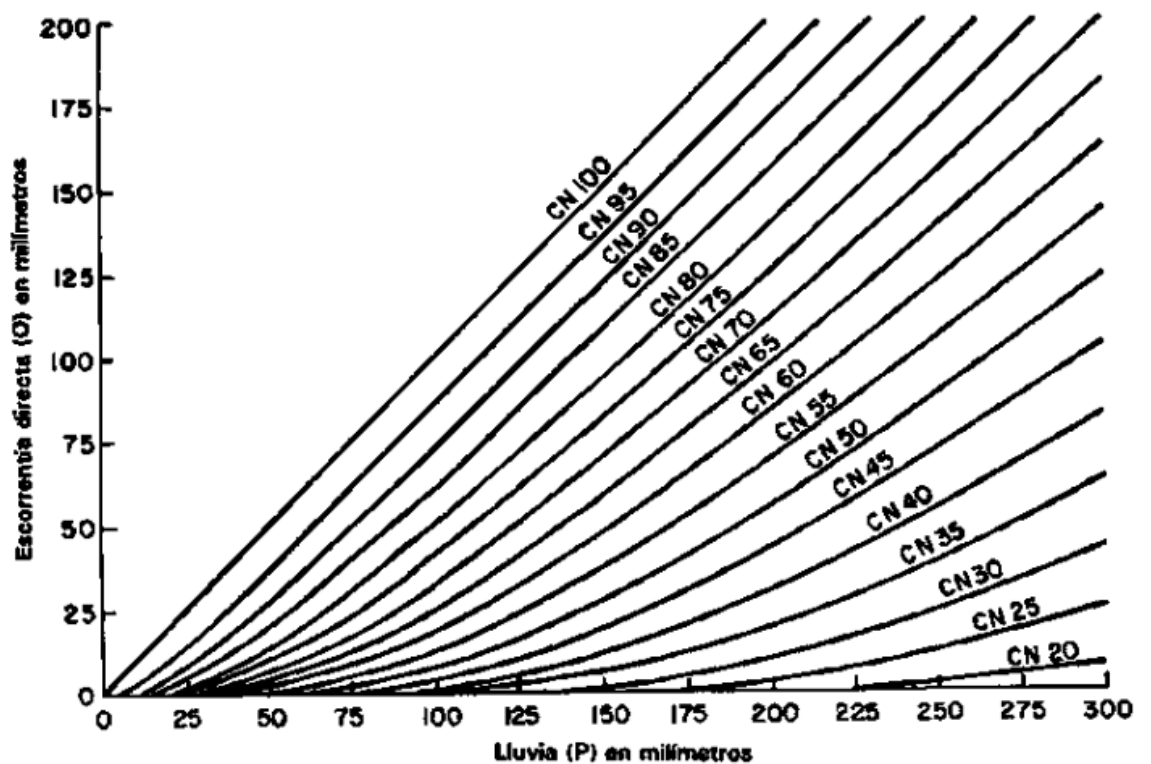


Figura 16: Curvas Numéricas

Fuente: Soil Conservation Service

2.2.3.4 Método de las simulaciones

Los métodos de simulaciones corresponden a esquemas más complejos y uso de programas capaces de estimar de manera más precisa toda la información de una cuenca, entre ellos tenemos:

a. BOSS DAMBRK

Este programa se desarrolló principalmente para simular la rotura de una presa y verificar los daños producidos por la propagación de la onda. Esta aplicación, especificando algunas consideraciones, podría ser válida para la definición de una llanura de inundación. Este es un programa avanzado y fácil de utilizar para el cálculo de cauces en una dimensión. El software puede representar estructuras, presas y los efectos de almacenamiento, la llanura de inundación y las olas de atenuación de inundaciones. Un uso interesante adicional es el cálculo dinámico de inundaciones.

b. FLDWAV

Es un programa, desarrollado por el Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos (NWS) que calcula una inundación generalizada con la capacidad para modelar los flujos a través de un solo arroyo o un sistema de interconexión de los cauces. FLDWAV, versión 1.0.0, publicada en noviembre de 1998, sustituyó a la NWS inundaciones generalizadas programas de enrutamiento, DAMBRK (publicado en 1988) y DWOPER (publicado en 1984).

c. MIKE FLOOD

Es un software para estudios de inundaciones, en el que se organizan dinámicamente MIKE 11 (modelización uní-dimensional) y MIKE 21 (modelización bi-dimensional). Proporciona el cálculo entre el conjunto de ríos y las llanuras de inundación.

d. CARPA

El software Carpa (Cálculo en Alta Resolución en Propagación de Avenidas) describe el comportamiento de la corriente hidráulica en una y en dos dimensiones. Para ello resuelve las ecuaciones de Saint Venant con dos variables usando siempre el método de los volúmenes finitos.

e. HEC- RAS

Este software, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), es una mejora del programa HEC-2, ya que mejora el modo de interactuar el programa con el usuario permitiéndole un mayor dominio del programa. El modelo numérico del programa realiza un análisis de flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre.

2.3 Términos Básicos

- **Escorrentía:** Es la corriente de agua que se vierte al rebasar su depósito o cauce natural o artificial. En hidrología la escorrentía hace referencia a la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje, es decir, la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida.
- **Caudal:** Es la cantidad de fluido medido en volumen que se mueve en una unidad de tiempo.
- **Precipitación:** La caída de agua sólida o líquida debido a la condensación del vapor sobre la superficie terrestre.
- **Coefficiente de escorrentía:** Factor que representa la porción de la precipitación que se convierte en caudal.
- **Método racional:** Método utilizado en hidrología para determinar el caudal instantáneo máximo en una cuenca hidrográfica.
- **Área:** Es la medida de la región o superficie encerrada por una figura geométrica.
- **Ciclo del agua:** Es el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos que conforman la hidrosfera. Se trata de un ciclo biogeoquímico en el que hay una intervención mínima de reacciones químicas, porque el agua solo se traslada de unos lugares a otros o cambia de estado físico.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se incluirá las acciones o pasos a seguir con el objeto de describir y analizar el fondo del problema planteado, así mismo se incluye el tipo, nivel y diseño de la investigación, las correspondientes fases de investigación que serán usadas en el presente trabajo, la población y muestra seleccionada y las técnicas e instrumentos de recolección de datos a utilizar. Así mismo Arias (2006) explica el marco metodológico como el “Conjunto de pasos, técnicas y procedimientos que se emplean para formular y resolver problemas” (p.16).

3.1 Tipo de investigación

Tomando en cuenta el tipo de problema planteado en la presente investigación, los objetivos que en ella se plantean y las bases teóricas mencionadas, la presente investigación será de tipo documental y descriptiva.

Según Palella y Martins (2010), definen: “La investigación documental se concreta exclusivamente en la recopilación de información en diversas fuentes. Indaga sobre un tema en documentos escritos u orales” (p.90).

Por otra parte Arias (2012), define: “La investigación exploratoria es aquella que se efectúa sobre un tema u objeto desconocido o poco estudiado, por lo que sus resultados constituyen una visión aproximada de dicho objeto, es decir, un nivel superficial de conocimientos” (p.23).

En la presente investigación se seleccionará estos tipos de estudios, debido a que se los conocimientos obtenidos serán aplicados con la finalidad de alcanzar los resultados prácticos y técnicos que permitirán solucionar el problema en estudio.

3.2 Diseño de la investigación

Según Sabino (2000) “su objeto es proporcionar un modelo de verificación que permita contrastar hechos con teorías, y su forma es la de una estrategia o plan general que determina las operaciones necesarias para hacerla”. (p.91).

Según la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (1998) la investigación Documental, “es estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo, principalmente, en trabajos previos, información y datos divulgados por medios impresos, audiovisuales o electrónicos”. (p.6).

En cuanto al diseño de la investigación documental, Pérez (2009) explica que: “se caracteriza fundamentalmente porque realiza análisis de fuentes secundarias, es decir, material elaborado por otros autores de manera sistemática. Las principales fuentes de información son textos, documentos, tesis, revistas especializadas, entre otros” (p. 26)

Con lo mencionado anteriormente la presente investigación se basara en la recopilación de fundamentos teóricos, materiales de información y fuentes secundarias con el propósito de profundizar el conocimiento que se pueda tener acerca de la escorrentía.

3.3 Nivel de la investigación

El nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un objeto o fenómeno.

Arias (2006) lo define como: “la caracterización de un hecho fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento, los mismos miden de forma independiente las variables y aun cuando se formulen hipótesis, las primeras aparecerán enunciadas en los objetivos de la investigación” (p. 46).

Se puede decir que esta investigación se ubicará en un nivel exploratorio, puesto que dicho tema no ha sido lo suficientemente abordado o estudiado, a partir de la recopilación de información referente al cálculo de la escorrentía se profundizara el estudio a un nivel académico.

3.4 Población y muestra

Según Tamayo y Tamayo, (1997), “La población se define como la totalidad del fenómeno a estudiar donde las unidades de población posee una característica común la cual se estudia y da origen a los datos de la investigación”(P.114).

En esta investigación propuesta el universo poblacional estará constituido por la totalidad de 194 estudiantes de Ing. Civil cursantes de los semestres 7mo, 8vo, 9no y 10mo semestre.

Por otro lado Tamayo y Tamayo (1997), la muestra “es el grupo de individuos que se toma de la población, para estudiar un fenómeno estadístico” (p.38).

Por tal motivo será seleccionada de manera intencional, un aproximado de 30% de la totalidad de la población para responder a las incógnitas que se presentaran en el instrumento de recolección de datos.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Según Tamayo y Tamayo (2002; p.182), depende en gran parte del tipo de investigación y del problema planteado para la misma, y puede efectuarse desde una simple ficha bibliográfica, observación, entrevista, cuestionario o encuesta, y aun mediante ejecución de investigaciones para este fin. Para todo proceso de investigación se requiere del uso de diversas técnicas que le permitan obtener toda la información o datos que se requiere para el desarrollo del mismo. De acuerdo a lo antes señalado las técnicas utilizadas para recabar la información con la finalidad de lograrlos objetivos propuestos fueron las siguientes:

Técnicas

Encuesta: Como una técnica de recolección de datos que pretende obtener información que suministra un grupo o muestra de sujetos en relación con una problemática planteada. Dentro de ese marco esta técnica, será aplicada según el tipo de muestra seleccionada.

Instrumentos

Cuestionario: este instrumento estará dirigido a personas directamente del área de estudio, quienes proporcionen toda la información de interés, de la experiencia y conocimientos sobre los aspectos relevantes relacionados con el aprendizaje mediante guías técnicas.

La elaboración del cuestionario es tipo escala de Likert y redactado con ítems de orden cerrado, es decir, preguntas dicotómicas donde se establecen cinco

(5) alternativas de respuesta, el cual se le entregara a los estudiantes seleccionados al azar.

3.6 Fases metodológicas

Para llevar a cabo la investigación, se cumplirá con cinco fases metodológicas, de acuerdo con los objetivos específicos planteados:

Fase I: Describir y explicar las variables que afectan el fenómeno de la escorrentía y dar a conocer los distintos métodos de cálculo existentes.

Dentro de esta primera fase se procedió a explicar detalladamente cómo funciona el ciclo de la escorrentía, todas las variables que la afectan y él porque de su relación directa con la escorrentía, además se mencionó los distintos tipos de cálculo existentes de la estimación del caudal de escorrentía.

Fase II: Definir los diferentes métodos de cálculo de la escorrentía.

En esta fase se explicó de una manera más profunda cada formula, detalle, variable y coeficiente para cada método para que de esta manera sea comprendido de una manera más sencilla.

Fase III: Generar ejercicios utilizando data real y resolverlos de una manera explicativa para que el estudiantado aprenda cómo abordar problemas relacionados a la escorrentía, en el marco de la sustentabilidad ambiental, utilizando herramientas virtuales.

Es esta fase entramos en una metodología académica adaptándonos a las nuevas tecnologías (software), tomando data ya recopilada con anterioridad en estaciones meteorológicas, y procedemos a realizar ejercicios paso a paso para que los estudiantes de ingeniería puedan ver más a detalle cómo se resuelven estos tipos de problemas tanto en lo académico como en la vida real.

Fase IV: Diseñar ejercicios propuestos para hacer que el estudiantado pueda resolverlos de manera sencilla utilizando los conocimientos adquiridos en la guía técnica.

En esta fase se procede a elaborar ejercicios con distintos grados de complejidad para que los estudiantes puedan resolverlos por sus propios medios aplicando los conocimientos ya adquiridos.

Fase V: Ensamblar la guía técnica de Hidrología sobre el tema de la escorrentía:

Por último pero no menos importante se procederá a terminar de elaborar la guía y ensamblarla para que se encuentre lista para su uso y reproducción.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Encuesta

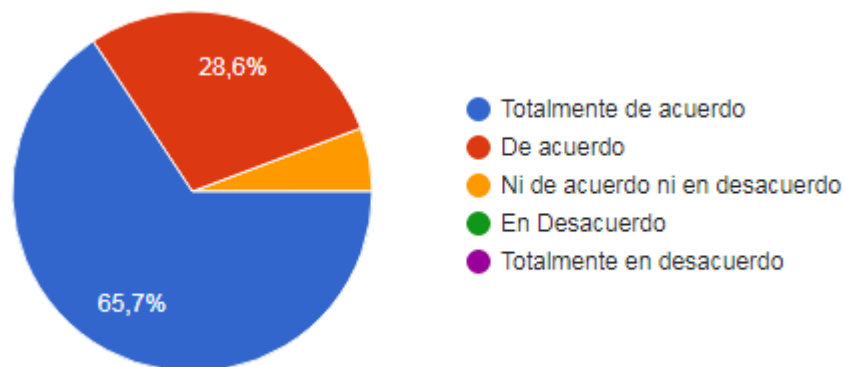
Para elaborar la encuesta referente al tema de la escorrentía superficial y comprobar si la guía técnica es factible, se utilizó la aplicación Google Encuesta para que la población de los estudiantes de Ingeniería civil de los semestres comprendidos de 7mo a 10mo, pudiera responder utilizando medios digitales.

El cuestionario de la encuesta fue respondido por 70 estudiantes, que representa el 36% de la población. La elaboración del cuestionario es tipo escala de Likert, con la siguiente propuesta y calificación:

Totalmente de acuerdo	1
De acuerdo	2
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3
En desacuerdo	4
Totalmente en desacuerdo	5

Ítem 1. El estudiante de Ing. Civil de la Ujap necesita poder contar con fuentes de información que le permitan conocer de manera más profunda el tema de la escorrentía.

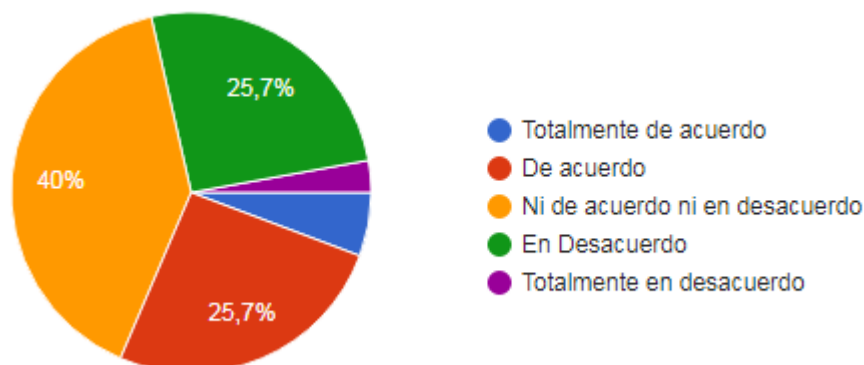
	Respuestas	%
Totalmente de acuerdo	46	65,7
De acuerdo	20	28,6
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	4	5,7
En desacuerdo	0	0
Totalmente en desacuerdo	0	0



Análisis: Como se puede observar en la gráfica uno (1), un total de 94,3% de los estudiantes de ingeniería civil a los cuales se les aplicó el cuestionario consideran que se debe contar con mas fuentes de información referentes al tema de la escorrentía.

Ítem 2. El estudiante de Ing. Civil de la Ujap tiene conocimientos amplios sobre escorrentía.

	Respuestas	%
Totalmente de acuerdo	4	5,7
De acuerdo	18	25,7
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	28	40
En desacuerdo	18	25,7
Totalmente en desacuerdo	2	2,9

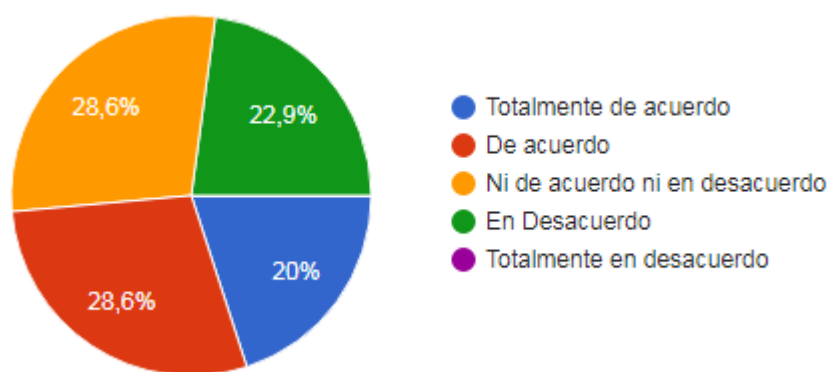


Análisis: Como se puede observar en la gráfica dos (2), las opiniones varían considerablemente, se puede decir que un 31,4% de los estudiantes encuestados opinan que se tienen amplios conocimientos sobre escorrentía, 28,8% considera

que no se tienen amplios conocimientos sobre escorrentía y un 40% tiene una opinión neutral respecto al conocimiento sobre escorrentía.

Ítem 3. La materia de hidrología no prepara a los estudiantes en cálculos físicos de escorrentía.

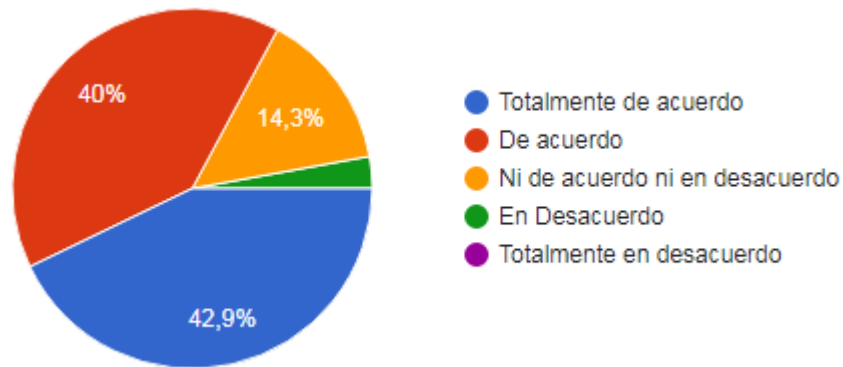
	Respuestas	%
Totalmente de acuerdo	14	20
De acuerdo	20	28,6
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	20	28,6
En desacuerdo	16	22,9
Totalmente en desacuerdo	0	0



Análisis: Como se puede observar en la gráfica tres (3), un 48,6% de los estudiantes encuestados tiene una opinión negativa respecto al nivel de preparación con respecto a los cálculos físicos de la escorrentía, un 28,6% tiene una opinión neutral y un 22,9% tiene una opinión positiva con respecto a los cálculos físicos de la escorrentía.

Ítem 4. La universidad no cuenta con material de apoyo para cálculos teóricos y prácticos del fenómeno de escorrentía.

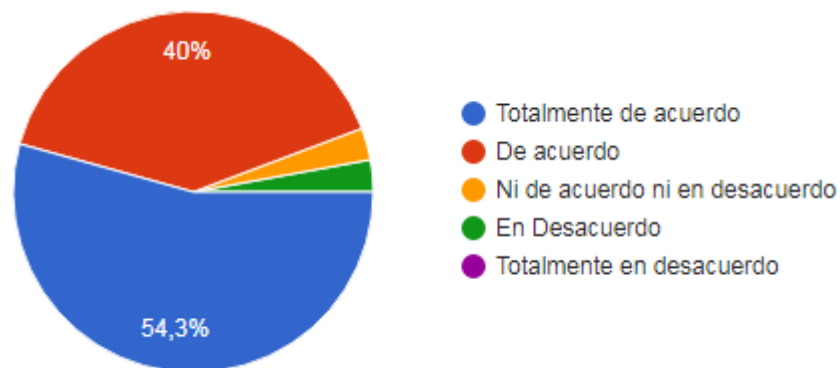
	Respuestas	%
Totalmente de acuerdo	30	42,9
De acuerdo	28	40
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	10	14,3
En desacuerdo	2	2,9
Totalmente en desacuerdo	0	0



Análisis: Como se puede observar en la gráfica cuatro (4), un 42,9% de los estudiantes encuestados opina que la cantidad de material de apoyo es insuficiente.

Ítem 5. Un ingeniero civil debe conocer que la escorrentía es el principal causante de la erosión del suelo.

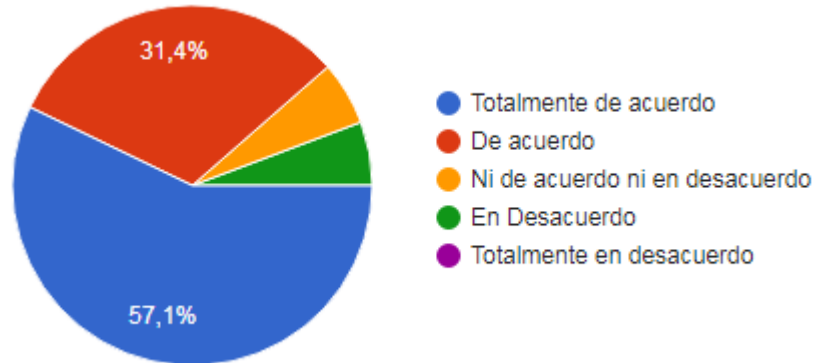
	Respuestas	%
Totalmente de acuerdo	38	54,3
De acuerdo	28	40
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	2	2,9
En desacuerdo	2	2,9
Totalmente en desacuerdo	0	0



Análisis: Como se puede observar en la gráfica cinco (5), un 94,3% de los estudiantes encuestados considera que en efecto la escorrentía es la principal causante de la erosión del suelo.

Ítem 6. En el país no se tiene conciencia que la escorrentía puede causar contaminación del agua al arrastrar consigo materiales contaminados.

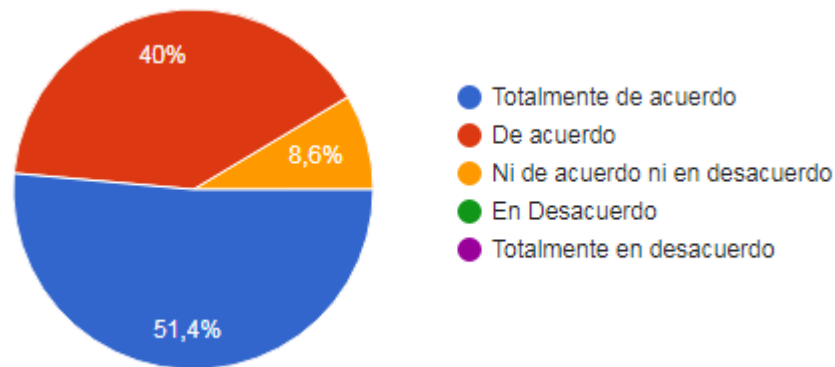
	Respuestas	%
Totalmente de acuerdo	40	57,1
De acuerdo	22	31,4
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	4	5,7
En desacuerdo	4	5,7
Totalmente en desacuerdo	0	0



Análisis: Como se puede observar en la gráfica seis (6), un 88,4% de los estudiantes encuestados considera que no se toma conciencia sobre la posible contaminación del agua por medio del arrastre de agentes contaminantes.

Ítem 7. A nivel de ingeniería civil la escorrentía afecta de manera directa las obras civiles debido a los riesgos que dicho fenómeno pueda causar.

