

Hidrología



Ing. Juan Miguel de la Torre Ostos

CIP: 67957

Guía de Estudios

SÍLABO DEL CURSO DE HIDROLOGIA

I. INFORMACIÓN GENERAL	
1.1 Facultad	Ingeniería
1.2 Carrera Profesional	Ingeniería Civil
1.3 Departamento	
1.4 Requisito	Hidráulica de Canales y Tuberías + Probabilidad y Estadística
1.5 Periodo Lectivo	2016
1.6 Ciclo de Estudios	10
1.7 Inicio – Término	
1.8 Extensión Horaria	06 horas semanales
1.9 Créditos	3

II. SUMILLA

El curso contribuye para que el estudiante desarrolle y utilice las bases teóricas y prácticas para modelar y predecir el comportamiento hidrológico de una cuenca, basándose en sus características geomorfológicas y muestras hidro-meteorológicas, orientado a la predicción de eventos y la explotación racional de una cuenca. El curso es de naturaleza teórico práctico. Los principales temas son: El sistema cuenca, Precipitación, Escurrimiento superficial, Evaporación y transpiración, Infiltración, Hidrología estadística y Almacenamiento y tránsito de embalses.

III. LOGRO DEL CURSO

Al finalizar el curso, el estudiante elabora un proyecto aplicativo, aplicando parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas, balance hidrológico y la estadística hidrológica, con criterio técnico y calidad.

Obras de Defensa Ribereña (Gaviones)



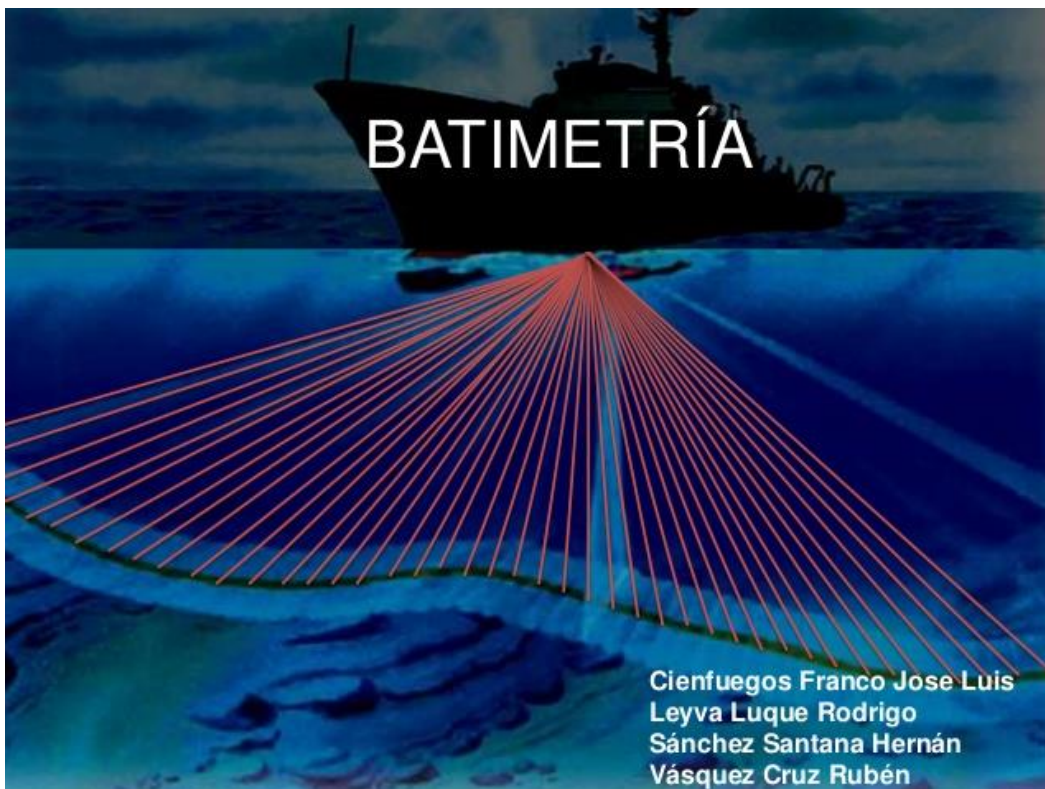
Obras de Defensa Ribereña (Enrocados)



Trabajos de Encauzamiento y Descolmatación de cauce de ríos



Batimetría



Obras de Dragado



Reservorios y Represas



IV. CONTENIDO DEL CURSO

Unidad I: El Sistema Cuenca y Precipitación

Logro de Unidad Al finalizar la I unidad, el estudiante desarrolla un informe de una cuenca hidrográfica; aplicando sus conocimientos sobre sistema cuenca, que contenga la delimitación, morfometría y fisiografía para ser utilizada en el diseño de una obra civil Y desarrolla un informe, utilizando las diferentes metodologías para la determinación de la precipitación media en una cuenca de estudio, con criterios de coherencia y calidad.

Unidad II: Escurrimiento Superficial y Relación Precipitación - Escorrentía

Logro de Unidad Al finalizar la II unidad, el estudiante formula informe técnico descriptivo sobre la estimación del escurrimiento superficial, aplicado a un curso natural de agua en una cuenca hidrográfica conocida, obtiene resultados de precipitación; aplicando métodos sobre la determinación la escorrentía superficial, con criterios de coherencia, precisión y sustento técnico.

Unidad III: Evaporación y Transpiración

Logro de Unidad Al finalizar la V unidad, el estudiante desarrolla un informe sobre la determinación de la Evapotranspiración, considerando algún método estudiado, con calidad y cálculos sustentatorios.

Unidad IV: Infiltración y. Estadística Hidrológica

Logro de Unidad: Al finalizar la unidad, el estudiante realiza cálculos y estimaciones; aplicando sus conocimientos sobre la determinación de la Infiltración y su aplicación para un punto específico en la cuenca en estudio; determinando en forma aproximada con parámetros obtenidos anteriormente el balance hidrológico en su cuenca en estudio y aplicando sus conocimientos sobre el análisis de consistencia, completación y extensión, con base a algunos procedimientos estudiados

Unidad I: El Sistema Cuenca y Precipitación

Logro de Unidad Al finalizar la I unidad, el estudiante desarrolla un informe de una cuenca hidrográfica; aplicando sus conocimientos sobre sistema cuenca, que contenga la delimitación, morfometría y fisiografía para ser utilizada en el diseño de una obra civil y desarrolla un informe, utilizando las diferentes metodologías para la determinación de la precipitación media en una cuenca de estudio, con criterios de coherencia y calidad.

1.1 Definiciones:

CAPITULO 1 LA ATMOSFERA Y LA HIDROLOGIA

1.1 Generalidades

Los proyectos hidráulicos son de dos tipos: los proyectos que se refieren al uso del agua y los que se refieren a la defensa contra los daños que ocasiona el agua. Los proyectos típicos de uso del agua son los de abastecimiento de agua potable, los de irrigación y los de aprovechamiento hidroeléctrico; comprenden, además, los de navegación, recreación y otros. Los proyectos típicos de defensa son los de drenaje urbano, drenaje vial y drenaje agrícola; comprenden, además, los de encausamiento de ríos, los de defensa contra las inundaciones y otros.

En el Perú estamos bastante familiarizados con estos dos tipos de problemas que se presentan con el agua, los de utilización y los de defensa.

El estudio de nuestros recursos hidrológicos corre por cuenta del Estado, siendo su objetivo proporcionar a los ingenieros los elementos para el aprovechamiento y el control del recurso agua.

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.” (Referencia 1.1)

Aceptando esta definición, es necesario limitar la parte de la hidrología que se estudia en la ingeniería a una rama que comúnmente se llama ingeniería hidrológica o hidrología aplicada, que incluye aquellas partes del campo de la hidrología que atañen al diseño y operación de proyectos de ingeniería para el control y aprovechamiento del agua.

6.1 NOCIONES DE HIDROMETEOROLOGÍA

La *meteorología* es el estudio de todos los fenómenos atmosféricos. El estudio de los fenómenos relacionados con el agua atmosférica, que son los que interesan en la ingeniería hidrológica, se denomina *hidrometeorología*. Aun cuando está dentro de la meteorología, la hidrometeorología constituye por sí misma toda una ciencia, cuyo tratamiento ocuparía un volumen mayor que el presente, de manera que en este texto solamente es posible revisar unos cuantos conceptos básicos. A continuación se verán las definiciones y conceptos necesarios para el planteamiento de algunos modelos simples de lluvia.

LA TEMPERATURA

Es de todos conocido que la temperatura es una de las magnitudes más utilizadas para describir el estado de la atmósfera. De hecho, la información meteorológica que aparece en los medios de comunicación casi siempre incluye un apartado dedicado a las temperaturas: sabemos que la temperatura del aire varía entre el día y la noche, entre una estación y otra, y también entre una ubicación geográfica y otra. En invierno puede llegar a estar bajo los 0° C y en verano superar los 40° C.

Como toda magnitud física, la temperatura tiene asociadas unas unidades de medida, diferentes en función de la escala que elijamos:

Escala Celsius (°C): Fue propuesta en 1742 por el astrónomo Anders Celsius.

Consiste en una división regular en 100 intervalos, donde el 0 corresponde al punto de congelación del agua y el 100 al punto de ebullición del mismo. Se expresa en grados centígrados y es la que utilizamos habitualmente.

Escala Fahrenheit (°F): Fue introducida en 1714 por Gabriel D. Fahrenheit y se utiliza habitualmente en Estados Unidos. El termómetro se gradúa entre 32 °F (correspondiente a los 0°C) y 212 °F (correspondientes a los 100°C).

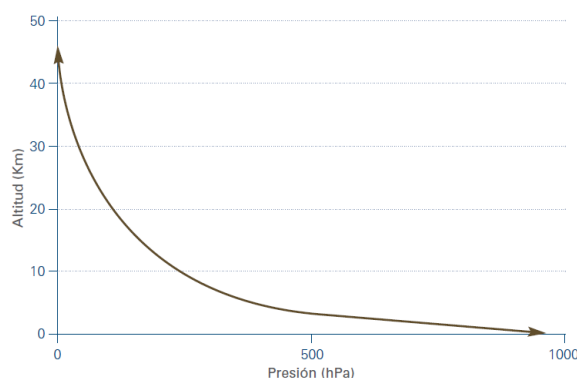
Por ejemplo, en Al Aziziyah, en Libia se han llegado a alcanzar valores de temperatura tan altos como los 58°C, mientras que en Vostok (estación investigadora rusa en la Antártida) las temperaturas han llegado a disminuir hasta los - 89°C.

LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA

El aire que nos rodea, aunque no lo notemos, pesa y, por tanto, ejerce una fuerza sobre todos los cuerpos debida a la acción de la gravedad. Esta fuerza por unidad de superficie es la denominada presión atmosférica, cuya unidad de medida en el Sistema Internacional es el Pascal (1 Pascal = 1N/m²).

La presión atmosférica depende de muchas variables, sobre todo de la altitud.

Cuanto más arriba en la atmósfera nos encontremos, la cantidad de aire por encima nuestro será menor, lo que hará que también sea menor la presión que éste ejerza sobre un cuerpo ubicado allí. El siguiente gráfico muestra



los valores promedio de la presión atmosférica en función de la altitud. En él puede apreciarse cómo la presión atmosférica desciende con la altura, mostrando un decrecimiento aproximadamente exponencial.

Existen muy diversas unidades de medida de la presión atmosférica. Las más comunes son: atmósferas, mm de mercurio, pascuales, hectopascuales y milibares. La conversión entre unas y otras puede realizarse teniendo en cuenta que: 1 atmósfera = 760 mmHg = 101300 N/m² (o Pa) = 1013 mb (o hPa).

EL VIENTO

El viento consiste en el movimiento de aire desde una zona hasta otra. Existen diversas causas que pueden provocar la existencia del viento, pero normalmente se origina cuando entre dos puntos se establece una cierta diferencia de presión o de temperatura.

¿Cómo se mide el viento?

Para poder disponer de medidas directas de velocidad y dirección del viento, los meteorólogos utilizan distintos instrumentos de medida:

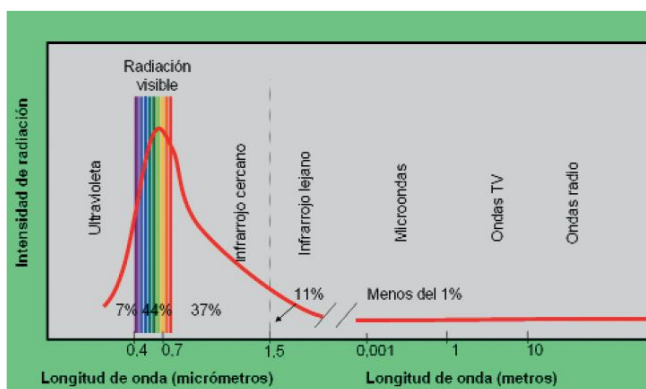
a) Medida de la velocidad horizontal del viento: el instrumento más utilizado es el anemómetro de cazoletas (figura), en el que el giro de las mismas es proporcional a la velocidad del viento. La unidad de medida es el km/h o el m/s.

b) Medida de la dirección: para ello se utilizan las veletas, que indican la procedencia geográfica del viento. Hablamos de viento norte, noreste, suroeste, etc. En función de dónde provenga éste.



LA RADIACIÓN SOLAR

La energía transferida por el Sol a la Tierra es lo que se conoce como energía radiante o radiación. Ésta viaja a través del espacio en forma de ondas que llevan asociada una determinada cantidad de energía. Según lo energéticas que sean estas ondas se clasifican en lo que se conoce como el espectro electromagnético (ver figura). Las ondas más energéticas son las correspondientes al rango del ultravioleta, seguidas por la luz visible, infrarroja y así hasta las menos energéticas que corresponden a las ondas de radio.



La cantidad de radiación solar recibida en un punto se mide mediante un aparato denominado piranómetro. Otro modo de tener una estimación de la radiación solar recibida es mediante la medición del número de horas de sol. Para ello se utiliza un instrumento llamado heliógrafo (ver figura).

LA HUMEDAD

La humedad es la cantidad de vapor de agua que contiene el aire. Esa cantidad no es constante, sino que dependerá de diversos factores, como si ha llovido recientemente, si estamos cerca del mar, si hay plantas, etc. La medida de humedad que más se utiliza es la denominada humedad relativa, que se expresa en tanto por ciento (%)

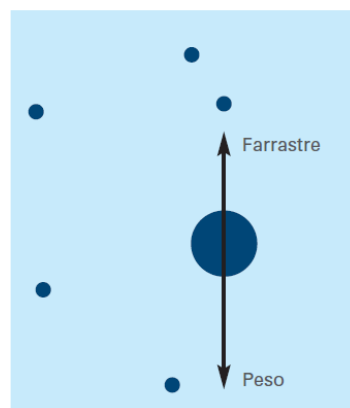
LA PRECIPITACIÓN

Una vez que se han formado las nubes, ¿qué es lo que hace que den o no lugar a la lluvia, el granizo o la nieve, es decir a algún tipo de precipitación? Las minúsculas gotitas que forman la nube y que se encuentran en suspensión dentro de ella gracias a la existencia de corrientes ascendentes, empezarán a crecer a expensas de otras gotitas que encuentran en su caída. Sobre cada gotita actúan fundamentalmente dos fuerzas: la debida al arrastre que la corriente de aire ascendente ejerce sobre ella, y el peso de la gotita. Cuando éste es suficientemente grande como para vencer la fuerza de arrastre, la gotita caerá hacia el suelo, produciendo la lluvia.

¿Cómo se mide la cantidad de precipitación caída durante un intervalo de tiempo determinado?

El instrumento que se suele utilizar para medir la precipitación caída en un lugar y durante un tiempo determinado se denomina pluviómetro.

La base de todas las observaciones reside en los instrumentos meteorológicos que se utilizan para tomar las medidas.

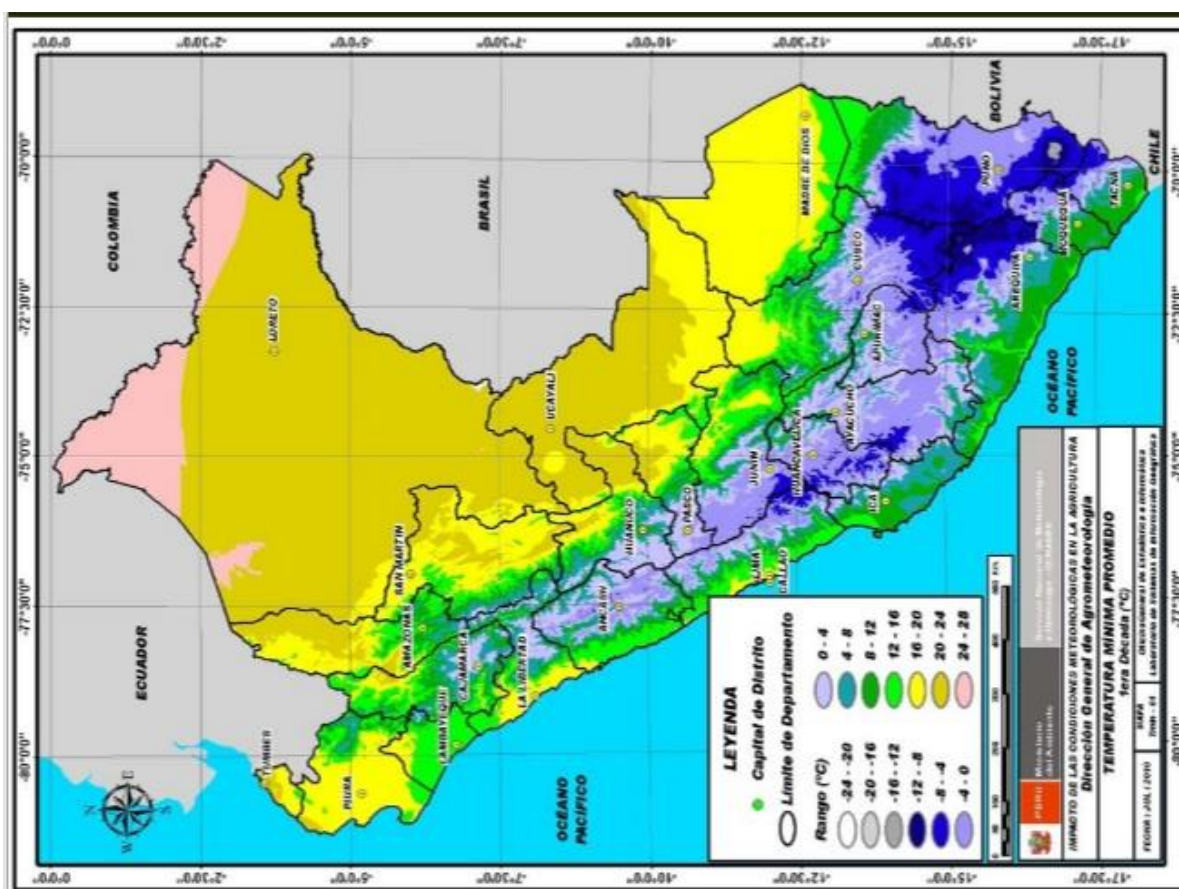
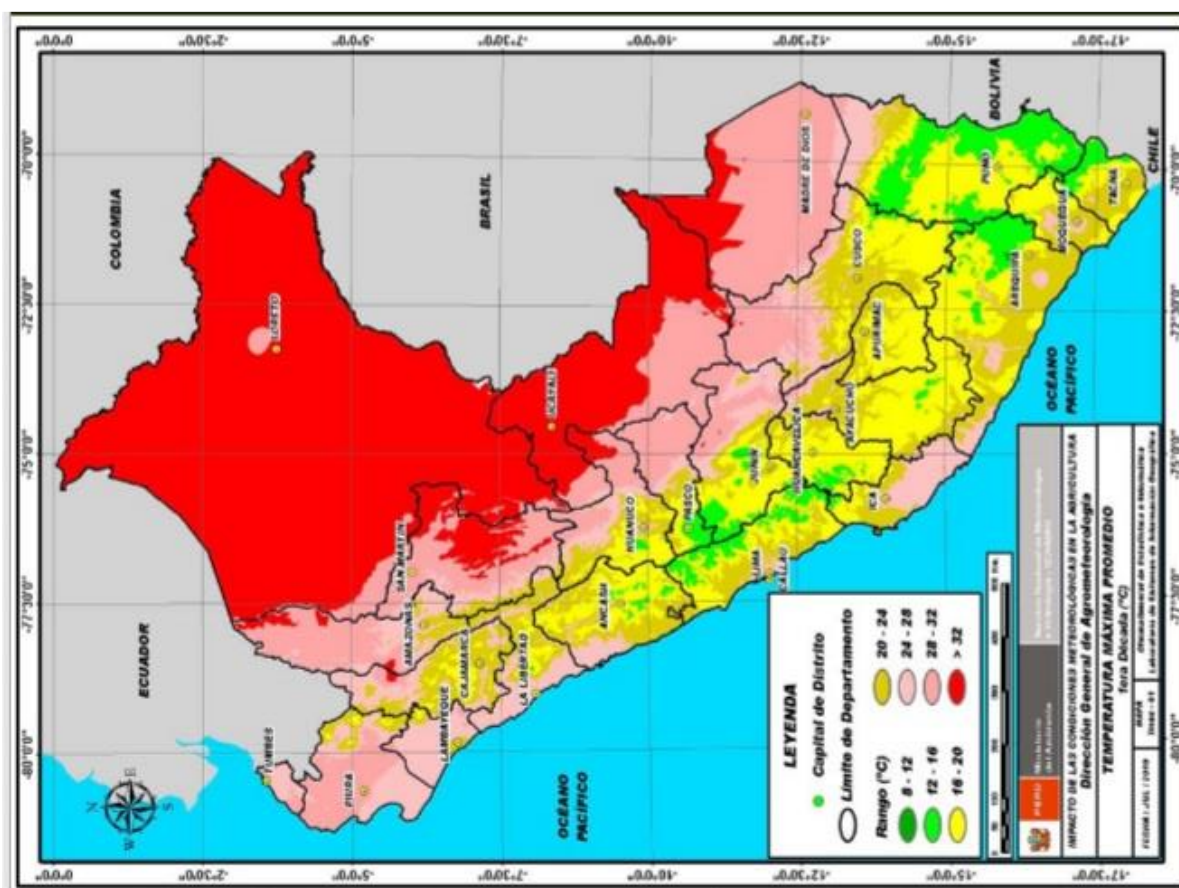


Instrumento de medida	Variable meteorológica	Unidades de medida
Termómetro	Temperatura	°C
Barómetro	Presión atmosférica	hPa
Pluviómetro	Precipitación	l/m ²
Higrómetro	Humedad relativa	%
Evaporímetro	Evaporación	mm de agua evaporada
Anemómetro	Velocidad del viento	m/s – km/h
Veleta	Dirección del viento	°
Heliógrafo	Horas de sol	h
Radiómetro	Radiación	W/m ²

LEY GENERAL DE AGUAS ESTABLECE SU USO JUSTIFICADO Y RACIONAL, INCLUYE LAS PRODUCIDAS, NEVADOS, GLACIARES, PRECIPITACIONES, ETC. DECRETO LEY N° 17752

Artículo 27°.- El orden de preferencia en el uso de las aguas es el siguiente: a) Para las necesidades primarias y abastecimientos de poblaciones; b) Para cría y explotación de animales; c) Para agricultura; d) Para usos energéticos industriales y mineros; y e) Para otros usos. El Poder Ejecutivo podrá variar el orden preferencial de los incisos c), d) y e) en atención a los siguientes criterio básicos: características de las cuencas o sistemas, disponibilidad de aguas, política hidráulica, planes de Reforma Agraria, usos de mayor interés social y público y usos de mayor interés económico.

