



UTPL
La Universidad Católica de Loja

Modalidad Abierta y a Distancia



Hidrología y Meteorología

Guía didáctica

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Civil

Hidrología y Meteorología

Guía didáctica

| Carrera | PAO Nivel |
|----------------------------------|-----------|
| ▪ Gestión de Riesgos y Desastres | II |

Autora:

Gonzaga Vallejo Sonia Lorena



T I E R _ 1 0 5 5

Asesoría virtual
www.utpl.edu.ec

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Universidad Técnica Particular de Loja

Hidrología y Meteorología

Guía didáctica

Gonzaga Vallejo Sonia Lorena

Diagramación y diseño digital:

Ediloja Cía. Ltda.

Telefax: 593-7-2611418.

San Cayetano Alto s/n.

www.ediloja.com.ec

edilojacialtda@ediloja.com.ec

Loja-Ecuador

ISBN digital - 978-9942-25-940-0



Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual

4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Usted acepta y acuerda estar obligado por los términos y condiciones de esta Licencia, por lo que, si existe el incumplimiento de algunas de estas condiciones, no se autoriza el uso de ningún contenido.

Los contenidos de este trabajo están sujetos a una licencia internacional Creative Commons **Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0)**. Usted es libre de **Compartir** – copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. **Adaptar** – remezclar, transformar y construir a partir del material citando la fuente, bajo los siguientes términos: **Reconocimiento** – debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario. **No Comercial** – no puede hacer uso del material con propósitos comerciales. **Compartir igual** – Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original. No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Índice

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Datos de información..... | 9 |
| 1.1. Presentación de la asignatura | 9 |
| 1.2. Competencias genéricas de la UTPL | 9 |
| 1.3. Problemática que aborda la asignatura..... | 10 |
| 2. Metodología de aprendizaje..... | 11 |
| 3. Orientaciones didácticas por resultados de aprendizaje..... | 12 |
| | |
| Primer bimestre | 12 |
| Resultado de aprendizaje 1 | 12 |
| Contenidos, recursos y actividades de aprendizaje | 12 |
| Semana 1 | 13 |
| | |
| Unidad 1. Historia e importancia de la hidrología..... | 13 |
| 1.1. Definición de Hidrología..... | 14 |
| 1.2. Historia de la hidrología | 14 |
| 1.3. Aplicaciones de la hidrología..... | 14 |
| 1.4. El ciclo hidrológico | 15 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 16 |
| Autoevaluación 1 | 17 |
| | |
| Semana 2 | 19 |
| | |
| Unidad 2. Cuenca hidrográfica..... | 19 |
| 2.1. Definición | 19 |
| 2.2. Características de la cuenca y los cauces..... | 21 |
| 2.4. Clasificación de los cursos de agua | 21 |
| 2.5. Parámetros morfométricos | 22 |
| 2.6. Sistema de drenaje..... | 25 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 28 |

Primer
bimestre

Segundo
bimestre

Solucionario

Referencias
bibliográficas

Recursos

| | |
|--|-----------|
| Índice | |
| Primer bimestre | |
| Segundo bimestre | |
| Solucionario | |
| Referencias bibliográficas | |
| Recursos | |
| Semana 3 | 30 |
| 2.7. Elevación y pendiente media de la cuenca | 30 |
| 2.8. Perfil longitudinal y pendiente media del cauce principal | 34 |
| 2.9. Curva hipsométrica | 39 |
| 2.10. Rectángulo equivalente..... | 43 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 46 |
| Autoevaluación 2 | 47 |
| Semana 4 | 50 |
| Unidad 3. Precipitación..... | 50 |
| 3.1. Introducción..... | 50 |
| 3.2. Definición | 51 |
| 3.3. Origen | 52 |
| 3.4. Tipos de precipitación..... | 53 |
| 3.5. Medición de la precipitación..... | 53 |
| 3.6. Análisis de la calidad de los registros..... | 56 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 57 |
| Semana 5 | 57 |
| 3.7. Precipitación media sobre una cuenca..... | 58 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 74 |
| Autoevaluación 3 | 75 |
| Semana 6 | 78 |
| Unidad 4. Análisis de tormentas | 78 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 79 |
| Semana 7 | 79 |
| 4.5. Análisis de Frecuencia de tormentas | 79 |
| 4.6. Distribución de probabilidad de Gumbel..... | 81 |

| | |
|---|----------------|
| 4.7. Relación Intensidad y periodo de retorno | 87 |
| 4.8. Curvas intensidad, duración y frecuencia IDF..... | 87 |
| 4.9. Ecuaciones de intensidad | 88 |
| 4.10.Fórmula Exponencial o americana..... | 88 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 95 |
| Autoevaluación 4 | 96 |
| Actividades finales del bimestre..... | 100 |
| Semana 8 | 100 |
| Segundo bimestre | 102 |
| Resultado de aprendizaje 1 | 102 |
| Contenidos, recursos y actividades de aprendizaje | 102 |
| Semana 9 | 102 |
| Unidad 5. Infiltración | 102 |
| 5.1. Introducción | 103 |
| 5.2. Descripción del proceso de infiltración..... | 104 |
| 5.3. Factores que influyen en la infiltración | 106 |
| 5.4. Capacidad de infiltración | 111 |
| 5.5. Coeficiente de escurrimiento..... | 112 |
| 5.6. Otros métodos empíricos | 113 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 117 |
| Semana 10 | 117 |
| 5.7. Medida de la infiltración..... | 122 |
| 5.8. Métodos de separación del flujo base | 126 |
| 5.9. Abstracciones y Número de la curva | 137 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 143 |
| Autoevaluación 5 | 144 |
| Semana 11 | 148 |

Índice

Primer
bimestre

Segundo
bimestre

Solucionario

Referencias
bibliográficas

Recursos

| | |
|---|------------|
| Unidad 6. Escurrimiento | 148 |
| 6.1. Introducción..... | 148 |
| 6.2. Factores que afectan el escurrimiento | 151 |
| 6.3. Hidrogramas | 154 |
| 6.4. Monitoreo de caudales y aforos..... | 158 |
| 6.5. Métodos de aforo | 159 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 164 |
| Semana 12 | 164 |
| 6.6. Curva de descarga..... | 188 |
| 6.7. Análisis de caudales extremos..... | 195 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 204 |
| Autoevaluación 6 | 205 |
| Semana 13 | 208 |
| Unidad 7. Relación lluvia y escurrimiento..... | 208 |
| 7.1. Introducción..... | 208 |
| 7.2. Método racional..... | 209 |
| 7.3. Hidrogramas | 218 |
| 7.4. Hidrograma unitario | 221 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 230 |
| Semana 14 | 230 |
| 7.5. Hidrograma Unitario sintético..... | 230 |
| 7.6. Hidrograma unitario triangular | 235 |
| 7.7. Hidrograma unitario adimensional del SCS..... | 239 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 242 |
| Autoevaluación 7 | 243 |
| Resultado de aprendizaje 2 | 246 |
| Contenidos, recursos y actividades de aprendizaje | 246 |

Índice

Primer
bimestre

Segundo
bimestre

Solucionario

Referencias
bibliográficas

Recursos

| | |
|--|------------|
| Semana 15 | 246 |
| Unidad 8. Meteorología y clima | 246 |
| 8.1. Características..... | 247 |
| 8.2. Movimiento atmosférico..... | 247 |
| 8.3. Fenómenos meteorológicos..... | 247 |
| Actividades de aprendizaje recomendadas | 247 |
| Actividades finales del bimestre..... | 247 |
| Semana 16 | 247 |
| 4. Solucionario | 249 |
| 5. Referencias bibliográficas | 256 |
| 6. Recursos | 257 |

Índice

Primer
bimestre

Segundo
bimestre

Solucionario

Referencias
bibliográficas

Recursos

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos



1. Datos de información

1.1. Presentación de la asignatura



1.2. Competencias genéricas de la UTPL

- Comunicación oral y escrita.
- Orientación a la innovación y a la investigación.
- Pensamiento crítico.
- Organización y planificación del tiempo.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

1.3. Problemática que aborda la asignatura

Escasas capacidades de respuesta ante eventos peligrosos. En los últimos años ha crecido el número de desastres, los cuales mayormente están relacionados con el clima, siendo Ecuador vulnerable a fenómenos como desertificación y el fenómeno del Niño, que cada vez es más imprevisible. Así mismo, el incremento de la urbanización y al aumento de las concentraciones de población en asentamientos urbanos no planificados e inseguros como zonas costeras desprotegidas, la pobreza, laderas inestables, zonas de inundación y la insuficiente atención que se presta a los cambios en los patrones de riesgo, cada vez son más las personas situadas en zonas expuestas a desastres. Es así que actualmente el gobierno a través de sus entidades busca aplicar mecanismos que puedan contribuir a aumentar la resiliencia ante los peligros y la incorporación sistemática de los enfoques de la reducción del riesgo en la ejecución de los programas de preparación para las situaciones de emergencia, de respuesta y de recuperación ante desastres, mejorar la información sobre el riesgo; crear una cultura de seguridad y resiliencia; reducir los riesgos en sectores clave y fortalecer la preparación para la respuesta.



2. Metodología de aprendizaje

Aprendizaje basado en problemas

Esta metodología de aprendizaje basado en problemas es un proceso de aprendizaje cíclico, que empieza por el conocimiento del fundamento teórico de los principios científicos que gobiernan los fenómenos hidrológicos y las técnicas y metodologías que más se utilizan en la práctica para la cuantificación de estos fenómenos, así como la fundamentación de la meteorología y su aplicación para la comprensión y prevención de procesos que puedan convertirse en riesgo o vulnerabilidad; se continúa con el estudio de ejemplos prácticos de aplicación de las mencionadas metodologías y técnicas de cuantificación para finalmente ofrecer una interpretación de los resultados obtenidos. Este proceso permitirá que el estudiante avance secuencialmente en el conocimiento de la asignatura y sea capaz de resolver problemas prácticos de mayor complejidad.

Poner en práctica esta metodología no supone sólo el ejercicio de indagación por parte de los alumnos, sino convertirlo en datos e información útil. Con esta metodología se persigue conseguir el desarrollo del pensamiento crítico, la mejora de las habilidades de resolución de problemas, el aumento de la motivación del alumno y una mejor capacidad de transferir conocimientos a nuevas situaciones.



3. Orientaciones didácticas por resultados de aprendizaje



Primer bimestre

Resultado de aprendizaje 1

Aplica los conocimientos de hidrología a la gestión del riesgo, conociendo sus conceptos básicos y aplicándolos a fenómenos peligrosos.

Para la consecución del primer resultado de aprendizaje, usted empezará conociendo el ciclo hidrológico como fundamento del estudio de la hidrología, a continuación, la caracterización de las cuencas hidrográficas como unidad superficial básica para la cuantificación de los diferentes parámetros, o fenómenos hidrológicos que le permitirán aplicarlo en la solución de problemas de probabilidad de ocurrencia de eventos de riesgo o vulnerabilidad.

Contenidos, recursos y actividades de aprendizaje

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos



Semana 1



Unidad 1. Historia e importancia de la hidrología

Como ya se ha mencionado, el objetivo primordial de la asignatura es destacar la importancia de la hidrología superficial, aplicada a la gestión de cuencas hidrográficas y el conocimiento de los fenómenos que se pueden predecir a partir del conocimiento del estado y gestión de las cuencas hidrográficas, indicando definiciones, división, descripción detallada del ciclo hidrológico y, los fenómenos que intervienen como la precipitación, análisis de tormentas, infiltración, escorrentía y la relación lluvia-escorrentía, conceptos fundamentales que le permitirá iniciar el estudio de la hidrología con pie firme.

Le invito a revisar los contenidos de la unidad 1 y los subtemas que le corresponden y que se describen a continuación:

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

1.1. Definición de Hidrología

Hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos, según Chow V.T. (1964)

El estudio de la hidrología permite realizar análisis hidrológicos cuantitativos para la selección de eventos de diseño que nos sirven para desarrollar obras hidráulicas para el uso y aprovechamiento del recurso hídrico y su impacto en el medio ambiente.

La hidrología aplicada, por su parte, utiliza la información básica y la procesa de acuerdo con las necesidades de los proyectos de aprovechamiento de los recursos hídricos, empleando las herramientas que ofrece la tecnología moderna. Los resultados son predictivos, estimaciones con aproximación que disminuya la incertidumbre de ocurrencia de eventos extremos.

1.2. Historia de la hidrología

[Historia de la hidrología](#)

1.3. Aplicaciones de la hidrología

La hidrología guarda estrecha relación con las obras de ingeniería hidráulica, así como con el manejo y planificación de uso y aprovechamiento del recurso hídrico. Mencionaremos algunas de las aplicaciones del estudio de la hidrología.

- Selección de fuentes de abastecimiento para sistemas de agua potable o de uso industrial
- Estudio y construcción de obras hidráulicas
- Drenaje

- Irrigación
- Regulación de cursos de agua y control de inundaciones
- Control de erosión
- Aprovechamiento hidroeléctrico
- Navegación
- Desarrollo de programas de alerta temprana y prevención de desastres

Es así, que la hidrología, en cuanto trata con un aspecto importante y vital del medio ambiente que es el agua, es una ciencia esencial para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos y el diseño de obras de defensa. Aunque esta ciencia está lejos de tener un desarrollo completo, existen varios **métodos analíticos y estadísticos** que son en mayor o menor grado aceptados.

1.4. El ciclo hidrológico

Ciclo Hidrológico

Otra definición de ciclo hidrológico es la que nos da (Campos Aranda, 1998), por ejemplo:

Sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y revaporación (p. 4).

Involucra un proceso de transporte y recirculación, indefinido o permanente, este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas:

- **El sol** que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación).
- **La gravedad terrestre** que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento).

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

La parte del agua de la precipitación que penetra bajo la superficie del terreno se denomina **infiltración** y va llenando los poros y fisuras del medio poroso.

Si el agua infiltrada es grande, una parte de esta desciende hasta recargar el agua subterránea; en cambio, cuando el volumen infiltrado es bajo, el agua queda retenida en la zona no saturada y constituye lo que se denomina **humedad del suelo**.

Cuando vuelve a la atmósfera por evaporación, transpiración de las plantas o, el proceso combinado se denomina **evapotranspiración**.



Actividades de aprendizaje recomendadas

Ahora, usted ya tiene conocimiento del origen y evolución del estudio de la hidrología y el concepto del ciclo hidrológico como fundamento. Para retroalimentar lo aprendido, realice un mapa mental sobre el tema de la hidrología en la gestión de los recursos hídricos y, plantee o diseñe un esquema que represente el ciclo hidrológico.

Finalmente, para comprobar su nivel de aprendizaje, desarrolle la autoevaluación 1 de esta unidad.



Autoevaluación 1

Lea detenidamente cada pregunta y seleccione verdadero (V) o falso (F), según corresponda.

1. () Los procesos que estudia la hidrología involucra variables definidas, y se apoya en otras ramas como la geografía y la física.
2. () La hidrología es una ciencia que tiene estatus de exacta.
3. () El ciclo hidrológico es el concepto fundamental de la hidrología.
4. () Infiltración y percolación tiene el mismo significado.
5. () Los cuerpos de agua como ríos, lagos, océanos, son parte del ciclo hidrológico.
6. () La hidrología es fundamental para el diseño de obras de aprovechamiento hidráulico.
7. Señale la respuesta correcta, solo existe una: se le atribuye el hecho de aceptar a la hidrología como una disciplina científica al investigador:
 - a. Leonardo Da Vinci.
 - b. Halley.
 - c. Perrault.
 - d. Bernard Palissy.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

8. Identifique la respuesta correcta. El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte y recirculación indefinido permanente y, se debe fundamentalmente a dos causas:
 - a. El viento y la evaporación.
 - b. La humedad y la temperatura ambiental.
 - c. La radiación solar y la gravedad terrestre.
 - d. La gravedad terrestre y el viento.
9. Señale la respuesta correcta. Cuando el volumen de agua que infiltra en el suelo es escaso el agua queda retenida en la zona no saturada y se denomina:
 - a. Flujo subsuperficial.
 - b. Capacidad de recarga.
 - c. Humedad del suelo.
10. Complete el siguiente concepto:

El ciclo hidrológico es la _____ de etapas que atraviesa el agua al pasar _____ a la tierra y volver a la atmósfera: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, _____, acumulación en el suelo o masas de agua y _____.

[Ir al solucionario](#)

¡Felicitaciones!, ha concluido con la primera unidad planificada dentro de la asignatura.



Semana 2



Unidad 2. Cuenca hidrográfica

Una vez que ha revisado la historia e importancia de la hidrología, así como el principio del ciclo hidrológico, entramos en materia y empezamos con el estudio de la cuenca hidrográfica como unidad fundamental para el análisis o comparación entre cuencas en el estudio de los fenómenos del ciclo hidrológico. Para esto, le invito a revisar los subtemas preparados para su mejor comprensión y que se encuentran a continuación:

2.1. Definición

Una cuenca hidrográfica es un área de la superficie terrestre en donde la precipitación de lluvias que caen sobre ella tiende a drenar por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Otro tipo de **cuenca** es la cuenca subterránea, cuya forma en planta sería semejante a la superficial, pero no son coincidentes, estas son definidas por los niveles freáticos del terreno.

Así, por la característica de punto de salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas:

Endorreicas: El punto de salida de la cuenca, está dentro de sus límites y, generalmente es un lago.

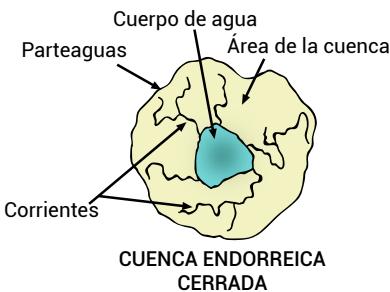


Figura 1. Cuenca endorreica

Fuente: [enlace](#)

Exorreicas: el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y pertenece a otra corriente o descarga en el mar.

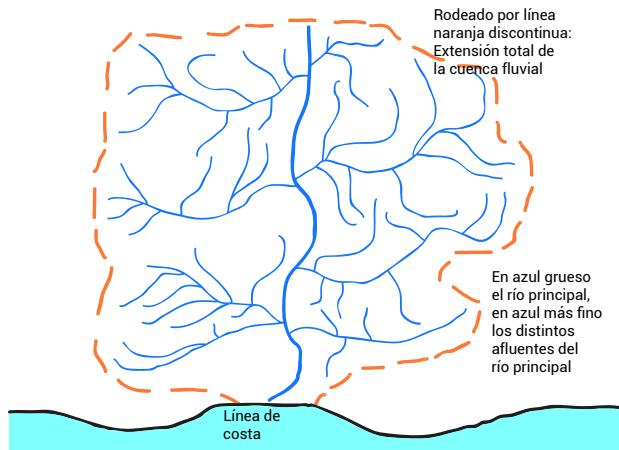


Figura 2. Cuenca exorreica

Fuente: [enlace](#)

2.2. Características de la cuenca y los cauces

Para abordar este subtema, le invito a revisar el siguiente recurso educativo:

[Ir a recursos](#)

Luego de la revisión minuciosa del recurso propuesto ahora conocemos cuales son las características de la cuenca y los cauces.

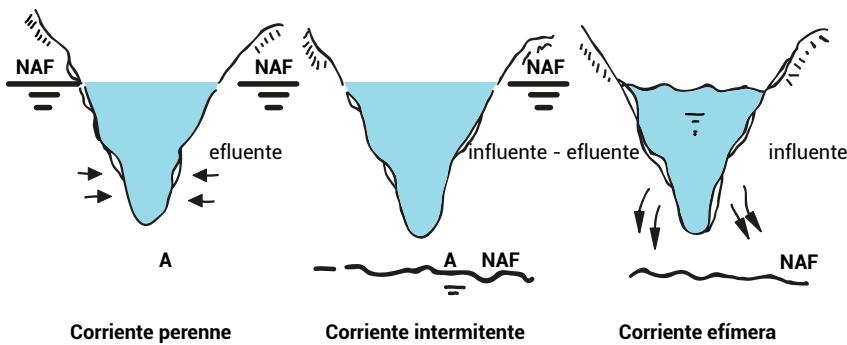
Continuemos con la siguiente temática.

2.4. Clasificación de los cursos de agua

Con base en la constancia de escorrentía, los cursos de agua se clasifican en:

- **Perennes:** Corrientes con agua todo el tiempo. El nivel de agua subterráneo mantiene una alimentación continua y no desciende nunca debajo del lecho del río.
- **Intermitentes:** Corrientes que escurren en estaciones de lluvia y se secan durante el verano. El nivel de agua subterránea se conserva por encima del nivel del lecho del río solo en estación lluviosa. En verano el escurrimento cesa, u ocurre solamente durante o inmediatamente después de las tormentas.
- **Efímeras:** Existen apenas durante o inmediatamente después de los periodos de precipitación, y solo transportan escurrimento superficial.

El nivel de agua subterráneo se encuentra siempre por debajo del nivel inferior del lecho de la corriente, no hay por tanto posibilidad de escurrimento subterráneo.



Por su posición topográfica o edad geológica, los cauces pueden ser de montaña o juveniles, de transición o maduros, o bien de planicie o viejos.

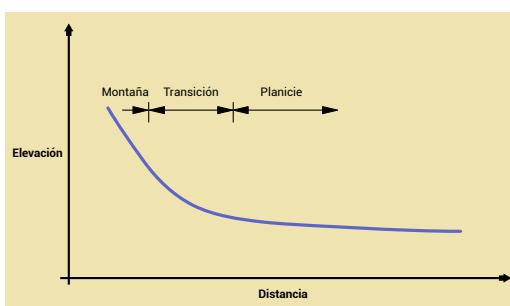


Figura 4. Esquema de clasificación por posición topográfica o edad geológica

Adaptado de: Aparicio (1997)

2.5. Parámetros morfométricos

Área de drenaje:

Es el área plana, proyección horizontal, incluida dentro de su divisoria topográfica.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Es quizá el parámetro más importante influyendo directamente en la cantidad de agua que ella puede producir y consecuentemente en la magnitud de los caudales.

Se puede determinar de un plano topográfico.

- Utilizando software: Arc GIS, Q GIS, Idrisi, entre otros.
- Utilizando planímetro
- Descomposición geométrica
- Por pesadas. Siguiendo el perímetro de la cuenca, se corta y se compara con el peso de una superficie de 1Ha o km².

Recuerde que el área aportante de una cuenca que usted definirá, está en función de un punto de interés dentro de la carta topográfica, en el caso de un estudio específico, como por ejemplo para un sistema de agua, para la ubicación de un puente, para un punto de medición de caudales, etc.

Perímetro *P*

Es la longitud del límite exterior de la cuenca, se determina utilizando:

- Software
- Curvímetro
- Hilo metálico. Siguiendo el contorno de la divisoria, luego se mide según la escala en la que está la cuenca y se obtiene la longitud del perímetro.

Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad *Kc*

Es la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual a la cuenca. En cualquier caso, el coeficiente será mayor que la unidad.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Donde:

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

Donde:

Kc – Coeficiente de compacidad

P – Perímetro

A – Área

Tanto más próximo a la unidad, la cuenca se aproxima más a la forma circular; en la tabla 1, encontrará algunos valores referenciales sobre la forma de cuenca en función de su Kc y la tendencia a crecidas.

Tabla 1. Valores de Kc y su relación con la forma

| Valores de Kc | Forma de la cuenca | Tendencia crecidas |
|-----------------|--------------------------------|--------------------|
| 1,00 - 1,25 | De casi redonda a oval redonda | Alta |
| 1,25 - 1,50 | De oval redonda a oval oblonga | Media |
| 1,50 - 1,75 | De oval oblonga a rectangular | Baja |

Nota: Oñate (2015)

Factor de forma Kf

Es la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la hoyo. La longitud axial de la hoyo se mide cuando se sigue el curso de agua más largo desde la desembocadura hasta la cabecera más distante en la hoyo. (Monsalve Sáenz, 2011)

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

El ancho medio B, se obtiene cuando se divide el área por la longitud axial de la hoyo.

$$K_f = \frac{B}{L}$$

Siendo:

$$B = \frac{A}{L} \quad (3)$$

Entonces:

$$K_f = \frac{B}{L^2} \quad (4)$$

Donde:

B - Ancho medio (B) en km

L - Longitud axial de la hoyo (L) en km

A - Área de drenaje, en km²

Una cuenca, con factor de forma bajo, está menos sujeta a crecientes que otra con el mismo tamaño, pero con menor factor de forma.

2.6. Sistema de drenaje

El sistema de drenaje de una cuenca está constituido por el cauce principal y sus tributarios.

Orden de corrientes:

Una corriente de orden **1** es un tributario sin ramificaciones, una de orden **2** tiene sólo tributarios de primer orden, etc.

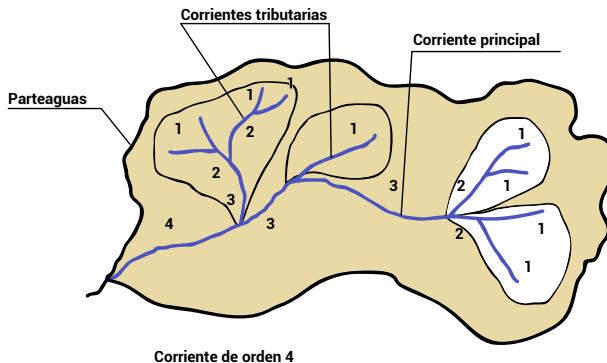


Figura 5. Clasificación de las corrientes

Adaptado de: [enlace](#).

Dos corrientes de orden 1 forman una de orden 2, dos corrientes de orden 3 forman una de orden 4, etc.

Pero, por ejemplo, una corriente de orden 2 y una de orden 3 forman otra de orden **3**. El orden de una cuenca es el mismo que el de la corriente principal en su salida.

El orden de una cuenca depende en mucho de la escala del plano utilizado para su determinación; en este sentido, las comparaciones entre una cuenca y otra deben hacerse con cuidado, especialmente cuando los planos correspondientes no están a la misma escala o están editados por diferentes organismos.

Otros indicadores del grado de bifurcación o eficiencia de una cuenca son la densidad de corrientes D_s , definida con el número de corrientes perennes e intermitentes por unidad de área y la densidad de drenaje D_d . Definida como la longitud de corrientes por unidad de área.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Densidad de drenaje D_d

Es la relación que existe entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca y su área total. (Monsalve Sáenz, 2011) Está relacionada con el tiempo de respuesta de una tormenta.

$$D_d = \frac{L_s}{A} \quad (5)$$

Donde:

L_s – Longitud total de corrientes en km

A – Área de la cuenca en km^2

Ejemplo:

Si tenemos $L_s = 27.54 \text{ km}$ y $A = 14.07 \text{ km}^2$ Entonces:

$$D_d = \frac{27.54}{14.07} \quad D_d = 1.96 \text{ km/km}^2$$

Interpretación:

Un valor de 0.05 km/km^2 indica cuencas con un drenaje pobre y, valores de cercanos a 3.5 km/km^2 cuencas excepcionalmente drenadas.

Cuidado con la escala de la topografía.

Densidad de corrientes D_s

Es la relación entre el número de corrientes perennes e intermitentes y el área total de la cuenca.

$$D_s = \frac{N_s}{A} \quad (6)$$

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Donde:

N_s – Número total de corrientes

A – Área de la cuenca

Con los datos del ejemplo anterior, es decir $A = 14,07 \text{ km}^2$ y $N = 5$.

Tendremos:

$$D_s = \frac{5}{14,07}$$

$$D_s = 0,355$$

Un orden de corrientes alto o una densidad elevada refleja una cuenca altamente disectada, que responde rápidamente a una tormenta.

Las densidades u órdenes de corrientes pequeñas se observan donde los suelos son muy resistentes a la erosión o muy permeables; donde estos indicadores son elevados, los suelos se erosionan fácilmente o son relativamente impermeables, las pendientes son altas y la cobertura vegetal es escasa.



Actividades de aprendizaje recomendadas

Revise nuevamente los subtemas 2,1 a 2,6 de la guía didáctica.

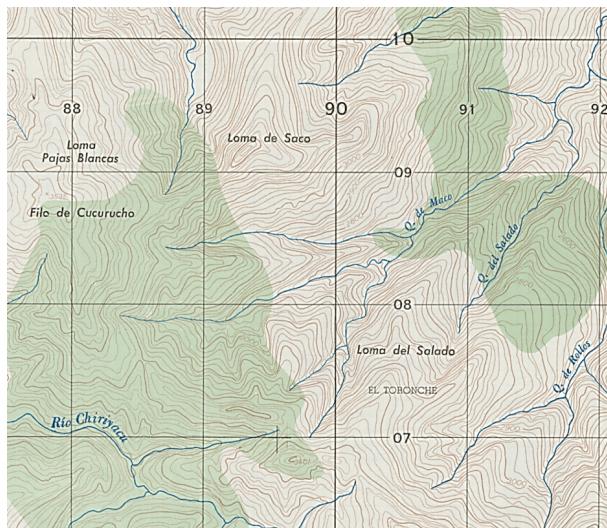
En lo referente a cuenca hidrográfica, si le quedó alguna duda sobre el método de pesadas para la determinación del área, puede revisar el [enlace](#).

Finalmente, como usted ya tiene el conocimiento de los fundamentos, ecuaciones y forma de delimitación de una cuenca, le invito a hacerlo con la ayuda de una herramienta ofimática si se le facilita o, manualmente con los métodos señalados en esta unidad; así como también calcular los diferentes coeficientes y parámetros morfológicos de una cuenca hidrográfica.

En la imagen, defina la microcuenca para la **quebrada de maco**, donde se ha definido con rojo el punto de interés donde se pretende construir una obra civil, determine:

- Área de la cuenca
- Perímetro
- Coeficiente de compacidad K_c
- Factor de forma
- Orden de corriente
- Densidad de drenaje
- Densidad de corriente

Puede usar la escala gráfica para evitar confusiones, la cuadrícula indica que cada cuadro equivale a 1 km².





Semana 3

Continuamos con el estudio de la cuenca hidrográfica, definición y cálculo de parámetros morfométricos. En esta semana usted aprenderá a calcular la pendiente media de la cuenca, pendiente media del cauce principal, la curva hipsométrica que le sirve para determinar el tipo de relieve que tiene la cuenca y el concepto de rectángulo equivalente, todos estos parámetros morfométricos de la cuenca le servirán para que usted la caracterice y tenga una idea de la capacidad de respuesta, es decir el escurrimiento. Revise los subtemas preparados, éxito en su estudio.

2.7. Elevación y pendiente media de la cuenca

Básicamente una media ponderada donde la variable de ponderación es la superficie de cada intervalo altitudinal.

$$H_m = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot A_i}{A_t} \quad (7)$$

Donde:

H_i – marca de clase de los intervalos de altitud en m

A_i – superficie de cada intervalo de altitud en km^2

A_t – superficie de la cuenca en km^2

n – número de intervalos de altitud

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Ejemplo:

Tabla 2. Datos y resultado de cálculo de elevación media de una cuenca

| Intervalos de altitud (m) | | Di (m) | Área (A) km2 | Marca de clase H(m) (Li+Ls)/2 | H*A |
|---------------------------|------|--------|--------------|----------------------------------|-----------------|
| Li | Ls | | | | |
| 1580 | 1600 | 20 | 0.33 | 1590.0 | 524.70 |
| 1600 | 1640 | 40 | 0.89 | 1620.0 | 1441.80 |
| 1640 | 1680 | 40 | 1.72 | 1660.0 | 2855.20 |
| 1680 | 1720 | 40 | 2.11 | 1700.0 | 3587.00 |
| 1720 | 1760 | 40 | 2.98 | 1740.0 | 5185.20 |
| 1760 | 1800 | 40 | 2.21 | 1780.0 | 3933.80 |
| 1800 | 1840 | 40 | 2.31 | 1780.0 | 4111.80 |
| 1840 | 1863 | 23 | 1.52 | 1851.5 | 2814.28 |
| At= | | | 14.07 | | 24453.78 |

$$H_m = \frac{24453.78 \text{ km}^2 \cdot m}{14.07 \text{ km}^2} = 1738.01 \text{ m}$$

Pendiente media de la cuenca

Tiene estrecha relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al caudal de la corriente. Afecta notablemente a la relación lluvia escurrimiento pues reduce el tiempo de concentración y acorta el periodo de infiltración.

$$S_c = \frac{\sum D_i \cdot L_i}{A_{TOTAL}} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

S_c – Pendiente media de la cuenca en porcentaje en %

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

D_i – Diferencia de nivel entre el límite superior L_s e inferior L_i de la faja altitudinal seleccionada en km. Equidistancia de las curvas de nivel

L_i – Longitud total de las curvas de nivel presentes en la cuenca en km

Entonces, continuando con los datos del ejemplo anterior y teniendo como dato la longitud de la curva media de cada intervalo, calculamos la pendiente media de la cuenca S_c

Tabla 3. *Pendiente media de la cuenca*

| Intervalos de altitud (m) | | Di (m) | Área (A) km ² | Li (Longitud de curvas de nivel) (km) | Di. Li (km. km) |
|---------------------------|----------------|--------|--------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| Li | L _s | | | | |
| 1580 | 1600 | 20 | 0.33 | 19.1 | 0.38 |
| 1600 | 1640 | 40 | 0.89 | 24.3 | 0.97 |
| 1640 | 1680 | 40 | 1.72 | 38.9 | 1.56 |
| 1680 | 1720 | 40 | 2.11 | 35.8 | 1.43 |
| 1720 | 1760 | 40 | 2.98 | 32.1 | 1.28 |
| 1760 | 1800 | 40 | 2.21 | 32.1 | 1.28 |
| 1800 | 1840 | 40 | 2.31 | 25.8 | 1.03 |
| 1840 | 1863 | 23 | 1.52 | 15.6 | 0.36 |
| Suma | | | 14.07 | 223.7 | 8.3008 |

$$S_c = \frac{8.30}{14.07} \times 100$$

$$SC = 56.46\%$$

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Otro concepto importante, a revisar, es el de **índice de pendiente global** en m/km. Permite caracterizar el relieve utilizando información tomada de la curva hipsométrica y del rectángulo equivalente:

$$I_g = \frac{H_5 - H_{95}}{L} \quad (9)$$

Donde:

H_s – Cota sobre la que está el 5% de la superficie de la cuenca en m.

H_{95} – Cota sobre la que está el 95% de la superficie de la cuenca en m.

L – Lado mayor del rectángulo equivalente en km. (Revisar apartado 2.11).

Tabla 4. Tipos de relieve según valor del índice de pendiente global I_g

| Tipo de relieve | I_g (m/km) |
|-----------------------|--------------|
| Muy débil | < 2 |
| Débil | 2-5 |
| Débil Moderado | 5-10 |
| Moderado-fuerte | 10-20 |
| Fuerte | 20-50 |
| Muy fuerte | 50 -100 |
| Extrafuerte | 100- 200 |
| Extremadamente fuerte | > 200 |

Nota: Oñate (2015)

2.8. Perfil longitudinal y pendiente media del cauce principal

Perfil longitudinal

Es la representación gráfica de la línea que traza un curso desde su nacimiento hasta la salida de la cuenca.

Si se plotea la proyección horizontal de la longitud de un cauce versus la altitud, como se observa en la figura 15, se obtiene el perfil longitudinal del curso de agua. Los valores se obtienen de la misma cuenca con la ayuda de las herramientas ofimáticas antes indicadas en el apartado 2.4 para área o perímetro de la cuenca.

| Longitud de cada tramo (m) | Longitud Acumulada (m) | Cota (m.s.n.m) |
|----------------------------|------------------------|----------------|
| 0 | 0 | 3340 |
| 420 | 420 | 3240 |
| 622 | 1042 | 3160 |
| 355 | 1397 | 3080 |
| 187 | 1584 | 3000 |
| 251 | 1835 | 2920 |
| 206 | 2041 | 2840 |
| 224 | 2265 | 2760 |
| 262 | 2527 | 2680 |
| 379 | 2906 | 2600 |
| 151 | 3057 | 2520 |
| 286 | 3343 | 2440 |
| 214 | 3557 | 2360 |
| 306 | 3863 | 2280 |
| 602 | 4465 | 2200 |
| 498 | 4963 | 2120 |
| 441 | 5404 | 2040 |
| 437 | 5841 | 1960 |
| 391 | 6232 | 1880 |
| 416 | 6648 | 1800 |
| 409 | 7057 | 1720 |
| 359 | 7416 | 1640 |
| 364 | 7780 | 1580 |

Datos de partida obtenidos de la carta topográfica. Punto de cota más alto

Punto de cota más bajo del cauce. Cota de salida o desembocadura

Longitud del cauce

Figura 6. Ejemplo de cálculo de longitud de cauce.

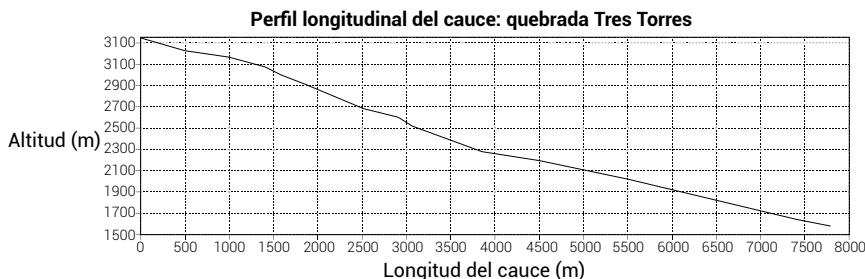


Figura 7. Perfil longitudinal de un cauce

Fuente: elaboración propia

Pendiente media del cauce

Uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta es la pendiente del cauce principal. Dado que la pendiente varía a lo largo del cauce es necesario definir una pendiente media; para ello existen varios métodos, de los cuales se mencionan dos:

1. La pendiente media es igual al desnivel entre los extremos de la corriente dividida entre su longitud medida en planta.

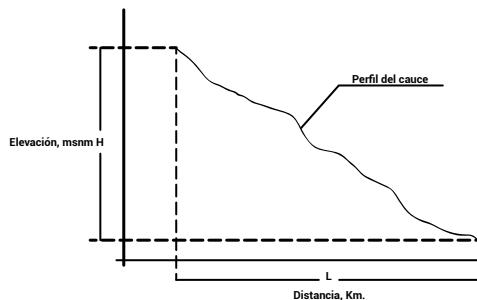


Figura 8. Pendiente del cauce principal

Es la diferencia total de cotas del cauce principal dividido para la longitud del cauce principal.

$$\bar{S} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \quad (11)$$

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Donde:

H_{\max} – Cota más alta en msnm

H_{\min} – Cota más baja en msnm

L_s – Longitud del cauce

Ahora desarrollemos un ejemplo de cálculo.

Ejemplo:

Con los datos de la tabla 4, en cuanto a H_{\max} y H_{\min} , calcule la pendiente media del cauce principal por el método 1.

$$H_{\max} = 3340 \text{ (m.s.n.m.)}$$

$$H_{\min} = 1580 \text{ (m.s.n.m.)}$$

$$L = 7780 \text{ m}$$

$$\bar{S} = \frac{3340 - 1580}{7780} = 0.22 \text{ o } 22.62\%$$

Entonces la pendiente media del cauce principal es del 22.62 %.

2. La pendiente media es la de una línea recta que, apoyándose en el extremo de aguas abajo de la corriente, hace que se tengan áreas iguales entre el perfil del cauce y arriba y abajo de dicha línea.

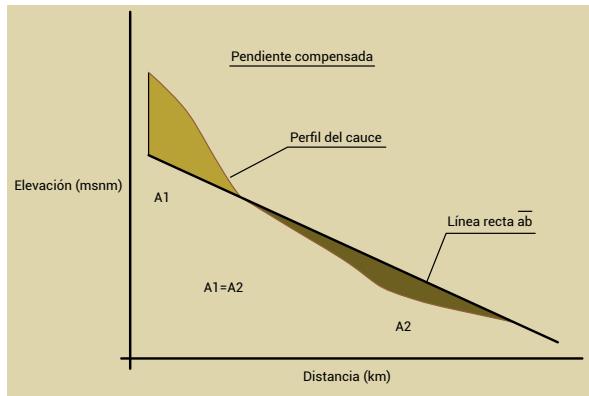


Figura 9. Pendiente del cauce principal-segundo método
Adaptado de: Aparicio (1997)

Procedimiento para determinar el punto de pivote

- Representar en abscisas las longitudes parciales del río y en ordenadas las cotas, siendo las escalas diferentes, uniéndose los puntos con líneas rectas.
- Calcular o medir el área que se encuentra bajo el perfil longitudinal del río y la cota mínima, como se muestra en la figura 18.

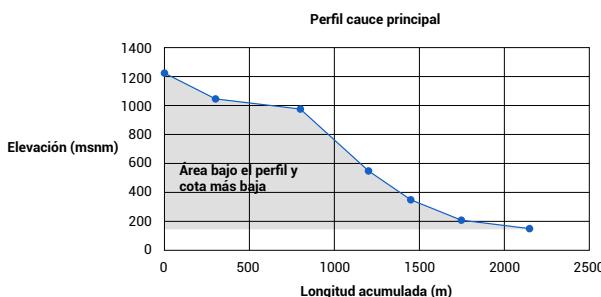


Figura 10. Área bajo el perfil del cauce y la horizontal trazada en la cota mínima con el segundo método

Fuente: elaboración propia

- c. Dividir el área obtenida m^2 para la longitud del río m y este valor se lo suma a la cota mínima para obtener el punto pivote.
- d. Unir con una línea el punto de cota mínima y el pivote para obtener una recta cuya pendiente es la mínima, se debe comprobar que el área sobre dicha línea sea igual a la que está bajo ella con una variación máxima de $\pm 5\%$.

$$\left(\frac{L}{2}; H_{min} + \frac{\text{Area bajo la curva}}{L} \right) \quad (11)$$

Entonces: Con los datos anteriores tenemos:

$$P = \left(\frac{7780}{2}; 1580 + \frac{6383.70}{7780} \right)$$

$P = (3890; 2400.53)$ que son las coordenadas del denominado punto pivote.

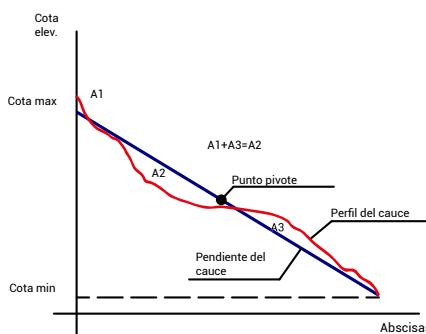


Figura 11. Esquema de ubicación del punto pivote para cálculo de pendiente media

Pendiente media ponderada

Se traza una línea tal que, el área comprendida entre esa línea y los ejes de coordenadas sea igual al área comprendida entre el perfil longitudinal y los ejes de coordenadas.

$$\bar{s}_{pon} = \frac{P_y - H_{min}}{L - P_x} \quad (13)$$

Donde:

P_y – Coordenada y del punto pivote

H_{min} – Cota del cauce en la desembocadura o cota más baja

L – Longitud cauce

P_x – Coordenada x del punto pivote

Ejemplo:

Con los datos obtenidos en el ítem anterior del punto pivote, calculo la pendiente media ponderada del cauce principal.

$$\bar{s}_{pon} = \frac{2400 - 1580}{7780 - 3890} = 0.21 \frac{m}{m} \text{ ó } 21.08\%$$

Pendiente media
ponderada en %

2.9. Curva hipsométrica

La curva hipsométrica sugerida por Langbein (1947), proporciona una información sintetizada sobre la altitud de la cuenca, que representa gráficamente la distribución de la cuenca vertiente por tramos de altura. Dicha curva representa, en ordenadas Y, las distintas cotas de altura de la cuenca, y en abscisas X la superficie de la cuenca que se halla por encima de dichas cotas, bien en km^2 o en porcentaje de la superficie de la cuenca.

- Al valor de cota mayor le corresponde el 0% de superficie con altitud superior

- Al valor de cota menor le corresponde el 100% de superficie con altitud superior.

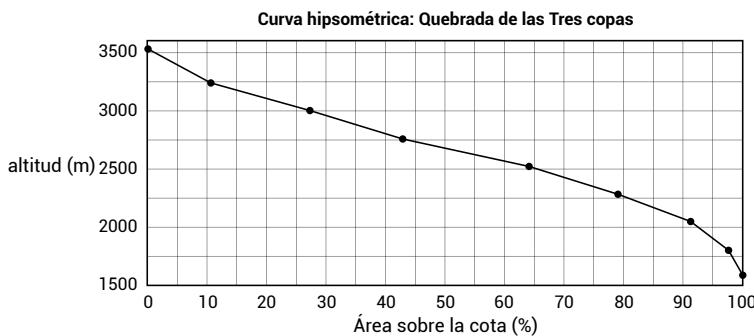


Figura 12. Ejemplo de gráfico de curva hipsométrica

Fuente: elaboración propia.

Continuamos con el desarrollo del siguiente ejemplo de cálculo de curva Hipsométrica y altura media de la cuenca.

Ejemplo:

Con los datos de las columnas 1 y 2 de la tabla 5 a continuación, obtenidos de la cuenca del río San José, determinar la curva hipsométrica y altura media de la misma.

Tabla 5. Ejemplo de cálculo de curva hipsométrica

| Datos de partida | | Cálculos | | | |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|-----------------|
| Fajas (1) m.s.n.m | Área faja (2) km ² | Área acumulada km ² | Área sobre la cota km ² | Cota de referencia m.s.n.m | Porcentaje % |
| <1536 | 0.00 | 0.00 | 10.54 | 1536 | 100.00 |
| 1536 - 1560 | 0.02 | 0,02 | 10.52 | 1560 | 99.81 |
| 1560 - 1640 | 0.29 | 0,31 | 10.23 | 1640 | 97.06 |
| 1640 - 1720 | 0.84 | 1,15 | 9,39 | 1720 | 89.09 |
| 1720- 1800 | 1.75 | 2,9 | 7.64 | 1800 | 72.49 |
| 1800-1880 | 2.23 | 5,13 | 5.41 | 1880 | 51.33 |

| Datos de partida | | Cálculos | | | |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|-----------------|
| Fajas (1) m.s.n.m | Área faja (2) km ² | Área acumulada km ² | Área sobre la cota km ² | Cota de referencia m.s.n.m | Porcentaje % |
| 1880- 1960 | 2.28 | 7,41 | 3.13 | 1960 | 29.70 |
| 1960- 2040 | 1.69 | 9,10 | 1.44 | 2040 | 13.66 |
| 2040-2120 | 1.04 | 10,14 | 0.40 | 2120 | 3.8 |
| 2120-2167 | 0.40 | 10,54 | 0.00 | 2167 | 0.00 |

Se procede a dibujar en el eje de las X los porcentajes de área sobre cada faja altitudinal y en el eje Y las cotas de referencia que le corresponde, así se comprueba que sobre la cota 1536 (desembocadura) se encuentra el 100% del área y, sobre la cota 2167 (inicio de la cuenca) tendríamos el 0 %, como se puede observar en la figura 20.

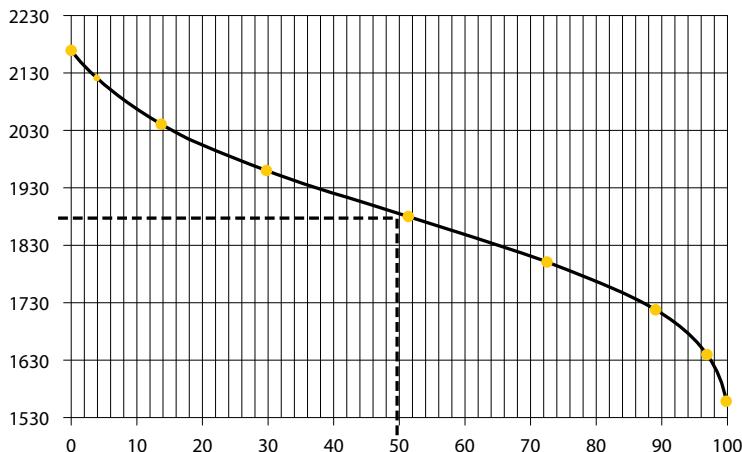


Figura 13. Curva hipsométrica del ejemplo de cálculo

Como se observa en la figura 21, se hace constar las coordenadas de la altitud mediana. Obtenida a partir de la gráfica al prolongar una línea recta en el valor de 50% en el eje de las X (% Área), obteniendo el valor de 1885 m aproximadamente, que calculado de forma aritmética resulta de 1884.97 m. A continuación, revise el cálculo.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Ejemplo:

Con los datos de la tabla 5 de la cuenca del río San José, calcule la H_m .