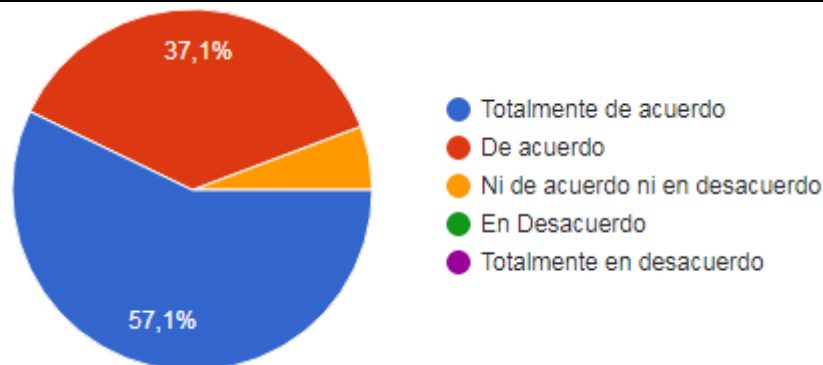
	Respuestas	%
Totalmente de acuerdo	36	51,4
De acuerdo	28	40
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	6	8,6
En desacuerdo	0	0
Totalmente en desacuerdo	0	0



Análisis: Como se puede observar en la gráfica siete (7), un 91,4% de los estudiantes encuestados considera que la escorrentía afecta directamente las obras civiles.

Ítem 8. Una guía de estudio es necesaria para mejorar la práctica docente sobre escorrentía, causas, ventaja y desventajas.

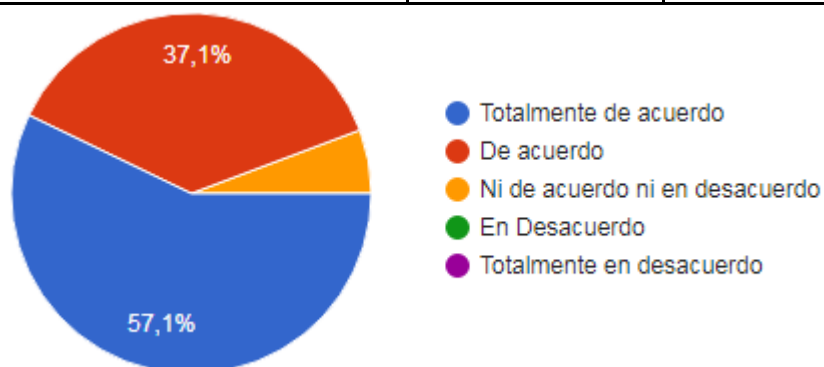
	Respuestas	%
Totalmente de acuerdo	40	57,1
De acuerdo	26	37,1
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	4	5,7
En desacuerdo	0	0
Totalmente en desacuerdo	0	0



Análisis: Como se puede observar en la gráfica ocho (8), un 94,2% de los estudiantes encuestados considera que es completamente necesario la elaboración de una guía lo cual es ideal ya que indica que la propuesta de investigación puede ser viable.

Ítem 9. Contar con información, además de ejercicios propuestos y resueltos de manera explicativa, basados en data de cuencas existentes permitiría al estudiante de Ing Civil contar con una mayor facilidad a la hora de entender la escorrentía.

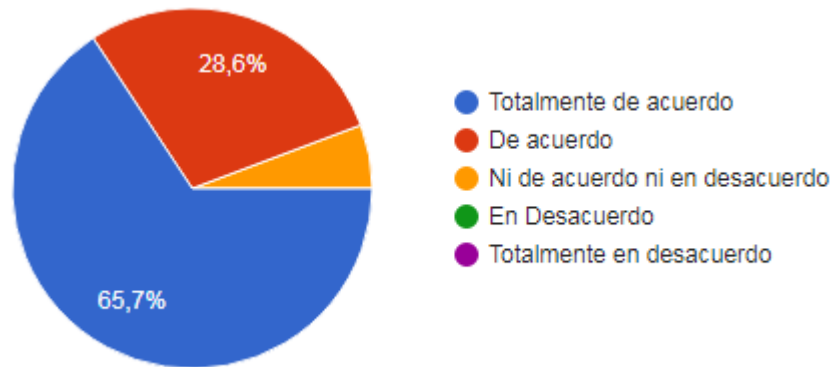
	Respuestas	%
Totalmente de acuerdo	40	57,1
De acuerdo	26	37,1
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	4	5,7
En desacuerdo	0	0
Totalmente en desacuerdo	0	0



Análisis: Como se puede observar en la gráfica nueve (9), un 94,2% de los estudiantes encuestados considera que deben existir ejercicios propuestos y explicativos para entender el tema de la escorrentía, esto nos indica que los objetivos de la propuesta de investigación los cuales son la elaboración de ejercicios resueltos y propuestos son viables.

Ítem 10. El diseño de una Guía técnica para el estudio y cálculo hidrológico de la escorrentía contribuiría en forma efectiva y eficaz en la preparación de los estudiantes de Ing Civil de la Ujap.

	Respuestas	%
Totalmente de acuerdo	46	65,7
De acuerdo	20	28,6
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	4	5,7
En desacuerdo	0	0
Totalmente en desacuerdo	0	0



Análisis: Como se puede observar en la gráfica diez (10), un 94,3% de los estudiantes encuestados considera que la elaboración de una guía técnica sería beneficiosa para el estudio y calculo hidrológico de la escorrentía.

Una vez realizado el análisis de las diez (10) preguntas del cuestionario se puede llegar a la conclusión de que la elaboración de la guía técnica para el estudio y cálculo hidrológico de la escorrentía es factible.

4.2 Describir y explicar las variables que afectan el fenómeno de la escorrentía y dar a conocer los distintos métodos de cálculo existentes.

Con toda la información obtenida de las distintas fuentes consultadas, se estudiaron y analizaron cada una de las variables que afectan el fenómeno de la escorrentía. Para la elaboración de la guía se buscó información acerca de cuatro métodos de cálculo de la escorrentía: método racional, método del SCS, método de Clark y método de simulaciones, se procedió a describir y explicar cada uno de los métodos de cálculo de manera que su comprensión fuese lo más sencilla posible.

4.3 Definir los diferentes métodos de cálculo de escorrentía.

Para definir los distintos métodos de cálculo de escorrentía se procedió a colocar cada método de cálculo como un capítulo de la guía técnica, una vez separado la guía técnica por capítulos, en cada uno de los capítulos se da una breve introducción al método, su respectiva descripción, las variables que afectan o son usadas, las posibles limitaciones que posea el método, las fórmulas utilizadas y las formas de cálculo en base a la data suministrada.

4.4 Generar ejercicios utilizando data real y resolverlos de una manera explicativa para que el estudiantado aprenda cómo abordar problemas relacionados a la escorrentía, en el marco de la sustentabilidad ambiental, utilizando herramientas virtuales.

Los ejercicios empleados en los distintos métodos fueron diseñados con datos de distintas fuentes, para el método racional se utilizó data pluviométrica de la estación Guataparo-el Dique, tablas de la fundación Juan José Aguerrevere-Colegio de Ingenieros de Venezuela y distintas fórmulas de cálculo de tiempo de concentración. Para el método del SCS se utilizó data de Número de curva de estudios de suelo del Servicio de Conservación de Suelos Estadounidense, data de precipitación de eventos tomados de los antecedentes y data de la cuenca del río Chama, Venezuela. Para el método de simulaciones se utilizó información de los distintos softwares de cálculo estadounidenses mostrados en dicho capítulo.

Los ejercicios fueron resueltos paso a paso explicando a detalle cada uno de los cálculos realizados, para la elaboración de las distintas tablas mostradas en la guía y los cálculos se utilizó el programa Microsoft Office Excel, el cual permite tener de una forma organizada toda la data.

4.5 Diseñar ejercicios propuestos para hacer que el estudiantado pueda resolverlos de una manera sencilla utilizando los conocimientos adquiridos en la guía técnica.

Los ejercicios propuestos en la guía técnica fueron seleccionados de tal manera que su grado de dificultad fuera aumentando, para algunos de los capítulos de la guía, se propusieron una cantidad de ejercicios de manera que se puedan resolver las variables por separado hasta llegar a uno para el cual haya que calcular todas las variables del método incluyendo el caudal.

4.6 Ensamblar la guía técnica de Hidrología sobre el tema de la Escorrentía.

Una vez establecidos todos los métodos de cálculo con sus respectivos ejercicios, se procedió a ensamblar la guía técnica para el estudio y cálculo hidrológico de la escorrentía.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Luego de haber elaborado la guía técnica para el estudio y cálculo hidrológico de la escorrentía se pudo concluir lo siguiente:

- El material académico es de vital importancia para el aprendizaje ya que les facilita a los estudiantes la adquisición de conocimientos y habilidades que les sean útiles y aplicables en su vida personal, académica y profesional. Independientemente de lo motivacional que pueda resultar para el alumno el empleo de materiales didácticos en el proceso de aprendizaje, tener conciencia de que éstas herramientas son fundamentales para que el estudiante entienda que existen otras formas de aprendizaje además de la que pueda ser impartida por un profesor.
- Es importante conocer que existen una gran cantidad de métodos de cálculo de escorrentía diferentes a los que puedan ser impartidos en un programa de estudio y que sus aplicaciones son específicas para ciertas características físicas de una cuenca.
- Es necesario la elaboración de material de estudio en ingeniería civil no solo de Hidrología, sino además del resto de materias que se vean a través de la carrera para que el estudiante se desenvuelva mejor a la hora de resolver problemas tanto en su vida académica como profesional.
- La escorrentía superficial puede causar daños graves a las estructuras si no es tomada en cuenta a la hora de diseñar una obra ya que puede actuar como una carga.
- Los caudales de escorrentía superficial pueden ser lo suficientemente grandes como para causar deslaves, erosión del suelo e inundaciones.

5.2 Recomendaciones

Como resultado del presente trabajo de investigación se presentan las siguientes recomendaciones:

- Investigar acerca de otros métodos de cálculo de la escorrentía superficial
- Evaluar las variaciones en los resultados de los cálculos de caudales de escorrentía por los distintos métodos.
- Investigar sobre los cálculos de la escorrentía hipodérmica y subterránea.
- Elaborar otras guías técnicas que abarquen distintas ramas de la Hidrología.
- Elaborar guías técnicas de cálculo para las demás materias vistas en la carrera de ingeniería civil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, F. (2006). **El proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología científica.** Quinta edición. Editorial Episteme, Caracas.
- Chow, V. T. (1988). **Handbook of Applied Hidrology,** McGraw-Hill, 712p.
- Chow, V. T. (1962). **Hydrologic determination of waterway areas for drainage structures in small drainage basins.** Experimental Station, Univ. of Illinois, Urbana, Ill, Illinois, bulletin No. 462.
- Departamento de Medio Ambiente de Maryland. Baltimore, MD (2007). **Erosión y control de sedimentos y manejo de aguas pluviales en Maryland.**
- Eagleson, P. (1970). **Dynamic hydrology,** McGraw-Hill.
- Izzard, C. F. (1946). **Hydraulics of Runoff from Developed Surfaces.** Proc. Highway Res, Board. Vol. 26.pp.129-150.
- L, Davis y Susan J, Mackenzie. **Principios de Ingeniería Ambiental y Ciencia.**
- Nelson, R. (2004). **El ciclo del agua.** Minneapolis: Learner.
- Ray K. Linslet y Joseph B. Franzini. (1978). **Engenharía de Recursos Hídricos.** Editora dá Universidade de Sao Paulo e Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda.
- Koehler, R. (2004). **Raster Based Analysis and Visualization of Hydrologic Time Series.** Ph.D. dissertation, University of Arizona. Tucson, Az, 189p.
- Rushton, K.R. (2003). **Groundwater Hydrology: Conceptual and Computational models.** John Wiley and Sons Ltd.
- Sabino, C. (1996). **El proceso de investigación.** Editorial. Panapo, Caracas.
- S, K, Mishra. y V, P, Singh. (2003). **Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology.** Editorial Kluber Academics Publisher.
- Tamayo, M. y Tamayo, M. (1997). **El proceso de la Investigación Científica.** Editorial. Limusa, México.
- Témez, J. (1978). **Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales.** Dirección General de Carreteras. Madrid. España. 111p.

CAPÍTULO VI

GUÍA TÉCNICA

6.1 Introducción a la guía técnica

En el presente capítulo se incluye la propuesta de investigación, realizada por el estudiante de ingeniería civil: Cesar Jesús Vela Conde; titular de la cedula de identidad N° 24.495.919, con la tutoría de la Ingeniero Emerly Castillo S; titular de la cedula de identidad N° 4.464.524.

Dicha guía técnica está estructurada en 5 capítulos:

Capítulo 1 Definición de términos: En este capítulo se definen los términos usados en los demás capítulos.

Capítulo 2 Método racional: Introducción, definición de las variables, formula de aplicación, limitaciones del método, ejercicios y ejercicios propuestos.

Capítulo 3 Método del SCS: 1) Método del número de curva: Introducción, descripción, condiciones de aplicación, tablas, corrección del CN, CN ponderado, limitaciones y deficiencias del método, ejercicios y ejercicios propuestos. 2) Método de Hidrogramas triangulares: Introducción, descripción, ejercicio y ejercicio propuesto.

Capítulo 4 Método de Clark: Introducción, Hidrograma, Hidrograma Unitario, Hidrograma Unitario de Clark, ejercicios y ejercicios propuestos.

Capítulo 5 Método de simulación: Introducción, descripción, limitaciones, generación de los modelos de simulación, capacidad técnica de quienes generan los modelos, capacidad técnica y tecnológica de los usuarios de dichos modelos, disponibilidad financiera y disponibilidad de tiempo, Programas más usados en Hidráulica e Hidrología, otros programas usados en Hidráulica e Hidrología y ejercicios propuestos.



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE
VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**GUÍA TÉCNICA
PARA EL ESTUDIO
Y CÁLCULO HIDROLÓGICO
DE LA ESCORRENTÍA**

Autor: Cesar J Vela C

Tutor Académico: Emerly B Castillo S

San diego, Abril de 2018

DEDICATORIA

Quiero expresar principalmente mi agradecimiento a Dios por darme la oportunidad de llegar tan lejos en la vida.

Un agradecimiento especial a mi tía Haydee Maribel Conde Mussa por ser la persona que más me ha apoyado mientras estudiaba la carrera de Ingeniería Civil.

- **A mis padres**, Cesar Vela y Janet Conde por darme la vida y ser siempre un apoyo para mi sin importar la situación.
- **A mi familia**, Por estar siempre ayudándome y apoyándome.
- **A la Ing. Emerly Castillo**, Mi tutora por todo el tiempo invertido en haberme ayudado a culminar este proyecto.
- **A los profesores**, Por haber impartido sus conocimientos conmigo a lo largo de la carrera.
- **A mis compañeros universitarios**, Por todo el apoyo y los ratos agradables que pasamos a lo largo de la carrera.
- **A la Universidad José Antonio Páez**, Por ofrecerme la oportunidad de estudiar la carrera de Ingeniería Civil.

PRÓLOGO

La idea de elaborar una guía técnica sobre el cálculo de la escorrentía me fue dada por la Ingeniera Emerly Castillo quien fue mi profesora de la materia de Hidrología, en aquel entonces cuando cursé la materia solamente se pudo impartir en clase el método racional, ya que por cuestiones de tiempo y de falta de información no se pudieron impartir otros métodos de cálculo.

Tiempo después en una conversación con la Ingeniera Emerly Castillo, esta me propuso como tema de trabajo de grado la elaboración de la guía técnica para que los estudiantes de ingeniería civil pudieran contar con un material que les permitiera conocer otros métodos de cálculo, esta experiencia me sirvió para reforzar mis conocimientos en Hidrología y poder aprender métodos nuevos.

Esta guía está dedicada a las nuevas generaciones de estudiantes de ingeniería civil para que les sea más sencillo conocer estos métodos de cálculo y para que en un futuro puedan ejercer su carrera sin ningún problema, aplicando los conocimientos adquiridos en su etapa de estudiante.

INDICE

CONTENIDO	pp.
DEDICATORIA	i
PRÓLOGO	ii

CAPÍTULO

I DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	1
II MÉTODO RACIONAL	3
2.1 Introducción	3
2.2 Descripción de las variables	3
2.2.1 Coeficiente de Escorrentía.....	3
2.2.2 Área de la Cuenca.....	5
2.2.3 Intensidad	6
2.2.4 Frecuencia	6
2.2.5 Duración	8
2.3 Formula de Aplicación.....	20
2.4 Limitaciones del método.....	20
III MÉTODO DEL SCS.....	28
3.1 Método del número de curva	28
3.1.1 Introducción.....	28
3.1.2 Descripción.....	29
3.1.3 Condiciones de aplicación.....	29
3.1.4 Tablas	30
3.1.5 Corrección del CN.....	33
3.1.6 CN ponderado.....	34
3.1.7 Limitaciones y deficiencias del método	35
3.2 Hidrogramas Triangulares	46
3.2.1 Introducción.....	46

3.2.2 Descripción.....	46
IV MÉTODO DE CLARK.....	50
4.1 Introducción.....	50
4.2 Hidrograma.....	50
4.3 Hidrograma Unitario.....	50
4.4 Hidrograma Unitario de Clark.....	56
V MÉTODOS DE SIMULACION.....	70
5.1 Introducción.....	70
5.2 Descripción.....	71
5.3 Limitaciones.....	72
5.4 Generación de los Modelos de Simulación.....	72
5.5 Capacidad técnica de quienes generan los modelos.....	74
5.6 Capacidad técnica y tecnológica de los usuarios de dichos modelos.....	74
5.7 Disponibilidad financiera y disponibilidad de tiempo.....	75
5.8 Programas más usados en Hidráulica e Hidrología.....	75
5.9 Otros programas usados en Hidráulica e Hidrología.....	87
REQUISITOS Y LIMITACIONES.....	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

CAPÍTULO I

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Arcilla: Roca sedimentaria descompuesta constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados.

Área: Medida de la extensión de una superficie.

Arena: Conjunto de fragmentos sueltos de rocas o minerales de pequeño tamaño.

Barbecho: Terreno de labor que no se siembra durante uno o dos años para que la tierra descanse o se regenere.

Bosques: Área que presenta una importante densidad de árboles.

Cauce: Concavidad del terreno, natural o artificial, por donde corre un río, un canal o cualquier corriente de agua.

Caudal: Volumen de agua que circula por el cauce de un río en un lugar y tiempo determinados.

Cuenca Hidrográfica: Territorio vaciado por un único sistema de drenaje natural.

Curvas IDF: Relación matemática entre la intensidad de una precipitación, su duración y la frecuencia.

Desviación estándar: Medida de dispersión de data con respecto a la media.

Embalse: Acumulación de agua producida por una construcción en el lecho de un río o arroyo que cierra parcial o totalmente su cauce.

Escorrentía: Agua de lluvia que circula libremente sobre la superficie de un terreno.

Estación pluviométrica: Lugar destinado a la obtención de datos de precipitación.

Hidrograma: Es un gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrológica tal como: nivel de agua, caudal, entre otros.

Humedales: Zona de tierras, generalmente planas, cuya superficie se inunda de manera permanente o intermitentemente.

Intensidad: Grado de fuerza o de energía con que se realiza una acción o se manifiesta un fenómeno.

Inundación: Es la ocupación por parte del agua de zonas que habitualmente están libres de esta, por desbordamiento de ríos, torrentes o ramblas, por lluvias torrenciales, deshielo, por subida de las mareas por encima del nivel habitual, por maremotos, huracanes, entre otros.

Media: Promedio de un conjunto de números.

Moda: Valor con mayor frecuencia en una distribución de datos.

Modelo de simulación: Es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real.

Pendiente: Declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal.

Praderas: Parte del campo cubierta de hierba.

Precipitación: Es la caída de agua sólida o líquida debido a la condensación del vapor sobre la superficie terrestre.

Precipitación efectiva: Diferencia entre la lluvia, el escurrimiento superficial y la percolación profunda.

Probabilidad: Cálculo matemático de las posibilidades que existen de que una cosa se cumpla o suceda al azar.

Regresión lineal: Modelo matemático usado para aproximar la relación de dependencia entre variables.

Software: Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas.

Tormenta: Fenómeno meteorológico caracterizado por la coexistencia de dos o más masas de aire de diferente temperatura.

Umbral de escorrentía: Precipitación a partir de la que el terreno no es capaz de infiltrar más agua.

CAPÍTULO II

MÉTODO RACIONAL

2.1. Introducción

El método racional es una de las formas más rápidas de calcular el caudal de escorrentía de un área contribuyente a un punto determinado, es el método más usado para la elaboración de sistemas de drenajes y otro tipo de proyectos de riego y pequeñas obras viales, al trabajar solamente con tres variables su aplicación es más exacta única y exclusivamente en cuencas con un área menor a 200 hectáreas, lo cual es equivalente a 2.000.000 metros cuadrados.

Las variables son: coeficiente de escorrentía, intensidad de la lluvia y área de la cuenca.

2.2. Descripción de las variables

En el método racional es necesario aprender que significa cada una de las variables a conseguir ya que puede ser muy sencillo llegar a confundirse. Es importante dar respuesta a las siguientes interrogantes ¿Pero a que exactamente se refiere al hablar de estos tres criterios?, ¿Qué intensidad se usa?, ¿Qué parte del área de la cuenca será tomada en cuenta para el cálculo? ¿Qué es el coeficiente de escorrentía? y ¿Bajo qué unidades trabaja este método?

2.2.1. Coeficiente de escorrentía: Representa la porción de la precipitación que se convierte en caudal, es decir, la relación entre el volumen de escorrentía superficial y el de precipitación total sobre un área o cuenca determinada,

Para referirse al coeficiente de escorrentía es necesario darse cuenta del hecho de que no toda el agua que pasa por un área determinada escurre por la superficie, la cantidad de escorrentía superficial depende del tipo de precipitación, humedad del suelo, tipo de terreno, tipo de cobertura superficial y la pendiente del terreno.

En pocas palabras el coeficiente de escorrentía es el porcentaje de agua que escurre en la superficie de un terreno, en relación al total de agua que pudo haber escurrido en el terreno, por ende no es un factor constante, pues varía de acuerdo a

la magnitud de la lluvia y particularmente con las condiciones fisiográficas de la cuenca hidrográfica: Cobertura superficial, pendientes, tipo de suelo, por lo que su determinación es aproximada. En general, los cálculos de este coeficiente se efectúan a partir de los valores anuales de precipitación y caudal, generalmente dichos valores están estipulados en distintos tipos de tablas ya que las condiciones del terreno no son iguales para cada región.

$$C = \frac{\text{Precipitación} - \text{perdidas}}{\text{Precipitación}}$$

Bajo numerosos criterios y estudios se han podido establecer distintas relaciones para conseguir los coeficientes de escorrentía de distintos tipos de área, el más usado ha sido el método de Prevert que mediante el uso de tablas en las cuales se establecen valores del coeficiente de escorrentía en base a: Cobertura vegetal, rangos de las pendientes de terreno, tipos de suelo y permeabilidad del suelo.

Es muy fácil encontrar información acerca de las tablas de coeficiente de escorrentía puesto que una gran cantidad de países han creado mediante estudios hidrológicos de suelos, tablas de coeficientes de escorrentía para diferentes tipos de terreno.

Cabe destacar que no todas las áreas de un terreno serán homogéneas (mismas características), es normal que se presente en un mismo terreno una amplia variedad de tipos de suelos, variabilidad de pendientes, distintas características de permeabilidad o distintos tipos de cobertura superficial, en estos casos se tendría que conseguir no sólo uno, sino tantos coeficientes de escorrentía como cantidad de áreas de diferentes características hayan, para estos casos se procede a hallar un coeficiente de escorrentía promedio, tomando en cuenta los múltiples coeficientes de escorrentía y las áreas tanto individuales como el área total del terreno, para ello se emplea la siguiente fórmula:

$$\bar{C} = \frac{(C_i \text{ Area}_i)}{\text{Area Total}}$$

Ejemplos de tablas de coeficiente de escorrentía:

Características de la superficie	Periodo de Retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Area de cultivos							
Plano 0% a 2%	0,31	0,34	0,36	0,4	0,43	0,47	0,57
Promedio 2% a 7%	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51	0,6
Pendiente superior a 7%	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61
Pastizales							
Plano 0% a 2%	0,25	0,28	0,3	0,34	0,37	0,41	0,53
Promedio 2% a 7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Pendiente superior a 7%	0,37	0,4	0,4	0,46	0,49	0,53	0,6
Bosques							
Plano 0% a 2%	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Promedio 2% a 7%	0,31	0,34	0,36	0,4	0,43	0,47	0,56
Pendiente superior a 7%	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58

Tabla 1 Coeficiente de escorrentía según el periodo de retorno y la superficie

Fuente: Chow, Et. Al., (1994).