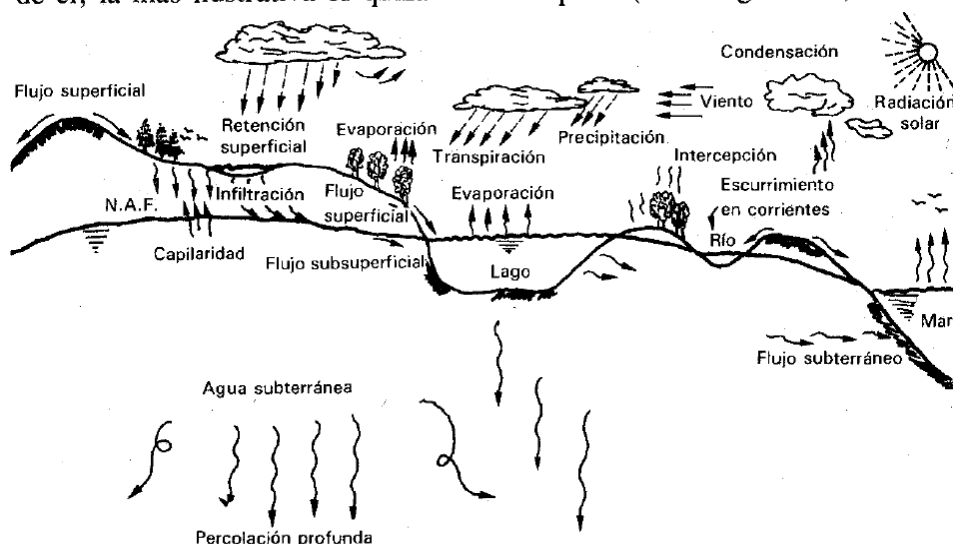
Artículo 28°.- Los usos de las aguas se otorgan mediante permiso, autorización o licencias.



1.2. El ciclo hidrológico.

1.3 EL CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico, como ya se mencionó, se considera el concepto fundamental de la hidrología. De las muchas representaciones que se pueden hacer de él, la más ilustrativa es quizás la descriptiva (véase figura 1.1).



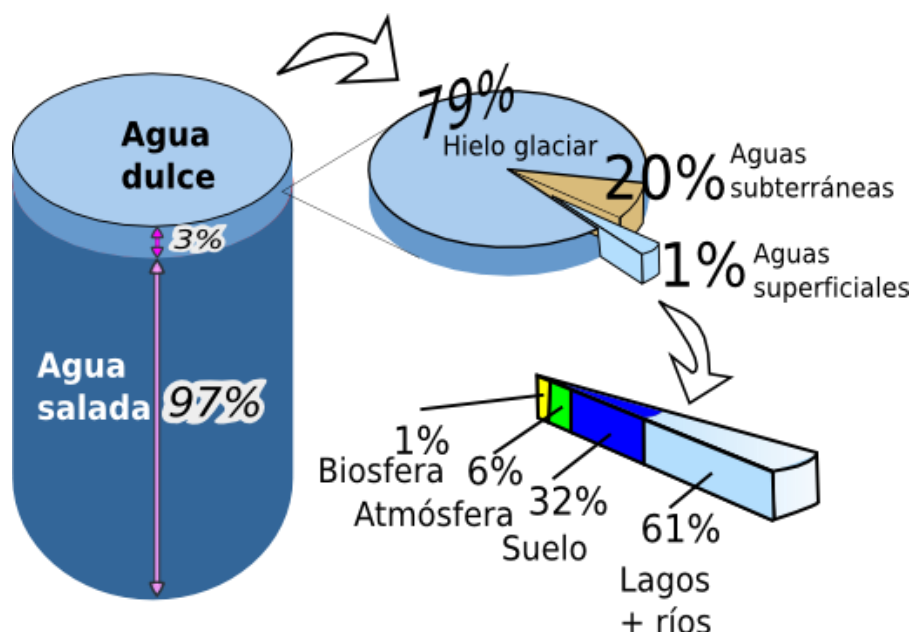
1.3. Conceptos y definiciones de cuenca hidrográfica. La cuenca como un sistema

2.1 CONCEPTO DE CUENCA

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

La definición anterior se refiere a una cuenca superficial; asociada a cada una de éstas existe también una cuenca subterránea, cuya forma en planta es semejante a la superficial. De ahí la aclaración de que la definición es válida si la superficie fuera impermeable.

Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas. En las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar (véase figura 2.1).



El agua en la Tierra supone un 71 % de la superficie terrestre, es decir: tres cuartas partes de nuestro planeta se compone de H₂O. Parece bastante, y lo es, pero el problema es su distribución y su difícil accesibilidad para ser utilizada por el ser humano.

1. En los océanos y los mares: 1370000000 km³
2. En la corteza terrestre: 60000000 km³
3. En los glaciares y nieves perpetuas: 29170000 km³
4. En los lagos: 750000 km³
5. En la humedad del suelo: 65000 km³
6. En el vapor atmosférico: 14000 km³
7. En los ríos: 1000 km³

El resto del agua se encuentra en ríos, lagos, atmósfera, etc. La siguiente tabla ilustra los diferentes tipos de agua y su distribución en el planeta:

Localización	Porcentaje de agua total	Tipo de agua
Mares y océanos	96,5 %	Salada
Casquetes y glaciares polares	1,74 %	Dulce
Agua subterránea salada	0,94 %	Salada
Agua subterránea dulce	0,76 %	Dulce
Glaciares continentales y permafrost*	0,022 %	Dulce
Lagos de agua dulce	0,007 %	Dulce
Lagos de agua salada	0,006 %	Salada
Humedad del suelo	0,001 %	Dulce
Atmósfera	0,001 %	Dulce
Embalses	0,0008 %	Dulce
Ríos	0,0002 %	Dulce
Agua biológica	0,0001 %	Dulce

* Permafrost: capa de hielo permanente en los niveles superficiales del suelo de las regiones muy frías o periglaciares

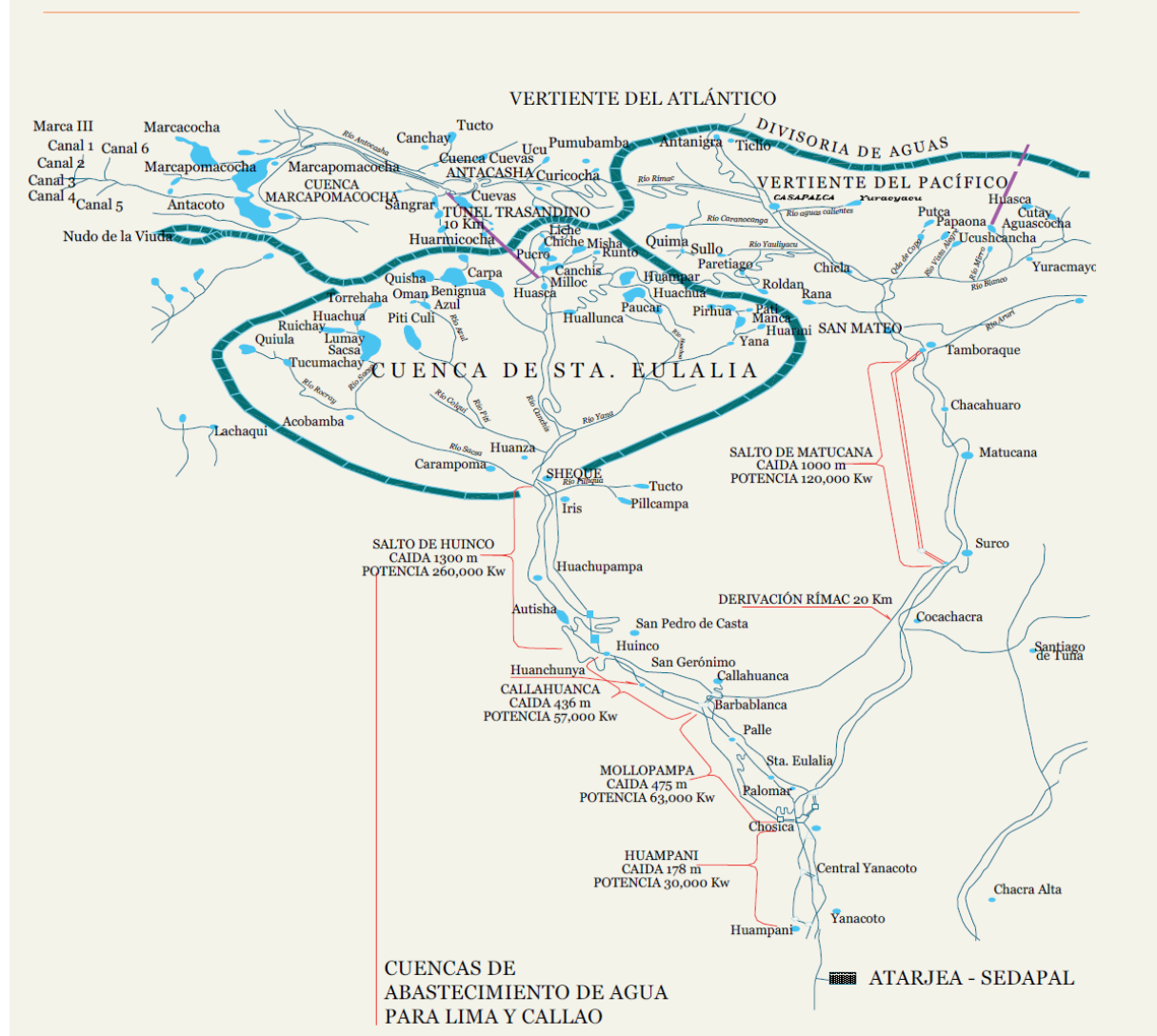
Lima, la capital del Perú, es el centro económico del país y alberga aproximadamente a la tercera parte de la población peruana. Esta ciudad está ubicada en el desierto costero en la vertiente del Pacífico, y cuenta solo con el 2.2% de los recursos hídricos del país para mantener a la población, la cual habita en uno de los ecosistemas más áridos del mundo.

Actualmente, Lima obtiene agua de los ríos Rímac, Chillón y Lurín, y de un conjunto de lagos, represas y reservorios. Debido a la escasa disponibilidad de agua que se acentuará en los próximos años, el gobierno peruano ha centrado sus esfuerzos en garantizar la futura provisión de agua mediante proyectos de transvase de agua de la vertiente del Atlántico a la del Pacífico, especialmente de ríos y lagunas de los Andes.

El Perú tiene una disponibilidad hidrológica de 62,655 m³ por habitante cada año, y se ubica en el puesto número 17 entre los países con la mayor cantidad de agua disponible per cápita por año (de 180 países). El país cuenta con un caudal promedio anual de 1,765,323 millones de m³, a partir de un total de 1,007 ríos (52 de los cuales desembocan en el Océano Pacífico) y 159 cuencas hidrográficas. Asimismo, cuenta con 12,201 lagos (la mayoría de origen glaciar) que cumplen la función de reservorios, 3,896 de los cuales están ubicados en la región hidrográfica del Pacífico, 7,441 en la región hidrográfica del Atlántico (Amazonía), 841 en la región hidrográfica del Titicaca y 23 en cuencas cerradas. De ellos, 105 de la vertiente del Pacífico y 76 de la vertiente del Atlántico tienen potencial para abastecer de agua a Lima (en total 2982.95 millones de m³).



CUENCAS ABASTECEDORAS DE AGUA E HIDROENERGÍA PARA LIMA Y CALLAO



1.4. Morfometría de la Cuenca

➤ ¿QUÉ ES LA MORFOMETRÍA DE CUENCAS?

Es el estudio cuantitativo de las características físicas de una cuenca hidrográfica, y se utiliza para analizar la red de drenaje, las pendientes y la forma de una cuenca a partir del cálculo de valores numéricos. Dentro de este contexto, es importante señalar que las mediciones deben ser realizadas sobre un mapa con suficiente información hidrográfica y topográfica.

La Morfometría de Cuencas resulta de gran utilidad ya que permite el estudio de la semejanza de los flujos de diferentes tamaños (Ruiz, 2001) con el propósito de aplicar los resultados de los modelos elaborados en pequeña escala a prototipos de gran escala (Chow *et al.*, 1994).

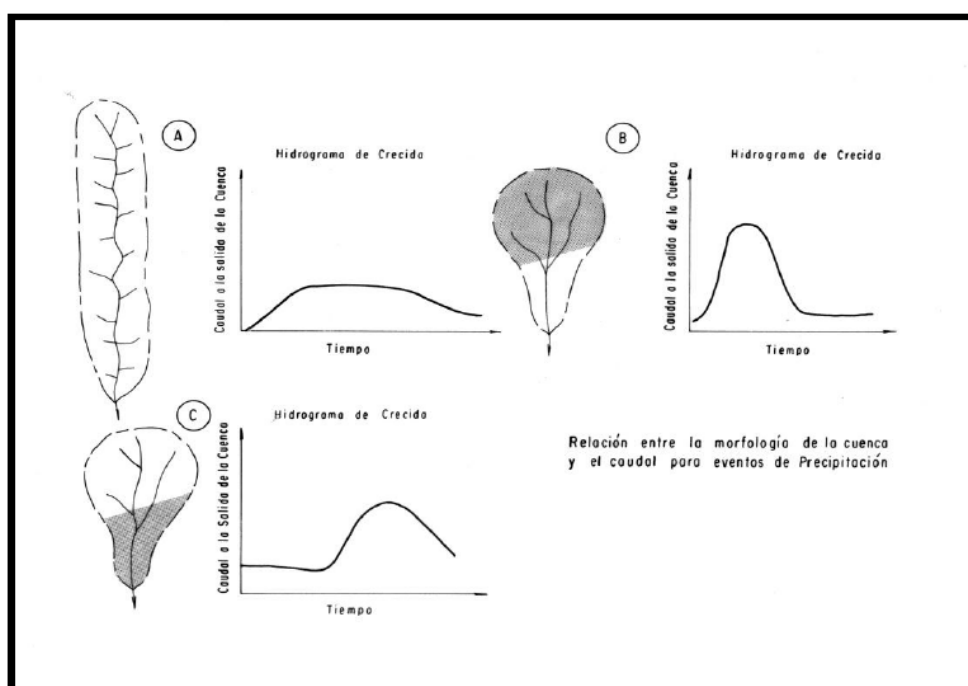


Figura 1. Relación entre la forma de algunas cuencas y el caudal pico para eventos máximos de precipitación.

¿Cómo influye la forma de cuenca en la esorrentía?

En líneas generales, las cuencas más ensanchadas poseen mayor susceptibilidad a generar crecidas, ya que el tiempo de recorrido del agua a través de la cuenca es mucho más corto que en cuencas alargadas, en otras palabras las cuencas ensanchadas tendrían menor tiempo de concentración y por ende mayor rapidez para la concentración de los flujos de aguas superficiales, generando mayor violencia en sus crecidas. Caso contrario ocurre con las cuencas alargadas donde el tiempo de viaje del agua es mucho más largo, contribuyendo a que los picos de crecidas sean menos súbitos en caso de lluvias concentradas o tormentas.

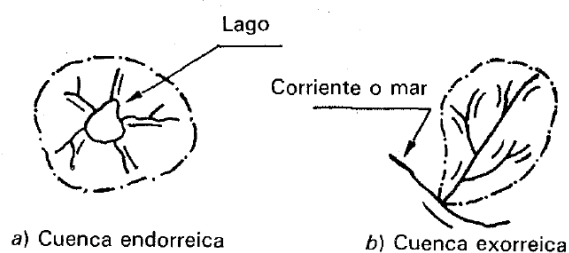


Figura 2.1 Tipos de cuencas.

Partes de una cuenca hidrográfica



1.5. Características de la Cuenca

A continuación se describen las características de la cuenca y los cauces de mayor importancia por sus efectos en la relación precipitación-escorrentía.

El *parteaguas* es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas (véase figura 2.2).

El *área de la cuenca* se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas (véase figura 2.2).

La *corriente principal* de una cuenca es la corriente que pasa por la salida de la misma. Nótese que esta definición se aplica solamente a las cuencas exorreicas. Las demás corrientes de una cuenca de este tipo se denominan corrientes tributarias. Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y sólo una corriente principal. Las cuencas

correspondientes a las corrientes tributarias o a los puntos de salida se llaman cuencas tributarias o subcuencas.

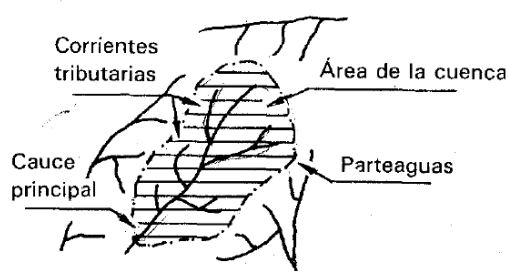
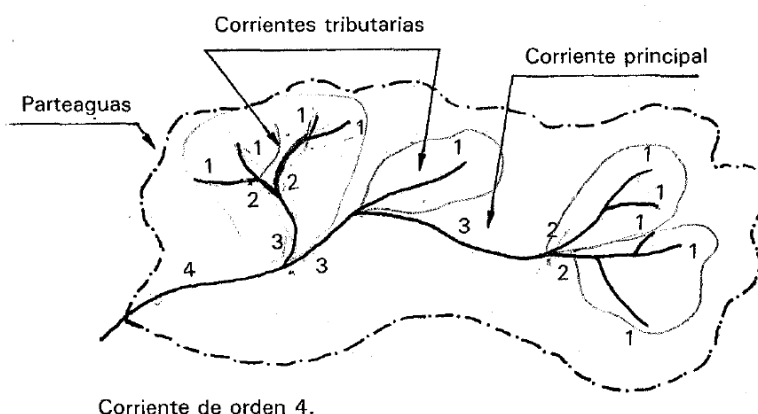


Figura 2.2



El *orden de corrientes* (referencia 2.1) se determina como se muestra en la figura 2.3. Una corriente de orden 1 es un tributario sin ramificaciones, una de orden 2 tiene sólo tributarios de primer orden, etc. 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; así, por ejemplo, el orden de la cuenca de la figura 2.3 es 4. Nótese que 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.