Recuerde que:

$H_i = \frac{(L_s + L_i)}{2}$ a manera de ejemplo como se obtienen los valores de , se presenta uno de los cálculos:

$$H_i = \frac{1560 + 1536}{2} = 1548 \text{ msnm}$$

Así obtenemos la altura media de cada faja altitudinal. Se muestra los resultados de cálculo en la tabla 6.

Tabla 6. *Datos para cálculo de altura media (H_m)*

| $Hi = (L_s + L_i)/2$ (m) | A_i (km ²) | $Hi \cdot A_i$ |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------|
| 1548 | 0.02 | 30.96 |
| 1600 | 0.29 | 464.00 |
| 1680 | 0.84 | 1411.2 |
| 1760 | 1.75 | 3080 |
| 1840 | 2.23 | 4103.20 |
| 1920 | 2.28 | 4377.60 |
| 2000 | 1.69 | 3380 |
| 2080 | 1.04 | 2163.20 |
| 2143.5 | 0.40 | 857.40 |
| Suma | 10,54 | 19867.56 |

$$H_m = \frac{\sum H_i \cdot A_i}{A_T}$$

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

$$H_m = \frac{19867.56 \text{ km}^2 \cdot m}{10.54 \text{ km}^2} = 1884.97 \text{ m}$$

2.10. Rectángulo equivalente

Este índice es utilizado para comparar el comportamiento hidrológico, la influencia de las características morfométricos de la cuenca sobre la escorrentía. Denominado rectángulo equivalente o rectángulo de *Gravelius*. Se trata de una transformación puramente geométrica en virtud de la cual se asimila la cuenca de un rectángulo que tenga el mismo perímetro y superficie, coeficiente de compacidad **Kc**. La característica más importante del rectángulo equivalente es que tiene igual distribución de alturas que la curva hipsométrica, por tanto, igual coeficiente de *Gravelius*.

Las curvas de nivel se transforman en rectas paralelas al lado menor del rectángulo, y el desagüe de la cuenca, que es un punto, queda convertido en el lado menor del rectángulo.

En este rectángulo las curvas de nivel se transforman en **líneas paralelas**.

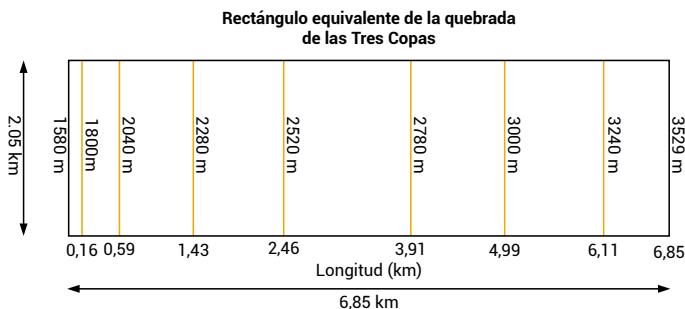


Figura 14. Ejemplo de cálculo de rectángulo equivalente de una cuenca

Para el cálculo de los lados del rectángulo utilizamos las siguientes expresiones:

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

A_t – Superficie de la cuenca

L_t – Lado mayor del rectángulo

l_t – Lado menor del rectángulo

K_c – Índice de *Gravelius*

Para el desarrollo de cálculos partimos de datos conocidos que se obtienen de la carta topográfica y ya delimitada la cuenca haciendo uso de las diferentes herramientas ofimáticas antes indicadas o mediciones con instrumentos. En este caso de los intervalos de altitud (fajas topográficas), y el área en cada faja altitudinal.

Los intervalos los define el usuario, pero deben quedar representadas todas las altitudes de la cuenca.

Para la selección de los intervalos de altitud es necesario apoyarse en las curvas de nivel.

Los valores de lado mayor y lado menor del rectángulo equivalente se calculan mediante las ecuaciones:

Lado mayor

$$L = \frac{K_c \times \sqrt{A_t}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (13)$$

Lado menor

$$l = \frac{K_c \times \sqrt{A_t}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (14)$$

Ejemplo:

Dado el valor del coeficiente de compacidad $K_c = 1.33$; área de la cuenca $A = 14.07 \text{ km}^2$ y los datos de intervalos de altitud, superficie y longitud de la tabla 7; determine la distribución de las fajas altitudinales en el rectángulo equivalente de la cuenca de la quebrada Tres copas.

Entonces:

$$L = \frac{1.33 \times \sqrt{14.07}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{1.13} \right)^2} \right] = 6.85 \text{ km}$$

Lado mayor

$$l = \frac{1.33 \times \sqrt{14.07}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{1.13} \right)^2} \right] = 2.05 \text{ km}$$

Lado menor

Tabla 7. Ejemplo de cálculo de rectángulo equivalente.

| Intervalos de altitud (m) | Superficie (km^2) | Superficie acumulada (km^2) | Longitud parcial (km) |
|---------------------------|------------------------------|--|-----------------------|
| < 1580 | 0 | 0 | 0.00 |
| 1580-1800 | 0.33 | 0.33 | 0.16 |
| 1800-2040 | 0.89 | 1.22 | 0.43 |
| 2040-2280 | 1.72 | 2.94 | 0.83 |
| 2280-2520 | 2.11 | 5.05 | 1.03 |
| 2520-2760 | 2.98 | 8.03 | 1.45 |
| 2760-3000 | 2.21 | 10.24 | 1.07 |
| 3000-3240 | 2.31 | 12.55 | 1.13 |
| 3240-3529 | 1.52 | 14.07 | 0.74 |
| Suma | 14.07 | 6.85 | Lado mayor (L) |

$$\text{Long parcial} = \frac{\text{Sup. parcial}}{l \text{ (lado menor)}}$$

$$\text{Long parcial} = \frac{0.33}{2.05} = 0.16$$

Es importante que en la figura aparezcan todas las unidades correctamente.

Las distancias entre las curvas de nivel son proporcionales a las áreas que separan dichas curvas en la cuenca, si multiplicamos base por altura nos darán superficies reales.

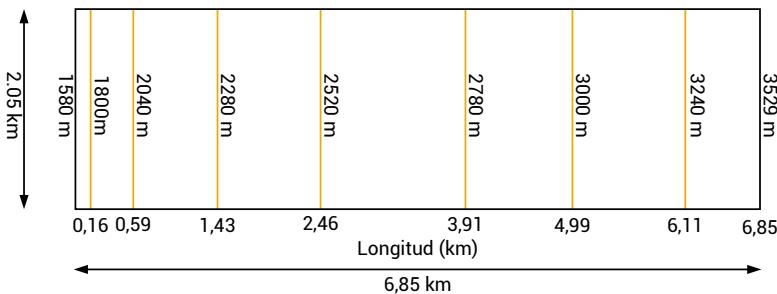


Figura 15. Rectángulo equivalente de la cuenca de la Quebrada Tres copas



Actividades de aprendizaje recomendadas

¡Felicitaciones! Usted ha concluido la unidad 2 y, está preparado para pasar al siguiente parámetro del ciclo hidrológico que es la precipitación; pero antes le recomiendo realizar la siguiente actividad:

Revise detenida y analíticamente los contenidos de esta semana que corresponde a los subtemas 2.7 al 2.10, aquí usted verá los métodos, ecuaciones y ejemplos de cálculo de lo que se le está solicitando en la actividad que es calificada. Es aconsejable que vaya extrayendo un formulario, que facilite su estudio y aplicación.

Finalmente, para conocer su nivel de aprendizaje, autoevalúese, desarrolle la autoevaluación 2.



Autoevaluación 2

1. Lea detenidamente los siguientes enunciados y conteste con (V) si considera que es verdadero y con (F) si lo considera falso.
 - a. () Una cuenca hidrográfica es una superficie terrestre cuya lluvia tiende a drenar por un curso de agua principal hacia uno o dos puntos de salida.
 - b. () En una cuenca exorreica los puntos de salida se encuentran en los límites de la cuenca.
 - c. () El parteaguas es la línea que existe y está formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de cuencas vecinas.
 - d. () La divisoria topográfica superficial y la divisoria subterránea coinciden en al menos un punto.
 - e. () Una cuenca de aportación tiene una o dos corrientes principales.
2. En el siguiente gráfico, señale lo siguiente:
 - a. Parteaguas o divisoria.
 - b. Señale el cauce principal (su inicio y salida).
 - c. Orden de corriente de la cuenca, según el criterio de *Horton*.
 - d. Indique si se trata de una cuenca endorreica o exorreica.

Índice

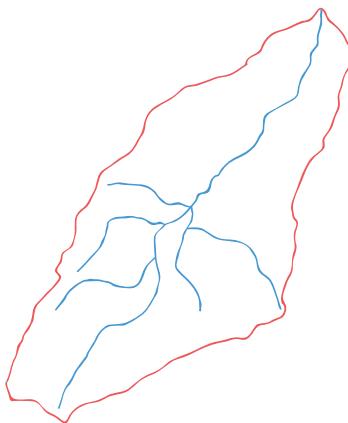
Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos



3. Complete el siguiente concepto de Coeficiente de compacidad

Es la relación entre el _____ de la cuenca y la _____ de un círculo de _____ al de la cuenca. En cualquier caso, el coeficiente será _____ que la unidad.

4. Indique qué variables intervienen en el cálculo del coeficiente de pendiente global Ig.

| |
|--|
| |
| |
| |

5. ¿Qué nos indica un valor alto o bajo de este coeficiente?

| |
|--|
| |
| |

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

6. Señale la respuesta correcta a la siguiente aseveración:
Para poder comparar el comportamiento hidrológico de dos cuencas, se utiliza la noción de rectángulo equivalente. Por tanto, si se trata de una transformación puramente geométrica en virtud de la cual se asimila que la cuenca de un rectángulo debe tener:
- a. () Igual coeficiente de compacidad o *Gravelius*.
 - b. () Aproximadamente el mismo perímetro y superficie.
 - c. () Distribución uniforme de fajas altitudinales.

[Ir al solucionario](#)

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos



Semana 4



Unidad 3. Precipitación

Es hora de continuar con el estudio de los parámetros o fenómenos del ciclo hidrológico, por tanto, en esta semana iniciaremos el estudio de la precipitación y, como ya se habrá dado cuenta hasta este punto de estudio, es indispensable que usted analice detenidamente cada subtema y desarrolle capacidad de síntesis para que avance adecuadamente en su aprendizaje que es secuencial y basado en problemas.

Le invito a revisar la unidad 3 y los subtemas preparados para la presente semana de estudio.

3.1. Introducción

La precipitación tiene como principal fuente de humedad la evaporación desde la superficie de los océanos y grandes cuerpos de agua. Sin embargo, la cercanía a los océanos no conlleva una precipitación proporcional, como lo demuestran muchas islas desérticas.

Ahora,

el régimen hidrológico de una región es función de características físicas, geológicas, topográficas y climatológicas. Los factores climatológicos más importantes son la precipitación, la evaporación, la temperatura y humedad del aire, y los vientos; estos tres últimos en medida en que ejercen influencia sobre la precipitación y la evaporación (Monsalve Sáenz, 2011) p 59.e).

Por otra parte, Heras (2000) menciona que los factores del clima como latitud, altitud, continentalidad, corrientes marinas, vientos dominantes y las barrerasorográficas, son las que determinan la humedad atmosférica sobre una región.

Considerando que la ingeniería hidrológica tiene a la precipitación como fuente primaria del agua superficial y, sus mediciones son el punto de partida de la mayor parte de los estudios para uso, control y aprovechamiento de los recursos hídricos, en esta unidad se estudiarán dos aspectos fundamentales de la precipitación:

- a. La manera en que se produce y algunos métodos con que se puede predecir dadas ciertas condiciones atmosféricas y,
- b. La manera en que se mide la precipitación y diversos criterios para el análisis, síntesis, corrección y tratamiento de los datos.

3.2. Definición

Se define como precipitación a toda forma de humedad, que originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre. De acuerdo con esta definición, las lluvias, las granizadas, las garúas y las nevadas son formas distintas del mismo fenómeno de la precipitación. La unidad en la que se expresa la precipitación es en función de altura de lámina, esto es: [mm]

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Entonces, para predecir o evaluar la respuesta hidrológica de una cuenca necesitamos determinar la **cantidad, intensidad y duración de la precipitación**, sobre una base espacial y temporal.

3.3. Origen

La precipitación tiene lugar cuando el aire húmedo se eleva, se expande, (al enfriarse) se enfriá lo suficiente para que el vapor del agua en el aire alcance el punto de condensación.

La atmósfera es rica en los llamados núcleos de condensación, principalmente partículas de suelo arcilla, productos residuales de hidrocarburos, sales marinas, entre otros. Con tamaños aproximados de 0.1 micrómetros.



Figura 16. Precipitación en forma de lluvia

Recuperado de: [enlace](#)

Para que la precipitación se produzca, necesitamos la presencia de núcleos de condensación en los que pueda iniciarse la propia condensación, en ausencia de ellos el aire puede llegar a sobresaturarse.

Estas gotas condensadas no deben evaporarse cuando atraviesan el aire más seco y deben ser de tamaño suficiente para caer libremente bajo la fuerza de la gravedad hacia la superficie de la tierra.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

La abundancia de los núcleos de condensación es tal que la probabilidad de que se formen gotitas a partir de la humedad del aire es muy alta, el tamaño inicial de las gotas es de 1/100 mm, para que ocurra la precipitación los elementos de la nube deben aumentar su tamaño y peso hasta que su velocidad de caída exceda la taza ascensional del aire, de no darse esto puede que la nube desaparezca lentamente por evaporación.

El agua en las nubes: diámetro aproximado de las gotas ≥ 0.02 mm, espaciamiento entre gotas ≥ 1 mm masa ≥ 0.5 a 1 gr/m³.

El agua de lluvia: diámetro ≥ 0.5 a 2 mm. El aumento de tamaño de las gotas de agua se produce por varios fenómenos. Uno de ellos es la coalescencia.

Como no todos los núcleos forman gotas muy grandes hay probabilidad de que ellas se unan por azar, por atracción electrostática, o por efecto de la turbulencia dentro de la nube para dar lugar a uno más grande y precipitable. En la caída incrementan su tamaño por su coalición con otras gotas de agua.

3.4. Tipos de precipitación

Tipos de precipitación

- Según el mecanismo que origina el ascenso de la masa húmeda, se pueden distinguir tres tipos de precipitaciones.

[Ir a recursos](#)

3.5. Medición de la precipitación

Para la medición de precipitación tenemos la pluviometría, que es la parte de la meteorología que mide y estudia la cantidad, la intensidad

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

y la regularidad de las lluvias según el espacio geográfico y las estaciones del año y se mide en espesor de lámina.

Instrumentos de medida:

Los instrumentos de medida más utilizados son los pluviómetros y los pluviógrafos. Sin embargo, existen otros equipos como los radares y satélites.

Pluviómetro: Es un instrumento que sirve para medir las cantidades de precipitación, altura de lámina de agua llovida; el periodo de tiempo empleado para hacer la medición, por lo general es de un día. Está constituido por un cilindro cuyo extremo superior o boca está formado por un anillo biselado de 200 cm^2 de superficie, aunque el tamaño varía acorde a las especificaciones técnicas del fabricante.

El agua recogida es conducida por un embudo hacia un recipiente interior llamado colector. La medición de la precipitación recogida se la realiza mediante una probeta graduada en mm en la que se vierte el agua almacenada en el colector.



Figura 17. Pluviómetro
Recuperado de [enlace](#)

En el mercado, también existen pluviómetros digitales, los cuales registran la precipitación de forma automática o en base a la configuración establecida.

Pluviómetro totalizador: Es un instrumento que permite obtener, en una sola medida el total de precipitación caída en un largo periodo de

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

tiempo. Se emplea en lugares de difícil acceso, la medición se realiza con una varilla graduada, para evitar la evaporación se usa aceite, para evitar el congelamiento se usa Cl_2Ca . Es recomendable instalar para validar datos medidos con sensores.

Pluviógrafo: Establece la distribución de la lluvia en el tiempo. El registro se realiza en una faja de papel (pluviograma) y permite determinar cantidades de precipitación en períodos cortos de duración, tal como se observa en la figura 29.

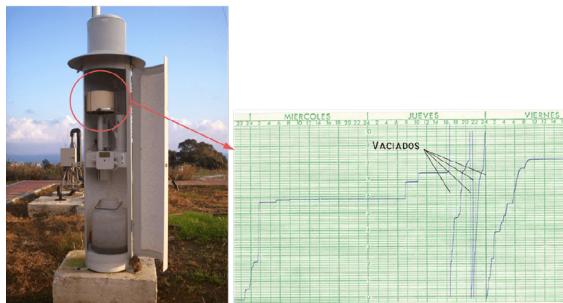


Figura 18. Pluviógrafo y faja pluviográfica

Recuperado de: [Enlace](#)

Radar: La medición se realiza según el grado de reflectividad de la precipitación, pudiéndose estimar la extensión y la magnitud. Mientras más intensa sea la precipitación mayor será la reflectividad. La longitud de onda electromagnética de los radares meteorológicos es variable según el tipo.

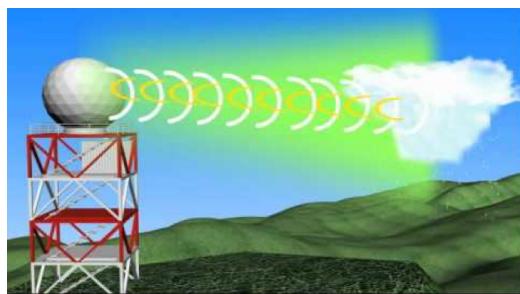


Figura 19. Radar meteorológico

Recuperado de: [Enlace](#)

Satélite: Se emplea en lugares de difícil acceso y la cuantificación se realiza mediante el coeficiente de precipitación con el que se relaciona la cantidad y el tipo de nubosidad con las mediciones obtenidas con otros procedimientos.

3.6. Análisis de la calidad de los registros

Existen estaciones pluviométricas con falta de datos en su registro, estos pueden ser por errores humanos o, de los equipos por fallas temporales en el registro de la información.

Los requerimientos de información en hidrología son de series continuas de datos, por tanto, al tener datos faltantes o la denominada porosidad de información, antes de aplicar la información pluviométrica es necesario someterla a tres procesos:

- Relleno de datos faltantes
- Extensión de series hasta un periodo común
- Chequeo de homogeneidad

Los métodos para relleno de datos son varios:

Relleno con datos de la misma estación: método de la razón normal y el método de las proporcionalidades.

Relleno con datos de otras estaciones; para esto debe considerarse que los datos de las estaciones a considerar deben tener las mismas condiciones meteorológicas, además de que los accidentes topográficos no afecten la continuidad del régimen y que la estación base cuente con estadísticas reales, confiables y seguras, los de mayor aplicación son:

- a. Método de las U.S. Weather Service
- b. Extensión de la estadística: método de correlación lineal, método de correlación ortogonal.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

En esta asignatura, no estudiaremos estos métodos ya que demanda de un estudio minucioso y detallado por el manejo de cálculos estadísticos, y manejo de extensas bases de dato; para avanzar en el estudio de la precipitación, tomaremos bases de datos completas, que ya han sido trabajadas en el relleno de información faltante.



Actividades de aprendizaje recomendadas

Revise nuevamente los contenidos en una lectura analítica y comprensiva de los subtemas de la unidad del 3.1 al 3.6, para que se familiarice con los términos y variables que intervienen en el estudio de la precipitación.

Finalmente, amplíe sus conocimientos sobre precipitación. Realice la lectura del documento sobre métodos de relleno de datos y extensión de estadísticas que puede descargar o leer directamente desde el [enlace](#), que le permitirá tener una idea del proceso de relleno de datos.

Como podrá observar, en el documento existen varios métodos para el relleno o extensión de estadísticas de datos de precipitación, la aplicación de cualquiera de ellos dependerá de la información que posea.



Semana 5

Continuamos con el estudio de la precipitación y los métodos que existen para definir la **precipitación media** de una cuenca; como se mencionó en la semana anterior, para el cálculo tomaremos datos de

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

precipitación ya trabajados, es decir, que ya han sido tratados y se ha completado las series de datos de precipitación de las estaciones.

Para el efecto, revise los subtemas a continuación, tome nota y analice cuidadosamente las variables que intervienen y los datos a utilizar.

3.7. Precipitación media sobre una cuenca

A partir de los datos registrados en las estaciones pluviométricas, se puede calcular la precipitación media de una cuenca. Siendo particularmente útil la precipitación media anual, o módulo pluviométrico anual de la cuenca.

Es menester mencionar que los pluviómetros deben ubicarse estratégicamente y en número suficiente para que la información que se recopila sea de buena calidad.

En el manejo de la información pluvial, para varias aplicaciones hidrológicas, es necesario conocer la altura de la lámina de agua sobre determinada área, lo que es factible establecer si se cuenta en la zona con datos puntuales. Cuando la lámina de agua está referida a una cuenca hidrográfica, estamos hablando de la precipitación media de una cuenca.

Entonces, la precipitación media de una cuenca se define como “La altura de la lámina que se formaría sobre la superficie de una cuenca a consecuencia de las lluvias en ella registradas”. Es un caso idealizado, pues las condiciones mismas del suelo y la distribución espacial de las lluvias lo imposibilitan.

Según el periodo considerado las precipitaciones pueden ser:

- Media mensual
- Media anual
- Plurianual, etc.

Para su determinación existen varios métodos, así, revisaremos los siguientes:

- Método de la media aritmética
- Método de los Polígonos de *Thiessen*
- Método de la *US Weather Service*
- Método de las isoyetas
- Curvas isoporcentuales

La aplicación de estos métodos requiere conocer la precipitación puntual de la mayor cantidad de estaciones que estén tanto dentro de la cuenca como próximas a ella.

3.7.1. Método de la media aritmética

Este método solo es aplicable a zonas planas donde las estaciones presenten una distribución uniforme y las lluvias registradas por cada pluviómetro no difieran mucho entre sí. Se recomienda este método para **cálculos preliminares**. Entonces:

$$P = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{n} \quad (15)$$

Donde:

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ – Precipitaciones anuales observadas en las estaciones.

n – Número de estaciones

3.7.2. Polígonos de Thiessen

Este método se aplica en zonas donde la topografía no afecte considerablemente a la distribución de las lluvias.

Tenemos una cuenca de área A en la cual se encuentran dentro y fuera de ella una cierta cantidad de pluviómetros y, en cada pluviómetro se registra una cantidad de lluvia acumulada P_i .

Mediante el método de los polígonos de Thiessen se trata de evaluar el área de la cuenca que le pertenece a cada pluviómetro. De esta manera se puede establecer una correspondencia entre cada área de influencia en concreto del pluviómetro y el instrumento mismo.

Se define el alcance del pluviómetro como la mitad de la distancia entre dos pluviómetros consecutivos. Vea la figura 31.

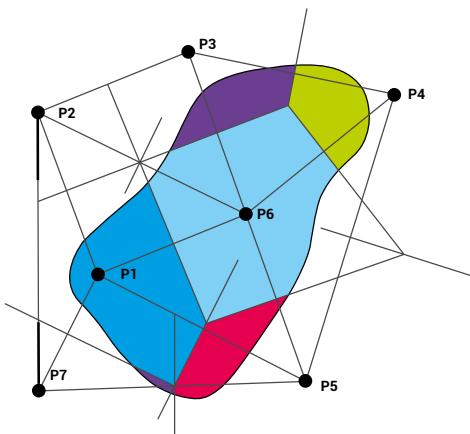


Figura 20. Distribución de áreas según los Polígonos de Thiessen
Recuperado de: [enlace](#)

La forma de determinar estas áreas es la siguiente:

1. Ubicar la cuenca y sus estaciones vecinas.
2. Unir las estaciones formando triángulos.
3. Trazar las **mediatrices** de los lados de los triángulos formando polígonos. Cada polígono es el área de influencia de una estación;
4. Determinar las áreas $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ de los polígonos.

5. Cada estación es particular del área que le rodea, la altura de lámina de lluvia se obtiene aplicando la ecuación:

$$P_m = \frac{P_1 A_1 + P_2 A_2 + P_3 A_3 + \dots + P_n A_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad (16)$$

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (17)$$

Donde:

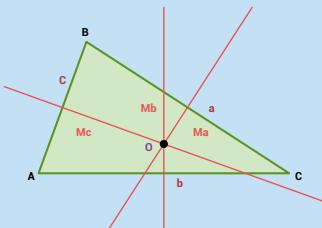
P_m – Precipitación media de la cuenca

P_i – Precipitación registrada en cada estación

A_i – Área parcial de cada polígono

La **mediatriz** de un triángulo es la recta perpendicular a dicho lado que pasa por el punto medio (o centro) de este.

Las tres mediatrices de un **triángulo** confluyen en un punto llamado circuncentro.



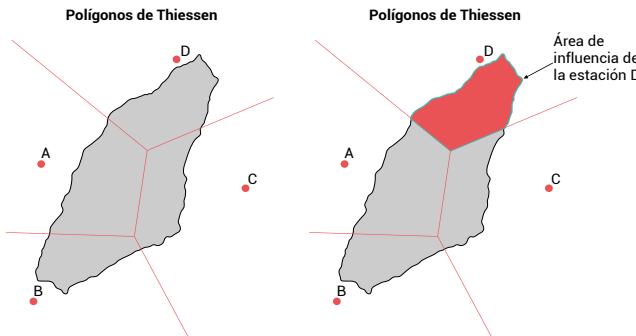


Figura 22. Polígonos de Thiessen para una cuenca

Fuente: elaboración propia

Se calcula como una media ponderada por el área de influencia de cada estación meteorológica. Se puede utilizar cuando se tenga una distribución no uniforme de las estaciones y si la superficie de la cuenca es relativamente plana. (Monsalve, 2009).

Ejemplo:

Dados los siguientes datos obtenidos del trazado de los polígonos de Thiessen en una cuenca y determinadas sus áreas de influencia, calcule la precipitación media de la cuenca.

Tabla 8. Áreas de polígonos de Thiessen

| Estación | Precipitación P(mm) | Área (km ²) |
|-----------|---------------------|-------------------------|
| Argelia | 1052.20 | 4.85 |
| Malacatos | 871.90 | 2.59 |
| Zamora | 1865.80 | 2.99 |
| San Lucas | 1124.50 | 3.64 |

Los datos de área se obtienen de la gráfica, en este caso.

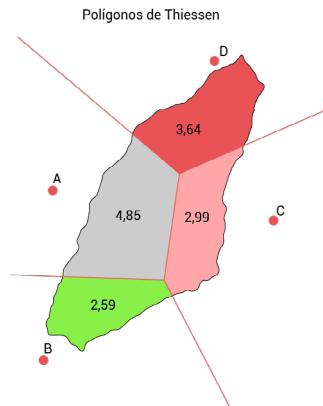


Tabla 9. Cálculo de precipitación media por Thiessen

| Estación | Precipitación P(mm) | Área | Pi* Ai |
|------------------|---------------------|--------------|-----------------|
| Argelia | 1052.20 | 4,85 | 5103.17 |
| Malacatos | 871.90 | 2,59 | 2258.22 |
| Zamora | 1865.80 | 2,99 | 5578.74 |
| San Lucas | 1124.50 | 3,64 | 4093.18 |
| Sumatoria | | 14.07 | 17033.31 |

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \bar{P} = \frac{17033,313}{14,07}$$

$$\bar{P} = 1210.61 \text{ mm}$$

3.7.3. Método de la distancia inversa al cuadrado

Es similar al método descrito anteriormente. Se aplica con buenos resultados en cuencas con áreas inferiores a 50 km² y su aplicación se realiza con respecto al centro de gravedad de la cuenca.

Este método estima la precipitación en un punto, como un promedio ponderado de otras cuatro estaciones, cada una ubicada en un

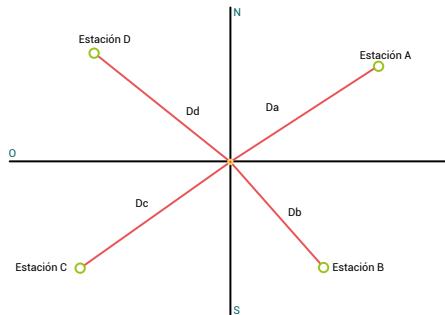


Figura 22. Esquema representativo de aplicación del método de la distancia inversa al cuadrado

Fuente: elaboración propia

Este método proporciona resultados aceptables cuando se dispone de una malla de puntos densos y con variaciones suaves. Cuando la red está dispersa y con altas variaciones, sus resultados no suelen ser muy representativos.

El factor de ponderación es el inverso del cuadrado de la distancia entre la estación y el punto de interés.

$$P_{mx} = \frac{\frac{P_{ma}}{D_{a^2}} + \frac{P_{mb}}{D_{b^2}} + \frac{P_{mc}}{D_{c^2}} + \frac{P_{md}}{D_{d^2}}}{\frac{1}{D_{a^2}} + \frac{1}{D_{b^2}} + \frac{1}{D_{c^2}} + \frac{1}{D_{d^2}}} \quad (18)$$

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i / D_i^2}{\sum_{i=1}^n 1 / D_i^2} \quad (19)$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Donde:

P_i – Precipitación en la estación i

n – Número de estaciones

D_i – Distancia entre la estación i y el centroide de la cuenca.

Si uno o más cuadrantes no contienen estaciones, el cálculo se realiza con los disponibles, una desventaja del método es que no puede dar un estimativo mayor a la máxima observación ni menor que la mínima. En las regiones montañosas es conveniente expresar los valores de la precipitación como un porcentaje de la precipitación normal anual.

La distancia de la estación al centroide de la cuenca en análisis se puede calcular por la expresión:

$$D_{ab} = \sqrt{(X_a - X_b)^2 + (Y_a - Y_b)^2} \quad (20)$$

Donde:

X_a – Coordenada geográfica longitud del centroide del punto A

X_b – Coordenada geográfica longitud de la estación del punto B

X_a – Coordenada geográfica latitud del centroide del punto A

X_b – Coordenada geográfica latitud de la estación del punto B

La manera más fácil de determinar el centroide de una cuenca es utilizando el método gráfico, para ello hay que materializar la cuenca utilizando cartón rígido a la misma escala de la cuenca, luego se suspende mediante un hilo flexible con un peso que funcione como plomada, desde dos puntos opuestos de la cuenca en su perímetro.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

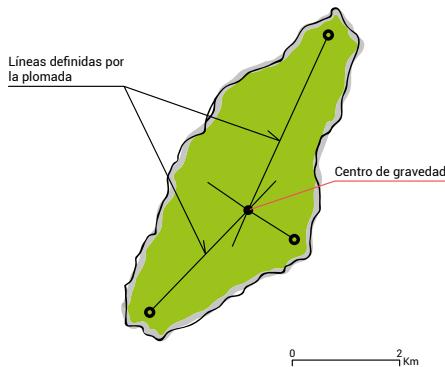


Figura 23. Trazado de centroide de una cuenca

Fuente: elaboración propia.

Ejemplo:

Dados los siguientes datos de la cuenca y estaciones, calcule la precipitación media por el método de la distancia inversa al cuadrado.

Los datos de precipitación y distancia calculadas son:

Tabla 10. *Datos para cálculos de precipitación media - Método de distancia inversa al cuadrado*

| Estación | Precipitación P(mm) | Distancia D(km) |
|-----------|---------------------|-----------------|
| Argelia | 1052.20 | 17.00 |
| Malacatos | 871.90 | 27.71 |
| Zamora | 1865.80 | 12.51 |
| San Lucas | 1124.50 | 45.43 |

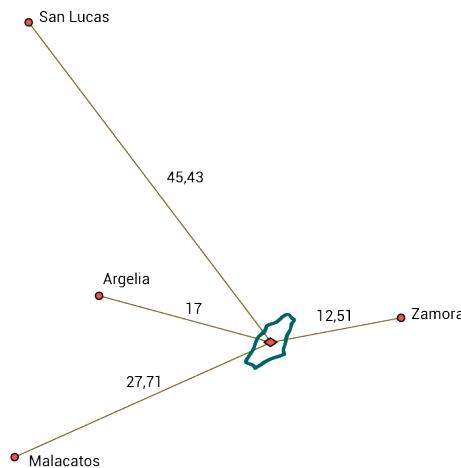


Tabla 11. Procedimiento de cálculo - Método de distancia inversa al cuadrado

| Estación | P (mm) | Distancia D (km) | Cálculos | | |
|-------------|--------|------------------|---|-----------------------------------|----------------------|
| | | | Distancia al cuadrado D ² (km) | P _i ÷ D ² i | 1 ÷ D ² i |
| Argelia | 1052.2 | 17.00 | 289.00 | 3.64 | 0.0035 |
| Malacatos | 871.9 | 27.71 | 767.84 | 1.14 | 0.0013 |
| Zamora | 1865.8 | 12.51 | 156.50 | 11.92 | 0.0064 |
| San Lucas | 1124.5 | 45.43 | 2063.88 | 0.54 | 0.0005 |
| Suma | | | | 17.24 | 0.0116 |

Aplicando la expresión: $\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i / D_i^2}{\sum_{i=1}^n 1 / D_i^2}$, resulta:

$$\bar{P} = \frac{17.24}{0.0116} = 1\,486.21\text{ mm}$$

3.7.4. Método de las curvas isoyetas

El método de las isoyetas, como su nombre indica, determina las líneas de igual altura de precipitación. En todo el plano y después se calcula el área entre las curvas, determinándose así la precipitación caída entre estas.

Es el método más preciso de los estudiados, aunque para esto se deben considerar los efectos orográficos en el trazado de las isoyetas.

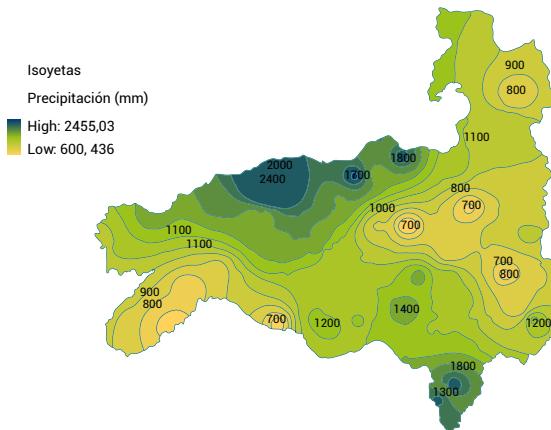


Figura 24. Distribución y cálculo de isoyetas para precipitación media
Recuperado de: [enlace](#)

La construcción de las curvas isoyetas se realiza siguiendo el procedimiento:

1. Se traza un plano de la cuenca y las estaciones aledañas a ella.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

2. Se realiza una triangulación de las estaciones, aplicando el criterio de la menor distancia, siempre que eso no implique enlazar dos estaciones separadas por un accidente topográfico que permita la formación de regímenes climáticos diferentes.
3. Se realiza la interpolación lineal entre las estaciones con la finalidad de encontrar los puntos de igual precipitación.
4. Empleando líneas de curvas suaves y continuas se unen los puntos de igual precipitación en forma similar al método empleado en curvas de nivel.
5. Ayudados por la topografía y la dirección de los vientos se corrigen las curvas isoyetas dándoles la forma correcta de acuerdo con el relieve y a la orientación de los frentes de lluvia dominantes.

Para el cálculo de la precipitación media se emplea la expresión:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) \cdot A_{i,i+1}}{\sum_{i=1}^{n-1} A_{i,i+1}} \quad (65)$$

Donde:

P_i – Valor de la precipitación de la isoyeta i

P_{i+1} – Valor de precipitación de la isoyeta $i + 1$

$A_{i,i+1}$ – Superficie entre la isoyeta i y la isoyeta $i + 1$

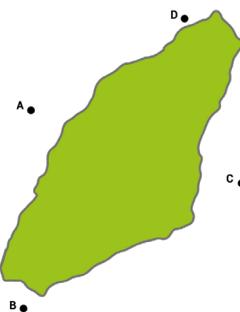
n – Número de isoyetas

Ejemplo:

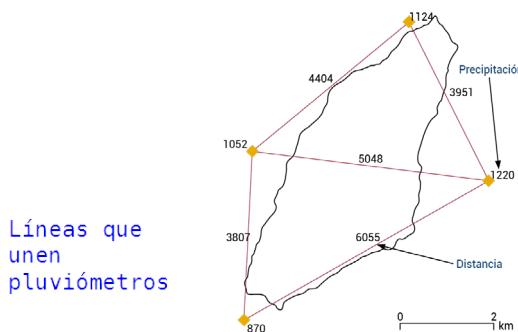
Con los datos que se detallan a continuación aplicar el método de las isoyetas para determinar la precipitación media de la cuenca.

Tabla 12. *Datos de precipitación para ejemplo*

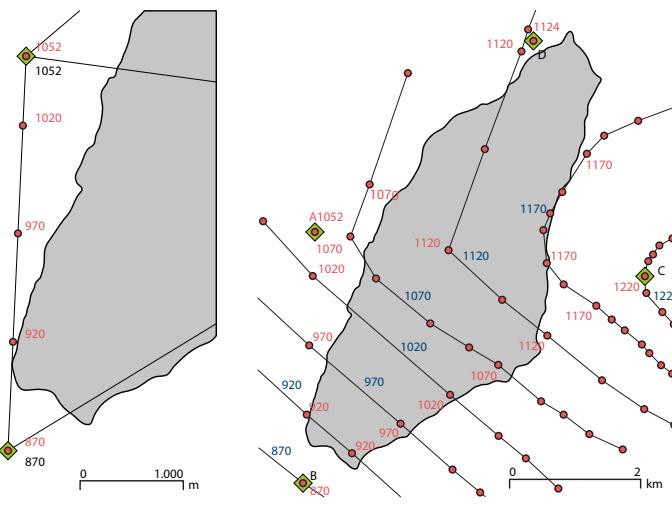
| Estación | P (mm) |
|----------|--------|
| A | 1052 |
| B | 870 |
| C | 1220 |
| D | 1124 |



Se realiza la triangulación de las estaciones y se determina la distancia entre las estaciones. Recuerde que el dato que coloca es el de precipitación anual en cada estación.



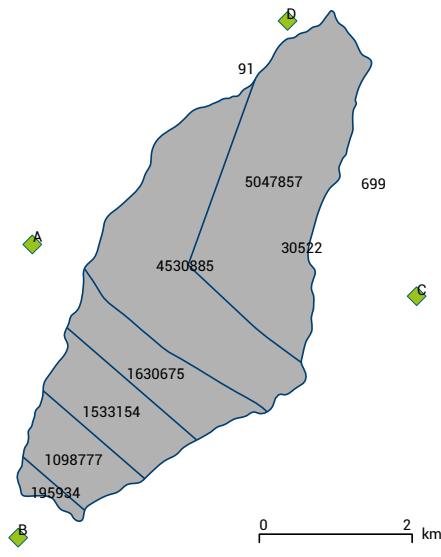
Interpolamos y se determinan las isolíneas de precipitación.



Se define el área de entre isolíneas.

Tabla 13. Procedimiento de cálculo de isolíneas

| Intervalo Pi+Pi-1 mm | Intervalo de referencia (Pi+Pi-1)/2 (mm) | Área A(m ²) |
|----------------------------|---|----------------------------|
| 870 920 | 895 | 195.93 |
| 920 970 | 945 | 1098.78 |
| 970 1020 | 995 | 1533.15 |
| 1020 1070 | 1045 | 1630.68 |
| 1070 1120 | 1095 | 4530.98 |
| 1120 1170 | 1145 | 5047.86 |
| 1170 1220 | 1195 | 31.22 |
| Total | | 14068.60 |

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Aplicamos la ecuación:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{P_i + P_{i-1}}{2} \right) \cdot A_{i,i-1}}{\sum_{i=1}^{n-1} A_{i,i-1}}$$

| De menor a mayor precipitación | | | | |
|--------------------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| P(B) (mm) 870 | P(A) (mm) 1052 | ΔP (mm) 182 | D _i (m) 3807 | Gradiente (G) m/mm 20.92 |

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

| Isoyeta (mm) | Dif (mm) | Distancia D(m) | Dist. Acumul. (m) |
|--------------|------------|----------------|-------------------|
| 870 | 0 | 0 | 0 |
| 920 | 50 | 1046 | 1046 |
| 970 | 50 | 1046 | 2092 |
| 1020 | 50 | 1046 | 3138 |
| 1052 | 32 | 669 | 3807 |
| Total | 182 | | |

| Intervalo Pi - Pi+1 (mm) | Intervalo de Referencia (Pi - Pi+1)/2 I.ref (mm) | Área A (m ²) | I.ref i x Ai |
|--------------------------|---|--------------------------|----------------------|
| (mm) | I.ref (mm) | A (m ²) | |
| 870-920 | 895 | 195.93 | 175 360.93 |
| 920-970 | 945 | 1 098.78 | 1 038 344.26 |
| 970-1020 | 995 | 1 533.15 | 1 525 488.23 |
| 1020-1070 | 1045 | 1 630.68 | 1 704 055.37 |
| 1070-1120 | 1095 | 4 530.97 | 4 961 418.72 |
| 1120-1170 | 1145 | 5 047.86 | 5 779 796.27 |
| 1170-1220 | 1195 | 31.22 | 37 309.10 |
| Total | | 14 068.59 | 15 221 772.88 |

$$\bar{P} = \frac{15221772.88}{14068.59} = 1081.87 \text{ mm}$$

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos



Actividades de aprendizaje recomendadas

¡Bien hecho! Ha concluido su estudio de la unidad 3 Precipitación. Ahora le recomiendo revisar nuevamente mediante una lectura pausada y analítica de los subtemas del 3.7 al 3.7.4 e intente desarrollar con autonomía los ejemplos de cálculo resueltos, para esto, puede ayudarse de un formulario que usted va obteniendo durante la revisión de los subtemas, este será de gran ayuda. No olvide, siempre, identificar las variables y las unidades en las que ingresa, cada una de ellas, en las ecuaciones.

Finalmente, puede comprobar su nivel de aprendizaje dando contestación a la autoevaluación 3.



Autoevaluación 3

Lea detenidamente los siguientes enunciados y conteste como corresponde en cada una las preguntas que se formula, sea dicotómicas o de selección múltiple.

1. Señale la respuesta correcta: Los factores climáticos más importantes para que se genere precipitación son:
 - a. Temperatura, condensación, coalescencia.
 - b. Temperatura, humedad y frentes.
 - c. Temperatura, humedad del aire, tipo de suelo, vientos.
 - d. Temperatura, latitud, continentalidad, longitud.

2. Señale la respuesta correcta: Según el mecanismo que origina el ascenso de la masa húmeda, las precipitaciones pueden ser:
 - a. Lluvia, llovizna, garúa, granizo, nieve.
 - b. Lluvia, rocío, neblina.
 - c. Frente frío, frente húmedo, ciclón.
 - d. Convectiva, orográfica, convergencia.
 - e. Ninguna de las anteriores.

3. Señale la respuesta correcta: las estaciones pluviométricas nos proporcionan datos de precipitación:
 - a. Diaria.
 - b. Mensual.
 - c. Anual.
 - d. Ninguna de las anteriores.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

4. Determine con verdadero (V) o Falso (F) las siguientes aseveraciones:

| | |
|--|--|
| El método idóneo para el cálculo de precipitación media es el método geométrico. | |
| El chequeo de homogeneidad de estaciones se debe realizar previamente al relleno de datos. | |
| El cálculo de precipitación media por el método de polígonos de Thiessen es idóneo para regiones de sierra o presencia de elevaciones. | |

5. Señale la respuesta correcta. Para la aplicación del método de la distancia inversa al cuadrado, se debe considerar que:
- Es aplicable siempre y cuando la red de estaciones sea densa y con variaciones altas.
 - Es aplicable aun cuando la red de estaciones sea dispersa.
 - Es aplicable siempre y cuando la red de estaciones sea densa y con variaciones suaves.
 - Ninguna de las anteriores.
6. Señale la respuesta correcta: el método de la *US Weather Service* utiliza el dato de:
- Distancia entre estaciones.
 - Distancia al centroide.
 - Distancia del centroide a la estación de mayor precipitación.
 - Ninguno de los anteriores.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

7. Señale con verdadero o falso:

| | |
|---|--|
| Para el método de los polígonos de Thiessen, se unen mediante líneas las estaciones que se encuentran en el área de influencia de la cuenca en análisis formando polígonos de cuatro lados. | |
| El método de la distancia inversa al cuadrado, es aplicable en cuencas con superficie mayor a las 50 km ² | |

8. Complete el siguiente concepto.

La precipitación _____ de una cuenca es la altura de _____ que se formaría sobre una _____ a consecuencia de _____. Y su unidad de medida es en _____.

9. Señale la respuesta correcta: el cálculo de la precipitación media considera.

- a. Los datos de precipitación diaria
- b. Los datos de precipitación mensual
- c. Los datos de precipitación anual
- d. Ninguno de las anteriores

10. Señale con verdadero o falso: El método de los Polígonos de Thiessen se puede aplicar en cuencas de áreas superiores a 50 km².

- a. () Verdadero.
- b. () Falso.

Ir al solucionario

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos



Semana 6



Unidad 4. Análisis de tormentas

¡Avanzamos! ahora continuamos con el análisis de tormentas, que nos sirve para el cálculo de eventos de crecida o eventos extremos que se dan cada cierto número de años. En esta unidad explicaremos como y que metodología aplicar para el cálculo de estos eventos de precipitación que pueden generar desastres como inundaciones, deslaves, u otros desastres derivados de las fuertes precipitaciones. El conocimiento de la probabilidad de ocurrencia de estos eventos permitirá desarrollar programas de alerta temprana o la planificación de la construcción de obras de protección.

Para su comprensión, le invito a revisar el siguiente recurso:

[Ir a recursos](#)

Ahora usted conoce los conceptos básicos de un análisis de tormentas, continúe su proceso de aprendizaje desarrollando las siguientes actividades recomendadas.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos



Actividades de aprendizaje recomendadas

Luego de revisar el recurso de esta semana, analice como se extraen los valores intensidad y tiempo en la tabla, el cálculo de intensidades máximas para diferentes periodos de tiempo, e intente recrear el ejemplo de forma autónoma.

Realice una hoja de cálculo para intensidades, esto le permitirá acelerar el proceso de tratamiento de la información y evitar errores de repetición, que puedan alterar los resultados.



Semana 7

4.5. Análisis de Frecuencia de tormentas

Para la séptima semana, están preparados los últimos subtemas de análisis de tormentas, con lo cual ya usted estaría en capacidad de realizar el cálculo de probabilidad de ocurrencia de eventos máximos o lluvias intensas.

Analice los subtemas a continuación:

Una vez conocida la intensidad y duración de las tormentas, es necesario determinar la frecuencia con que una determinada tormenta se va a repetir en el tiempo. Para esto es necesario analizar una serie de tormentas registradas en una estación dada, conformando registros históricos de intensidades máximas

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

para cada periodo de duración. Las intensidades deben ser máximas maximum (máximo valor de todos los valores máximos identificados), es decir, las correspondientes al mayor valor de todas las intensidades de cada periodo de duración.

Para determinar la frecuencia se procede a ordenar en forma decreciente e independientemente del tiempo los valores de intensidad máxima correspondiente a cada periodo de duración, procediendo luego a calcular la frecuencia correspondiente, aplicando la ecuación:

$$f = \frac{m}{n + 1} \quad (23)$$

Donde:

m – Número de orden

n – Número total de años de observación

f – Frecuencia

Con base a la frecuencia se puede determinar el **periodo de retorno** *Tr* que se define como el tiempo en el cual se espera la ocurrencia de un suceso de igual o mayor magnitud al valor en análisis por una sola vez, expresándose en años. Se calcula con:

$$Tr = 1/f \quad (24)$$

Por la relación existente entre el periodo de retorno y la frecuencia y de esta con el número de orden y la cantidad total de datos, se deduce que en una serie determinada se tendrán tantos valores de *Tr* cuantos registros *n* existan. En la práctica, el periodo de retorno es un valor conocido y lo que se desea es conocer la magnitud del evento que corresponde a tal periodo de retorno.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

El problema surge cuando la serie no abarca al T_r solicitado, necesitándose en estos casos realizar extrapolaciones, es decir, por ejemplo, a partir de un registro de 20 años extrapolar a un periodo de retorno de 100 años.

Lo que nos conlleva a buscar la distribución de probabilidad teórica que más se ajuste a los datos medidos y usar esta función para la extrapolación, en hidrología la más usadas son las distribuciones: Normal, Pearson III, y Gumbel, siendo esta la distribución diseñada para análisis de **valores extremos**.