Cobertura vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada >50%	Alta (50-20)%	Media (20-8)%	Suave (8-1)%	Despreciable <1%
Sin vegetacion	Impermeable	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6
	Semipermeable	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Permeable	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
Cultivos	Impermeable	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Semipermeable	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
	Permeable	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2
Pastos y vegetacion ligera	Impermeable	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45
	Semipermeable	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
	Permeable	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15
Hierba y grama	Impermeable	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
	Semipermeable	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
	Permeable	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
Bosques y vegetacion densa	Impermeable	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
	Semipermeable	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25
	Permeable	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05

Tabla 2 Coeficiente de escorrentía en base al tipo de suelo y la pendiente

Fuente: Franceschi Luis (1983) Drenaje Vial – Fundación Juan José Aguerrevere – Colegio de Ingenieros de Venezuela

2.2.2. Área de la cuenca: Cuando se habla de un área se podría referir simplemente a la medida de una superficie expresada en una unidad matemática, sin embargo, en hidrología se trabaja con cuencas y el concepto es mucho más amplio

Una cuenca hidrográfica es un territorio vaciado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que sus aguas dan al mar a través de un único río, o que vierte sus aguas a un único lago endorreico o a otro río de mayor dimensión. Una cuenca hidrográfica es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas o parteaguas.

El área de dicha cuenta comprendería la medida de la extensión de la superficie de la cuenca hidrográfica normalmente medida en metros cuadrados, kilómetros cuadrados o en hectáreas.

El área con el cual se trabaja en este método dependerá única y exclusivamente del punto de concentración, el cual es el punto de estudio de la cuenca para un diseño civil, esto normalmente implica que donde se quiera proceder a construir una obra en un determinado punto de una cuenca hidrográfica este punto pasará a ser el punto de concentración y el área a usar para el método racional será la parte del área total del terreno que contribuya a drenar o mover las aguas a través del punto de concentración en estudio. En algunos proyectos de obras civiles como el drenaje urbano o también en sistemas de riego, se trabaja con el área de sectores contribuyentes a un punto donde se construirá una obra de captación u otro tipo de obra.

2.2.3. Intensidad: Para emplear el método racional hay que conocer es la precipitación que ocurre en la cuenca, en una cuenca ocurrieron, ocurren y ocurrirán distintos eventos de precipitación significando así distintas lluvias con distintas intensidades, pero si se quiere diseñar una obra en una cuenca hidrográfica se plantea en general la misma duda: ¿Con cuál de todos los eventos de precipitación se debería trabajar?

Para ello se utilizan los criterios de intensidad, duración y frecuencia mejor conocidos como IDF para saber cuál va a ser la intensidad de diseño para aplicar el método racional.

2.2.4. Frecuencia

Muchas obras de Ingeniería Civil e Ingeniería Agrícola son diseñadas en base a un evento de lluvia crítico, es decir un evento de lluvia con tal dimensión que muy probablemente sólo ocurra una vez cada tantos años, a este concepto se

le llama periodo de retorno y en base a distintos tipos de obras se escoge un periodo de retorno de diseño. En efecto, un correcto dimensionamiento del drenaje garantizará la vida útil de una carretera, una vía férrea, un aeropuerto, cultivos, etc. En el caso de presas y embalses, el conocimiento de las precipitaciones pluviales extremas y el consecuente dimensionamiento adecuado de los órganos extravasares de las represas garantizará su seguridad y la seguridad de las poblaciones, cultivos y demás estructuras que se sitúan aguas abajo de la misma. El conocimiento de las lluvias intensas, de corta duración, es muy importante para dimensionar el drenaje urbano y rural, y de esta manera evitar inundaciones en los centros poblados o cultivos.

Las precipitaciones pluviales extremas, es decir con tiempos de retorno de 20, 500, 1.000 y hasta 10.000 años, o la precipitación máxima probable, son determinadas para cada sitio particular con procedimientos estadísticos, con base en observaciones de larga duración.

Dependiendo del tipo de obra a diseñar se escoge el periodo de retorno de diseño, es fundamental la experiencia y el criterio del Proyectista, la ubicación de la obra, el nivel de riesgo y otros factores, algunos criterios sugeridos se muestran en las Tablas a continuación.

Obras de drenaje transversal	Tipos de via				
	Vias ferreas	Vias expresas	Carreteras		Caminos
			Mas de 2 canales	2 canales	
Viaductos	100	100	100	-	-
Puentes	100	50	50	25	25
Portones	50	50	50	25	10
Alcantarillas $Q > 20 \text{ m}^3/\text{s}$	50	25	25	25	10
Alcantarillas $Q < 20 \text{ m}^3/\text{s}$	25	25	25	10	5
Canales interviales	25	25	-	-	-
Bateas	-	-	-	-	5

Tabla 3 Obras de drenaje transversal

Fuente: Franceschi Luis (1983) Drenaje Vial – Fundación Juan José Aguerrevere – Colegio de Ingenieros de Venezuela

Obras de protección contra socavación	Tipos de vía				
	Vías ferreas	Vías expresas	Carreteras		Caminos
			Más de 2 canales	2 canales	
Fundaciones puentes	100	100	100	50	25
Descarga de alcantarillas	25	25	10	10	5
Terraplenes	50	25	10	10	5
Diques marginales	100	50	50	10	5

Tabla 4 Obras de protección contra socavación

Fuente: Franceschi Luis (1983) **Drenaje Vial – Fundación Juan José Aguerrevere – Colegio de Ingenieros de Venezuela**

Obras de drenaje longitudinal	Tipos de vía				
	Vías ferreas	Vías expresas autopistas	Carreteras		Caminos
			4 canales	2 canales	
Canales revestidos adyacentes a la vía	25	10	10	5	5
Canales revestidos paralelos a la vía	10	10	10	5	2
Canales revestidos de grama o similar	-	10	-	-	-
Zanjas no revestidas	-	-	-	-	5
Sumideros en la isla central	-	25	-	-	-
Drenaje de puntos bajos	25	25	25	10	10
Drenaje pasos inferiores en distribuidores	-	25	25	-	-

Tabla 5 Obras de drenaje longitudinal

Fuente: Franceschi Luis (1983) **Drenaje Vial – Fundación Juan José Aguerrevere – Colegio de Ingenieros de Venezuela**

2.2.5. Duración

Es necesario conocer un criterio muy importante cuando se quiere estimar la intensidad de lluvia para un punto de concentración y ese es la duración del evento con el cual se trabajará, un criterio es seleccionar la lluvia cuya duración es igual al tiempo de concentración de la cuenca o área de estudio; dicho tiempo se define como el tiempo que tarda una gota de lluvia en llegar desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de concentración y se garantiza que todos los puntos de una cuenca se encuentren aportando agua de escorrentía de manera

simultánea al mismo punto de salida o desagüe, el cual sería el punto de concentración a estudiar.

Para calcular el tiempo de concentración se han tomado en cuenta muchos estudios los cuales han desarrollado distintas maneras de calcularlo dependiendo del tipo de área:

Para pendientes empinadas (entre 3% y 10%)

$$t_c = 0.01947L^{0.77}S^{-0.385}$$

L= longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida, m.

S= pendiente promedio de la cuenca, m/m

Para pequeñas cuencas montañosas

$$t_c = 0.0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

L= longitud del curso de agua más largo, m.

H= diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, m.

Para drenaje de aeropuertos y cuencas urbanas

$$t_c = 0.7035 \frac{(1.1 - C)L^{0.5}}{S^{0.333}}$$

C= coeficiente de escorrentía del método racional.

L= longitud de flujo superficial, m.

S= pendiente de la superficie, m/m.

Para cuencas de uso agrícola y cuencas urbanas

$$t_c = \frac{0.0136 \cdot L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{S^{0.5}}$$

L = longitud hidráulica de la cuenca mayor
trayectoria de flujo (m)

CN = Número de curva SCS

S = pendiente promedio de la cuenca (m/m).

Cálculo de la intensidad de diseño

Una vez establecidos los criterios de periodo de retorno y tiempo de concentración es necesario proceder a calcular la intensidad de diseño, para ello se utilizan las curvas IDF regionales o de una estación cercana a la cuenca, las cuales son conocidas como una relación matemática entre la intensidad de la precipitación, su duración y su probabilidad de ocurrencia. Hay muchas maneras estadísticas de elaborar las curvas IDF, una de las maneras más usadas para elaborar las curvas IDF es el método de distribución acumulada de Gumbel el cual se procederá a explicar paso a paso.

1) Obtención de datos pluviométricos:

Es obligatorio para efectos de aplicación de este método obtener data de estaciones pluviométricas que se encuentren lo más cercano que se pueda a la cuenca de estudio, dicha data corresponde a un período de datos de precipitaciones mensuales, además de la data de precipitación máxima anual y las precipitaciones en milímetros, su formato suele ser de la siguiente forma:

M.A.R.N.R. DIRECCION DE HIDROLOGIA Y METEOROLOGIA										
Estacion: GUATAPARO-DIQUE										
06/1951 Fecha Elim: 01/1984										
Serial: 1359 Fecha Inst:										
OCT	AYO NOV	ENE DIC	FEB MAX	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
Parametro: INTENSIDAD PARA 24 HORAS							Codigo: 6111 Edo:			
CARABOBO										
	1952	0	0	0	52	-	28	27	31	102
40	40	23	<u>102</u>							
	1953	12	6	5	18	39	40	33	61	52
31	46	7	61							
	1954	0	29	0	76	23	41	22	46	20
55	15	3	76							
	1955	2	1	12	24	36	42	29	30	20
57	18	3	57							
	1956	27	14	13	11	27	29	28	30	40
34	9	7	40							
	1957	0	0	1	8	34	11	5	11	25
16	41	4	41							
	1958	0	2	0	18	49	48	49	45	26
40	12	1	49							
	1959	0	0	3	24	15	22	36	-	22
29	-	5	36							
	1960	11	5	0	26	33	33	43	30	57
24	16	6	57							
	1961	0	0	1	1	32	-	-	25	26
27	20	5	32							
	1962	5	0	9	1	43	33	28	19	36
<u>109</u>	32	9	<u>109</u>							
	1963	6	0	0	17	-	-	-	31	73
73	21	5	73							
	1964	0	0	2	21	44	28	32	44	32
47	11	23	47							
	1965	12	0	0	4	74	29	37	<u>104</u>	-
-	73	9	104							
	1966	6	6	1	32	45	53	-	42	33
44	-	-	53							
	1967	1	0	-	44	70	35	32	71	33
50	10	6	71							
	1968	0	6	1	<u>97</u>	56	<u>95</u>	17	46	35
20	25	5	97							
	1969	27	17	49	56	25	35	47	72	35
85	57	5	85							
	1970	4	0	1	26	30	24	31	27	29
17	26	23	31							
	1971	0	40	0	22	63	35	42	22	62
59	12	4	63							
	1972	13	14	40	15	68	25	28	20	112
30	17	1	<u>112</u>							
	1973	4	0	1	<u>82</u>	25	39	11	94	94
33	32	0	94							

Tabla 6.1 Data pluviométrica de la estación Guataparo-Dique

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAMEH

33	1974	1	0	0	3	25	12	31	62	35
	22	5	62							
52	1975	1	0	4	5	53	14	87	62	42
	14	32	87							
24	1976	0	0	2	50	22	-	29	29	30
	-	3	50							
24	1977	0	0	-	9	43	49	32	32	28
	46	1	49							
33	1978	6	0	1	21	83	40	31	26	30
	35	6	83							
30	1979	1	0	25	42	-	17	83	51	64
	-	5	83							
37	1980	1	0	3	66	56	45	51	59	29
	20	1	66							
51	1981	0	79	10	-	121	27	48	35	31
	64	24	121							
54	1982	2	1	2	73	40	43	22	20	28
	4	18	73							
13	1983	3	0	10	121	58	42	33	73	54
	8	4	121							
13	1984	3	0	10	121	58	42	33	73	54
	8	4	121							

Tabla 6.2 Data pluviométrica de la estación Guataparo-Dique

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAMEH

Nótese que en la tabla se pueden apreciar la data de precipitación mensual, desde el año 1952 hasta el año 1984, para una duración de 24 Horas, hay tablas para distintas duraciones: 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 3 horas, 6 horas, 9 horas, 12 horas y 24 horas.

2) Determinación de las precipitaciones máximas por año:

Una vez obtenida la data se procede a seleccionar los datos máximos de precipitación de ese año, las tablas indican cual es el máximo por año, se ordena la data en columnas de la siguiente manera:

Año	Máximo	Año	Máximo	Año	Máximo
1952	102	1963	73	1974	62
1953	61	1964	47	1975	87
1954	76	1965	104	1976	50
1955	57	1966	53	1977	49
1956	40	1967	71	1978	83
1957	41	1968	97	1979	83
1958	49	1969	85	1980	66
1959	36	1970	31	1981	121
1960	57	1971	63	1982	73
1961	32	1972	112	1983	121
1962	109	1973	94	1984	121
				MAX	109,00

3) Determinación de las variables estadísticas:

Se procede a calcular los valores de media, desviación estándar, beta y moda.

Media: Para hallar la media se suman todos los datos máximos de precipitaciones y se divide entre la cantidad de años

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$$

Para los datos de la estación Guataparo-Dique la media sería:

$$\bar{X} = \frac{2406}{33} \quad \bar{X} = 72,91\text{mm}$$

Desviación estándar: Es necesario tener el dato de la media para proceder a calcular según la siguiente fórmula la desviación estándar.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$
$$S = \sqrt{\frac{23710,7}{33 - 1}} \quad S = 27,22\text{mm}$$

Beta: Beta es un valor utilizado para ajustar la expresión probabilística de la desviación estándar, este valor implica la modificación del valor de la desviación estándar por un valor fijo.

$$= \frac{\bar{b}}{S}$$
$$= \frac{\bar{b}}{27,22} \quad = 21,22\text{mm}$$

Moda: En el método de Gumbel el signo de la moda se e

$$= \bar{X} - (\bar{b} - \bar{X})$$
$$= 72,91 - (0,5772 \cdot 21,22) = 60,66\text{mm}$$

4) Cálculo de las variables de precipitación para un periodo de retorno

En esta parte se utilizan logaritmos para obtener lo que serian las variables reducidas del método de Gumbel, las precipitaciones establecidas, las verificaciones de probabilidad de ocurrencia y las mayoraciones a las precipitaciones

Variable reducida (YT): La variable reducida es un factor el cual dependerá netamente del periodo de retorno, su uso será para minorar o mayorar la intensidad de diseño dependiendo del periodo de retorno.

$$YT = \ln \left(\ln \left(\frac{Tr}{Tr - 1} \right) \right)$$

Ejercicio: Para un periodo de retorno de 50 años, ¿Cuál sería el valor de la variable reducida?

$$YT = \ln \left(\ln \left(\frac{50}{50 - 1} \right) \right) \quad YT = 3,9019$$

Precipitación establecida (XT): será el valor de intensidad de diseño sin la mayoracion de corrección

$$XT = \quad + (\quad YT)$$

Continuando el ejercicio:

$$XT = 60,66 + (21,22 \cdot 3,9019) \quad XT = 143,45\text{mm}$$

Probabilidad de ocurrencia F(XT): En este paso se verifica si el método de distribución de Gumbel ha sido realizado de manera correcta, se verifica de la siguiente forma:

$$P + F(XT) = 1$$

Donde:

$$P = \frac{1}{Tr}$$

Y a su vez:

$$F(XT) = e^{-e^{-\left(\frac{XT-\mu}{\beta}\right)}}$$

Continuando el ejercicio:

$$P = \frac{1}{50} \qquad P = 0,02$$

$$F(XT) = e^{-e^{-\left(\frac{143,45-60,66}{21,22}\right)}} \qquad F(XT) = 0,98$$

$$0,02 + 0,98 = 1$$

Corrección de intervalo fijo $XT_{\text{corregido}}$: Muchos estudios aplicados a el análisis estadístico han propuesto una corrección de intervalo fijo, ya que los resultados obtenidos por este método varían de la realidad un 13%, por esta razón se decidió utilizar la implementación de un intervalo fijo el cual consta simplemente de multiplicar el dato de precipitación establecida por un factor de 1,13.

$$XT_{\text{corregido}} = XT \quad 1,13$$

Continuando el ejercicio:

$$XT_{\text{corregido}} = 143,45\text{mm} \quad 1,13 \quad XT_{\text{corregido}}$$

$$= 162,10\text{mm}$$

5) **Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias**

Para obtener una curva IDF es necesario establecer las diferentes duraciones de lluvia en horas, para ello Campos A., (1978) establece mediante una tabla, unos coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas.

Duraciones, en horas									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
0,30	0,39	0,46	0,52	0,57	0,61	0,68	0,80	0,91	1,00

Tabla 7 coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas

Fuente: D.F. Campos A., (1978)

Aplicándolo al ejercicio se tendría de resultado para el periodo de retorno de 50 años:

Horas	I (mm)
24 hr	162,109
18 hr	147,519
12 hr	129,687
8 hr	110,234
6 hr	98,886
5 hr	92,402
4 hr	84,297
3 hr	74,57
2 hr	63,223
1 hr	48,633

6) Intensidades en minutos

En este paso simplemente se dividen las intensidades entre el número de horas para obtener los datos de precipitación para un valor de tiempo en minutos.

Tiempo de duracion		Intensidades según el tiempo	
Horas	Minutos	Lamina de precipitacion (mm)	Intensidad (mm/hora)
24 hr	1440	162,109	6,755
18 hr	1080	147,519	8,196
12 hr	720	129,687	10,807
8 hr	480	110,234	13,779
6 hr	360	98,886	16,481
5 hr	300	92,402	18,48
4 hr	240	84,297	21,074
3 hr	180	74,57	24,857
2 hr	120	63,223	31,611
1 hr	60	48,633	48,633

7) Regresión inicial

Como se puede apreciar, no se poseen datos acerca de las intensidades en duraciones menores a 60 minutos, se debe proceder a hacer regresiones I-D-T (Intensidad, duración, Periodo de retorno).

$$I = \frac{K T^m}{t^{|n|}}$$

Donde

I = Intensidad (mm/hr)

T = Periodo de retorno (años)

t = Duración

K,m,n = Parámetros de ajuste

Para calcular el valor de (n) es necesario conseguir la regresión inicial, (K) y (m) se calcularan con la regresión potencial.

Para el ejercicio:

Periodo de retorno para T = 50 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	6,755	7,2724	1,9103	13,8923	52,8878
2	1080	8,196	6,9847	2,1037	14,6936	48,7863
3	720	10,807	6,5793	2,3802	15,6599	43,2865
4	480	13,779	6,1738	2,6231	16,1947	38,1156
5	360	16,481	5,8861	2,8022	16,4941	34,6462
6	300	18,480	5,7038	2,9167	16,6362	32,5331
7	240	21,074	5,4806	3,0480	16,7052	30,0374
8	180	24,857	5,1930	3,2131	16,6857	26,9668
9	120	31,611	4,7875	3,4535	16,5336	22,9201
10	60	48,633	4,0943	3,8843	15,9037	16,7637
10	4980	200,673	58,1555	28,3352	159,3990	346,9435
Ln (d) = 6,4180		d = 612,7902		n = -0,6164		

$$\ln(d) = \frac{[(\ln x \quad \ln y) \quad (\ln x)] \quad [(\ln x)^2 \quad \ln y]}{\ln x^2 \quad [(\ln x)^2 \quad 10]}$$

$\ln(d)$

$$= \frac{[(159,3990) (58,1555)] [346,9435 28,3352]}{58,1555^2 [346,9435 10]}$$

$$d = e^{\ln(d)}$$

$$n = \frac{\ln y (\ln(d) 10)}{\ln x}$$

$$n = \frac{28,3352 (6,4180 10)}{58,1555}$$

8) **Regresión potencial**

<i>Regresión potencial</i>						
Nº	x (Periodo de retorno)	y (d)	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	2					
2	5					
3	10					
4	25					
5	50					
6	100					
7	500					
7						
Ln (K) =		K =		m =		

Para efectos del ejercicio se calculara en base al Periodo de retorno de 50 años, si se desea realizar para todos los periodos de retorno se debe hacer el paso 7 para cada uno de ellos.

En este caso como es necesario tomar en cuenta todos los cálculos de los distintos tiempos de retorno para obtener (K) y (m), se colocara la tabla de regresión potencial completa, sabiendo que para los demás periodos de retorno se calculan de la misma forma los anteriores pasos.

Regresión potencial						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	2	292,3646	0,6931	5,6780	3,9357	0,4805
2	5	395,1301	1,6094	5,9792	9,6232	2,5903
3	10	463,1698	2,3026	6,1381	14,1335	5,3019
4	25	599,2750	3,2189	6,3957	20,5870	10,3612
5	50	612,7902	3,9120	6,4180	25,1075	15,3039
6	100	676,2197	4,6052	6,5165	30,0097	21,2076
7	500	822,5086	6,2146	6,7124	41,7147	38,6214
7	692	3861,4580	22,5558	43,8379	145,1112	93,8667
Ln (K) = 5,6764		K = 291,9010		m = 0,1819		

$$\text{Ln}(K) = \frac{[(\text{Ln } x \text{ Ln } y) \text{ (Ln } x)] \text{ [(Ln } x)^2 \text{ Ln } y]}{\text{ln } x^2 \text{ [(Ln } x)^2 \text{ 7]}}$$

$$\text{Ln}(K) = \frac{[(143,1112) \text{ (22,5558)}] \text{ [93,8667 \text{ 43,8379}]}}{22,5558^2 \text{ [93,8667 \text{ 7}]}}$$

$$K = e^{\text{Ln}(K)}$$

$$m = \frac{\text{Ln } y \text{ (Ln}(K) \text{ 7)}}{\text{Ln } x}$$

$$m = \frac{43,8379 \text{ (5,6764 \text{ 7})}}{22,5558}$$

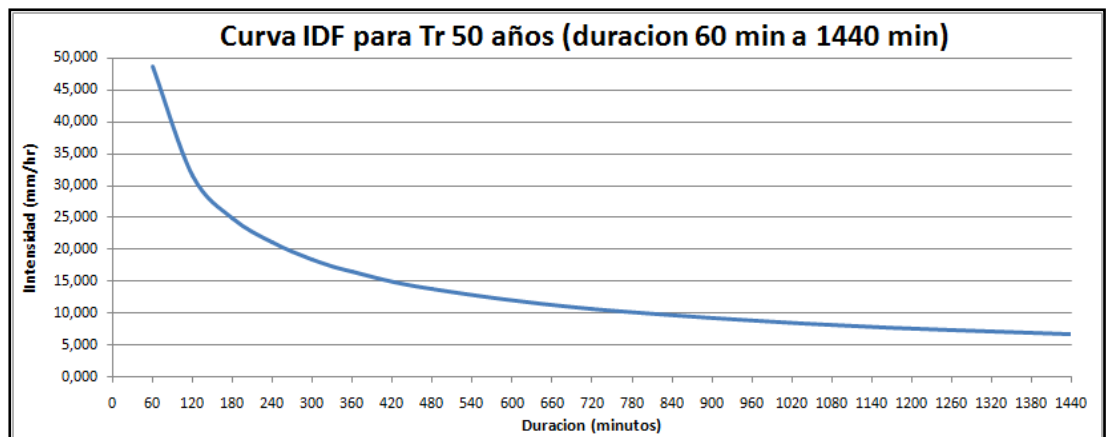
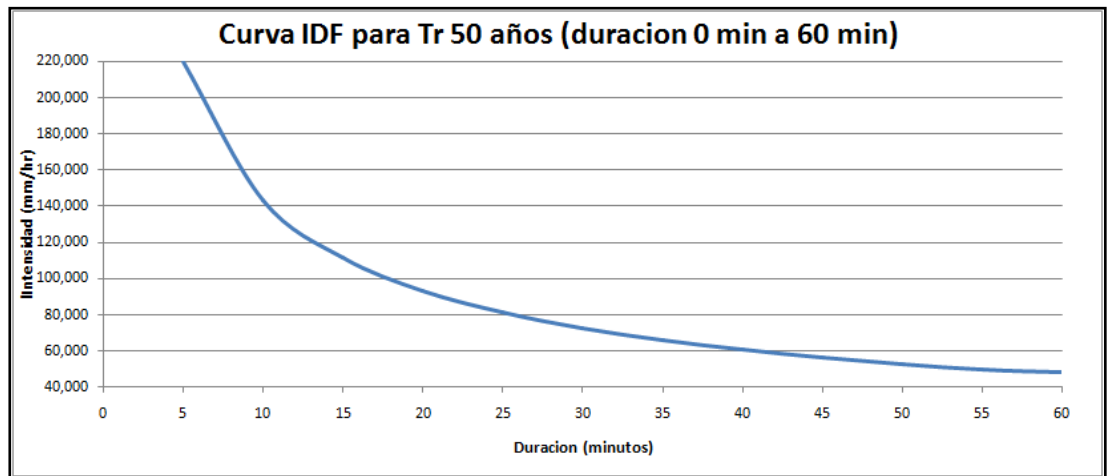
9) Valores de intensidad para duraciones menores a 60 minutos

Se aplica la fórmula de Intensidad (paso 7) y se obtienen los valores, se sigue utilizando la fórmula para obtener los valores de intensidad para los tiempos mayores a 60 minutos.