En un mismo cauce se pueden encontrar los tres tipos de ríos. Los ríos de montaña, característicos de cotas elevadas sobre el nivel del mar, tienen grandes pendientes y pocas curvas y, debido a las altas velocidades que alcanza el agua, sus cauces están generalmente formados por cantos rodados con un poco de grava y casi nada de finos. Los ríos de planicie, por el contrario, presentan numerosos meandros debido a las bajas velocidades del agua y su cauce se forma por arenas y finos. En general, estos ríos se encuentran en cotas cercanas al nivel del mar. Los ríos de transición están en una situación intermedia entre los dos anteriores: presentan algunas curvas, con velocidades de agua moderadas y sus cauces están formados básicamente por grava, con algo de cantos rodados y arena.

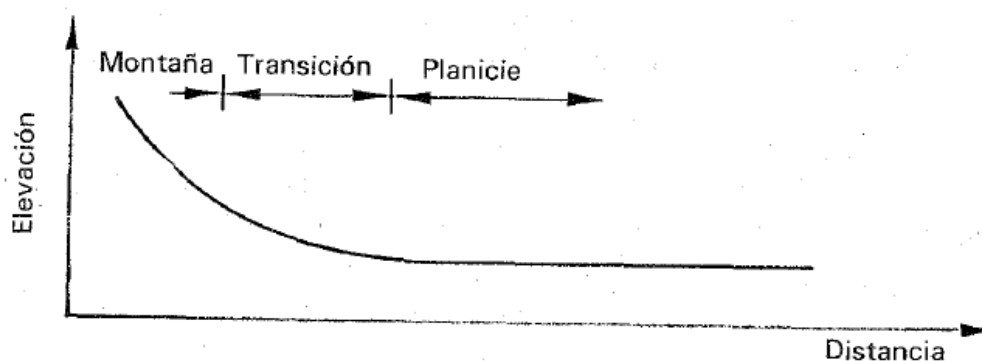


Figura 2.6 Clasificación de corrientes (por su posición topográfica o edad geológica).

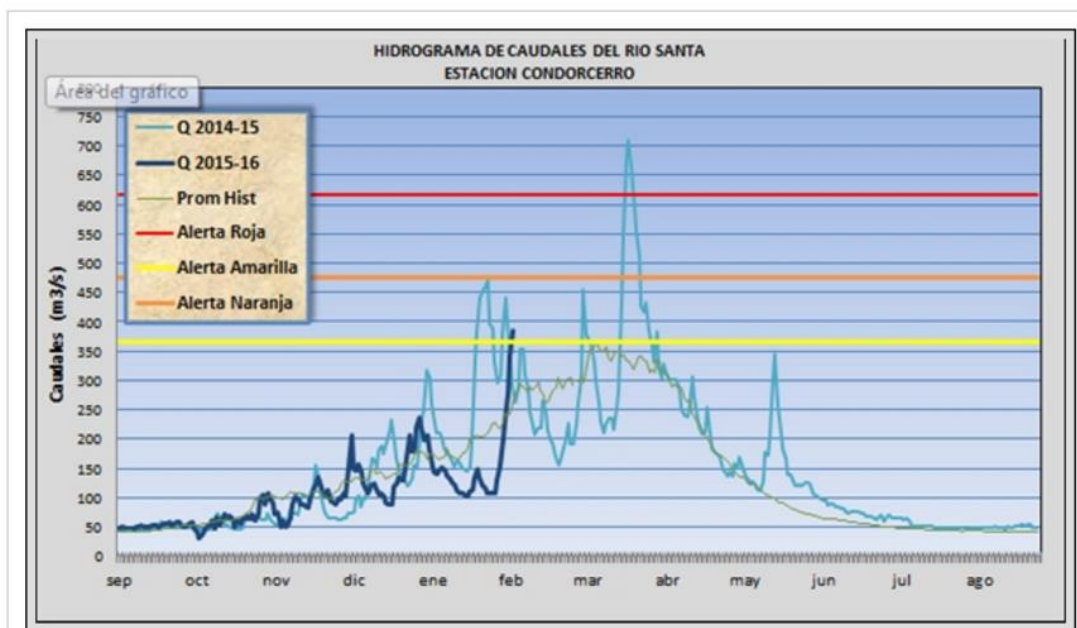
Algunas veces la naturaleza parece trabajar demasiado para producir lluvias torrenciales que hacen crecer los ríos en exceso. En otras ocasiones la maquinaria del ciclo parece detenerse completamente y con ella la precipitación y la escorrentía. En zonas adyacentes las variaciones en el ciclo pueden llegar a ser bastante diferentes. Estos extremos de crecientes y sequías son precisamente los que a menudo tienen mayor interés para el ingeniero hidrólogo, puesto que muchos proyectos de ingeniería hidráulica se diseñan para la protección contra los efectos perjudiciales de los extremos. La explicación de estos extremos climáticos se

PROBLEMAS

- 1-1 Prepare una lista de los Institutos de su Estado que se encarguen de asuntos hidrológicos. ¿Cuál es la responsabilidad específica de cada Instituto?
- 1-2 Repita el problema 1-1 para Institutos Nacionales, Estatales o Federales.
- 1-3 Prepare una lista de los proyectos hidráulicos de mayor envergadura en su área. ¿Qué puntos específicos de hidrología se contemplaron en cada uno?

SENAMHI – Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (www.senamhi.gob.pe)

En la estación hidrométrica Condorcerro, el río Santa registró en los últimos días un incremento significativo de su caudal, encontrándose para este jueves 04 de febrero hasta las 16:00 horas con un valor promedio de 368 m³/s, lo que representa una anomalía de +41%. En virtud a esto, se encuentra en un nivel de Alerta Amarilla.



Dirección de Hidrografía y Navegación – Marina de Guerra del Perú.(www.dhn.mil.pe)

Instituto Geográfico Nacional. (www.ign.gob.pe) (Cartas Nacional Escalas 1 / 25000 – 1 / 100000)

aforo con limnímetros y limnógrafos



NIVEL DEL AGUA

4-1 Limnímetros

El *nivel de un río* es la elevación del agua en una estación medida por encima de un cero arbitrario de referencia. Algunas veces, la referencia utilizada es el nivel medio del mar, pero más a menudo, se toma como referencia un punto ligeramente por debajo del nivel para el cual la descarga es cero. Dado que es muy difícil lograr una medición continua y directa del caudal en una corriente, mientras que es relativamente sencillo lograr un registro continuo del nivel del agua, la información primaria obtenida en una estación para medición del caudal es el nivel del río [1].

La manera más sencilla para medir el nivel de un río consiste en utilizar una *mira*, es decir, una escala colocada de tal manera que una parte de ella esté siempre sumergida en el agua. La mira puede ser una escala vertical colocada en una pila de un puente, soporte, muelle u otra estructura que se prolongue verticalmente hasta el canal de aguas bajas de la corriente. En los casos en los cuales no existe una estructura que permita esta disposición de la mira, puede utilizarse una *mira seccionada* (fig 4-1). Con ese objeto, se colocan miras cortas en las estructuras disponibles o en soportes construidos con ese fin de tal manera que una sección de la mira esté siempre en condición de medir. Como una alternativa a la mira seccionada, se puede utilizar una *mira inclinada*, la cual se coloca sobre la pendiente de la banca y se gradúa de tal manera que su lectura indique directamente la profundidad vertical.



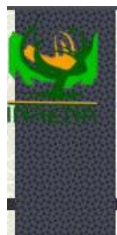


DELIMITACIÓN Y CODIFICACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS DEL PERÚ

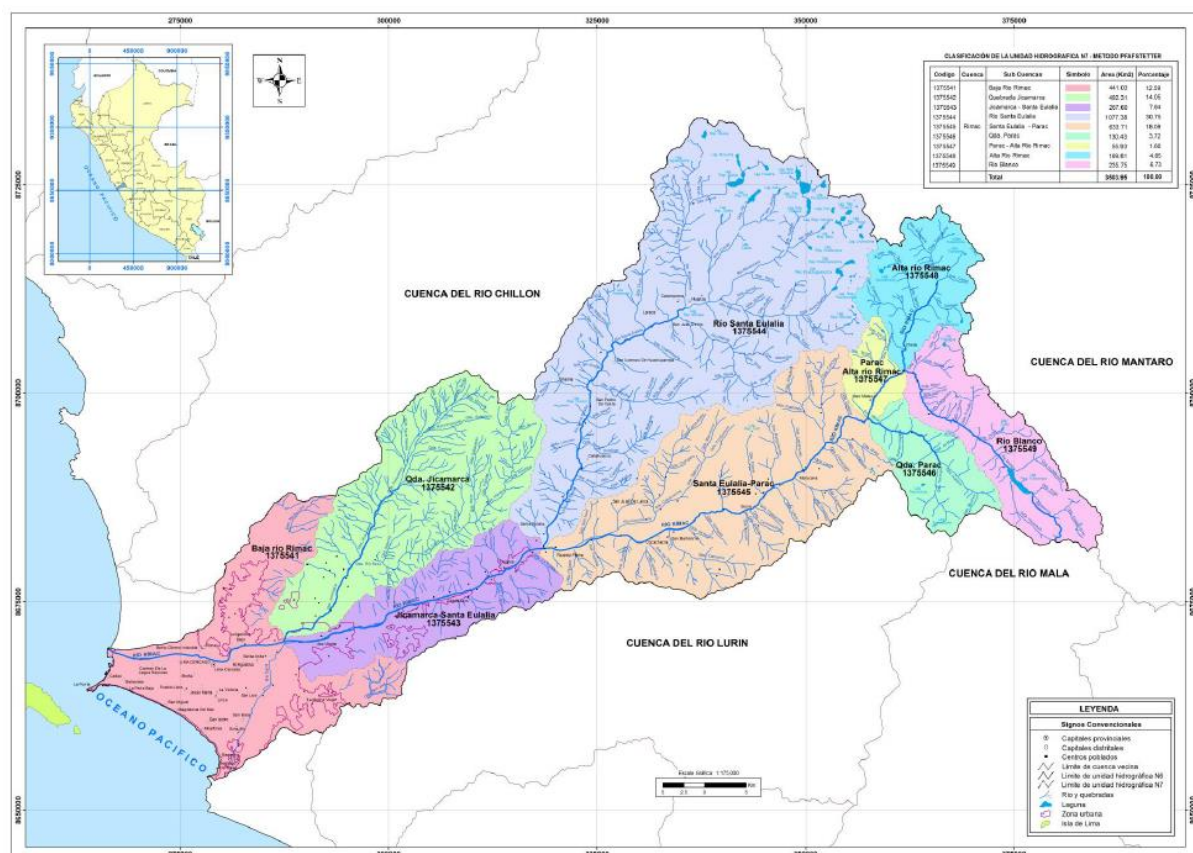
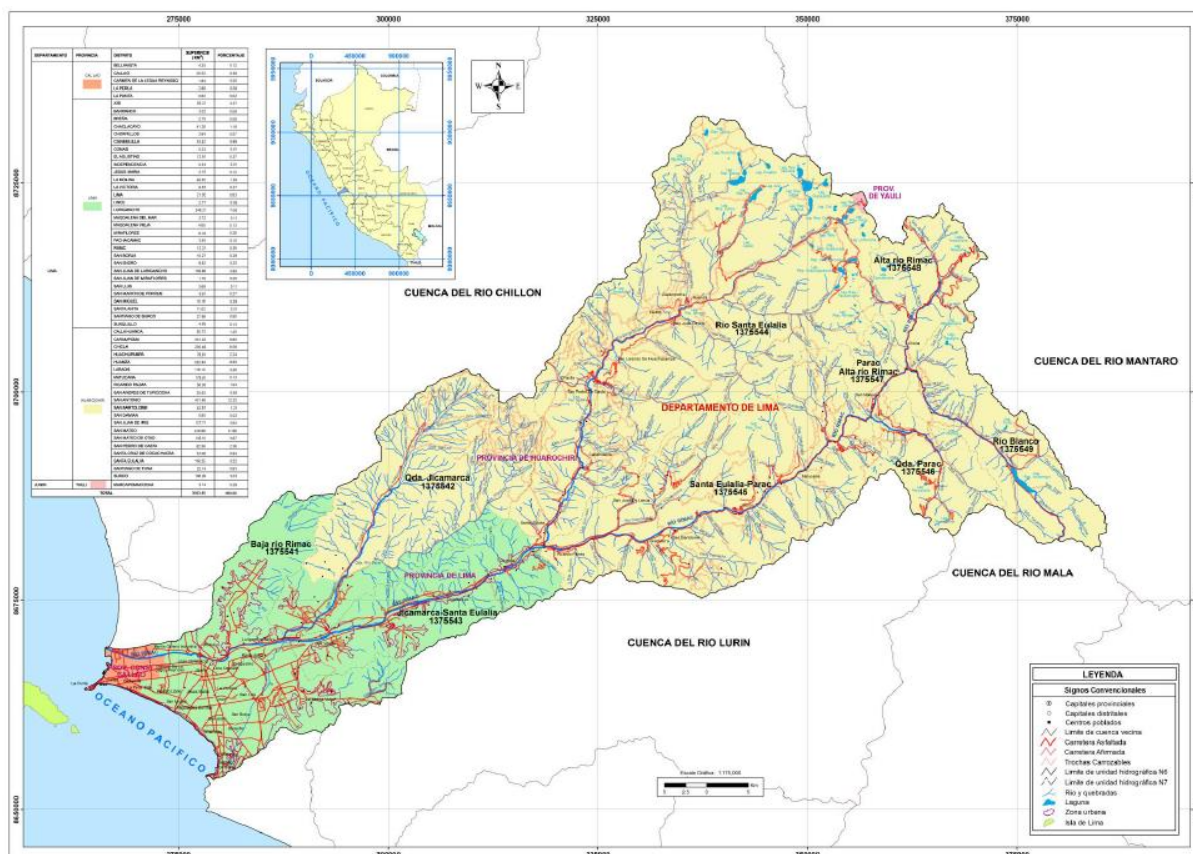
Antecedentes:

En 1984, la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN), desarrolló un primer mapa de delimitación de cuencas en el país a partir del cual se determinaron 106 cuencas hidrográficas.

En 2001, la ex Dirección General de Aguas y Suelos del INRENA, obtuvo el mapa que actualmente se maneja a escala de impresión 1:1'800,000; en el cual se determinó 107 cuencas hidrográficas, considerándose a la gran intercuenca del Amazonas como una cuenca más; distribuidos en tres vertientes hidrográficas: del Pacífico, 53 cuencas; del Amazonas, 45 cuencas y del Titicaca, 9 cuencas.



Unidades Hidrográficas en la Región Lima

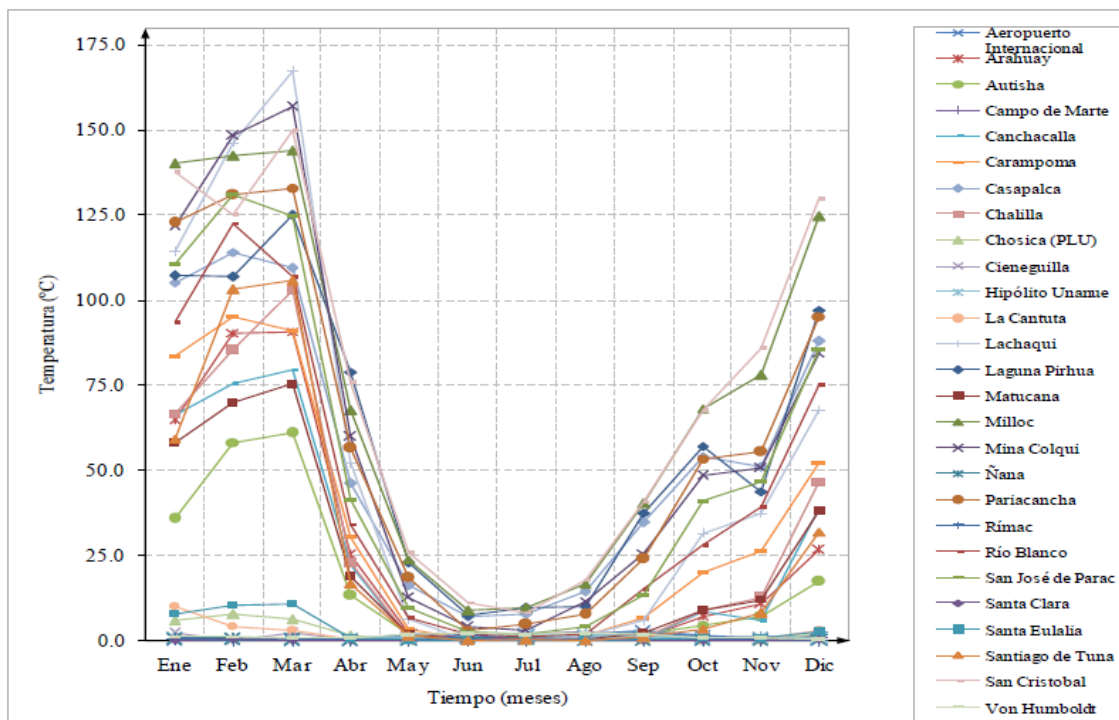


Cuadro N° 3.1 Precipitación total mensual – Promedio multimensual
Estaciones de la cuenca del río Rímac y cuencas vecinas

N°	Estación	Altitud (msnm)	Mes												Total Anual
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
1	Aeropuerto Internacional	13.0	0.1	0.2	0.1	0.0	1.3	1.6	1.2	1.4	2.6	0.9	0.4	0.6	10.3
2	Arahmay	2800.0	64.7	90.3	90.8	24.9	2.1	0.0	0.0	0.0	0.6	6.9	10.6	26.4	317.4
3	Autisha	2171.0	35.7	58.1	60.9	13.2	1.9	0.0	0.0	0.2	1.6	4.5	7.0	17.2	200.2
4	Campo de Marte	159.0	0.2	0.3	0.2	0.0	0.1	0.9	1.2	2.2	1.1	0.3	0.6	0.6	7.8
5	Canchacalla	2554.0	66.1	75.5	79.5	22.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.4	8.3	5.8	38.9	297.1
6	Carampoma	3489.0	83.7	95.1	90.8	30.3	3.2	0.3	0.8	1.4	6.7	19.8	26.1	52.3	410.4
7	Casapalca	4214.0	105.2	114.1	109.6	46.2	16.1	6.7	7.7	14.3	34.8	54.0	50.9	87.9	647.6
8	Chalilla	4050.0	66.7	85.3	102.8	23.0	0.9	0.0	0.0	0.5	0.8	8.9	12.5	46.7	348.1
9	Chosica (PLU)	850.0	5.7	7.7	6.2	1.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	1.8	23.3
10	Cieneguilla	280.0	2.1	0.0	2.1	0.3	0.0	0.1	1.0	0.2	0.0	0.1	0.3	0.2	6.4
11	Hipólito Uname	70.0	0.6	0.2	0.3	0.1	0.3	0.8	1.6	1.5	1.4	0.4	0.6	0.4	8.3
12	La Cantuta	850.0	9.9	4.0	2.9	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	2.9	20.5
13	Lachaqui	3668.0	114.2	146.1	167.2	52.1	6.4	0.0	0.0	1.5	5.9	31.2	37.3	67.8	629.8
14	Laguna Pirhua	4750.0	107.3	106.9	125.1	78.9	22.7	7.2	9.5	9.7	37.5	57.0	43.8	97.1	702.7
15	Matucana	2479.0	58.1	69.7	75.4	18.8	1.8	0.3	0.0	0.2	1.9	8.9	11.9	38.2	285.2
16	Milloc	4398.0	140.2	142.3	144.0	67.5	23.7	8.7	9.5	16.4	40.2	68.2	78.0	124.5	863.2
17	Mina Colqui	4600.0	121.8	148.4	157.0	59.9	12.5	4.0	2.8	11.4	25.6	48.2	50.5	84.4	726.4
18	Nana	460.0	0.3	0.4	0.1	0.0	0.0	0.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
19	Pariacancha	3800.0	122.8	130.9	133.0	56.5	18.4	2.9	4.6	7.6	23.8	53.4	55.3	95.2	704.6
20	Rimac	35.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
21	Río Blanco	3550.0	93.7	122.4	106.8	34.1	6.5	1.6	0.9	1.9	15.2	28.0	39.0	75.1	525.3
22	San José de Parac	3860.0	110.8	131.0	124.7	41.3	9.5	2.6	1.7	3.9	13.4	41.0	46.6	85.6	612.1
23	Santa Clara	415.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	2.2
24	Santa Eulalia	982.0	7.6	10.3	10.7	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.7	0.5	2.6	33.4
25	Santiago de Tuna	2921.0	59.3	103.1	105.7	16.6	1.4	0.0	0.1	0.1	0.9	3.4	8.1	31.9	330.4
26	San Cristobal	4700.0	137.6	124.9	150.0	75.9	25.7	11.1	8.1	17.5	40.6	67.5	85.6	130.0	874.6
27	Von Humboldt	238.0	1.0	1.1	0.5	0.6	1.7	2.1	1.7	2.2	1.8	0.7	0.7	0.4	14.5

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.1 Variación Mensual de la Precipitación – Promedio multimensual
Estaciones de la cuenca del río Rímac y cuencas vecinas



Fuente: Elaboración propia

En la Figura N° 3.3, mediante el trazado de las isolíneas de precipitación (isoyetas) se presenta la distribución espacial de la precipitación anual a nivel de la cuenca del río Rímac, se observa que los valores de la precipitación en la cuenca varían de 0.6 mm a 874.6 mm. Los valores altos se registran en la parte alta de la cuenca; y los menores se registran en la parte baja de la cuenca.