4.6. Distribución de probabilidad de Gumbel

Es la distribución de probabilidad más utilizada en la hidrología, se emplea para el análisis de valores extremos siendo diseñada especialmente para series anuales. Se emplean las siguientes expresiones:

$$Y = -\ln -\ln \left(1 - \frac{1}{T_r} \right) \quad (25)$$

$$Y_n = \frac{\sum y}{n} \quad (26)$$

$$SI = \sqrt{\frac{(I_i - I_m)^2}{n - 1}} \quad (27)$$

$$Imax = I_m + \frac{S_I}{S_n} (Y - Y_n) \quad (28)$$

Donde:

I_{max} – Intensidad máxima en mm

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Y – Variable reducida

T_r – Tiempo de retorno

I_m – Intensidad media

SI – Desviación estándar de

Y_n – Media de los n valores de Y (Tabla 8)

S_n – Desviación estándar de los n valores (Tabla 8)

n – Número de datos

La información obtenida del análisis de *Gumbel* nos permite establecer la máxima intensidad que se daría en el sitio de monitoreo de lluvias, para una duración de la lluvia y un periodo de retorno específicos.

En la tabla 8 se presentan los valores de Y_n y S_n para distintos periodos de retorno.

Tabla 14. Valores de Yn y Sn para diferentes períodos de retorno

| Nº Datos | Yn | Sn | Nº Datos | Yn | Sn | Nº Datos | Yn | Sn |
|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 1 | 0.36651 | 0.0000 | 35 | 0.54034 | 1.12847 | 69 | 0.55453 | 1.18440 |
| 2 | 0.40434 | 0.49838 | 36 | 0.54105 | 1.13126 | 70 | 0.55477 | 1.18535 |
| 3 | 0.42859 | 0.64348 | 37 | 0.54174 | 1.13394 | 71 | 0.55500 | 1.18629 |
| 4 | 0.44580 | 0.73147 | 38 | 0.54239 | 1.13650 | 72 | 0.55523 | 1.18720 |
| 5 | 0.45879 | 0.79278 | 39 | 0.54302 | 1.13896 | 73 | 0.55546 | 1.18809 |
| 6 | 0.46903 | 0.83877 | 40 | 0.54362 | 1.14131 | 74 | 0.55567 | 1.18896 |
| 7 | 0.47735 | 0.87493 | 41 | 0.54420 | 1.14358 | 75 | 0.55589 | 1.18982 |
| 8 | 0.48428 | 0.90432 | 42 | 0.54475 | 1.14576 | 76 | 0.55610 | 1.19065 |
| 9 | 0.49015 | 0.92882 | 43 | 0.54529 | 1.14787 | 77 | 0.55630 | 1.19147 |
| 10 | 0.49521 | 0.94963 | 44 | 0.54580 | 1.14989 | 78 | 0.55650 | 1.19227 |
| 11 | 0.49961 | 0.96758 | 45 | 0.54630 | 1.15184 | 79 | 0.55669 | 1.19306 |
| 12 | 0.50350 | 0.98327 | 46 | 0.54678 | 1.15373 | 80 | 0.55689 | 1.19382 |

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

| Nº Datos | Yn | Sn | Nº Datos | Yn | Sn | Nº Datos | Yn | Sn |
|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 13 | 0.50695 | 0.99713 | 47 | 0.54724 | 1.15555 | 81 | 0.55707 | 1.19458 |
| 14 | 0.51004 | 1.00948 | 48 | 0.54769 | 1.15731 | 82 | 0.55726 | 1.19531 |
| 15 | 0.51284 | 1.02057 | 49 | 0.54812 | 1.15901 | 83 | 0.55744 | 1.19604 |
| 16 | 0.51537 | 1.03060 | 50 | 0.54854 | 1.16066 | 84 | 0.55761 | 1.19675 |
| 17 | 0.51768 | 1.03973 | 51 | 0.54895 | 1.16226 | 85 | 0.55779 | 1.19744 |
| 18 | 0.51980 | 1.04808 | 52 | 0.54934 | 1.16380 | 86 | 0.55796 | 1.19813 |
| 19 | 0.52175 | 1.05575 | 53 | 0.54972 | 1.16530 | 87 | 0.55812 | 1.19880 |
| 20 | 0.52355 | 1.06282 | 54 | 0.55009 | 1.16676 | 88 | 0.55828 | 1.19945 |
| 21 | 0.52522 | 1.06938 | 55 | 0.55044 | 1.16817 | 89 | 0.55844 | 1.20010 |
| 22 | 0.52678 | 1.07547 | 56 | 0.55079 | 1.16955 | 90 | 0.55860 | 1.20073 |
| 23 | 0.52823 | 1.08115 | 57 | 0.55113 | 1.17088 | 91 | 0.55876 | 1.20135 |
| 24 | 0.52959 | 1.08646 | 58 | 0.55146 | 1.17218 | 92 | 0.55891 | 1.20196 |
| 25 | 0.53086 | 1.09145 | 59 | 0.55177 | 1.17344 | 93 | 0.55905 | 1.20256 |
| 26 | 0.53206 | 1.09613 | 60 | 0.55208 | 1.17467 | 94 | 0.55920 | 1.20315 |
| 27 | 0.53319 | 1.10054 | 61 | 0.55238 | 1.17586 | 95 | 0.55934 | 1.20373 |
| 28 | 0.53426 | 1.10470 | 62 | 0.55268 | 1.17702 | 96 | 0.55948 | 1.20430 |
| 29 | 0.53527 | 1.10864 | 63 | 0.55296 | 1.17816 | 97 | 0.55962 | 1.20486 |
| 30 | 0.53622 | 1.11237 | 64 | 0.55324 | 1.17926 | 98 | 0.55976 | 1.20541 |
| 31 | 0.53713 | 1.11592 | 65 | 0.55351 | 1.18034 | 99 | 0.55989 | 1.20596 |
| 32 | 0.53799 | 1.11929 | 66 | 0.55378 | 1.18139 | 100 | 0.56002 | 1.20649 |
| 33 | 0.53881 | 1.12249 | 67 | 0.55403 | 1.18242 | 101 | 0.56015 | 1.20701 |
| 34 | 0.53959 | 1.12555 | 68 | 0.55429 | 1.18342 | ... | ... | ... |

Nota: Monsalve (2011, p.96).

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Ejemplo:

Con los datos de la serie que se proporciona, realizar el análisis de valores extremos aplicando el método de Gumbel.

| Año | Duración (min) | | | | | | |
|------|----------------|------|------|------|------|------|-----|
| | 5 | 10 | 15 | 30 | 60 | 120 | 360 |
| 1990 | 38.0 | 33.0 | 26.7 | 23.2 | 13.0 | 9.2 | 4.0 |
| 1991 | 45.0 | 22.0 | 23.0 | 22.0 | 20.0 | 11.0 | 3.0 |
| 1992 | 60.0 | 60.6 | 45.0 | 20.0 | 15.0 | 8.6 | 6.0 |
| 1993 | 50.4 | 35.2 | 34.3 | 17.0 | 17.5 | 5.3 | 4.4 |
| 1994 | 42.0 | 39.0 | 28.8 | 34.0 | 12.0 | 9.4 | 3.0 |
| 1995 | 48.0 | 31.0 | 26.7 | 29.0 | 12.0 | 19.0 | 4.1 |
| 1996 | 47.2 | 55.0 | 30.0 | 40.0 | 18.0 | 15.0 | 3.5 |
| 1997 | 29.0 | 29.3 | 45.0 | 13.0 | 22.0 | 12.0 | 3.3 |
| 1998 | 48.0 | 36.0 | 28.0 | 18.6 | 13.4 | 6.0 | 5.0 |
| 1999 | 114.0 | 72.0 | 24.4 | 15.0 | 18.1 | 8.4 | 3.9 |
| 2000 | 45.0 | 45.3 | 53.0 | 13.0 | 13.0 | 9.2 | 3.0 |

Obtenemos la intensidad media de cada periodo.

| Año | Duración (min) | | | | | | |
|------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | 5 | 10 | 15 | 30 | 60 | 120 | 360 |
| 1990 | 38.00 | 33.00 | 26.70 | 23.20 | 13.00 | 9.20 | 4.00 |
| 1991 | 45.00 | 22.00 | 23.00 | 22.00 | 20.00 | 11.00 | 3.00 |
| 1992 | 60.00 | 60.60 | 45.00 | 20.00 | 15.00 | 8.60 | 6.00 |
| 1993 | 50.40 | 35.20 | 34.30 | 17.00 | 17.50 | 5.30 | 4.40 |
| 1994 | 42.00 | 39.00 | 28.80 | 34.00 | 12.00 | 9.40 | 3.00 |
| 1995 | 48.00 | 31.00 | 26.70 | 29.00 | 12.00 | 19.00 | 4.10 |
| 1996 | 47.20 | 55.00 | 30.00 | 40.00 | 18.00 | 15.00 | 3.50 |

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

| Año | Duración (min) | | | | | | |
|------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | 5 | 10 | 15 | 30 | 60 | 120 | 360 |
| 1997 | 29.00 | 29.30 | 45.00 | 13.00 | 22.00 | 12.00 | 3.30 |
| 1998 | 48.00 | 36.00 | 28.00 | 18.60 | 13.40 | 6.00 | 5.00 |
| 1999 | 114.00 | 72.00 | 24.40 | 15.00 | 18.10 | 8.40 | 3.90 |
| 2000 | 45.00 | 45.30 | 53.00 | 13.00 | 13.00 | 9.20 | 3.00 |
| Im | 51.51 | 41.67 | 33.17 | 22.26 | 15.82 | 10.28 | 3.93 |

Construimos la tabla auxiliar para el cálculo de SI , previamente de la tabla 8 obtenemos los valores de $Y_n = 0.4996$ y $Y_s = 0.9676$.

| Año | 5 | 10 | 15 | 30 | 60 | 120 | 360 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | (I-Im)2 |
| 1990 | 182.50 | 75.22 | 41.90 | 0.89 | 7.94 | 1.17 | 0.01 |
| 1991 | 42.37 | 387.02 | 103.48 | 0.07 | 17.49 | 0.52 | 0.86 |
| 1992 | 72.10 | 358.24 | 139.88 | 5.08 | 0.67 | 2.83 | 4.30 |
| 1993 | 1.23 | 41.90 | 1.27 | 27.61 | 2.83 | 24.82 | 0.22 |
| 1994 | 90.42 | 7.14 | 19.12 | 137.96 | 14.58 | 0.78 | 0.86 |
| 1995 | 12.31 | 113.91 | 41.90 | 45.50 | 14.58 | 76.01 | 0.03 |
| 1996 | 18.57 | 177.62 | 10.07 | 314.90 | 4.76 | 22.26 | 0.18 |
| 1997 | 506.66 | 153.08 | 139.88 | 85.65 | 38.22 | 2.95 | 0.39 |
| 1998 | 12.31 | 32.18 | 26.76 | 13.36 | 5.85 | 18.33 | 1.15 |
| 1999 | 3905.11 | 919.74 | 76.96 | 52.63 | 5.21 | 3.54 | 0.00 |
| 2000 | 42.37 | 13.16 | 393.12 | 85.65 | 7.94 | 1.17 | 0.86 |
| SUMA | 4885.95 | 2279.20 | 994.34 | 769.29 | 120.06 | 154.38 | 8.86 |

Aplicando la ecuación:

$$SI = \sqrt{\frac{(I_i - I_m)^2}{n - 1}}$$

Calculamos los valores de SI . Que se muestran a continuación:

| SI | 5min | 10min | 15min | 30min | 60min | 120min | 360min |
|----|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | 22.104 | 15.097 | 9.972 | 8.771 | 3.465 | 3.929 | 0.941 |

Finalmente, aplicando la ecuación: $I_{max} = I_m + \frac{SI}{S_n} (Y - Y_n)$ calculamos los valores de intensidades máximas para los diferentes períodos de retorno. En este caso: 10, 25, 50 y 100 años.

| Tr (años) | Variable reducida (Y) | t=5 min | t=10 min | t=15 min | t=30 min | t=60 min | t=120 min | t=360 min |
|-----------|-----------------------|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 10 | 2.25 | 91.50 | 68.99 | 51.22 | 38.13 | 22.09 | 17.39 | 5.63 |
| 25 | 3.20 | 113.16 | 83.78 | 60.99 | 46.72 | 25.48 | 21.24 | 6.55 |
| 50 | 3.90 | 129.23 | 94.76 | 68.24 | 53.10 | 28.00 | 24.10 | 7.24 |
| 100 | 4.60 | 145.18 | 105.65 | 75.43 | 59.42 | 30.50 | 26.93 | 7.92 |

Ejercicio propuesto

Ahora ponga en práctica lo estudiado. Con los datos que se propone a continuación realice el análisis de valores extremos aplicando el método de Gumbel. Siga el procedimiento indicado en el ejemplo anterior, paso a paso, puede ayudarse verificando los resultados del ejemplo con una hoja de cálculo, Excel.

| Año | 5 min | 10min | 15min | 30min | 60min | 120 min | 360min | 1440min |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|---------|
| 1990 | 42.0 | 38.4 | 27.6 | 22.2 | 13.0 | 8.8 | 3.6 | 2.7 |
| 1991 | 48.0 | 30.0 | 24.0 | 22.0 | 20.0 | 11.0 | 3.9 | 1.0 |
| 1992 | 66.0 | 58.8 | 40.0 | 20.0 | 11.7 | 8.6 | 4.5 | 1.6 |
| 1993 | 50.4 | 34.2 | 25.6 | 20.0 | 10.5 | 5.3 | 3.8 | 1.6 |
| 1994 | 42.0 | 31.8 | 28.8 | 23.0 | 17.0 | 9.4 | 3.5 | 0.9 |
| 1995 | 48.0 | 36.0 | 26.8 | 16.0 | 13.0 | 10.0 | 4.7 | 1.2 |
| 1996 | 46.8 | 34.2 | 30.0 | 20.8 | 13.0 | 11.0 | 4.1 | 1.1 |
| 1997 | 62.4 | 54.0 | 40.0 | 32.8 | 17.9 | 9.0 | 3.8 | 1.1 |
| 1998 | 36.0 | 28.8 | 29.2 | 23.2 | 21.9 | 11.1 | 4.2 | 1.1 |
| 1999 | 48.0 | 36.0 | 24.4 | 13.0 | 13.0 | 7.2 | 3.5 | 1.2 |
| 2000 | 102.0 | 69.0 | 52.0 | 32.2 | 18.1 | 9.9 | 3.3 | 0.9 |
| 2001 | 36.0 | 45.0 | 32.0 | 22.0 | 13.0 | 8.6 | 3.9 | 1.2 |

4.7. Relación Intensidad y periodo de retorno

Esta relación es directamente proporcional ya que conforme aumenta el periodo de retorno la intensidad también aumenta y viceversa.

Para su análisis se establece el periodo con el que se suceden, adoptándose 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 y 500 años.

4.8. Curvas intensidad, duración y frecuencia IDF

Estas gráficas corresponden a la representación de los resultados obtenidos del análisis probabilístico de intensidades, se las confecciona disponiendo las intensidades máximas probables en ordenadas y las duraciones de la lluvia en abscisas, para cada periodo de retorno considerado, obteniéndose una familia de curvas IDF.

La representación se puede realizar con base en escalas aritmética, los puntos conforman una curva asintótica que en ocasiones dificulta la interpretación de resultados.

Generalmente se utiliza una representación en escalas logarítmicas obteniéndose alineamientos rectos que brindan mayores facilidades para la lectura de resultados.

Con los datos del ejemplo anterior, se dibuja las curvas IDF en escala aritmética y escala logarítmica.

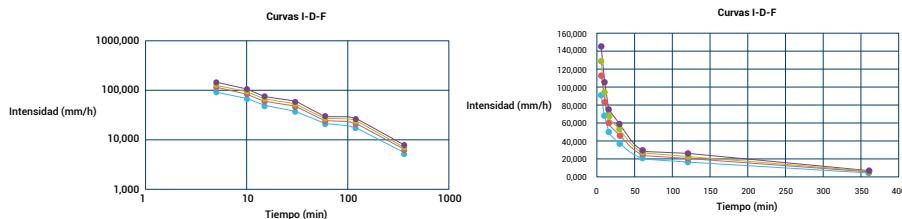


Figura 25. Ejemplo de gráfica de curvas IDF. Escala aritmética y logarítmica
Fuente: elaboración propia.

4.9. Ecuaciones de intensidad

Para eliminar la subjetividad que se presenta al interpolar gráficamente en las curvas intensidad duración frecuencia, se acostumbra a determinar expresiones matemáticas que las representen, la más conocida es la que se obtiene por la fórmula exponencial o americana.

4.10. Fórmula Exponencial o americana

La fórmula empírica utilizada en Estados Unidos, que relaciona la intensidad máxima I_{max} , con la duración t con el periodo de retorno.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

$$I = K \cdot \frac{Tr^e}{t^f} \quad (29)$$

Donde:

I – Intensidad en mm/h

T – Periodo de retorno

e y f – Coeficientes característicos del entorno donde está ubicada la estación. Su valoración puede realizarse a través de un análisis numérico o gráfico.

Análisis numérico: Asumiendo que:

$$A = K * Tr^e$$

Entonces:

$$I = A/t^f \quad (30)$$

Aplicando logaritmos a ambos lados de la igualdad tenemos:

$$\log I = \log A - f * \log t \quad (31)$$

$$\log I = \log K + e \cdot \log Tr - f * \log t \quad (32)$$

De este análisis se concluye que, debido a la relación lineal existente entre los logaritmos de las variables, si se construyen las curvas IDF en papel *log log* la gráfica resultante será una línea recta. Como se puede ver en la figura 26.

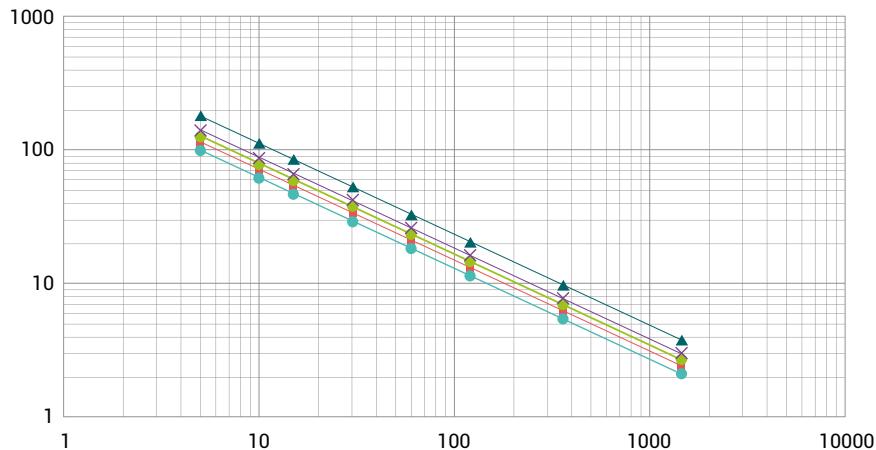
[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Figura 26. Ejemplo de gráfica de curvas IDF escala Log-Log

La fórmula americana, en su forma reducida, permite aplicar el análisis de mínimos cuadrados para encontrar el valor de los coeficientes.

El proceso de cálculo comprende la conformación de un cuadro en el que:

$$Y = \log I \quad (33)$$

$$X = \log t \quad (34)$$

Para luego calcular los coeficientes de α_1 y β_1 , aplicando el método de mínimos cuadrados para luego determinar el valor de A y f .

$$\alpha_1 = \log A \quad (35)$$

por tanto; $A = \text{Antilogaritmo de}$

$$\beta_1 = -f \quad (36)$$

Índice

$$f = -\beta_1 \quad (37)$$

Siendo entonces:

Este procedimiento se aplica a todos los datos agrupados en cada periodo de retorno considerados, para que al final el valor de f que interviene en la ecuación general es la media de los valores obtenidos.

Con los valores obtenidos de A , para cada uno de los Tr que se requiere, se desarrolla la expresión:

$$A = K * Tr^e \quad (84)$$

La expresión al ser sometida a logaritmos se convierte en lineal, lo que permite calcular los valores de K y e .

Aplicando nuevamente mínimos cuadrados, considerando esta vez:

$$Y = \log A \quad (39)$$

$$X = \log Tr \quad (40)$$

se obtienen los valores de y , pudiéndose calcular el valor de K y e aplicando:

$$\alpha_2 = \log K \quad (41)$$

por tanto, $K = \text{antilogaritmo de } \alpha_2$

$$\beta_2 = e \quad (42)$$

Coeficientes de la recta de regresión

Variable dependiente Y

Variable independiente X

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Ordenada al origen α_2

Pendiente β_2

Ejemplo:

Con los siguientes datos previamente calculados de intensidades máximas anuales, determinar la ecuación de intensidad aplicando el método de la fórmula americana.

| Tr Años | Intensidad (mm/h) | | | | | | | |
|---------|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| | Duración (min) | | | | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 30 | 60 | 120 | 360 | 1440 |
| 10 | 84.41 | 64 | 46.45 | 32.27 | 21.63 | 12.16 | 4.64 | 2.18 |
| 25 | 101.83 | 76.29 | 54.45 | 37.7 | 25.14 | 13.79 | 5.05 | 2.66 |
| 50 | 114.76 | 85.41 | 60.39 | 41.73 | 27.74 | 14.99 | 5.34 | 3.01 |
| 100 | 127.59 | 94.47 | 66.29 | 45.73 | 30.32 | 16.19 | 5.64 | 3.36 |
| 500 | 157.25 | 115.39 | 79.91 | 54.96 | 36.29 | 18.96 | 6.33 | 4.18 |

Aplicando: $\log I = \log A - f * \log T$ para cada periodo de diseño tenemos un ejemplo de cálculo del $Tr = 10$ años.

| I (mm/h) | t (min) | x (Log t) | y Log I | x^2 | x*y |
|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 84.41 | 5 | 0.70 | 19.26 | 0.49 | 1.35 |
| 64.00 | 10 | 1.00 | 18.06 | 1.00 | 1.81 |
| 46.45 | 15 | 1.18 | 1.67 | 1.38 | 1.96 |
| 32.27 | 30 | 1.48 | 15.09 | 2.18 | 2.23 |
| 21.63 | 60 | 1.78 | 13.35 | 3.16 | 2.37 |
| 12.16 | 120 | 2.08 | 10.85 | 4.32 | 2.26 |
| 4.64 | 360 | 2.56 | 0.67 | 6.53 | 1.70 |
| 2.18 | 1440 | 3.16 | 0.34 | 9.98 | 1.07 |
| n= 8 | suma | 13.92 | 79.29 | 29.05 | 14.74 |

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

$$\alpha_1 = \frac{[(\sum Y)(\sum X^2)] - [(\sum X)(\sum X \cdot Y)]}{[n(\sum X^2)] - [\sum X]^2}$$

$$\alpha_1 = 2.4637; \alpha_1 = \log^{-1} 2.4637; \alpha_1 = 290.8702$$

$$\beta_1 = \frac{[n(\sum XY)] - [(\sum X)(\sum Y)]}{[n(\sum X^2)] - [\sum X]^2}$$

$$\beta_1 = -0.67338; \beta_1 = 0.67338$$

Se sigue el mismo procedimiento para todos los periodos de retorno siguientes (25, 50, 100, 500) y obtenemos los diferentes valores de α_2 y β_2 . A continuación, se muestran los resultados del cálculo:

| Operador | Periodos de retorno | | | | |
|------------|---------------------|---------|---------|----------|----------|
| | 10 años | 25 años | 50 años | 100 años | 500 años |
| α_2 | 290.87 | 346.56 | 388.61 | 430.24 | 526.31 |
| β_2 | 0.673 | 0.678 | 0.682 | 0.685 | 0.690 |

En un segundo paso aplicando:

$$\log A = \log K + e \cdot \log Tr$$

Obtenemos los valores α_2 y β_2 :

| Tr (años) | A | x = Log Tr | y = Log A | x^2 | x*y | f |
|-----------|-------------|------------|-----------|--------|--------|-------|
| 10 | 290.870 | 1.000 | 2.464 | 1.000 | 2.464 | 0.673 |
| 25 | 346.562 | 1.398 | 2.540 | 1.954 | 3.550 | 0.678 |
| 50 | 388.612 | 1.699 | 2.590 | 2.887 | 4.400 | 0.682 |
| 100 | 430.241 | 2.000 | 2.634 | 4.000 | 5.267 | 0.685 |
| 500 | 526.312 | 2.699 | 2.721 | 7.284 | 7.345 | 0.690 |
| n=5 | Suma | 8.796 | 12.948 | 17.125 | 23.026 | |

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

$$\alpha_2 = \frac{[\sum Y][\sum X^2] - [\sum X][\sum X \cdot Y]}{[n(\sum X^2)] - [\sum X]^2}$$

$$\alpha_2 = 2.3255$$

$$\text{Luego } K = 211.607$$

$$\beta_2 = \frac{[N(\sum XY)] - [(\sum X)(\sum Y)]}{[N(\sum X^2)] - [\sum X]^2}$$

$$\beta_2 = 0.1501$$

$$e = 0.1501$$

La expresión de la ecuación entonces quedará:

$$I = K \frac{Tr^e}{t}$$

$$I = 211,61 * \frac{Tr^{0.15}}{t^{0.68}}$$

Aplicando valores a esta ecuación tenemos como resultado las Intensidades máximas para los diferentes períodos de retorno con la ecuación americana.

| Tr (años) | Intensidad (mm/h) | | | | | | | |
|-----------|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| | Duración (min) | | | | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 30 | 60 | 120 | 360 | 1440 |
| 10 | 100.05 | 62.45 | 47.40 | 29.59 | 18.47 | 11.53 | 5.46 | 2.13 |
| 25 | 114.79 | 71.65 | 54.39 | 33.95 | 21.19 | 13.22 | 6.27 | 2.44 |
| 50 | 127.37 | 79.50 | 60.34 | 37.66 | 23.51 | 14.67 | 6.95 | 2.71 |
| 100 | 141.33 | 88.21 | 66.96 | 41.79 | 26.08 | 16.28 | 7.71 | 3.01 |
| 500 | 179.92 | 112.30 | 85.24 | 53.20 | 33.21 | 20.73 | 9.82 | 3.83 |

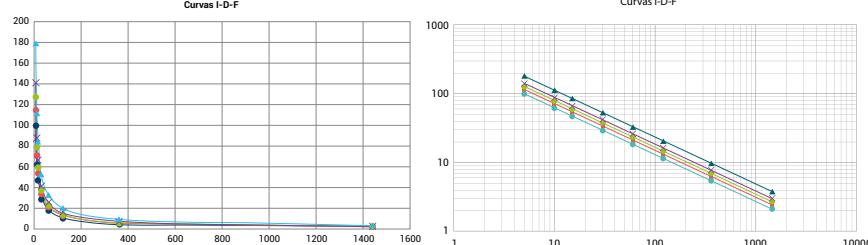


Figura 27. Curvas IDF del ejemplo

Fuente: elaboración propia.



Actividades de aprendizaje recomendadas

Esta cerca de culminar el primer bimestre y es necesario que continúe con su aprendizaje. Para ello, es importante que vuelva a revisar los contenidos estudiados hasta ahora, así como las actividades desarrolladas que le han servido para reforzar sus conocimientos. Esto lo ha preparado para rendir su primera evaluación presencial. Sin embargo, acreciente sus conocimientos de esta semana estudiando los subtemas de la unidad 4 y elabore una hoja de cálculo para la determinación de la distribución de probabilidad de Gumbel, y la ecuación de Intensidad por la Formula exponencial o americana, le ayudará para realizar rápidamente los cálculos y sobre todo entender el proceso.

A modo de verificación de su nivel de comprensión de los temas revisados, desarrolle la autoevaluación de la unidad 4.



Autoevaluación 4

Lea detenidamente el siguiente enunciado y conteste como corresponde en cada una las preguntas que se formula, sea dicotómicas, de selección múltiple o completar.

1. La intensidad, duración y frecuencia de una tormenta se desarrollan en base de un análisis del pluviograma de ella.
 - a. () Verdadero.
 - b. () Falso.
2. El análisis de tormentas se realiza en base a intervalos definidos del pluviograma que genere la misma.
 - a. () Verdadero.
 - b. () Falso.
3. De las tormentas interesa conocer los siguientes parámetros hidrológicos.
 - a. Precipitación, duración y frecuencia.
 - b. Precipitación, Intensidad, frecuencia.
 - c. Intensidad, duración y frecuencia.
 - d. Ninguna de las anteriores.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

4. Periodo de duración:

- a. Es el tiempo transcurrido entre dos cambios de intensidad dentro de una tormenta.
- b. Es el tiempo en el cual se espera que un evento de igual o mayor magnitud se repita.
- c. Es el tiempo determinado adoptado dentro del total que dura la tormenta. Se adoptan periodos estándares.
- d. Ninguno de los anteriores.

5. La frecuencia requiere del análisis de una serie de tormentas en una estación dada.

- a. () Verdadero.
- b. () Falso.

6. El diagrama de masas de una tormenta es:

- a. La representación gráfica de las Intensidades acumuladas de lluvia caída, en el eje de las ordenadas y en las abscisas se representa el tiempo que corresponda.
- b. La representación gráfica de la cantidad acumulada de agua caída, en el eje de las ordenadas y en las abscisas se representa el tiempo que corresponda.
- c. Ninguna de las anteriores.

7. La obtención de intensidades máximas se basa en que, para cada periodo de duración se realicen:
- Un número fijo de combinaciones aleatorias, tomando la intensidad máxima de la tormenta.
 - Un número de combinaciones determinado de combinaciones consecutivas, tomando la intensidad máxima de la tormenta.
 - Las combinaciones posibles consecutivas, adoptándose como punto de partida para el cálculo la intensidad máxima de la tormenta.
 - Ninguna de las anteriores.
8. La gráfica de las curvas IDF nos indican:
- El resultado analítico de intensidades en ordenadas y las duraciones de la lluvia en abscisas para cada periodo de retorno considerado.
 - El resultado analítico de intensidades máximas en ordenadas y las duraciones de la lluvia en abscisas para cada periodo de retorno considerado.
 - El resultado probabilístico de intensidades máximas en ordenadas y las duraciones de la lluvia en abscisas para cada periodo de retorno considerado.
 - Ninguna de las anteriores.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

9. La fórmula exponencial o americana, es una ecuación que se utiliza para determinar la intensidad máxima probable de una cuenca y relaciona:
 - a. El intervalo de tiempo con el periodo de retorno.
 - b. La frecuencia con el periodo de retorno.
 - c. La duración de la tormenta con el periodo de retorno.
 - d. Ninguna de las anteriores.
10. La distribución de probabilidad de *Gumbel* permite:
 - a. Visualizar la variación de la tormenta en un intervalo de tiempo.
 - b. Graficar las variaciones de intensidad de lluvia de una tormenta en el tiempo.
 - c. Analizar los valores extremos de eventos.
 - d. Ninguna de las anteriores.

[Ir al solucionario](#)

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Actividades finales del bimestre



Semana 8

Ha llegado al final del primer bimestre y en esta semana usted deberá rendir su evaluación bimestral, donde pondrá en práctica todo lo aprendido, le recomiendo acoger la sugerencia de actividades que se detallan a continuación.

Actividades:

- Revise analíticamente las unidades estudiadas en el primer bimestre, prepárese para la evaluación bimestral.
- Tenga a la mano su propio formulario, tablas, nomogramas, etc. Todo el material que pueda necesitar para la evaluación, una calculadora básica, y materiales de trabajo para un buen desempeño.
- Identifique adecuadamente en su formulario todas las ecuaciones, así como las unidades en las que se trabaja y, la nomenclatura es esencial.
- Repase los ejercicios resueltos y los de sus trabajos, así como también la bibliografía complementaria que usted considere que le ayudan a comprender los temas.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

- Mantenga la serenidad durante la evaluación, indispensable para asignaturas como esta que tiene un grado de complejidad por la cantidad de ecuaciones y cálculos a aplicar para obtener los resultados.

Éxitos en el desarrollo de sus evaluaciones.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos



Segundo bimestre

Resultado de aprendizaje 1

Aplica los conocimientos de hidrología a la gestión del riesgo, conociendo sus conceptos básicos y aplicándolos a fenómenos peligrosos.

Contenidos, recursos y actividades de aprendizaje



Semana 9



Unidad 5. Infiltración

Continuamos con el proceso de aprendizaje, para el segundo bimestre abordaremos el tema de infiltración, el estudio de este parámetro del ciclo hidrológico es esencial para entender el proceso de infiltración en el suelo y posterior relación con el escurrimiento

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

en una cuenca, que generará el aumento de caudales en los cauces superficiales y es determinante como fuente de recarga de acuíferos.

Empezamos con la explicación de los subtemas preparados para esta semana:

5.1. Introducción

Infiltración se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares.

La diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre por su salida recibe el nombre genérico de **pérdidas**. En general, las pérdidas están constituidas por la intercepción en el follaje de las plantas y en los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charcos, que posteriormente se evapora o se infiltra, la evaporación y la infiltración.

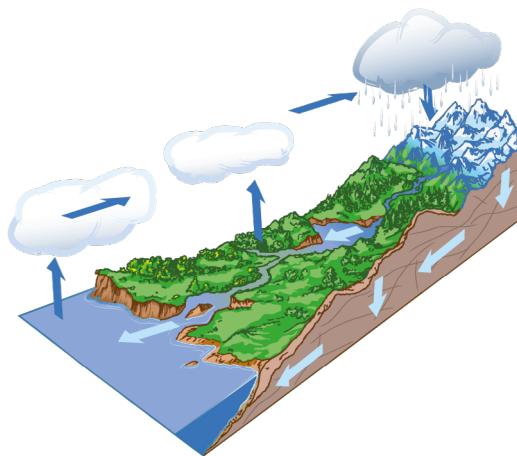


Figura 28. Esquema de Infiltración

Fuente: [enlace](#)

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

La infiltración juega un papel fundamental en los procesos de escorrentía como respuesta a la precipitación dada en una cuenca, dependiendo de su magnitud. Lluvias de iguales intensidades, pueden producir caudales diferentes. Además, cumple un papel fundamental en la recarga de acuíferos.

En general, como se puede ver en la figura 28, la infiltración es parte importante en el proceso de lluvia-escurrimiento, ya que una vez que el suelo se satura, producto de las precipitaciones, se produce el escurrimiento. El volumen de infiltración es varias veces mayor que el de escurrimiento durante una tormenta dada.

5.2. Descripción del proceso de infiltración

Considérese una cuenca de área pequeña, de modo que sus características: tipo de suelo, cobertura vegetal, entre otros, así como la intensidad de la lluvia en el espacio puedan considerarse uniformes, aunque la última cambie en el tiempo.

Se supone que, al inicio de una tormenta, el suelo está seco de tal forma que la cantidad de agua que puede absorber en la unidad de tiempo y la **capacidad de infiltración** es mayor que la intensidad de la lluvia en los primeros instantes de la tormenta. En estas condiciones, se infiltraría toda la lluvia.

$$\text{si } i < f_p, f = 1$$

f – Infiltración, expresada como lámina por unidad de tiempo, por ejemplo, mm/h

f_p – Capacidad de infiltración, en las mismas unidades mm/h

i – Intensidad de lluvia

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

En este paso, predominan las fuerzas producidas por la capilaridad sobre las gravitatorias.

Al avanzar el tiempo, si la lluvia es **suficientemente intensa**, el contenido de humedad del suelo aumenta hasta que su superficie alcanza la saturación. En este momento se empiezan a llenar las depresiones del terreno, es decir, se originan **charcos** y se produce el flujo sobre la superficie. A este instante se le llama **tiempo de encharcamiento** y se denota como t_p .

Después del tiempo de encharcamiento, si la lluvia sigue siendo intensa, las fuerzas capilares pierden importancia frente a las gravitatorias, pues el contenido de humedad del suelo aumenta y la capacidad de infiltración disminuye

con el tiempo. Bajo estas condiciones, la infiltración se hace independiente de la variación en el tiempo de la intensidad de la lluvia, en tanto que esta sea mayor que la capacidad de transmisión del suelo. Entonces:

$$\text{si } i > f_p, \quad t > t_p, \quad f = f_p$$

f_p decrece con el tiempo

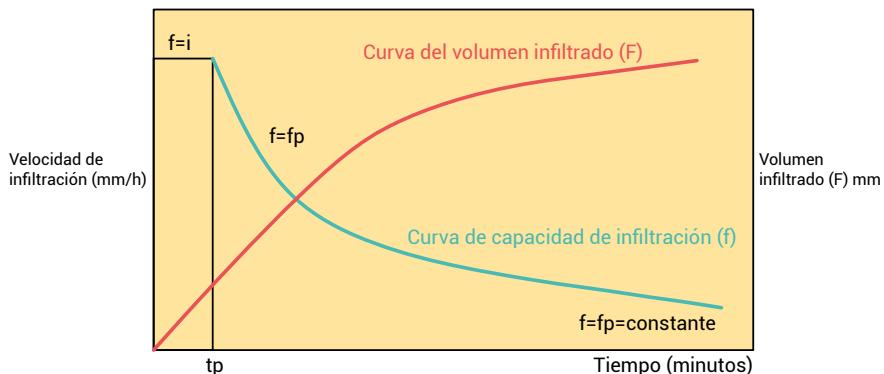


Figura 29. Descripción del proceso de Infiltración
Adaptado de: Aparicio (1997)

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

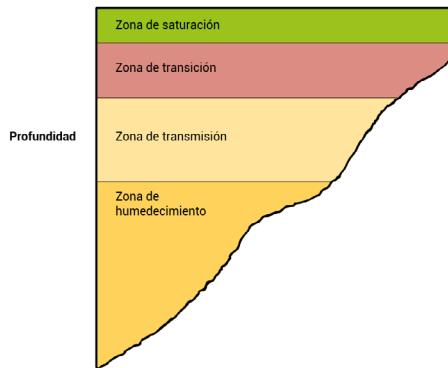


Figura 30. Perfil de humedad del suelo

Fuente: Elaboración propia

5.3. Factores que influyen en la infiltración

Los principales factores que afectan la infiltración en una cuenca pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- Textura
- Estructura
- Condición del suelo
- Vegetación
- Características de la lluvia

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Textura, estructura y condición del suelo

Los parámetros que miden estos factores son la porosidad , la granulometría, permeabilidad, forma de los granos y la humedad del suelo.

Porosidad:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (43)$$

Donde:

V_v – Volumen de vacíos

V_t – Volumen total de la muestra

El hecho de que un material sea poroso no significa necesariamente, que pueda darse una infiltración alta, para que esta se dé, es necesario que los poros estén intercomunicados entre sí, es decir que el material sea **permeable**.

Granulometría:

La influencia de la forma de los granos y su distribución en el suelo se mide por una curva acumulativa, consiste en llevar los datos de tamaño de grano a un diagrama semilogarítmico, en el cual el eje de las abscisas es en escala logarítmica y el eje de las ordenadas en escala aritmética. Los tamaños de los diámetros de los granos se reportan en valores descendentes sobre el eje de las abscisas y en las ordenadas los porcentajes acumulados, con respecto al peso total de la muestra que pasa a través de cada tamiz. Esto da lugar a una curva descendente. También puede tomarse los porcentajes acumulados retenidos sobre cada tamiz, obteniéndose así una curva ascendente.



Figura 31. Equipo y materiales para ensayo de clasificación y granulometría

Fuente: [Enlace](#)

La posición de la curva permite determinar las características predominantes en el material: curvas situadas a la derecha indican materiales gruesos como gravas o arenas gruesas.

La pendiente permite saber la uniformidad del material, a mayor pendiente más uniforme es la granulometría, el material no gradado favorece a la infiltración.

Parámetros granulométricos: permiten comparar curvas con otras, grado de homogeneidad de la granulometría.

El coeficiente de uniformidad c_u establecido por Hazen (1892) se define como:

$$c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (44)$$

Donde:

D_{10} – Es aquel para el cual el 10% del peso de la muestra tiene un diámetro inferior.

D_{60} – Para el cual el 60% del material tiene un diámetro menor.

- La granulometría es tanto más homogénea cuanto menor es este coeficiente.
- Cuanto más próximo a la unidad, mayor es la porosidad del material.
- Si $Cu < 2$ granulometría uniforme.
- Si $Cu >> 2$ granulometría variada o heterogénea.

Forma de los granos:

Los suelos con granos redondeados favorecen más la infiltración que suelos con granos angulosos. Por esta razón para la construcción de filtros es norma utilizar material de río, en vez de material de cantera, mucho más angulosos y por tanto menos permeable.

Compactación: Cuando un suelo se compacta disminuye la porosidad total y por ende la infiltración. Esta es una de las razones por las cuales campos cultivados que soportan el paso de tractores y maquinaria agrícola tienen menos infiltración.

Contenido inicial de humedad del suelo: Si el suelo tiene un alto porcentaje de humedad, la infiltración es menor que si el suelo está seco. Por esta razón láminas bajas de precipitación pueden producir crecientes significativos en épocas invernales. Un parámetro que mide la humedad es la capacidad de campo.

Capacidad de campo: Es el grado de humedad de una muestra que ha perdido su agua gravítica o agua que puede circular por efecto de la gravedad. La capacidad de campo puede suponerse igual a la humedad equivalente.

Humedad equivalente: Grado de humedad de una muestra que se somete a una fuerza centrífuga 100 veces superior a la de la gravedad ($P = 10$ atm aprox.) durante un tiempo de 40 minutos.

Punto de marchitez: Otra medida del contenido de humedad del suelo, es el contenido de agua existente en el suelo que no es

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

potencialmente aprovechable por la planta. La poca agua que la planta adquiere se debe a las altas tensiones de succión por las raíces lo cual incide en bajos rendimientos de producción de follaje.

La capacidad de campo y el punto de marchitez se determinan en laboratorio sometiendo la muestra a una presión de 15 Atm. Y encontrando después su contenido de humedad. Dependen del tipo de suelo y de la vegetación.

Características de la lluvia

Si la precipitación es muy intensa, las gotas de lluvia compactan el suelo. Disminuyendo la infiltración. Este efecto es disminuido por la vegetación.

La vegetación

La vegetación influye en la infiltración de muchas maneras: Las raíces de los árboles producen grietas en el suelo, favoreciéndola, el follaje protege el suelo contra el impacto de las gotas de lluvia, reduciendo el efecto de compactación y por tanto evitando la erosión.

Al disminuir la velocidad de escorrentía por efecto de los tallos y troncos, la infiltración se incrementa y alcanza valores máximos en bosques primarios, cuando se talan los bosques inmediatamente disminuye la infiltración y aumenta la escorrentía superficial directa.

Pendiente del terreno

En terrenos con pendiente fuertes el agua escurre rápidamente y no hay infiltración o esta es muy reducida, en terrenos con pendientes suaves los valores de infiltración son mucho mayores.

Los mapas de pendientes pueden usarse como indicativo de las tasas de recarga cuando se está estudiando el potencial de las capas acuíferas.

5.4. Capacidad de infiltración

La capacidad de infiltración es la cantidad de agua, en lámina, que el suelo es capaz de absorber en la unidad de tiempo. Se expresa en mm/h.

Este criterio supone que la capacidad de infiltración es constante durante toda la tormenta. A esta capacidad de infiltración se le llama índice de infiltración media φ .

Cuando se tiene un registro simultáneo de precipitación y escurrimiento de una tormenta, el índice de infiltración media se calcula de la siguiente manera:

1. Del hidrograma de la avenida se separa el gasto base y se calcula el volumen de escurrimiento directo VED.

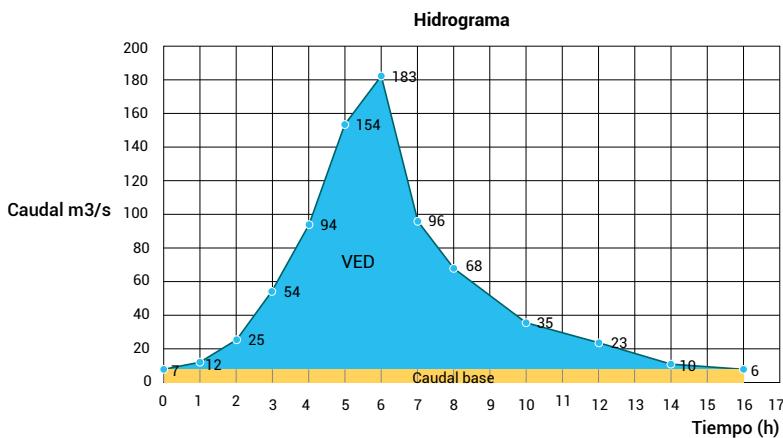


Figura 32. Ejemplo de hidrograma separado el caudal o flujo base

2. Se calcula la altura de lluvia en exceso o efectiva h_{pe} como el volumen de escurrimiento directo dividido entre el área de la cuenca:

Índice

$$h_{pe} = \frac{V_{ed}}{A_c} \quad (45)$$

Donde:

V_{ed} – Volumen de escurrimiento directo

A_c – Área de la cuenca

3. Se calcula el índice de infiltración media φ trazando una línea horizontal en el hietograma de la tormenta, de tal manera que la suma de las alturas de precipitación que queden arriba de esa línea sea igual a H_{pe} . El índice de infiltración media será entonces igual a la altura de precipitación correspondiente a la línea horizontal dividida entre el intervalo de tiempo Δt que dure cada barra del hietograma.

Existen muchos índices para estimar la infiltración en una cuenca como respuesta a una lámina precipitada. Estos hallan la infiltración utilizando los hidrogramas y el hietograma de la tormenta correspondiente. El más utilizado es el índice Φ , llamado índice **de infiltración media** como ya se ha explicado en párrafos anteriores.

Por sobre este valor en el hietograma, todo lo que se precipita se transforma en escorrentía superficial directa.

5.5. Coeficiente de escurrimiento

Otro criterio es el de coeficiente de escurrimiento, este criterio supone que las pérdidas son proporcionales a la intensidad de lluvia, esto es:

$$f = (1 - C_e) \cdot i \quad (46)$$

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Donde:

$$C_e \cdot i = r$$

r – Lámina de escurrimiento directo por unidad de tiempo.

C_e – Constante de proporcionalidad C_e , sin unidades. Coeficiente de escurrimiento.

Otra forma de escribir esta ecuación es:

$$V_{ed} = K \times V_{ll} \quad (47)$$

Donde:

K ó C_e – Coeficiente de escurrimiento

V_{ll} – Volumen de lluvia

$$k \text{ ó } C_e = \frac{V_{ED}}{Vll} \quad (48)$$

5.6. Otros métodos empíricos

5.6.1. Método de Horton

Se han hecho numerosos intentos por representar el proceso de infiltración de alguna fórmula más o menos empírica. La fórmula más conocida es, tal vez, la llamada de *Horton*, publicada por primera vez en 1921 por *Gardner* y *Widstoe* y años después, en 1940 y de manera aparentemente independiente, por *Horton*.

$$f_p = f_c + (f_o - f_c) \cdot e^{-kt} \quad (49)$$

Donde:

f_p – Capacidad de infiltración en un tiempo t en mm/h.

f_c – Capacidad de equilibrio, que se da cuando el suelo está completamente saturado en mm/h (final).

f_o – Capacidad inicial en mm/h para $t = 0$.

t – Tiempo en horas. (Transcurrido desde el inicio de la infiltración).

k – Constante que representa la tasa de crecimiento de esa capacidad.

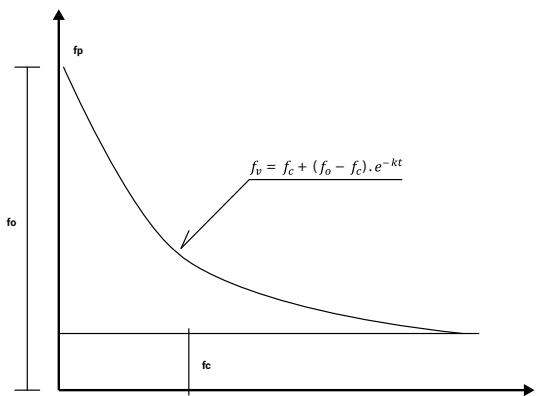


Figura 33. Esquema de infiltración Horton

Adaptado de: Aparicio (1997)

Supone que al inicio de una tormenta el suelo está de tal manera seco, que la capacidad de infiltración es mayor que la intensidad de la lluvia, esto implica que toda la lluvia se infiltra.

Si la lluvia continúa $f = f_c$ y esta capacidad de infiltración es equivalente a la conductividad hidráulica del suelo.

El área bajo la curva representa la profundidad del agua infiltrada durante un intervalo de tiempo.

Para facilidad de aplicación de la ecuación Wilson propone los valores de f_o , f_c , y k que se muestran en la tabla 9. Para diferentes tipos de suelo.