Tabla de intensidades - Tiempo de duración											
Periodo de retorno	Duración en minutos										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
50	219,66	143,04	111,30	93,15	81,13	72,47	65,88	60,66	56,39	52,83	49,81

10) Graficar las curvas IDF

En este último paso se grafican los datos obtenidos en los pasos 6 y 9



2.3. Fórmula de aplicación

$$Q = \frac{C \ I \ A}{360}$$

Donde:

Q = Caudal (m³/s).

C = coeficiente de escorrentía (adimensional).

I = Intensidad de la lluvia de diseño (mm).

A = Área de la cuenca (ha).

2.4. Limitaciones del método

Solamente trabaja con caudal pico, no expresa el comportamiento del evento de la precipitación.

El método supone que sólo se puede trabajar en áreas menores a 200 hectáreas.

Se asume que la precipitación es uniforme en toda la cuenca, no hay variabilidad en ningún punto del área de la cuenca.

Ignora el efecto de la retención superficial.

Se considera válido solamente el uso del tiempo de concentración, no se estudian las duraciones de los eventos de precipitación.

Asume que el período de retorno de la precipitación y el de la escorrentía son los mismos, lo que sería cierto en áreas impermeables, en donde las condiciones de humedad antecedente del suelo no influyen de forma significativa en la Escorrentía Superficial.

Asume que la escorrentía es directamente proporcional a la precipitación.

EJERCICIOS

Ejercicio 1. Se tiene una cuenta semipermeable con un área total de 180 hectáreas, 40 hectáreas de cultivos con 9% de pendiente, 60 hectáreas de vegetación ligera con 0,5% de pendiente, 80 hectáreas de hierba con 25% de pendiente. Determine el coeficiente de escorrentía promedio.

Resolución:

Determinación de los coeficientes de escorrentía por área: Para poder encontrar el coeficiente de escorrentía promedio se necesita determinar el coeficiente de cada una de las áreas de la cuenca:

Cobertura vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada >50%	Alta (50-20)%	Media (20-8)%	Suave (8-1)%	Despreciable <1%
Sin vegetacion	Impermeable	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6
	Semipermeable	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Permeable	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
Cultivos	Impermeable	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Semipermeable	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
	Permeable	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2
Pastos y vegetacion ligera	Impermeable	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45
	Semipermeable	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
	Permeable	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15
Hierba y grama	Impermeable	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
	Semipermeable	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
	Permeable	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
Bosques y vegetacion densa	Impermeable	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
	Semipermeable	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25
	Permeable	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05

Obtención del coeficiente de escorrentía promedio: Se aplica la ecuación y se obtiene el coeficiente de escorrentía promedio

$$\bar{C} = \frac{(40 \cdot 0,5) + (60 \cdot 0,35) + (80 \cdot 0,45)}{180}$$

$$\bar{C} = 0,427$$

Ejercicio 2. Se tiene una cuenca urbana la cual posee un cauce principal de 3000m y una diferencia de cota de 55mts y un coeficiente de escorrentía promedio de 0,432.

Se pide determinar el tiempo de concentración

Determinar la formula a usar: El Tc se determinara usando una sola formula, para este caso se puede usar la formula de retardo del S.C.S pero el único detalle es que en el ejercicio no se da ningún dato de numero de curva, en cambio en la formula de F.A.A se tienen todos los datos necesarios, además esta fórmula aplica a cuencas urbanas.

Utilizar la formula: Para aplicar esta formula el único dato faltante seria la pendiente, es muy fácil de sacar puesto a que el ejercicio proporciona como dato la diferencia de cota(altura) y la longitud.

$$S = \frac{55\text{mts}}{3000\text{mts}}$$

$$S = 0,01833$$

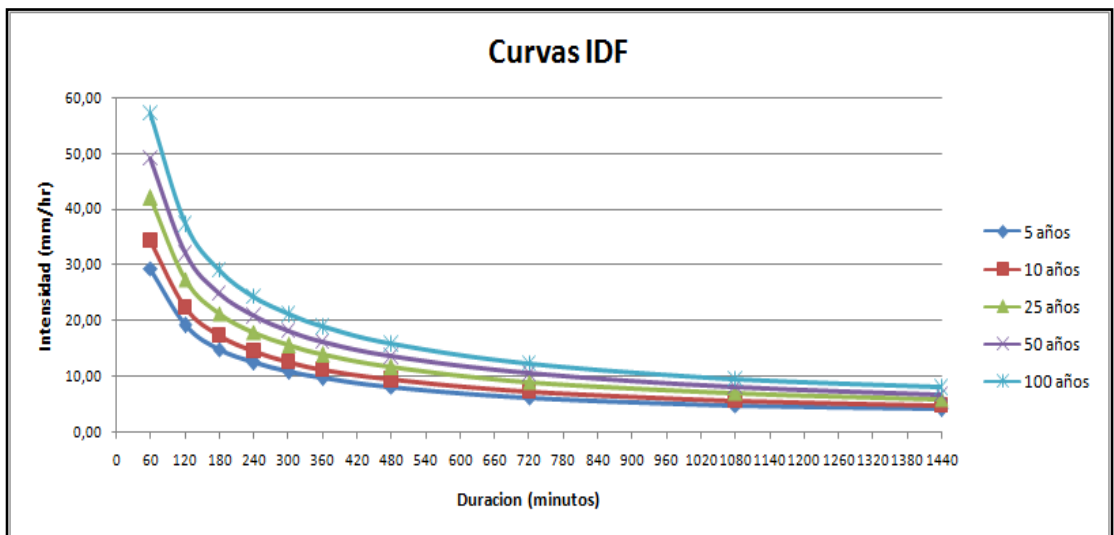
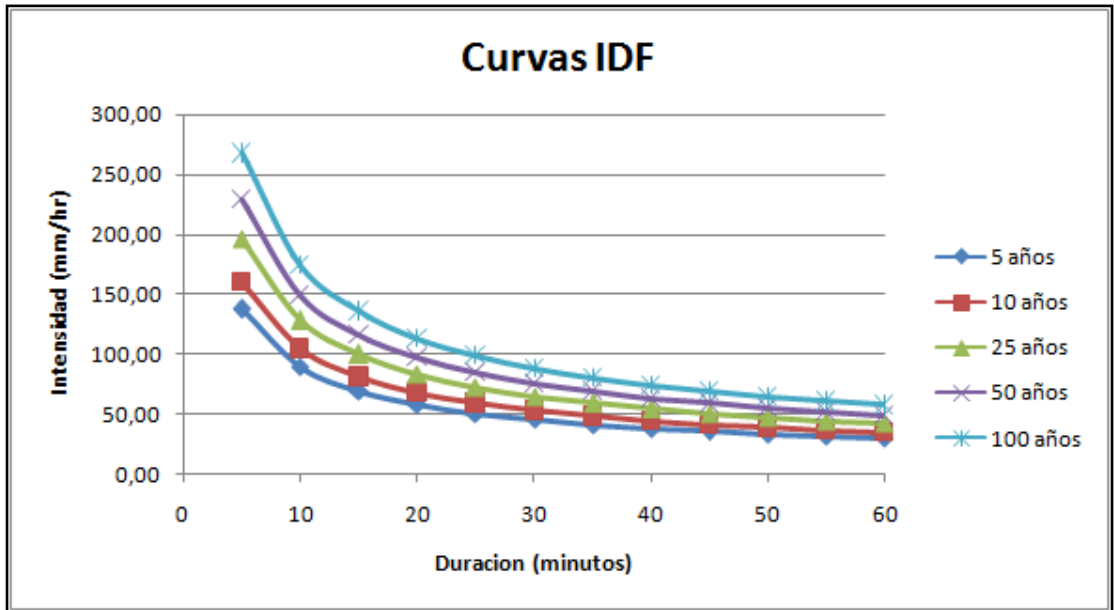
$$T_c = 0,7035 \frac{(1,1 \cdot C) \cdot L^{0,5}}{S^{0,333}}$$

$$T_c = 97,4918 \text{ minutos}$$

Ejercicio 3. En una cuenca con un cauce principal de 7500 mts con una diferencia de cota total entre el punto más alto y el punto de concentración de 120 mts, conformada de por las siguientes áreas:

	Area (ha)	Tipo de suelo	Pendiente (%)
Bosques	44	Permeable	16
Hierba	49	Semipermeable	7
Pastos	56	Semipermeable	29
Cultivos	51	Permeable	0,5

Se cuenta con la data de las curvas IDF:



Se pide calcular: el coeficiente de escorrentía, el tiempo de concentración y los caudales para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años.

Determinación de los coeficientes de escorrentía por área:

Cobertura vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada >50%	Alta (50-20)%	Media (20-8)%	Suave (8-1)%	Despreciable <1%
Sin vegetacion	Impermeable	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6
	Semipermeable	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Permeable	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
Cultivos	Impermeable	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Semipermeable	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
	Permeable	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2
Pastos y vegetacion ligera	Impermeable	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45
	Semipermeable	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
	Permeable	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15
Hierba y grama	Impermeable	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
	Semipermeable	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
	Permeable	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
Bosques y vegetacion densa	Impermeable	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
	Semipermeable	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25
	Permeable	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05

$$\bar{C} = \frac{(44 \quad 0,15) + (49 \quad 0,35) + (56 \quad 0,5) + (41 \quad 0,2)}{200}$$

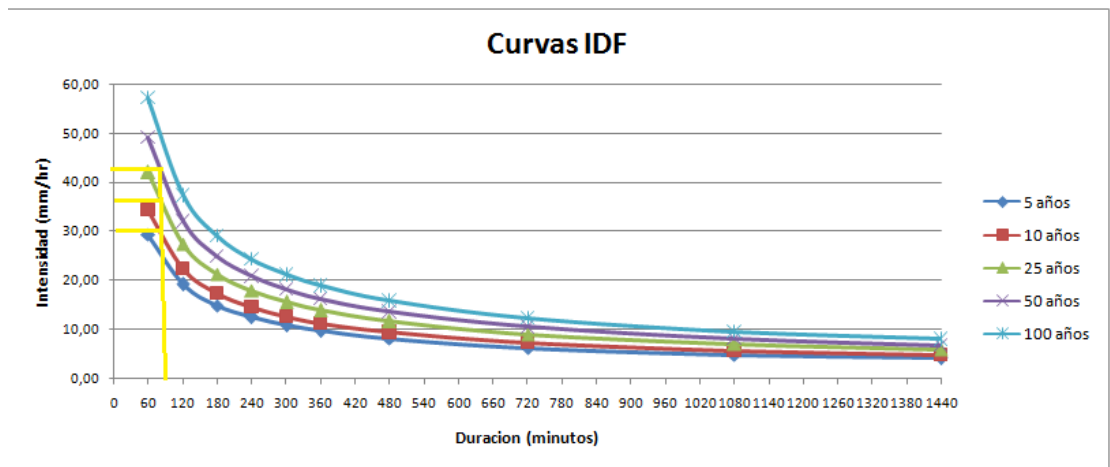
$$\bar{C} = 0,30$$

Utilización de la formula de tiempo de concentración

$$T_c = 0,0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

$$T_c = 92,31 \text{ minutos}$$

Determinación de las intensidades para los diferentes periodos de retorno usando las curvas IDF: Una vez obtenido el tiempo de concentración se procede a conseguir las intensidades para los tres periodos de retornos que se pide determinar en el ejercicio, simplemente se intercepta el valor del tiempo de concentración con los periodos de retorno de las curvas IDF y se corta con el eje Y (intensidad) y se obtienen los valores.



$$I_{10 \text{ años}} = 30,15 \text{ mm/hr}$$

$$I_{25 \text{ años}} = 37,28 \text{ mm/hr}$$

$$I_{50 \text{ años}} = 42,13 \text{ mm/hr}$$

Calculo de los caudales

$$Q_{10 \text{ años}} = \frac{0,30 \quad 30,15 \text{ mm/hr} \quad 200 \text{ ha}}{360} = 5,025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{25 \text{ años}} = \frac{0,30 \quad 37,28 \text{ mm/hr} \quad 200 \text{ ha}}{360} = 6,213 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{50 \text{ años}} = \frac{0,30 \quad 42,13 \text{ mm/hr} \quad 200 \text{ ha}}{360} = 7,022 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

EJERCICIOS PROPUESTOS

Ejercicio 1. Se tiene una cuenca con suelo permeable con las siguientes características:

Cobertura vegetal	Area(ha)	Pendiente %
Pastos	25	10
Bosques	98	32
Sin vegetacion	29	45
Pastos	12	3
Hierba	20	7

Determinar el coeficiente de escorrentía promedio

Ejercicio 2. Para una cuenca montañosa con un cauce principal con una longitud de 2000mts y una diferencia de cota de 95mts

Calcular el tiempo de concentración

Ejercicio 3. Para el diseño de un terraplén de un camino dentro de una cuenca con las siguientes características:

Cobertura vegetal	Area(ha)	Pendiente %
Vegetacion densa	51	4,5
Pastos	12	1,7
Bosques	78	2,2
Pastos	30	9
Hierba	6	0,3
Cultivos	50	10

Determinar el coeficiente de escorrentía promedio utilizando valores tabulados para diferentes períodos de retorno.

Ejercicio 4. Se cuenta con la siguiente data de una estación meteorológica:

Año	Lamina de precipitacion (mm)	Año	Lamina de precipitacion (mm)	Año	Lamina de precipitacion (mm)
1979	56	1992	124	2005	32
1980	48	1993	98	2006	49
1981	43	1994	79	2007	72
1982	77	1995	65	2008	64
1983	78	1996	82	2009	59
1984	69	1997	64	2010	48
1985	59	1998	71	2011	42
1986	83	1999	72	2012	89
1987	86	2000	79	2013	92
1988	78	2001	60	2014	97
1989	92	2002	82	2015	105
1990	106	2003	54	2016	101
1991	115	2004	45	2017	88

El coeficiente de escorrentía promedio es de 0,45 y el área de la cuenca es de 195ha

1. Elaborar las curvas IDF para los periodos de retorno de 25,50 y 100 años.
2. Calcular las Intensidades para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años
3. Calcular los caudales de escorrentía para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años

4. Si el área de la cuenca fuese 3000ha, explique: ¿Cómo afectarían los cálculos de los caudales?, ¿En qué variarían los cálculos con respecto a un área pequeña?

CAPÍTULO III

MÉTODO DEL SCS

3.1. MÉTODO DE NÚMERO DE CURVA

3.1.1. Introducción

El método de número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) es uno de los métodos más populares para calcular el volumen de escorrentía después de una tormenta. Es popular porque es simple, fácil de entender, aplicar, y estable, y representa la mayoría de las características de la cuenca productora de escorrentía, como el tipo de suelo, el uso de la tierra, la condición hidrológica y la condición de humedad previa. El método de número de curva fue desarrollado originalmente para su uso en pequeñas cuencas hidrográficas agrícolas y desde entonces se ha extendido y aplicado a cuencas hidrográficas rurales, forestales y urbanas. Desde el inicio del método, se ha aplicado a una amplia gama de entornos. En los últimos años, el método ha recibido mucha atención en la literatura hidrológica. El método se publicó por primera vez en 1956 en la Sección 4 del Manual de Ingeniería Nacional del Servicio de Conservación de Suelos (ahora llamado Servicio de Conservación de Recursos Naturales), del departamento de Agricultura de los Estados Unidos. La publicación ha sido revisada varias veces. Sin embargo, los contenidos de la metodología han sido más o menos lo mismo. Siendo una metodología de la agencia, el método no ha pasado por el proceso de una revisión por pares y, en general, se acepta en la forma en que existe. A pesar de varias limitaciones del método e incluso credibilidad cuestionable, ha estado en uso continuo por la sencilla razón de que funciona bastante bien a nivel de campo.

La suposición básica del método de número de curva SCS es que, para una sola tormenta, la relación entre la retención real del suelo después de la escorrentía y la posible retención máxima es igual a la relación entre la escorrentía directa y la precipitación disponible. Esta relación, después de la manipulación algebraica y la inclusión de supuestos simplificadores, resulta en la siguiente

ecuación encontrada en la Sección 4 del Manual Nacional de Ingeniería (NEH-4) (USDA-SCS, 1985), donde el número de curva (CN) representa una representación conveniente de la retención máxima potencial del suelo.

3.1.2. Descripción

El método del sistema de conservación de suelos trabaja bajo el hecho de que las precipitaciones iniciales no producen escorrentía directa este hecho es conocido como la abstracción inicial o umbral de escorrentía, el cual es la cantidad de precipitación a partir de la cual el terreno no es capaz de infiltrar más agua y esta discurre sobre la superficie en un flujo difuso.

Esto significa que en un evento cualquiera de precipitación, el suelo absorberá una parte de la precipitación hasta que haya perdido la capacidad de infiltrar el agua o este se encuentre sobresaturado.

Este umbral depende de la humedad inicial del suelo, el uso del suelo, el tipo de suelo y la pendiente, estas dependencias las veremos más adelante con las tablas directas de umbral de escorrentía y número de curva, dichas tablas no sólo dependerán del tipo de suelo sino además del tipo de construcción planteada y del tipo de terreno.

3.1.3. Condiciones de aplicación

Este método es aplicable para un estudio directo de un evento normal o extremo de precipitación ya sea para un simple estudio del comportamiento del flujo superficial o bien sea de un cálculo estimado para un diseño de obra.

Los datos de lluvia generalmente disponibles son los totales medidos en pluviómetros y para tales datos se ha desarrollado la relación lluvia - escorrentía. Esos datos son los totales de una o más tormentas que ocurren en un día del calendario, y nada se sabe acerca de su distribución en el tiempo, por eso es que la relación excluye al tiempo como la variable explícita.

$$P_n = \frac{(P - 0,20 S)^2}{(P + 0,8S)} \quad S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Donde:

P_n = Escurrimiento neto (mm).

P = Precipitación por evento (mm).

S = Retención máxima potencial (mm).

CN = Curvas numéricas (adimensional).

No sería muy exacto decir que todas las tablas lleguen a trabajar en base a las curvas numéricas, como se llegaba a mencionar anteriormente el umbral de escorrentía es tomado en cuenta para otras tablas, es por ese hecho que la fórmula anteriormente mostrada se suele modificar para que se halle el escurrimiento medio en base al umbral de escorrentía.

$$P_n = \frac{(P - P_o)^2}{(P + 4P_o)} \quad P_o = \frac{5080}{CN} \quad 50,8$$

P_o = Umbral de escorrentía (mm).

La relación P_o = 0,2S nace de la suposición del hecho de que el umbral de escorrentía representa un 20% de la retención máxima superficial.

Si se aplica la fórmula en base a P_o, se puede llegar a analizar la precipitación acumulada para un periodo de tiempo determinado.

$$P_n = \frac{(P - P_o)^2}{(P + 4P_o)}$$

Donde P es analizado como la suma de las precipitaciones individuales hasta la hora de estudio.

A su vez se puede calcular el coeficiente de escorrentía promedio por evento como:

$$C = \frac{P_n}{P}$$

3.1.4. Tablas

A continuación se presentaran las siguientes tablas de número de curva y umbral de escorrentía, dichas tablas han sido elaboradas en base a los usos dados a las tierras y los tipos de cobertura:

Descripción Del Uso De La Tierra	Pendiente (%)	Características hidrologicas	Umbral de Escorrentía Para El Tipo De Suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	≥3	R	15	8	6	4
		N	17	11	8	6
	<3	R/N	20	14	11	8
Cultivos en Hileras	≥3	R	23	13	8	6
		N	25	16	11	8
	<3	R/N	28	19	14	11
Cereales de Invierno	≥3	R	29	17	10	8
		N	32	19	12	10
	<3	R/N	34	21	14	12
Rotación de Cultivos Pobres	≥3	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
	<3	R/N	30	19	13	10
Rotación de Cultivos Densos	≥3	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
	<3	R/N	47	25	16	13
Praderas	≥3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	*	33	18	13
		Muy Buena	*	41	22	15
	<3	Pobre	58	25	12	7
		Media	*	35	17	10
Plantaciones Regulares de Aprovechamiento Forestal	≥3	Buena	*	*	22	14
		Muy Buena	*	*	25	16
		Pobre	62	26	15	10
	<3	Media	*	34	19	14
		Buena	*	42	22	15
		Pobre	*	34	19	14
Masas Forestales		Media	*	42	22	15
		Buena	*	50	25	16
		Muy Clara	40	17	8	5
		Clara	60	24	14	10
		Media	*	34	22	16
		Espesa	*	47	31	23
		Muy Espesa	*	65	43	33

Tabla 1 Umbral de Escorrentía según uso de la tierra

Fuente: MOPU (1990)

Donde:

R = Denotación de cultivo según la máxima pendiente.

N = Denotación de cultivo según las curvas de nivel.

* = Parte de la cuenca inexistente para efectos de cálculo.