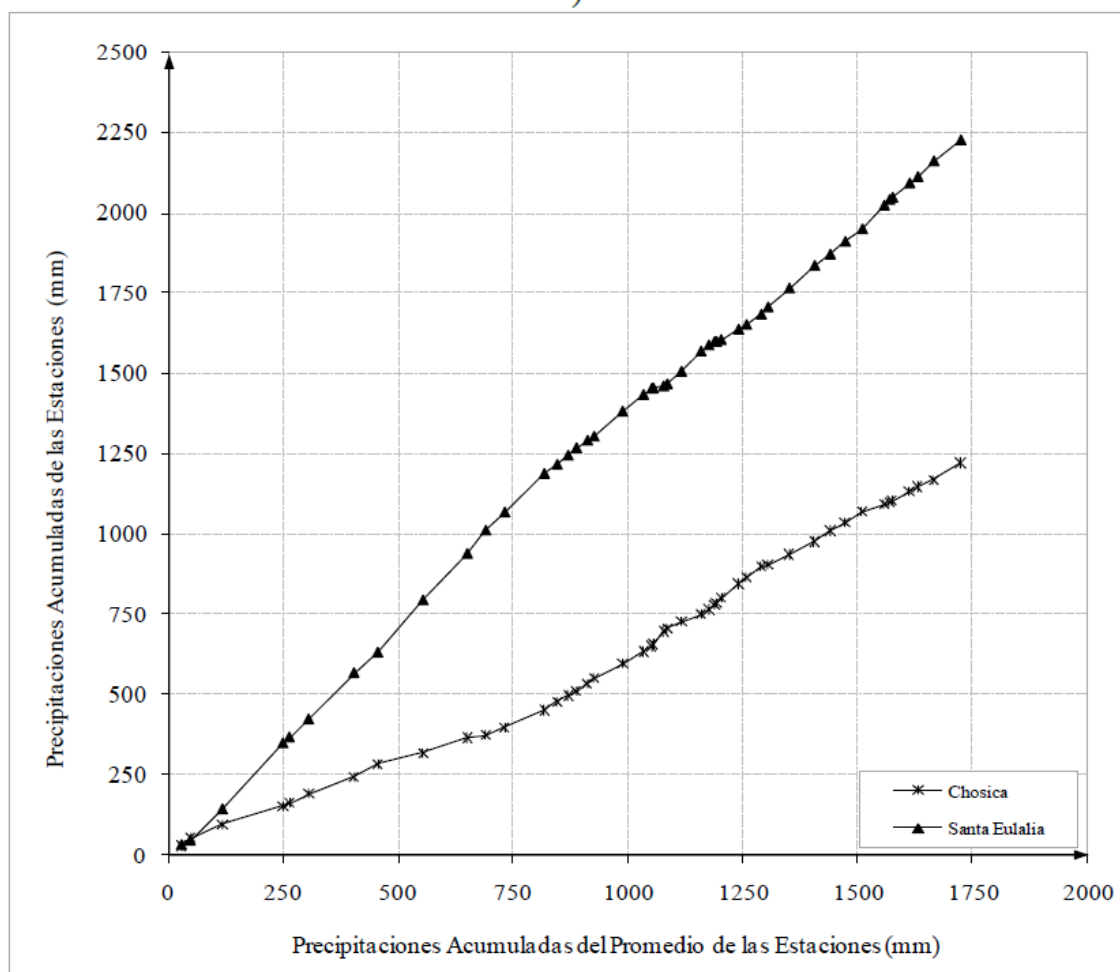
PERU: ZONA DE ARIAS DE INTERÉS

Altura	Color	Altura	Color
0-100	Verde	1000-1100	Naranja
100-200	Verde claro	1100-1200	Naranja claro
200-300	Verde medio	1200-1300	Naranja oscuro
300-400	Verde oscuro	1300-1400	Naranja muy oscuro
400-500	Verde muy oscuro	1400-1500	Naranja casi negro
500-600	Verde casi negro	1500-1600	Naranja negro
600-700	Verde negro	1600-1700	Naranja negro
700-800	Verde negro	1700-1800	Naranja negro
800-900	Verde negro	1800-1900	Naranja negro
900-1000	Verde negro	1900-2000	Naranja negro
1000-1100	Verde negro	2000-2100	Naranja negro
1100-1200	Verde negro	2100-2200	Naranja negro
1200-1300	Verde negro	2200-2300	Naranja negro
1300-1400	Verde negro	2300-2400	Naranja negro
1400-1500	Verde negro	2400-2500	Naranja negro
1500-1600	Verde negro	2500-2600	Naranja negro
1600-1700	Verde negro	2600-2700	Naranja negro
1700-1800	Verde negro	2700-2800	Naranja negro
1800-1900	Verde negro	2800-2900	Naranja negro
1900-2000	Verde negro	2900-3000	Naranja negro
2000-2100	Verde negro	3000-3100	Naranja negro
2100-2200	Verde negro	3100-3200	Naranja negro
2200-2300	Verde negro	3200-3300	Naranja negro
2300-2400	Verde negro	3300-3400	Naranja negro
2400-2500	Verde negro	3400-3500	Naranja negro
2500-2600	Verde negro	3500-3600	Naranja negro
2600-2700	Verde negro	3600-3700	Naranja negro
2700-2800	Verde negro	3700-3800	Naranja negro
2800-2900	Verde negro	3800-3900	Naranja negro
2900-3000	Verde negro	3900-4000	Naranja negro
3000-3100	Verde negro	4000-4100	Naranja negro
3100-3200	Verde negro	4100-4200	Naranja negro
3200-3300	Verde negro	4200-4300	Naranja negro
3300-3400	Verde negro	4300-4400	Naranja negro
3400-3500	Verde negro	4400-4500	Naranja negro
3500-3600	Verde negro	4500-4600	Naranja negro
3600-3700	Verde negro	4600-4700	Naranja negro
3700-3800	Verde negro	4700-4800	Naranja negro
3800-3900	Verde negro	4800-4900	Naranja negro
3900-4000	Verde negro	4900-5000	Naranja negro
4000-4100	Verde negro	5000-5100	Naranja negro
4100-4200	Verde negro	5100-5200	Naranja negro
4200-4300	Verde negro	5200-5300	Naranja negro
4300-4400	Verde negro	5300-5400	Naranja negro
4400-4500	Verde negro	5400-5500	Naranja negro
4500-4600	Verde negro	5500-5600	Naranja negro
4600-4700	Verde negro	5600-5700	Naranja negro
4700-4800	Verde negro	5700-5800	Naranja negro
4800-4900	Verde negro	5800-5900	Naranja negro
4900-5000	Verde negro	5900-6000	Naranja negro
5000-5100	Verde negro	6000-6100	Naranja negro
5100-5200	Verde negro	6100-6200	Naranja negro
5200-5300	Verde negro	6200-6300	Naranja negro
5300-5400	Verde negro	6300-6400	Naranja negro
5400-5500	Verde negro	6400-6500	Naranja negro
5500-5600	Verde negro	6500-6600	Naranja negro
5600-5700	Verde negro	6600-6700	Naranja negro
5700-5800	Verde negro	6700-6800	Naranja negro
5800-5900	Verde negro	6800-6900	Naranja negro
5900-6000	Verde negro	6900-7000	Naranja negro
6000-6100	Verde negro	7000-7100	Naranja negro
6100-6200	Verde negro	7100-7200	Naranja negro
6200-6300	Verde negro	7200-7300	Naranja negro
6300-6400	Verde negro	7300-7400	Naranja negro
6400-6500	Verde negro	7400-7500	Naranja negro
6500-6600	Verde negro	7500-7600	Naranja negro
6600-6700	Verde negro	7600-7700	Naranja negro
6700-6800	Verde negro	7700-7800	Naranja negro
6800-6900	Verde negro	7800-7900	Naranja negro
6900-7000	Verde negro	7900-8000	Naranja negro
7000-7100	Verde negro	8000-8100	Naranja negro
7100-7200	Verde negro	8100-8200	Naranja negro
7200-7300	Verde negro	8200-8300	Naranja negro
7300-7400	Verde negro	8300-8400	Naranja negro
7400-7500	Verde negro	8400-8500	Naranja negro
7500-7600	Verde negro	8500-8600	Naranja negro
7600-7700	Verde negro	8600-8700	Naranja negro
7700-7800	Verde negro	8700-8800	Naranja negro
7800-7900	Verde negro	8800-8900	Naranja negro
7900-8000	Verde negro	8900-9000	Naranja negro
8000-8100	Verde negro	9000-9100	Naranja negro
8100-8200	Verde negro	9100-9200	Naranja negro

Análisis de doble masa

Después de haber analizado los hidrogramas de las series respectivas se realiza el análisis de doble masa. El diagrama de doble masa se obtiene planteando en el eje de las abscisas el volumen anual promedio acumulado de la variable pluviométrica de las estaciones en unidades respectivas y en el eje de las ordenadas los volúmenes anuales acumulados de la variable pluviométrica en unidades correspondientes de cada una de las estaciones consideradas en el estudio. De los gráficos de doble masa se selecciona una estación más confiable, la que presenta el menor número de quiebres, la cual se usará como estación base para el análisis de otras estaciones. En este análisis, los errores producidos por los fenómenos naturales y sistemáticos son detectados mediante los “quiebres” que se presentan en los diagramas y permite determinar el rango de los períodos dudosos y confiables para cada estación en estudio, la cual se debe corregirse utilizando ciertos criterios estadísticos.

Figura N° 4.7 Diagrama de doble masa de las precipitaciones anuales - Grupo N° 3
a)



Cuadro N° 4.4 Análisis de doble masa de las precipitaciones anuales (mm) - Grupo N° 3

m	Año	Estación				Promedio	
		Chosica		Santa Eulalia			
		P	Pacumul	P	Pacumul	P	Pacumul
1	1964	27.7	27.7	30.2	30.2	29.0	29.0
2	1965	24.6	52.3	13.7	43.9	19.2	48.2
3	1966	41.8	94.1	97.9	141.8	69.9	118.1
4	1967	57.6	151.7	205.5	347.3	131.6	249.7
5	1968	9.3	161.0	18.2	365.5	13.8	263.5
6	1969	27.5	188.5	56.3	421.8	41.9	305.4
7	1970	53.5	242.0	144.0	565.8	98.8	404.2
8	1971	39.3	281.3	63.9	629.7	51.6	455.8
9	1972	34.4	315.7	162.7	792.4	98.6	554.4
10	1973	47.6	363.3	144.9	937.3	96.3	650.7
11	1974	8.0	371.3	72.3	1009.6	40.2	690.9
12	1975	25.9	397.2	56.6	1066.2	41.3	732.2
13	1976	51.8	449.0	120.1	1186.3	86.0	818.2
14	1977	27.6	476.6	28.5	1214.8	28.1	846.3
15	1978	18.4	495.0	28.7	1243.5	23.6	869.9
16	1979	13.1	508.1	23.0	1266.5	18.1	888.0
17	1980	25.2	533.3	23.0	1289.5	24.1	912.1
18	1981	15.8	549.1	12.8	1302.3	14.3	926.4
19	1982	45.9	595.0	78.1	1380.4	62.0	988.4
20	1983	38.3	633.3	52.2	1432.6	45.3	1033.7
21	1984	17.1	650.4	19.4	1452.0	18.3	1052.0
22	1985	5.5	655.9	0.6	1452.6	3.1	1055.1
23	1986	38.7	694.6	6.3	1458.9	22.5	1077.6
24	1987	9.9	704.5	6.1	1465.0	8.0	1085.6
25	1988	21.7	726.2	39.7	1504.7	30.7	1116.3
26	1989	22.7	748.9	62.7	1567.4	42.7	1159.0
27	1990	14.8	763.7	19.1	1586.5	17.0	1176.0
28	1991	14.0	777.7	10.8	1597.3	12.4	1188.4
29	1992	7.6	785.3	0.5	1597.8	4.1	1192.5
30	1993	14.6	799.9	5.6	1603.4	10.1	1202.6
31	1994	44.0	843.9	32.2	1635.6	38.1	1240.7
32	1995	19.6	863.5	14.6	1650.2	17.1	1257.8
33	1996	32.8	896.3	31.8	1682.0	32.3	1290.1
34	1997	6.4	902.7	22.8	1704.8	14.6	1304.7
35	1998	33.2	935.9	59.3	1764.1	46.3	1351.0
36	1999	39.6	975.5	70.2	1834.3	54.9	1405.9
37	2000	33.0	1008.5	35.3	1869.6	34.2	1440.1
38	2001	25.7	1034.2	39.4	1909.0	32.6	1472.7
39	2002	35.0	1069.2	39.3	1948.3	37.2	1509.9
40	2003	21.5	1090.7	73.5	2021.8	47.5	1557.4
41	2004	5.5	1096.2	18.2	2040.0	11.9	1569.3
42	2005	5.9	1102.1	6.5	2046.5	6.2	1575.5
43	2006	29.3	1131.4	44.8	2091.3	37.1	1612.6
44	2007	15.7	1147.1	20.0	2111.3	17.9	1630.5
45	2008	20.9	1168.0	48.7	2160.0	34.8	1665.3
46	2009	51.9	1219.9	65.2	2225.2	58.6	1723.9

IX BALANCE HÍDRICO

9.1 GENERALIDADES

El balance hídrico es la comparación entre la oferta y demanda hídrica de una cuenca, en el presente estudio se ha realizado para la cuenca del río Rímac en la estación hidrométrica Chosica como punto de control.

En el ámbito de la cuenca existe un punto de control hidrométrico estación Chosica. El balance hídrico se ha efectuado en este punto, tanto la disponibilidad hídrica como la demanda hídrica se contabiliza a partir de este punto, con el propósito de conocer el déficit y exceso del recurso hídrico en la cuenca.

Ecuación del balance hídrico de la cuenca

La ecuación general para el balance hídrico a utilizarse, en un punto del río, es la siguiente:

$$\boxed{\text{Balance Hídrico} = Q - D}$$

Donde:

Q = caudal (oferta hídrica) en el río.
 D = demandas hídricas (usos de agua).

9.2 OFERTA HÍDRICA

La disponibilidad hídrica de la cuenca del río Rímac, se muestra en el capítulo anterior, determinado para 75% de persistencia de las descargas medias mensuales y del Túnel Trasandino en capítulo de hidrometría. Los mismos valores se muestran en el balance hídrico.

9.3 DEMANDA HÍDRICA EN SITUACIÓN ACTUAL Y FUTURA

La demanda de agua es el requerimiento de los usuarios para satisfacer una necesidad. En tal sentido el agua se caracteriza no sólo por la diversidad de usos, sino por la multiplicidad de usuarios.

9.4 BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA EN SITUACIÓN ACTUAL

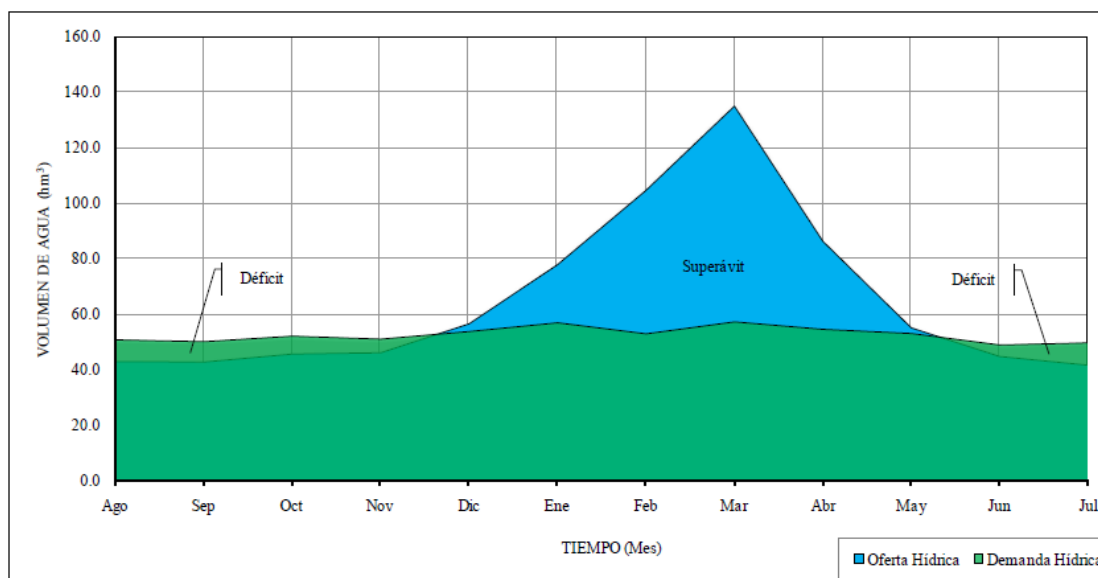
En el presente estudio, el balance hídrico se ha desarrollado con usos actuales de agua en la cuenca del río Rímac.

Una vez definido la disponibilidad hídrica y las demandas hídricas actuales, en el punto de control de la cuenca se ha realizado el balance hídrico respectivo.

Cuadro 9.1 Balance hídrico de la cuenca del río Rímac (estación Chosica)

Descripción		Volumen de agua mensualizada en hm ³												Total
		Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	
Oferta Hídrica	Caudal al 75% persistencia Río Rímac	28.52	30.59	33.27	34.16	45.69	68.92	96.41	124.68	76.49	44.41	31.54	27.80	642.48
	Caudal medio mensual Túnel Trasandino	14.65	12.39	12.59	12.16	11.06	9.19	8.47	10.55	10.03	10.90	13.43	14.03	139.45
	Aguas subterráneas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Total	43.18	42.98	45.85	46.32	56.76	78.10	104.87	135.23	86.52	55.31	44.97	41.84	781.92
Demanda Hídrica	Uso Agrícola	6.08	6.88	7.42	7.80	9.10	12.26	12.62	12.59	11.34	8.38	5.68	5.00	105.15
	Uso Poblacional	42.59	41.21	42.59	41.21	42.59	42.59	38.47	42.59	41.21	42.59	41.21	42.59	501.44
	Uso Minero	2.33	2.26	2.33	2.26	2.33	2.33	2.11	2.33	2.26	2.33	2.26	2.33	27.46
	Otros usos (industrial)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.95
Total		51.08	50.43	52.42	51.35	54.10	57.26	53.27	57.59	54.89	53.38	49.23	50.00	635.00
Demanda atendida		43.18	42.98	45.85	46.32	54.10	57.26	53.27	57.59	54.89	53.38	44.97	41.84	635.00
		84.53%	85.22%	87.47%	90.20%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	91.35%	83.67%	100.00%
Superávit (+)		-	-	-	-	2.66	20.84	51.60	77.64	31.63	1.93	-	-	146.92
		-	-	-	-	4.68%	26.69%	49.20%	57.41%	36.56%	3.49%	-	-	18.79%
Déficit (-)		-7.90	-7.45	-6.57	-5.03	-	-	-	-	-	-	-4.26	-8.16	-
		15.47%	14.78%	12.53%	9.80%	-	-	-	-	-	-	8.65%	16.33%	-

Figura N° 9.1 Comparación de ofertas y demandas hídricas
Cuenca del río Rímac - Estación Chosica



En los meses de junio a noviembre muestra déficit hídrico y en los meses de diciembre a mayo muestra superávit del recurso hídrico. La oferta hídrica total anual es de 781.92 hm³, demanda hídrica total anual de 635.0 hm³ y el balance hídrico anual resulta 146.92 hm³, este valor indica que hay superávit anual en la cuenca del río Rímac.