Tabla 15. Factores f_o y f_c Método de Horton

| Tipo de suelo | | f_o (mm/h) | f_c (mm/h) | K min-1 |
|----------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------|
| Agrícola normal | Desnudo | 280 | 6- 220 | 0.8 |
| | Cubierto de vegetación | 900 | 20-290 | |
| Turba | | 325 | 2-20 | 1.8 |
| Areno- arcilloso | Desnudo | 210 | 2-25 | 1.4 |
| | Cubierto de vegetación | 670 | 10-30 | |

Nota: Aparicio (1997, p. 192).

El volumen filtrado F en milímetros correspondiente a cualquier tiempo t en min, es igual a:

$$F = \int_0^t \frac{fp}{60} dt = \frac{fc \cdot t}{60} + \frac{(fo - fc)}{60K} (1 - e^{-kt}) \quad (50)$$

Una aproximación teórica al flujo en medios no saturados está dada por la ecuación de Richards (1931) la cual tiene la forma de:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \partial \left[K(\theta) \frac{\partial \varphi(\theta)}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial Z} \quad (51)$$

Donde:

θ – Contenido de humedad

$\varphi(\theta)$ – Presión de succión capilar en cm

$K(\theta)$ – Conductividad hidráulica no saturada

Z – Distancia bajo la superficie del terreno

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Presenta la dificultad de determinar la conductividad hidráulica no saturada y la presión de succión capilar.

Siendo Philip (1957-1969) quien resuelve la Ec. Richards para el caso: $i > f$, y tiene la forma, emplea la transformación de Boltzmann $B(\theta) = zt^{1/2}$; θ – contenido de humedad.

$$f = (0.5)At^{-1/2} + B \quad (52)$$

$$F = A.t^{1/2} + Bt \quad (53)$$

Donde:

f – capacidad de infiltración en mm/h

F – Lámina infiltrada en mm

A, B – Constantes que dependen del tipo de terreno

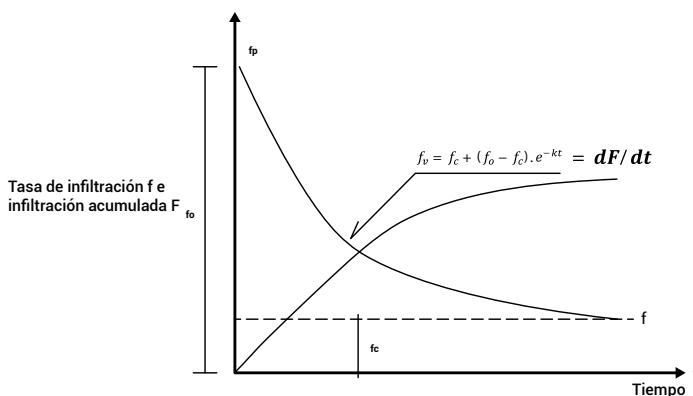


Figura 34. Tasa de infiltración e infiltración acumulada

Adaptado de: Aparicio (1997)



Actividades de aprendizaje recomendadas

Como actividad de aprendizaje se le recomienda realizar el análisis de los subtemas propuestos de la unidad del 5.1 al 5.6.1. Como ha visto, todas las unidades tienen involucradas metodologías de cálculo, ecuaciones y procedimientos de cálculo que ameritan de su concentración, por lo que siempre recomiendo uso del formulario; de igual forma, en este capítulo debe continuar con su elaboración de acuerdo a sus hábitos de estudio.

Ya que debe utilizar tablas para el cálculo de infiltración, sepárelas y adjúntelas al formulario para que facilite su uso.



Semana 10

Continuamos con el aprendizaje, esta semana concluiremos con el estudio de la infiltración, los parámetros que se requieren y los métodos de cálculo que existen para determinarla. Como se mencionó anteriormente es fundamental para el cálculo del escurrimiento y de la relación lluvia escorrentía.

Revise los subtemas preparados en esta guía, a continuación:

5.6.2. Método de Green y Ampt

Una aproximación alternativa es desarrollar una teoría física más aproximada que tenga una solución analítica exacta. Green y Ampt (1911) propusieron el esquema simplificado para infiltración que

se muestra en la Figura 35. El frente mojado es una frontera brusca que divide el suelo con contenido de humedad θ_i debajo del suelo saturado con contenido de humedad η arriba.

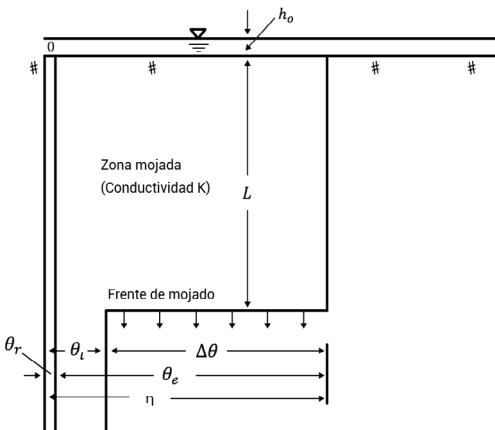


Figura 35. Esquema de variables en el modelo de infiltración de Green y Ampt Chow, Maidment, Mays (1993). *Hidrología Aplicada*

El frente mojado ha penetrado hasta una profundidad L desde el momento t en que la infiltración empieza. El agua se encharca en la superficie hasta una pequeña profundidad h_o .

Considérese una columna vertical de suelo de sección transversal horizontal de área unitaria y un volumen de control definido alrededor del suelo mojado entre la superficie y la profundidad L . Si el suelo tenía un contenido de humedad θ_i a través de toda su longitud, el contenido de humedad se incrementa desde θ_i hasta η (porosidad) a medida que el frente mojado pasa. El contenido de humedad θ es la relación entre el volumen de agua y el volumen total dentro de la superficie de control, de aquí, el incremento de agua almacenada dentro del volumen de control como resultado de la infiltración es $L(\eta - \theta_i)$, para una sección transversal unitaria.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Por definición, esta cantidad es igual a , la **profundidad acumulada de agua infiltrada en el suelo**. Luego:

$$F(t) = L \cdot \Delta\theta \quad (54)$$

$$F(t) = (\eta - \theta_i)$$

Donde:

$$\Delta\theta = (\eta - \theta_i) \quad (55)$$

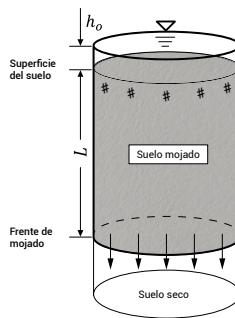


Figura 36. Infiltración en una columna de suelo de área transversal unitaria para el modelo de Green y Ampt. Tomado de "Hidrología Aplicada", Chow, Maidment, Mays (1993, p.114).

Chow, Maidment y Mays (1993) indican que, Green y Ampt desarrollan sus ecuaciones basándose en la ley de Darcy, llegando a obtener la ecuación de $F(t)$. para la infiltración acumulada.

$$F(t) - K \cdot t + \varphi \cdot \Delta\theta \cdot \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\varphi \cdot \Delta\theta} \right) = K(t) \quad (56)$$

Siendo que F ha sido calculada en la ecuación anterior, la tasa de infiltración f puede obtenerse de:

$$f(t) = K \cdot \left(\frac{\varphi \cdot \Delta\theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (57)$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

En el caso cuando la profundidad de encharcamiento h_o no es despreciable, el valor de $\varphi - h_o$ se sustituye por φ en las ecuaciones de $F(t)$ y $f(t)$.

Se obtiene:

$$F(t) = K \cdot t + \varphi \cdot \Delta\theta \cdot \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\varphi \cdot \Delta\theta} \right) \quad (58)$$

Dados K , t , φ y $\Delta\theta$, se sustituye un valor de prueba para diferentes valores y se resuelve con aproximaciones sucesivas hasta que ambos valores de $F(t)$ converjan a una constante.

Parámetros de Green y Ampt

La aplicación del modelo de Green y Ampt requiere estimaciones de la conductividad hidráulica K , de la porosidad η y de la cabeza de succión de suelo en el frente mojado φ . La variación de la cabeza de succión y de la conductividad hidráulica con el contenido de humedad φ fue estudiada por Brooks y Corey (1964). Ellos concluyeron después de analizar varios tipos de suelo en laboratorio que, φ puede expresarse como una función logarítmica de una saturación efectiva S_e . Si se denomina θ_r el contenido residual de humedad del suelo después de que se ha drenado completamente, la saturación efectiva es la relación entre la humedad disponible $\theta - \theta_r$ y el máximo contenido de humedad disponible $\eta - \theta_r$,

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r} \quad (59)$$

Donde:

$\eta - \theta_r$ – Porosidad efectiva

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

La saturación efectiva está contenida en el rango $0 \leq S_e \leq \theta \leq \eta$ siempre que . Para la condición inicial. Cuando $\theta = \theta_i$, el producto

cruzado en $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r}$ resulta en $\theta_i - \theta_r = S_e \cdot \theta_e$ y el cambio de contenido de humedad cuando pasa el frente mojado es $\Delta\theta = \eta - \theta_i = \eta - (S_e \cdot \theta_e + \theta_r)$; por consiguiente:

$$\Delta\theta = (1 - S_e) \cdot \theta_e \quad (60)$$

En la tabla 16 se muestran los valores de los parámetros a aplicar en las ecuaciones de Green y Ampt para varios tipos de suelo.

Tabla 16. Parámetros de Green y Ampt para varias clases de suelo.

| Clase de suelo | Porosidad η | Porosidad efectiva θ_e | Cabeza de succión del suelo en el frente mojado Ψ (cm) | Conductividad hidráulica K (cm/h) |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------------|
| Arena | 0.437 (0,374-0,500) | 0.417 (0,354-0,480) | 4.95 (0,97-25,36) | 11.78 |
| Arena margosa | 0.437 (0,363 - 0,506) | 0.401 (0,329 - 0,473) | 6.13 (1,35 - 27,94) | 2.99 |
| Marga arenosa | 0.453 (0,351 -0,555) | 0.412 (0,283-0,541) | 11.01 (2,67 -45,47) | 1.09 |
| Marga | 0.463 (0,375-0,551) | 0.434 (0,334 - 0,534) | 8.89 (1,33 - 59,38) | 0.34 |
| Marga limosa | 0.501 (0,420-0,582) | 0.486 (0,394 - 0,578) | 16.68 (2,92 - 95,39) | 0.65 |
| Marga arenosa arcillosa | 0.398 (0,332 - 0,464) | 0.33 (0,235 - 0,425) | 21.85 (4,42- 108,0) | 0.15 |
| Marga arcillosa | 0.464 (0,332-0,464) | 0.309 (0,235-0,425) | 20.88 (4,79 - 91,10) | 0.1 |
| Marga limo-arcillosa | 0.471 | 0.432 | 27.3 | 0.1 |

| Clase de suelo | Porosidad η | Porosidad efectiva θ_e | Cabeza de succión del suelo en el frente mojado Ψ (cm) | Conductividad hidráulica K (cm/h) |
|-----------------|--------------------------|-------------------------------|---|-----------------------------------|
| | (0,418 - 0,524) | (0,347 -0,517) | (5,67 - 131,50) | |
| Arcilla arenosa | 0.43 (0,370- 0,490) | 0.321 (0,207- 0,435) | 23.9 (4,08-140,2) | 0.06 |
| Arcilla limosa | 0.479 (0,425 - 0,533) | 0.423 (0,334- 0,512) | 29.22 (6,13 - 139,4) | 0.05 |
| Arcilla | 0.475 (0,427-0,523) | 0.385 (0,269 -0,501) | 31.63 (6,39-156,5) | 0.03 |

Recuperado de "Hidrología Aplicada", de Chow, V, 1993 p. 117, Santafé de Bogotá /Colombia: Mc GRAW HILL Inc.

5.7. Medida de la infiltración

La secuencia triple: entrada de agua, circulación y almacenamiento de agua en el suelo, hacen que se presenten dificultades en la medida de la infiltración de agua en una cuenca determinada. Los diferentes factores que afectan cada fase producen múltiples combinaciones de parámetros que impiden que haya una técnica generalizada para medir la infiltración. Se pueden utilizar tres metodologías generales para estimar la infiltración.

- a. Medidas directas de campo (infiltrómetros)
- b. Utilizando los índices obtenidos de hidrogramas
- c. Métodos empíricos

a. Infiltrómetros

Se usan en pequeñas áreas o cuencas experimentales. Existe una gran variación en los suelos o en la vegetación, para su uso se divide en áreas uniformes y en cada una de ellas se realizan mediciones.

Son de 2 tipos:

- Tipo inundación
- Simuladores de lluvia

Tipo inundación *Flooding type*

Son generalmente tubos abiertos en sus extremos, de aproximadamente 30 cm de diámetro y 60 cm de longitud, enterrados en la tierra unos 50 cm. Se les suministra agua tratando de mantener el nivel constante y se mide la cantidad de agua necesaria para esto durante varios intervalos de tiempo con lo que se puede conocer la capacidad infiltración.

Se debe continuar hasta que se obtenga la capacidad de infiltración (f) aproximadamente constante.

Las desventajas de este tipo de medición son:

- Impacto de las gotas de lluvia en el terreno no es tenido en cuenta
- Se alteran las condiciones del suelo al enterrar el tubo
- Los resultados dependen mucho del tamaño del tubo

Simuladores de lluvia

En parcelas de 2 x 4 metros se simula artificialmente la lluvia por medio de aspersores, que pueden controlar tanto la intensidad, duración y la lámina total.

Se mide la escorrentía superficial directa y la lámina infiltrada se puede hallar por medio de la ecuación de balance hídrico así:

$$I = P - ESD$$

I – Infiltración o lámina de pérdidas acumuladas

P – Altura de lluvia acumulada

ESD – Escurrimiento directo acumulado

Infiltrómetro de doble anillo



Figura 37. Infiltrómetro de doble anillo.

Adaptado de: [enlace](#)

El objetivo del uso del infiltrómetro de doble anillo es determinar la curva de infiltración y la conductividad hidráulica de un suelo saturado. La experiencia se realiza directamente en campo evitando el muestreo y posibles errores, el uso de dos anillos concéntricos evita el movimiento descendente del agua, puesto que al llenarse los dos anillos simultáneamente la velocidad del flujo lateral es despreciable frente a la rapidez del agua descendente, quién avanzará en condiciones de no saturación.

Para el uso del doble anillo se debe clavar el instrumento en el suelo firmemente hasta una profundidad de al menos 10 cm. Se coloca el dispositivo de medida del nivel de agua y procedemos a llenar con agua el anillo exterior.

Se debe llenar con la mayor rapidez posible, pero en cualquier caso sin alterar la estructura natural del suelo, de ser necesario se debe proteger del impacto del chorro de agua al momento del llenado.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Se registra el tiempo y el nivel de agua en el instante y en intervalos de tiempo preestablecidos.

Al inicio de la experiencia el suelo estará seco y el nivel del agua bajará más rápidamente, en cualquier caso, no es recomendable que el descenso del agua supere los dos centímetros.

Se van rellenando los anillos a medida que esta se infiltre, siendo aconsejable que la diferencia entre la altura máxima y la mínima no sea muy elevada.

Finalmente, tabulamos los datos y el resultado de la tasa de infiltración obtenidos durante la experiencia. Como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Datos de ensayo de infiltrómetro de doble anillo

| Lectura | Tiempo (min-seg) | Tiempo (seg) | Nivel de agua (cm) | h (infiltrada) (mm) | Tasa de infiltración (mm/h) |
|---------|------------------|--------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 50 | 0 | - |
| 2 | 2'30" | 150 | 53.50 | 35 | 840.00 |
| 3 | 6'30" | 390 | 55.20 | 17 | 255.00 |
| 4 | 11'55" | 715 | 57.00 | 18 | 199.30 |
| 5 | 0 | 0 | 55.00 | 0 | - |
| 6 | 5'12" | 312 | 55.80 | 8 | 92.31 |
| 7 | 15'0" | 900 | 57.00 | 12 | 73.47 |
| 8 | 25'0" | 1500 | 57.80 | 8 | 48.00 |
| 9 | 35'0" | 2100 | 58.70 | 9 | 54.00 |
| 10 | 45'0" | 2700 | 59.50 | 8 | 48.00 |

Nota: Forma de tabular los datos y resultados con infiltrómetro de doble anillo.

Adaptado de: [enlace](#)

Como se puede observar, en las tres últimas lecturas el nivel de agua se mantiene prácticamente igual, por tanto, el suelo habrá alcanzado la velocidad o tasa de infiltración del suelo saturado permaneciendo

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

constante hasta que el agua alcance un horizonte subyacente de características hidráulicas diferentes al horizonte superior.

Con los datos de la tasa de infiltración en (Y) y, tiempo en el eje de las (X) graficamos la curva, obteniendo así la conductividad hidráulica del suelo saturado.

5.8. Métodos de separación del flujo base

El principio en que se basa el método es la separación en el hidrograma de la parte que corresponde a la escorrentía superficial directa, del llamado flujo base. Para separar el flujo base de la escorrentía superficial directa existen varios métodos:

- La técnica más simple es dibujar una línea horizontal desde el punto en el cual empieza a ascender el hidrograma hasta el punto en el cual termina y va a comenzar la llamada curva de recesión.

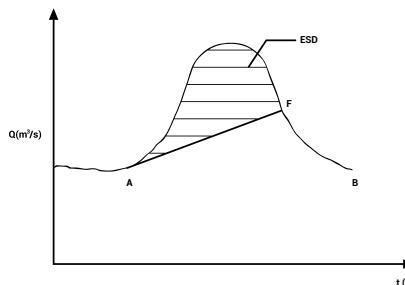


Figura 38. Método para separar flujo base (a)

Fuente: Oñate (2015)

- Un segundo método continúa la curva de recesión de A hasta C, situado debajo del caudal pico. El punto B se encuentra a N días después del pico donde:

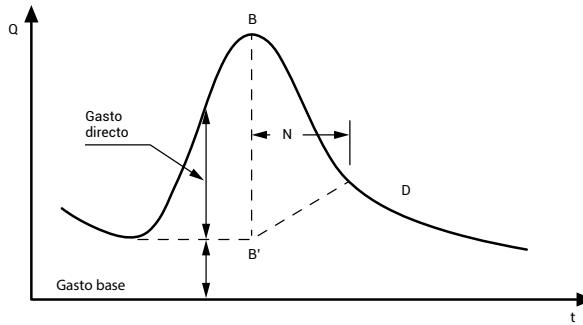


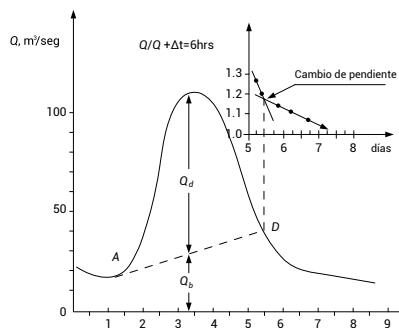
Figura 39. Método (b) de separar el gasto base.

Fuente: Aparicio. (1997)

Este método es útil en cuencas con área no menor de 3 km^2 . Sus resultados son en general aceptables, aunque como todos los demás deben tomarse con precaución.

c. Otro método más consistente para buscar el punto de mayor curvatura de la curva de recesión del hidrograma. Esto se puede hacer:

- Se tiene un hidrograma en el que se tienen los gastos.
- Se los ordena en orden descendente.
- Se los divide entre los ocurridos en Δt fijo $Q + \Delta t$ contra el tiempo.
- El punto donde ocurra cambio de pendiente tiene la mayor curvatura de la rama descendente y por tanto el punto D .



| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----|------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|
| día | hora | $Q \text{ m}^3/\text{s}$ | $Q+6 \text{ m}^3/\text{s}$ | $Q/Q+6 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| 5 | 12 | 60,1 | 47,5 | 1,27 |
| | 18 | 47,5 | 39 | 1,22 |
| | 24 | 39 | 33,2 | 1,17 |
| 6 | 6 | 33,2 | 28,6 | 1,16 |
| | 12 | 28,6 | 25,2 | 1,13 |
| | 18 | 25,2 | 22,7 | 1,11 |
| | 24 | 22,7 | 20,9 | 1,09 |
| 7 | 6 | 20,9 | 19,7 | 1,06 |
| | 12 | 19,7 | 18,9 | 1,04 |
| | 18 | 18,9 | 18,2 | 1,04 |
| | 24 | 18,2 | | |

Figura 40. Método (c) de separar el gasto base

Fuente: Aparicio. (1997)

Una vez localizado el punto *D* por medio de cualquiera de los métodos anteriores o de algún otro, se traza la línea de separación entre el gasto base y el directo.

- d. Un cuarto procedimiento prolonga la curva de recesión de *B* hasta un punto *F*, situado debajo del punto de inflexión de la rama descendente. Este punto se une luego con el punto *A*, inicio del hidrograma.

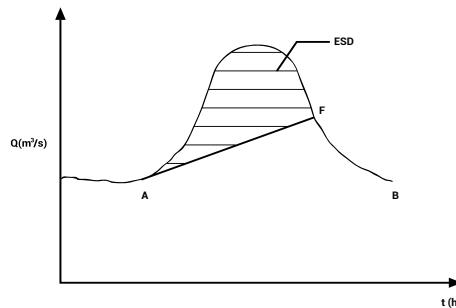


Figura 41. Método para separar flujo base (d)
Adaptado de: Oñate (2015, p68)

Una vez separado el flujo base, se expresa en forma de lámina, es decir, se calcula la lluvia en exceso efectiva h_{pe} como el volumen de escurrimiento directo dividido entre el área de la cuenca.

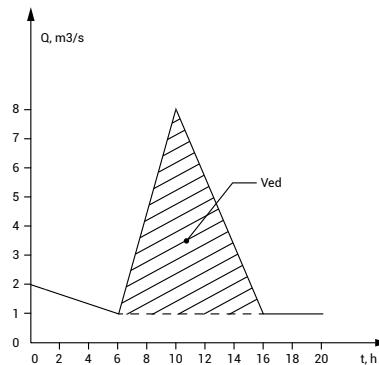


Figura 42. Ejemplo de Hidrograma separado el flujo base
Adaptado de: Aparicio (1997)

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

$$h_{pe} = \frac{V_{ed}}{A_c}$$

Finalmente, se calcula el índice de infiltración media Φ . Trazando una línea horizontal en el histograma de la tormenta, de tal manera que la suma de las alturas de precipitación que queden arriba de esa línea sea igual a h_{pe} .

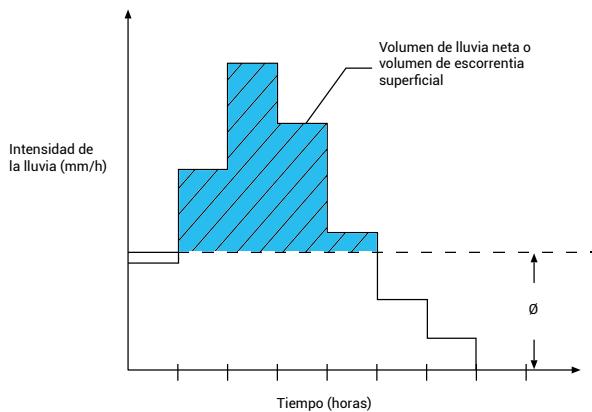


Figura 43. Cálculo del índice de infiltración media

Fuente: Chow, Maidment, Mays (1993). *Hidrología Aplicada*.

El índice de precipitación media será igual a la altura de precipitación correspondiente a la línea horizontal dividida entre el intervalo de tiempo Δt que dure cada barra del histograma.

Ejemplo:

De acuerdo con la siguiente información obtenga el índice de infiltración y el coeficiente de escurrimiento. Sabiendo que el área de la cuenca es de 0.5 Ha.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

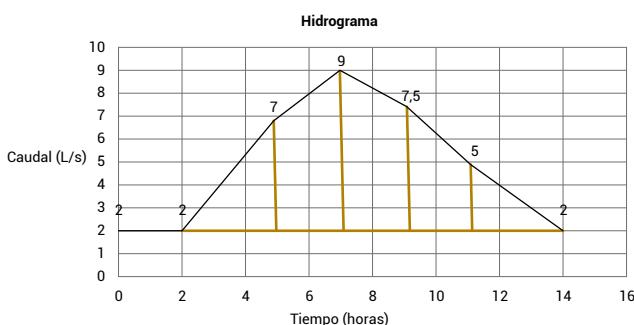
Tabla 18. Datos de caudal

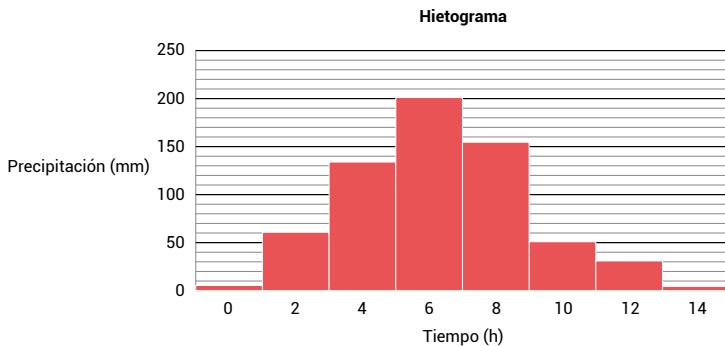
| t(horas) | Q (L/s) |
|----------|---------|
| 0 | 2 |
| 2 | 2 |
| 5 | 7 |
| 7 | 9 |
| 9 | 7.5 |
| 11 | 5 |
| 14 | 2 |

Tabla 18. Datos de caudal

| t(horas) | P(mm) |
|----------|-------|
| 0 | 5 |
| 2 | 60 |
| 4 | 134 |
| 6 | 200 |
| 8 | 156 |
| 10 | 50 |
| 12 | 32 |
| 14 | 5 |

Con los datos graficamos el hidrograma y hietograma.





Se calcula el área bajo la curva del hidrograma, separando el flujo base. Tenemos:

$$A = \frac{3h(5 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}) \times \frac{3600}{1h}}{2} + \frac{(5+7)10^{-3} \frac{m^3}{s} \times 2 \times \frac{3600}{1h}}{2} + \frac{(7+5.5)10^{-3} \frac{m^3}{s} \times 2 \times \frac{3600}{1h}}{2} + \frac{(5.5+3)10^{-3} \frac{m^3}{s} \times 2 \times \frac{3600}{1h}}{2} + \frac{3h(3 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}) \times \frac{3600}{1h}}{2}$$

$$A = 162 \text{ m}^3$$

$$h_{pe} = \frac{V_{ed}}{A_c} \quad h_{pe} = \frac{162}{5000 \text{ m}^2}$$

$$h_{pe} = 0.0324 \text{ m} \cong 32.4 \text{ mm}$$

Trazo una línea horizontal sobre el hidrograma ubicada donde, aproximadamente, tenga por sobre esta, el valor de h_{pe} , en este ejemplo es muy fácil ya que tenemos un valor que sobresale, de 200 mm. Queda para los tanteos.

Tabla 20. Tanteos para definir el Φ

| $\Phi(\text{mm/h})$ | $h_{pe1} (\text{mm})$ | $h_{pe2} (\text{mm})$ | $h_{pe3} (\text{mm})$ | $h_{pe4} (\text{mm})$ | $h_{pe5} (\text{mm})$ | $h_{pe6} (\text{mm})$ | $h_{pe7} (\text{mm})$ | $h_{pe8} (\text{mm})$ | $\Sigma h_{ei} (\text{mm})$ |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| - | - | - | - | 32,4 | | | | | 32,4 |

Índice

Primer bimestre

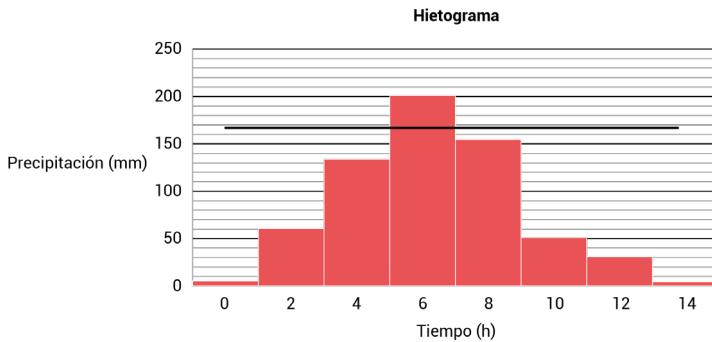
Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Como se observa para este valor, corta en el bloque 4, dejando la diferencia de los valores de precipitación que infiltran, en este caso $h = 167.6$



$$\phi = \text{altura de línea horizontal}/\Delta t$$

$$\phi = \frac{167.6 \text{ mm}}{2 \text{ h}}$$

$$\phi = 83.8 \text{ mm/h}$$

Coeficiente de escurrimiento directo C_e

$$C_e = \frac{V_{ed}}{Vll} = \frac{hpe \cdot Ac}{P \cdot Ac}$$

$$C_e = \frac{32.4}{642}$$

$$C_e = 0.054 \equiv 5.04\%$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

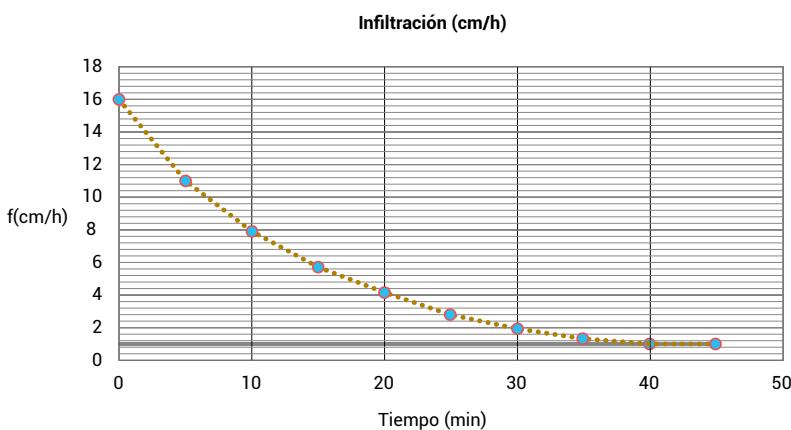
Ejemplo:

Determinar la ecuación de la curva de capacidad de infiltración para los siguientes datos observados.

Tabla 21. Datos para cálculo de capacidad de infiltración

| t (min) | f(cm/h) |
|---------|----------|
| 0 | 16 |
| 5 | 11 |
| 10 | 7.9 |
| 15 | 5.7 |
| 20 | 4.1 |
| 25 | 2.8 |
| 30 | 1.9 |
| 35 | 1.3 |
| 40 | 1 |
| 45 | 1 |

Dibujamos la curva y se obtiene. (Se puede hacer manualmente)



Identificamos los valores de f_o y f_c

$$f_o = 16 \text{ cm/h}$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

$$f_c = 1 \text{ cm/h}$$

La Ecuación de *Horton* tiene la forma:

$$f_p = f_c + (f_o - f_c) \cdot e^{-kt}$$

Tomando la ecuación para dos puntos consecutivos de la curva, en este caso el valor de 11 cm /h tenemos:

$$11 \text{ cm/h} = 1 \text{ cm/h} + (16 \text{ cm/h} - 1 \text{ cm/h}) \cdot e^{-5k}$$

Entonces:

$$e^{-5k} = 10/15$$

Resolviendo matemáticamente y aplicando las leyes de los logaritmos:

$$-5k \cdot \ln e = \ln \left(\frac{10}{15} \right)$$

$$K = -0.081$$

Finalmente, tenemos:

$$f_p = 1 + (16 - 1) \cdot e^{-0.081t}$$

Ejemplo:

En la cuenca del río Chaqueinal se presentó una tormenta cuyas variaciones de caudal se presentan en tabla a continuación. Las alturas de precipitación se registran en las estaciones A, B y C que se encuentran en la cuenca. Así A = 90 mm; B = 70 mm; C = 30 mm. El área para A = 150 Ha; B = 200 Ha C = 100 Ha. Con esta información determine:

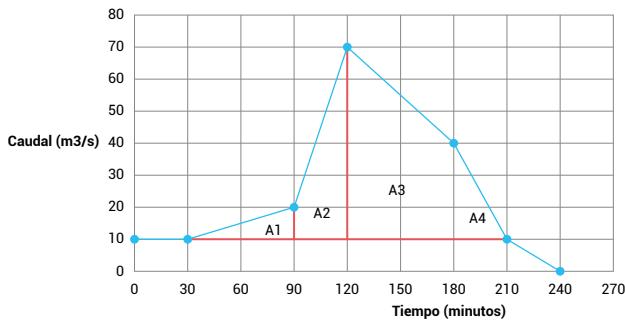
- a. La lámina escurrida
- b. Coeficiente de escurrimiento

Tabla 21. Datos de caudal

| tiempo (min) | Q (m^3/s) |
|--------------|-----------------|
| 0 | 10 |
| 30 | 10 |
| 90 | 20 |
| 120 | 70 |
| 180 | 40 |
| 210 | 10 |
| 240 | 0 |

| ESTACIÓN | ÁREA (Ha) |
|----------|-----------|
| A | 150 |
| B | 200 |
| C | 100 |

Se grafica el hidrograma con los datos proporcionados. El área de la cuenca es 450 Ha, es decir $4500000 m^2$.



[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Se calcula al área bajo el hidrograma, se tiene:

Tabla 22. Cálculo de área bajo curva del histograma

| DESCRIPCIÓN | ÁREA (m3) |
|-------------|---------------|
| A1 | 18000 |
| A2 | 63000 |
| A3 | 162000 |
| A4 | 27000 |
| suma | 270000 |

Calculamos el valor de h_{pe}

$$h_{pe} = \frac{V_{ed}}{A_c} \quad h_{pe} = \frac{270000 \text{ m}^3}{4500000 \text{ m}^2}$$

$$h_{pe} = 0.086 \text{ m}; \quad h_{pe} = 86 \text{ mm}$$

Calculamos el valor de la Precipitación: al no tener más información utilizamos el método aritmético.

$$P_m = \frac{P_A + P_B + P_C}{N} = \frac{90 + 70 + 30}{3}$$

$$P_m = 63.33 \text{ mm}$$

$$C_e = \frac{V_{ed}}{Vll} = \frac{h_{pe} \cdot A_c}{P * A_c}$$

$$C_e = \frac{86 \text{ mm}}{63.33}$$

$$C_e = 1.36$$

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

5.9. Abstracciones y Número de la curva

Para el estudio de este subtema, revise el siguiente recurso.

Abstracciones y número de la curva

[Ir a recursos](#)

Una vez que ha concluido con la revisión del recurso sobre abstracciones y número de la curva, (CN) por sus siglas en inglés, revisemos los siguientes ejemplos de casos que se presentan.

Ejemplo:

Calcular la Precipitación efectiva (Pe) que se producirá en una parcela de 8 Ha que presenta una pendiente menor al 1 %, donde se ha registrado una precipitación total de 63 mm. La parcela presenta suelo con alto contenido de arcilla y considerables cantidades de arena y finos. Ha sido utilizada para el cultivo de leguminosas, que fueron sembradas siguiendo las curvas de nivel. Estos cultivos cubren el 20% de la parcela. El resto de la parcela está cubierto de pastizales. En la cuenca, se registró en los 5 días precedentes una precipitación total de 71 mm.

Solución:

De la tabla 12. Definimos el tipo de suelo y el grupo hidrológico. En este caso la descripción se ajusta al tipo de suelo **TIPO C** (Franco-arcillo–arenoso).

Tengo una lluvia antecedente de 71 mm. Entonces corresponde a una condición de AMCIII. Según se estable por:

- AMC III para suelos húmedos, $lI_5 > 5 \text{ cm}$.

De la tabla 3 seleccionamos el *CN* según las condiciones y usos del suelo. Entonces tenemos:

Tabla 23. Valores de *CN* para condiciones y uso de suelo del ejemplo

| Descripción | CN |
|---|----|
| Para cultivos de leguminosas sembrados en contorno y pendiente < 1% Tipo de suelo C | 78 |
| Para pastizales pendiente < 1%. Tipo de suelo C | 74 |

Estos valores corresponden a una condición *AMCII*, por tanto, se deben corregir y llevarlos a la condición *AMCIII*.

Aplicamos las ecuaciones 65 o 66 según corresponda, en este caso la ecuación 66.

$$CN_{III} = \frac{23 \cdot CN_{II}}{10 + 0.13 \cdot CN_{II}}$$

$$CN_{III} = \frac{23 * 78}{10 + 0.13(78)}$$

- Para las leguminosas ***CN_{II} = 89.976***

$$CN_{III} = \frac{23 * 74}{10 + 0.13(74)}$$

- Para los pastizales ***CN_{II} = 86.75***

Ponderamos el valor de *CN* para la cuenca.

$$CN_{ponderado} = \frac{89.076(20)+(86.75)(80)}{100}$$

- CN_{ponderado} = 87.22*

Calculamos el valor de P_e

$$P_e = \frac{\left[P - \frac{508}{CN} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32}$$

$$P_e = \frac{\left[6,3 - \frac{508}{87.22} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{87.22} - 20.32}$$

- $P_e = 2.445 \text{ cm} ; P_e = 24.45 \text{ mm}$

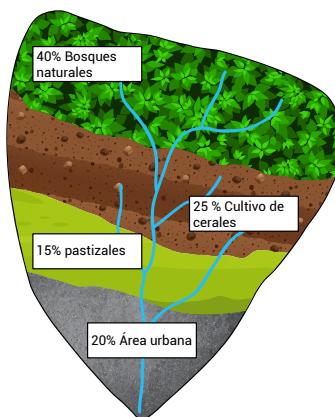
Tenemos entonces una precipitación efectiva P_e de 24.45 mm

Ejemplo:

Se va a construir una obra de corrección de torrentes en el cauce del río Zamora, aguas abajo de la unión con el río Malacatos. Se tiene información secundaria que indica que en 1970, la cuenca aportante estaba cubierta en un 40% de bosques naturales normales, en un 25% estuvo cultivado por cereales siguiendo las curvas de nivel en los sectores con pendiente menor al 1 %, pastizales 15% para ganado vacuno. Y el 20% en área urbana: 70% en lotes de 1/3 acre aproximadamente, y 30% en infraestructura urbana. Al 2017, la cuenca ha sido significativamente modificada y el crecimiento urbano ha llegado a un 40% de la cuenca ocupando las zonas que inicialmente fueron bosques naturales. La frontera agrícola ha crecido en un 10% con cultivos de leguminosas en terrazas con pendiente mayor al 1 %. El porcentaje restante se mantiene con pastizales. El valor de precipitación media en los últimos 5 años es de 3,01 mm. Asumir este valor para el cálculo que corresponda. ¿Cuál es el valor de la escorrentía máxima? Considerando que los suelos de esta cuenca están compuestos por una mezcla de arena y limo con un alto porcentaje de arcilla. ¿Qué diferencia porcentual en la escorrentía se puede apreciar?

Del enunciado del ejemplo, que es un caso de estudio, observamos que se pide analizar dos escenarios o estados, así analizamos por separado cada estado y luego concluiremos como el cambio de uso del suelo modifica el valor del coeficiente de escorrentía Ce .

Escenario 1. A 1970



20% del área urbana está compuesta en un 70% por lotes de 1/3 Acre y el 30% en infraestructura urbana.

Por la descripción se asume que el grupo hidrológico del suelo corresponde a **TIPO C**.

Se entiende que la condición hidrológica es la AMCII.

De la tabla 3 seleccionamos el CN según las condiciones y usos del suelo. Entonces para este caso tenemos:

Tabla 24. Valores de CN para condiciones y uso de suelo del ejemplo

| Descripción | CN |
|---|----|
| Para Bosques naturales normales Tipo de suelo C | 70 |
| Para cereales siguiendo las curvas de nivel en los sectores con pendiente menor al 1 %. Tipo de suelo C | 81 |
| Pastizales | 70 |

Para el área urbana pondero el CN de los porcentajes dados.
Entonces, revisamos la tabla 14 donde se encuentra el tipo de suelo y usos.

Tabla 25. Valores de CN para condiciones y uso de suelo área urbana

| Descripción | CN |
|---|----|
| Para áreas urbanas. Lotes de 1/3 Acre | 81 |
| Infraestructura urbana. Pavimentadas y alcantarillados. Tipo de suelo C | 98 |

$$CN_{\text{ponderado area urbana}} = \frac{70 \% * 81 + 30 \% * 98}{100 \%}$$

$$CN_{\text{ponderado area urbana}} = 86.1$$

Luego ponderamos el CN de toda la cuenca.

$$CN_{\text{ponderado total}} = \frac{40 \% * 70 + 25 \% * 81 + 15 \% * 70 + 20 \% * 86.1}{100 \%}$$

- $CN_{\text{ponderado total}} = 75.97$

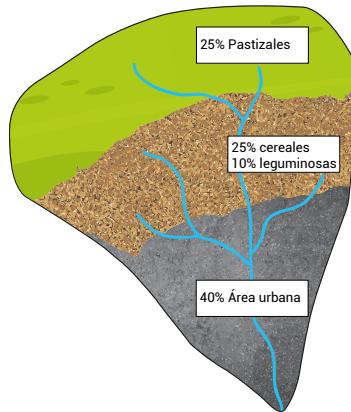
Calculamos la Pe para el caso 1.

$$P_e = \frac{\left[P - \frac{508}{CN} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32}$$

$$P_e = \frac{\left[3.01 - \frac{508}{75.97} + 5.08 \right]^2}{3.01 + \frac{2032}{75.97} - 20.32}$$

$$Pe = 0.211 \text{ cm} = 2.11 \text{ cm}$$

Escenario 2. A 2017



Área urbana, se conserva las mismas condiciones, por tanto, el $CN_{\text{ponderado}} = 86.1$

Área de cultivos:

Tabla 26. Valores de CN para escenario 2

| Descripción | CN |
|---|----|
| Para cereales siguiendo las curvas de nivel en los sectores con pendiente menor al 1 %. Tipo de suelo C | 81 |
| Leguminosas | 80 |
| Pastizales | 70 |

$$CN_{\text{ponderado}} = \frac{40 \% * 86.1 + 25 \% * 81 + 10 \% * 80 + 25 \% * 70}{100 \%}$$

- $CN_{\text{ponderado}} = 80.19$

Asumiendo el mismo valor de P (mm)

$$P_e = \frac{\left[3.01 - \frac{508}{80.19} + 5.08 \right]^2}{3.01 + \frac{2032}{80.19} - 20.32}$$

$$P_e = 0.36 \text{ cm} = 3.86 \text{ mm}$$

Para analizar la escorrentía o escurrimiento, calculamos el Ce.

$$C_e = \frac{V_{ed}}{Vll} = \frac{hpe \cdot Ac}{P \cdot Ac}$$

$$C_{e1} = \frac{0.211}{3.01}$$

- $C_{e1} = 0.07 \equiv 7\%$

$$C_{e2} = \frac{0.386}{3.01}$$

- $C_{e2} = 0.1282 \equiv 12.82\%$

Como era de suponer el porcentaje de escurrimiento medido desde el Ce, crece al aumentar el área urbana. En un **5.82 %**.



Actividades de aprendizaje recomendadas

¡Felicitaciones! Ha concluido la unidad 5 de infiltración, ahora puede continuar al siguiente parámetro, escurrimiento.

Antes, le recomiendo realizar la lectura analítica de la unidad y seguir con la elaboración del formulario, sacar y adjuntar las tablas que correspondan.

Es hora de autoevaluarse, desarrolle la autoevaluación 5.



Autoevaluación 5

Lea detenidamente los siguientes enunciados y conteste como corresponde en cada una las preguntas que se formula, sea dicotómicas o de selección múltiple.

1. Señale la respuesta correcta. En el proceso de la infiltración, para analizar y describir el fenómeno, se estima:
 - a. Un área de la cuenca de dimensiones medias, de modo que sus características: tipo de suelo, cobertura vegetal, porosidad, granulometría, etc., así como la intensidad de la lluvia en el espacio sean uniformes y permanentes.
 - b. Que las condiciones de suelo: tipo, cobertura vegetal, contenido de humedad, porosidad, granulometría, etc., así como la intensidad de la lluvia en el espacio puedan considerarse uniformes y permanentes.
 - c. Considerar una cuenca de área pequeña, de modo que sus características de suelo: tipo, cobertura vegetal, granulometría, humedad, etc., así como la intensidad de la lluvia en el espacio puedan considerarse uniformes, aunque la última varíe en el tiempo.
 - d. Ninguna de las anteriores.
2. Señale con verdadero o falso: cuando se presentan las siguientes condiciones: $i < fp$ y $f = i$ predominan las fuerzas gravitatorias y se produce el escurrimiento.
 - a. () Verdadero.
 - b. () Falso.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

3. Señale la respuesta correcta. Entre los diferentes parámetros que influyen en el proceso de infiltración, se encuentra la textura, estructura y condición del suelo que se miden por:
 - a. Contenido de humedad del suelo, límite líquido y plástico del suelo, porosidad.
 - b. Contenido de humedad del suelo, porosidad, permeabilidad.
 - c. Porosidad, permeabilidad, forma de los granos, humedad del suelo.
 - d. Ninguna de las anteriores.
4. Señale con verdadero o falso. El índice de infiltración media φ considera que la capacidad de infiltración durante toda la tormenta es variable.
 - a. () Verdadero.
 - b. () Falso.
5. Identifique la respuesta correcta. Para el cálculo de la altura de precipitación efectiva, requerimos conocer:
 - a. El hietograma de la tormenta.
 - b. El hidrograma de la tormenta.
 - c. Las curvas IDF.
 - d. Ninguna de las anteriores.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

6. Identifique la respuesta correcta. El índice de infiltración media será igual a:
- La altura de precipitación h_{pe} dividida entre el intervalo de tiempo Δt que dure cada barra del hietograma.
 - La altura de precipitación h_{pe} dividida entre el intervalo de tiempo $\Delta t = 1$ h.
 - La altura de precipitación correspondiente al restante de h_{pe} trazada con la línea horizontal, dividida entre el intervalo de tiempo Δt que dure cada barra del hietograma.
7. Señale con verdadero o falso, según corresponda. El método de Horton para representar el proceso de infiltración es un método exacto y nos proporciona una idea precisa del valor de la capacidad de infiltración del suelo.
- () Verdadero.
 - () Falso.
8. Identifique los parámetros que se requiere conocer para la aplicación del método de Green y Ampt para el cálculo de la capacidad de infiltración de un suelo.
- Límite líquido y plástico, contenido de humedad, porosidad.
 - Granulometría, conductividad hidráulica, porosidad.
 - Porosidad, cabeza de succión, conductividad hidráulica, contenido de humedad.
 - Ninguna de las anteriores.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

9. Señale con verdadero o falso. El método desarrollado por la SCS para la estimación de la altura de precipitación efectiva o de exceso, considera que la precipitación o escorrentía directa P_e , es mayor o igual a la profundidad de la precipitación P .
- a. () Verdadero.
b. () Falso.
10. Señale la respuesta correcta: Los valores del Número de la curva CN para superficies impermeables es $CN = 100$.
- a. () Verdadero.
b. () Falso.

[Ir al solucionario](#)



Semana 11



Unidad 6. Escurrimiento

Iniciamos una nueva unidad, escurrimiento superficial, como todos los parámetros estudiados anteriormente, es importante dentro del ciclo hidrológico; y, como ya se habrá dado cuenta, todos están conectados, no puede haber un fenómeno sin la existencia del otro, el escurrimiento es la respuesta de la cuenca a la precipitación e infiltración; por tanto, de particular importancia para la medición y cálculo de caudales en cauces.

6.1. Introducción

El escurrimiento se define como el agua que proviene de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre que llega a una corriente para luego drenar hasta la salida de la cuenca. Una parte del agua que llega a la superficie terrestre es retenida y evaporada, la restante se mueve superficialmente, subsuperficial y subterráneamente hasta la salida de la cuenca.