Descripción Del Uso De La Tierra	Numero De Curva Para El Tipo De Suelo			
	A	B	C	D
Estacionamientos Pavimentados, Techos, Entradas	98	98	98	98
Calles y Caminos Pavimentados Con Bordillos y Alcantarillas	98	98	98	98
Calles y Caminos Con Grava	76	85	89	91
Calles y Caminos Con Tierra	72	82	87	89
Cultivado (Cultivo Agrícola) Sin Tratamiento De Conservacion (Sin Terrazas)	72	81	88	91
Cultivado (Cultivo Agrícola) Con Tratamiento De Conservacion (Terrazas y Contornos)	62	71	78	81
Pastos o Terras a Distancia Pobres (<50% Cubierta Del Suelo o Muy Adornada)	68	79	86	89
Pastos o Terras a Distancia Buena (50-75% Cubierta Del Suelo, No Muy Adornada)	39	61	74	80
Pradera (Hierba, Sin Pastoreo, Cortada Para Heno)	30	58	71	78
Cepillo (Buena, >75% Cubierta Del Suelo)	30	48	65	73
Maderas y Bosques (Pobres, Destruídos Por Sobrepastoreo o Quemados)	45	66	77	83
Maderas y Bosques (Justas, Pastoreados No Quemados)	36	60	73	79
Maderas y Bosques (Buenos, Sin Pastoreo)	30	55	70	77
Espacios Abiertos (Céspedes, Parques, Campos De Golf, Cementerios, Entre Otros) (Justa, La Grama Cubre 50-75% Del Area)	49	69	79	84
Espacios Abiertos (Céspedes, Parques, Campos De Golf, Cementerios, Entre Otros) (Buena, La Grama Cubre >75% Del Area)	39	61	74	80
Distritos Comerciales y De Negocios (85% Impermeables)	89	92	94	95
Distritos Industriales (72% Impermeables)	81	88	91	93
Áreas Residenciales (505.857 m2, Aproximadamente 65% Impermeables)	77	85	90	92
Áreas Residenciales (1011.71 m2, Aproximadamente 38% Impermeables)	61	75	83	87
Áreas Residenciales (2023.43 m2, Aproximadamente 25% Impermeables)	54	70	80	85
Áreas Residenciales (4046.86 m2, Aproximadamente 20% Impermeables)	51	68	79	84

Tabla 2 Numero de Curva según uso de la tierra

Fuente: Chow Et Al (1988)

Tipo de Cubierta (Condición Hidrológica)	Tipos de cobertura terrestre nacional Según Tipo De Data	Numero De Curva Para El Tipo De Suelo			
		A	B	C	D
Agua	Aguas Abiertas	100	100	100	100
Espacio Abierto (buena)	Desarrollado - Espacios Abiertos	39	61	74	80
Residencial - 2023.43 m2	Desarrollado - Baja Intesidad	54	70	80	85
Residencial - 505.857 m2	Desarrollado - Mediana Intesidad	77	85	90	92
Comercio y Negocios	Desarrollado - Alta Intesidad	89	92	94	95
Barbecho - Suelo Desnudo	Tierra Estéril	77	86	91	94
Roble - Aspen (Buena)	Bosque Caducifolio	30	30	41	48
Bosques (Buena)	Bosque Siempre Verde	30	55	70	77
Bosques (Justa)	Bosque Mixto	36	60	73	79
Cepillo (Justa)	Arbusto / Matorral	35	56	70	77
Pastos, Pastizales (Justa)	Pastizales / Herbáceas	49	69	79	84
Prado	Pasto / Heno	30	58	71	78
Cultivos En Hileras	Cosechas Cultivadas	67	78	85	89
Humedales	Humedales Leñosos	100	100	100	100
Humedales	Humedales Herbáceos Emergentes	100	100	100	100

Tabla 3 Numero de Curva según tipo de cubierta

Fuente: NRCS (1986)

Tipos de Suelo	Textura del Suelo
A	Arenas con Poco limo y Arcilla; Suelos muy Permeables
B	Arenas Finas y Limos
C	Arenas muy Finas, Limos, Suelos con Alto Contenido en Arcilla
D	Arcillas en Grandes Cantidades; Suelos Poco Profundos con Subhorizontes de Roca Sana; Suelos muy Impermeables

Tabla 4 Tipos de Suelos

Fuente: NRCS (1986)

3.1.5. Corrección de CN

El número de la curva de escorrentía (también llamado número de curva o simplemente CN) es un parámetro empírico utilizado en hidrología para predecir el escurrimiento directo o la infiltración del exceso de lluvia, se desarrolló a partir de un análisis empírico de la escorrentía de pequeñas cuencas y parcelas de colinas monitoreadas por el USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). Es ampliamente utilizado y es un método eficiente para determinar la cantidad aproximada de escorrentía directa de un evento de lluvia en un área particular.

Para condiciones de sequía o lluvias intensas hay que corregir los valores de CN obtenidos. Las condiciones iniciales de saturación del suelo también influyen en la formación de escorrentía, ya que si el suelo está previamente saturado a un aguacero, la formación de escorrentía se producirá antes que si el suelo se encuentra en condiciones no saturadas, ya que el agua tenderá inicialmente a rellenar los poros. La corrección del valor de CN se hace en función de las lluvias caídas durante los 5 días previos.

En periodos húmedos

Para $P < 12,5 \text{ mm}$ Corrección A. (Condición previa de sequía).

Para $12,5\text{mm} < P < 28 \text{ mm}$ No se corrige. (Condición previa normal).

Para $P > 28 \text{ mm}$ Corrección B. (Condición previa de lluvia intensa).

En periodos secos

Para $P < 35 \text{ mm}$ Corrección A. (Condición previa de sequía).

Para $35\text{mm} < P < 53\text{ mm}$ No se corrige. (Condición previa normal).

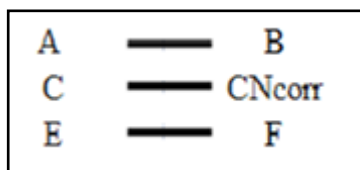
Para $P > 53\text{ mm}$ Corrección B. (Condición previa de lluvia intensa)

CN (Tablas)	CN con correccion A	CN con correccion B
0	0	0
10	4	22
20	9	37
30	15	50
40	22	60
50	31	70
60	40	78
70	51	85
80	53	91
90	78	96
100	100	100

Tabla 5 Correcciones del número de curva

Fuente: NRCS (1986)

Usando interpolación se puede obtener CN corregido:



$$CN_{corr} = F + \frac{(B - F)(C - E)}{(A - E)}$$

Chow Et Al (1992, p. 152) propone una manera de obtener dichas correcciones sin la necesidad de interpolar, además de correcciones para P_o

$$CN(A) = \frac{4,2 \text{ CN}}{10 + (0,058 \text{ CN})} \quad CN(B) = \frac{23 \text{ CN}}{10 + (0,13 \text{ CN})}$$

$$P_o(A) = P_o \cdot 2,38$$

$$P_o(B) = P_o \cdot 0,43$$

3.1.6. CN Ponderado

No siempre se llegara a cumplir que en una cuenca se encuentre un solo tipo de cubierta, o se le dé un sólo uso al terreno, o existe un sólo tipo de suelo, por ende también es necesario obtener un valor de CN ponderado el cual actuará en

los posteriores cálculos como el único CN de la cuenca, en este caso CN ponderado se obtendría de la siguiente forma:

$$CN_{pond} = \frac{(\%cubierta \text{ o uso } CN)}{/100}$$

3.1.7. Limitaciones y deficiencias del método

El método fue en origen desarrollado utilizando datos regionales estadounidenses, por lo que es necesario de estudios locales para ser aplicable a otro país para poder adaptar las tablas de CN.

Los números de curva representan una condición media de los registros efectuados y tienen su máximo potencial de aplicación para tormentas de diseño. Si la tormenta es real la precisión del método disminuye.

El método propone una relación entre perdidas iniciales y almacenamiento potencial de 20% esto se traduce en las fórmulas como $Po = 0,2S$ sin embargo estudios demuestran variaciones a este valor entre 0S y 0,3S por lo tanto es necesario introducir variaciones respecto al cálculo.

El método funciona bien en cuencas agrícolas y urbanas, pero suele ser mediocre para en pastizales y zonas forestales.

No se recomienda su uso en cuencas mayores a 25000 hectáreas, puesto a que esto por lo general supone una gran variación en las áreas de una cuenca o la precisión del método se reduce.

Si el área de estudio es muy heterogénea (áreas que no tienen ninguna semejanza entre sí) el cálculo de CN_{pond} será muy poco satisfactorio ya que distara de la realidad del terreno.

EJERCICIOS

Ejercicio 1. Se tiene un terreno con alto contenido de arcillas, dicho terreno es un prado cubierto de heno, se desea evaluar el evento de la tormenta (A) la cual tuvo una duración de 9 horas, antes de dicha tormenta ocurrió una lluvia durante un periodo seco la cual produjo un máximo de 38 mm de precipitación, los datos de precipitación obtenidos en dicha tormenta son los siguientes:

Horas	Precipitacion
1	12
2	6
3	24
4	39
5	30
6	20
7	16
8	10
9	4

Se pide: Esguurrimiento neto, esguurrimiento neto por hora y coeficiente de esguurréntía por hora.

Resolución:

En base a los datos del ejercicio tenemos que:

Tipo de suelo: El suelo posee alto contenido de arcillas, lo cual según la tabla 4 lo convierte en un suelo tipo C.

Tabla de CN o Po a usar: La cobertura del terreno es un prado cubierto de heno, esto nos colocaría en la tabla 3 y por efecto del paso 1 tenemos que el suelo es tipo C, por lo tanto su CN = 71.

Verificaciones de correcciones: Como se puede apreciar en el enunciado solo tenemos 1 tipo de cubierta, por ende no se necesita conseguir CN_{pond}, tampoco se necesitaría corregir el CN ya que antes del evento ocurrió un aguacero de 38mm lo cual nos indica que es un periodo seco con condición previa normal.

Cálculos posteriores: una vez establecidas todas las consideraciones se procede a calcular paso a paso lo que se pide en el ejercicio.

Primero se calculara la retención máxima superficial S ya que se está trabajando con el CN

$$S = \frac{25400}{71} - 254$$

Se procederá a llenar la siguiente tabla:

Horas	P			Pn	C
1	12	12			
2	6	18			
3	24	42			
4	39	81			
5	30	111			
6	20	131			
7	16	147			
8	10	157			
9	4	161			

Donde es la suma de los totales de las precipitaciones

$$P_n = \frac{(P - P_0)^2}{(P + 4P_0)}$$

$$P_n = P_n (\text{hora actual}) - P_n (\text{hora anterior})$$

$$C = \frac{P_n}{P}$$

Para la primera hora

$$P_n = \frac{(12 - 0,20 - 104)^2}{(12 + 0,8 - 104)}$$

12 es menor que $0,2 \cdot 104$ se asume $=0$

Para la segunda hora

$$P_n = \frac{(18 - 0,20 - 104)^2}{(18 + 0,8 - 104)}$$

18 es menor que $0,2 \cdot 104$ se asume $=0$

Para la tercera hora

$$P_n = \frac{(42 - 0,20 - 104)^2}{(42 + 0,8 - 104)}$$

$$= 3,59 \text{ mm}$$

Para la cuarta hora

$$P_n = \frac{(81 \quad 0,20 \quad 104)^2}{(81 + 0,8 \quad 104)}$$

$$= 22,07 \text{ mm}$$

Y así sucesivamente hasta terminar la tabla

Horas	Precipitacion	ΣP	ΣP_n	P_n	C
1	12	12	0,00	0,00	0,00
2	6	18	0,00	0,00	0,00
3	24	42	3,59	3,59	0,15
4	39	81	22,07	18,48	0,47
5	30	111	41,90	19,82	0,66
6	20	131	56,69	14,80	0,74
7	16	147	69,19	12,49	0,78
8	10	157	77,23	8,04	0,80
9	4	161	80,49	3,26	0,82

Escurrimiento neto = 80,49mm

Escurrimiento neto por hora (columna 5)

Coefficiente de escorrentía por hora (columna 6)

Ejercicio 2. Se tiene un terreno de 5000ha el cual está compuesto de:

1850ha de cultivo agrícola sin terrazas de las cuales 647,5 tienen suelo tipo A y 1202,5ha de suelo tipo D, 2400ha de bosques pobres de las cuales 1200ha son tipo A y 1200ha tipo B y 750ha de calles y caminos con tierra tipo A.

Se pide determinar el CN_{pond}

Resolución:

Establecer los CN a usar: De la tabla 2 obtenemos los CN

Descripción Del Uso De La Tierra	Numero De Curva Para El Tipo De Suelo			
	A	B	C	D
Estacionamientos Pavimentados, Techos, Entradas	98	98	98	98
Calles y Caminos Pavimentados Con Bordillos y Alcantarillas	98	98	98	98
Calles y Caminos Con Grava	76	85	89	91
Calles y Caminos Con Tierra	72	82	87	89
Cultivado (Cultivo Agrícola) Sin Tratamiento De Conservacion (Sin Terrazas)	72	81	88	91
Cultivado (Cultivo Agrícola) Con Tratamiento De Conservacion (Terrazas y Contornos)	62	71	78	81
Pastos o Terras a Distancia Pobres (<50% Cubierta Del Suelo o Muy Adornada)	68	79	86	89
Pastos o Terras a Distancia Buena (50-75% Cubierta Del Suelo, No Muy Adornada)	39	61	74	80
Pradera (Hierba, Sin Pastoreo, Cortada Para Heno)	30	58	71	78
Cepiño (Buena, >75% Cubierta Del Suelo)	30	48	65	73
Maderas y Bosques (Pobres, Destruídos Por Sobrepastoreo o Quemados)	45	66	77	83

Determinar los porcentajes de área

$$\% \text{ área cultivo agrícola sin terrazas tipo A} = (647,5/5000)*100$$

$$\% \text{ área cultivo agrícola sin terrazas tipo A} = 12,95\% \quad \text{CN} = 72$$

$$\% \text{ área cultivo agrícola sin terrazas tipo D} = (1202,5/5000)*100$$

$$\% \text{ área cultivo agrícola sin terrazas tipo A} = 24,05\% \quad \text{CN} = 91$$

$$\% \text{ área bosques pobres tipo A} = (1200/5000)*100$$

$$\% \text{ área bosques pobres tipo A} = 24\% \quad \text{CN} = 45$$

$$\% \text{ área bosques pobres tipo B} = (1200/5000)*100$$

$$\% \text{ área bosques pobres tipo B} = 24\% \quad \text{CN} = 66$$

$$\% \text{ área calles y caminos con tierra tipo A} = (750/5000)*100$$

$$\% \text{ área calles y caminos con tierra tipo A} = 15\% \quad \text{CN} = 72$$

Cálculo del CN_{pond}: aplicamos la formula de CN_{pond}

$$\text{CN}_{\text{pond}} = [(12,95*72) + (24,05*91) + (24*45) + (24*66) + (15*72)] / 100$$

$$\text{CN}_{\text{pond}} = 68,6495$$

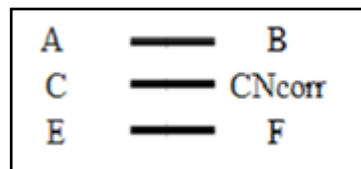
Ejercicio 3. Con el dato de CN_{pond} del ejercicio anterior obtenga las correcciones para los casos de condición previa de sequia y condición previa de lluvia intensa interpolando y por formulas.

Resolución:

Verificación de las correcciones pedidas: se pide en este caso del ejercicio las 2 formas de correcciones y los 2 métodos, significa que se debe encontrar CN(A) y CN(B) por los dos métodos.

Determinaciones por interpolación: se procede a usar la tabla 5 tomando en cuenta nuestro valor de CN = 68,6495 se hallaran los valores CN por defecto y exceso más cercanos a él, en este caso serán 60 y 70 respectivamente

CN (Tablas)	CN con correccion A	CN con correccion B
0	0	0
10	4	22
20	9	37
30	15	50
40	22	60
50	31	70
60	40	78
70	51	85
80	53	91
90	78	96
100	100	100



$$CN_{corr} = F + \frac{(B \quad F) \quad (C \quad E)}{(A \quad E)}$$

Para CN(A)

A = 60, B = 40, C = 68,6495, E = 70 y F = 51

$$CN(A) = 51 + \frac{(40 \quad 51) \quad (68,6495 \quad 70)}{(60 \quad 70)}$$

CN(A) = 49,51445

Para CN(B)

A = 60, B = 78, C = 68,6495, E = 70 y F = 85

$$CN(A) = 85 + \frac{(78 \quad 85) \quad (68,6495 \quad 70)}{(60 \quad 70)}$$

CN(B) = 84,05465

Determinaciones por formulas: se procede a usar las formulas tomando en cuenta nuestro valor de CN =68,6495

$$CN(A) = \frac{4,2 \quad 68,6495}{10 \quad (0,058 \quad 68,6495)}$$

CN(A) = 47,90823813

$$CN(B) = \frac{23 \cdot 68,6495}{10 + (0,13 \cdot 68,6495)}$$

$$CN(B) = 83,43385153$$

Ejercicio 4. Se tiene una zona urbana de 8650m² la cual está compuesta de la siguiente manera:

Áreas Residenciales 1500m ² Suelo Tipo A
Áreas Residenciales 1500m ² Suelo Tipo B
Distritos Comerciales 2500m ² Suelo Tipo A
Distritos Industriales 2100m ² Suelo Tipo C
Espacios Abiertos con 80% de Grama 850 m ² Suelo Tipo C
Calles y Caminos Pavimentados Con Bordillos y Alcantarillas 200 m ² Suelo Tipo A

Se cuenta también con la información de la última tormenta:

Horas	Precipitación
1	16
2	12
3	32
4	40
5	20
6	10
7	15
8	8
9	7
10	2
11	1

Se sabe además que la zona está en un periodo seco en el cual en la última lluvia se produjo una precipitación total de 56mm.

Se pide: Esguerrimiento neto, esguerrimiento neto por hora y coeficiente de esguerruía por hora.

Resolución:

Establecer los CN a usar: De la tabla 2 obtenemos los CN (se simplifica la tabla para colocar solo lo que el ejercicio nos pide)

Descripción Del Uso De La Tierra	Numero De Curva Para El Tipo De Suelo			
	A	B	C	D
Estacionamientos Pavimentados, Techos, Entradas	98	98	98	98
Calles y Caminos Pavimentados Con Bordillos y Alcantarillas	98	98	98	98
Espacios Abiertos (Céspedes,Parques,Campos De Golf,Cementerios,Entre Otros) (Justa, La Grana Cubre 50-75% Del Area)	49	69	79	84
Espacios Abiertos (Céspedes,Parques,Campos De Golf,Cementerios,Entre Otros) (Buena, La Grana Cubre >75% Del Area)	39	61	74	80
Distritos Comerciales y De Negocios (85% Impermeables)	89	92	94	95
Distritos Industriales (72% Impermeables)	81	88	91	93
Áreas Residenciales (505.857 m2,Aproximadamente 65% Impermeables)	77	85	90	92
Áreas Residenciales (1011.71 m2,Aproximadamente 38% Impermeables)	61	75	83	87
Áreas Residenciales (2023.43 m2,Aproximadamente 25% Impermeables)	54	70	80	85
Áreas Residenciales (4046.86 m2,Aproximadamente 20% Impermeables)	51	68	79	84

Determinar los porcentajes de área

% Área Residenciales tipo A = $(1500/8650)*100$

% Área Residenciales tipo A = 17,34% CN = 54

% Área Residenciales tipo B = $(1500/8650)*100$

% Área Residenciales tipo B = 17,34% CN = 70

% Área Distritos Comerciales tipo A = $(2500/8650)*100$

% Área Distritos Comerciales tipo A = 28,90% CN = 89

% Área Distritos Industriales tipo C = $(2100/8650)*100$

% Área Distritos Industriales tipo C = 24,28% CN = 91

% Área Espacios Abiertos tipo C = $(850/8650)*100$

% Área Espacios Abiertos tipo C = 9,83% CN = 74

% Área Calles y Caminos Pavimentados con Bordillo tipo A = $(200/8650)*100$

% Área Calles y Caminos Pavimentados con Bordillo tipo A = 2,31% CN =98

Cálculo del CNpond: aplicamos la formula de CNpond

$$\text{CNpond} = [(17,34*54) + (17,34*70) + (28,90*89) + (24,28*91) + (9,83*74) + (2,31*98)] / 100$$

$$\text{CNpond} = 78,8554 \quad 78,86$$

Corrección del CN: Ya que se tiene como dato que se está en un periodo seco y la ultima precipitación anterior al evento fue de 56mm se sabe que la corrección se hará para CN(B) (condición previa de lluvia intensa) se procede a usar las formulas tomando en cuenta nuestro valor de CN =78,8554

$$\text{CN(B)} = \frac{23 \quad 78,86}{10 + (0,13 \quad 78,86)}$$

$$\text{CN(B)} = 89,56$$

Cálculos posteriores: una vez establecidas todas las consideraciones se procede a calcular paso a paso lo que se pide en el ejercicio.

Primero se calculara la retención máxima superficial S ya que se está trabajando con el CN

$$S = \frac{25400}{89,56} - 254$$

En este ejercicio en los cálculos de $0,20S$ en ningún momento $0,20S$ llega a ser mayor que la Precipitación acumulada en ninguna de las horas iniciales, por lo tanto se construye la tabla sin tomar en ningún punto de la tabla un valor $P_n = 0$.

Se aplica la formula $C = \frac{P_n}{\sum P_n}$, el cálculo de P_n y C para cada hora.

Horas	Precipitación	$\sum P$	$\sum P_n$	P_n	C
1	16	16	2,56	2,56	0,16
2	12	28	9,43	6,87	0,57
3	32	60	34,94	25,51	0,80
4	40	100	71,56	36,61	0,92
5	20	120	90,57	19,01	0,95
6	10	130	100,17	9,60	0,96
7	15	145	114,67	14,49	0,97
8	8	153	122,43	7,76	0,97
9	7	160	129,24	6,81	0,97
10	2	162	131,19	1,95	0,97
11	1	163	132,16	0,97	0,97

EJERCICIOS PROPUESTOS

Ejercicio 1. La cuenca A se encuentra compuesta de la siguiente forma:

Barbecho con pendiente 2,65% 1200ha Suelo tipo A
Barbecho "R" con pendiente 10,12% 550ha Suelo tipo D
Cultivos en hilera con pendiente 1,58% 650ha Suelo tipo C
Praderas con pendiente 5% condicion regular 900ha Suelo tipo C
Praderas con pendiente 2% condicion buena 450ha Suelo tipo B
Praderas con pendiente 2% condicion mala 300ha Suelo tipo B
Praderas con pendiente 9% condicion muy buena 900ha Suelo tipo A
Plantacion regular con pendiente 3% 650ha Suelo tipo C

Determinar: CN y Umbral de escorrentía (Po).

Ejercicio 2. Se produjo un evento de lluvia el cual arrojó los siguientes datos:

Horas	Precipitación	Horas	Precipitación
1	1	12	31
2	3	13	12
3	5	14	10
4	8	15	9
5	9	16	8
6	15	17	1
7	20	18	0
8	33	19	15
9	29	20	4
10	25	21	2
11	40	22	1

Si el Umbral de escorrentía es 35mm

Determinar: Ecurrimiento neto, escurrimiento neto por hora, coeficiente de escorrentía por hora, ¿a partir de qué hora se empieza a producir escurrimiento neto?, ¿a qué hora el escurrimiento neto es mayor?, ¿en qué hora el coeficiente de escorrentía es de 50%?.

Ejercicio 3. Si en una cuenta se obtuvo un CN = 65,12

Si las condiciones aplican, determinar: CN para periodo húmedo con precipitación de 32mm, CN para periodo seco con precipitación de 30mm, CN para periodo húmedo con precipitación de 25mm y CN para periodo seco con precipitación de 10mm. Utilizando ambos métodos.

Ejercicio 4. Para las cuencas A, B, C y D diga teóricamente en cuales de ellas el método del SCS presenta deficiencias y mencione él porque:

Cuenca A
Masas Forestales Claras 3500ha
Masas Forestales Espesas 2800 ha
Praderas con pendiente <3% Media 2000ha

Cuenca B
Maderas y Bosques (Buenos, Sin Pastoreo)
Calles y Caminos Pavimentados Con Bordillos y Alcantarillas
Distritos Industriales (72% Impermeables)
Cultivado (Cultivo Agrícola) (Sin Terrazas)

Cuenca C
Pastos o Terras a Distancia Pobres 35% Cubierta Del Suelo
Cultivado (Cultivo Agrícola) Con Tratamiento De Conservacion
Pradera (Hierba, Sin Pastoreo, Cortada Para Heno)
Cultivado (Cultivo Agrícola) (Sin Terrazas)
Calles y Caminos Con Tierra
Espacios Abiertos con 55% de Grama

Cuenca D
Prado 5000ha
Humedales Leñosos 3200ha
Espacios Abiertos 4000ha
Barbecho - Suelo Desnudo 2900 ha
Bosques (Buena) 7000ha
Cultivos En Hileras 3500ha

Ejercicio 5. Se tiene una cuenca con las siguientes características:

20 % Humedales Herbáceos Emergentes Tipo A
16% Arbusto / Matorral Tipo C
8,5 % Tierra Estéril Tipo A
25% Comercio y Negocios Tipo D
19,5 % Residencial - 505.857 m2 Tipo B
11% Espacio Abierto Tipo B

Y el siguiente evento de tormenta:

Horas	Precipitación	Horas	Precipitación
1	7	7	23
2	15	8	20
3	22	9	17
4	28	10	14
5	32	11	18
6	45	12	9

Además de sabe que la cuenca esta en temporada de sequia y la ultima precipitación anterior al evento fue de 12mm.