1.6. Precipitación:

Definición

Se define precipitación a toda forma de humedad, que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre. De acuerdo a esta definición, las lluvias, las granizadas, las garúas y las nevadas son formas distintas del mismo fenómeno de la precipitación. En Estados Unidos, la lluvia se identifica según su intensidad, en:

- ligera, para tasas de caída de hasta 2.5 mm/h
- moderada, desde 2.5 hasta 7.6 mm/h
- fuerte, por encima de 7.6 mm/h

2.2 Medición de la Precipitación

Fundamentalmente, existen tres tipos de instrumentos.

1. Pluviómetros simples.- En principio cualquier recipiente abierto de paredes verticales puede servir de pluviómetro, porque lo que interesa es retener el agua llovida para luego medirla. En el sistema métrico se mide en milímetros y décimos de milímetro. Sin embargo, es importante que las dimensiones de estos instrumentos sean normalizadas para poder comparar las medidas tomadas en diferentes localidades.

El pluviómetro estándar del U.S. National Weather Service (fig. 2.1) consta de un recipiente cilíndrico (a), un embudo colector (b) de diámetro 8" y un tubo medidor (c) de área igual a un décimo del área del embudo colector; de esta manera, 1 mm. de lluvia llenará el tubo medidor 10 mm. con el cual se mejora la precisión de la lectura. Con una regla graduada en mm. es posible estimar hasta los décimos de mm.

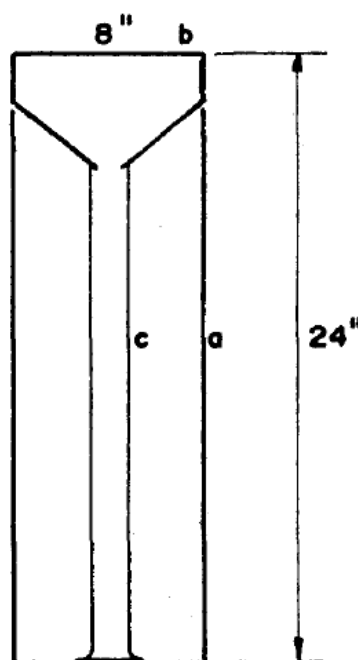


Fig. 2.1 PLUVIOMETRO

Ejemplo 2.2

La tabla 2.1 contiene las precipitaciones mensuales registradas en la estación de Sibayo, en Puno, tomadas de la referencia 4.

TABLA 2.1 PRECIPITACIONES MENSUALES EN SIBAYO - PUNO

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1951	156.3	133.8	55.2	6.4	0.0	2.1	3.4	3.1	33.6	1.4	6.8	56.5	458.6
1952	126.3	163.9	152.2	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	76.4	76.4	619.2
1953	100.3	255.9	86.0	31.9	11.4	0.0	0.0	0.0	0.0	11.5	29.9	27.1	554.0
1954	123.6	154.4	221.6	17.8	18.0	6.0	3.0	0.0	5.0	21.3	22.8	160.9	754.4
1955	114.1	81.1	22.6	1.2	1.7	0.0	0.0	0.4	2.2	0.0	11.2	14.0	248.5
1956	122.4	164.7	150.0	3.5	0.0	27.1	0.0	0.0	8.7	5.8	1.6	97.0	580.8
1957	82.3	145.5	123.2	5.3	6.3	0.0	2.5	2.7	13.8	24.2	31.2	24.9	461.9
1958	64.0	131.9	102.6	25.1	7.9	1.0	0.0	0.0	5.0	5.9	9.7	213.5	566.6
1959	193.4	66.1	225.6	10.8	0.0	0.6	0.0	6.1	24.1	29.9	68.0	52.9	677.5
1960	152.4	152.3	91.1	55.1	28.0	0.8	0.0	24.8	17.7	6.3	103.5	163.7	795.7
Pro- me- dio	123.5	145.0	123.0	17.2	7.3	3.8	0.9	3.7	11.0	11.5	36.1	88.7	571.7

Valor central dominante.- En este caso viene a ser la precipitación anual media o módulo pluviométrico anual, que es 571.7 mm. Este valor da una idea de la magnitud de las lluvias en Sibayo.

Rango.- Es la diferencia entre los valores extremos de las precipitaciones anuales. Para el registro utilizado: 795.7 - 248.5 = 547.2 mm.

Desviación estándar o desviación típica.- Se define por la fórmula:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum x^2 - \bar{x} \sum x}{n-1}} \quad \dots(2.1)$$

S_x ... desviación estándar de las precipitaciones anuales

$\bar{x}$... valor promedio de las precipitaciones anuales = 571.7 mm.

x ... cada una de las precipitaciones anuales del registro

n ... longitud del registro en años (10).

Hechos los cálculos se obtiene $S_x = 159$ mm.

Coeficiente de variabilidad.- Se define: $\gamma(x) = \frac{S_x}{\bar{x}} \times 100 \dots (2.2)$

$$\gamma(x) = \frac{S_x}{\bar{x}} \times 100 = \frac{159}{571.7} \times 100 = 27.8 \%$$

Si suponemos que las precipitaciones anuales en Sibayo constituyen una población normal, y que la muestra tiene también una distribución de frecuencias normal como la población, entonces el punto medio de la campana de Gauss corresponde al valor medio $\bar{x}$ y los demás valores respecto a la media se distribuyen así:

- el 50 % de los datos se encuentra entre $\bar{x} \pm \frac{2}{3} S_x$;
- el 68 % de los datos se encuentra entre $\bar{x} \pm S_x$;
- el 95 % de los datos se encuentra entre $\bar{x} \pm 2 S_x$.

Se interpreta diciendo que, en la localidad de Sibayo:

- es de esperar una precipitación anual comprendida entre 678.0 y 466.0 mm., con un 50 % de probabilidad;
- es de esperar una precipitación anual comprendida entre 731.0 y 413.0 mm., con un 68 % de probabilidad;
- es de esperar una precipitación anual comprendida entre 890.0 y 254.0 mm., con un 95 % de probabilidad.

Luego del trabajo que se acaba de hacer, ya es posible tomar decisiones para el diseño de alguna estructura hidráulica en particular que se proyecte en la zona de Sibayo, en Puno.

El manejo estadístico de la información pluviométrica, es decir el estudio de su comportamiento según un modelo matemático, sólo es posible realizarlo cuando la información reúne estos tres requisitos: es completa, consistente y de extensión suficiente. Es por eso que, una información pluviométrica antes de ser estudiada en su comportamiento debe ser revisada en estos tres aspectos, en la forma cómo se describe enseguida.

2.3.1 Estimación de Datos Faltantes

Frecuentemente se halla uno con que faltan datos en los registros de lluvias. Esto se debe a ausentismo del operador o a fallas instrumentales.

Se llama correlación a la operación o procedimiento por medio del cual se completan los datos faltantes. Para ello se utilizan los datos de estaciones índices, que sí tienen los datos completos y que se seleccionan de modo que estén lo más cerca posible y sean de altitud parecida a la estación en estudio. Distancia y altitud son pues los factores principales para la selección de las estaciones índice.

Métodos de estimación

Método del U.S. Weather Bureau.- Si los datos faltantes son lluvias diarias, se escogen tres estaciones índice A, B, C.

- a) Si la precipitación anual media en cada estación índice ($\bar{x}_A$, $\bar{x}_B$, $\bar{x}_C$) está dentro de un 10 % de la correspondiente a la estación incompleta ($\bar{x}$), un promedio aritmético simple de las precipitaciones en las estaciones índice da una estimación adecuada. En los ejemplos que siguen las precipitaciones están en mm.

Ejemplo 2.3

Estación	$\bar{x}$	Δ	%	día j
A	680	10	1.5	15
B	710	40	6.0	20
C	701	31	4.6	25
x	670			

$$x = \frac{15 + 20 + 25}{3} = 20 \text{ mm.}$$

- b) Si la precipitación anual media en cualquiera de las estaciones índice difiere de aquella de la estación problema en más de un 10 %, se utiliza la fórmula:

$$p_x = \frac{1}{3} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{x}_A} p_A + \frac{\bar{x}}{\bar{x}_B} p_B + \frac{\bar{x}}{\bar{x}_C} p_C \right) \quad \dots (2.3)$$

Si los datos faltantes son precipitaciones anuales, se puede aplicar el método de los promedios o el método de la recta de regresión.

Método de los promedios.- Se escoge una estación índice (A) cuya precipitación anual media es $\bar{x}_A$; si la estación problema es la estación x, se halla su correspondiente precipitación anual media $\bar{x}$ y se establece la proporción:

$$\frac{x}{x_A} = \frac{\bar{x}}{\bar{x}_A} \quad \dots (2.4)$$

de donde se puede despejar x que es el dato faltante. Hay que tener cuidado de hallar los valores medios para el período común de registros, como se puede apreciar en el ejemplo 2.4.

Ejemplo 2.4

	x_A	x
1984	754	731
1985	766	690
1986	166	
1987	410	306
1988	576	610

$$\bar{x} = \frac{731 + 690 + 306 + 610}{4} = 584.3$$

$$\bar{x}_A = \frac{754 + 766 + 410 + 576}{4} = 626.5$$

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{x}_A} \cdot x_A = \frac{584.3}{626.5} \cdot 166 = 154.8 \text{ mm.}$$

Si hay dos o tres estaciones índice se procede igual con cada una de ellas, obteniéndose 2 ó 3 valores de x . El valor final de x será el promedio de esos valores.

Ejemplo 2.5

Completar la información para la estación pluviométrica A a partir de las estaciones índice B y C, próximas a A y de altitudes parecidas, mediante el método de la recta de regresión. Las cifras se refieren a precipitaciones anuales en mm.

	A	B	C
1967	786	628	765
8	846	708	876
9	1332	1112	1020
1970	918	816	641
1		830	918
2	930	803	781
3	1115	1020	849
4	887	867	807
5	800	1056	875
6	857	847	947
7	930	756	889
8		918	799
9	888	793	871
1980	915	1002	1000
1	817	831	933
2	999	797	849

2.3.2 Análisis de Consistencia

Cualquier cambio en la ubicación como en la exposición de un pluviómetro puede conllevar un cambio relativo en la cantidad de lluvia captada por el pluviómetro. El registro completo publicado representará condiciones inexistentes. Un registro de este tipo se dice que es inconsistente.

2.5 Precipitación Media en la Cuenca

A partir de las lluvias medidas en los pluviómetros es posible calcular la precipitación media en la cuenca. Singularmente útil resulta la precipitación media anual, o módulo pluviométrico anual, en la cuenca.

Los pluviómetros deben ubicarse estratégicamente y en número suficiente para que la información resulte de buena calidad.

El problema entonces se refiere al cálculo de la lámina o altura de agua que cae en promedio durante 1 año en una cuenca. Existen para ello varios métodos disponibles, de los cuales los más usados son los tres que se describen a continuación.

Promedio aritmético.— Si $p_1, p_2, \dots, p_n$ son las precipitaciones anuales observadas en diferentes puntos de la cuenca, entonces la precipitación anual media en la cuenca es:

$$p = \frac{p_1 + p_2 + \dots + p_n}{n} \quad \dots (2.12)$$

Curvas Isoyetas.— Se define isoyeta la línea de igual precipitación.

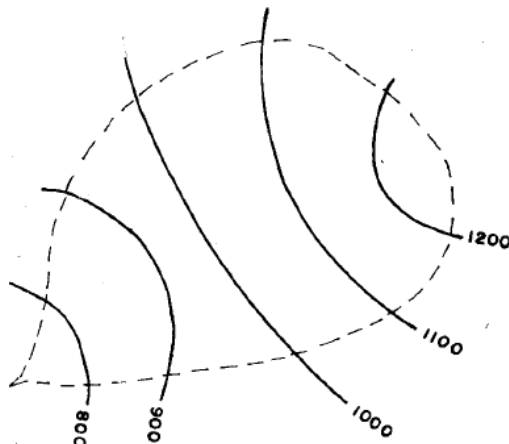
El método consiste en (fig. 2.8):

- 1° Trazar las isoyetas, interpolando entre las diversas estaciones, de modo similar a cómo se trazan las curvas de nivel;
- 2° Hallar las áreas $a_1, a_2, \dots, a_n$ entre cada 2 isoyetas seguidas;
- 3° Si $p_0, p_1, \dots, p_n$ son las precipitaciones anuales representadas por las isoyetas respectivas, entonces:

$$p = \frac{\frac{p_0 + p_1}{2} a_1 + \dots + \frac{p_{n-1} + p_n}{2} a_n}{a_1 + \dots + a_n} \quad \dots (2.14)$$

es la precipitación anual media en la cuenca.

Fig.2.8 ISOYETAS



1.7. Curvas de intensidad-duración-frecuencia

Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia

Se define tormenta el conjunto de lluvias que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de características bien definidas. Una tormenta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aun días y puede abarcar desde una zona pequeña hasta una extensa región.

De las tormentas interesa conocer las curvas intensidad - duración - frecuencia.

Intensidad.- Se mide en mm/h. y su valor varía durante la tormenta.

Duración.- Se mide en minutos o en horas. Es el tiempo transcurrido entre el comienzo y el fin de la tormenta.

Período de duración.- Es un concepto importante. Es un período de tiempo dentro de la duración de la tormenta. Se escogen períodos de duración tipos. Por ejemplo: 10 m., 30 m., 60 m., 120 m., 240 m. Lo que se busca, como veremos, son las intensidades máximas para estos períodos de duración.

Frecuencia.- Aclararemos este concepto mediante un ejemplo. Una tormenta de frecuencia 1/15 significa que es probable que se presente, como término medio, una vez cada 15 años. Los 15 años vienen a constituir el tiempo de retorno o período de retorno de dicha tormenta.

El análisis de tormentas tiene por objeto obtener aseveraciones como la de este otro ejemplo, más completo. "En el lugar tal, es probable que se presente una tormenta de intensidad máxima 48 mm/h., para un período de duración de 20 minutos, cada 15 años en promedio".

El análisis de tormentas se hace a través de siete etapas o pasos.

Paso 1.- Se parte de un pluviograma, es decir el registro de un pluviógrafo, como el de la fig. 2.2.

Paso 2.- Se hace la siguiente tabulación, a partir del pluviograma.

Hora	Intervalo de tiempo min.	Lluvia parcial mm.	Intensidad mm / h
11.00			
	60	0.5	0.5
12.00			
	50	8.5	10.2
12.50			
	70	10.0	8.6
14.00			
	140	4.5	1.9
16.20			

Hora. Se anotan las horas en que cambia la intensidad.

Intervalo de tiempo. Es el intervalo entre las horas de la primera columna.

Lluvia parcial. Es la lluvia caída en cada intervalo de tiempo. Se saca por diferencia.

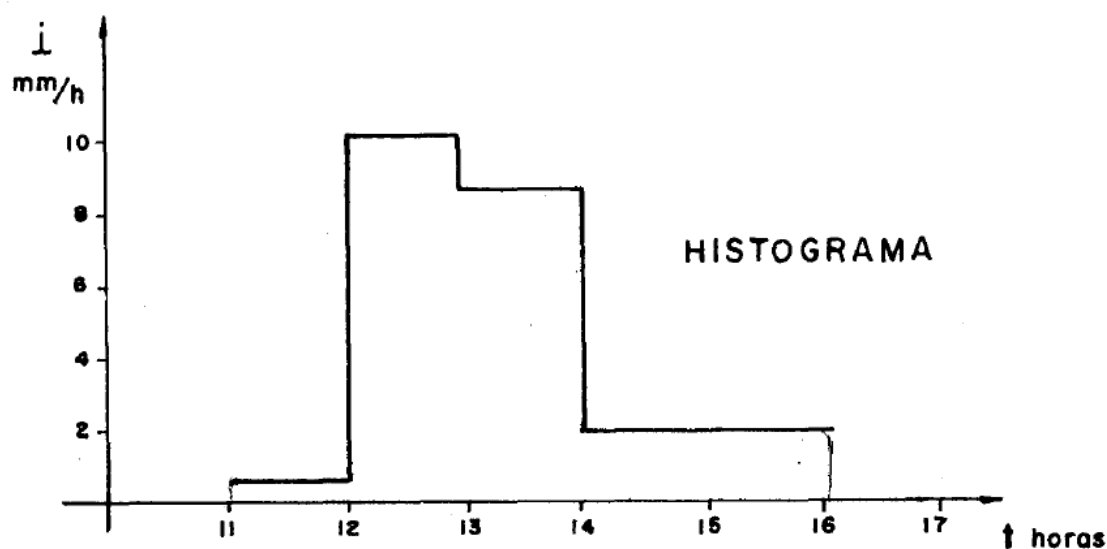
Intensidad. Es la precipitación referida a 1 hora, para cada intervalo de tiempo. Se obtiene mediante una regla de tres. Para el segundo intervalo, por ejemplo:

$$\frac{8.5}{50} = \frac{x}{60} \quad x = \frac{8.5 \times 60}{50} = 10.2 \text{ mm/h.}$$

Paso 3.- Se dibuja el gráfico intensidad - tiempo, que recibe el nombre de histograma.

El histograma permite apreciar más objetivamente cómo varía la intensidad durante la tormenta.

Paso 4.- Se calcula la intensidad máxima para diferentes periodos de duración. Fijemos 10 m., 30 m., 60 m., 120 m., 240 min



- a) Tomemos la intensidad máxima: 10.2 mm/h durante 50 min. Luego la intensidad máxima para períodos de duración de 10 m. y 30 m. es 10.2 mm/h.
- b) Para 60 min. faltan 10 min. Hay que buscar antes o después de los 50 min. la intensidad máxima inmediata inferior: 8.6 mm/h durante 70 min. Luego, la intensidad máxima para 60 min. será:

$$\frac{50}{60} \times 10.2 + \frac{10}{60} \times 8.6 = 9.9 \text{ mm/h.}$$

- c) Análogamente, para 120 min. :

$$\frac{50}{120} \times 10.2 + \frac{70}{120} \times 8.6 = 9.3 \text{ mm/h.}$$

- d) Para 240 min:

$$\frac{50}{240} \times 10.2 + \frac{70}{240} \times 8.6 + \frac{120}{240} \times 1.9 = 5.6 \text{ mm/h.}$$

Después del paso 4 se tiene la siguiente tabla:

Período de duración (min.)	10	30	60	120	240
Intensidad máxima (mm/h)	10.2	10.2	9.9	9.3	5.6

Falta ver cómo se determina la frecuencia.

Para esto, se procede a analizar todas las tormentas caídas en el lugar siguiendo el proceso ya indicado; es decir que para cada tormenta se halla la intensidad máxima en diferentes períodos de duración.

Paso 5.- Se tabulan los resultados en orden cronológico, tomando la intensidad mayor de cada año para cada período de duración.

Año	Período de duración (min.)				
	10	30	60	120	240
1950	102	81	64	42	18 21
1951	83	70	56	33	16
1952	76	61	42	29	19
1953	102 105	72 83	45 65	32 44	11 23
1954	61	58	36	28	14
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.

Paso 6.- Procediendo por separado para cada período de duración, se colocan en orden decreciente, prescindiendo del año, los valores de la tabla última.

N° de orden m	Frecuencia $p = \frac{m}{n}$	Tiempo de retorno $T = \frac{1}{p}$	Período de duración (min.)				
			10	30	60	120	240
1	1/30	30	105	83	65	44	23
2	2/30	15	102.88	81.72	64.56	42.37	21.19
3	3/30	10	99.77	79.61	62.46	39.28	19.12
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.

n=30

Paso 7.- Se construyen las curvas intensidad-duración-frecuencia.

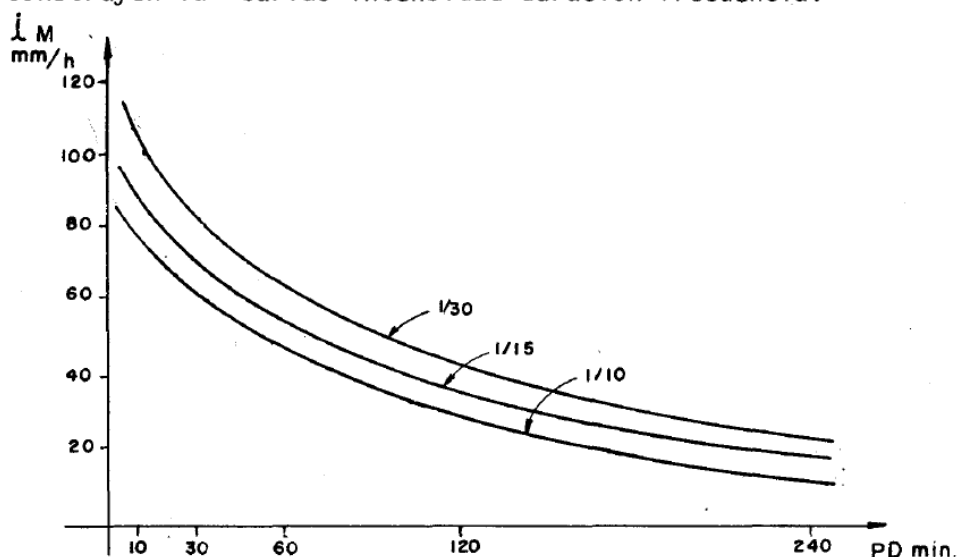


Fig. 2.II CURVAS INTENSIDAD - DURACION - FRECUENCIA

Se ilustra el uso de estas curvas con un par de ejemplos. En este lugar, es probable que se presente una tormenta de intensidad máxima igual a 72 mm/h. para un período de duración de 30 min., cada 15 años en término medio.