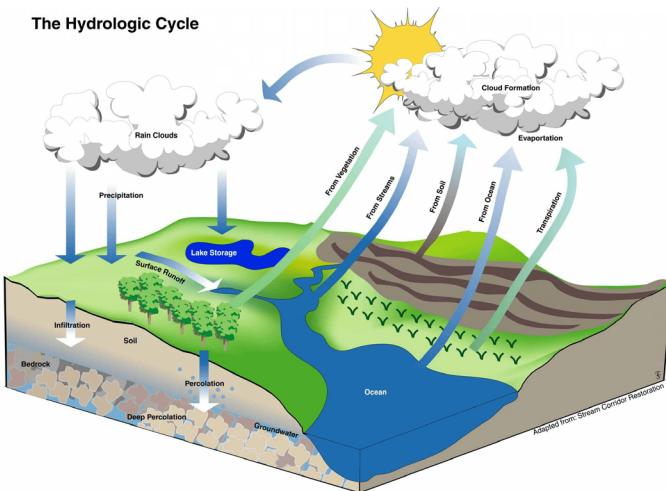


Figura 44. Esquema de escurrimiento

Fuente: [Enlace](#)

El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre se infiltra en las capas superiores del suelo saturándolo, una vez que se llenan las depresiones del terreno, el agua empieza a escurrir sobre la superficie, produciéndose el **escurrimiento sobre el terreno**. El agua se mueve, infiltrándose parcialmente y evaporándose en pequeñas cantidades, hasta llegar a un curso permanente, en donde el flujo se convierte en **escurrimiento de corrientes**. El escurrimiento sobre la superficie y en corrientes forma el denominado **escurrimiento superficial**.

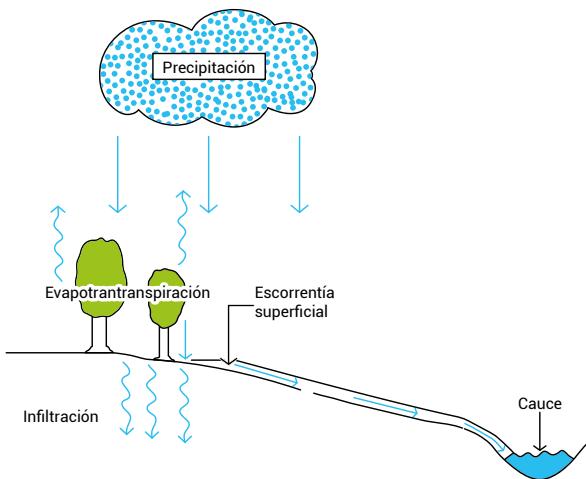


Figura 45. Escurrimiento superficial

Fuente: [Enlace](#)

Una parte del agua de precipitación que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él. A esta parte se le llama **escurrimiento subsuperficial**.

La otra parte que se infiltra hasta los niveles inferiores al freático, se denomina **escurrimiento subterráneo**.

De los tres tipos de escurrimiento, el superficial es el que llega más rápido hasta la salida de la cuenca. Por ello está relacionado directamente con una tormenta particular y entonces se dice que proviene de la **precipitación en exceso o efectiva** y que constituye el **escurrimiento directo**.

El escurrimiento subterráneo es el que de manera más lenta llega hasta la salida de la cuenca (puede tardar años) y, en general, difícilmente se le puede relacionar con una tormenta particular, a menos que la cuenca sea demasiado pequeña y su suelo muy permeable. Debido a que se produce bajo el nivel freático, es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias y por eso se dice que forma el **escurrimiento base**.

El escurrimiento subsuperficial puede ser tan rápido como el superficial o casi tan lento como el subterráneo, dependiendo de la permeabilidad de los estratos superiores, lo cual dificulta distinguirlos.

Lo importante es la rapidez con que una cuenca responde a una tormenta, esto es lo que determina la magnitud de las correspondientes avenidas.

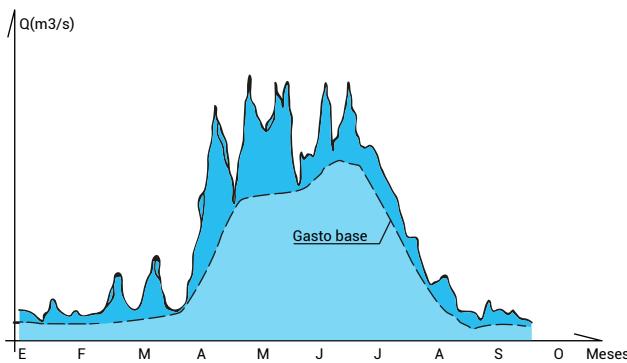


Figura 46. Hidrograma anual

Adaptado de: Aparicio (1997 p. 28)

6.2. Factores que afectan el escurrimiento

El escurrimiento superficial fundamentalmente depende de dos factores:

- Factores meteorológicos:** Se pueden considerar la forma, el tipo, la duración y la intensidad de la precipitación, la dirección y la velocidad de la tormenta, y la distribución de la lluvia en la cuenca.
- Factores fisiográficos:** En este mencionaremos a las características físicas de la cuenca, estos son forma, elevación, pendiente; uso del suelo, humedad antecedente.

Factores meteorológicos

La forma y tipo de precipitación tiene gran influencia en la distribución de los escurrimientos en la cuenca. Así, por ejemplo, si la precipitación es de origen orográfico, seguramente ocurrirá en las zonas montañosas, parte alta de la cuenca, por lo que los escurrimientos se regularizan notablemente durante su recorrido, y se tendrán valores relativamente bajos de caudal en la descarga.

Si la precipitación cae en forma de lluvia, con intensidad y duración suficiente, el escurrimiento superficial se presentará casi de inmediato, no ocurriendo lo mismo cuando la precipitación es en forma de nieve, donde la respuesta de la cuenca será más lenta debido al tiempo necesario para que se produzca el deshielo. Notándose el efecto de la forma de precipitación.

Cuando la intensidad de lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo, se presenta el escurrimiento superficial, observándose para incrementos posteriores en la intensidad de lluvia, aumento en el caudal transportado por el río. Esta respuesta, sin embargo, no es inmediata, pues existe retardo debido al tamaño de la cuenca, al almacenamiento en las depresiones y al efecto regulador de los cauces.

La capacidad de infiltración del suelo disminuye durante la precipitación, por lo que puede darse el caso, que con tormentas con intensidad de lluvia relativamente baja, produzcan un escurrimiento superficial considerable, si su duración es extensa. En particular en las zonas bajas de la cuenca, para lluvias de mucha duración, el nivel freático puede ascender hasta la superficie del suelo, llegando a nulificar la infiltración, aumentando la magnitud del escurrimiento.

En cuanto a la distribución de la lluvia, es muy difícil sobre todo en cuencas de gran extensión que la precipitación se distribuya de forma uniforme y, con la misma intensidad en toda el área de la cuenca.

El escurrimiento resultante de cualquier lluvia depende de la distribución en tiempo y espacio de esta. Si la precipitación se concentra en la parte baja de la cuenca, producirá caudales mayores, que los que se tendrían si tuvieran lugar en la parte alta, donde el efecto regulador de los caudales y el retardo en la concentración, se manifiestan en una disminución del caudal máximo de descarga.

Aunque la lluvia es el factor más importante que afecta y determina la magnitud de un escurrimiento, no es el único que debe considerarse. Existen condiciones meteorológicas generales que influyen, aunque de manera indirecta, como la temperatura, viento, humedad relativa, entre otros.

Factores fisiográficos

Se ha observado que la relación entre el tamaño de la cuenca y el caudal de descarga no es lineal. A igualdad de los demás factores, para cuencas mayores, se observa una disminución relativa en el caudal máximo de descarga, debido a que son mayores, el efecto de almacenaje, la distancia recorrida por las aguas, y el tiempo de regulación en los cauces naturales.

La forma de la cuenca, cuantitativamente, tiene influencia en el escurrimiento y se han propuesto índices numéricos, como es el caso del **factor de forma** y el **coeficiente de compacidad**.

La elevación media de la cuenca, así como la diferencia entre sus elevaciones extremas, influye en las características meteorológicas, que determinan principalmente las formas de precipitación, cuyo efecto en la distribución se ha mencionado anteriormente.

La pendiente media de la cuenca es uno de los factores que mayor influencia tiene en la duración del escurrimiento sobre el suelo y los cauces naturales, afectando de manera notable la magnitud de las descargas influye, así mismo, sobre la infiltración, la humedad del suelo y la probable aparición de aguas subterráneas al escurrimiento superficial.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

El tamaño de los granos del suelo, su ordenamiento y contenido de materia orgánica, etc., son factores íntimamente ligados a la capacidad de infiltración, como ya se mencionó en el capítulo 5, por lo que el suelo predominante en la cuenca, así como su uso, influye notablemente en la magnitud y distribución de los escurrimientos.

6.3. Hidrogramas

Un hidrograma es una gráfica que relaciona el caudal con el tiempo. Caudal se define como el volumen de agua por unidad de tiempo. El gasto que pasa de manera continua durante todo un año por una determinada sección transversal de un río y se grafican los valores obtenidos Vs el tiempo. Esto lo podemos ver en la figura 64, donde se muestra un Hidrograma anual.

Si la escala se amplía de tal manera que se pueda observar el escurrimiento producido por una sola tormenta, se tendría un hidrograma aislado. La forma de los hidrogramas producidos por tormentas particulares varía no sólo de una cuenca a otra, sino también de tormenta a tormenta.

En la figura 47 se puede observar las principales partes que se pueden distinguir de un hidrograma.

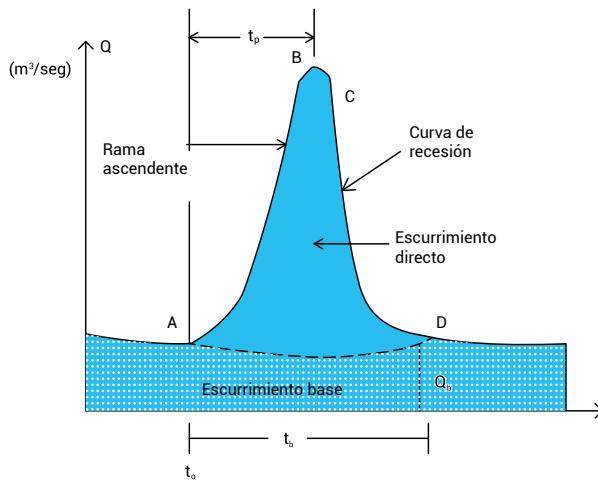


Figura 47. Partes de un Hidrograma

Fuente: [Enlace](#)

Punto de levantamiento A: En este punto, el agua proveniente de la tormenta bajo análisis comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce inmediatamente después de iniciada la tormenta, durante la misma o incluso cuando ha transcurrido ya algún tiempo después de que cesó de llover, dependiendo de varios factores, entre los que se pueden mencionar el tamaño de la cuenca, su sistema de drenaje y suelo, la intensidad de la lluvia, entre otros.

Pico B: Es el caudal máximo que se produce por la tormenta. Con frecuencia es el punto más importante de un hidrograma para los diseños de obras hidráulicas.

Punto de inflexión C: En este punto es cuando termina el flujo sobre el terreno aproximadamente y, de aquí en adelante lo que resta de agua en la cuenca escurre por los canales y como escurrimiento subterráneo.

Final del escurrimiento directo D: De este punto en adelante el escurrimiento es solo de origen subterráneo. Normalmente se acepta como el punto de mayor curvatura de la curva de recesión, aunque pocas veces se distingue de fácil manera.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Tiempo de pico tp : Es el tiempo medido desde el punto de levantamiento A hasta el pico del hidrograma.

Tiempo de base tb : Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el punto final del escurrimiento directo. Es, entonces, el tiempo que dura el escurrimiento directo.

Rama ascendente: Es la parte del hidrograma que va desde el punto de levantamiento hasta el pico.

Rama descendente: O curva de recesión, es la parte del hidrograma que va desde el pico hasta el final del escurrimiento directo. Tomada desde el punto de inflexión, es una curva de vaciado de la cuenca.

El tiempo base de un hidrograma aislado puede ser desde algunos minutos hasta varios días, y el pico puede tener valores del orden de unos cuantos litros/s hasta miles de m^3/s .

El área bajo el hidrograma, $\int_{t_0}^t Q dt$, es el volumen total escurrido; el área bajo el hidrograma y arriba de la línea de separación entre gasto base y directo $\int_{t_0}^t (Q - Q_b) dt$, es el escurrimiento directo.

Debido a que el escurrimiento directo proviene de la precipitación, casi siempre aporta un componente del gasto total en un hidrograma mucho mayor que el que genera el escurrimiento base. Por otra parte, el escurrimiento base está formado, normalmente, por agua proveniente de varias tormentas que ocurrieron antes de la considerada y es muy difícil determinar a cuáles pertenece.

Para poder correlacionar la precipitación con los hidrogramas que genera es necesario antes separar el gasto base del directo. En vista de que rara vez es posible conocer con precisión la evolución de los niveles freáticos durante una tormenta y el punto D de un hidrograma, la tarea no es fácil, existen varios métodos, pero en general se detalla el siguiente:

- a. El más simple consiste en trazar una línea recta entre el punto **A** y el **D** del hidrograma. Puede dar buenas aproximaciones, especialmente en pequeñas tormentas donde los niveles freáticos no se alteran mayormente, en general, se sobreestima el tiempo base y el volumen de escurrimiento directo.
- b. Otro método es el de determinar una curva tipo vaciado del escurrimiento base, analizando varios hidrogramas y seleccionando aquellos tramos en que solo exista escurrimiento base. Como se muestra en la figura 66(a).

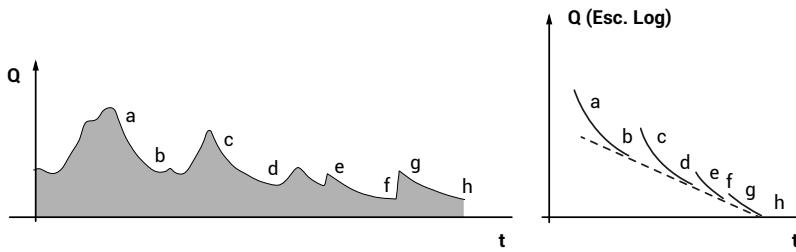


Figura 48. (a) Hidrogramas (b) Selección en escala logarítmica

Fuente: Aparicio. (1997, p. 31-32)

Estos tramos podrían ser los a-b-c-d-e-f-g... Los tramos seleccionados se dibujan posteriormente en papel semilogarítmico de manera que sus extremos inferiores sean tangentes a una línea como se puede ver en la figura 48 (b).

Si uno de los tramos seleccionados está formado por escurrimiento directo, se nota de inmediato que no es tangente a dicha línea, por tanto, estos tramos se eliminan.

El punto D del hidrograma se localiza superponiendo la curva de vaciado dibujada en papel aritmético y a la misma escala que el hidrograma a la curva de recesión del hidrograma.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

El punto D se encuentra entonces donde ambas líneas se separan. Este método es más preciso que el anterior, pero tiene la desventaja de que se requiere contar con varios hidrogramas registrados anteriormente, lo que no siempre es posible.

Existe un método que relaciona el tiempo de vaciado con el área de la cuenca. Una relación muy utilizada es la siguiente:

$$N = 0.827 A^{0.2} \quad (67)$$

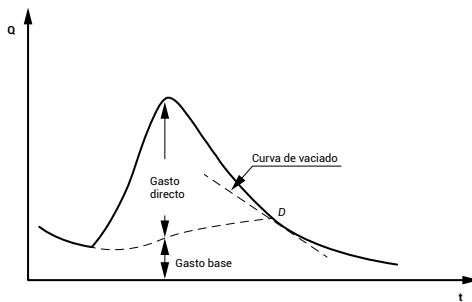


Figura 49. Hidrograma y gasto base

Fuente: Aparicio (1997, p. 32)

N - Tiempo de vaciado del escurrimiento directo en días.

A - Área de la cuenca [km^2]

D – Tiempo N días después del pico.

6.4. Monitoreo de caudales y aforos

La hidrometría, es la rama de la hidrología que estudia la medición de escurrimiento. Para este mismo fin, es usual emplear otro término denominado **aforo** que no es otra que determinar las mediciones de caudal que pasa por una sección dada. El aforo se puede realizar empleando varias metodologías, la elección del método de aforo depende de las características del curso de agua en cuanto a la

naturaleza del lecho, su pendiente y el caudal principalmente. Los más utilizados son:

1. Aforos con flotadores
2. Aforos volumétricos
3. Aforos químicos
4. Aforos con vertederos
5. Aforos con correntómetro
6. Aforo con medidas de la sección y pendiente

6.5. Métodos de aforo

6.5.1. Aforo con flotadores

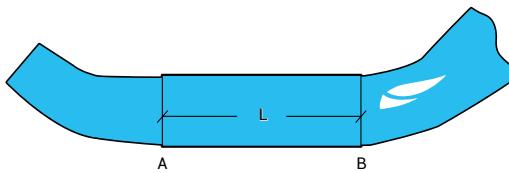


Figura 50. Esquema de sección A-B. Método de aforo con flotadores.

Una forma sencilla de aproximar el valor del caudal de un cauce, es realizar el aforo con flotadores. En la figura 68 se esquematiza una sección de control con secciones transversales en dos puntos, partida y llegada del flotador.

En este método, se mide la velocidad superficial v de la corriente y el área A de la sección transversal. Luego con estos valores aplicando la ecuación de continuidad, se calcula el caudal con la ecuación:

$$Q = A \cdot v$$

Este método se utiliza cuando se dificulta la aplicación de otros métodos, por ejemplo, la presencia de cuerpos extraños en la corriente que pueda dañar los equipos de medición y cuando no

se disponga de estos equipos. Como flotador se puede utilizar cualquier cuerpo pequeño que flote, como por ejemplo corcho, trozo de madera, botella lastrada, entre otros. En la figura 69 se muestra la forma en que los operadores deben realizar las mediciones. Para realizar este aforo, se debe elegir en lo posible un tramo recto del cauce de longitud L .

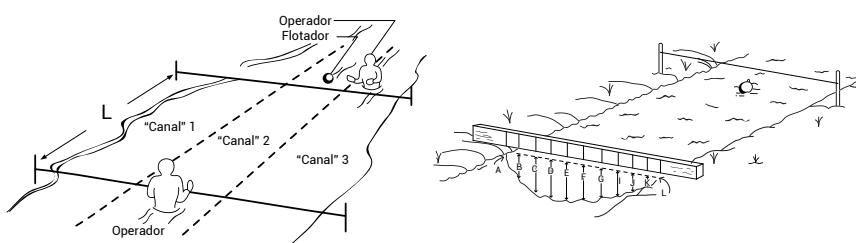


Figura 51. Sección de control para aforo con flotadores

Fuente: [Enlace](#)

El procedimiento para medir la velocidad es el siguiente.

- Medir la longitud L del tramo
- Medir con un cronómetro el tiempo T que tarda en desplazarse el flotador en el tramo AB
- Calcular la velocidad superficial

El cálculo de la velocidad promedio de la sección se realiza aplicando la relación \bar{v} / V_{ms} donde v es la velocidad promedio y V_{ms} es la velocidad media de la superficie. En general, la relación \bar{v} / V_{ms} crece con la profundidad media, pero también intervienen otros factores como la turbulencia, presencia de vegetación, entre otros.

Si no se tiene ninguna indicación sobre esto, se puede tomar los siguientes valores:

Tabla 26. Características y valores de relación de velocidades

| CARACTERÍSTICAS | v/Vms |
|---|----------|
| Velocidad fuerte, profundidad superior a 4m | 1.00 |
| Velocidad promedio en ríos de montaña | 1.05 |
| Pendiente débil, ríos de montaña | 0.85 |
| Ríos grandes | 0.95 |
| Pendiente mediana, ríos medianos | 0.9-0.95 |
| Velocidad muy débil | 0.80 |

Cálculo del área promedio del tramo.

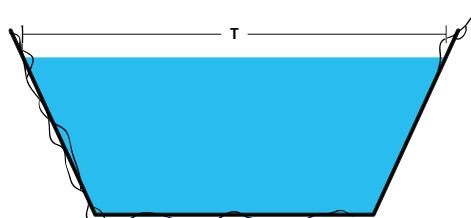
Para el cálculo del área se debe hacer lo siguiente:

- Calcular el área en la sección A, A_A
- Calcular la sección en B, A_B
- Calcular el área promedio

$$A = \frac{A_A + A_B}{2} \quad (68)$$

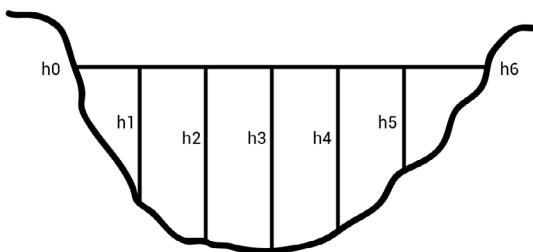
Para calcular el área en cualquiera de las secciones, hacer lo siguiente:

Medir el espejo T del agua.



[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Se divide en distancias iguales en dependencia del ancho T del espejo (0.20; 0.30; 0.50; etc.) y en cada uno medir la profundidad.



Calcular el área para cada tramo geométricamente a través del método de trapecios. Luego se calcula el área total mediante la sumatoria de las áreas parciales.

Una vez que ha definido las distancias parciales en la sección transversal del cauce, de cada una de ellas lanza la botella lastrada y registra los tiempos, aplica la ecuación de velocidad $v = x/t$ y obtendrá las velocidades superficiales. Siendo X la distancia entre las dos secciones transversales A y B , para luego determinar la velocidad media mediante los valores de la tabla 16. Tal como se indicó anteriormente.

6.5.2. Aforo volumétrico

Este método es poco utilizado en hidrología, útil para caudales pequeños de pequeñas vertientes, donde se pueda encausar todo el caudal a una sola sección que permita recoger el volumen. Consiste en hacer llegar la corriente a un depósito o recipiente de volumen conocido V y medir el tiempo T que tarda en llenarse dicho depósito.



Figura 52. Sección de control para aforo volumétrico

Fuente: Adaptado de [enlace](#)

Elaboración Propia

Para calcular el caudal se procede de la siguiente manera:

- En primer lugar, medir la capacidad del recipiente o depósito V
- Con un cronómetro, medir le tiempo T . requerido para llenar el depósito
- Calcular el caudal mediante la ecuación

$$Q = \frac{V}{T} \quad (69)$$

Donde:

Q – Caudal en m^3/s

V – Volumen del depósito en m^3

T – Tiempo en que se llena en segundos

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos



Actividades de aprendizaje recomendadas

Luego de revisar los temas propuestos de la unidad 6 de esta guía, le recomiendo realizar un resumen o un mapa mental de los conceptos básicos de escorrentía y los tipos de hidrogramas, así como la forma de separar el flujo base, clave para el cálculo de caudales por el método del hidrograma.

Participe activamente de las actividades síncronas y asíncronas de la semana, esto le ayudará a entender mejor el tema, a través del aprendizaje colectivo.



Semana 12

6.5.3. Aforo con correntómetros o molinetes

En esta semana continuaremos con el estudio de la unidad de escurrimiento, con los subtemas de los métodos de aforo de caudales, en este caso revisaremos el aforo con el correntómetro o molinete, método de sección pendiente y el análisis de caudales extremos, para este caso únicamente estudiaremos el método de Gumbel por ser el de mayor aplicación con buenos resultados y la facilidad de cálculo que presenta. Existen muchos otros métodos estadísticos y estocásticos, pero esos temas son más especializados y requieren de un estudio más detallado y preciso que quedan a criterio del estudiante profundizar en su estudio.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Para este método, se emplea el correntómetro o molinete. Estos son aparatos que miden la velocidad, en un punto dado del curso del agua. Esta velocidad es medida en los instrumentos, por medio de un elemento móvil, que detecta la velocidad de corriente y transmite las indicaciones de un interruptor encargado de cerrar un circuito eléctrico, cuando ha dado un cierto número de vueltas, sobre un contador o correntómetro (de impulsiones de sonido, señales luminosas, digitales, etc.).

Existen dos tipos de correntómetros: De eje vertical o cazoletas y de eje horizontal o de hélice. En la figura 53 se pueden observar los dos tipos de molinetes. El número de revoluciones es el medio para determinar la velocidad del agua en el punto en que se encuentra el aparato.

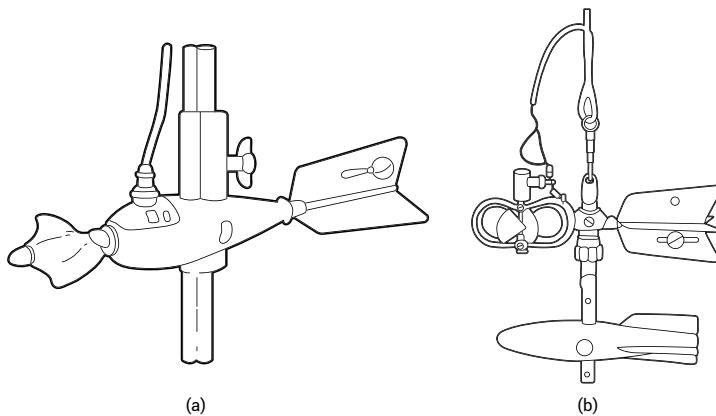


Figura 53. Correntómetro (a) de eje horizontal (b) de eje vertical
Fuente: [Enlace](#)

Los correntómetros poseen una fórmula que debe utilizarse para calcular la velocidad a partir del número de revoluciones por segundo de la hélice y que es de la forma.

$$V = an + b \quad (70)$$

Donde:

V – Velocidad de la corriente en m/s.

n – Número de revoluciones por segundo.

b – Velocidad de frotamiento en m/s. Constante que considera la inercia de la hélice y la mínima velocidad de la corriente para accionarla. Se expresa en m/s y también se determina experimentalmente.

La velocidad se mide indirectamente ya que lo que se mide es el tiempo que el correntómetro emplea para dar un cierto número de vueltas y mediante una fórmula propia para cada hélice se calcula la velocidad.

Condiciones de la sección de aforo

El aforo con molinete consiste en explorar el campo de velocidades de la sección en la que se quiere medir el caudal líquido, el emplazamiento ideal debe enmarcarse en las siguientes especificaciones:

- Debe estar situada sobre un lecho fluvial recto que cuente a lo largo del sector recto con secciones uniformes y pendiente constante.
- Debe tener una corriente paralela a la dirección general del río que a su vez debe coincidir con la dirección general del valle.
- Deben evitarse secciones con sectores de aguas muertas, contracorrientes y remolinos.
- Debe evitarse secciones con mucha vegetación, fangosa o que contenga piedras muy grandes.
- Las orillas deben tener una pequeña inclinación hacia el río.
- No es conveniente que existan velocidades inferiores a 10 cm/s ni superiores a 3 m/s.

Es evidente, que toda irregularidad del lecho del río (piedras, vegetación arbustiva, bancos de arena), altera las condiciones del flujo y, constituye un factor desfavorable para las medidas. Estas influencias, son más notables en los cursos de agua más pequeños, es por eso, que es más fácil aforar con una misma precisión relativa, un gran río que uno pequeño, y un río en altas aguas que otro en estiaje.

En los aforos con molinete se puede aplicar tres procedimientos.

1. Aforo completo por puntos
2. Aforo completo por integración
3. Aforo abreviado

En la figura 54 se puede observar un ejemplo de aforo por el método de aforo completo por puntos.

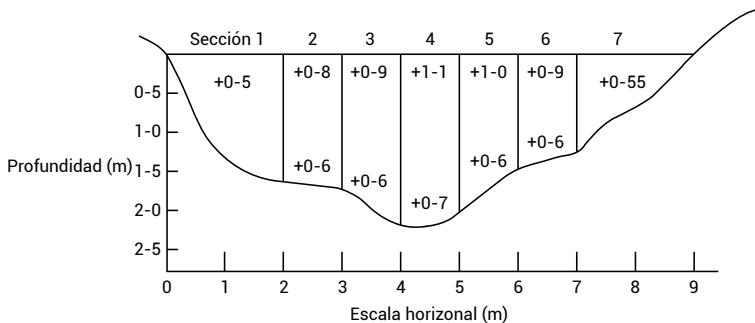


Figura 54. Aforo completo por puntos

Fuente: [Enlace](#)

El aforo completo o por puntos es el más recomendable, pues mediante él se define claramente la curva de distribución de velocidades en cada vertical. Por lo general se toma un mínimo de 3 puntos por vertical. La distribución de puntos debe ser más densa cerca de la superficie y del fondo.

También denominado método de los 5 puntos: Este más claramente especifica que consiste en medir la velocidad del flujo en la superficie

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

en un punto cercano al fondo y en tres puntos intermedios, situados a 0.2, 0.6 y 0.8 veces la profundidad, h , de la vertical de aforo, medidos desde la superficie libre. La velocidad media del flujo se obtiene, con buena aproximación, a partir de la siguiente ecuación:

$$V_m = \frac{V_s + 3V_{0.2} + 2V_{0.6} + 3V_{0.8} + V_f}{10} \quad (71)$$

Donde:

V_s – Velocidad superficial

$V_{0.2}$ – Velocidad a 0.2 h

$V_{0.6}$ – Velocidad a 0.6 h

$V_{0.8}$ – Velocidad a 0.8 h

V_f – Velocidad sobre el lecho o velocidad en el fondo

Método 0.2 y 0.8. Es el método más utilizado, debido a la rapidez de ejecución que presenta. Se toman medidas de velocidad en dos puntos de la vertical: a 0.2 h y 0.8 h de profundidad, y la velocidad media en la vertical viene dada por:

$$V_m = \frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2} \quad (72)$$

Este método está fundamentado en el hecho de que, si se suponen las velocidades distribuidas a lo largo de un arco de parábola, la velocidad media es el promedio de las abscisas 0.2114 h y 0.7886 h, las cuales son prácticamente 0.2 h y 0.8 h, medidas desde la superficie.

Se acepta un error del 5% con este método, en relación con otros de mayor exactitud.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Método 0.6. En este caso, solamente se realiza una medición de velocidad, a 0.6 h medidos desde la superficie libre. Esta velocidad se considera ser la velocidad media en la vertical, suponiendo que la distribución de velocidades corresponde a un arco de parábola, en cuyo caso la abscisa media se encuentra entre 0.58 h y 0.62 h, bajo la superficie.

Este método, obviamente, no es muy exacto, por lo cual sólo se recomienda en aquellos casos que no requieran mayor rigor en la determinación del caudal, y en corrientes de poca profundidad que hacen impracticable la aplicación del método anterior, como quiera que la hélice del molinete podría tocar el fondo del lecho, cuando se le coloque a 0.8 h.

Método 0.2 0.6 0.8: Combina los dos procedimientos anteriores y es, lógicamente, más exacto que los mismos, y se aplica cuando se duda de las velocidades medidas a 0.2 h y 0.8 h.

En casos en que la velocidad puntual $V_{0.8}$ resulte insegura, como consecuencia de la turbulencia producida por las irregularidades del lecho, la velocidad media se calcula promediando las tres velocidades anteriores, pero ponderando doblemente la velocidad $V_{0.6}$. Esto es:

$$V_m = \frac{V_{0.2} + 2V_{0.6} + V_{0.8}}{4} \quad (73)$$

Método por integración: Consiste en determinar la velocidad media vertical, subiendo y bajando el molinete, mediante un control eléctrico a una velocidad uniforme que varía entre 1 y 4 cm/s.

Los métodos abreviados consisten en medir las velocidades solo en uno o dos puntos en cada vertical. Tomando como referencia el fondo del lecho, se acostumbra operar ya sea a 0,2 y 0,8 veces la

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

profundidad o a 0,4 h o tomando las velocidades superficiales. Se supone que a 0,4 h se halla la velocidad media.

El criterio para realizar la distribución de las verticales se basa en el hecho de que cualquier interpolación, ya sea de las velocidades entre dos verticales, ya sea del perfil del lecho, supone previamente la existencia de una variación uniforme. Por tanto, en sectores en que se observa una variación fuerte o brusca de distribución de las velocidades es necesario hacer más verticales.

Método de Cunningham: Este autor propone la siguiente fórmula simplificada para calcular la velocidad media en la vertical:

$$V_m = \frac{V_s + 3V_{2/3}}{4} \quad (74)$$

Donde:

V_s – Velocidad superficial de la corriente

$V_{2/3}$ – Velocidad a los 2/3 de la profundidad h , en vertical

Curva de calibración de una sección de aforo

Como se vio en los párrafos anteriores, las estaciones pluviométricas registran los niveles de agua, y los aforos permiten conocer el campo de velocidades y el caudal del flujo en la sección de aforo. Sin embargo, ninguno de estos métodos permite conocer en forma continua el caudal de la corriente, es decir, su variación con el tiempo.

Por esta razón, se recurre a establecer una relación empírica entre los niveles H y los caudales Q , es decir, que para conocer los caudales, se necesita establecer una ecuación matemática para la relación.

$$Q = f(H)$$

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Si se conoce esta función, se puede pasar del registro de niveles al de caudal. La gráfica de esta función recibe los nombres de curva de gasto, curva de descarga, curva de caudales, curva de patronamiento, curva de calibración, etc., para la sección considerada, y tiene la forma presentada.

En ríos de morfología constante o poco variable, en que la pendiente de la línea de agua es aproximadamente la misma en épocas de creciente y de estiaje (o sequía), la relación nivel-caudal, resulta unívoca y estable, permitiendo la definición de una curva de descarga única. En la figura 73 se puede observar una curva de descarga típica.

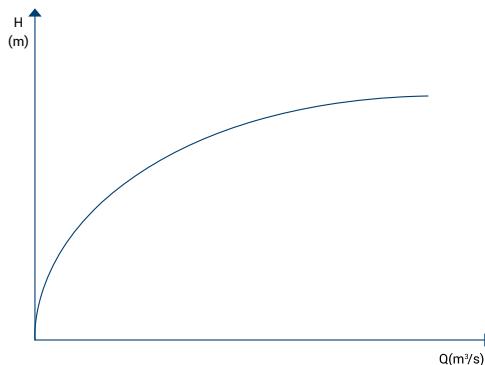


Figura 55. Curva de descarga típica

Fuente: elaboración propia.

Muy pocos ríos llenan este requisito; sin embargo, en la mayoría de los casos son despreciables la influencia y las variaciones de la pendiente de la línea de agua y es posible aceptar como unívoca y permanente la relación nivel-caudal de un gran número de estaciones hidrométricas.

Las curvas de descarga exigen en general, para su definición, una serie de medidas de caudal, abarcando distintos niveles de agua, más o menos distribuidos entre los estiajes y las crecidas. Cuanto mayor sea el número de mediciones, mayores serán los resultados de definición de la curva. Se considera como mínimo razonable el de

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

una decena de mediciones de caudal. Cada medición de caudal debe referenciarse al respectivo nivel que tenía el río en el momento de la medición.

Los pares de valores nivel-caudal se grafican en un sistema cartesiano, en el cual el eje de las abscisas represente el caudal, y el de las ordenadas mida el nivel dado por el limnimétrico. Los datos se pueden ajustar a una ley matemática por el método de regresión de potencia, o se recurre a un método gráfico de ajuste.

Dado que la geometría de la sección transversal de una corriente natural puede variar estacionalmente, la curva de calibración de toda sección de aforo debe actualizarse con cierta frecuencia.

Cálculo de aforos

El cálculo de los aforos completos por puntos se efectúa en forma gráfica.

1. Se calculan las velocidades tomadas en los distintos puntos aplicando las ecuaciones de calibración. Estos valores se corrigen cuando ha habido arrastres o desviaciones.
2. Se dibuja en papel milimetrado las curvas de velocidad, es decir para cada vertical se aplica a cada profundidad la velocidad correspondiente. Dichos puntos se unen mediante una curva de trazos suaves.
3. Se determina el área de cada gráfica, obteniéndose las superficies de velocidad en m^2/s .
4. Luego se llevan estos valores a un nuevo gráfico cuyas abscisas son las distancias horizontales de cada vertical hacia arriba, se aplican los valores de cada superficie de velocidad y hacia abajo los valores de las profundidades.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

5. Uniendo los puntos de la curva y calculando ambas superficies se obtiene los valores del gasto y de la superficie mojada respectivamente y por división de ambos valores, la velocidad media.

En el caso del aforo abreviado, se realizan los cálculos en forma numérica.

La velocidad media en cada vertical se obtiene realizando un promedio de las observaciones entre dos verticales (1 y 2) se calcula como:

$$V_m = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (75)$$

El área A entre dichas verticales separadas una distancia L es:

$$A = \frac{h_1 + h_2 \cdot L}{2} \quad (76)$$

Por lo que el caudal que circula entre ellas es:

$$Q = V_m * A$$

El caudal total que circula por el río se lo determina integrando todos los caudales que circulan entre verticales.

$$Q = \sum(q)$$

La sección útil se establece acumulando las áreas entre verticales

$$A = \sum(a)$$

Tratándose de velocidades superficiales se acostumbra reducirlas a velocidades medias aplicando un coeficiente entre 0,8 y 0,9. Este coeficiente se puede definir con mayor precisión mediante un aforo completo hecho con anterioridad.

6.5.4. Aforo con sección y la pendiente

Este método se utiliza para estimar el gasto máximo que se presentó durante una avenida reciente en un río donde no se cuenta con ningún otro tipo de aforos. Para su aplicación se requiere solamente contar con topografía de un tramo del cauce y las marcas del nivel máximo del agua durante el paso de la avenida.

En la tabla 27 se muestran algunos valores de n de Manning para ser utilizados en la ecuación, estos valores han sido tomados de otros textos especializados.

Tabla 27. Valores del coeficiente de rugosidad n (Manning)

| Tipo de canal y descripción | Mínimo | Normal | Máximo |
|--|--------|--------|--------|
| C. Excavado o dragado | | | |
| a. En tierra, recto y uniforme | | | |
| 1. Limpio, recientemente terminado | 0.016 | 0.018 | 0.020 |
| 2. Limpio, después de exposición a la interperie | 0.018 | 0.022 | 0.025 |
| 3. Con gravas, sección uniforme, limpio | 0.022 | 0.025 | 0.030 |
| 4. Con pastos cortos, algunas malezas | 0.022 | 0.027 | 0.033 |
| b. En tierra, serpenteante y lento | | | |
| 1. Sin vegetación | 0.023 | 0.025 | 0.030 |
| 2. Pastos, algunas malezas | 0.025 | 0.030 | 0.033 |
| 3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos | 0.030 | 0.035 | 0.040 |
| 4. Fondo en tierra con lados en piedra | 0.028 | 0.030 | 0.035 |
| 5. Fondo pedregoso y bancas con maleza | 0.025 | 0.035 | 0.040 |
| 6. Fondo en cantos rodando y lados limpios | 0.030 | 0.040 | 0.050 |
| c. Excavado con pala o dragado | | | |
| 1. Lisos y uniformes | 0.025 | 0.028 | 0.033 |
| 2. Afiliados e irregulares | 0.035 | 0.050 | 0.060 |

| Tipo de canal y descripción | Mínimo | Normal | Máximo |
|--|--------|--------|--------|
| d. Cortes en roca | | | |
| 1. Malezas densas, tan altas como la profundidad del flujo | 0.050 | 0.080 | 0.120 |
| 2. Fondo limpio, matorrales en los lados | 0.040 | 0.050 | 0.080 |
| 3. Igual, nivel máximo de flujo | 0.045 | 0.070 | 0.110 |
| 4. Matorrales densos, nivel alto | 0.080 | 0.100 | 0.140 |
| D. Corrientes naturales | | | |
| D1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente <100 pies) | | | |
| a. Corrientes en planicies | | | |
| 1. Limpias rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos | 0.025 | 0.030 | 0.033 |
| 2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas | 0.030 | 0.035 | 0.040 |
| 3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena | 0.033 | 0.040 | 0.045 |
| 4. Igual al anterior pero con algunos matorrales y piedras | 0.035 | 0.045 | 0.050 |
| 5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones mas eficientes | 0.040 | 0.048 | 0.055 |
| 6. Igual a 4, pero con más piedras | 0.045 | 0.050 | 0.060 |
| 7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos | 0.050 | 0.070 | 0.080 |
| 8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos | 0.075 | 0.100 | 0.150 |
| b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos | | | |
| c. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos | | | |
| 1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas | 0.030 | 0.040 | 0.050 |
| 2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes | 0.040 | 0.050 | 0.070 |
| D2. Planicies de inundación | | | |
| a. Áreas cultivadas | | | |
| 1. Sin cultivo | 0.020 | 0.030 | 0.040 |
| 2. Cultivos en línea maduros | 0.025 | 0.035 | 0.045 |
| 3. Campos de cultivo maduros | 0.030 | 0.040 | 0.050 |
| b. Matorrales | | | |
| 1. Matorrales dispersos, mucha maleza | 0.035 | 0.050 | 0.070 |
| 2. Pocos matorrales y árboles en invierno | 0.035 | 0.050 | 0.060 |
| 3. Pocos matorrales y árboles en verano | 0.040 | 0.060 | 0.080 |

| Tipo de canal y descripción | Mínimo | Normal | Máximo |
|--|--------|--------|--------|
| 4. Matorrales medios a densos, en invierno | 0.045 | 0.070 | 0.120 |
| 5. Matorrales medios a densos, en verano | 0.070 | 0.100 | 0.160 |
| c. Árboles | | | |
| 1. Sauces densos, rectos y en verano | 0.110 | 0.150 | 0.200 |
| 2. Terreno limpio, con troncos sin retoños | 0.030 | 0.040 | 0.050 |
| 3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños | 0.005 | 0.060 | 0.080 |
| 4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por debajo de las ramas | 0.008 | 0.100 | 0.120 |
| 5. Igual que el anterior, pero con nivel de crecimiento por encima de las ramas | 0.100 | 0.120 | 0.160 |
| D3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 100 pies). El valor n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva | | | |
| a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales | 0.025 | ... | 0.060 |
| b. Sección irregular y ruguosa | 0.035 | ... | 0.100 |

Fuente: Hidráulica de canales abiertos Ven T. Chow. Pag. 110 -111

Para seleccionar el coeficiente de rugosidad de Manning en cauces naturales, se debe disponer de información previa de valores ya establecidos, verificados, siendo realmente de mucha ayuda, pero esos valores responden a unas características muy concretas que seguramente presentará similitudes con las que tiene el cauce que se debe modelizar, pero al final cada caso es **único**. Por ello es importante entender los factores que afectan el valor n para adquirir un conocimiento básico del problema y disminuir la incertidumbre.

Y si nos centramos en los cauces naturales, los factores que más influencia tienen en la determinación del valor de la n de Manning son: el tipo y tamaño de los materiales que lo componen y las características morfológicas del mismo. Teniendo en cuenta estos condicionantes, disponemos de un método de obtención del valor del coeficiente de rugosidad de Manning. El método **de Cowan o multiparamétrico**.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Método de Cowan

Cowan, en 1956, desarrolló una expresión que permite determinar el valor del coeficiente de Manning a través de la interacción de diferentes parámetros que permiten describir o valorar características concretas de un cauce. La expresión es la siguiente:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \quad (77)$$

Donde:

n_b – Un valor base de n para un cauce recto, uniforme y liso en función del material del fondo

n_1 – factor de corrección para implementar el efecto de las irregularidades superficiales

n_2 – un valor que añade las variaciones de forma y tamaño de la sección del cauce

n_3 – un valor que implementa el efecto de obstrucciones

n_4 – un valor que incorpora el efecto de presencia de vegetación

m – un factor corrector que implementa la sinuosidad del cauce

A continuación, en la tabla 28 se presentan los valores de n para aplicar la ecuación dada por Cowan.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Tabla 28. Otros valores del coeficiente de rugosidad n (Manning)

| Condiciones del Canal | | | Valores |
|---------------------------------------|---------------------------|-------|---------------|
| Material involucrado | Tierra | n_0 | 0.020 |
| | Corte en roca | | 0.025 |
| | Grava fina | | 0.024 |
| | Grava gruesa | | 0.028 |
| Grado de irregularidad | Suave | n_1 | 0.000 |
| | Menor | | 0.005 |
| | Moderado | | 0.010 |
| | Severo | | 0.020 |
| Variaciones de la sección transversal | Gradual | n_2 | 0.000 |
| | Ocasionalmente alternante | | 0.005 |
| | Frecuentemente alternante | | 0.010 - 0.015 |
| Efecto relativo de las obstrucciones | Insignificante | n_3 | 0.000 |
| | Menor | | 0.010 - 0.015 |
| | Apreciable | | 0.020 - 0.030 |
| | Severo | | 0.040 - 0.060 |
| Vegetación | Baja | n_4 | 0.000 |
| | Media | | 0.005 - 0.010 |
| | Alta | | 0.010 - 0.025 |
| | Muy alta | | 0.025 - 0.050 |
| Grados de los efectos por meandros | Menor | m_5 | 1.000 |
| | Apreciable | | 1.150 |
| | Severo | | 1.300 |

Nota: Chow V. (2004, p105). *Hidráulica de canales*

Deducción de la ecuación de la relación sección y pendiente.

Aplicando la ecuación de principio de conservación de la energía *Bernoulli* se tiene:

$$z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (78)$$

$$h_f = \Delta y + \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) \quad (79)$$

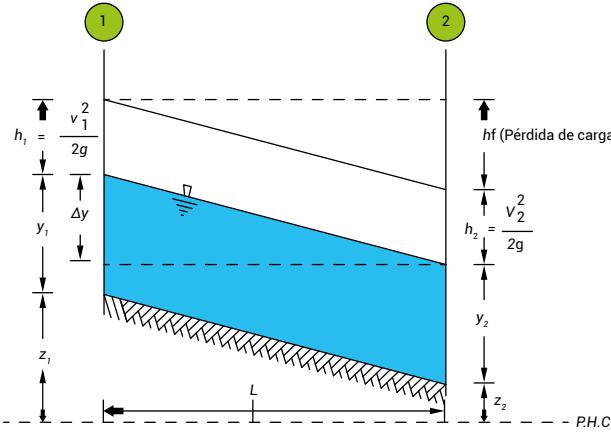


Figura 56. Principio de conservación de la energía Bernoulli

Adaptado de: Chow V.T. (2004, p 4). *Hidráulica de canales*.

Donde $\Delta y = (z_1 + y_1) - (z_2 + y_2)$ es la diferencia en elevación de las marcas del nivel máximo del agua en los extremos del tramo. Para tomar en cuenta las pérdidas locales tenemos:

$$h_f = \Delta y + \frac{Q^2}{bg} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right)$$

$$b = 2 \text{ si } A_1 > A_2 \text{ y } b = 4 \text{ si } A_2 > A_1$$

Haciendo $\overline{K_d} = \frac{A_i R^{2/3}}{n}$ - coeficiente de conducción medio en el tramo;

$$Q = A \cdot \frac{1}{n} R^{2/3} S f^{1/2} = \overline{K_d} \cdot S f^{1/2}$$

tenemos:

$$\overline{K_d} = \sqrt{K_{d1} K_{d2}}; K_{di} = \frac{A_i \cdot R_i^{2/3}}{n_i} \quad (80)$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Siendo que $h_f = S_f L$

$$\frac{Q^2}{K_d^2} = \Delta y + \frac{Q^2}{bgL} \left(\frac{1}{A1^2} - \frac{1}{A2^2} \right) \quad (81)$$

$$Q = \frac{\sqrt{\Delta y / L}}{\sqrt{\frac{1}{K_d^2} - \frac{1}{bgL} \left(\frac{1}{A1^2} - \frac{1}{A2^2} \right)}} \quad (82)$$

Despejando:

Con esta ecuación es posible estimar el gasto de pico de una avenida si se conocen las marcas del nivel máximo del agua en las márgenes, la rugosidad y la topografía.

Ejemplo:

Método sección y pendiente

Se ha medido dos secciones de control separadas entre sí 65 m. La sección del cauce está conformada por grava gruesa con secciones irregulares y cambios frecuentes de sección, es un cauce limpio de vegetación, arrastre y el tramo es recto. Determinar el caudal cuando el agua alcanza 1 m en cada una de las secciones, esta distancia es medida desde el punto más bajo del cauce.