Determine: CN_{pond} , CN corregido, P_o , Esguerrimiento neto, esguerrimiento neto por hora, coeficiente de esguerrentía por hora.

3.2. HIDROGRAMAS TRIANGULARES

3.2.1. Introducción

No en todas las cuencas se podrá contar con un registro de datos, por ende algunos métodos no podrán ser empleados, para esos casos se comenzó a implementar el uso de hidrogramas unitarios a partir de relaciones empíricas entre las características físicas de las cuencas.

3.2.2. Descripción

En este método se considera que el hidrograma puede ser representado por un triangulo en el cual son representados tanto el caudal pico como el tiempo que se tarda en llegar a producir ese caudal, y el resto será un tiempo base o de recesión.

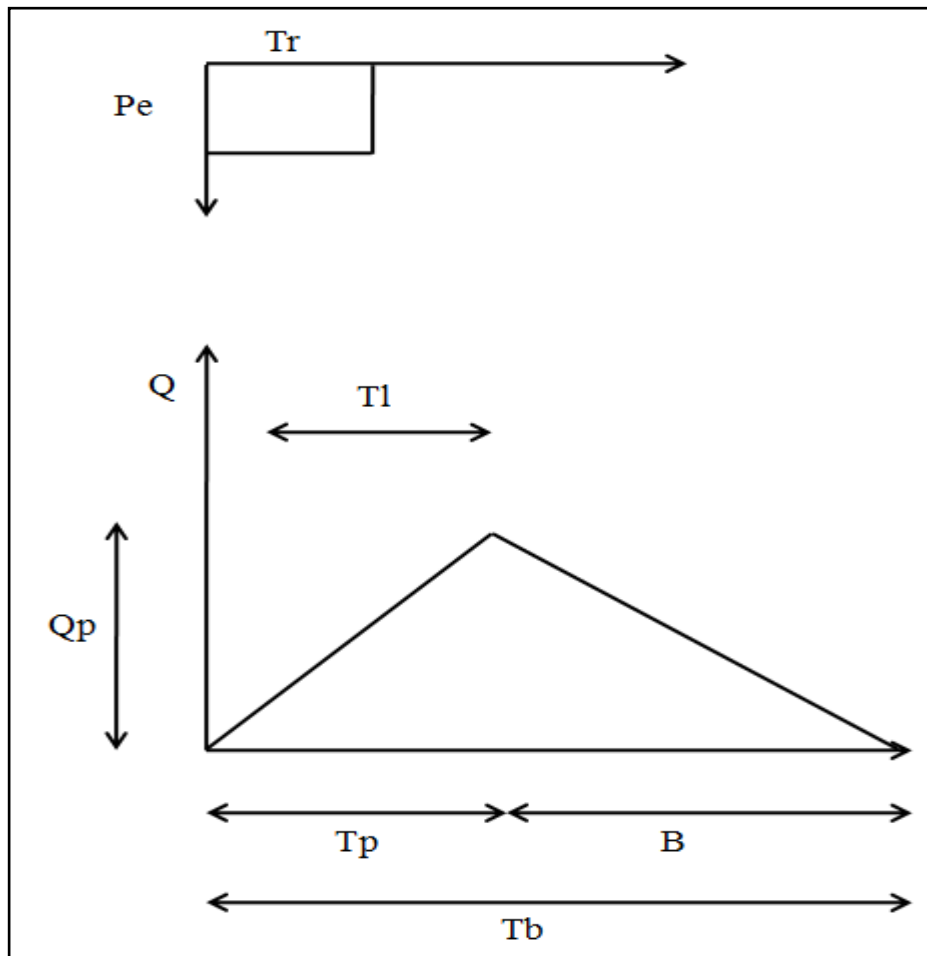


Figura 1. Hidrograma de forma triangular

De un gran número de hidrogramas se obtuvo que:

$$B = 1,67 \quad T_p$$

De donde:

$$T_b = T_p + B$$

$$T_b = 2,67 \quad T_p$$

De acuerdo a estas relaciones se tiene que el caudal pico para un volumen de un milímetro de escorrentía directa será:

$$Q_p = 2,081 \quad 10^{-7} \quad \frac{A}{T_p}$$

Donde:

Q_p = Caudal pico (m³/s).

T_p = Tiempo al pico (hrs).

A = Área de la cuenca (m²).

$$T_l = 0,6 T_c$$

$$T_p = T_l + \frac{T_r}{2}$$

T_l = Tiempo de retardo (hrs).

T_c = Tiempo de concentración (hrs).

T_r = Tiempo real de la precipitación (hrs).

$$T_c = 0,9545 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

T_l = Longitud del cauce principal (Km).

T_c = Diferencia de elevación entre el punto más remoto y la salida de la cuenca (mts).

A su vez el volumen de escorrentía será calculado de la siguiente forma:

$$V = \frac{Q_p T_b}{2}$$

EJERCICIO

Se determinara el hidrograma unitario de una hora para la cuenca del rio Chama en el Vigía, en donde se conocen:

Área = 2752 km

L = 126 km

H = 3750 mts

T_r = 1 Hora

Cálculo del tiempo de concentración:

$$T_c = 0,9545 \left(\frac{126^3}{3750} \right)^{0,385}$$

$$T_c = 10,70 \text{ hrs}$$

Cálculo del tiempo de retardo:

$$Tl = 0,6 \quad 10,70$$

$$Tl = 6,42 \text{ hrs}$$

Cálculo del tiempo al pico:

$$Tp = 6,42 + \frac{1}{2}$$

$$Tp = 6,92 \text{ hrs}$$

Cálculo del tiempo base:

$$Tb = 2,67 \quad 6,92$$

$$Tb = 18,4764 \text{ hrs}$$

Cálculo del caudal pico:

$$Qp = 2,081 \quad 10^{-7} \quad \frac{2752 \quad 10^6 \text{m}^2}{6,94}$$

$$Qp = 82,52 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

Cálculo del volumen:

$$V = \frac{82,52 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (18,4764 \quad 3600) \text{seg}}{2}$$

$$V = 2744410,55 \text{m}^3$$

EJERCICIO PROPUESTO

Determinar el hidrograma unitario y el volumen total para una cuenca con las siguientes características:

$$\text{Área} = 4200 \text{km}^2$$

$$L = 189 \text{km}$$

$$H = 1940 \text{ mts}$$

$$Tr = 2 \text{ Horas}$$

CAPÍTULO IV

MÉTODO DE CLARK

4.1. Introducción

El cálculo del caudal que llega a la sección de un cauce como resultado de los volúmenes de escorrentía generados en una cuenca durante una precipitación con características determinadas, ha sido uno de los retos de los hidrólogos e ingenieros. Esto ha generado la necesidad de metodologías que permitan relacionar las características de la precipitación con la respuesta de la cuenca. Para entender algunos de estos métodos es necesario revisar los conceptos de hidrograma y el de hidrograma unitario.

4.2. Hidrograma

Se le llama hidrograma a cualquier gráfico que relacione alguna propiedad del flujo de agua de un cauce con el tiempo, por ejemplo la variación del caudal de un río con el tiempo.

El hidrograma es de gran utilidad porque muestra el efecto integral de las características físicas y climáticas que gobiernan las relaciones entre precipitación y escorrentía en una cuenca dada.

El hidrograma representa la distribución de la escorrentía total que pasa por una determinada estación de aforos del río. Se sabe que en un momento dado la escorrentía total se compone de una escorrentía directa, una escorrentía subsuperficial y una escorrentía subterránea.

4.3. Hidrograma Unitario

El método del hidrograma unitario es uno de los más utilizados en hidrología para la determinación del caudal producido por una precipitación en una determinada cuenca hidrográfica.

Dicho método es uno de los más empleados ya que su estudio y aplicación no presenta límites en cuanto a las condiciones de: área de la cuenca, tipo de suelo, pendiente, cobertura vegetal, variaciones en las intensidades de lluvia, entre otros.

El único detalle de este método es que al obtener un hidrograma unitario se asume que todas las precipitaciones posteriores se comportaran de la misma manera, es decir, el hidrograma representará los eventos posibles de precipitación.

Si fuera posible que se produjeran dos lluvias idénticas sobre una cuenca hidrográfica cuyas condiciones antes de la precipitación también fueran idénticas, sería de esperarse que los hidrogramas correspondientes a las dos lluvias también fueran iguales. Esta es la base del concepto de hidrograma unitario. En la realidad es muy difícil que ocurran lluvias idénticas, estas pueden variar su duración, el volumen precipitado, su distribución espacial y su intensidad.

a) Descripción de las variables

Para poder conocer los hidrogramas de manera más sencilla es necesario conocer las variables que influyen en el cálculo.

Un hidrograma unitario generalmente se representa con una grafica la cual generalmente es representada de la siguiente forma:

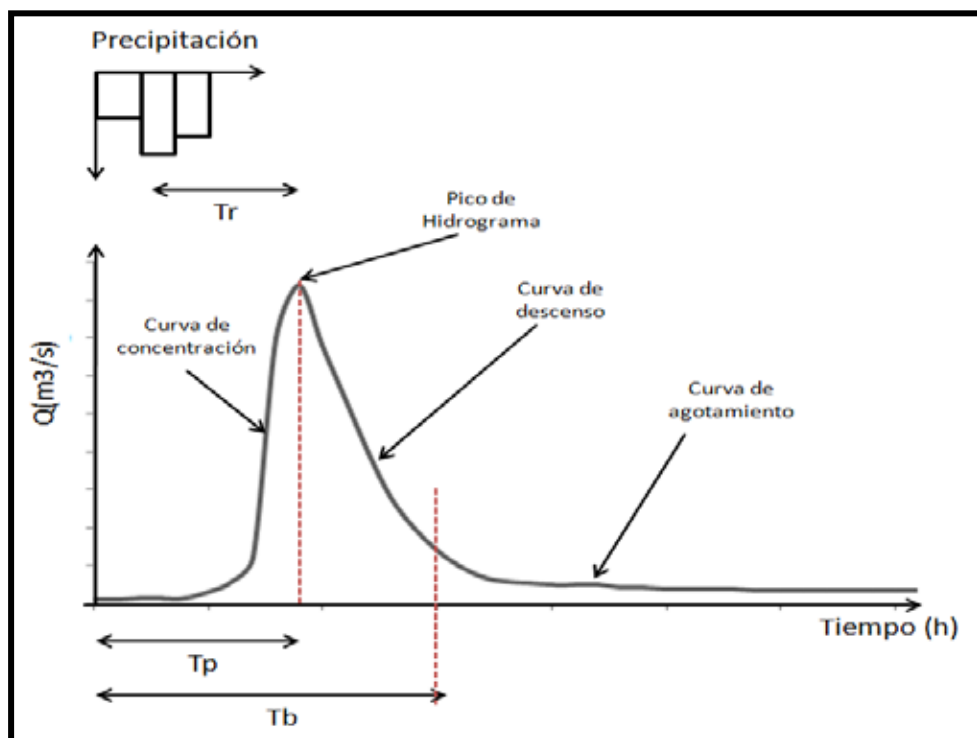


Figura 1. Hidrograma unitario

Donde:

Tiempo de pico (T_p): Es el tiempo que transcurre desde el inicio del escurrimiento directo hasta el pico del hidrograma

Tiempo base (T_b): Es el intervalo entre el comienzo y el fin de la esorrentía directa.

Tiempo de retardo (T_r): Es el intervalo de tiempo comprendido entre los instantes que corresponden al centro de gravedad del hietograma de la tormenta y el centro de gravedad del hidrograma.

b) Estimación del caudal base

El caudal base es el caudal transportado por un cauce cuando ha transcurrido el tiempo suficiente desde la última precipitación como para que no exista esorrentía directa superficial.

El importante estimar el caudal base, ya que para calcular el hidrograma unitario se debe conocer el caudal directo, el cual es la diferencia entre el caudal total y el caudal base.

Lo primero que se debe conocer para estimar el caudal base va a ser la ubicación del inicio de la curva de agotamiento.

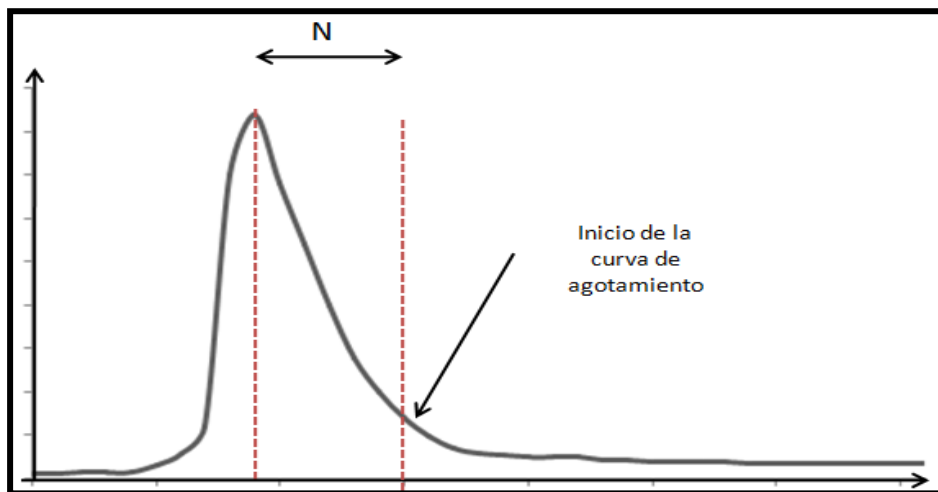


Figura 2. Factor N

El factor N será calculado con la siguiente fórmula empírica:

$$N = 0,827 A^{0,2}$$

Donde:

N = Tiempo (días).

A = área de la cuenca (Km^2).

Luego de haber obtenido el factor N , se procede a estimar el caudal base por alguno de los siguientes métodos:

Método 1.

En este método el caudal base se estima con 2 rectas:

La primera siendo una recta paralela al inicio de la curva de concentración, que se extiende hasta el centro de gravedad del hidrograma.

La segunda recta inicia en el centro de gravedad y termina en el punto de inicio de la curva de agotamiento.

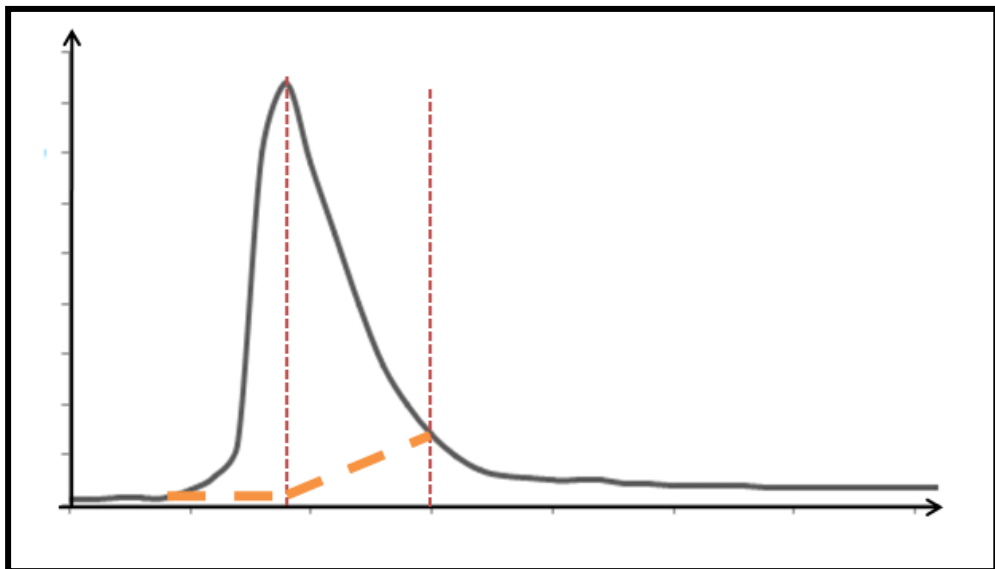


Figura 3. Método 1 de estimación del caudal base

Método 2.

En este método simplemente se traza una recta desde el inicio de la curva de concentración hasta el inicio de la curva de agotamiento.

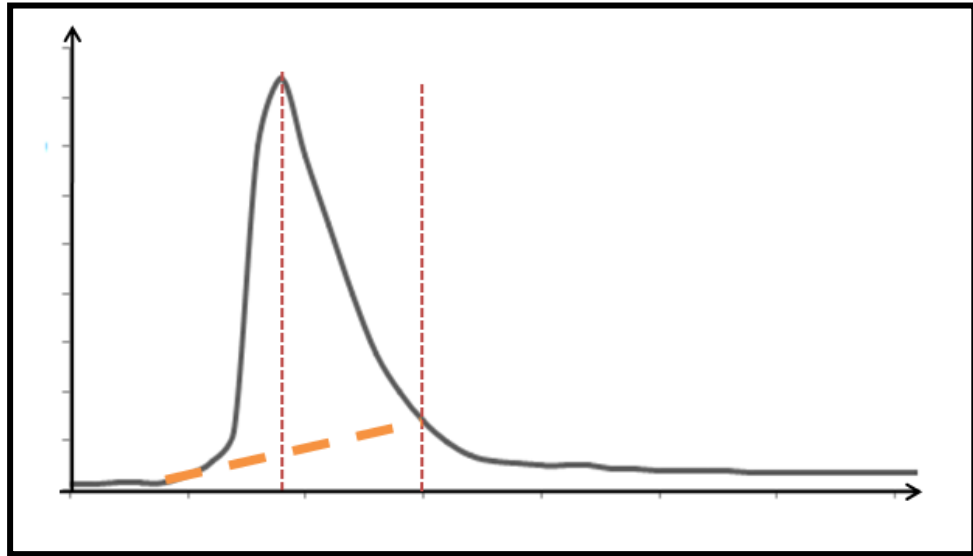


Figura 4. Método 2 de estimación del caudal base

c) Cálculo del volumen de la escorrentía directa y la lámina efectiva caída.

Es necesario conocer la precipitación efectiva puesto que en el método del hidrograma va a ser un valor fundamental para conseguir un valor de precipitación efectiva neta para estimar directamente el hidrograma unitario.

El volumen será calculado de la siguiente manera:

$$Ved = \sum_{i=0}^n Qd_i \quad t$$

Donde:

Qd = Caudal directo de escorrentía (m³/s).

t = Diferencia de tiempo (seg).

A su vez la lámina efectiva caída será:

$$Pe = \frac{Ved}{A \cdot 10^6 \left(\frac{m^2}{km^2}\right)} \cdot \frac{1000mm}{1m}$$

Donde:

Ved = volumen de escorrentía directa (m³).

A = Área de la cuenca (km²).

2. Se calcula en volumen de escorrentía directa y se determina la precipitación efectiva.
3. De la definición del hidrograma unitario, la ordenada Q_n del hidrograma de escorrentía directa para cualquier tiempo será:

$$Q_n = \sum_{i=0}^n P_i U_{n+1-i}$$

Donde:

Q_n = Ordenada del hidrograma de escorrentía directa.

P = Precipitación efectiva.

U = Ordenada del hidrograma unitario.

El esquema del método será de la siguiente forma:

Tiempo (horas)	Ordenada (n)	$P_1 \cdot U_n$	$P_2 \cdot U_{n-1}$	$P_i \cdot U_{n-(i-1)}$	Q_d (m ³ /s)	H.U (m ³ /s/mm)

Tabla 2. Tabla de cálculo para la obtención del hidrograma unitario a partir de tormentas complejas.

Tomando en cuenta que el Q_d será calculado de manera normal y el H.U estará basado en las combinaciones de las precipitaciones y las ordenadas.

4.4. Hidrograma unitario de Clark.

Este método fue expuesto por Clark en el año 1945 y es reconocido por casi todos los libros de Hidrología. El método se basa en la distribución de la superficie de la cuenca entre líneas isócronas, para computar el volumen de agua caído sobre cada una de esas superficies y considerar el retardo producido por el tránsito de agua a lo largo de la cuenca.

Este método supone que la cuenca considerada funciona como un depósito. Un aumento del caudal de entrada de un depósito o embalse se refleja en el caudal de salida amortiguado y retardado.

a) Formulas del método.

Una forma de considerar este método es considerar un depósito lineal, esto significa que existe una relación lineal entre el volumen almacenado en el depósito y el caudal de salida

$$Q_i = \frac{I_{i-1} + I_i}{2} C + Q_{i-1} \quad (1 \quad C)$$

$$C = \frac{2 \quad t}{2R + t}$$

$$R = 0,75 \quad T_c$$

$$HUI = Q_i$$

$$HUI_{\text{desplazado}} = HUI_{i+1}$$

$$HU = \frac{HUI + HUI_{\text{desplazado}}}{2}$$

$$\text{Vol (m}^3\text{)} = \text{Area (km}^2\text{)} \quad 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{km}^2} \quad 10^{-3} \text{m}$$

$$I_i = \frac{\text{Vol (m}^3\text{)}}{t \text{ (s)}}$$

Donde

I_i = Caudal de entrada en el intervalo (m³/s).

I_{i-1} = Caudal de entrada en el intervalo anterior (m³/s).

Q_i = Caudal de salida en el intervalo (m³/s).

Q_{i-1} = Caudal de salida en el intervalo anterior (m³/s).

t = Diferencia de tiempo entre intervalos (Horas).

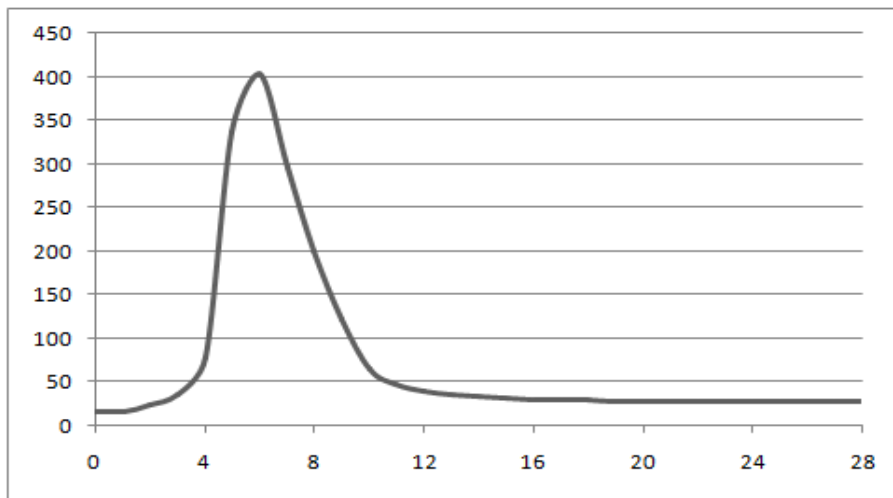
R = Coeficiente de almacenamiento del depósito o embalse (Horas).

T_c = Tiempo de concentración (Horas).

HUI = Hidrograma Unitario Instantáneo.

HUI_{i+1} = Hidrograma Unitario Instantáneo en el intervalo siguiente

Graficar el caudal total:



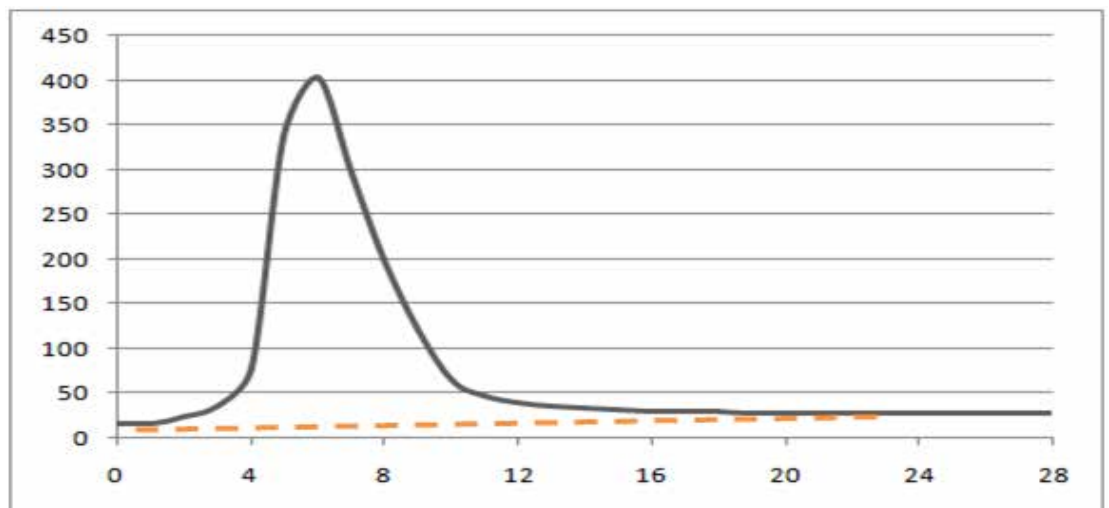
Estimar el caudal base: Utilizar el método 2 para estimar dicho caudal.