En este lugar, la intensidad máxima para un período de duración de 120 min. y período de retorno de 30 años es 44 mm/h.

A las tormentas de frecuencias 1/15, 1/10, 1/5, etc. se les llama "tormenta de los 15, 10, 5 años", etc., respectivamente.

La probabilidad de que un año cualquiera se presente una tormenta de magnitud igual o mayor que la magnitud de la tormenta de los 5 años, es:
 $1/5 = 0.20 = 20 \%$.

Unidad II: Escurrimiento Superficial y Relación Precipitación - Escorrentía

Logro de Unidad Al finalizar la II unidad, el estudiante formula informe técnico descriptivo sobre la estimación del escurrimiento superficial, aplicado a un curso natural de agua en una cuenca hidrográfica conocida, obtiene resultados de precipitación; aplicando métodos sobre la determinación la escorrentía superficial, con criterios de coherencia, precisión y sustento técnico.

2.1. Curvas de intensidad-duración-frecuencia

Precipitación Media en la Cuenca

A partir de las lluvias medidas en los pluviómetros es posible calcular la precipitación media en la cuenca. Singularmente útil resulta la precipitación media anual, o módulo pluviométrico anual, en la cuenca.

Los pluviómetros deben ubicarse estratégicamente y en número suficiente para que la información resulte de buena calidad.

El problema entonces se refiere al cálculo de la lámina o altura de agua que cae en promedio durante 1 año en una cuenca. Existen para ello varios métodos disponibles, de los cuales los más usados son los tres que se describen a continuación.

Promedio aritmético.- Si $p_1, p_2, \dots, p_n$ son las precipitaciones anuales observadas en diferentes puntos de la cuenca, entonces la precipitación anual media en la cuenca es:

$$p = \frac{p_1 + p_2 + \dots + p_n}{n} \quad \dots (2.12)$$

Es el método más sencillo pero que sólo da buenos resultados cuando el número de pluviómetros es grande.

•Polígonos Thiessen.- El método consiste en (fig. 2.7):

1. Unir las estaciones formando triángulos;
2. Trazar las mediatrices de los lados de los triángulos formando polígonos. Cada polígono es el área de influencia de una estación;
3. Hallar las áreas $a_1, a_2, \dots, a_n$ de los polígonos.
4. Si $p_1, p_2, \dots, p_n$ son las correspondientes precipitaciones anuales, entonces:

$$p = \frac{p_1 a_1 + p_2 a_2 + \dots + p_n a_n}{a_1 + a_2 + \dots + a_n} \quad \dots (2.13)$$

es la precipitación anual media en la cuenca.

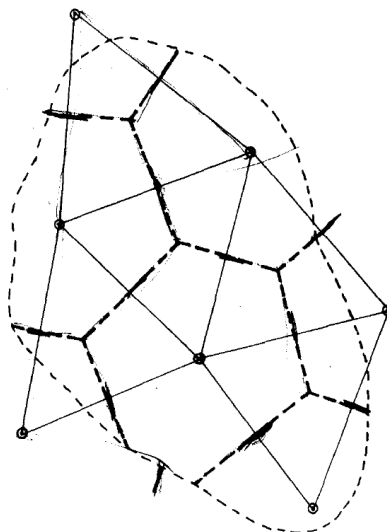
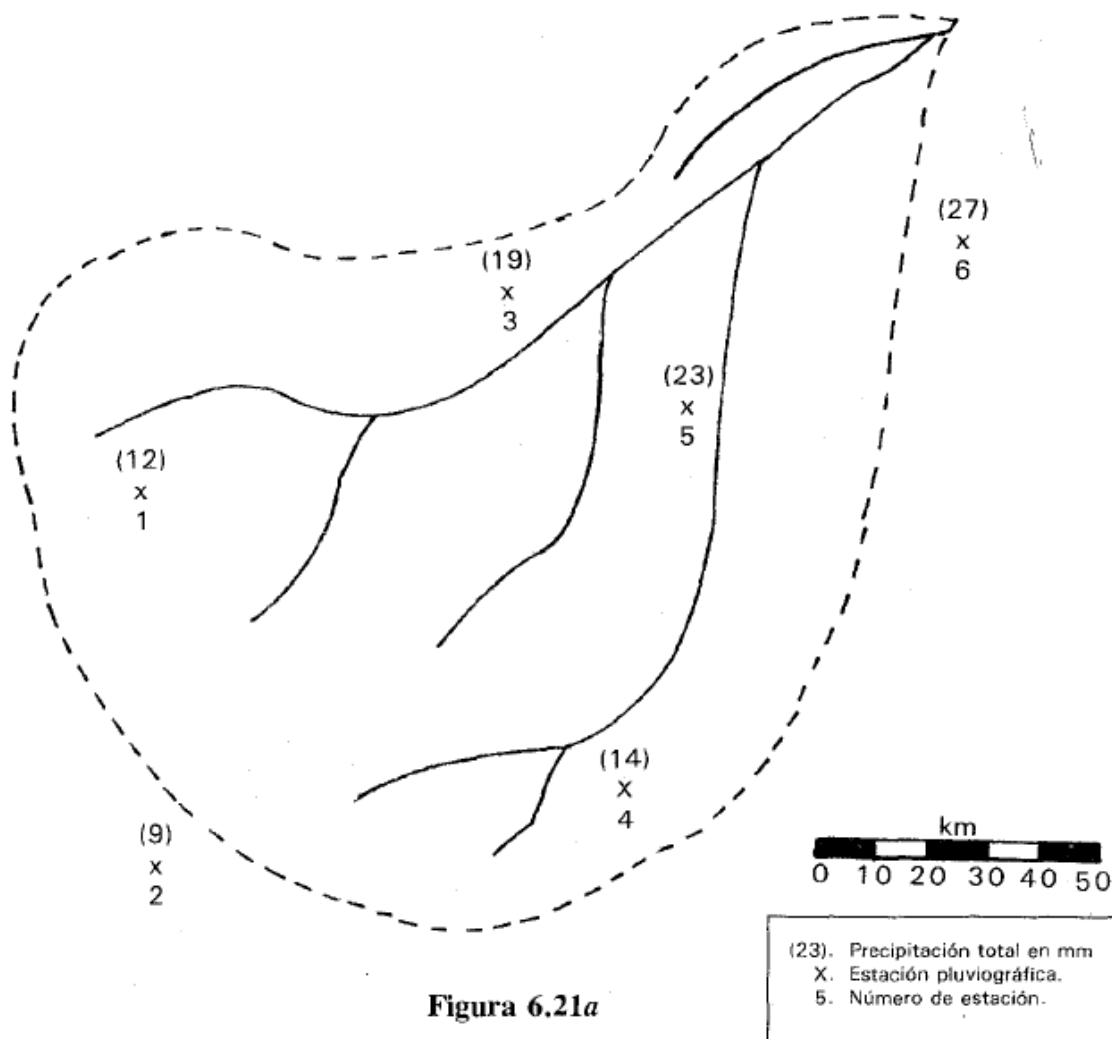


Fig. 2.7 POLIGONOS THIESSEN

Ejemplo 6.3. En la cuenca mostrada en la figura 6.21a se han registrado las alturas de precipitación señaladas en la misma. Calcular las alturas medias de precipitación en la cuenca usando los tres métodos vistos anteriormente.

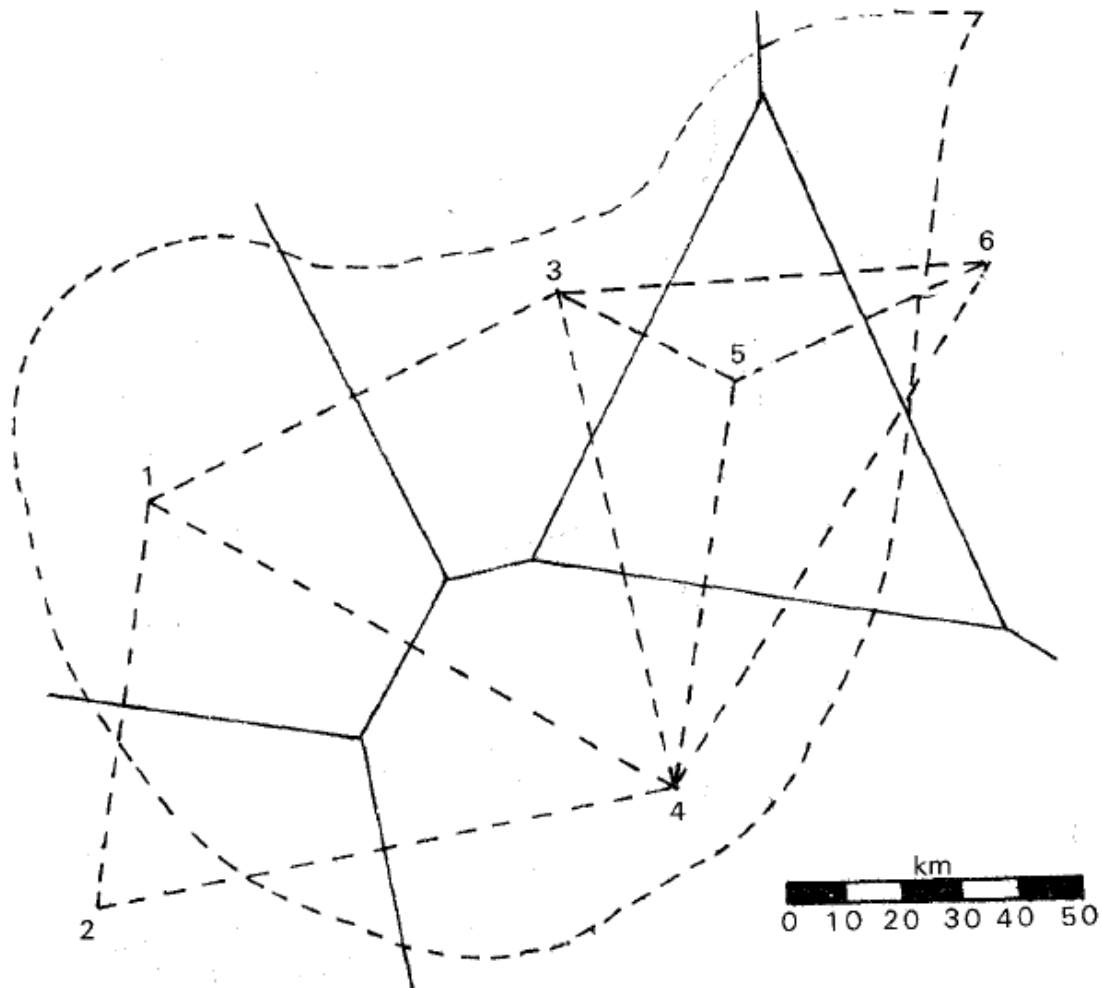


Solución

a) Método aritmético. La precipitación media es (ecuación 6.36):

$$\bar{h}_p = \frac{1}{6} (12 + 9 + 19 + 14 + 23 + 27) = 17.33 \text{ mm}$$

b) Polígonos de Thiessen. En la figura 6.22 se muestra la división en áreas de influencia de la cuenca.

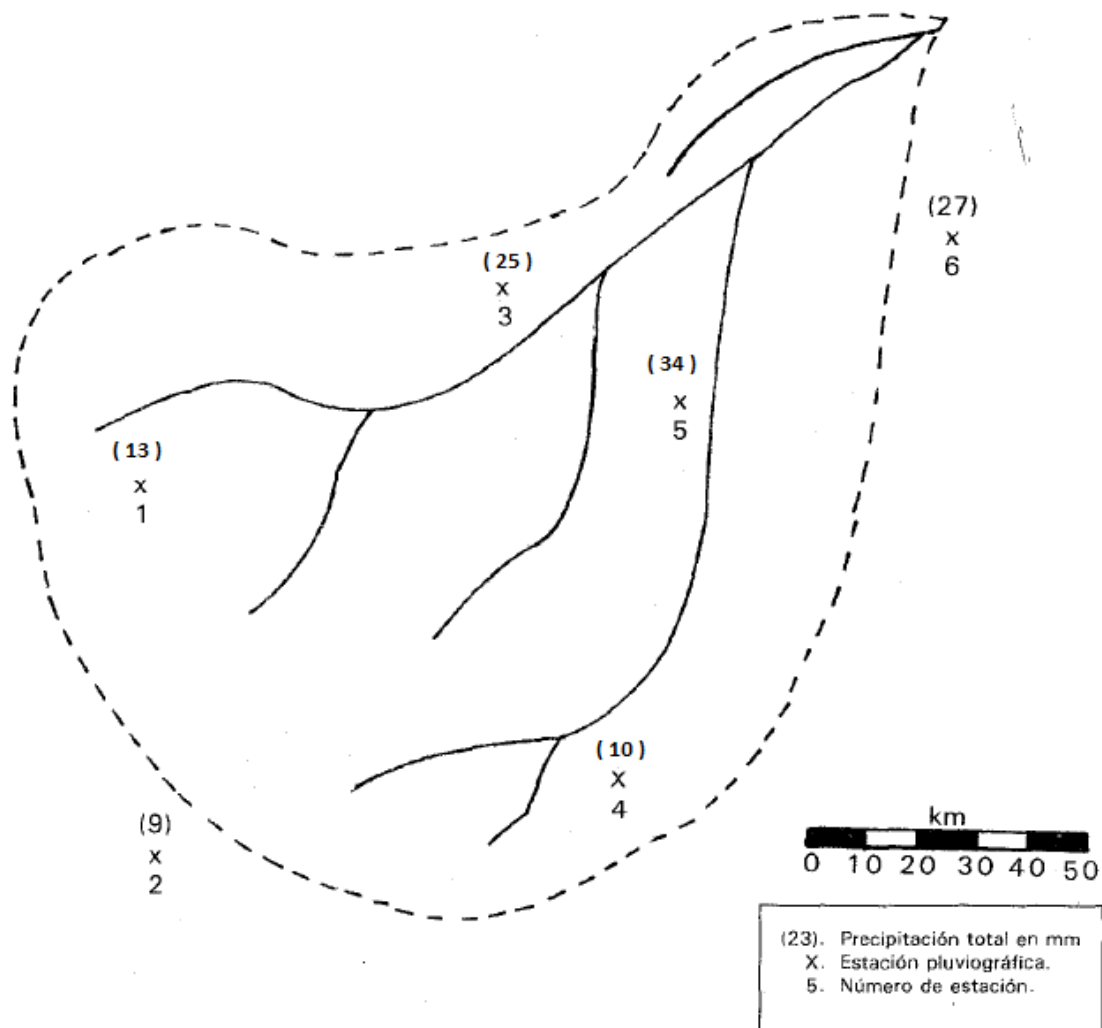


Las áreas de influencia de cada estación son:
 $A_1 = 4\,613 \text{ km}^2$, $A_2 = 1\,170 \text{ km}^2$, $A_3 = 2\,802 \text{ km}^2$, $A_4 = 4\,061 \text{ km}^2$, $A_5 = 3\,314 \text{ km}^2$, $A_6 = 1\,390 \text{ km}^2$. La precipitación media resulta ser (ecuación 6.37):-

$$\bar{h}_p = \frac{1}{17\,350} (12 \times 4\,613 + 9 \times 1\,170 + 19 \times 2\,802 + 14 \times 4\,061 + 23 \times 3\,314 + 27 \times 1\,390)$$

$$\bar{h}_p = 16.7 \text{ mm}$$

Ejemplo: Calcular la precipitación media utilizando los 2 métodos estudiados



Las áreas de influencia de cada estación son:

$$A_1 = 5.24 \text{ km}^2, A_2 = 1.14 \text{ km}^2, A_3 = 3.05 \text{ km}^2, A_4 = 4.23 \text{ km}^2, A_5 = 3.15 \text{ km}^2, A_6 = 1.25 \text{ km}^2.$$

2.2. Escurrimiento.

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.

El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre —una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada— sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca. Conviene dividir estos caminos en tres clases: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo.

3.1 FUENTES DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ESCURRIMIENTO

Una vez que la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, se comienzan a llenar las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie. Este escurrimiento, llamado *flujo en la superficie del terreno*,* se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos (es decir, que no desaparecen entre dos tormentas sucesivas). En su trayectoria hacia la corriente más próxima, el agua que fluye sobre el terreno se sigue infiltrando, e incluso se evapora en pequeñas cantidades. Una vez que llega a un cauce bien definido se convierte en *escurrimiento en corrientes*.

El flujo sobre el terreno, junto con el escurrimiento en corrientes, forma el *escurrimiento superficial*. 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 del escurrimiento se le llama *escurrimiento subsuperficial*;

la otra parte, que se infiltra hasta 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 en llegar), 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*.

3.2 HIDROGRAMAS Y SU ANÁLISIS

Si se mide el gasto (que se define como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo) que pasa de manera continua durante todo un año por una determinada sección transversal de un río y se grafican los valores obtenidos contra el tiempo, se obtendría una gráfica como la de la figura 3.1.

Una gráfica como la anterior se denomina *hidrograma*, como cualquiera que relacione el gasto contra el tiempo. La figura 3.1 representa un *hidrograma anual*; si la escala del tiempo se amplía de tal manera que se pueda observar el escurrimiento producido por una sola tormenta, se tendría una gráfica como la que se muestra en la figura 3.2. Aunque la forma de los hidrogramas producidos por tormentas particulares varía no sólo de una cuenca a otra sino también de tormenta a tormenta, es posible, en general, distinguir las siguientes partes en cada hidrograma (véase figura 3.2):

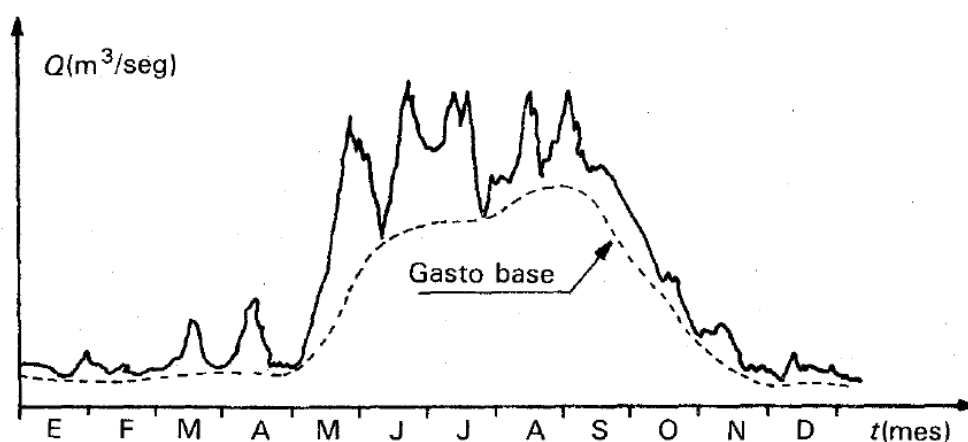


Figura 3.1 Hidrograma.

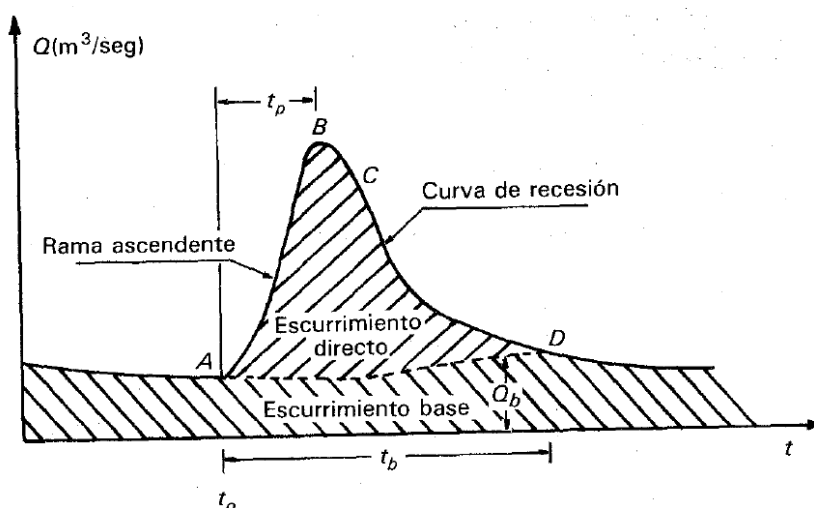


Figura 3.2 Hidrograma aislado.