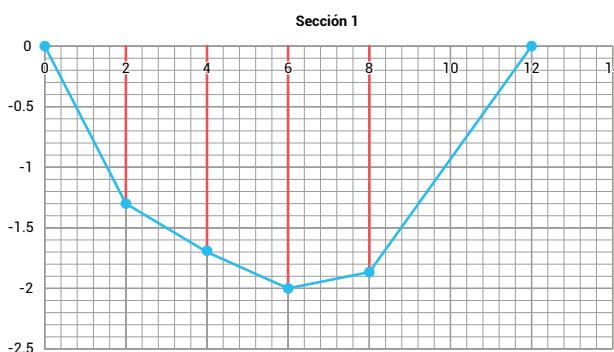
[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

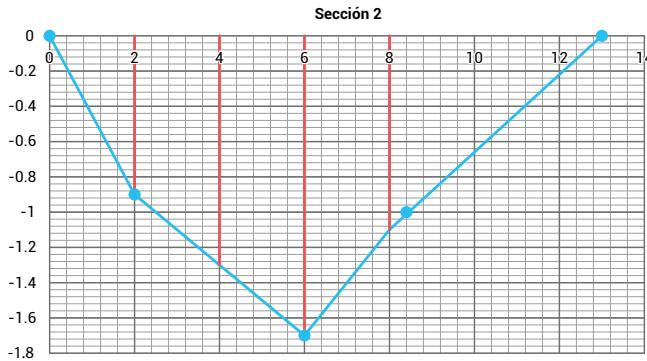
Tabla 29. Datos de coordenadas sección 1 y 2

| Sección 1 | |
|-----------|------|
| x | y |
| 0 | 0 |
| 2 | 1.3 |
| 4 | 1.7 |
| 6 | 2 |
| 8 | 1.86 |
| 12 | 0 |

| Sección 2 | |
|-----------|-----|
| x | y |
| 0 | 0 |
| 2 | 0.9 |
| 4 | 1.3 |
| 6 | 1.7 |
| 8 | 1.1 |
| 13 | 0 |

Con estos valores, se procede a dibujar la sección 1 y sección 2, como se muestra en las figuras a continuación:



[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Los valores del perímetro mojado de las secciones son:

$$P_1 = 12.90 \text{ m}$$

$$P_2 = 13.34 \text{ m}$$

Calculamos mediante descomposición en figuras geométricas el área hidráulica de cada sección.

$$A_1 = \frac{2 * 1.3}{2} + \frac{1}{2} [(1.3 + 1.7) * 2 + (1.7 + 2) * 2 + (2 + 1.86) * 2 + (1.86 * 4)]$$

$$A_1 = 12.86 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \frac{1}{2} [(2 * 0.9) + (0.9 + 1.3) * 2 + (1.3 + 1.7) * 2 + (1.7 + 1.1) * 2 + (1.1 * 5)]$$

$$A_2 = 11.65 \text{ m}^2$$

Los valores de n de Manning para las diferentes condiciones dadas, de la tabla 18 se tiene:

$$n_0 = 0.028 \text{ Tipo de suelo}$$

$$n_1 = 0.006 - 0.010 \text{ (Irregularidad)}, \text{ tomo } n_2 = 0.010$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

$$n_2 = 0.01 - 0.005 \text{ (Forma y tamaño)} n_3 = 0.01$$

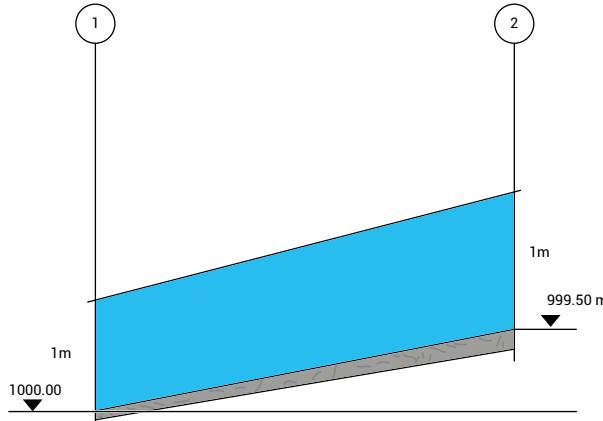
$$n_3 = 0.005 - 0.015 \text{ (Obstrucciones)} n_4 = 0.005$$

$$n_4 = 0.002 - 0.010 \text{ (vegetación)} n_5 = 0.002$$

$$m_5 = 1 \text{ (considero un efecto menor de los meandros)} n_3 = 0.01$$

$$n_{\text{total}} = 0.055$$

Con los datos de perfil longitudinal (65 m de distancia) entre la sección 1 y 2 tenemos:



Entre la sección 1 y 2 existe una distancia de 65 m y una diferencia de cota de 0.50 m. Entonces la pendiente resulta ser:

$$J = \frac{0.50m}{65m}$$

$$J = 7,69\% \text{ o}$$

$$\overline{K_{d1}} = \frac{A_i \cdot R_i^{2/3}}{n_i}$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

$$\overline{K_{d1}} = \frac{12.86 \cdot \left(\frac{12.86}{12.90}\right)^{2/3}}{0.055} = 233.33$$

$$\overline{K_{d2}} = \frac{11.65 * \left(\frac{11.65}{13.34}\right)^{2/3}}{0.055} = 193.53$$

$$\overline{K_d} = \sqrt{\overline{K_{d1}}\overline{K_{d2}}} = \sqrt{233.33 * 193.53}$$

$$\overline{K_d} = 212.50$$

$$Q = \frac{\sqrt{\Delta y/L}}{\sqrt{\frac{1}{K_d^2} - \frac{1}{bgL} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right)}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{0.50/65}}{\sqrt{\frac{1}{212.50^2} - \frac{1}{2(9.81)(.65)} \left(\frac{1}{12.86^2} - \frac{1}{11.65^2} \right)}}$$

$$Q = 61.51 m^3/s$$

Ejemplo:

Método de molinete

Se desea determinar el caudal de un curso de agua superficial y se han registrado los datos que se detallan en la tabla a continuación. La ecuación del correntómetro es:

$$V = 2.170 \left(\frac{rev}{t} \right) + 0.00914$$

Datos de campo:

Tabla 30. *Datos de aforo con molinete*

| Abscisa (m) | Prof. Total (m) | Prof. Absc. (m) | No Rev. vueltas | Tiempo (s) |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0.6 | 0.3 | 12 | 30 |
| 4 | 0.9 | 0.25 | 12 | 30 |
| | | 0.5 | 20 | 30 |
| | | 0.75 | 15 | 30 |
| 6 | 0.8 | 0.3 | 26 | 30 |
| | | 0.7 | 18 | 30 |
| 6.6 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Con esta información calculamos las revoluciones por intervalo de tiempo, Rev/t y, la velocidad aplicando la ecuación propia del molinete. Y tenemos los siguientes resultados, completando la tabla:

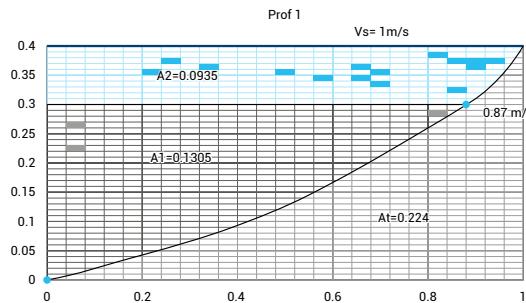
Tabla 31. *Cálculo de velocidades de aforo*

| Abscisa (m) | Prof. Total (m) | Prof. Absc. (m) | No Rev. vueltas | Tiempo (s) | Rev/ t (V/s) | Velocidad (m/s) |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|--------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0.6 | 0.3 | 12 | 30 | 0.400 | 0.87714 |
| 4 | 0.9 | 0.25 | 12 | 30 | 0.400 | 0.87714 |
| | | 0.5 | 20 | 30 | 0.667 | 1.45653 |
| | | 0.75 | 15 | 30 | 0.500 | 1.09414 |
| 6 | 0.8 | 0.3 | 26 | 30 | 0.867 | 1.89053 |
| | | 0.7 | 18 | 30 | 0.600 | 1.31114 |
| 6.6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

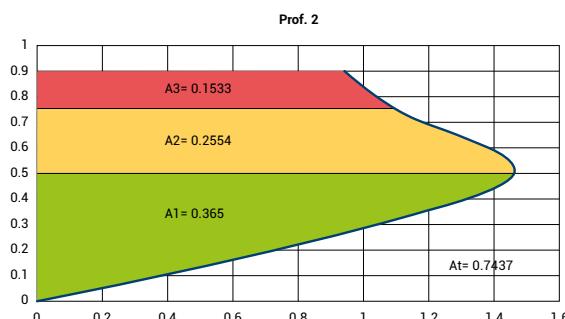
Procedemos a graficar en un eje de coordenadas planas para cada abscisa los perfiles de velocidad en los puntos de medición, y

procedemos a calcular de forma geométrica, por descomposición de áreas geométricas, los valores de la sección. Realice la interpretación de cálculo de áreas por descomposición. Tenemos:

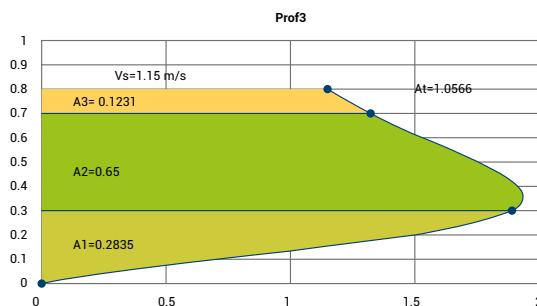
Abscisa 2. Prof. Total 0.6 m. Velocidad superficial (dato) = 1 m/s



Abscisa 4. Prof. Total 0.9 m. Velocidad superficial (dato) = 1 m/s

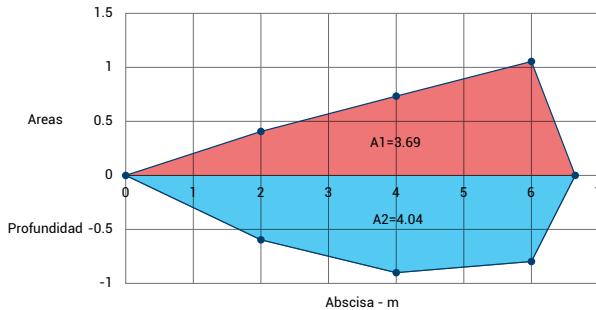


Abscisa 6. Prof. Total 0.8 m. Velocidad superficial (dato) = 1.15 m/s



[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Resumimos los resultados en el siguiente gráfico, para poder tener en un mismo plano los valores de áreas parciales encontrados y los valores del perfil de la sección del cauce. Como se puede observar:



A partir del gráfico calculamos nuevamente por descomposición geométrica los valores de área, lo cual nos dará como resultado el valor del caudal m^3/s de esa medición o aforo con correntómetro. Así como el valor del área transversal del cauce o área mojada.

En este caso A_1 representa el valor del caudal que trasciega por la sección A_2 o área mojada. Se resume los cálculos en la tabla a continuación:

Tabla 32. Resultado de cálculos de aforo método gráfico

| Área 1 | | |
|-------------|-----------------|--------------------|
| Abscisa (h) | Áreas (m^2) | Caudal (m^3/s) |
| 0 | 0 | 0.0 |
| 2 | 0.41 | 0.41 |
| 4 | 0.744 | 1.16 |
| 6 | 1.057 | 1.80 |
| 6.6 | 0 | 0.32 |
| | | 3.69 |

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

| Área 2 | | |
|-------------|-----------------|------------------------|
| Abscisa (h) | Profundidad (m) | Área (m ²) |
| 0 | 0 | |
| 2 | 0.6 | 0.60 |
| 4 | 0.9 | 1.50 |
| 6 | 0.8 | 1.70 |
| 6.6 | 0 | 0.24 |
| | | 4.04 |

El valor del caudal aforado con molinete de la ecuación indicada es:

$$Q = 3.69 \text{ m}^3/\text{s}$$

El área mojada es: $A = 4.04 \text{ m}_2$

La velocidad media calculada por continuidad es: $v = 0.913 \text{ m/s}$

6.6. Curva de descarga

Hablaremos de *Niveles de agua* que hace referencia al nivel h que alcanza la superficie libre del agua con respecto al fondo del cauce y al contrario de lo que sucede con el caudal constituye una medida que representa las condiciones en el punto o en la sección en que ella se realiza.

La sección destinada a controlar niveles del agua (estación limnimétrica), debe cumplir con una serie de condiciones, de tal manera que se pueda obtener una medida precisa del nivel que nos permita tener un valor preciso del caudal.

Después de seleccionar adecuadamente la sección del río, se establece la sección de aforo y se procede a medir diariamente el caudal; también se mide el nivel. Luego de un tiempo es posible

dibujar la curva de descarga del río en el lugar de la estación. Es una curva de caudales versus niveles o alturas de agua la sección debe poseer:

Estabilidad:

- Tratándose de observaciones que se efectúan para ser relacionadas con caudales es de primordial importancia que el sector fluvial que influencia la estación limnimétrica sea estable, es decir no sufra dentro de un plazo previsible alteraciones debidas a erosiones o embanques.
- Debe verificarse la calidad del terreno en la zona fluvial que ejerce alguna influencia sobre la sección limnimétrica.
- Si no es posible encontrar una zona estable, es necesario estabilizarla artificialmente.

Sensibilidad:

- Cuando una pequeña variación de caudal repercute en una fuerte variación de nivel
- La más sensible es aquella que tiene una sección en V.
- Es conveniente que aguas debajo de la sección limnimétrica se presente algún estrechamiento.
- La menos sensible, es la rectangular.

Ausencia de oleaje:

- Se debe tratar de localizar las escalas limnimétrica en sectores en que el agua, aún durante crecidas, presente un oleaje mínimo para facilitar las observaciones.
- En caso de no contar con esta posibilidad se recurre a pozos tranquilizantes.

- Se puede recurrir a las escalas inclinadas cuyas lecturas se reducen a la vertical en base al ángulo de inclinación.
- Con esta descripción finalmente enunciaremos que la relación que existe entre los niveles de agua observados durante los aforos y los respectivos caudales, se representa a través de la llamada **curva de descarga**.

La curva de descarga representa los valores de las alturas en el eje de las abscisas (X) y, en las ordenadas (Y) los valores de caudal. Para poder definirla se requiere tener datos de al menos 10 aforos bien espaciados. La determinación del punto más bajo de la curva, cuando Q es igual a cero, se facilita si en el terreno se establece la máxima profundidad en el sector que influencia a la sección limnimétrica vigente en ese momento.

Como regla general debe trazarse la recta de tal manera que ningún aforo presente respecto a la recta una dispersión superior al 5 %. En la figura 57 se muestra un ejemplo de la gráfica de una curva de descarga.

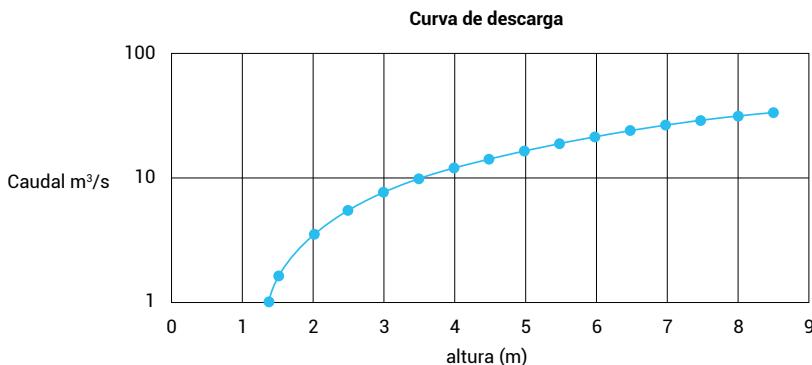


Figura 57. Ejemplo de curva de descarga

Para facilitar la extrapolación tanto hacia arriba como hacia abajo en la curva de descarga es conveniente establecer una correlación entre

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

los niveles y las superficies de las secciones mojadas y, entre los niveles y las velocidades medias registradas.

La primera es una línea recta, la segunda representa una leve curvatura, lo que facilita su extrapolación.

Otro método que facilita la extrapolación es el uso del papel Log- Log.

La curva de descarga se asemeja a una curva parabólica de orden superior cuya ecuación es del tipo.

$$Q = \alpha * (h - h_0)^n \quad (83)$$

Donde:

h_0 – Valor de H para el caudal $Q = 0$

α – Valor de Q para $h - h_0 = 1$

h – Altura de escala hidrométrica para el caudal que se quiere conocer.

Aplicando logaritmos a la ecuación anterior resulta:

$$\log Q = \log \alpha + n \cdot \log (h - h_0) \quad (84)$$

Se observa que la ecuación corresponde a una recta en la que el valor de n representa el coeficiente angular.

Si en papel Log- Log se lleva en el eje de la ordenada los valores de $h-h_0$ y en el de las abscisas los correspondientes valores de Q , siendo h_0 el parámetro se obtienen una serie de curvas que en parte resultan ser cóncavas hacia arriba y en parte cóncava hacia abajo. En la transición de cóncavas a convexas existirá un valor de h_0 para el cual los puntos se alinean según una línea recta.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

La ecuación de esa recta corresponde a la ecuación de la curva de descarga el valor de la constante a se obtiene viendo qué valor de Q le corresponde a $h-h_0$ y n corresponde al valor de la tangente de la recta.

Si los caudales de estiaje se acercan mucho a cero es conveniente definir esta curva separadamente utilizando papel milimetrado, ya que, debido al estrechamiento del cauce fluvial correspondiente a alturas de niveles más bajos, la curva logarítmica presenta una cierta concavidad hacia abajo, similar a la que se observa en el papel milimetrado.

En una sección poco estable, es común que después de cierto tiempo se presente una socavación o un embancamiento.

Los aforos reflejan este hecho con claridad y exigirán el establecimiento de una nueva curva de descarga y de una curva de transición.

Para definir la nueva curva de descarga se debe disponer de un adecuado número de aforos. En la mayoría de los casos, la fecha de cambio de la ecuación coincide con alguna creciente de importancia.

Para afinar la curva de descarga se puede aplicar el método de los mínimos cuadrados en la ecuación de la recta.

$$Y = A + BX$$

$$A = \log Q$$

$$A = \log a$$

$$B = n$$

$$X = \log (h - h_0)$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

A y B son los coeficientes de dicha ecuación que pueden ser encontrados numéricamente aplicando:

$$a = \frac{[(\sum Y) * (\sum (x^2)] - [\sum (X \cdot Y)]}{[N * (\sum X^2)] - [\sum X]^2} \quad (85)$$

$$b = \frac{N[(\sum X * Y)] - [\sum (X) \times \sum (Y)]}{[N * (\sum X^2)] - [\sum X]^2} \quad (86)$$

N es el número de pares de datos que existen:

$$r = \frac{N[(\sum X * Y)] - [\sum (X) \times \sum (Y)]}{\{[N * (\sum X^2)] - [\sum X]^2\} * \{N * (\sum Y^2 - (\sum Y)^2\}^{0.5}} \quad (87)$$

El valor más alto de r será el que defina la ecuación de la curva de descarga.

Ejemplo:

Con los datos de una estación limnimétrica que se muestran en la tabla, encuentre la ecuación de caudal de la curva de descarga. Asuma un valor de $h_o = 0.1$ m.

Tabla 33. Datos de caudal y altura de lámina en sección de aforo

| No | Q (m ³ /s) | H (m) |
|----|-----------------------|-------|
| 1 | 1.5 | 0.8 |
| 2 | 2.3 | 1.5 |
| 3 | 0.5 | 0.3 |
| 4 | 2.1 | 1.3 |
| 5 | 3 | 2.1 |

Para aplicar las ecuaciones de mínimos cuadrados, procedemos a calcular las celdas auxiliares y sus correspondientes sumatorias. Así tenemos:

Tabla 34. Cálculo de parámetros para la curva de descarga. Usando mínimos cuadrados

| No | Q (m ³ /s) | H (m) | H0= | 0.1 | | | |
|------|--------------------------|----------|----------|-----------------|--------|-------------|-------------|
| | | | Y= Log Q | X=Log (H-H0) | X2 | X.Y | Y2 |
| 1 | 1.5 | 0.8 | 0.176 | -0.155 | 0.0249 | -0.02727688 | 0.031008132 |
| 2 | 2.3 | 1.5 | 0.362 | 0.146 | 0.0214 | 0.05285858 | 0.130847027 |
| 3 | 0.5 | 0.3 | -0.301 | -0.699 | 0.4885 | 0.21041094 | 0.090619058 |
| 4 | 2.1 | 1.3 | 0.322 | 0.0792 | 0.0063 | 0.02551373 | 0.103825274 |
| 5 | 3 | 2.1 | 0.477 | 0.301 | 0.0906 | 0.14362781 | 0.227644692 |
| suma | | | 1.036 | -0.327 | 0.6308 | 0.40513417 | 1.073564649 |

Aplicamos las ecuaciones:

$$a = \frac{[(\sum Y) * (\sum x^2)] - [\sum(X) \sum(X.Y)]}{[N * (\sum X^2)] - [\sum X]^2}$$

$$b = \frac{N[(\sum X * Y)] - [\sum(X) \times \sum(Y)]}{[N * (\sum X^2)] - [\sum X]^2}$$

$$r = \frac{N[(\sum X * Y)] - [\sum(X) \times \sum(Y)]}{\{[N * (\sum X^2)] - [\sum X]^2\} * \{N * (\sum Y^2 - (\sum Y)^2\}^{0.5}}$$

Los valores resultantes son:

$$a = 0.25807614$$

$$b = 0.77626155$$

$$r = 0.6538512$$

$$A = \log a$$

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

$$A = 1.8116577$$

$$B = 0.77626155 = n$$

$$Q = 1.81165 (h - 0.1)^{0.77} \text{ Ecuación de caudal calibrado.}$$

6.7. Análisis de caudales extremos

6.7.1. Introducción

Se entiende por máxima descarga de un río al caudal que haya sobrepasado a todos los demás observados durante un tiempo dado. Las máximas descargas de un río se denominan *avenidas*.

Se considera creciente a cualquier caudal alto que desborde los terraplenes ya sea naturales o artificiales a lo largo de la corriente y son responsables de una serie de problemas cuando no son controlados, produciendo inundaciones, daños en estructuras hidráulicas, etc. En la figura 58 se puede observar uno de los fenómenos naturales por avenidas que produjo inundaciones, aludes, derrumbe de viviendas, vías de comunicación e innumerables pérdidas humanas en Perú en el 2017.



Figura 58. Imagen de caudales en eventos extremos.

Fuente: [enlace](#).

El análisis de máximas descargas tiene como objetivo estudiar el comportamiento de estos eventos; poder pronosticarlos dentro de ciertos límites y determinar las dimensiones más convenientes para las obras de ingeniería, que puedan prevenir grandes desastres.

6.7.2. Conceptos fundamentales

Periodo de retorno Tr

Se denomina periodo de retorno Tr al tiempo que se requiere para que un evento de magnitud dada se repita en promedio. Es decir que si decimos que una descarga de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ en cierto río tiene un periodo de retorno de 2 años, significa que en promedio, cada dos años una descarga de tal magnitud será observada en dicho río.

Para calcular el periodo de retorno de las máximas descargas se emplea la relación:

$$Tr = \frac{n + 1}{m} \quad (88)$$

Donde:

n – Número total de descargas anuales observadas, es decir, el número de registros.

m – Número de orden de la magnitud dada cuando todas las descargas son colocadas en orden decreciente.

Descarga de diseño

Se llama descarga de diseño a la descarga que hay que tener en cuenta cuando se determinan las dimensiones de las diferentes estructuras hidráulicas de control, conducción, almacenamiento u, otras obras de arte sobre el curso de aguas como aliviaderos, bocatomas, puentes, etc.

Hay que considerar que la descarga determinada por el análisis de máximas avenidas se refiere únicamente el número de años en promedio que se esperan entre eventos de una magnitud dada.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Considerar la vida útil de las obras hidráulicas para considerar riesgos.

Periodo de diseño

A cualquier obra de ingeniería se le asigna un periodo de vida útil aproximada, la que se determina por varias consideraciones, estas pueden ser económicas, técnicas, sociales, entre otras. Sin embargo, no es posible establecer con certeza la durabilidad relativa de las estructuras por cuanto siempre es posible una falla por ocurrencia de descargas extremas u otros fenómenos de la naturaleza.

Riesgo

Se debe considerar el riesgo de que las estructuras fallen debido a que la descarga considerada para su diseño sea superada.

Si P es la probabilidad de que no ocurra el fenómeno, es decir la descarga considerada no sea igualada o superada, entonces:

En 1 año la probabilidad es P

En 2 años consecutivos es $P^2 = (P * P)$

En 3 años consecutivos es $P^3 = (P * P * P)$

En consecuencia, la probabilidad de que el evento si ocurra en años consecutivos es:

$$J = 1 - P^n \quad (89)$$

Y cuando ocurre este evento, entonces la estructura fallará.

Se presenta la siguiente tabla que relaciona el riesgo, la vida esperada del proyecto y los periodos de retorno para calcular la descarga de diseño.

Tabla 35. Periodos de retorno para riesgos de ocurrencia durante la vida útil de las estructuras

| Riesgo permisible de falla | Vida esperada de las estructuras (años) | | | | | |
|----------------------------|---|-----|-----|------|------|------|
| | 1 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| 0.01 | 100 | 498 | 995 | 2487 | 4957 | 9950 |
| 0.10 | 10 | 48 | 95 | 238 | 475 | 950 |
| 0.25 | 4 | 18 | 35 | 87 | 475 | 348 |
| 0.50 | 5 | 8 | 15 | 37 | 72 | 145 |
| 0.75 | 1.3 | 4 | 8 | 18 | 37 | 72 |
| 0.99 | 1.01 | 1.7 | 1.7 | 6 | 11 | 22 |

Adaptado de: Oñate (2015). Apuntes de hidrología.

6.7.3. Métodos de cálculo

Cálculo de crecidas

La selección de la metodología adecuada para la determinación de un caudal de crecida depende de la clase, cantidad y calidad de información o datos disponibles y, del tipo e importancia de la obra. No siempre el método más refinado es el más apropiado para un caso en particular.

Métodos estadísticos

Estos métodos estadísticos se basan en varias distribuciones de probabilidad que se aplican a un registro de caudales instantáneos, mensuales o anuales recomendándose series mayores de 20 años de registro para obtener valores más consistentes.

Método de Gumbel

Este método estadístico estima valores máximos de una variable asumiendo que estos valores son independientes entre sí. Es adecuado cuando se utilizan datos de descarga máximas

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

instantáneas, mensuales y anuales en un punto de control de una vertiente o río. Para su aplicación se utilizan las siguientes expresiones:

$$Y = -\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) \right) \quad (90)$$

$$SQ = \sqrt{\frac{\sum (Q_i - Q_m)^2}{n - 1}} \quad (91)$$

$$Q_{máx} = Q_m + \frac{SQ}{Sn} (Y - Y_n) \quad (92)$$

Donde:

Tr – Periodo de retorno

Y – Variable normalizada

SQ – Desviación estándar del caudal

n – Numero de datos de la serie

Q_i – Caudal i

Q_m – Caudal medio

Q_{max} – Caudal máximo (m^3/s)

$Y_n S_n$ – Valores de variación en función de los años de registro. (tabla 12)

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Se debe determinar el rango de confianza dentro del cual puede variar el caudal máximo calculando:

$$\Gamma = 1 - \frac{1}{Tr} \quad (93)$$

Si Γ varía entre 0,2 y 0,8

$$\Delta Q = \pm W \frac{SQ}{Sn\sqrt{N}} \quad (94)$$

Si es mayor a 0,9

$$\Delta Q = \pm \frac{1.14 * SQ}{Sn} \quad (95)$$

ΔQ – Variación de caudal m³/s.

Los valores de W se determinan de la tabla 20

Tabla 36. Valores de W para diferentes valores de Γ

| Valores de W | | | |
|--------------|---------|----------|--------|
| Γ | W | Γ | W |
| 0.010 | -2.1607 | 0.5000 | 1.4427 |
| 0.020 | -1.7894 | 0.5500 | 1.1513 |
| 0.050 | -1.4550 | 0.6000 | 1.5984 |
| 0.100 | 1.3028 | 0.6500 | 1.7034 |
| 0.150 | 1.2548 | 0.7000 | 1.8355 |
| 0.200 | 1.2427 | 0.7500 | 2.0069 |
| 0.250 | 1.2494 | 0.8000 | 2.2408 |
| 0.300 | 1.2667 | 0.8500 | 3.1629 |
| 0.350 | 1.2981 | 0.9000 | 4.4721 |
| 0.400 | 1.3366 | 0.9500 | 7.0711 |
| 0.450 | 1.3845 | 0.9900 | 10.000 |

Adaptado de: Oñate (2015). Apuntes de hidrología.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

El caudal máximo de diseño viene dado por:

$$Q_{\text{diseño}} = Q_{\text{máx}} + \Delta Q \quad (96)$$

Ejemplo:

Con los datos de caudales que se detallan en la tabla a continuación, determine el caudal de crecida o diseño para un periodo de retorno de 50 años.

Tabla 37. *Datos de caudales para cálculo de caudales extremos*

| No | Qi (m ³ /s) |
|----|------------------------|
| 1 | 78 |
| 2 | 96 |
| 3 | 45 |
| 4 | 123 |
| 5 | 89 |
| 6 | 56 |
| 7 | 79 |
| 8 | 101 |
| 9 | 87 |
| 10 | 68 |

Para aplicar las ecuaciones antes indicadas del método, se procede al cálculo del Caudal medio y las columnas auxiliares para determinar SQ.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Tabla 38. Cálculos de celdas auxiliares para determinar SQ

| No | Qi (m ³ /s) | (Qi - Qm) ² |
|-------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 78 | 17.64 |
| 2 | 96 | 190.44 |
| 3 | 45 | 1383.84 |
| 4 | 123 | 1664.64 |
| 5 | 89 | 46.24 |
| 6 | 56 | 686.44 |
| 7 | 79 | 10.24 |
| 8 | 101 | 353.44 |
| 9 | 87 | 23.04 |
| 10 | 68 | 201.64 |
| suma | 82.2 | 4577.6 |

De la tabla 14 tenemos los valores de Yn y Sn.

| | |
|-----------|-----------|
| n= | 10 |
| Yn= | 0.4952 |
| Sn= | 0.9497 |

Aplicamos las ecuaciones:

$$Y = -Ln\left(-Ln\left(1 - \frac{1}{Tr}\right)\right)$$

$$Y = -Ln\left(-Ln\left(1 - \frac{1}{50}\right)\right)$$

$$Y = 3.9019$$

$$SQ = \sqrt{\frac{\sum(Q_i - Q_m)^2}{n-1}}$$

$$Sq = 22.5526$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

$$Q_{máx} = Q_m + \frac{SQ}{Sn} (Y - Y_n)$$

$$Q_{máx} = 82.2 + \frac{22.5526}{0.9497} (3.9019 - 0.4952)$$

$$Q_{máx} = 163.099 \text{ m}^3/\text{s}$$

Rango de confianza:

$$\Gamma = 1 - \frac{1}{Tr}$$

$$r = 0.98$$

$$\Delta Q = \pm \frac{1.14 * SQ}{Sn}$$

$$\Delta Q = 27.0717$$

$$Q \text{ diseño} = Q_{máx} + \Delta Q \quad Q \text{ diseño} = 190.1711 \text{ m}^3/\text{s}$$

Índice

Primer
bimestre

Segundo
bimestre

Solucionario

Referencias
bibliográficas

Recursos



Actividades de aprendizaje recomendadas

Se le recomienda realizar la revisión de los subtemas de la unidad de 6.5.3 al 6.7.3 y un resumen. Continúe con la elaboración del formulario de la unidad, tema Escurrimiento y prepárese para la evaluación parcial.

Puede desarrollar de manera autónoma los ejercicios resueltos en esta guía, y procure hacer hojas de cálculo, sobre todo para el método de análisis de distribución de probabilidad de *Gumbel*, con lo cual optimiza el cálculo y puede verificar los resultados.

Ahora proceda a dar contestación a la autoevaluación 6.



Autoevaluación 6

Con todos los conceptos y fundamentos que posee, ahora está en la capacidad de resolver la siguiente autoevaluación, vale la pena que desarrolle los ejercicios resueltos y compare sus resultados, recuerde que dependerá del número de decimales con los cuales trabaje.

1. Empareje los conceptos según corresponda:

- | | |
|------------------------------------|---|
| a. Escurrimiento subsuperficial | 1. Parte del agua de precipitación que se infiltra al nivel inferior del nivel freático. |
| b. Escurrimiento superficial | 2. Parte del agua de precipitación que escurre en dirección más o menos paralela al suelo. |
| c. Escurrimiento subterráneo | 3. Parte del agua que escurre por la superficie del suelo una vez que este se ha saturado. |

2. Señale con verdadero o falso, según corresponda: el escurrimiento que más pronto llega a la salida de la cuenca es el escurrimiento subsuperficial

- a. () Verdadero.
- b. () Falso.

3. Señale con verdadero (V) o falso (F), según corresponda:

- a. () La relación entre el tamaño de la cuenca y cuenca es lineal.
- b. () La forma de la cuenca, tiene influencia en el escurrimiento.
- c. () El Índice de pendiente global nos indica la forma de escurrimiento de una cuenca.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

4. Complete el siguiente concepto:

Un hidrograma es _____ que relaciona el _____ con el _____

El gasto que pasa de manera continua durante _____ por una determinada sección transversal de un río y se grafican los valores obtenidos Vs el tiempo, se denomina _____

5. Enuncie las partes de un hidrograma.

- a. _____
- b. _____
- c. _____
- d. _____
- e. _____
- f. _____
- g. _____

6. Señale con verdadero (V) o falso (F), según corresponda: el área bajo la curva de descarga se constituye en el volumen de escurrimiento.

- a. () Verdadero.
- b. () Falso.

7. Señale la respuesta correcta. El método que relaciona el área de la cuenca con el punto de inflexión D para separar el caudal o gasto base es:

- a. $N = 0.813A^{0.3}$
- b. $N = 0.827A^{0.4}$
- c. $N = 0.827A^{0.2}$
- d. Ninguna de las anteriores.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

8. Señale con verdadero o falso la siguiente aseveración: el escurrimiento base está formado normalmente por agua proveniente de la tormenta en análisis y es muy difícil de determinar con precisión.
- a. () Verdadero.
b. () Falso.
9. Señale con verdadero o falso la siguiente aseveración: la curva de descarga representa los valores de las alturas en el eje de las abscisas y en las ordenadas los valores de caudal. Para poder definirla se requiere tener datos de al menos 10 aforos espaciados.
- a. () Verdadero.
b. () Falso.
10. Para la aplicación del método de aforo por el método sección pendiente, se requiere conocer:
- a. Dos secciones de control, pendiente media de la cuenca, características del cauce.
b. Una sección de control, pendiente del cauce, características del cauce.
c. Dos secciones transversales de control, pendiente y características del cauce.
d. Ninguna de las anteriores.

[Ir al solucionario](#)



Semana 13



Unidad 7. Relación lluvia y escurrimiento

El estudio de la relación lluvia y escurrimiento es de particular importancia, porque en el estudio de esta, se conjugan todos los parámetros revisados en las semanas anteriores, estudiaremos los diferentes métodos para la generación de caudales a partir de información de precipitación, a la falta de información hidrométrica, que es una debilidad de la red de estaciones del país, que no es suficiente para cubrir la necesidad de información, principalmente para el diseño de obras hidráulicas, sean de aprovechamiento o de protección, que reducirían el riesgo de ocurrencia de desastres.

A continuación, revise los subtemas preparados para la semana.

7.1. Introducción

Es muy común que no se cuente con datos adecuados de escurrimiento en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para el diseño y operación de obras hidráulicas.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Se puede decir que en general, los registros de *precipitación* son más abundantes que los de *escurrimiento* y, por otro lado, los datos de escurrimiento se ven afectados por cambios en la cuenca, como construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, deforestación, urbanización, entre otros. Siendo conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca mediante las características de la misma y la precipitación.

Los principales factores que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes:

- Área de la cuenca
- Altura total de precipitación
- Características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.)
- Distribución de la lluvia en el tiempo
- Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca

Dado que la cantidad y calidad de información varían notablemente, se han desarrollado una gran cantidad de métodos para analizar la relación lluvia y escurrimiento. Uno de ellos es el Método Racional.

7.2. Método racional

Este método empezó a utilizarse desde mediados del siglo XIX y es probablemente el método más usado en nuestro medio para la generación de caudales a partir de datos de la precipitación y muy especialmente para el diseño de sistemas de alcantarillado pluvial.

La idea detrás del método racional es que si una lluvia con intensidad I empieza en forma instantánea y continua en forma indefinida, la tasa de escorrentía continuará hasta que se llegue el tiempo de concentración t_c , en el cual toda la cuenca está contribuyendo al

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

flujo de salida. El producto de la intensidad de la lluvia I y el área de la cuenca es el caudal de entrada de agua al sistema $A \cdot I$ y la relación entre este caudal y el caudal Q que ocurre en el tiempo t_c se conoce como coeficiente de escorrentía C que varía entre 0 y 1.

La expresión de la fórmula racional es:

$$Q = C \times I \times A \quad (97)$$

Donde:

Q – Caudal en m^3/s

Por efectos de la reducción de unidades, la ecuación queda:

$$Q = 0.278 \times C \times I \times A \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (98)$$

Supóngase que en una cuenca impermeable se hace caer uniformemente, una lluvia de intensidad constante durante un largo tiempo. Al principio, el gasto que sale de la cuenca será creciente con el tiempo, pero llegará un momento en el que se alcance un punto de equilibrio, es decir, en el que el volumen que entra por unidad de tiempo por la lluvia sea el mismo que el gasto de salida de la cuenca.

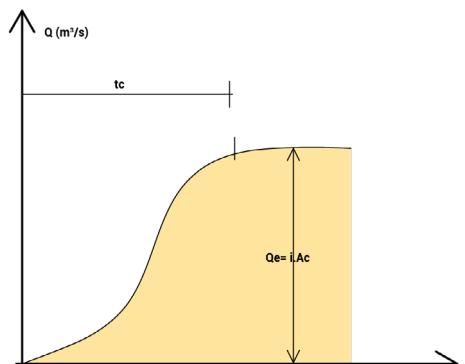


Figura 58. Esquema de variación de gasto hasta punto de equilibrio.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

7.2.1. Tiempo de concentración t_c

El tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio se denomina tiempo de concentración, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca.

Naturalmente, el tiempo de concentración t_c depende de la longitud máxima que debe recorrer el agua hasta la salida de la cuenca y de la velocidad que adquiere, en promedio, dentro de la misma. Esta velocidad está en función de las pendientes del terreno y los cauces, y de la rugosidad de la superficie de los mismos. El tiempo de concentración se calcula mediante la ecuación:

$$t_c = \frac{L}{3600 v} \quad (99)$$

Donde:

t_c – Tiempo de concentración en horas.

L – Longitud del cauce principal en m.

v – Velocidad media del agua en cauce principal m/s.

Esta fórmula no toma en cuenta el recorrido del agua de lluvia que llega a la superficie hasta los cauces.

Otra manera de estimar el tiempo de concentración es mediante la fórmula de **Kirpich**:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (100)$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Donde:

S – Pendiente del cauce principal en m/m

L – Longitud cauce en m

t_c – Tiempo de concentración en h

Para flujos en superficies de concreto y asfalto se debe multiplicar t_c por 0.4; para canales de concreto se debe multiplicar por 0,2 y no se debe hacer ningún ajuste para flujo superficial en suelo descubierto o para un flujo en cunetas.

Existen algunas fórmulas empíricas:

Formula de Kirpich en minutos

$$t_c = 0.01947 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (101)$$

Donde:

S – Pendiente del cauce principal en m/m

L – Longitud del cauce principal en m

t_c – Tiempo de concentración en minutos

Fórmula Californiana del USBR

Es la expresión utilizada para el tiempo de concentración en el cálculo del hidrograma triangular del *U.S. Bureau of reclamation*.

$$t_c = 0.066 \left(\frac{L}{J^{1/2}} \right)^{0.77} \quad (102)$$

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Donde:

L – Longitud del cauce principal en Km

J – Pendiente del cauce principal en m/m

t_c – Tiempo de concentración en h

Fórmula de Giandotí

$$t_c = \frac{4 \times \sqrt{A} + 1.5L}{25.3 \sqrt{JL}} \quad (103)$$

Donde:

J – Pendiente del cauce principal en m/m

L – Longitud del cauce principal en m

A – Área de la cuenca en km^2

t_c – Tiempo de concentración en h

Fórmula Ventura y Heras

$$t_c = \alpha \frac{A^{0.5}}{J}; \quad 0.04 \leq \alpha \leq 0.13 \quad (104)$$

Donde:

J – Pendiente del cauce principal en m/m

L – Longitud del cauce principal en km

t_c – Tiempo de concentración en h

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Fórmula de Passini

Recomendada en España para el método racional modificado, en la instrucción 5.2 – IC. De drenaje superficial (M.O.P.U. 19990). Se utiliza en el hidrograma unitario de J.R. Temez. Se deriva de la ecuación del U. S. Army corps of Engineers.

$$t_c = 0.3 \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76} \quad (105)$$

t_c – Tiempo de concentración en h

Fórmula de California Culvert Practice

$$t_c = 60 \left(\frac{11.9 L^3}{H} \right) \quad (106)$$

Donde:

H – Diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y el desagüe de la cuenca en pies.

L – Longitud del curso de agua más largo en millas

t_c – Tiempo de concentración en minutos

Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía es la variable menos precisa del método racional. Su uso implica una relación fija entre la tasa de escorrentía pico y la tasa de lluvia para la cuenca de drenaje, lo que no es cierto en realidad. La proporción de la lluvia total que alcanzarán los drenajes de tormenta dependerán del porcentaje de permeabilidad, de la pendiente y de las características del encarramiento de la superficie. Superficies impermeables como pavimentos o techos

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

de los edificios producirán una escorrentía de casi el ciento por ciento después de que la superficie ha sido totalmente mojada, independiente de la pendiente.

También depende de las características y las condiciones del suelo. La tasa de infiltración disminuye a medida que la lluvia continúa y también es influida por las condiciones de humedad antecedente.

Otros factores que influyen son la intensidad de lluvia, la proximidad del nivel freático, el grado de compactación del suelo, la porosidad del subsuelo, la vegetación, la pendiente del suelo y el almacenamiento por depresión.

En la tabla se dan algunos valores de coeficientes escogidos para diferentes tipos de superficies.

Tabla 39. *Valores de coeficiente de escorrentía C.*

| Tipo del área drenada | | Coeficiente de escurrimiento | | |
|------------------------|------------------------------------|------------------------------|--|-----------|
| | | | | |
| PRADOS: | | | | |
| | Suelos arenosos, planos, 2 % | | | 0.05-0.10 |
| | Suelos arenosos, promedio, 2-7 % | | | 0.15-0.20 |
| | Suelos pesados, planos, 2 % | | | 0.13-0.17 |
| | Suelos pesados, promedio, 2-7 % | | | 0.18-0.22 |
| | suelos pesados, pendientes, 7 % | | | 0.25-0.35 |
| | | | | |
| DISTRITOS COMERCIALES: | | | | |
| | Áreas de centro de ciudad | | | 0.70-0.95 |
| | Áreas vecinas | | | 0.50-0.70 |
| | | | | |
| RESIDENCIAL: | | | | |
| | Áreas casas individuales separadas | | | 0.30-0.50 |
| | Casas multifamiliares separadas | | | 0.40-0.60 |
| | Casas multifamiliares unidas | | | 0.60-0.75 |
| | Suburbana | | | 0.25-0.40 |
| | Áreas de apartamentos | | | 0.50-0.70 |
| | | | | |

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

| Tipo del área drenada | | Coeficiente de escurrimiento | |
|----------------------------------|----------------|------------------------------|-----------|
| INDUSTRIAL: | | | |
| | Áreas livianas | | 0.50-0.80 |
| | Áreas pesadas | | 0-60-0.90 |
| PARQUES, CEMENTERIOS | | | 0.10-0.25 |
| CAMPOS DE JUEGO | | | 0.20-0.35 |
| ÁREAS DE PATIOS DE FERROCARRILES | | | 0.20-0.40 |
| ÁREAS NO DESARROLLADAS | | | 0.10-0.30 |
| CALLES: | | | |
| | Asfaltadas | | 0.70-0.95 |
| | Concreto | | 0.80-0.95 |
| | Ladrillo | | 0.70-0.85 |
| CALZADAS Y ALAMEDAS | | | 0.75-0.85 |
| TECHOS | | | 0.75-0.95 |

| TIPO DEL ÁREA DRENADA | | COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO | |
|-----------------------------|--|------------------------------|--------|
| | | MÍNIMO | MÁXIMO |
| ZONAS COMERCIALES: | | | |
| Zona comercial | | 0.70 | 0.95 |
| Vecindarios | | 0.50 | 0.70 |
| ZONAS RESIDENCIALES: | | | |
| Unifamiliares | | 0.30 | 0.50 |
| Multifamiliares, espaciados | | 0.40 | 0.60 |
| Multifamiliares, compactos | | 0.60 | 0.75 |
| semiurbanas | | 0.25 | 0.40 |
| Casas habitación | | 0.50 | 0.70 |

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

| ZONAS INDUSTRIALES: | | | | |
|-----------------------|---|--|------|------|
| | Espaciado | | 0.50 | 0.80 |
| | Compacto | | 0.60 | 0.90 |
| | | | | |
| CEMENTERIOS, PARQUES | | | 0.10 | 0.25 |
| CAMPOS DE JUEGO | | | 0.20 | 0.35 |
| PATIOS DE FERROCARRIL | | | 0.20 | 0.40 |
| ZONAS SUBURBANAS | | | 0.10 | 0.30 |
| CALLE: | | | | |
| | Asfaltadas | | 0.70 | 0.95 |
| | De concreto hidráulico | | 0.70 | 0.95 |
| | Adoquinadas | | 0.70 | 0.85 |
| ESTACIONAMIENTOS | | | 0.75 | 0.85 |
| TECHADOS | | | 0.75 | 0.95 |
| PRADERAS: | | | | |
| | Suelos arenosos planos (pendiente de 0.02 o menos) | | 0.05 | 0.10 |
| | Suelos arenosos con pendientes medias (0.02-0.07) | | 0.10 | 0.15 |
| | Suelos arenosos escarpados (0.07 o más) | | 0.15 | 0.20 |
| | Suelos arcillosos planos (0.02 o menos) | | 0.13 | 0.17 |
| | Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02-0.07) | | 0.18 | 0.22 |
| | Suelos arcillosos escarpados (0.07 o más) | | 0.25 | 0.35 |

Fuente: Aparicio (1997, p.210)

La intensidad de la lluvia / es la tasa promedio de lluvia en mm/h para una subcuenca. La intensidad se selecciona con base en la duración de la lluvia de diseño y al periodo de retorno. El periodo de retorno se establece utilizando estándares de diseño o es escogido por el hidrólogo como parámetro de diseño.

7.3. Hidrogramas

Un hidrograma es la representación gráfica de las variaciones del caudal respecto al tiempo, en orden cronológico, medidos en un punto de la corriente. Sitio donde se ha colocado una estación hidrométrica.

En la figura 60 que se presenta a continuación se puede observar hidrogramas correspondientes a una tormenta aislada y a una sucesión de ellas respectivamente, hidrograma anual.

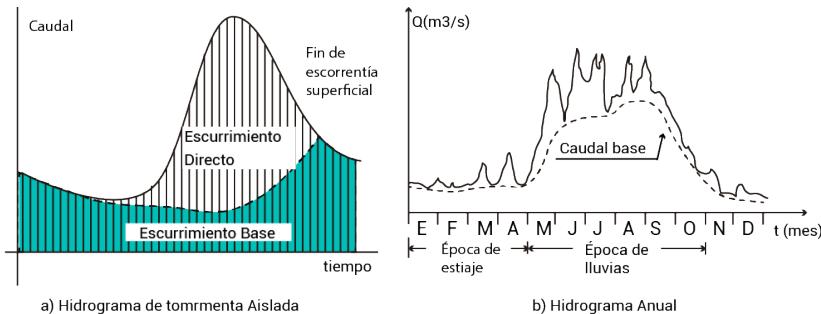


Figura 60. Hidrograma de tormenta aislada, b) hidrograma anual

Fuente: [Enlace](#).

7.3.1. Definiciones importantes

Tiempo de pico tp : Algunos autores lo denominan tiempo de demora, es el intervalo entre el inicio del periodo de precipitación neta y el caudal máximo. Es decir, es el tiempo que transcurre desde el inicio del escurrimiento directo hasta el pico del hidrograma.

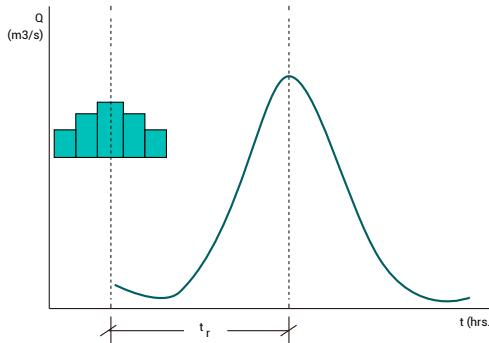
[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Figura 61. Tiempo de retraso

7.3.2. Análisis de un hidrograma

El escurrimiento total Q que pasa por un cauce, está compuesto de:

$$Q = Q_d + Q_b$$

Donde:

Q : Escurrimiento total

Q_d : Escurrimiento directo, producido por la precipitación

Q_b : Flujo base, producido por aporte del agua subterránea, incluye el flujo subsuperficial.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

En principio, no todas las corrientes reciben aporte de agua subterránea, así como tampoco todas las precipitaciones provocan ED. Solo las precipitaciones intensas y prolongadas, producen un aumento significativo en el escurrimiento de las corrientes.