Para ello se debe conocer el valor del factor N par saber exactamente donde se encuentra la curva de agotamiento.

$$N = 0,827 \quad 1580^{0,2}$$

$$N = 3,60 \text{ dias} \quad 86,4 \text{ horas}$$

Como el factor N supera por mucho la totalidad de las horas, se tomara la última hora de la data la cual es 28 horas.



De esta manera se puede interceptar la recta del caudal base a cada hora para obtener los valores, quedando como resultado los caudales bases para cada periodo de tiempo:

Tiempo (horas)	Qb (m3/s)	Tiempo (horas)	Qb (m3/s)	Tiempo (horas)	Qb (m3/s)
0	16,9	10	18,2	20	24,96
1	16,9	11	19,5	21	25,35
2	16,9	12	20,54	22	25,74
3	16,9	13	21,06	23	26
4	16,9	14	22,1	24	27,3
5	16,9	15	22,75	25	27,3
6	16,9	16	23,4	26	27,3
7	16,9	17	23,66	27	27,3
8	16,9	18	24,05	28	27,3
9	17,94	19	24,7		

La resta entre los valores de caudal total y caudal base dará como resultado el caudal directo, el cual es el requerido para poder calcular el hidrograma unitario.

Tiempo (horas)	Qd (m3/s)	Tiempo (horas)	Qd (m3/s)	Tiempo (horas)	Qd (m3/s)
0	0	10	46,8	20	3,64
1	0	11	28,6	21	2,6
2	6,5	12	19,76	22	2,21
3	19,5	13	15,34	23	1,3
4	61,1	14	11,7	24	0
5	321,1	15	9,1	25	0
6	386,1	16	7,15	26	0
7	279,5	17	6,24	27	0
8	183,3	18	5,2	28	0
9	104,26	19	3,9		

Cálculo del volumen de escorrentía directa y lamina efectiva caída:

Para calcular el volumen hay que sumar todos los datos de Qd y

$$Ved = 1524,9 \frac{m^3}{s} \cdot 3600s$$

$$Ved = 5489640 m^3$$

$$Pe = \frac{5489640m^3}{1580km^2 \cdot 10^6 \left(\frac{m^2}{km^2}\right)} \cdot \frac{1000mm}{1m}$$

$$Pe = 3,47mm$$

Cálculo de los factores de tanteo y la lluvia efectiva: Tomando como ejemplo la tabla 1 y las fórmulas.

Tiempo (horas)	Precipitación acumulada	Δt (horas)	Δp (horas)
0	0		
		1	5,85
1	5,85		
		1	11,05
2	16,9		
		1	9,36
3	26,26		
		1	6,76
4	33,02		
		1	1,82
5	34,84		

1er tanteo

$$= \frac{34,84 \cdot 3,47}{5}$$

(3,47) es el dato obtenido del paso anterior, (5) es la cantidad de horas

$$= 6,274$$

Tiempo (horas)	Precipitacion acumulada	Δt (horas)	Δp (horas)	1er Tanteo	
				Φ	Pe
0	0				
		1	5,85	6,274	
1	5,85				
		1	11,05	6,274	4,776
2	16,9				
		1	9,36	6,274	3,086
3	26,26				
		1	6,76	6,274	0,486
4	33,02				
		1	1,82	6,274	
5	34,84				
				Total	8,348

$$= \frac{34,84 \quad (3,47 + 1,82 + 5,85)}{3}$$

encuentran por debajo de y (3) es la cantidad de h que

$$= 7,9$$

Tiempo (horas)	Precipitacion acumulada	Δt (horas)	Δp (horas)	1er Tanteo	
				Φ	Pe
0	0				
		1	5,85	7,9	
1	5,85				
		1	11,05	7,9	3,15
2	16,9				
		1	9,36	7,9	1,46
3	26,26				
		1	6,76	7,9	
4	33,02				
		1	1,82	7,9	
5	34,84				
				Total	4,61

por debajo de

$$= \frac{34,84 \quad (3,47 + 1,82 + 5,85 + 6,76)}{2}$$

$$= 8,47$$

Tiempo (horas)	Precipitacion acumulada	Δt (horas)	Δp (horas)	1er Tanteo	
				Φ	P_e
0	0				
		1	5,85	8,47	
1	5,85				
		1	11,05	8,47	2,58
2	16,9				
		1	9,36	8,47	0,89
3	26,26				
		1	6,76	8,47	
4	33,02				
		1	1,82	8,47	
5	34,84				
				Total	3,47

Como se puede observar esta vez, el valor total dio exactamente igual a la lámina efectiva caída y ya no se pueden realizar más tanteos debido a que se

Cálculo del hidrograma unitario: Como paso final se procede a dividir cada uno de los datos de Q_d entre el valor que dio el paso anterior del cálculo de lluvia efectiva = 3,47mm

Tiempo (horas)	Q_d (m ³ /s)	H.U	Tiempo (horas)	Q_d (m ³ /s)	H.U
0	0	0	10	46,8	13,49
1	0	0	11	28,6	8,24
2	6,5	1,87	12	19,76	5,69
3	19,5	5,62	13	15,34	4,42
4	61,1	17,61	14	11,7	3,37
5	321,1	92,54	15	9,1	2,62
6	386,1	111,27	16	7,15	2,06
7	279,5	80,55	17	6,24	1,80
8	183,3	52,82	18	5,2	1,50
9	104,26	30,05	19	3,9	1,12

Tiempo (horas)	Qd (m3/s)	H.U
20	3,64	1,05
21	2,6	0,75
22	2,21	0,64
23	1,3	0,37
24	0	0
25	0	0
26	0	0
27	0	0
28	0	0

Ejercicio 2. Para la siguiente cuenca dividida en isócronas calcular el Hidrograma Unitario de Clark

T (horas)	Área (km2)
0	4
1	10
2	26
3	33
4	36
5	26
6	18
7	15
8	9

Calculo de los volúmenes y caudales de entrada: Como se posee información de la cuenca, se procede a calcular sus respectivos volúmenes y áreas

Para la fila 1:

$$\text{Vol (m}^3\text{)} = 4 \text{ km}^2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{km}^2} \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Vol} = 4000 \text{ m}^3$$

$$I_i = 0$$

$I_i = 0$ ya que no ha transcurrido tiempo.

Para la fila 2:

$$\text{Vol (m}^3\text{)} = 10 \text{ km}^2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{km}^2} \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Vol} = 10000 \text{ m}^3$$

$$I_i = \frac{10000 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}}$$

$$I_i = 2,78 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

T (horas)	Área (km ²)	Vol (m ³) Pneta = 1mm	Q (m ³ /s) Pneta = 1mm
0	4	4000	0
1	10	10000	2,78
2	26	26000	7,22
3	33	33000	9,17
4	36	36000	10,00
5	26	26000	7,22
6	18	18000	5,00
7	15	15000	4,17
8	9	9000	2,50

Calculo de C: Para el método el tiempo de concentración es igual al total de las Horas, en este caso es igual a 8 horas, el factor de Coeficiente de almacenamiento del depósito o embalse será:

$$R = 0,75 T_c$$

$$R = 6 \text{ Horas}$$

Y el valor de C será igual a:

$$C = \frac{2 t}{2R + t}$$

$$C = \frac{2 \cdot 1 \text{ Hora}}{2 \cdot 6 \text{ Horas} + 1 \text{ Hora}}$$

$$C = 0,1538$$

Calculo de los caudales de salida y los Hidrogramas Unitarios: Se aplica la formula de Q_i , se desplazan los valores para los hidrogramas desplazados y se obtienen los Hidrogramas Unitarios.

Para la fila 1:

$$Q_i = \frac{0 + 0}{2} \quad 0,1538 + 0 \quad (1 \quad 0,1538)$$

$$Q_i = 0$$

Para la fila 2:

$$Q_i = \frac{0 + 2,78}{2} \quad 0,1538 + 0 \quad (1 \quad 0,1538)$$

$$Q_i = 0,21$$

Para la fila 3:

$$Q_i = \frac{2,78 + 7,22}{2} \quad 0,1538 + 0,21 \quad (1 \quad 0,1538)$$

$$Q_i = 0,95$$

Para los Hidrogramas Unitarios:

Para la fila 1:

$$HU = \frac{0 + 0,21}{2}$$

Para la fila 2:

$$HU = \frac{0,21 + 0,95}{2}$$

Los cálculos se realizan hasta que los caudales de salida sean aproximados a cero.

T (horas)	Área (km2)	Vol (m3) Pneta = 1mm	Q (m3/s) Pneta = 1mm	HUI (m3/s)	HUIdesplazado (m3/s)	HU (m3/s)
0	4	4000	0	0	0,21	0,11
1	10	10000	2,78	0,21	0,95	0,58
2	26	26000	7,22	0,95	2,06	1,51
3	33	33000	9,17	2,06	3,22	2,64
4	36	36000	10,00	3,22	4,05	3,64
5	26	26000	7,22	4,05	4,37	4,21
6	18	18000	5,00	4,37	4,40	4,38
7	15	15000	4,17	4,40	4,24	4,32
8	9	9000	2,50	4,24	3,78	4,01
9	0	0	0,00	3,78	3,20	3,49
10	0	0	0,00	3,20	2,70	2,95
11	0	0	0,00	2,70	2,29	2,50
12	0	0	0,00	2,29	1,94	2,11
13	0	0	0,00	1,94	1,64	1,79
14	0	0	0,00	1,64	1,39	1,51
15	0	0	0,00	1,39	1,17	1,28
16	0	0	0,00	1,17	0,99	1,08
17	0	0	0,00	0,99	0,84	0,92
18	0	0	0,00	0,84	0,71	0,78
19	0	0	0,00	0,71	0,60	0,66
20	0	0	0,00	0,60	0,51	0,56
21	0	0	0,00	0,51	0,43	0,47
22	0	0	0,00	0,43	0,36	0,40
23	0	0	0,00	0,36	0,31	0,34
24	0	0	0,00	0,31	0,26	0,28
25	0	0	0,00	0,26	0,22	0,24
26	0	0	0,00	0,22	0,19	0,20
27	0	0	0,00	0,19	0,16	0,17
28	0	0	0,00	0,16	0,13	0,15
29	0	0	0,00	0,13	0,11	0,12
30	0	0	0,00	0,11	0,10	0,10
31	0	0	0,00	0,10	0,08	0,09
32	0	0	0,00	0,08	0,07	0,07
33	0	0	0,00	0,07	0,06	0,06
34	0	0	0,00	0,06	0,05	0,05
35	0	0	0,00	0,05	0,04	0,05
36	0	0	0,00	0,04	0,04	0,04
37	0	0	0,00	0,04	0,03	0,03
38	0	0	0,00	0,03	0,03	0,03
39	0	0	0,00	0,03	0,02	0,02
40	0	0	0,00	0,02	0,02	0,02
41	0	0	0,00	0,02	0,02	0,02
42	0	0	0,00	0,02	0,01	0,01
43	0	0	0,00	0,01	0,01	0,01
44	0	0	0,00	0,01	0,01	0,01
45	0	0	0,00	0,01	0,01	0,01
46	0	0	0,00	0,01	0,01	0,01
47	0	0	0,00	0,01	0,01	0,01
48	0	0	0,00	0,01	0,00	0,01
49	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00

EJERCICIOS PROPUESTOS

Ejercicio 1. Obtener el Hidrograma Unitario para una cuenca de 2050 km², se cuenta con la siguiente data.

Tiempo (horas)	Qt (m ³ /s)	Tiempo (horas)	Qt (m ³ /s)	Tiempo (horas)	Qt (m ³ /s)
0	15	11	156	22	29
1	15,5	12	148	23	29
2	16	13	122	24	28
3	18	14	94	25	27,5
4	29	15	78	26	26
5	36	16	65	27	24
6	53	17	59	28	24
7	189	18	55	29	23
8	241	19	42	30	22
9	201	20	31	31	22
10	178	21	30	32	22

Tiempo (horas)	P (mm)
0	0
1	4
2	8,5
3	5,5
4	8
5	7
6	2

Ejercicio 2. Obtener el Hidrograma Unitario de Clark para una cuenca a la cual su área, calculada por isócronas quedo de la siguiente manera:

T (horas)	Área (km ²)
0	6,5
1	12
2	32
3	48
4	63
5	34
6	25
7	12
8	5
9	2

CAPÍTULO V

MÉTODOS DE SIMULACION

5.1. Introducción

Los métodos de simulación corresponden a esquemas más complejos y uso de programas de computadora capaces de estimar de manera más precisa toda la información de una cuenca, dichos métodos consisten en la implementación de simulaciones por computadora las cuales emplean el uso de modelos matemáticos para estimaciones de muchos sistemas naturales, la simulación por computadora se desarrolló de la mano con el rápido crecimiento de la computadora, luego de su primer despliegue a gran escala durante el Proyecto Manhattan en la Segunda Guerra Mundial para modelar el proceso de detonación nuclear. Fue una simulación de 12 esferas duras usando un algoritmo de Monte Carlo. La simulación por computadora a menudo se usa como un complemento o sustituto de los sistemas de modelado para los cuales no son posibles las soluciones analíticas simples de forma cerrada. Hay muchos tipos de simulaciones por computadora; su característica común es el intento de generar una muestra de escenarios representativos para un modelo en el que una enumeración completa de todos los posibles estados del modelo sería prohibitiva o imposible.

Cuando una cantidad de data o factores de un sujeto, evento o ambiente de estudio excede las proporciones consideradas normales, realizar un estudio analítico o matemático de forma manual, requeriría invertir una enorme cantidad de tiempo para analizar, interpretar y estimar el evento de manera precisa, pero esto normalmente sería una forma demasiado compleja de realizar para cualquier persona y esto como consecuencia causaría muchos errores, fallas en la interpretación de la data, pérdida de data, entre otros.

Los requisitos de datos externos de simulaciones y modelos varían ampliamente. Para algunos, la entrada puede ser sólo unos pocos números o datos (por ejemplo, tamaño de la cuenca, intensidad de lluvia y coeficiente de escorrentía), mientras que otros pueden requerir terabytes de información (como

los modelos climáticos, factores influyentes en la cuenca, pérdidas, datas muy grandes de intensidades, cuencas de gran dimensión, múltiples áreas, múltiples pendientes, desastres naturales, desechos humanos, sedimentos, tipos de suelos, usos del suelo, estudios mecánicos del suelo, entre otros). Debido a esta variedad, y debido a que los diversos sistemas de simulación tienen muchos elementos comunes, existe una gran cantidad de lenguajes de simulación especializados.

Los sistemas que aceptan datos de fuentes externas deben tener mucho cuidado al saber lo que están recibiendo. Si bien es fácil para las computadoras leer los valores de texto o archivos binarios, lo que es mucho más difícil es saber cuál es la precisión de los valores. A menudo se expresan como "barras de error", una desviación mínima y máxima del rango de valores dentro del cual se encuentra el valor verdadero. Debido a que las matemáticas de las computadoras digitales no son perfectas, los errores de redondeo y truncamiento multiplican este error, por lo que es útil realizar un "análisis de errores" para confirmar que los valores generados por la simulación seguirán siendo útiles.

5.2. Descripción

En hidrología suele ocurrir que para el estudio de alguna cuenca se tiene una cantidad de información muy extensa como para poder aplicar los métodos tradicionales de cálculo, ya que los métodos tradicionales solamente trabajan con cierto tipo de data de las cuencas, de este exceso de data se suelen generar algunas incógnitas: ¿En que afecta esa data? ¿Cómo podría alterar el estudio? ¿Para qué serviría la data? ¿Cómo la podría aplicar?

Otro problema que se pueda presentar sería si la data abarca una gran cantidad de métodos, para efectos de estimaciones se tuviera que emplear el uso de varios métodos al mismo tiempo lo cual presentaría un gran problema ya que el grado de complejidad se incrementa.

Si la data no es excesiva y se puede llegar a aplicar los métodos tradicionales de cálculo, ¿Qué pasaría si se quisiera estudiar la posible afectación posterior al estudio por algún fenómeno natural?; Normalmente se tienen que evaluar todos los estudios para casos normales o extremos según el cálculo o alguna norma lo requiera, ¿pero esto incluiría algún fenómeno natural?, se podría

evaluar el comportamiento de una cuenca para un evento poco probable (inundaciones, sismos, incendios). Nuevamente se vuelve a preguntar si la data es suficiente o si se tendría que utilizar mucha más data la cual no se empleó para cálculos en condiciones normales, todo eso volvería a implicar un aumento tanto a la cantidad de data a usar como a la complejidad del problema.

5.3. Limitaciones

Los modelos de simulación suponen costos muy elevados para poder usarse, significando así que su uso se limita a todo aquel usuario del sector público o del sector privado con los recursos y materiales suficientes para poder comprarlos y requieren de mucho tiempo para desarrollarse y validarse.

No está permitido realizar cálculos que excedan la capacidad del programa o que supongan el uso de información que los programas no manejen.

Por lo general si el programa o software no es reconocido o no ha sido evaluado no ofrece seguridad, pueden presentar alguna que otra falla al aplicarse o puede arrojar resultados erróneos.

No cualquier persona tiene la capacidad de manejar un programa de simulación, para usarlos es necesario conocer algún operador capaz de manejar el programa de manera correcta, en caso de no conocer algún operador, se requiere por lo general aprender a usar el programa mediante cursos generalmente impartidos por las compañías que desarrollan dichos programas, lo cual supone un costo adicional.

A pesar de ser más eficientes que los métodos tradicionales de cálculo o estimación, esto no garantiza que el evento real ocurra de la misma forma que en las simulaciones.

5.4. Generación de los modelos de simulación

En la generación de un modelo de simulación es necesario enumerar las fases o etapas necesarias para desarrollar una simulación:

- a) **Formulación del problema:** En este paso debe quedar perfectamente establecido el objeto de la simulación. Se debe acordar lo más detalladamente posible: que se espera de la simulación, posibles experimentaciones, disponibilidad de tiempo, tipo de eventos a estudiar,

modelos matemáticos y analíticos aplicables al sistema, las variables, el rango de alcance, los posibles resultados, rango estadístico de errores, complejidad del sistema, para quienes será diseñado el sistema, quien podrá usar el sistema, entre otros.

- b) Definición y formulación del sistema: El sistema deberá estar completamente definido en relación al alcance de la investigación, data y resultados posibles.
- c) Colección de datos: La naturaleza y cantidad de datos necesarios están determinadas por la formulación del problema y del modelo. Los datos pueden ser provistos por registros históricos, experimentos de laboratorios o mediciones realizadas en el sistema real. Los mismos deberán ser procesados adecuadamente para darles el formato exigido por el modelo.
- d) Implementación del modelo en la computadora: El modelo es implementado utilizando algún lenguaje de computación. Existen lenguajes específicos de simulación que facilitan esta tarea; también, existen programas que ya cuentan con modelos implementados para casos especiales.
- e) Verificación: Esta es conocida como la etapa de control de calidad ya que en ella se verifica que no se hayan cometido errores durante el desarrollo del modelo. Para ello se implementa el debugging o mejor conocido como depuración del programa, la cual consiste en eliminar errores o fallas.
- f) Validación: En esta etapa se comprueba la exactitud del modelo desarrollado. Esto se lleva a cabo comparando las predicciones del modelo con: mediciones realizadas en el sistema real, datos históricos o datos de sistemas similares.
- g) Diseño de experimentos: En esta etapa se decide las características de los experimentos a realizar: el tiempo de arranque, el tiempo de simulación y el número de simulaciones.

- h) Experimentación: En esta etapa se pone a prueba el programa para obtener resultados.
- i) Interpretación: Se analiza la sensibilidad del modelo con respecto a los parámetros que tienen asociados la mayor incertidumbre.
- j) Implementación: En esta etapa se define que tipo de usuarios pueden manejar el programa
- k) Documentación: Incluye la elaboración de la documentación técnica y manuales de uso. La documentación técnica debe contar con una descripción detallada del modelo y de los datos; también, se debe incluir la evolución histórica de las distintas etapas del desarrollo. Esta documentación será de utilidad para el posterior perfeccionamiento del simulador.

5.5. Capacidad técnica de quienes generan los modelos:

Desarrollar un modelo computacional no es tarea sencilla, es necesario poder dominar los distintos lenguajes de programación existentes para poder saber programar, pero no sólo se necesita saber dominar dichos lenguajes o escribir códigos, más allá de la habilidad que se tenga al programar, es necesario para un programador tener habilidades sociales ya que la generación de un modelo de simulación no es tarea de una sola persona y es necesario saber comunicarse con el equipo de trabajo, se debe poseer gran capacidad de resolución de problemas ya que la implementación de un nuevo modelo supone salirse de los estándares y esto conlleva a retos.

5.6. Capacidad técnica y tecnológica de los usuarios de dichos modelos

Uno de los requisitos más básicos para poder manejar los modelos de simulación es saber manejar las nuevas tecnologías, ya que generalmente las compañías que desarrollan dichos modelos, con la compra de las licencias de usuario entregan guías en las cuales se explican cómo se deben usar dichos modelos, entender dichas guías normalmente depende de la capacidad de retención de información y capacidad de aprendizaje que posea el usuario, si esto posee alguna dificultad es necesario que el usuario tome cursos en los cuales aprenda a manejar los modelos con mayor facilidad

5.7. Disponibilidad financiera y disponibilidad de tiempo

Para poder poseer un software es necesario saber si hay que comprar una licencia de usuario para poder poseer acceso al programa, de ser necesaria dicha licencia esto supone costos, muchas veces dichos costos suelen ser elevados dependiendo de la calidad del programa, significando que se necesita poseer amplios recursos económicos para poder comprar las licencias de usuario, pero no sólo el costo representa un problema, la disponibilidad de tiempo para aprender a usar el programa, analizarlo y manejarlo no suele ser tarea fácil y esto conlleva a invertir una gran cantidad de tiempo.

5.8. Programas más usados en Hidráulica e Hidrología

Recientemente con el desarrollo de software y la aplicación de algoritmos genéticos, la carrera de ingeniería hidráulica ha tenido un gran avance, permitiendo al ingeniero hidráulico encontrar soluciones que se alejan de las convencionales y que además de resultar viables, son económicamente más aceptables. Así mismo las carreras de ingeniería civil, agrícola, ambiental, de carreteras, sanitaria y otras requieren del estudio de la hidráulica.

El empleo del software hidráulico adecuado al caso que estemos estudiando nos permite reducir los tiempos de resolución de ecuaciones permitiendo destinar más tiempo al diseño y, por tanto, al estudio de alternativas dado que mediante los diferentes tipos de software existentes en la actualidad podemos simular las condiciones de contorno lo más parecido a la realidad variando diversas variables.

El manejo de estos programas nos permite ser más competitivos por la propia velocidad en la obtención de soluciones para un mismo problema, constituyendo uno de los factores a tener en cuenta para la selección de personal en una empresa o incluso para ascender dentro de una. Si bien es cierto, que nos encontramos en el era de la informática con lo que constantemente aparecen nuevos programas con más condicionantes cada uno de ellos y que nos ofrecen más informaciones lo que nos obliga a un constante reciclaje para estar al día no sólo con las normativas, sino con los programas más eficientes para cada caso que van desarrollándose continuamente, o actualizándose.

Una vez dado a conocer la importancia en el uso de dichos programas, se procederá a mencionar algunos de los más usados por ingenieros civiles e hidráulicos.

BOSS DAMBRK

Desarrollado principalmente para simular la rotura de una presa y verificar los daños producidos por la propagación de la onda. Esta aplicación, especificando algunas consideraciones, podría ser válida para la definición de una llanura de inundación. Este es un programa avanzado y fácil de utilizar para el cálculo de cauces en una dimensión.