A: punto de levantamiento. 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 y duración de la lluvia, etc.

B: pico. Es el gasto máximo que se produce por la tormenta. Con frecuencia es el punto más importante de un hidrograma para fines de diseño.

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

D: final del escurrimiento directo. De este punto en adelante el escurrimiento es sólo 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.

T_p : tiempo de pico. Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el pico del hidrograma.

T_b : tiempo base. 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 a partir del punto de inflexión, es una curva de vaciado de la cuenca.

Se han realizado numerosos intentos de correlacionar el tiempo de vaciado del escurrimiento directo con algunas características de las cuencas. El método que mejores resultados ha tenido es el que relaciona dicho tiempo con el área de la cuenca. Una relación muy utilizada es la siguiente (referencia 3.1):

$$N = 0.827 A^{0.2} \quad (3.1)$$

donde N = tiempo de vaciado del escurrimiento directo en días y A = área de la cuenca en km^2 . El punto D del hidrograma estará un tiempo de N días después del pico (véase figura 3.6).

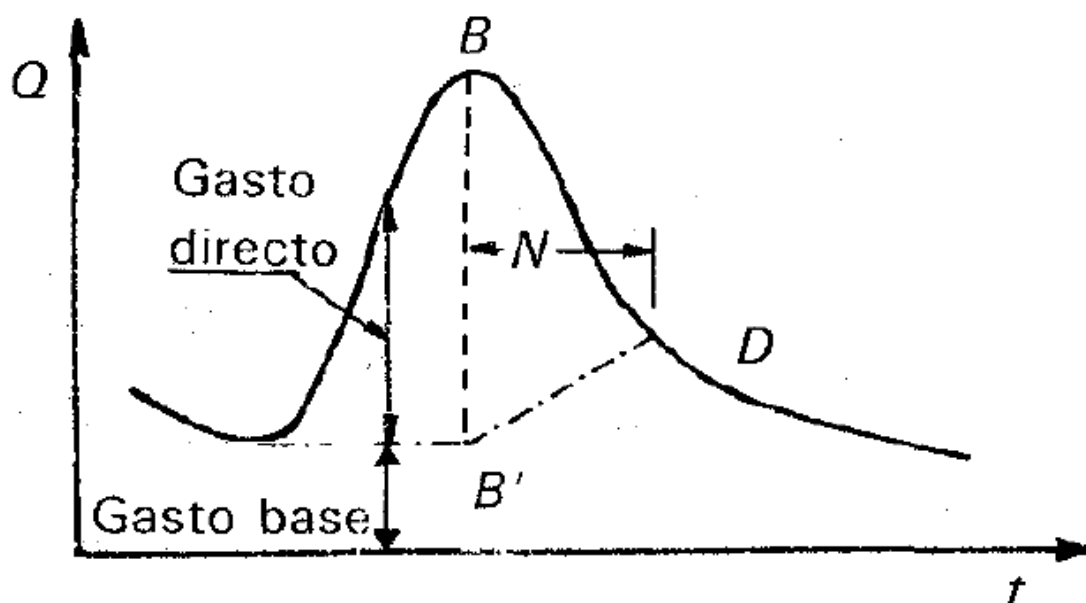


Figura 3.6

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

Unidad III: Evaporación y Transpiración

Logro de Unidad Al finalizar la V unidad, el estudiante desarrolla un informe sobre la determinación de la Evapotranspiración, considerando algún método estudiado, con calidad y cálculos sustentatorios.

3.1. Evaporación.

Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica es importante conocer, por un lado, la cantidad de agua que se pierde por evaporación en grandes depósitos, como presas, lagos o en sistemas de conducción, y, por otro, la cantidad de agua con que es necesario dotar a los distritos de riego, para determinar las fuentes y dimensiones de los sistemas de abastecimiento.

Evaporación es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en los almacenamientos, conducciones y en el suelo, en las capas cercanas a su superficie, a estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera.

Transpiración es el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas. Esta agua es tomada por las plantas, naturalmente, del suelo.

Evapotranspiración es la combinación de evaporación y transpiración.

Factores

De todos los factores que intervienen en la evaporación, los principales son los meteorológicos: radiación solar, temperatura del aire, la presión de vapor, el viento y en menor grado la presión atmosférica. Estos factores son los que provocan la evaporación. Debido a que la radiación solar es el factor más importante, la evaporación varía con la latitud, época del año, hora del día y condiciones de nubosidad.

La tasa de evaporación desde un suelo saturado es aproximadamente igual a la evaporación desde una superficie de agua cercana, a la misma temperatura. Al comenzar a secarse el suelo la evaporación disminuye, y finalmente cesa porque no existe un mecanismo que transporte el agua desde una profundidad apreciable.

En cuanto a los efectos de la calidad del agua, puede decirse que la presencia de sales hace disminuir ligeramente la evaporación. En el agua de mar, por ejemplo, es del orden de 2 % menor que en el agua dulce. Quiere decir que los efectos de la salinidad pueden despreciarse en la estimación de la evaporación de un embalse.

3.2 Evaporación en Embalses

La medida directa de la evaporación en el campo no es posible, en el sentido en que se puede medir la profundidad de un río, la precipitación, etc. Debido a esto se han desarrollado una serie de técnicas para estimar la evaporación desde la superficie de un embalse.

3.2.1 Balance Hídrico

Este método consiste en escribir la ecuación de balance hídrico en términos de volúmenes:

$$S_1 + I + P - O - O_g - E = S_2 \quad \dots (3.1)$$

S ... almacenamiento
I ... volumen de entrada
P ... precipitación
O ... volumen de salida
 O_g ... infiltración
E ... evaporación

Se trata de un método simple, en teoría, porque en la práctica rara vez da resultados confiables. La razón está en que los errores en la medición de los volúmenes que intervienen y de los almacenamientos repercuten directamente en el cálculo de la evaporación. De todos los términos que entran en la ecuación, el más difícil de evaluar es la infiltración, porque debe ser estimada indirectamente a partir de niveles de agua subterránea, permeabilidad, etc.

3.2.2 Nomograma de Penman

Penman en 1948 propuso dos formas para calcular la evaporación diaria, E_o , en mm. a partir de una superficie libre de agua. La primera de ellas mediante el uso de un nomograma y la segunda mediante un balance energético.

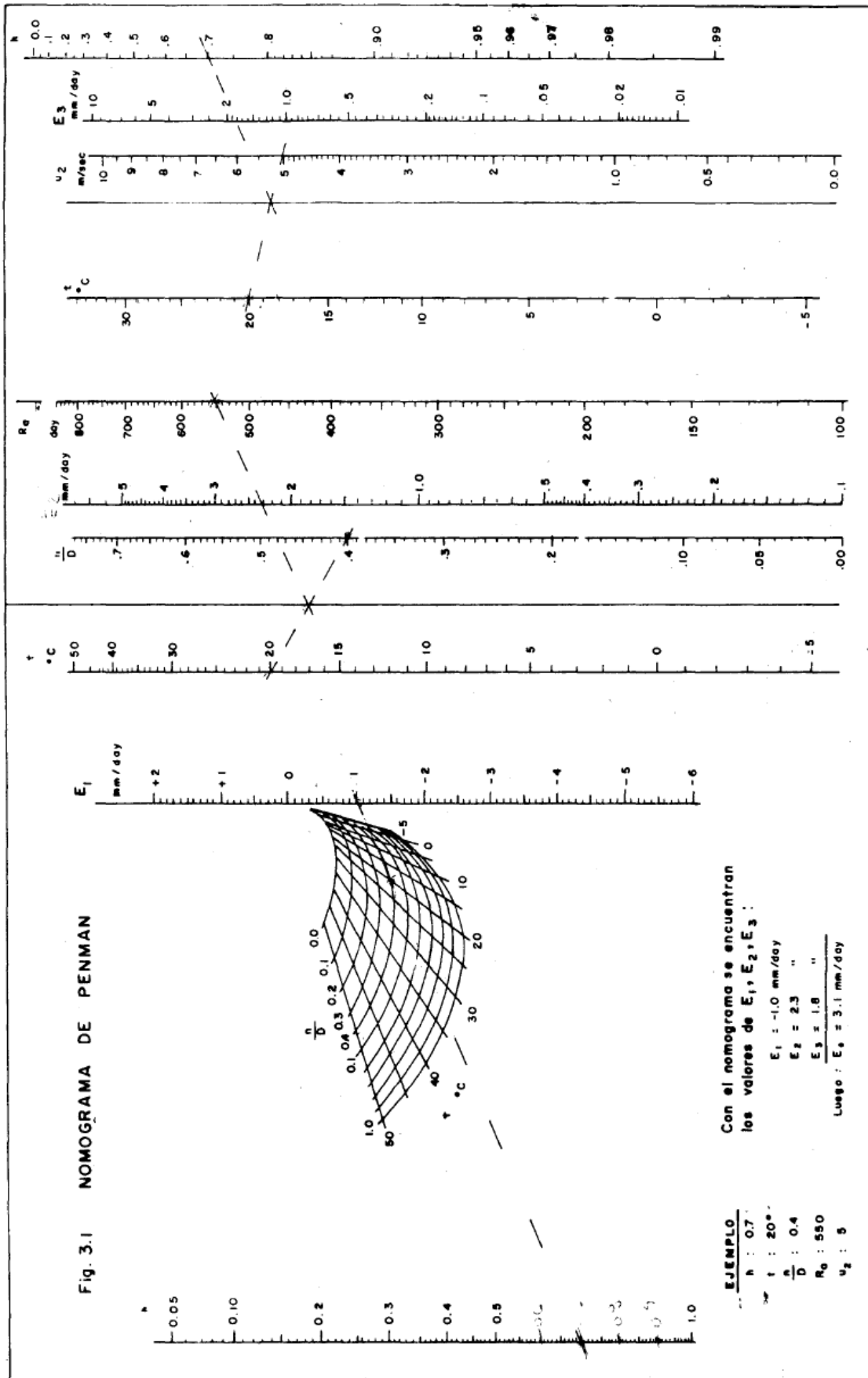
Para el uso del nomograma (fig. 3.1) se requiere la siguiente información:

t ... temperatura media del aire en °C.
h ... humedad relativa media
 u_2 .. velocidad media del viento a 2 m. de altura, en m/sg.

$\frac{n}{D}$.. duración relativa de insolación.
n ... duración de insolación efectiva (medida por un heliógrafo)
D ... duración del día astronómico (desde la salida hasta la puesta del sol).

$\frac{n}{D} = 0$... cielo completamente cubierto

$\frac{n}{D} = 1$... cielo completamente despejado



RA ... valor de Angot. Es la cantidad de radiación solar, en calorías por día en un plano horizontal de 1 cm²., entrante en los límites exteriores de la atmósfera. Es una función de la posición geográfica y la época del año (tabla 3.1).

TABLA 3.1 VALORES DE R_A EN $\frac{\text{CAL}}{\text{Cm}^2 - \text{DIA}}$

Latitud Sur	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0°	885	915	925	900	850	820	830	870	905	910	890	875
10°	965	960	915	840	755	710	730	795	875	935	955	960
20°	1020	975	885	765	650	590	615	705	820	930	1000	1025
30°	1050	965	830	665	525	460	480	595	750	900	1020	1065
40°	1055	925	740	545	390	315	345	465	650	840	995	1080
50°	1035	865	640	415	250	180	205	325	525	760	975	1075

En el nomograma se encuentra E_o como la suma de tres términos:

$$E_o = E_1 + E_2 + E_3$$

4.1.1 Fórmulas empíricas

La mayor parte de las fórmulas empíricas que se han propuesto se basan en el planteamiento aproximado de la ley de Dalton (ecuación 4.2). Existe una gran cantidad de fórmulas de este tipo, pero todas ellas son muy similares, por lo que en este apartado se mencionará solamente una.

Fórmula de Meyer

Propuesta en 1915 (referencia 4.1), esta fórmula es:

$$E_m = C (e_s - e_a) \left[1 + \frac{V_w}{16.09} \right] \quad (4.3)$$

donde

E_m = evaporación mensual en cm.

e_a = presión de vapor media mensual en pulgadas de mercurio.

e_s = presión de vapor de saturación media mensual en pulgadas de mercurio.

V_w = velocidad media mensual del viento, medida a 10 m de la superficie, en km/h.

C = coeficiente empírico, cuyo valor puede tomarse como de 38 para depósitos pequeños y evaporímetros y de 28 para grandes depósitos.

e_a y e_s se determinan con base en la temperatura y la humedad relativa medias mensuales y con ayuda de la figura 6.2 correspondiente al capítulo 6.

Ejemplo 4.1. Obtener la evaporación en el día 15 de agosto en un sitio localizado en la latitud 60°N cuando la temperatura es de 18°C , $n = 6.3$ h, $V_w = 3$ m/s y $h = 60\%$.

Solución

De la tabla 4.1, $D = 15.3$ h

$$\therefore \frac{n}{D} = \frac{6.3}{15.3} = 0.41$$

De la tabla 4.2: $R_c = 800$ (interpolado).

De la figura 4.2 resulta:

$$E_1 = -2.30$$

$$E_2 = 3.40$$

$$E_3 = 0.92$$

$$E_4 = 1.52$$

$$\Rightarrow E = -2.30 + 3.40 + 0.92 + 1.52 = 3.54 \text{ mm/día}$$

Tabla 4.1 Valores de D en h

Latitud N o S	N Jul 17 S Ene 15	Ago 19 Feb 15	Sep 17 Mar 15	Oct 18 Abr 15	Nov 17 May 15	Dic 16 Jun 15	Ene 13 Jul 15	Feb 11 Ago 15	Mar 13 Sep 15	Abr 12 Oct 15	May 13 Nov 15	Jun 14 Dic 15
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
10	12.6	12.4	12.2	11.9	11.7	11.5	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7
20	13.2	12.7	12.2	11.7	11.2	10.9	11.0	11.4	12.0	12.6	13.1	13.3
30	13.9	13.1	12.3	11.4	10.6	10.2	10.4	11.0	11.9	12.8	13.6	14.1
40	14.6	13.6	12.4	11.1	9.9	9.3	9.6	10.5	11.8	13.2	14.3	15.0
50	15.9	14.2	12.5	10.6	9.0	8.1	8.5	9.9	11.7	13.6	15.3	16.3
60	18.0	15.3	12.7	10.0	7.4	5.9	6.6	8.7	11.5	14.3	17.0	18.7
70	24.0	17.6	13.2	8.8	3.6	0	0	6.7	11.3	15.2	21.3	24.0
80	24.0	24.0	14.6	4.2	0	0	0	0	11.2	20.2	24.0	24.0
90	24.0	24.0	24.0	0	0	0	0	0	0	24.0	24.0	24.0

Tabla 4.2 Valores de R_e , g cal/cm² día

Latitud	Mar 21	Abr 13	May 6	May 29	Jun 22	Jul 15	Ago 8	Ago 31	Sep 23	Oct 16	Nov 8	Nov 30	Dic 22	Ene 13	Feb 4	Feb 26
N 90		436	795	1029	1109	1024	788	431								
80	100	436	783	1014	1092	1009	777	431	158	7						7
70	310	541	771	967	1012	962	764	535	312	133	25				25	135
60	460	654	833	962	1008	957	825	648	455	281	150	74	50	75	150	284
50	592	754	893	987	1019	983	885	747	585	426	295	210	181	211	298	432
40	707	831	937	1001	1021	996	928	822	697	561	442	358	326	361	447	570
30	798	891	957	996	1004	989	949	882	788	683	581	507	480	509	585	690
20	866	921	951	963	963	958	943	911	856	788	706	646	623	649	712	792
10	908	924	920	907	899	903	913	914	897	860	813	770	755	775	819	870
0	922	899	862	828	814	824	855	889	912	913	898	877	868	881	904	923
S 10	908	849	783	728	708	725	776	838	897	937	954	959	961	964	964	949
20	866	773	680	611	584	608	674	763	856	934	987	1017	1029	1023	997	946
30	798	674	559	479	449	477	554	665	788	903	993	1051	1072	1056	1002	915
40	707	554	425	339	306	338	421	549	697	844	972	1058	1091	1063	982	853
50	592	420	284	199	170	198	282	416	585	765	928	1044	1088	1048	936	775
60	460	277	144	70	48	70	143	274	455	663	865	1113	1077	1022	872	672
70	316	131	24				24	130	312	518	801	1023	1113	1028	809	555
80	166	7						7	158	442	814	1072	1166	1077	820	447
90										442	825	1088	1183	1094	833	447

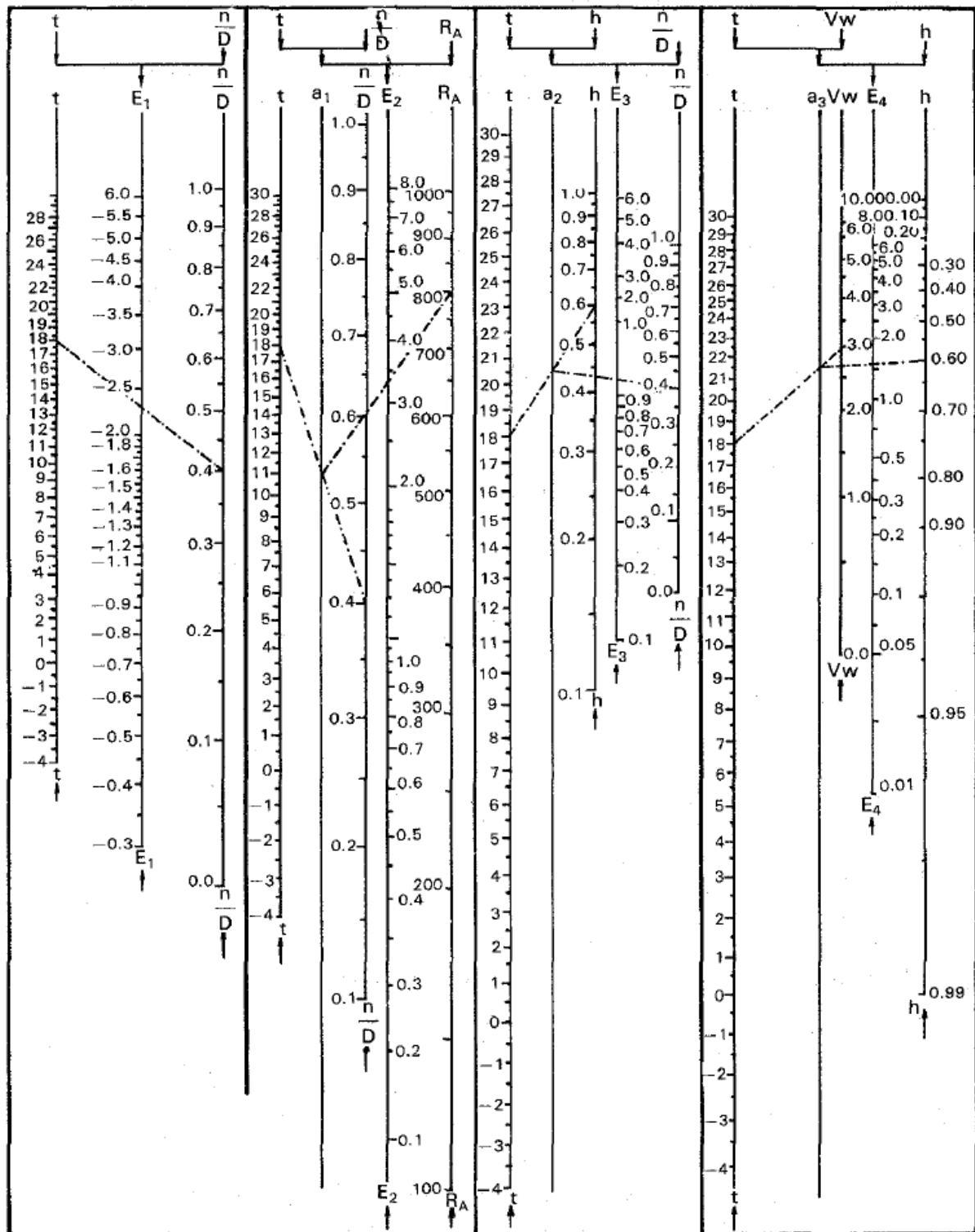


Figura 4.2 Nomograma de Wilson.

Medición Directa de la Evaporación (referencia 5)

Para la confección de proyectos hidráulicos se establecen a menudo, en la zona de interés, estaciones con aparatos que permiten la medida directa, en un largo período, de la evaporación de pequeñas superficies de agua - (tanques de evaporación) o de pequeñas superficies húmedas de papel (evaporímetro Piche) o porcelana porosa (atmómetro Bellani).