Las características del escurrimiento directo y del flujo base, difieren tanto, que deben tratarse separadamente en los problemas que involucran periodos cortos de tiempo.

7.3.3. Separación del flujo base

Como se explicó en el capítulo de infiltración, es importante separar el flujo base del escurrimiento directo, conociéndose varias técnicas para separarlo, recordamos algunos de los métodos brevemente.

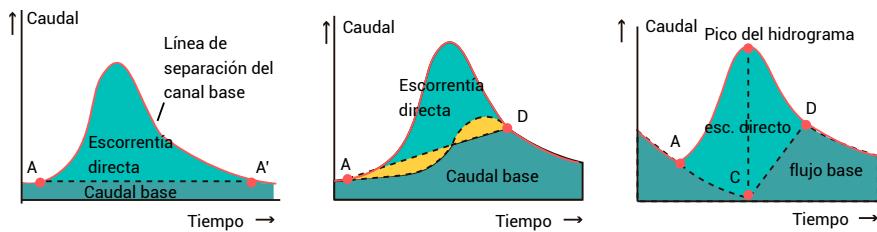


Figura 62. Métodos de separación de flujo base

Fuente: [enlace](#)

- Consiste en admitir como límite del escurrimiento base, la línea recta AA', figura 80a, que une el punto de origen del escurrimiento directo y sigue en forma paralela al eje X.

Este método da buenos resultados especialmente en tormentas pequeñas donde los niveles freáticos no se alteran. En general, sobreestima el tiempo base y el volumen de escurrimiento directo.

- b. Como variante, se puede asignar al hidrograma del flujo base, un trazado siguiendo la línea recta AD , donde A es el punto de levantamiento y el punto D es el punto de inicio de la curva de agotamiento, figura 80b.
1. Otra forma es admitir la línea ACD , figura 80c, el segmento AC esquematiza la porción de la curva de descenso partiendo del caudal correspondiente al comienzo de la subida, y extendiéndose hasta el instante del pico del hidrograma, el segmento CD es una recta, que une el punto C con el punto D , escogido igual que en el proceso anterior.

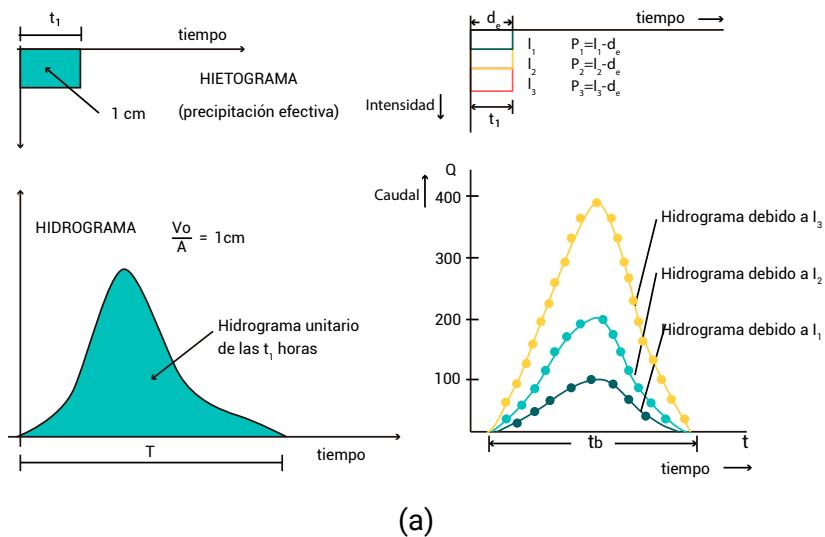
7.4. Hidrograma unitario

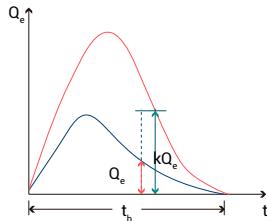
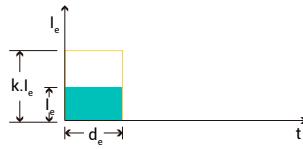
Se define como hidrograma unitario de escurrimiento directo que se produce por la lluvia efectiva de lámina unitaria, generalmente 1 mm de duración d y repartida uniformemente sobre la cuenca. Para su confección se requiere de al menos un hidrograma medido a la salida de la cuenca, además de los registros de precipitación. Sin embargo, esta información rara vez está disponible, por ello se han desarrollado varias metodologías que se permiten obtener hidrogramas unitarios usando básicamente datos de las características generales de la cuenca. Los hidrogramas así obtenidos se denominan **sintéticos**.

El método del hidrograma unitario fue desarrollado originalmente por Sherman en 1932, y está basado en las siguientes hipótesis:

- a. **Tiempo base constante.** Para una cuenca en análisis, la duración total de escurrimiento directo o tiempo base tb es la misma para todas las tormentas con la misma duración de precipitación efectiva, esto es independiente del volumen total escurrido. Todo hidrograma unitario está atado a una duración de la lluvia en exceso. figura 81.

- b. **Linealidad o proporcionalidad.** Otro principio es la linealidad o proporcionalidad. Las ordenadas de todos los hidrogramas de ED con el mismo tiempo base, son directamente proporcionales al volumen total de escurrimiento directo VED , es decir, al volumen total de lluvia efectiva. Como consecuencia, las ordenadas de dichos hidrogramas son proporcionales entre sí. (Villón, 2002)
- c. **Superposición de causas y efectos.** El hidrograma que resulta de un periodo de lluvia dado puede superponerse a hidrogramas resultantes de periodos lluviosos precedentes. (Villón, 2002)



[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

(b)

Figura 63. a) Tiempo de base b) Linealidad o proporcionalidad

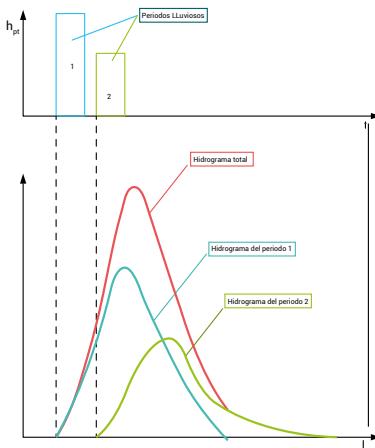
[Fuente: enlace](#)

Figura 64. Principio de superposición

[Fuente: enlace](#)

7.4.1. Construcción de un hidrograma unitario

Para obtener un hidrograma unitario, es importante comenzar con un hidrograma observado (hidrograma patrón) que represente la ED correspondiente a una sola tormenta. Esta tormenta ha producido

la precipitación efectiva con una cobertura temporal y espacial casi uniforme sobre la cuenca. Se considera además la siguiente información:

- Área de la cuenca
- Altura de la precipitación promediada sobre la cuenca
- Período a lo largo del cual ocurrió la precipitación efectiva

Para su construcción se siguen los siguientes pasos:

1. Seleccionar el periodo de precipitación adecuado
2. Separar el flujo base de la escorrentía directa

Para que el hidrograma unitario muestre únicamente el efecto de la ED, se debe separar la contribución del caudal base, aplicando uno de los métodos simplificados descritos anteriormente. El hidrograma que se obtiene eliminando la contribución del caudal base muestra sólo la contribución del exceso de precipitación, o la ED. figura 65.

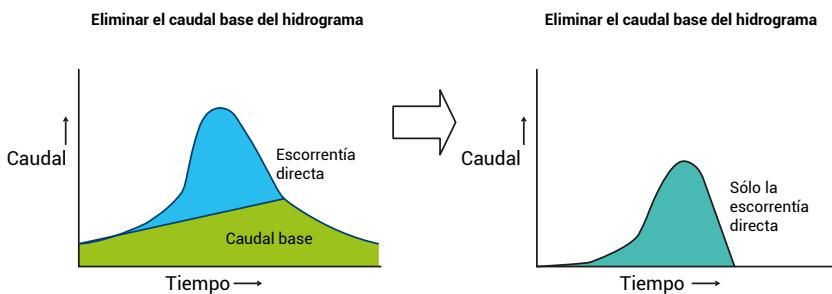


Figura 65. Esquema de pasos para construcción del HU

Fuente: [enlace](#)

Calcular el Volumen de escorrentía directa. El procedimiento ya ha sido descrito en el capítulo de infiltración, sin embargo, se recuerda el procedimiento.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

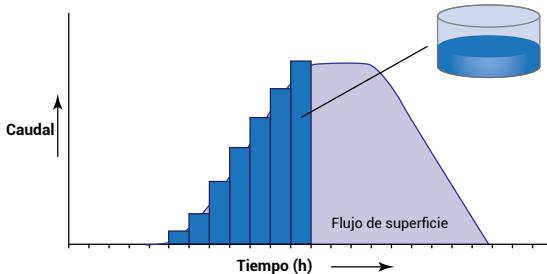


Figura 66. Volumen de escorrentía directa

Fuente: [enlace](#)

A través del cálculo del área bajo la curva del hidrograma, una vez que se ha separado el flujo base, a través de aproximaciones a figuras geométricas, como se muestra en la figura 84, se transforman los escurrimientos directos a volumen; los valores parciales se suman y obtenemos el volumen de escurrimiento directo *VED*.

3. Calcular la altura de precipitación en exceso o efectiva (h_{pe}), dividiendo el *VED* para el área de la cuenca *A*.

$$h_{pe} = \frac{VED}{A} \quad (181)$$

Donde:

h_{pe} – Altura de precipitación efectiva en m

VED – Volumen de escurrimiento directo en m^3

A - Área de la cuenca en m^2

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

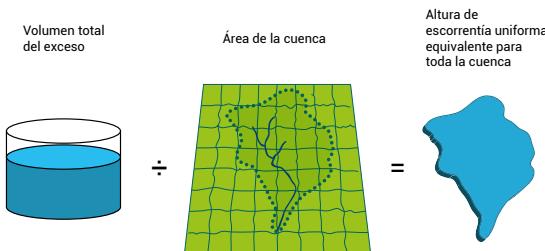


Figura 67. Esquema de cálculo de altura de escorrentía directa en la cuenca

Fuente: [Enlace](#)

Esta lámina de escorrentía directa es, por definición, igual a la lámina de precipitación efectiva.

4. Obtener las ordenadas del hidrograma unitario, dividiendo los valores de ordenadas del escurrimiento directo entre la altura de precipitación efectiva.

La duración de exceso, tiempo efectivo que provoca altura de precipitación efectiva h_{pe} , correspondiente al hidrograma unitario, se obtiene a partir del hietograma de la tormenta y el índice de infiltración medio, como ya se explicado en la unidad de infiltración.

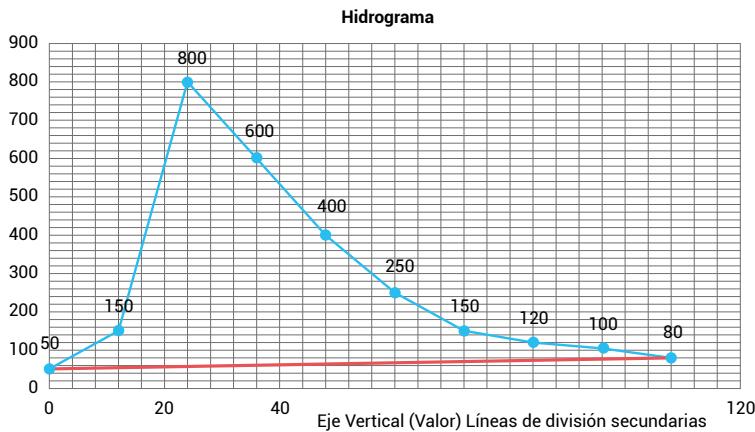
Ejemplo:

Obtener el Hidrograma unitario HU de una tormenta con la siguiente información: Área de la cuenca: 3077.28 km^2 Duración de exceso de = 12 horas

Tabla 40. Datos de caudal para cálculo de HU

| $t(h)$ | $Q (m^3/s)$ |
|--------|-------------|
| 0 | 50 |
| 12 | 150 |
| 24 | 800 |
| 36 | 600 |
| 48 | 400 |
| 60 | 250 |
| 72 | 150 |
| 84 | 120 |
| 96 | 100 |
| 108 | 80 |

- Con los datos, obtengo el hidrograma del evento, o patrón.



- Para calcular el volumen de escurrimiento directo VED , primero se resta el Q_{base} y, se determina las coordenadas del HU sin este caudal, para luego obtener el área bajo la curva, en este caso se lo realiza mediante aproximación a figuras geométricas conocidas.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Tabla 41. Cálculo de HU

| t(h) | Q (m³/s) | Q HU (m³/s)-Q_{base} |
|-------------|----------------------------|--|
| 0 | 50 | 0 |
| 12 | 150 | 95 |
| 24 | 800 | 742 |
| 36 | 600 | 540 |
| 48 | 400 | 340 |
| 60 | 250 | 188 |
| 72 | 150 | 88 |
| 84 | 120 | 52 |
| 96 | 100 | 30 |
| 108 | 80 | 0 |

$$A_t = \frac{1}{2} [(12 * 95) + (95 + 742) * 12 + (742 + 540) * 12 + (540 + 340) * 12 + (340 + 188) * 12 + (188 + 88) * 12 + (88 + 52) * 12 + (52 + 30) * 12 + (30 * 12)]$$

$$A_t = 24900 \frac{m^s \cdot h}{s} 3600 \frac{s}{h}$$

$$A_t = 896404000 \text{ m}^3 \approx \text{VED}$$

3. Calculo el valor de h_p .

$$h_p = \frac{\text{VED}}{A}$$

$$h_p = \frac{89640000}{3077.28 \times 10^6}$$

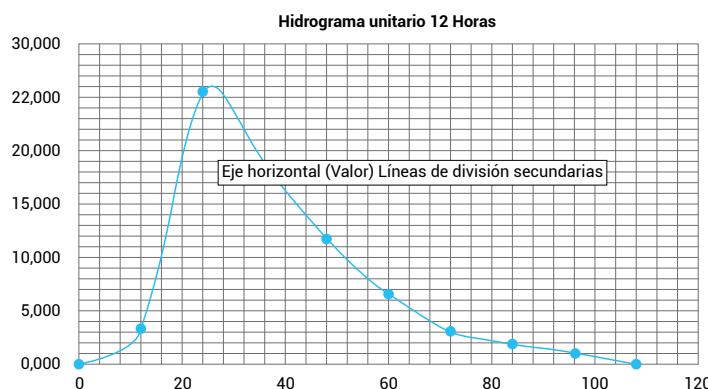
$$h_p = 0.2913 \text{ m} \approx 29.13 \text{ mm.}$$

4. Obtengo el HU dividiendo los valores del HU para el valor de hp y obtengo:

Tabla 42. Resultado de cálculo de HU (12 horas)

| $t(h)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q HU (m^3/s) - Q_{base}$ | $Q HU (m^3/s/mm)$ |
|--------|-------------|---------------------------|-------------------|
| 0 | 50 | 0 | 0.000 |
| 12 | 150 | 95 | 3.269 |
| 24 | 800 | 742 | 25.533 |
| 36 | 600 | 540 | 18.582 |
| 48 | 400 | 340 | 11.700 |
| 60 | 250 | 188 | 6.469 |
| 72 | 150 | 88 | 3.028 |
| 84 | 120 | 52 | 1.789 |
| 96 | 100 | 30 | 1.030 |
| 108 | 80 | 0 | 0.000 |

5. Grafico el HU en $m^3/s/mm$



Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos



Actividades de aprendizaje recomendadas

Como todas las semanas, se le recomienda realizar una lectura analítica y pausada de los subtemas propuestos del 7.1 al 7.4, a la vez ir extrayendo el formulario y tablas necesarias para los cálculos, recuerde que la secuencia, así como la identificación de las variables es indispensable para la comprensión de la metodología de cálculo.

Le animo a desarrollar los ejercicios resueltos en esta guía y desarrollar hojas de cálculo, que le ayudaran en los cálculos de la tarea que se propone como actividad calificada para esta semana.



Semana 14

7.5. Hidrograma Unitario sintético

Como se ha mencionado, para la confección de un hidrograma se requiere de al menos un hidrograma a la salida de la cuenca, además de los registros de precipitación. Sin embargo, esta información rara vez está disponible, por ello se han desarrollado varias metodologías que permiten obtener hidrogramas unitarios usando básicamente datos de las características generales de la cuenca. Los hidrogramas así obtenidos se denominan sintéticos. (Villón, 2002)

Ven T. Chow. Desarrolló un método para el cálculo del gasto pico de hidrograma de diseño para alcantarillas y otras estructuras de drenaje pequeñas. Este método solo proporciona el gasto pico y es aplicable a cuencas no urbanas con un área menor a 25 km^2 .

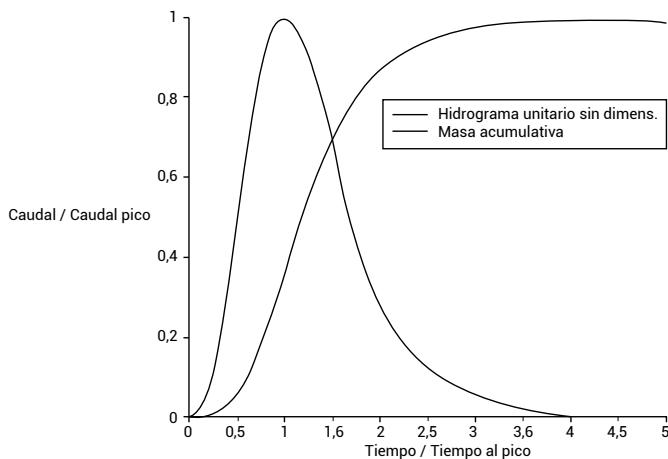


Figura 68. Hidrograma unitario sintético

Fuente: [enlace](#)

Según esta metodología el gasto pico Q_p de un hidrograma de escurrimiento directo puede expresarse como el producto de precipitación efectiva P_e por el gasto de pico de un hidrograma unitario q_p .

$$Q_p = q_p \times P_e \quad (109)$$

El gasto de pico del hidrograma unitario q_p se expresa como una fracción del gasto de equilibrio para una lluvia de intensidad $i = 1 \text{ mm}$.

$$q_p = \frac{1}{d_e} A_c * Z \quad (183)$$

Z = es la fracción mencionada, que se denomina factor de reducción de pico. Si A_c se expresa en m^2 y d_e en horas, la ecuación anterior se escribe como:

$$q_p = \frac{0,278}{d_e} A_c * Z \quad (111)$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

$$q_p \text{ está } \frac{m^3}{s} / mm$$

Entonces, sustituyendo tenemos:

$$Q_p = \frac{0,278 * Pe * A_c}{d_e} * Z \quad (112)$$

El valor de precipitación efectiva Pe , se calcula en base a la metodología del número de la curva a partir de la lluvia total P . El factor de reducción de pico se calcula como función del tiempo de retraso, tiempo que transcurre entre el centro de masa de la precipitación al pico del hidrograma.

$$Pe = \frac{\left(P - \frac{508}{N} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (113)$$

Donde:

P_e – Altura de precipitación efectiva en cm

N – Número de la curva o escurrimiento

P – Precipitación total llovida en (cm)

El tiempo de retraso se calcula según Ven T. Chow como:

$$t_r = 0.005 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.64} \quad (114)$$

Donde:

L – Longitud del cauce principal en m

S – Pendiente en %.

T_r – Tiempo de retraso en horas

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Para aplicar este método es conveniente tener los datos de precipitación en forma de curvas IDF. Así el periodo de retorno adecuado para el problema, se calcularían los picos correspondientes a varias duraciones y se escogería el mayor para el diseño.

Los valores de Z de los diferentes rangos de $-d_e/t_r$, se especifican en la tabla 43.

Tabla 43. Valores de Z.

| | |
|-------------------------------|--|
| $0.05 \leq d_e / tr \leq 0.4$ | $z = 0.73 \left(\frac{d_e}{tr} \right)^{0.97}$ |
| $\leq d_e / tr \leq 2$ | $z = 1.89 \left(\frac{d_e}{tr} \right)^{0.23} - 1.23$ |
| $d_e / tr > 2$ | $z = 1$ |

Ejemplo:

Calcular el caudal de diseño de una alcantarilla con la siguiente información: Área de la cuenca = 15 Km², tipo de suelo: arcilla en su totalidad. Uso del suelo: bosques normales en su totalidad. Pendiente del cauce 1 %; pendiente media de la cuenca 12 %. La Ecuación de intensidad para la zona de estudio $I = \frac{720 \times T_r^{0.4}}{d^{0.7}}$. Considerar un Tr = 10 años

Determinar el caudal considerando los diferentes períodos de tiempo de concentración.

Solución:

1. Calculamos el tiempo de retraso según Chow como:

$$t_r = 0.005 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.64}$$

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

$$t_r = 0.005 \left[\frac{5000}{\sqrt{1}} \right]^{0.64}$$

$$t_r = 1.16 \text{ horas}$$

2. Calculo la Intensidad dejándola en función de $d = tc$.

$$I = \frac{720 \times T_r^{0.4}}{d^{0.7}}$$

$$I = \frac{720 \times 10^{0.4}}{d^{0.7}}$$

$$I = 1808.55 \times d^{-0.7} \text{ mm/h.}$$

3. Para que la ecuación nos dé resultados en mm/minuto realizamos las operaciones de reducción de unidades quedando la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$I = 30.1425 d^{-0.7} \text{ mm/min}$$

$$I = P/d \text{ Entonces, } \frac{30.1425}{d^{0.7}} = \frac{P}{d}$$

$$I = 30.1425 \times d^{0.3} \text{ mm/min}$$

4. Con los datos del enunciado tenemos que el $CN = 77$

Siendo:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5.08 \right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32}$$

5. tenemos que P_e dependerá de los diferentes valores de P que obtengamos, así se calcula Q_p con la expresión:

$$Q_p = \frac{0,278 * P_e * A_c}{d_s} * Z$$

Para los diferentes tiempos de concentración obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 65. Valores de Z y cálculo de caudal

| De | P (mm) | P (cm) | P _e (cm) | P _e (mm) | de/tr | z | Q (m ³ /s) |
|-----|---------|---------|---------------------|---------------------|------------|------------|-----------------------|
| 10 | 60.142 | 6.0142 | 1.67341147 | 16.7341147 | 0.14306152 | 0.11070825 | 46.3521674 |
| 20 | 74.044 | 7.4044 | 2.57211754 | 25.7211754 | 0.28612303 | 0.21685982 | 69.7793976 |
| 30 | 83.621 | 8.3621 | 3.24631532 | 32.4631532 | 0.42918455 | 0.32585795 | 88.2236595 |
| 40 | 91.159 | 9.1159 | 3.80212198 | 38.0212198 | 0.57224607 | 0.4322864 | 102.807532 |
| 50 | 97.47 | 9.747 | 4.2819714 | 42.819714 | 0.71530758 | 0.51982717 | 111.383288 |
| 60 | 102.95 | 10.295 | 4.70809963 | 47.0809963 | 0.8583691 | 0.59476458 | 116.768794 |
| 70 | 107.822 | 10.7822 | 5.09360531 | 50.9360531 | 1.00143062 | 0.66062155 | 120.272763 |
| 80 | 112.229 | 11.2229 | 5.44725304 | 54.4725304 | 1.14449213 | 0.71958759 | 122.590984 |
| 90 | 116.266 | 11.6266 | 5.77501453 | 57.7501453 | 1.28755365 | 0.77312398 | 124.121502 |
| 100 | 119.999 | 11.9999 | 6.08111396 | 60.8111396 | 1.43061516 | 0.82225846 | 125.106189 |
| 120 | 126.746 | 12.6746 | 6.64114686 | 66.4114686 | 1.7167382 | 0.91014767 | 126.026247 |
| 150 | 135.521 | 13.5521 | 7.38131074 | 73.8131074 | 2.14592275 | 1.02285398 | 125.934051 |
| 180 | 143.14 | 14.314 | 8.03355745 | 80.3355745 | 2.5751073 | 1.11933382 | 124.992032 |

Entonces, el caudal de diseño será 126.03 m³/s

7.6. Hidrograma unitario triangular

Mokus desarrolló un hidrograma unitario sintético de forma triangular. Este es utilizado por la Soil Conservation Service SCS. De la geometría del hidrograma unitario se desprende que:

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

$$q_p = \frac{0.555 * A}{t_p} \quad (115)$$

Donde:

A – Área de la cuenca en km^2

t_p – Tiempo de pico en horas

q_p – Gasto pico en $\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}$

Del análisis de varios hidrogramas Mokus concluye que el tiempo t_p base y el tiempo se relacionan mediante la expresión:

$$t_b = 2.67 * t_p \quad (116)$$

A su vez, el tiempo de pico se expresa como:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (117)$$

Donde d_e es la duración en exceso en horas y t_r es el tiempo de retraso en horas, el cual se estima mediante el tiempo de concentración t_c como:

$$t_r = 0.6 * t_c \quad (118)$$

Además, la duración es exceso con la que se tiene mayor gasto pico a falta de mejores datos, se puede calcular aproximadamente como:

$$d_e = 2\sqrt{t_c} \quad (119)$$

Para cuencas grandes. O bien de igual t_c para pequeñas. Todos los tiempos y duración en exceso en las fórmulas anteriores en horas.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

$$q_p = \frac{0.208 * A}{t_p} \quad (120)$$

En donde:

$$t_p = \sqrt{t_c} + 0.6 * t_c \quad (121)$$

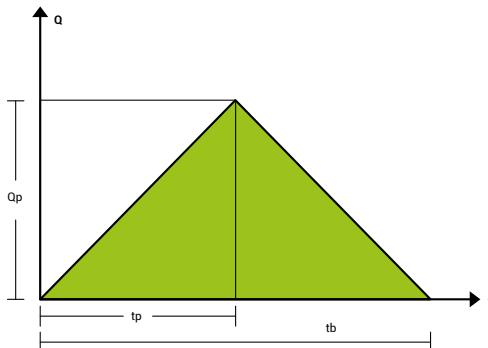


Figura 69. Hidrograma unitario triangular

Ejemplo:

Construir un hidrograma unitario triangular para una cuenca de $A = 70 \text{ km}^2$; Longitud del cauce principal $L = 16 \text{ km}$; Pendiente $S = 8\%$

Solución:

Calculo el tiempo de concentración t_c por Kirpich:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

$$t_c = 0.000325 \frac{16000^{0.77}}{0.08^{0.385}} = 1.484 \text{ horas}$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

La duración es exceso:

$$d_e = 2\sqrt{t_c} = 2\sqrt{1.484}$$

$$d_e = 2.436 \text{ horas}$$

Tiempo de retraso:

$$t_r = 0.6t_c = 0.6 \times 1.484$$

$$t_r = 0.8904 \text{ horas}$$

Tiempo pico:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r$$

$$t_p = \frac{2.436}{2} + 0.8904 \text{ horas}$$

$$t_p = 2.1084 \text{ horas}$$

Caudal pico:

$$q_p = \frac{0.208 * A}{t_p}$$

$$q_p = \frac{0.208 * 70 \text{ Km}^2}{2.1084}$$

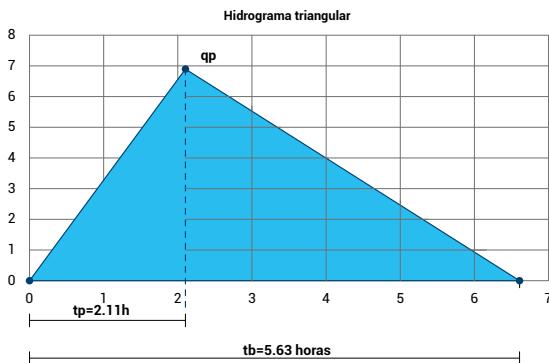
$$q_p = 6.9057 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} / \text{mm}$$

Tiempo de base

$$t_b = 2.67 * t_p$$

$$t_b = 2.67 * 2.1084$$

$$t_b = 5.629 \text{ horas}$$



7.7. Hidrograma unitario adimensional del SCS

El hidrograma adimensional del SCS es un hidrograma unitario sintético en el cual el caudal se expresa como una relación del caudal q con el caudal de pico q_p y el tiempo en relación del tiempo t al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario t_p .

Dados el caudal pico y el tiempo de retraso para la duración de exceso de la precipitación, el hidrograma unitario puede estimarse a partir del hidrograma sintético adimensional para la cuenca dada.

En la figura se muestra un hidrograma sintético adimensional, obtenido a partir de varios hidrogramas registrados en una gran variedad de cuencas. Para obtener un hidrograma unitario a partir de esta figura para una cuenca en particular, basta con multiplicar las ordenadas por el gasto pico q_p de la ecuación:

$$q_p = \frac{0.208 * A}{t_p}$$

y las abscisas por el tiempo pico de la ecuación:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r$$

Tabla 44. Valores de las relaciones t/tp y Q/Qp

| t/tp | Q/Qp | t/tp | Q/Qp |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0.00 | 0.00 | 1.40 | 0.75 |
| 0.10 | 0.02 | 1.50 | 0.65 |
| 0.20 | 0.08 | 1.60 | 0.57 |
| 0.30 | 0.16 | 1.80 | 0.43 |
| 0.40 | 0.28 | 2.00 | 0.32 |
| 0.50 | 0.43 | 2.20 | 0.24 |
| 0.60 | 0.60 | 2.40 | 0.18 |
| 0.70 | 0.77 | 2.60 | 0.13 |
| 0.80 | 0.89 | 2.80 | 0.098 |
| 0.90 | 0.97 | 3.00 | 0.075 |
| 1.00 | 1.00 | 3.50 | 0.036 |
| 1.10 | 0.98 | 4.00 | 0.018 |
| 1.20 | 0.92 | 4.50 | 0.009 |
| 1.30 | 0.84 | 5.00 | 0.004 |

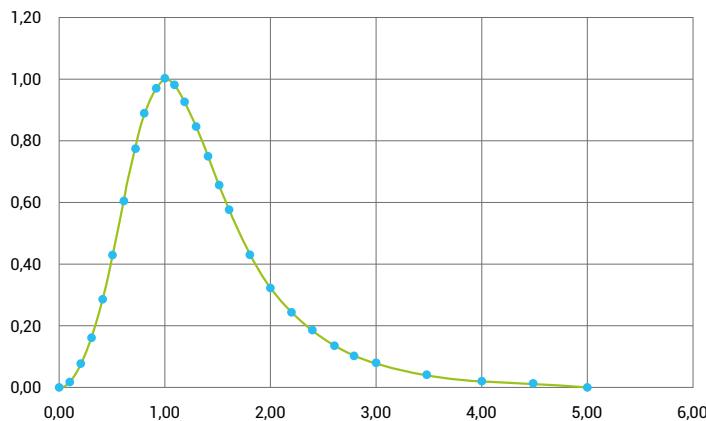


Figura 70. Hidrograma unitario adimensional del SCS

Ejemplo:

Con los datos de qp y tp del ejercicio anterior primero obtener el Hidrograma Adimensional del SCS.

[Índice](#)

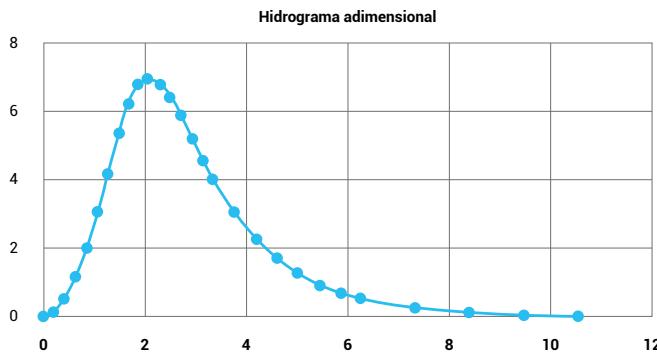
$$tp = 2.11 \text{ horas}$$

$$qp = 6.9057 \text{ m}^3/\text{s/mm}$$

Tabla 45. Cálculo de HU sintético del ejemplo

| t/tp | q qp | t | Q |
|------|-------|-------|-----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.1 | 0.015 | 0.211 | 0.1035855 |
| 0.2 | 0.075 | 0.422 | 0.5179275 |
| 0.3 | 0.16 | 0.633 | 1.104912 |
| 0.4 | 0.28 | 0.844 | 1.933596 |
| 0.5 | 0.43 | 1.055 | 2.969451 |
| 0.6 | 0.6 | 1.266 | 4.14342 |
| 0.7 | 0.77 | 1.477 | 5.317389 |
| 0.8 | 0.89 | 1.688 | 6.146073 |
| 0.9 | 0.97 | 1.899 | 6.698529 |
| 1 | 1 | 2.11 | 6.9057 |
| 1.1 | 0.98 | 2.321 | 6.767586 |
| 1.2 | 0.92 | 2.532 | 6.353244 |
| 1.3 | 0.84 | 2.743 | 5.800788 |
| 1.4 | 0.75 | 2.954 | 5.179275 |
| 1.5 | 0.65 | 3.165 | 4.488705 |
| 1.6 | 0.57 | 3.376 | 3.936249 |
| 1.8 | 0.43 | 3.798 | 2.969451 |
| 2 | 0.32 | 4.22 | 2.209824 |
| 2.2 | 0.24 | 4.642 | 1.657368 |
| 2.4 | 0.18 | 5.064 | 1.243026 |
| 2.6 | 0.13 | 5.486 | 0.897741 |
| 2.8 | 0.098 | 5.908 | 0.6767586 |
| 3 | 0.075 | 6.33 | 0.5179275 |
| 3.5 | 0.036 | 7.385 | 0.2486052 |
| 4 | 0.018 | 8.44 | 0.1243026 |
| 4.5 | 0.009 | 9.495 | 0.0621513 |
| 5 | 0.004 | 10.55 | 0.0276228 |

[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)



¡Felicitaciones! Ha concluido con el estudio de la unidad 7 y la revisión del componente de hidrología. Ahora le invito a revisar las actividades recomendadas.



Actividades de aprendizaje recomendadas

Como una estrategia de aprendizaje, se ha establecido la elaboración del formulario y hojas de cálculo, que viene muy bien con asignaturas como esta, en la que se tiene un fuerte componente de matemática y estadística aplicados a la hidrología.

El estudio permanente de los temas que se ha preparado para cada semana, es lo que le llevará a culminar con éxito la asignatura. Por tanto, la recomendación para la presente semana es estudiar los subtemas de la unidad del 7.5 al 7.7. Como verá, los contenidos los tiene preparados en una secuencia ordenada y no tiene que recurrir a un texto, sin embargo, hay lecturas con las que puede reforzar sus conocimientos y le servirán para dar atención a las actividades calificadas.

Para culminar con el estudio de la semana, les animo a desarrollar la autoevaluación.



Autoevaluación 7

1. Conteste con verdadero o falso, según corresponda: el hidrograma unitario adimensional del SCS relaciona el caudal Q con el caudal pico qp .
 - a. () Verdadero.
 - b. () Falso.
2. Conteste con verdadero o falso, según corresponda: el método de Ven T. Chow es aplicable a cuencas urbanas con áreas menores a 25 Km^2
 - a. () Verdadero.
 - b. () Falso.
3. Conteste con verdadero o falso, según corresponda: para la confección de un hidrograma unitario no se requiere de hidrogramas previos.
 - a. () Verdadero.
 - b. () Falso.
4. Señale la respuesta correcta: la precipitación efectiva es aquella que:
 - a. Se obtiene del hietograma del evento de precipitación.
 - b. Es aquella que obtiene graficando en un plano, el caudal en función del tiempo.
 - c. La que resulta de separar caudal o flujo base del hidrograma.
 - d. Ninguna de las anteriores.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

5. Conteste con verdadero o falso, según corresponda: la hipótesis de la linealidad o proporcionalidad sobre la cual se basa la construcción de los hidrogramas unitarios nos dice que las ordenadas de todos los hidrogramas de escurrimiento directo con el mismo tiempo base, son inversamente proporcionales al volumen total de escurrimiento directo.

- a. () Verdadero.
- b. () Falso.

6. Enumere al menos 3 de los parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento.

- a. _____
- b. _____
- c. _____

7. Complete el siguiente concepto:

El tiempo que _____ el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de _____, se denomina tiempo _____, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más _____ hasta la salida de la cuenca.

8. Señale la respuesta correcta al que corresponda el siguiente fundamento: es el intervalo del tiempo comprendido entre los instantes que corresponden, al centro de gravedad del hietograma de la tormenta, y al centro de gravedad del hidrograma.

- a. Tiempo de concentración.
- b. Tiempo de pico.
- c. Tiempo de retraso.
- d. Ninguno de los anteriores.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

9. Señale la respuesta correcta. la idea detrás del método racional es:
- Que si una lluvia con intensidad I empieza en forma instantánea y continua en forma indefinida, la tasa de escorrentía continuará hasta que se llegue el tiempo de concentración t_c .
 - Que si una lluvia con intensidad I empieza en forma creciente y continua en forma indefinida, la tasa de escorrentía continuará hasta que se llegue el tiempo de concentración t_c .
 - Que si una lluvia con intensidad I empieza en forma instantánea y continua en forma definida la tasa de escorrentía continuará hasta que se llegue al tiempo de concentración t_c .
 - Ninguna de las anteriores.
10. Señale la respuesta correcta. El tiempo de concentración t_c depende de la longitud a recorrer el agua hasta la salida de la cuenca y de las pendientes del terreno y cauces.
- () Verdadero.
 - () Falso.

[Ir al solucionario](#)

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Resultado de aprendizaje 2

Comprende los conceptos básicos de meteorología, para su aplicación en la interpretación de fenómenos peligrosos.

Contenidos, recursos y actividades de aprendizaje



Semana 15



Unidad 8. Meteorología y clima

Para la última semana de estudio, se ha preparado el tema de meteorología, que como ya se ha mencionado, la hidrología está íntimamente ligada a esta ciencia. Ya dimos algunos conceptos como la clasificación del tipo de precipitación, ahora corresponde realizar una revisión de los subtemas preparados, con la finalidad de vincular los fenómenos meteorológicos como la lluvia, escurrimiento a las definiciones de meteorología y sus efectos en el clima, así como conocer los conceptos y principios de los fenómenos meteorológicos.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Durante esta semana estudiaremos los subtemas:

8.1. Características

8.2. Movimiento atmosférico

8.3. Fenómenos meteorológicos



Actividades de aprendizaje recomendadas

Para una mejor comprensión del tema de esta semana, se le recomienda realizar la lectura del texto de meteorología y clima que podrá encontrar en la web.



Actividades finales del bimestre



Semana 16

En esta semana usted rendirá su segunda evaluación presencial, donde pondrá de manifiesto todos los conocimientos adquiridos durante el bimestre. Le recomendamos terminar con su preparación y considerar los lineamientos institucionales para presentarse a las

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

evaluaciones, de tal manera que no tenga ningún contratiempo; de igual forma, no olvide llevar todo el material necesario para poder realizar cálculos y gráficos. Es importante hacerle conocer que si bien es cierto usted ha desarrollado varias hojas de cálculo, para acelerar y entender las metodologías de cálculo, en la evaluación no podrá utilizar calculadoras programables ni computadores, por lo que deberá llevar su calculadora básica, su formulario y tablas.

Actividad:

- Repase y analice la Unidad VI, VII y VIII de su texto guía.
- Revise el material complementario, ejercicios resueltos y actividades desarrolladas por usted.
- Organice su material de trabajo (formularios, tablas, nomogramas).
- Preséntese a rendir sus evaluaciones presenciales acorde al horario establecido por la UTPL.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

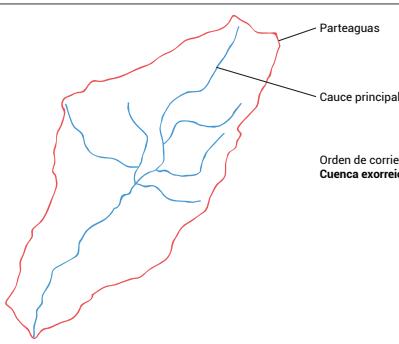


4. Solucionario

| Autoevaluación 1 | |
|------------------|---|
| Pregunta | Respuesta |
| 1 | Falso. Involucra muchas variables |
| 2 | Falso |
| 3 | Verdadero |
| 4 | Falso |
| 5 | Falso |
| 6 | Verdadero |
| 7 | Perrault |
| 8 | a |
| 9 | c |
| 10 | El ciclo hidrológico es la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y revaporación”. |

Ir a la
autoevaluación

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

| Autoevaluación 2 | |
|------------------|--|
| Pregunta | Respuesta |
| 1 | Falso |
| 2 | Falso |
| 3 | Falso |
| 4 | Falso |
| 5 | Falso |
| 6 |  <p>Parteaguas Cauce principal Orden de corrientes según Horton 3 Cuenca exorreica</p> |
| 7 | Es la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de un círculo de área igual al de la cuenca. En cualquier caso, el coeficiente será mayor que la unidad. |
| 8 | Permite caracterizar el relieve utilizando información tomada de la curva hipsométrica. Las variables que intervienen son la H_5 = cota sobre la que está el 5% de la superficie de la cuenca m , H_{95} = cota sobre la que está el 95% de la superficie de la cuenca m . L = lado mayor del rectángulo equivalente m . |
| 9 | Igual Kc |
| 10 | c |

[Ir a la autoevaluación](#)

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

| Autoevaluación 3 | |
|------------------|--|
| Pregunta | Respuesta |
| 1 | a |
| 2 | d |
| 3 | c |
| 4 | El método idóneo para el cálculo de precipitación media es el método geométrico. (F) El chequeo de homogeneidad de estaciones se debe realizar previamente al relleno de datos. (V) El cálculo de precipitación media por el método de polígonos de Thiessen es idóneo para regiones de sierra o presencia de elevaciones. (F) |
| 5 | c |
| 6 | d |
| 7 | Para el método de los polígonos de Thiessen, se une mediante líneas las estaciones que se encuentran en el área de influencia de la cuenca en análisis formando polígonos de cuatro lados. (F) El método de la distancia inversa al cuadrado, es aplicable en cuencas con superficie mayor a las 50 km ² (F) |
| 8 | La precipitación media de una cuenca es la altura <u>de la lámina que se formaría sobre la superficie de una cuenca a consecuencia de las lluvias en ella registradas</u> y su unidad de medida es en milímetros. |
| 9 | d (se define de acuerdo a los requerimientos, puede ser diaria, mensual, anual, plurianual, etc.). |
| 10 | V |

[Ir a la autoevaluación](#)

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

| Autoevaluación 4 | |
|------------------|-----------|
| Pregunta | Respuesta |
| 1 | a |
| 2 | b |
| 3 | c |
| 4 | c |
| 5 | a |
| 6 | b |
| 7 | c |
| 8 | c |
| 9 | d |
| 10 | b |

Ir a la
autoevaluación

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

| Autoevaluación 5 | |
|------------------|---|
| Pregunta | Respuesta |
| 1 | c |
| 2 | b |
| 3 | c |
| 4 | b |
| 5 | d (Se requieren conocer el hietograma y el hidrograma) |
| 6 | c |
| 7 | b |
| 8 | c |
| 9 | b |
| 10 | b (Este valor de 100 es para el agua, no para superficies impermeables) |

Ir a la
autoevaluación

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

| Autoevaluación 6 | |
|------------------|--|
| Pregunta | Respuesta |
| 1 | a con 2 b con 3 c von 1 |
| 2 | b |
| 3 | a. (F) b. (V) c. (V) d. (F) |
| 4 | Un hidrograma es la representación gráfica que relaciona el caudal con el tiempo. El gasto que pasa de manera continua durante todo un año por una determinada sección transversal de un río y se grafican los valores obtenidos Vs el tiempo, se denomina hidrograma anual. |
| 5 | a. Punto de levantamiento A b. Pico B c. Punto de inflexión C d. Final del escurrimiento directo D e. Tiempo de pico t_p f. Tiempo de base t_b g. Rama ascendente h. Rama descendente. |
| 6 | a |
| 7 | c |
| 8 | b |
| 9 | b |
| 10 | c |

[Ir a la autoevaluación](#)

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

| Autoevaluación 7 | |
|------------------|---|
| Pregunta | Respuesta |
| 1 | a |
| 2 | a |
| 3 | b |
| 4 | b |
| 5 | d |
| 6 | b |
| 7 | Área de la cuenca Altura total de precipitación Características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.) |
| 8 | El tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio se denomina tiempo de concentración, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca. |
| 9 | c |
| 10 | a |

Ir a la
autoevaluación



5. Referencias bibliográficas

Aparicio, F. J. (1997). *Fundamentos de Hidrología de superficie*. México D.F, México: Limusa.

Carrera, C. (2016). Slideshare. Recuperado de: <https://www.slideshare.net/AngelArequipa/capitulo-6-hidrograma>

Castillo, M. C., & Alarcón, M. A. (1999). *Meteorología y clima* (Vol. 79). Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.

Chereque, W. (1991). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Lima: Perú.

Chow, V.T., Maidment, D.R., & Mays, L.W. (1993), *Hidrología Aplicada*: Mc Graw – Hill, Santafé de Bogotá.

Monsalve, G. (2006). *Hidrología en la Ingeniería*, Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Oñate, Fernando." Hidrología". Universidad Técnica Particular de Loja. Loja Ecuador. Abril 2015.

Villón, M. (2004). *Hidrología*. Cartago, Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica.



6. Recursos

Características y delimitación de una cuenca hidrográfica

El ciclo hidrológico, a nivel de cuenca, se lo puede esquematizar como un estímulo, constituido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento.

Entre el estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos que condicionan la relación entre uno y otro que están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización. (Aparicio, 1997).

Por sus características y según la manera que controlan los fenómenos mencionados, las cuencas se clasifican en dos tipos:

- Las que condicionan el volumen de escurrimiento.
- Las que condicionan la velocidad de respuesta.

Con base en los efectos de relación lluvia - escurrimiento, se describen las características:

El **parteaguas** es una línea imaginaria formada por la unión de los puntos de mayor nivel topográfico y que separa a la cuenca de las cuencas vecinas.

El **área de** la cuenca se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Monsalve Sáenz (2011) Designa como divisoria la línea que separa las precipitaciones que caen en hoyas inmediatamente vecinas, y que encaminan la escorrentía resultante para uno u otro sistema fluvial. Su delimitación se realiza siguiendo estrictamente una línea uniendo los puntos de máxima cota o elevación entre las hoyas, y corta el curso de agua únicamente en su punto de salida. Esto no impide que en el interior de una hoyo existan picos aislados.

Se pueden distinguir dos tipos de divisorias:

- Divisoria topográfica o superficial.

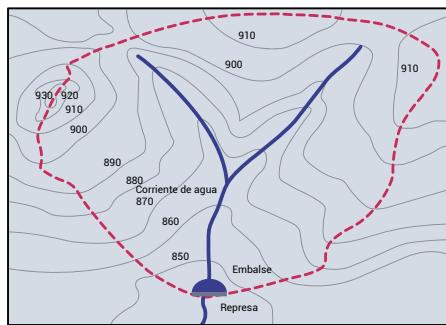


Figura 1. Parteaguas (divisoria topográfica).

Fuente: [enlace](#)

- Divisoria freática o subterránea: Establece los límites de los embalses de agua subterránea, de donde se deriva el caudal base de la hoyo.

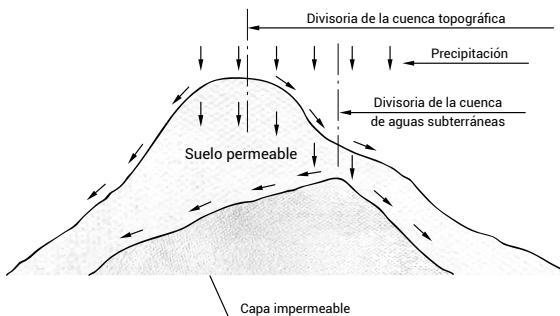


Figura 2. Divisoria superficial y divisoria subterránea

Fuente: [enlace](#)

Aunque las dos divisorias no coincidan. El área de drenaje de una hoyo se define con su divisoria topográfica.

2.3. Delimitación de una cuenca hidrográfica

Para la delimitación de una cuenca superficial. En primer lugar, se debe identificar la red de drenaje o corrientes superficiales, y se realiza un trazado general de la delimitación. En la Figura 6, se puede ver el trazado de la divisoria de la cuenca aportante a la quebrada Santa Ana.

No olvidar que la divisoria corta perpendicularmente a las curvas de nivel y pasa estrictamente por los puntos de mayor nivel topográfico.