BOSS DAMBRK TM es un software hidrodinámico de enrutamiento de inundación. El software tiene en cuenta las fallas de la presa y el puente, los efectos de almacenamiento, el flujo del banco de inundación, la atenuación de la onda de inundación y el funcionamiento del yacimiento. BOSS DAMBRK se utiliza para el enrutamiento dinámico de inundaciones, el análisis de seguridad de represas y el análisis y diseño de vertederos de depósitos. BOSS DAMBRK se ejecuta en Windows 2000, XP y Vista. Tanto el sistema métrico como el sistema ingles son compatibles. Las aplicaciones típicas de BOSS DAMBRK incluyen:

- Análisis de falla de ruptura
- Análisis de riesgo de inundación y diseño de mitigación
- Mapeo de inundación por inundación
- Previsión de inundación en tiempo real
- Optimización de la puerta del depósito y las operaciones de la estructura de flujo

Las pantallas de entrada de datos permiten al usuario fácilmente ingresar o cambiar los datos de entrada. Esta interfaz de usuario intuitiva, junto con su motor de base de datos subyacente y sistema experto, permite al usuario definir rápidamente un modelo. Menús, pantallas de ayuda y documentación profesional ayudan al usuario en cada paso en la definición de un modelo.

BOSS DAMBRK muestra más de 30 gráficos diferentes de calidad de presentación, incluyendo un diagrama de condiciones iniciales, mapa de

inundación, parcelas hidrográficas, hidrograma de resumen, parcelas de historia del tiempo y parcelas 3D del valle del río, lo que le permite evaluar rápidamente.

El usuario puede seleccionar cualquiera o todos los gráficos para la salida y dejar que el software imprima los gráficos seleccionados uno tras otro. Los gráficos de análisis previos pueden ser automáticos superpuesto a los gráficos de análisis actuales, lo que permite una comparación fácil de resultados tales como falla de presa versus hidrogramas sin falla. Además, todas las entradas, incluida la sección transversal y geometría, se puede ver gráficamente durante la entrada de datos, lo que permite al usuario examinar rápidamente los datos de modelado para errores de entrada.

BOSS DAMBRK puede analizar hasta 10 estructuras de presas y / o puentes en uno solo análisis. Regímenes de flujo subcríticos, supercríticos y mixtos son compatibles.

Se pueden especificar desarrollos de fallas de canalización o desbordamiento no lineales en una estructura, junto con flujo de turbina constante o dependiente del tiempo y una variedad de vertederos, se pueden analizar las crestas de la presa inclinada y las cubiertas de puentes.

El motor de base de datos BOSS DAMBRK permite que cualquier sección transversal ingresada se use como una plantilla para definir nuevas secciones transversales. Esto reduce significativamente el tiempo requerido para ingresar un modelo grande al permitir que el usuario defina la plantilla característica de secciones transversales, y luego propagar nuevas secciones transversales hacia arriba y hacia abajo.

Además, el programa admite simultáneamente unidades inglesas y métricas permitiendo al usuario cambiar de una unidad de medida a la otra en cualquier momento.

BOSS DAMBRK se ejecutará en cualquier computadora personal debidamente equipada. Se requiere un mínimo de 4 MB de memoria RAM. La salida del programa BOSS DAMBRK puede imprimirse en cualquier impresora de red. La salida gráfica de BOSS DAMBRK se puede imprimir en soporte de impresoras láser, trazadores e impresoras matriciales. La salida gráfica de BOSS

DAMBRK se puede exportar a casi cualquier programa de CAD, como AutoCAD® o MicroStation®. Además, la salida gráfica puede ser exportada a muchos procesadores de texto, como WordPerfect y Microsoft Word, permitiendo que los gráficos del programa se incluyan con los informes. BOSS DAMBRK puede operarse en Microsoft Windows. Además, BOSS DAMBRK se puede operar con un mouse.

Para instalar BOSS DAMBRK, aproximadamente 3 megabytes de espacio libre en el disco duro deben estar disponibles. El programa de instalación verificará el disco duro de la computadora donde llegue a ser instalado para verificar si hay suficiente espacio de disco antes de instalar BOSS DAMBRK.

Fuente: www.bossintl.com/html/dambrk_overview.html

FLDWAV

El programa FLDWAV, desarrollado por el Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos (NWS), es un programa generalizado de enrutamiento de inundaciones con la capacidad de modelar flujos a través de un solo flujo o un sistema de vías fluviales interconectadas. FLDWAV, Versión 1.0.0, lanzada en noviembre de 1998, reemplazó los programas de enrutamiento de inundación generalizados del NWS, DAMBRK (lanzado en 1988) y DWOPER (lanzado en 1984). La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés) ha aceptado el programa FLDWAV para su uso con el Programa Nacional de Seguros contra Inundaciones (NFIP).

Mientras DAMBRK tiene la capacidad de analizar el flujo de una sola corriente, DWOPER tiene la capacidad adicional de modelar los flujos a través de un sistema de canales interconectados. Además de las capacidades de DAMBRK y DWOPER, FLDWAV también tiene la capacidad de analizar flujos en regímenes de flujo mixto. FLDWAV fue creado para ejecutarse en el entorno DOS; sin embargo, FLDWAV puede ejecutarse en estaciones de trabajo UNIX y computadoras mainframe con cambios mínimos en el código fuente, que está disponible en el sitio web de NWS. Un programa de utilidad impulsado por menú, FLDGRF, está disponible para mostrar los datos de salida generados por

FLDWAV. Una función de calibración automática está disponible en FLDWAV, y el NWS declara que para producir pronósticos aceptables por FLDWAV, el modelo primero debe calibrarse a las etapas observadas en los medidores dentro del área de estudio.

Propósito principal:

- Previsión de inundaciones en tiempo real de inundaciones y / o inundaciones naturales
- análisis de inundación de represa para tuberías o desbordamientos en días soleados

El programa FLDWAV funciona si se tiene al menos 4MB de memoria RAM, de 5 a 20MB HD de tarjeta grafica y un sistema operativo mínimo de Windows 98

Funciones del FLDWAV:

1. Dimensionamiento variable: la estructura de datos de entrada se ha organizado de forma que los tamaños de los conjuntos se determinen internamente en función del sistema del río. Esto elimina el problema de quedarse sin cantidad de pasos de tiempo o cantidad de secciones transversales.
2. FLDWAV puede modelar sistemas de ríos que tienen una estructura dendrítica (tributarios de primer orden). Los tributarios de segundo orden a veces se pueden acomodar reordenando el sistema, es decir, seleccionando otra rama del sistema como la raíz principal.
3. Análisis de fallas de presas y puentes / terraplenes: se han conservado todas las capacidades asociadas con represas y puentes.
4. Opción de dique: los flujos que superan los diques ubicados a lo largo de uno o ambos lados de un río principal y / o sus afluentes principales pueden simularse dentro de FLDWAV.
5. Método simultáneo de cálculo: FLDWAV puede enrutar flujos inestables que se producen simultáneamente en un sistema de ríos interconectados.

6. Régimen de flujo: FLDWAV puede manejar flujos subcríticos, supercríticos o una combinación de cada una, variando en espacio y tiempo de una a otra.
7. Condiciones de frontera: el límite superior puede ser un hidrograma de etapa o de descarga para cada río. Las opciones de límite aguas abajo siguen siendo las mismas que para DAMBRK y DWOPER. Aunque el límite aguas abajo de afluentes es un hidrograma de etapa generado, el parámetro KD debe establecerse en cero para estos ríos. La opción $KD = 1$ está siendo reservada para un hidrograma de etapa observada que permitirá modelar los canales divergentes (p. Ej., Ramales de un delta de río) más directamente. Actualmente, estos canales se modelan etiquetando el extremo aguas abajo del canal como la condición de límite aguas arriba y anulando el hidrograma de flujo de entrada que lo fuerza a salir ($Q = -Q$).
8. Condiciones iniciales: las condiciones iniciales incluyen las elevaciones iniciales de la superficie del agua (WSEL) y las descargas en cada una de las ubicaciones de la sección transversal de lectura. FLDWAV puede iniciarse en estado estable (no cambia temporalmente) o en estado inestable.
9. Paso de tiempo computacional: actualmente se debe leer el paso de tiempo computacional inicial. Este valor se usará durante todo el período de ejecución hasta que se active el modo de falla de ruptura de una presa. El modelo usará el valor más pequeño entre el (los) paso (s) de tiempo de falla y el paso de tiempo inicial.
10. Coeficientes de rugosidad: una tabla Manning se define para cada alcance de canal delimitado por estaciones de calibración y se especifica como una función de WSEL (h) o descarga (Q) de acuerdo con una relación lineal. La interpolación lineal se usa para obtener n para valores de h o Q intermedios para los valores tabulares. A diferencia de DWOPER, los alcances de Manning n se

definen por la sección más ascendente de la cadena, en lugar de la sección que se encuentra más abajo. Para permitir que FLDWAV funcione como DAMBRK, las tablas de Manning n se duplican internamente de modo que haya una tabla en cada alcance entre las secciones transversales.

11. Calibración automática: esta opción permite la determinación automática de Manning n para minimizar la diferencia entre los WSEL calculados (hidrogramas de etapa) y los hidrogramas observados. En áreas donde las secciones transversales detalladas pueden no estar disponibles, hay una opción (Fread y Lewis, 1986) que ajustará automáticamente las secciones promedio obtenidas de los mapas topográficos además del Manning.
12. Salida de impresora: aunque el formato puede ser ligeramente diferente, FLDWAV mostrará los mismos datos como el modelo DAMBRK.

Fuente: <https://www.fema.gov/national-weather-service-fldwav-computer-program>

MIKE FLOOD

Es un software para estudios de inundaciones, en el que se organizan dinámicamente MIKE 11 (modelización uní-dimensional) y MIKE 21 (modelización bi-dimensional). Proporciona el cálculo entre el conjunto de ríos y las llanuras de inundación.

Los elementos centrales MIKE HYDRO River para ríos, MIKE URBAN para sistemas de recolección y MIKE 21 para flujo superficial 2D. Estos están acoplados para formar una herramienta de modelado acoplada de tres vías únicas y de tendencia.

Beneficios:

1. MIKE FLOOD se basa en tecnología probada y motores de simulación, que se aplican con éxito en numerosos proyectos de ingeniería importantes en todo el mundo.
2. Con los motores 2D paralelos, proporciona un marco único para acoplar modelos 1D y 2D utilizando unidades de procesamiento de gráficos (GPU) para una ejecución de simulación rápida.
3. Especialmente para las evaluaciones de impacto ambiental de inundaciones, MIKE FLOOD proporciona características únicas para el transporte de contaminación acoplado dinámicamente y los procesos de calidad del agua.
4. Ofrece la mayor flexibilidad en opciones para acoplar motores 1D y 2D
5. Modelado integrado de inundaciones que comprende interacciones dinámicas costeras, urbanas, fluviales e inundables
6. Acceso a la experiencia en modelado de inundaciones en más de 30 países de todo el mundo

Aplicaciones típicas:

MIKE FLOOD es aplicable a cualquier escala, desde un solo estacionamiento hasta modelos regionales que ofrecen múltiples opciones para acelerar el rendimiento de cómputo a través de motores de simulación paralelos. Las aplicaciones van desde la extensión de inundación clásica y el mapeo de riesgo hasta evaluaciones de impacto ambiental de eventos de inundación severos.

Para MIKE HYDRO RIVER y MIKE 11:

1. Tiene rutinas de estructuras completas y comprobadas.
2. Puede modelar sistemas fluviales muy largos o complicados con poco esfuerzo.
3. Puede modelar el flujo de un canal dimensional con precisión.
4. Se puede vincular fácilmente a programas de lluvia y esorrentía.
5. Puede simular condiciones de alta velocidad / flujo súper crítico.

6. Es unidimensional, por lo que en dos efectos dimensionales como el canal cruzado el impulso no es posible.
7. El flujo por tierra es difícil de modelar si las rutas de flujo son inciertas.
8. No se puede simular fácilmente una situación costera.

Para MIKE URBAN:

1. Tiene descripciones sofisticadas para flujo de tuberías y estructuras.
2. Puede modelar redes de tuberías altamente complejas.
3. Se puede vincular fácilmente a programas de lluvia y escurrimiento.
4. Puede usarse para modelar secciones abiertas.
5. Es unidimensional, por lo que en una verdadera descripción bidimensional de la tierra no es posible describir la compleja interacción entre el flujo por tierra y flujo de tubería.

Para MIKE 21:

1. Dos dimensiones significa más precisión y mejor resolución.
2. El flujo por tierra se puede simular sin un conocimiento previo de las rutas de flujo.
3. Las inundaciones y el secado pueden manejarse eficientemente usando algoritmos robustos.
4. Puede simular condiciones de alta velocidad / flujo supercrítico.
5. Puede simular una situación costera.
6. Requiere más esfuerzo computacional.

Fuente: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-flood>

CARPA

El software Carpa (Cálculo en Alta Resolución en Propagación de Avenidas) describe el comportamiento de la corriente hidráulica en una y en dos dimensiones. Para ello resuelve las ecuaciones de Saint Venant con dos variables usando siempre el método de los volúmenes finitos.

Permite una modelación conjunta en una y dos dimensiones de una red fluvial y sus llanuras de inundación. El área de estudio se puede dividir en distintas zonas, y en cada una de ellas utilizar una aproximación unidimensional o bidimensional según sean las condiciones reales del flujo, la precisión que se desee y el coste computacional asumible.

Modelación bidimensional:

El módulo bidimensional del modelo CARPA resuelve las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales en un dominio discretizado por una malla de cálculo irregular y no estructurada, con distintos esquemas numéricos y variantes de los mismos, permitiendo simular el mojado y secado del terreno. Incorpora asimismo la posibilidad de considerar el efecto de la precipitación con distintas funciones de pérdidas, siendo por lo tanto también un modelo hidrológico de transformación lluvia-escorrentía.

En la modelación bidimensional, como condición inicial se deben imponer, en cada elemento de volumen, el calado (o alternativamente la cota de la lámina de agua), y las dos componentes de la velocidad. El modelo permite empezar el cálculo con todo el dominio, o una parte del mismo, seco. Para los elementos secos se considera que el valor del calado y de los varios componentes de la velocidad sería nulo.

Por supuesto se pueden imponer distintas condiciones de contorno en distintos instantes de tiempo para dar condiciones variables como hidrogramas de entrada, o niveles de agua variables en la salida, entre los instantes dados el programa interpola linealmente.

Modelación unidimensional:

El módulo unidimensional resuelve las ecuaciones del régimen variable en lámina libre en una dimensión, pudiéndose escoger entre distintos esquemas numéricos y distintas variantes de cada uno de ellos, para un cauce de geometría cualquiera y coeficiente de rugosidad variable dentro de una misma sección transversal. Permite la simulación del avance sobre fondo seco, así como el secado completo del cauce. En el módulo 1D no tiene demasiado sentido la

incorporación de un modelo hidrológico de transformación lluvia-escorrentía, ni se ha implementado un modelo de pérdidas.

En el cálculo unidimensional, como condiciones iniciales se requiere conocer el valor del caudal y calado en cada una de las secciones de estudio. Para ello, con el valor del caudal y las condiciones de contorno en el primer instante de tiempo, el modelo realiza un cálculo en régimen permanente gradualmente variado para determinar el resto de variables hidráulicas en cada sección. El cálculo se realiza integrando la ecuación de conservación de la energía con el conocido método paso a paso, considerando para efectos de cálculo secciones compuestas.

Fuente:

<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6394/08Ebc08de12.pdf?sequence=8>

HEC-RAS

El HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) es un software, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU que modela la hidráulica del flujo de agua a través de ríos naturales y otros canales. Es una mejora del programa HEC-2, ya que mejora el modo de interactuar el programa con el usuario permitiéndole un mayor dominio del programa. El modelo numérico del programa realiza un análisis de flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre.

El procedimiento computacional básico de HEC-RAS para flujo constante se basa en la solución de la ecuación de energía unidimensional. Las pérdidas de energía se evalúan por fricción y contracción / expansión. La ecuación de momento se puede usar en situaciones donde el perfil de la superficie del agua se varía rápidamente. Estas situaciones incluyen saltos hidráulicos, hidráulica de puentes y evaluación de perfiles en confluencias fluviales.

Para el flujo inestable, HEC-RAS resuelve la ecuación completa, dinámica y en 1-D de Saint Venant utilizando un método implícito de diferencia finita. HEC-

RAS está equipado para modelar una red de canales, un sistema dendrítico o un solo alcance del río. Deben hacerse algunas simplificaciones para modelar algunas situaciones complejas de flujo utilizando el enfoque unidimensional HEC-RAS. Es capaz de modelar el flujo de régimen de flujo mixto subcrítico, supercrítico y mixto junto con los efectos de puentes, alcantarillas, vertederos y estructuras.

HEC-RAS es un programa de computadora para modelar el flujo de agua a través de sistemas de canales abiertos y perfiles de superficie de agua de cómputo. HEC-RAS encuentra una aplicación comercial particular en los estudios de gestión de inundación y seguros contra inundaciones para evaluar invasiones de vías de inundación. Algunos de los usos adicionales son: diseño y análisis de puentes y alcantarillas, estudios de diques y estudios de modificación de canales. Se puede utilizar para el análisis de brechas de presas, aunque otros métodos de modelado actualmente son más ampliamente aceptados para este propósito.

HEC-RAS tiene sus méritos, especialmente su apoyo por parte del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. , Las futuras mejoras en el progreso y su aceptación por parte de muchas agencias gubernamentales y empresas privadas. Está en el dominio público y revisado por pares, y está disponible para su descarga gratuita desde el sitio web de HEC. Varias empresas privadas están registradas como "proveedores" oficiales y ofrecen servicios de consultoría y software adicional. Algunos también distribuyen el software en países que no tienen permiso para acceder a los sitios web del Ejército de EE. UU. Sin embargo, la descarga directa de HEC incluye una amplia documentación, y los científicos e ingenieros versados en el análisis hidráulico deberían tener poca dificultad para utilizar el software.

HEC-RAS se puede usar junto con AutoCAD. Se puede construir un modelo de terreno digital (DTM) en AutoCAD y las secciones se pueden cortar desde el DTM y se pueden importar a HEC-RAS.

HEC-RAS también se puede usar en el programa GIS ArcView (con analista 3D y extensiones de SpatialAnalyst). ArcView puede leer dibujos de AutoCAD para fondos y puede crear un modelo digital de terreno (DTM). De forma similar a CAD fluvial, Geo-RAS se puede usar para crear secciones

transversales y otros datos geométricos para usar en HEC-RAS y se puede usar para exportar datos de superficie de agua de HEC-RAS a ArcView para crear mapas de inundación con profundidades y extensiones de inundación.

Fuente: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

5.9. Otros programas usados en Hidráulica e Hidrología

- a) **Aquaterra**
- b) **GeoHEC-RAS**
- c) **WMS** (Watershed Modeling System)
- d) **CarlsonHydrology**
- e) **HEC-HMS** (Hydrologic Modeling System)
- f) **FLO-2D**
- g) **HSPF** (Hydrologic Simulation Program Fortran)
- h) **QGIS** (Quantum Geographic Information System)
- i) **SagaGIS** (System for Automated Geoscientific Analyses)
- j) **iRIC** (International River Interface Cooperative)
- k) **PRMS** (Precipitation Runoff Modeling System)
- l) **MODFLOW** (Modular finite-difference Flow model)
- m) **MT3DMS** (Modular Transport, 3-Dimensional, Multi-Species model)
- n) **openFOAM** (Open Source Computational Fluid Dynamics)
- o) **MIDUSS**
- p) **CivilStorm**

EJERCICIOS PROPUESTOS

Analice tres proyectos hidráulicos importantes en su región, uno con un embalse, una canalización y uno de control de inundaciones.

1. Revise cada una de las aplicaciones descritas e indique cuál de ellas considera que pudiera ser utilizado en los proyectos por usted seleccionados.

2. ¿Qué resultados debería obtener de cada simulación?

3. ¿Qué datos cree usted que deberían alimentar el modelo?

4. ¿Qué resultados debería arrojar el modelo? Investigue.

REQUISITOS Y LIMITACIONES

Método	Información mínima necesaria				Limitaciones
	Cartografica	Pluviometrica	Pluviometrica	Otras	
Racional	Mapa hidrografico para determinar areas parciales	Ninguna	Curvas de Intensidad-Duracion-Frecuencia o en su defecto informacion de estaciones pluviometricas	Apreciacion del uso de la tierra y pendientes	Areas menores a 200ha, Duraciones de la lluvia menores a 5 minutos, Frecuencia de lluvias, Solo se calcula el caudal pico
Clark	Mapa hidrografico con informacion altimetrica	Data de precipitacion	Curvas de Intensidad-Duracion-Frecuencia	Apreciacion del uso de la tierra y estimacion de perdidas	Ninguna
Hidrograma Unitario	Area de la cuenca	Data de precipitacion	Data de caudal total de evento de precipitacion según periodo de retorno	Apreciacion del uso de la tierra y estimacion de perdidas	Ninguna
Numero de Curva	Mapa hidrografico para determinar areas parciales	Informacion de eventos previos de precipitacion	Data de precipitacion	Apreciacion del uso de la tierra	Areas menores a 25000ha, Fallos de calculo en pastizales y zonas forestales, Areas heterogeneas, Data regional solo local
Hidrograma Triangular	Area de la cuenca	Ninguna	Tiempo de la precipitacion	Longitud y Diferencia de altura de la cuenca	Estimaciones poco exactas basadas en poca informacion
Simulacion	La informacion y limitaciones dependeran de cada modelo en particular, pero en general requieren de informacion mucho mas detallada que en los metodos tradicionales y las limitaciones son de capacidad del programa en si y de indole de economia				

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Clark, C.O. (1945). **Storage and the Unit Hydrograph**, ASCE Trans. 110: 1919-1446.
- Chow, V. T. (1988). **Handbook of Applied Hidrology**, McGraw-Hill, 712p.
- Chow, V. T. (1962). **Hydrologic determination of waterway areas for drainage structures in small drainage basins**. Experimental Station, Univ. of Illinois, Urbana, Ill, Illinois, bulletin No. 462.
- Eagleson, P. (1970). **Dynamic hydrology**, McGraw-Hill.
- Franceschi, L. (1983.) **Drenaje Vial**, Fundación Juan José Aguerrevere, Colegio de Ingenieros de Venezuela.
- Hidrologic Engineering Center. (2000). **Hidrologic Modeling System HEC-HMS**. Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, 138pp.
- Izzard, C. F. (1946). **Hydraulics of Runoff from Developed Surfaces**. Proc. Highway Res, Board. Vol. 26.pp.129-150.
- Jiang, R. (2001). **Investigation of Runoff Curve Number Initial Abstraction Ratio**, Ph.D. University of Arizona.
- Koehler, R. (2004). **Raster Based Analysis and Visualization of Hydrologic Time Series**. Ph.D. dissertation, University of Arizona. Tucson, Az, 189pp.
- Rushton, K.R. (2003). **Groundwater Hydrology: Conceptual and Computational models**. John Wiley and Sons Ltd.
- S, K, Mishra. y V, P, Singh. (2003). **Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology**. Editorial Kluber Academics Publisher.
- Témez, J. R. (1978). **Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales**. Dirección General de Carreteras. Madrid. España. 111p.
- Témez, J. R. (1991). **Generación y Mejora del Método Racional**. Version de la Dirección General de Bibliografía y Referencias.
- Wanielista, M. P. (1997). **Hydrology and Water Quality Control**. Wiley, 567pp. 2° Edition.

http://hidrologia.usal.es/practicas/HU_Clark_EXPLICACION.pdf, **Método de Clark**, (2016). Sánchez, F.

http://hidrologia.usal.es/practicas/Pneta_SCS/Pneta_SCS_fundam.pdf, **Método del SCS**, (2016). Sánchez, F.

<http://www.hidrojing.com/recursos/formaciones-y-cursos/>, **Curso HEC-RAS**, Oliveras, J.