Reducción de la evaporación.-

A fin de tener una idea del orden de magnitud de la evaporación en embalses, vamos a considerar los valores que alcanzó la evaporación en Huancayo en un par de años (en mm).

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
1956	159	133	136	149	134	151	176	198	186	229	241	249	2,141
1957	197	142	154	143	137	123	207	208	200	189	217	226	2,143

Suponiendo un coeficiente de 0.7, la lámina de evaporación anual desde un embalse viene a ser:

$$0.7 \times 2,142 = 1,500 \text{ mm.}$$

Para un espejo de agua de 1 Km^2 , el volumen de agua evaporada en un año resulta ser $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, cantidad nada despreciable.

3.2. Transpiración.

Evapotranspiración

Del agua que una planta absorbe del suelo sólo una parte muy pequeña se queda para formar los tejidos de la planta; el resto regresa a la atmósfera en forma de vapor, configurando la transpiración. Este fenómeno de la transpiración constituye una fase muy importante del ciclo hidrológico, porque es el mecanismo principal por medio del cual el agua precipitada a tierra regresa a la atmósfera.

Al estudiar el balance hídrico de una cuenca, el interés recae en la de terminación de las pérdidas totales de agua, es decir por evaporación y por transpiración. Además, desde el punto de vista práctico es muy difícil evaluar por separado cada pérdida. Las pérdidas totales de agua constituyen la evapotranspiración.

El término "evapotranspiración potencial" fue introducido por Thornthwaite y se define como la pérdida total de agua que ocurriría si en ningún momento existiera deficiencia de agua en el suelo para el uso de la vegetación.

Unidad IV: Infiltración y. Estadística Hidrológica

Logro de Unidad Al finalizar la unidad, el estudiante realiza cálculos y estimaciones; aplicando sus conocimientos sobre la determinación de la Infiltración y su aplicación para un punto específico en la cuenca en estudio; determinando en forma aproximada con parámetros obtenidos anteriormente el balance hidrológico en su cuenca en estudio y aplicando sus conocimientos sobre el análisis de consistencia, completación y extensión, con base a algunos procedimientos estudiados.

4.1. Infiltración

4.1 Descripción

Cuando llueve, parte de la lluvia del comienzo es retenida en la cobertura vegetal como intercepción y en las depresiones del terreno como almacenamiento superficial. Conforme continúa la lluvia, el suelo se cubre de una delgada capa de agua conocida como detención superficial y el flujo comienza pendiente abajo hacia los cursos, lo que constituye la escorrentía superficial. Inmediatamente debajo de la superficie tiene lugar la escorrentía subsuperficial y las dos escorrentías, la superficial y la subsuperficial, constituyen la escorrentía directa. La infiltración es el paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra; la percolación es el movimiento del agua dentro del suelo y ambos fenómenos, la infiltración y la percolación, están íntimamente ligados puesto que la primera no puede continuar sino cuando tiene lugar la segunda. El agua que se infiltra en exceso de la escorrentía - subsuperficial puede llegar a formar parte del agua subterránea, la que eventualmente puede llegar a los cursos de agua.

El agua de un río, en general, puede así estar formada de dos partes. Una parte de escorrentía (superficial y subsuperficial) que recibe el nombre de escorrentía directa y otra parte de agua subterránea que recibe el nombre de flujo base.

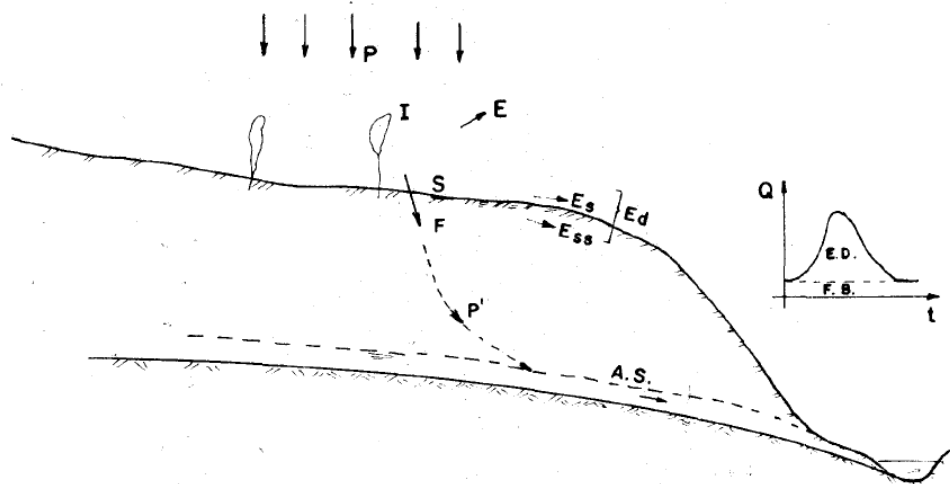


Fig. 4.1 DISTRIBUCION DEL AGUA LLOVIDA

Ecuación de balance hídrico

Escribamos la ecuación de balance hídrico para una cuenca, referida a un período corto.

$$P = I + S + E + F + P_n \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

- P ... lluvia total
- I ... interceptación
- S ... almacenamiento superficial
- E ... evaporación desde el suelo
- F ... infiltración
- P_n ... escorrentía directa, también llamada lluvia neta.

La suma de los términos I, S, E, constituye la retención superficial, de modo que:

$$P = \text{retención} + \text{infiltración} + \text{escorrentía directa} \quad \dots (4.2)$$

(lluvia neta)

7.1.3 Factores que afectan la capacidad de infiltración.

La forma precisa en que se realiza el proceso descrito depende de un gran número de factores, entre los que destacan:

- a) Textura del suelo.
- b) Contenido de humedad inicial.
- c) Contenido de humedad de saturación.
- d) Cobertura vegetal.
- e) Uso del suelo.
- f) Aire atrapado.
- g) Lavado de material fino.
- h) Compactación.
- i) Temperatura, sus cambios y diferencias.

Constituye una preocupación permanente de la Hidrología la obtención de la escorrentía directa que corresponde a una determinada lluvia en un cierto lugar. La primera manera es a través de la fórmula simple de escorrentía:

$$P_n = CP \quad \dots (4.3)$$

El término C recibe el nombre de coeficiente de escorrentía y para evaluarlo han sido sugeridas diversas tablas, de las que se citan 2 (tablas 4.1 y 4.2)

TABLA 4.1 VALORES DE C (*)

Naturaleza de la superficie	Topografía	
	Ondulada S de 5 a 10%	Inclinada S de 10 a 30%
Cultivos generales	0.60	0.72
Cultivos de pastos	0.36	0.42
Cultivos de bosques	0.18	0.21
Areas desnudas	0.80	0.90

(*) Tomada del libro Riegos y Avenamientos, de Enrique Blair (Lima 1957)

TABLA 4.2 VALORES DE C (REFERENCIA 1)

Area residencial urbana sólo casas habitación	0.30
Apartamentos con espacios verdes	0.50
Area de edificios comerciales e industriales	0.90
Areas boscosas, dependiendo del suelo	0.05 - 0.20
Parques, terrenos agrícolas y pastizales	0.05 - 0.30
Asfalto o pavimento de concreto	0.85

Aun cuando la (4.3) parece resolver de manera sencilla el problema de obtener la escorrentía directa P_n correspondiente a una lluvia P , hay que tener presente que la determinación del valor apropiado del coeficiente de escorrentía C es algo sumamente complejo. En la práctica, esta labor se deja para los ingenieros con más experiencia de campo, quienes pueden interpretar mejor las diferentes características de la cuenca en estudio.

La tasa máxima a la cual puede penetrar agua a un suelo, en un sitio en particular y con tasa de abastecimiento suficiente, se llama capacidad de infiltración (f_p). Es máxima al comienzo de una tormenta (f_o) y se aproxima a una tasa mínima (f_c) a medida que el suelo se satura (fig. 4.2). El valor límite está controlado por la permeabilidad del suelo.

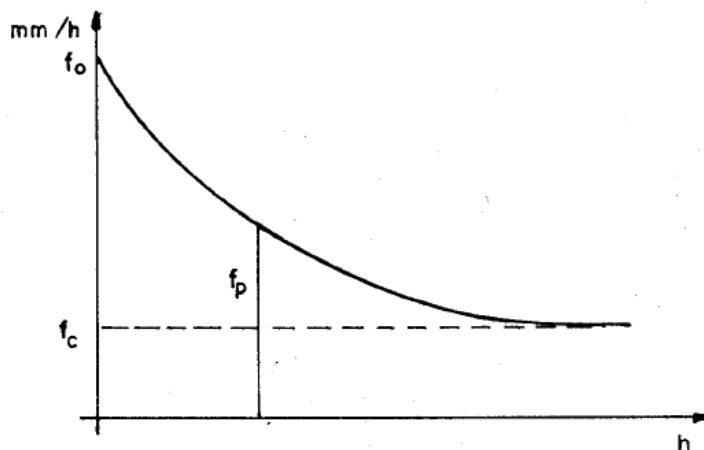


Fig. 4.2 CURVA DE CAPACIDAD DE INFILTRACION

De lo expuesto surge una segunda manera de obtener la escorrentía directa correspondiente a una lluvia (fig. 4.3).

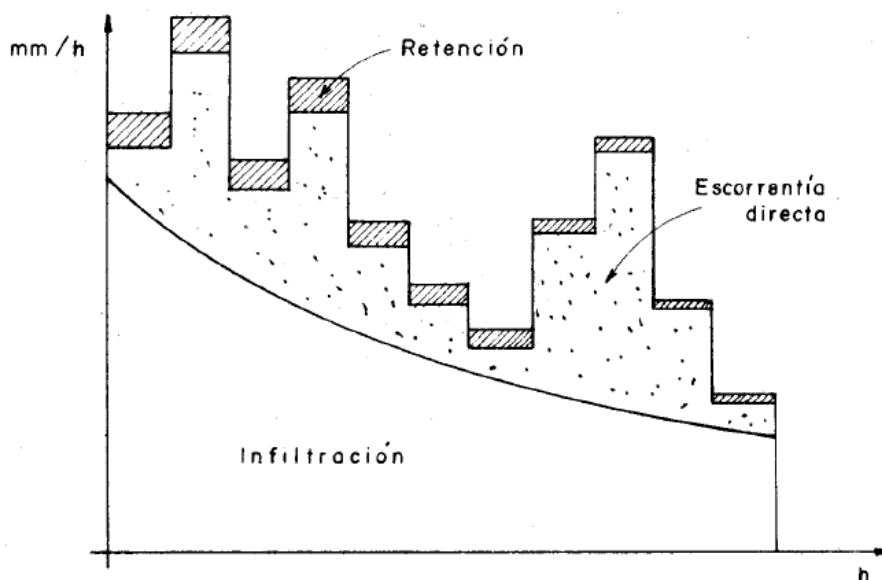


Fig. 4.3 OBTENCION DE LA ESCORRECTIA DIRECTA

El efecto de la cobertura vegetal en la capacidad de infiltración es difícil de determinar ya que también afecta a la intercepción. No obstante, la vegetación aumenta la infiltración en comparación con la del mismo suelo desnudo. La explicación está en que: 1) retarda el flujo de superficie dando al agua más tiempo para que penetre en el suelo, 2) los sistemas de raíces hacen al suelo más permeable; 3) el follaje protege al suelo de la erosión causada por las gotas de agua y reduce la compactación de la superficie del suelo.

4.4 Medición de la Infiltración

La mayoría de datos sobre tasas de infiltración se obtienen mediante ensayos con un infiltrómetro.

En los casos en que existe una amplia variación en los suelos o en la vegetación dentro del área, la cuenca se divide en subcuencas homogéneas, cada una de las cuales está cubierta por un complejo de suelo único. Repitiendo varias veces el ensayo se pueden obtener datos fidedignos de cada subárea.

Un infiltrómetro es un tubo u otro contorno metálico diseñado para aislar una sección del suelo. El área efectiva varía desde menos de 1 pie² hasta varias decenas de pie². El procedimiento clásico consiste en inundar el infiltrómetro, aplicando agua en una lámina de altura constante sobre el área encerrada y medir el tiempo que tarda en infiltrarse. Esta práctica está siendo reemplazada por los simuladores de lluvia. Como en este caso no se puede medir directamente la cantidad de agua que penetra el suelo, la infiltración se calcula como la diferencia entre el agua aplicada y la escorrentía directa medida.

4.2. Relaciones Precipitaciones – Escorrentia.

7.1 Introducción

En el apartado 4.1 se describió cómo el agua de un río, en general, puede estar formada de dos partes: una parte de escorrentía directa y otra parte de agua subterránea. Si bien ambas provienen de las lluvias, sólo la primera obedece a las precipitaciones recientes.

El poder inferir el caudal proveniente de una precipitación tiene múltiples aplicaciones. Por ejemplo, permite obtener los caudales en un río sin estaciones hidrométricas; o extender los registros cortos de caudales a fin de someterlos a análisis estadísticos.

Características de la cuenca y sus efectos

Resulta apropiado describir ahora cómo varias propiedades de la cuenca afectan la tasa y cantidad de la escorrentía.

Pendiente.- A mayor pendiente de la cuenca mayor rapidez en el viaje de la escorrentía, de modo que los caudales pico son mayores. La infiltración tiende a ser menor. Algunas veces se conviene definir como pendiente de la cuenca la pendiente del curso principal pero medida entre dos puntos estándar, por ejemplo a 10% y 85% del punto de desagüe de la cuenca.

Orientación.- La orientación de la cuenca es importante con respecto a la meteorología del área en que ella se encuentra. Si los vientos dominantes tienen un patrón estacional definido el hidrograma de escorrentía dependerá en algún grado de la orientación de la cuenca. Aquí juega papel importante el conocimiento que tenga el hidrólogo de la región en estudio.

Forma.- El efecto de la forma puede demostrarse mejor considerando los hidrogramas de descarga de tres cuencas de diferente forma e igual área sometidas a una lluvia de igual intensidad (figura 7.1). Si cada cuenca se divide en segmentos concéntricos, que se puede asumir tengan todos los puntos a la misma distancia del punto de salida de la cuenca, se puede ver que la forma A requerirá 10 unidades de tiempo antes que todos los puntos de la cuenca estén contribuyendo a la descarga. Similamente B requerirá 5 y C 8 1/2. Los hidrogramas de escorrentía resultantes serán similares a los mostrados en la figura 7.1, cada uno marcado con la correspondiente letra minúscula. La forma B da una corriente de ascenso más rápido que las forma C y A, y también de descenso más rápido.

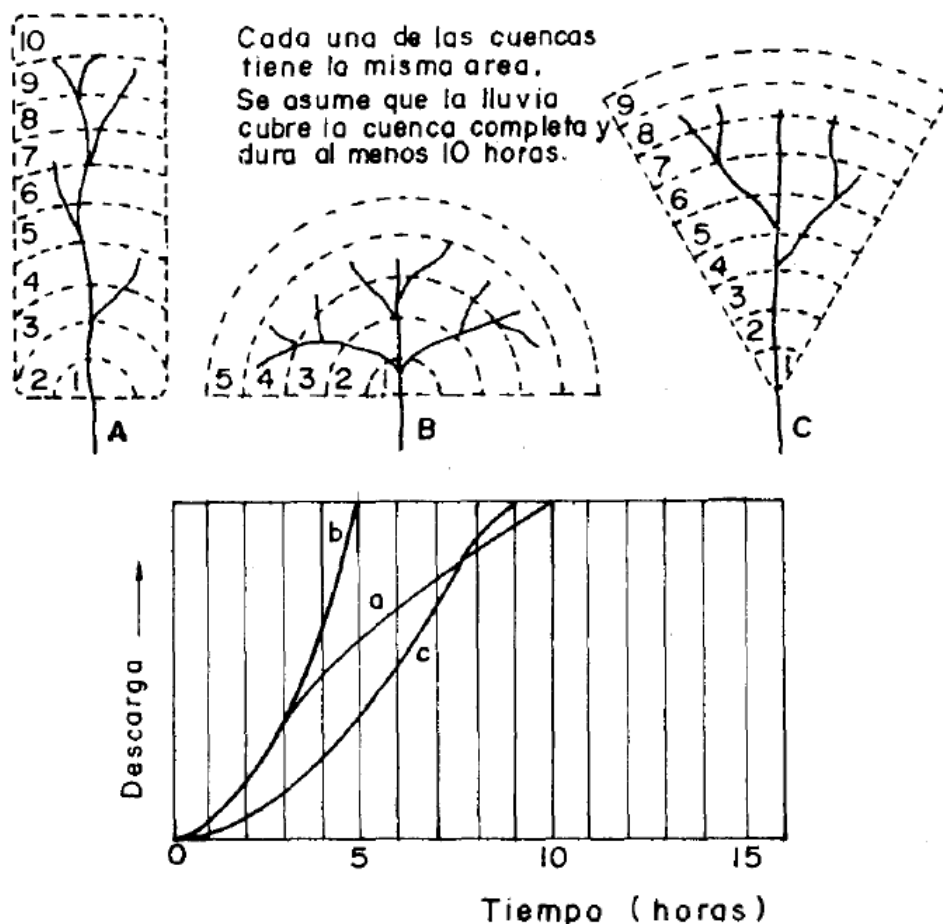


FIG. 7.1 EFECTO DE LA FORMA DE LA CUENCA

Densidad de arroyos.- El esquema de los cursos de agua en la cuenca puede tener un efecto marcado en la tasa de escorrentía. Una cuenca bien drenada tendrá comparativamente hidrogramas más empinados que una cuenca con muchas depresiones superficiales, charcas y similares. Una manera de cuantificar esta densidad de cursos de agua consiste en medir las longitudes de cursos por unidad de área. Otra manera consiste en expresarla mediante el número de uniones de cursos por unidad de área.

Lagos.- Los lagos, lagunas y reservorios actúan como almacenamientos superficiales del agua y tienen el efecto de suavizar los hidrogramas de escorrentía a la salida de las cuencas que los contienen.

Otros.- Aparte de los citados hay otros factores que afectan la tasa y cantidad de la escorrentía, como el déficit de humedad del suelo, la altitud (con su efecto sobre la temperatura y la presencia de nieve en invierno), el uso de la tierra (ya sea área de bosques o tierras de cultivo), la proporción del desarrollo urbano, etc.

Bibliografía

El material presentado en la presente guía pertenecen a las siguientes publicaciones y se presentan con fines académicos y educativos y no con fines comerciales de ninguna índole.

Libro: Fundamentos de Hidrología de Superficie
Autor: Francisco Javier Aparicio Mijares

Cartilla Técnica: Balance Hídrico Superficial
Autor: Juan Julio Ordoñez Gálvez - SENAMHI

Libro: Hidrología para Ingenieros
Autor: Linsley – Kohler – Paulus

Libro: Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil
Autor: Wender Chereque Moran

Artículo: Hidrología
Autor: Alejandro Delgadillo Santander, Ada Moreno Barrios

UN FRÁGIL CICLO Agua, energía y población en Lima
Autores Principales: Juan Carlos Riveros, Camila Germaná, Cecilia Alvarez
Elaborado y publicado en enero de 2014 por WWF Perú, gracias al apoyo financiero de WWF Suiza

Enlaces de Interés:

Ciclo del Agua

<https://www.youtube.com/watch?v=oaDkph9yQBs>

<https://www.youtube.com/watch?v=al-do-HGulk>

Cuenca Hidrológica

https://www.youtube.com/watch?v=JybqL_aVqtE

Trabajos de Investigación:

1. Cuenca del Rio Rímac
2. Cuenca del Rio Chillón

3. Obras de defensa ribereña (Enrocados y Gaviones)
4. Batimetría (ríos, lagos, océanos) y Obras de Dragado.
5. Calculo del caudal pico y consideraciones de diseño de un sistema de drenaje pluvial. (Software HEC –HMS).
6. Calculo del caudal pico y consideraciones de diseño de alcantarillas. (Software HEC –HMS)
7. Consideraciones de diseño de una pequeña represa.
8. Métodos de aforo (medición de caudales en canales y ríos)
9. Ley de Recursos Hídricos y su Reglamento. Calidad del agua. (características físico químicas).
10. Métodos de Aforo para canales y ríos.
11. Método experimental para el cálculo de Evaporación.
12. Métodos para el cálculo del perímetro y área de una Cuenca.

Contenido de los Trabajos de Investigación:

- Marco conceptual / Definiciones
- Objetivos
- Consideraciones de diseño
- Ejemplos numéricos o de aplicación práctica en Ingeniería.
- Ejemplos de obras en Perú.

Presentación con un máximo de 20 láminas (diapositivas) sobre el tema a exponer. Tiempo de exposición 10 minutos por integrante. Última parte de la exposición preguntas del profesor y/o alumnos asistentes