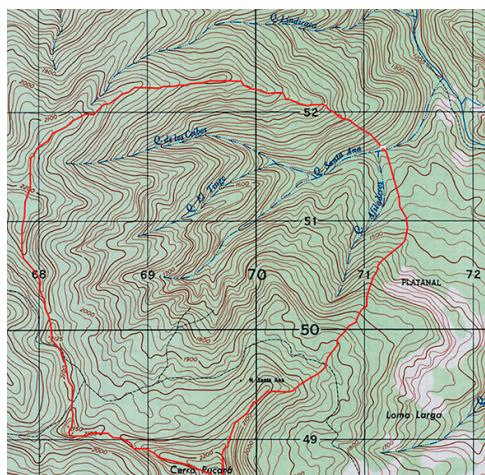


Figura 3. Divisoria superficial de la Q. Santa Ana
Fuente: elaboración propia.

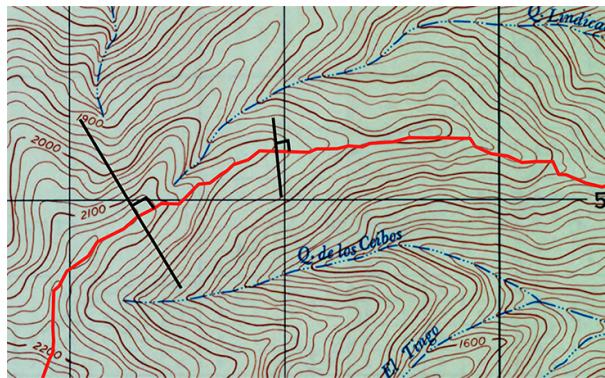


Figura 4. Trazado de divisoria de una cuenca

Fuente: elaboración propia.

Cuando la divisoria va aumentando su altitud, corta a las curvas de nivel por su parte convexa, como se observa en la Figura 8.

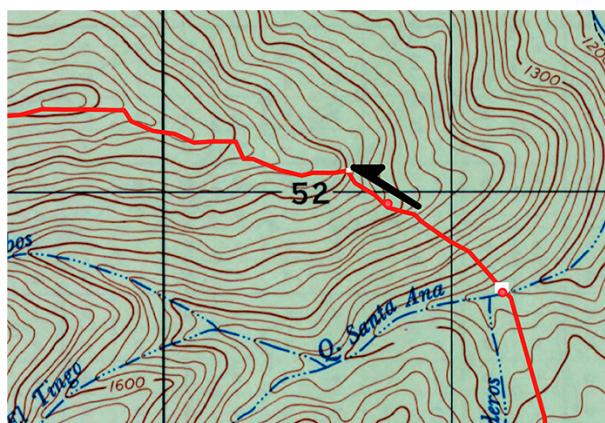


Figura 5. Trazado de divisoria -. crece altitud

Fuente: elaboración propia.

Cuando la altitud de la divisoria va decreciendo, corta a las curvas de nivel por la parte cóncava como se observa en la Figura 6.

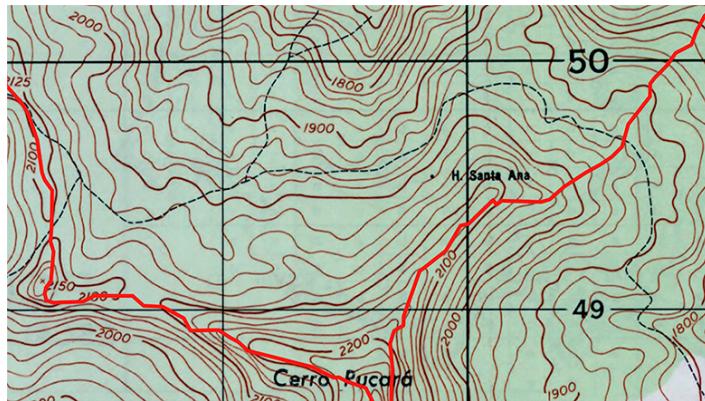


Figura 6. Trazado de divisoria - decrece altitud

Fuente: elaboración propia.

Como comprobación, la divisoria **nunca corta una quebrada o río**, sea que este haya sido graficado o no en el mapa. Excepto en el punto de interés de la cuenca (Salida).

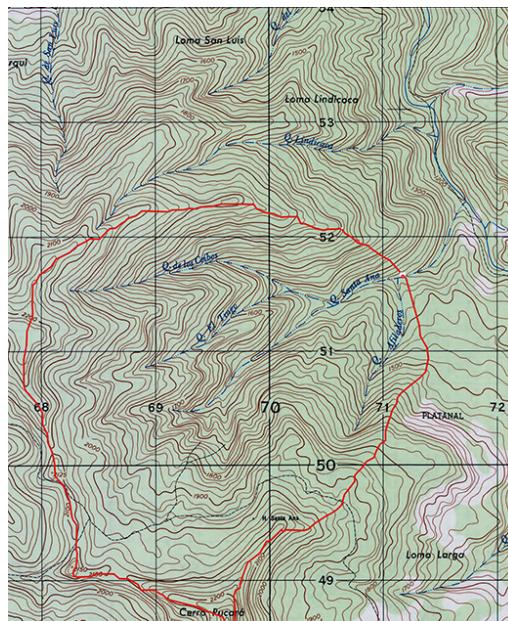


Figura 7. Divisoria de una cuenca

Fuente: elaboración propia

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

La escala utilizada para delimitar una cuenca sobre una carta topográfica está en dependencia del área de la misma y, de la disponibilidad de información, en el Ecuador, el Instituto geográfico Militar posee las cartas topográficas es escala 1: 50000. Más como se ha mencionado, depende la información que se posea (escala).

Toda línea divisoria de una cuenca hidrográfica se desplaza o grafica entre las curvas de nivel uniendo las cotas más altas.

Recuerde que la línea divisoria establece sus límites a través de los puntos más altos del borde de la cuenca, es decir la divisoria debe unir los puntos exteriores con mayores valores de altitud.

Se define como corriente principal *de una cuenca a aquella que pasa por la salida de la misma*, y donde todas las otras corrientes convergen en diferentes puntos, a estas corrientes, se les denomina corrientes tributarias; toda cuenca tiene una y sólo una corriente principal.

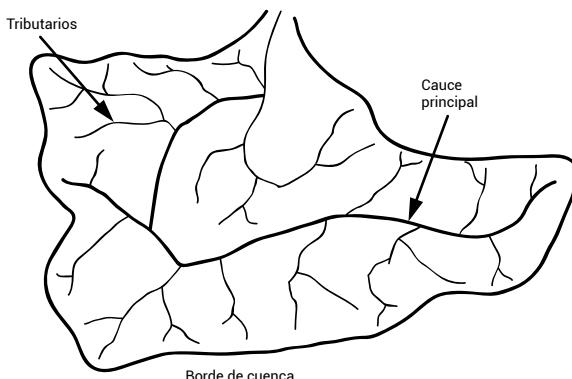


Figura 8. Cauce principal de una cuenca

Fuente: [enlace](#)

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

[Ir al contenido](#)

Las cuencas correspondientes a las corrientes tributarias a los puntos de salida se llaman **cuencas tributarias o subcuencas**.

Entre más corrientes tributarias tenga una cuenca, es decir, entre mayor sea el grado de bifurcación de su sistema de drenaje, más rápida será su respuesta a la precipitación.

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos



The background features a dark blue circular pattern with light blue dashed concentric circles and small white dots. The UTPL logo is in the top left corner. A yellow horizontal bar at the bottom contains the text "Tipos de precipitación". In the bottom right corner is a yellow square with the text "soy+ utpl".



Tipos de precipitación

a. Según el mecanismo que origina el ascenso de la masa húmeda

Los procesos que se dan hacia el interior de la masa de aire comienzan con la disminución de la presión interna producida por la reducción de la presión atmosférica; con ello, la masa se expande desgastando energía térmica, provocando una disminución de la temperatura en estas condiciones el vapor se satura, se condensa, y si las condiciones meteorológicas son adecuadas, se precipita ya sea en forma líquida o sólida de acuerdo al mecanismo de que ocasione el ascenso de la masa de aire se pueden distinguir 3 tipos de precipitación:





Según el mecanismo que origina el ascenso de la masa húmeda



• Precipitación convectiva

- por el ascenso del aire, que al estar Originada en contacto con el suelo se expande, se hace mas ligero y asciende, produciendo corrientes verticales (convección).
- Las precipitaciones que tienen este origen se caracterizan por ser cortas e intensas.

soy+ utpl

Primer bimestre

Segundo bimestre

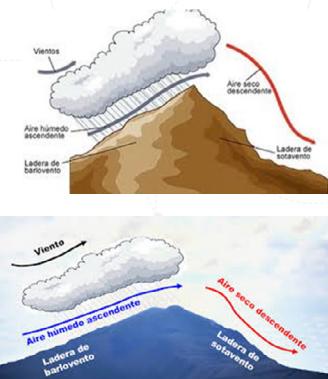
Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos



Según el mecanismo que origina el ascenso de la masa húmeda



• Precipitación orográfica

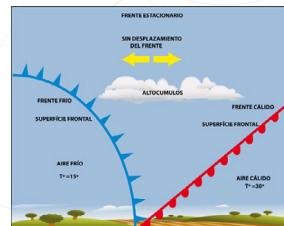
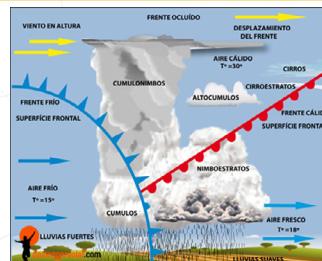
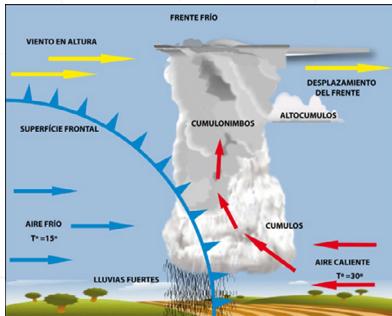
- El enfriamiento se produce cuando la masa de aire es movimiento se encuentra con una barrera topográfica, y es obligada a ascender siguiendo los accidentes del terreno; si estos son muy empinados, se presenta el efecto combinado de orografía y turbulencia. Las precipitaciones se presentan en la vertiente en la cual la masa del aire pega contra la montaña, por el otro lado el aire desciende relativamente seco.

soy+ utpl



Precipitación por convergencia

- **Convergencia:** Es el caso de 2 masas de aire que viaja en direcciones contrarias y se encuentran a un mismo nivel y el choque hace que ambas se eleven.
- **Frentes:** Se producen cuando una masa de aire en movimiento se encuentra con otra de diferente temperatura.
- **Ciclón:** Masa de aire de baja presión que gira en el sentido contrario de las manecillas del reloj en el hemisferio norte y en horario en el sur, el centro del ciclón (ojo) funciona como una chimenea y hace subir el aire de las capas inferiores.





b. Por la forma en que cae

Lluvia: Precipitación atmosférica de gotas de agua en estado líquido con un diámetro igual o mayor del medio milímetro, caen con el aire en calma a una velocidad superior a 3 m/s.

Llovizna: Precipitación análoga a la lluvia pero con gotas de diámetro menor a medio mm. Nacen de estratos bajos, a veces tanto que constituyen niebla, si cae más de un milímetro/h ya se considera lluvia.



Tipos de precipitación



Chubascos, aquaceros: Son precipitaciones de agua líquida o sólida que comienzan y acaban bruscamente varían violentamente de intensidad.



Nieve: Precipitación formada por agrupaciones cristalinas de hielo.

Rocío: Gotas de agua debidas a la condensación directa del vapor de agua contenido en el aire adyacente a superficies enfriadas por radiación nocturna.



Escarcha: Cristales diminutos de hielo en forma de escamas y agujas que se forman por la condensación del vapor que pasa directamente al estado sólido sobre superficies muy frías durante la noche.

Granizo: Precipitación de granos de hielo translucido, en general esféricos, están formados por granizo blando envuelto por una capa de hielo.

[Ir al contenido](#)

[Índice](#)

[Primer bimestre](#)

[Segundo bimestre](#)

[Solucionario](#)

[Referencias bibliográficas](#)

[Recursos](#)

Análisis de tormentas, definición e importancia

4.1. Definición e importancia

Se puede definir a una tormenta a una o más lluvias ocurridas en determinado periodo de tiempo y que obedecen a una misma perturbación meteorológica, con características bien definidas, que puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aún días, puede abarcar extensiones de terreno muy variables.

El análisis de tormentas está relacionado con los cálculos, al diseño de obras de ingeniería hidráulica, esto es para estudios de drenaje, determinación de caudales máximos, que deben encausarse, para obras de protección, conservación de suelos, de apoyo en sistemas de alerta temprana para prevención de inundaciones.

4.2. Elementos fundamentales

Las tormentas se definen en base a su Intensidad, Duración y Frecuencia (I-D-F.). Por tanto, definimos:

4.2.1. Intensidad

Es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo, se expresa en $[mm/h]$ y su valor varía durante una tormenta.

4.2.2. Duración

Es el tiempo transcurrido entre el comienzo y el fin de la tormenta. Se mide en minutos o en horas. Se debe distinguir los conceptos de:

- **Intervalo de duración:** Que es el tiempo transcurrido entre dos cambios de intensidad (pendiente) dentro de una tormenta.

- **Periodo de duración:** Es un periodo de tiempo determinado adoptado dentro del total que dura la tormenta. Por lo general se habla de periodos de 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240, 360 minutos.

4.2.3. Frecuencia

Es el número de veces que se repite una tormenta de intensidad y duración definida en un periodo de tiempo más, o menos largo, tomado en años.

La intensidad y duración de una tormenta se realiza con base en el análisis del pluviograma de ella, en cambio la frecuencia requiere del análisis de una serie de tormentas en una estación dada.

4.3. Análisis de tormentas

El análisis de las tormentas se realiza en base al análisis de los registros de los **pluviógrafos**, Figura 36, ya que estos, al monitorear la tormenta continua, permiten la identificación y análisis de las tempestades. El **pluviógrafo** es un instrumento registrador de la lámina de precipitación, que permite analizar la variación de la intensidad de precipitación.



Figura 1. Pluviógrafo

Recuperado de: [enlace](#)

Esta dispuesto de una escala horizontal, que se recomienda fijar cada 24 h, por ejemplo: de 07h:00 a 07h:00 del día siguiente. La escala vertical que mide las alturas de lámina de precipitación, hincado en la parte inferior con 0mm -10mm en la parte superior. El registro se realiza en líneas que pueden ser inclinadas cuando hay lluvias o, verticales cuando el trazador alcanza un nivel máximo, por lo que el aparato se desplaza verticalmente hacia abajo, para alcanzar el límite y posteriormente continuar el registro y horizontales cuando no hay lluvias.

El inicio y fin de la tormenta se identifican por estar precedidos y seguidos respectivamente, de periodos considerables de tiempo sin lluvias. Sin embargo, no es raro que a lo largo de las tormentas se produzcan cortos períodos de tiempo sin lluvias, pues mientras continúa la perturbación meteorológica lo que sucede en ella pertenece al mismo fenómeno.

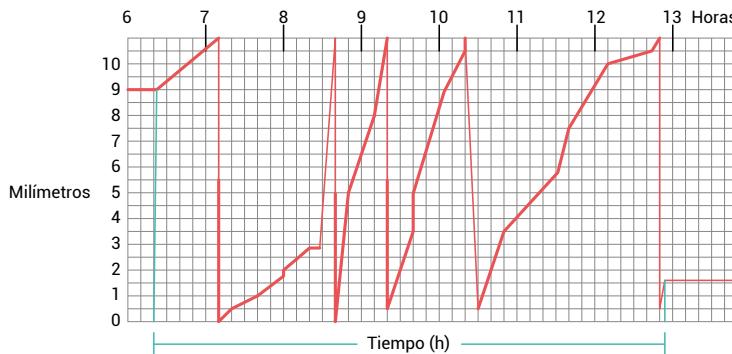


Figura 2. Pluviograma

Adaptado de: [enlace](#)

La interpretación del pluviograma tiene el propósito de analizar o llegar a establecer intensidades máximas de una tormenta para cada uno de los períodos de duración seleccionados. Para ellos se deben ubicar los puntos de cambio de pendiente y los trazos por ellos delimitados, los que se caracterizan por el intervalo de duración, la cantidad de lluvia caída y la intensidad del tramo:

- Intervalo de duración: $\Delta t = t_2 - t_1$
- Cantidad de lluvia: $\Delta P = P_2 - P_1$
- Intensidad del tramo: $I = \Delta P / \Delta t$

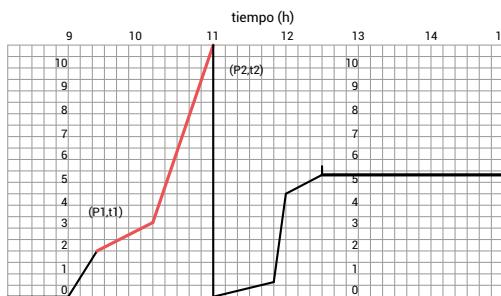


Figura 3. Interpretación de cambio de pendiente (intensidad) en el pluviograma.

Adaptado de: [enlace](#)

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Como se puede observar en la figura 38 durante el registro de la tormenta se presenta cambios de pendiente que nos indican el cambio de intensidad dentro de la misma tormenta.

4.4. Análisis de intensidad

El objetivo de analizar la intensidad de una tormenta es el de obtener las intensidades máximas para diversos períodos de duración, teniendo como base la información obtenida del pluviograma correspondiente.

En una faja pluviográfica se observa que la pendiente varía constantemente en el tiempo, siendo necesario identificar las diferentes variaciones de intensidad durante la tormenta para su cálculo, dividiéndose de esta manera la curva en tramos. La intensidad viene dada por la relación entre la precipitación y el tiempo en que esta se presentó. Puede utilizarse la expresión:

$$I = \frac{dP}{dt} \quad (22)$$

Donde:

I – Intensidad (mm/h)

dP – Variación de la altura de precipitación (mm)

dT – Variación de tiempo (h)

De la expresión se concluye que la *Intensidad* es la pendiente a la curva del pluviograma.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

4.4.1. Intensidades máximas para diferentes períodos de duración

Las diferentes intensidades que se presentan en una tormenta, tienen intervalos de duración variados, lo que imposibilita un análisis comparativo entre varias tormentas, por eso es necesario determinar las intensidades para períodos estándar de duración, siendo los más comunes 5, 10, 20, 30, 60, 120, 240, 360 minutos.

La obtención de intensidades máximas se basa en que, para cada período de duración, se realice todas las combinaciones **posibles consecutivas**, adoptándose como punto de partida para el cálculo la **intensidad máxima de la tormenta**.

Se ha observado que a mayor período de duración dt menor intensidad y viceversa, considerando eso si el mismo dP .

El análisis de tormentas se hace a través de los siguientes pasos:

Paso 1. Partiendo del pluviograma, es decir del registro del Pluviógrafo, se observa los cambios de pendiente (intensidad) en el gráfico.

Paso 2. Se hace la siguiente tabulación: a partir del pluviograma.

| Hora | Intervalo de tiempo (min) | Lluvia parcial (mm) | Intensidad (mm/h) |
|-------|---------------------------|---------------------|-------------------|
| 11.00 | | | |
| 12.00 | 60 | 0.5 | 0.5 |
| 12.50 | 50 | 8.5 | 10.2 |
| 14.00 | 70 | 10.0 | 8.6 |
| 16.20 | 140 | 4.5 | 1.9 |

Hora: Se anotan las horas en que cambia la intensidad.

Intervalo de tiempo. Es el intervalo entre las horas de la primera columna.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Lluvia parcial: es la lluvia caída en cada intervalo de tiempo. Se saca por diferencia.

Intensidad. Es la precipitación referida a 1 hora (60 minutos), para **cada intervalo de tiempo**. Se obtiene mediante una regla de tres simple: Ejemplo:

$$\frac{8.5}{50} = \frac{x}{60} \quad x = \frac{8.5 * 60}{50} = 10.2 \text{ mm/h}$$

Paso 3. Se dibuja el gráfico Intensidad – Tiempo, que recibe el nombre de histograma de precipitación o hietograma.

El **hietograma** (del griego *hietos*, lluvia) es un gráfico que expresa precipitación en función del tiempo. Permite apreciar más objetivamente como varía la intensidad durante la tormenta. Se confecciona en base a los criterios de estadística, graficándose en ordenadas las intensidades y en abscisas el tiempo en el que sucedieron.

A partir de este gráfico se puede establecer la hora en la que la tormenta adquirió su máxima intensidad, su valor y el tiempo en el que se mantuvo.

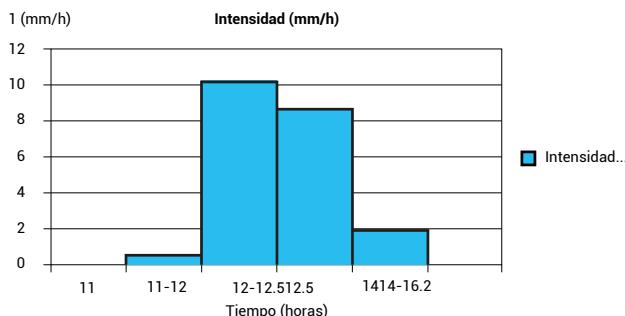


Figura 4. Hietograma.

Diagrama de masas

Es la representación gráfica de la cantidad acumulada de agua caída en el eje de las ordenadas y, en las abscisas se representa el tiempo que corresponda. En este diagrama la pendiente a la curva en cualquier punto representa la intensidad instantánea de la lluvia considerada.

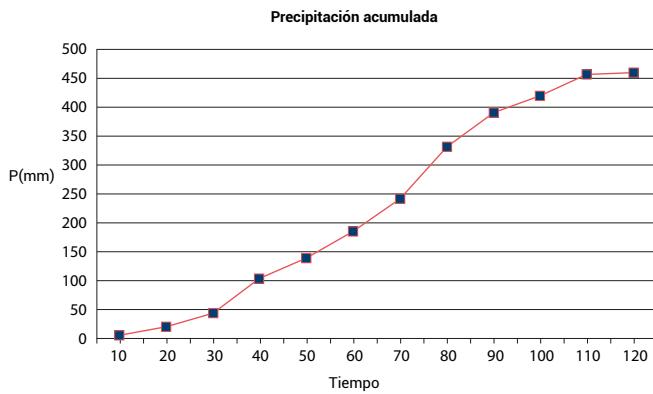
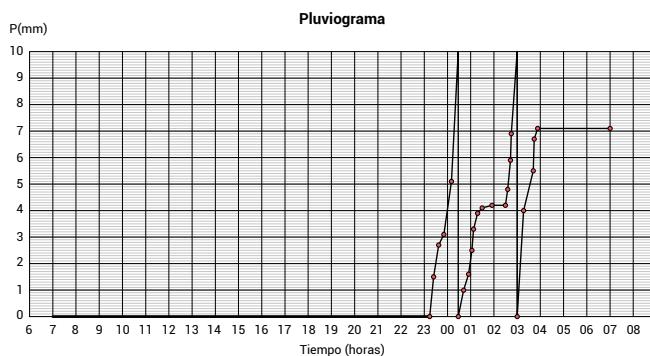


Figura 5. Ejemplo de gráfica de diagrama de masas.

EJEMPLO

Los datos a continuación, han sido extraídos de la faja pluviográfica que se muestra, los datos de altura de precipitación (mm) y tiempo en el que se ha sucedido una tormenta se detallan en la tabla.

Determinar su hietograma, curva de masa y las intensidades máximas para los diferentes períodos de duración de 5, 10, 20, 30, 60, 120 min.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

| Hora | Intervalo de tiempo (min) | Lluvia parcial (mm) |
|---------------|---------------------------|---------------------|
| 7:00 - 23:16 | 976 | 0.0 |
| 23:16 - 23:25 | 9 | 1.5 |
| 23:25- 23:38 | 13 | 1.2 |
| 23:38- 23:52 | 14 | 0.4 |
| 23:52-0:11 | 19 | 2.0 |
| 0:11- 0:30 | 19 | 5.0 |
| 0:30 -0:43 | 13 | 1.0 |
| 0:43-0:55 | 12 | 0.6 |
| 0:55- 1:04 | 9 | 0.9 |
| 1:04- 1:08 | 4 | 0.8 |
| 1:08- 1:18 | 10 | 0.6 |
| 1:18- 1:32 | 14 | 0.2 |
| 1:32- 1:57 | 25 | 0,1 |
| 1:57- 2:31 | 34 | 0.0 |
| 2:31 - 2:37 | 6 | 0.6 |
| 2:37 - 2:44 | 7 | 1.1 |
| 2:44 - 2:47 | 3 | 1.0 |
| 2:47 - 3:05 | 18 | 3.2 |
| 3:05 - 3:30 | 25 | 4.0 |
| 3:30- 3:43 | 13 | 1.5 |
| 3:43 -3:46 | 3 | 1.2 |
| 3:46 - 3:54 | 8 | 0.4 |
| 3:54- 7:00 | 186 | 0.0 |

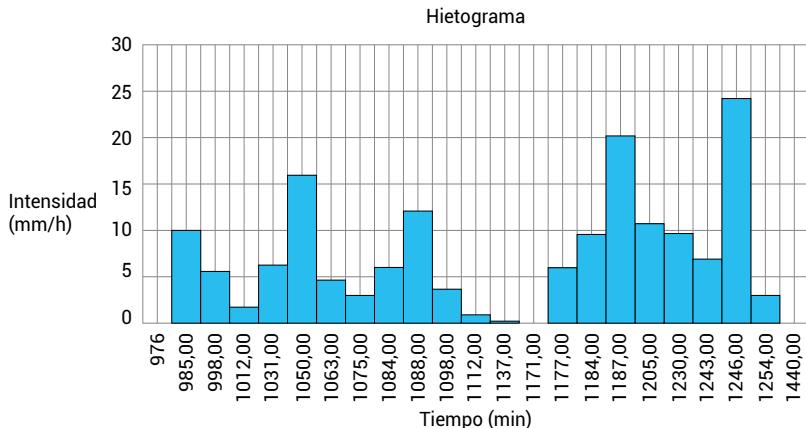
[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Calculamos las columnas de tiempo acumulado (min), precipitación acumulada (mm) e Intensidad en mm/h.

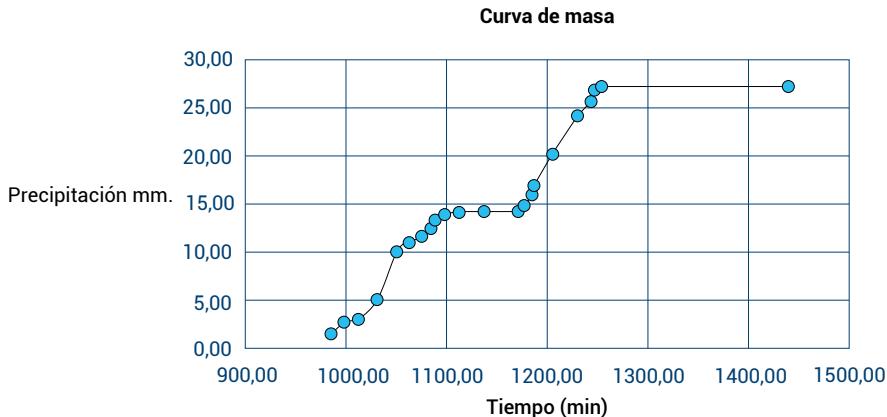
| Hora | Intervalo de tiempo (min) | Lluvia parcial (mm) | Tiempo acumulado (min) | Precipitación acumulada (mm) | Intensidad (mm/h) |
|---------------|---------------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|-------------------|
| 7:00- 23:16 | 976 | 0.0 | 976.00 | 0.00 | - |
| 23:16 - 23:25 | 9 | 1.5 | 985.00 | 1.50 | 10.00 |
| 23:25- 23:38 | 13 | 1.2 | 998.00 | 2.70 | 5.54 |
| 23:28- 23:52 | 14 | 0.4 | 1012.00 | 3.10 | 1.71 |
| 23:52-0:11 | 19 | 2.0 | 1031.00 | 5.10 | 6.32 |
| 0:11- 0:30 | 19 | 5.0 | 1050.00 | 10.10 | 15.79 |
| 0:30 -0:43 | 13 | 1.0 | 1063.00 | 11.10 | 4.62 |
| 0:43-0:55 | 12 | 0.6 | 1075.00 | 11.70 | 3.00 |
| 0:55- 1:04 | 9 | 0.9 | 1084.00 | 12.60 | 6.00 |
| 1:04 -1:08 | 4 | 0.8 | 1088.00 | 13.40 | 12.00 |
| 1:08- 1:18 | 10 | 0.6 | 1098.00 | 14.00 | 3.60 |
| 1:18- 1:32 | 14 | 0.2 | 1112.00 | 14.20 | 0.86 |
| 1:32- 1:57 | 25 | 0,1 | 1137.00 | 14.30 | 0.24 |
| 1:57- 2:31 | 34 | 0.0 | 1171.00 | 14.30 | 0.00 |
| 2:31 - 2:37 | 6 | 0.6 | 1177.00 | 14.90 | 6.00 |
| 2:37 - 2:44 | 7 | 1.1 | 1184.00 | 16.00 | 9.43 |
| 2:44 - 2:47 | 3 | 1.0 | 1187.00 | 17.00 | 20.00 |
| 2:47 - 3:05 | 18 | 3.2 | 1205.00 | 20.20 | 10.67 |
| 3:05 - 3:30 | 25 | 4.0 | 1230.00 | 24.20 | 9.60 |
| 3:30- 3:43 | 13 | 1.5 | 1243.00 | 25.70 | 6.92 |
| 3:43 -3:46 | 3 | 1.2 | 1246.00 | 26.90 | 24.00 |
| 3:46 - 3:54 | 8 | 0.4 | 1254.00 | 27.30 | 3.00 |
| 3:54- 7:00 | 186 | 0.0 | 1440.00 | 27.30 | 0.00 |



Su hietograma quedará así:



Curva de masa



Para el análisis de intensidades máximas, vemos que la intensidad máxima es de 24 mm/h con una duración de 3 minutos, es decir que para los minutos 1, 2 y 3 la intensidad es máxima, por tanto, es necesario completar para los 5 minutos a partir de 24 mm/h que tenemos en 3 minutos. Procedemos a realizar varios tanteos y de estos se elige el más alto, teniendo en consideración que se procede con el máximo y las intensidades adyacentes.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

$$I_5 = \frac{3}{5} \times 24 + \frac{2}{5} \times 6.92 = 17.20$$

$$I_5 = \frac{3}{5} \times 24 + \frac{2}{5} \times 3 = 15.6$$

$$I_{10} = \frac{3}{10} \times 24 + \frac{7}{10} \times 6.92 = 12.04$$

$$I_{10} = \frac{3}{10} \times 24 + \frac{7}{10} \times 3 = 9.3$$

$$I_{20} = \frac{3}{20} \times 24 + \frac{13}{20} \times 6.92 + \frac{4}{20} \times 9.60 = 10.02$$

$$I_{20} = \frac{3}{20} \times 24 + \frac{8}{20} \times 3.0 + \frac{9}{20} \times 0 = 4.80$$

$$I_{30} = \frac{3}{30} \times 24 + \frac{13}{30} \times 6.92 + \frac{14}{30} \times 9.60 = 9.88$$

$$I_{60} = \frac{3}{60} \times 24 + \frac{13}{60} \times 3.0 + \frac{18}{60} \times 10.67 + \frac{3}{60} \times 20 + \frac{7}{60} \times 9.43 + \frac{6}{60} \times 6 + \frac{10}{60} \times 0 = 8.60$$

Analizamos otra posible combinación con $I_{\max} = 20 \text{ mm/h}$

$$I_{20} = \frac{3}{20} \times 20 + \frac{17}{20} \times 10.67 = 12.07$$

$$I_{30} = \frac{3}{30} \times 20 + \frac{18}{30} \times 10.67 + \frac{9}{30} \times 9.60 = 11.28$$

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Las Intensidades máximas quedan como se muestra en el cuadro.

| Periodo de duración (min) | Intensidad máxima (mm/h) |
|---------------------------|--------------------------|
| 5.00 | 17.20 |
| 10.00 | 13.47 |
| 20.00 | 12.07 |
| 30.00 | 11.28 |
| 60.00 | 10.23 |
| 120.00 | 6.30 |

[Ir al contenido](#)

Abstracciones y Número de la curva

Todos los métodos antes mencionados, requieren que la cuenca esté aforada, es decir, que se hayan medido gastos de salida al mismo tiempo que las precipitaciones. Dado que la mayor parte de las cuencas del país no están aforadas, con mucha frecuencia no se cuenta con estos datos, por lo que es necesario tener métodos con los que se pueda estimar la altura de lluvia efectiva a partir de la total y las características de la cuenca.

El cálculo del caudal que produce un cauce principal en una cuenca sin aforar puede ser obtenido mediante la estimación de la cantidad de agua que penetra la superficie (*fenómeno de abstracción*) o la cantidad de líquido que se llega a escurrir ante la presencia de un evento lluvioso.

El Soil Conservation Service (SCS), en 1972, desarrolló un procedimiento para obtener la llamada precipitación efectiva P_e o la lámina de precipitación que produce escorrentía superficial directa. Este método es muy empleado para determinar las tormentas de diseño cuando se estudian caudales máximos.

El SCS desarrolló el método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa ,que siempre es menor o igual a la profundidad de precipitación P . De manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual a alguna retención potencial S .

Existe una cierta cantidad de precipitación I_o (Abstracción inicial antes del encarcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía, luego la escorrentía potencial $P-I_o$. La hipótesis del método del SCS consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales. (Chow, 1994), es decir.

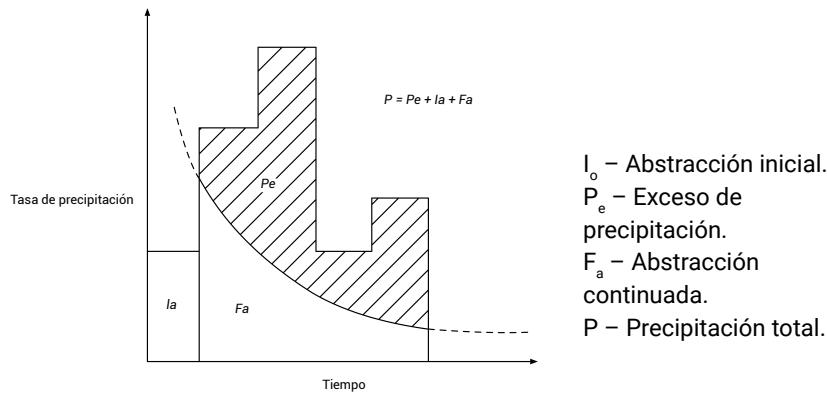
[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Figura 1. Variables del método de abstracciones del SCS.

Fuente: Chow, Maidment, Mays (1993). *Hidrología Aplicada*

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_o} \quad (61)$$

Del principio de continuidad:

$$P = P_e + I_o + F_a$$

$$P_e = \frac{(P - I_o)^2}{P - I_o + S} \quad (62)$$

Ecuación básica para el cálculo de la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta utilizando el método de la SCS.

Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, se desarrolló una relación empírica.

Entonces:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (63)$$

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

En este método, la profundidad de escorrentía o precipitación efectiva P_e está en función de la precipitación total P y de un parámetro de abstracción referido al número de curva o CN , cuyos valores fluctúan entre 1 y 100, para superficies impermeables del agua $CN= 100$; para superficies naturales $CN<100$.

En la figura 61 puede verse los diferentes valores de CN para diferentes valores de P (pulgadas)

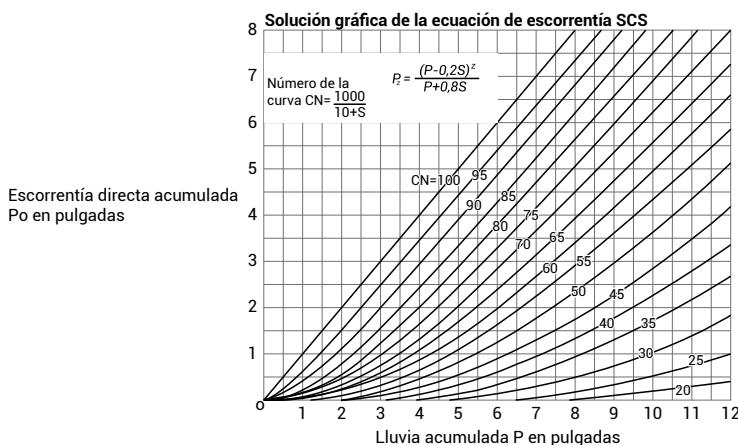


Figura 2. Solución de las ecuaciones de escorrentía del SCS.

Adaptado de: Chow, Maidment, Mays (1993, p152)

Las curvas mostradas relacionan la lluvia P con la lluvia efectiva P_e , las mismas que se expresan algebraicamente mediante la ecuación, deducida de la ecuación básica expuesta anteriormente.

$$P_e = \frac{\left[P - \frac{508}{CN} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad (64)$$

5.9.1. Factores para determinar el número de la curva

El número de curva [CN] depende de ciertas propiedades productoras de escorrentía tales como:

- Utilización y tratamiento del suelo
 - Tipo de suelo hidrológico
 - Condiciones de la superficie del terreno
 - Condición de humedad antecedente del suelo.
- **Tipo de cobertura del suelo**

El SCS determina grandes grupos de suelo de acuerdo al uso u ocupación, así: agrícola, pastizal, forestal y urbano, adaptados a las áreas estudiadas en Estados Unidos, y que en ocasiones presentan dificultades de ajuste a otros ámbitos o a otros territorios.

Los métodos para determinar la cobertura del suelo pueden ser varios, entre los más comunes están: Reconocimiento en campo, fotografías aéreas y mapas de uso del suelo.

- **Condición hidrológica**

Este parámetro indica los efectos del tipo de cubierta y de su tratamiento sobre la infiltración y la escorrentía. Generalmente es estimada a través de la densidad de la planta que cubre el suelo o de los residuos acumulados sobre él.

La condición hidrológica indica el grado de cobertura del terreno que por lo general es:

- Cobertura < 50% mala
- Cobertura entre 50 y 75 regular
- Cobertura > 75% buena.

▪ Clasificación del grupo hidrológico del suelo

Se define al grupo hidrológico al conjunto de suelos que se pueden agrupar en una misma categoría por poseer una capacidad similar de producir escorrentía, bajo ciertas condiciones de precipitación y de cobertura vegetal. (Fernández, 2006).

El método desarrollado por el SCS, clasifica a los suelos en cuatro grupos que se los definen a continuación.

Grupo A: Tiene bajo potencial de escurrimiento cuando está completamente mojada. Estos suelos suelen tener menos del 10 por ciento de arcilla y más del 90 por ciento de arena o grava y tienen texturas de grava o arena. Incluye las arenas profundas **muy permeables** y los agregados limosos procedentes de las deposiciones.

Grupo B: Tienen potencial de escurrimiento moderadamente bajo cuanto se encuentra totalmente saturado. Estos suelos suelen tener entre un 10% y 20% de arcilla y arena, 50% a 90% de arena arcillosa o texturas franco arenosas. Incluye suelos arenosos y franco-limosos de moderada profundidad y con tasas de infiltración mínimas por encima de la media, comprendidas entre 3,81 mm/h a 7,62 mm/h (**permeable**).

Grupo C: Los suelos de este grupo tienen potencial de escurrimiento moderadamente alto cuando está completamente mojado. Estos suelos suelen tener entre un 20% y 40% de arcilla y menos del 50% de arena y tienen texturas franco limosa, franco arcillo arenoso, franco arcilloso, limoso y arcilloso. Incluye suelos poco profundos de todas las clases texturales; con tasas mínimas de infiltración por debajo de la media, comprendidas entre 1,27 mm/h a 3,81 mm/h (Martínez, 2009) (**Impenetrable**).

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Grupo D: Los suelos de este grupo tienen un potencial alto de escurrimiento cuando está completamente mojada. Estos suelos tienen más del 40% de arcilla, menos del 50% de arena, y tienen texturas arcillosas. Incluye suelos con altas tasas de expansión en la superficie o en la subsuperficie; presentan tasas de infiltración mínimas, aproximadamente de 1,27 mm/h (muy impermeable) (Martínez, 2009)

En la tabla 1 se resume la correspondiente textura y los grupos hidrológicos del suelo.

Tabla 1. *Grupo hidrológico del suelo*

| Grupo Hidrológico | Textura del suelo |
|-------------------|--|
| A | Arenosa Arenoso- franca Franco - arenosa |
| B | Franca Franco - arenosa |
| C | Franco – arcillo - arenosa |
| D | Franco- arcillosa Franco – arcillo- limosa Arcillo –arenosa Arcillo – limosa Arcillosa |

Nota: Oñate (2015)

- Condición de humedad antecedente del suelo**

La determinación de la AMC es, al día de hoy, una de las más complejas, pues no hay un criterio fijo y fiable; lo único que se puede decir es que la condición II representa la situación media y típica de un suelo, mientras que las condiciones I y III representarían aquellas en las que, para una misma tormenta, la cuenca sería capaz de producir menos o más escorrentía, respectivamente, que en las condiciones medias (Monsalve G.).

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Entonces la Humedad antecedente relacionada con la cantidad de lluvia caída en la cuenca durante 5 días precedentes () .

- AMC I para suelos secos $l_{l_5} < 2,5 \text{ cm}$.
- AMC II para suelos intermedios $2,5 < l_{l_5} < 5 \text{ cm}$.
- AMC III para suelos húmedos, $l_{l_5} > 5 \text{ cm}$.

Para condiciones secas (AMC I) o condiciones húmedas (AMC III), los números de la curva equivalentes pueden ajustarse utilizando las expresiones:

$$CNI = \frac{4.2 CNII}{10 - 0.058CNII} \quad (65)$$

$$CNIII = \frac{23 CNII}{10 + 0.13CNII} \quad (66)$$

En la tabla 13 se presentan los valores de CN para diferentes condiciones de humedad antecedente y en la tabla N.^o 14 se pueden observar los diferentes usos de la tierra y la cobertura, relacionada con la pendiente y proporciona los valores de CN de cada grupo hidrológico. Estos valores son para una condición media, es decir $CNII$.

[Índice](#)[Primer bimestre](#)[Segundo bimestre](#)[Solucionario](#)[Referencias bibliográficas](#)[Recursos](#)

Tabla 2. Valores de CN para diferentes condiciones de humedad antecedente.

| CN AMC II | CN AMCI | CN AMC III |
|-----------|---------|------------|
| 100 | 100 | 100 |
| 95 | 87 | 98 |
| 90 | 78 | 96 |
| 85 | 70 | 94 |
| 80 | 63 | 91 |
| 75 | 57 | 88 |
| 70 | 51 | 85 |
| 65 | 45 | 82 |
| 60 | 40 | 78 |
| 55 | 35 | 74 |
| 50 | 31 | 70 |
| 45 | 26 | 65 |
| 40 | 22 | 60 |
| 35 | 18 | 55 |
| 30 | 15 | 50 |

Nota: Oñate (2015)

Tabla 3. Valores para selección de CN

| Uso de la tierra y cobertura | Tratamiento del suelo | Pendiente del terreno | Tipo de suelo | | | |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|----|----|----|
| | | | A | B | C | D |
| Sin cultivo | Surcos rectos | - | 77 | 86 | 91 | 94 |
| Cultivos en surco | Surcos rectos | >1 | 72 | 81 | 88 | 91 |
| | Surcos rectos | <1 | 67 | 78 | 85 | 89 |
| | Contorneo | >1 | 70 | 79 | 84 | 88 |
| | Contorneo | <1 | 65 | 75 | 82 | 86 |
| | Terrazas | >1 | 66 | 74 | 80 | 82 |
| | Terrazas | <1 | 62 | 71 | 78 | 81 |
| | | | | | | |
| Cereales | Surcos rectos | >1 | 65 | 76 | 84 | 88 |
| | Surcos rectos | <1 | 63 | 75 | 83 | 87 |
| | Contorneo | >1 | 63 | 74 | 82 | 85 |

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

| Uso de la tierra y cobertura | Tratamiento del suelo | Pendiente del terreno | Tipo de suelo | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|----|----|----|
| | | | A | B | C | D |
| | Contorneo | <1 | 61 | 73 | 81 | 84 |
| | Terrazas | >1 | 61 | 72 | 79 | 82 |
| | Terrazas | <1 | 59 | 70 | 78 | 81 |
| | | | | | | |
| Leguminosas o praderas con rotación | Surcos rectos | >1 | 66 | 77 | 85 | 89 |
| | Surcos rectos | <1 | 58 | 72 | 81 | 85 |
| | Contorneo | >1 | 64 | 75 | 83 | 85 |
| | Contorneo | <1 | 55 | 69 | 78 | 83 |
| | Terrazas | >1 | 63 | 73 | 80 | 83 |
| | Terrazas | <1 | 51 | 67 | 76 | 80 |
| | | | | | | |
| Pastizales | ----- | >1 | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | ----- | <1 | 39 | 61 | 74 | 80 |
| | Contorneo | >1 | 47 | 67 | 81 | 88 |
| | Contorneo | <1 | 6 | 35 | 70 | 79 |
| | | | | | | |
| Pradera permanente | ----- | <1 | 30 | 58 | 71 | 78 |
| | | | | | | |
| Bosques naturales | | | | | | |
| Muy ralo | ----- | - | 56 | 75 | 86 | 91 |
| ralo | ----- | - | 46 | 68 | 78 | 84 |
| Normal | ----- | - | 36 | 60 | 70 | 77 |
| Espeso | ----- | - | 26 | 52 | 62 | 69 |
| Muy espeso | ----- | - | 15 | 44 | 54 | 61 |
| | | | | | | |
| Caminos | | | | | | |
| De terracería | ----- | - | 72 | 82 | 87 | 89 |
| Con superficie dura | ----- | - | 74 | 84 | 90 | 92 |

Fuente: Aparicio (1997)

Tabla 4. Valores para selección de CN usos selectos de tierra agrícola

| Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, Ia= 0.2 S) | | Descripción del uso de la tierra | | | | Grupo hidrológico del suelo | | | |
|---|---|----------------------------------|----|----|----|-----------------------------|---|--|--|
| | | | | A | B | C | D | | |
| Tierra cultivada: | Sin tratamientos de conservación | 72 | 81 | 88 | 91 | | | | |
| | con tratamientos de conservación | 62 | 71 | 78 | 81 | | | | |
| Pastizales: | Condiciones pobres | 68 | 79 | 86 | 89 | | | | |
| | Condiciones óptimas | 39 | 61 | 74 | 80 | | | | |
| Vegas de ríos | Condiciones óptimas | 30 | 58 | 71 | 78 | | | | |
| Bosques: | Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas | 45 | 66 | 77 | 83 | | | | |
| | Cubierta buena ² | 25 | 55 | 70 | 77 | | | | |
| Áreas abiertas , césped, parques, campos de golf, cementerios,etc | | | | | | | | | |
| | óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o mas | 39 | 61 | 74 | 80 | | | | |
| | condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75% | 49 | 69 | 79 | 84 | | | | |
| Áreas comerciales de negocios (85% impermeables) | | 89 | 92 | 94 | 95 | | | | |
| Distritos industriales /72% impermeables) | | 81 | 88 | 91 | 93 | | | | |
| Residencial ³ | | | | | | | | | |
| Tamaño promedio del lote | Porcentaje promedio impermeable ⁴ | | | | | | | | |
| 1/8 acre o menos | 65 | 77 | 85 | 90 | 92 | | | | |
| 1/4 acre | 38 | 61 | 75 | 83 | 87 | | | | |
| 1/3 acre | 30 | 57 | 72 | 81 | 86 | | | | |
| 1/2 acre | 25 | 54 | 70 | 80 | 85 | | | | |
| 1 acre | 20 | 51 | 68 | 79 | 84 | | | | |

Índice

Primer bimestre

Segundo bimestre

Solucionario

Referencias bibliográficas

Recursos

Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2 S$)

| | | | | |
|--|----|----|----|----|
| Parqueaderos, pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵ | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Calles y carreteras | | | | |
| Pavimentadas con cunetas y alcantarillados | 98 | 98 | 98 | 98 |
| grava | 76 | 85 | 89 | 91 |
| tierra | 72 | 82 | 87 | 89 |

Nota. Recuperado de "Hidrología Aplicada", de Chow, V, 1993 p 154, Santafé de Bogotá /Colombia: Mc GRAW HILL Inc.

[Ir al contenido](#)