

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES DE HIDROLOGÍA

SUPERFICIAL

1.1 PRECIPITACIÓN

La precipitación, mejor conocida como lluvia, es uno de los fenómenos más importantes en los ámbitos del abastecimiento y control del agua. Esto es debido a la gran influencia que tiene en la hidrología y en general en todo ecosistema ya sea por su presencia o ausencia. Regresando al enfoque más técnico, y más concretamente desde el punto de vista de la ingeniería, la precipitación tiene su importancia directamente sobre el suministro de agua, que es necesario para el sustento de las principales poblaciones, esto sucede porque las fuentes de abastecimiento requieren precipitaciones favorables, como puede ser desde la recarga del vaso de una obra hidráulica como también, de los mantos freáticos.

A continuación se dan a conocer conceptos y definiciones relacionados con la precipitación y con su estudio, que son de utilidad para el actual proyecto.

1.1.1 Definiciones

Precipitación: Se refiere a la caída de agua a la superficie terrestre, esto es debido a la condensación del agua desde los cuerpos de agua como ríos, lagos y el océano. La precipitación concierne a todas las formas que pueda adoptar el agua atmosférica con lo cual se incluye no solo lluvia sino también nieve, granizo, neblina etc.

Ciclo hidrológico: Para comprender mejor las precipitaciones, hay que considerarlas como parte de un proceso mucho más complejo, ya que las condiciones para que existan se encuentran distribuidas en una serie de sucesos a los cuales se les llama ciclo hidrológico.

Tormenta: Suceso meteorológico en el cual se delimitan las precipitaciones durante un periodo de tiempo para su registro y estudio.

Altura de precipitación: Valor representativo de la cantidad de lluvia presentada en una tormenta.

Presión atmosférica: La presión se define como el resultado de aplicar una fuerza a un área determinada. En el estudio de los fluidos se ha establecido que la presión que este ejerce en los límites de su forma es equivalente al peso de una columna virtual compuesta por el fluido que está en contacto con el área mencionada en su punto más bajo. Es por esto que la presión atmosférica se ha definido como el peso de la columna de aire considerando dicha columna desde la superficie de estudio hasta los límites de la atmósfera.

Siguiendo este razonamiento se puede decir que la presión atmosférica varía en magnitud a proporción inversa a la altitud de la superficie en estudio. Es decir que a mayor altitud menor será la presión atmosférica ejercida por la columna de aire. La altura es medida tomando como referencia el nivel del mar.

La mayor presión atmosférica registrada es, como ya se ha mencionado la que se presenta a nivel del mar, existen dispositivos que pueden medir la magnitud de la presión actuante con bastante precisión. Estos son llamados barómetros los cuales funcionan creando una interfaz entre cierta cantidad de mercurio y el aire del ambiente. Posteriormente se hace una comparación entre la altura de la columna de mercurio producida por la interacción y se determina la presión necesaria para haber elevado el mercurio hasta dicho punto.

La presión atmosférica máxima registrada se ha fijado en una columna de 760 mm de mercurio. Este valor ha presentado varias equivalencias y se han propuesto varias unidades de medición para su estudio como por ejemplo:

$$1bar = 760mmHg \quad \text{Bares}$$

$$1atm = 1.033 \frac{kg}{cm^2} \quad \text{Atmósferas}$$

Por supuesto las unidades tienen equivalencias entre ellas, de hecho se ha establecido una fórmula para calcular la presión atmosférica teniendo como dato inicial la altitud de la zona de estudio con respecto al nivel del mar la cual se enuncia a continuación:

$$p = 1013.2 \left(\frac{288 - .0065z}{288} \right)^{5.256}$$

Donde las unidades de altitud expresadas por la variable “z” están expresadas en metros y las unidades de presión de la variable “p” se expresan en mb, es decir milibares.

Presión de Vapor: Como se ha explicado anteriormente los gases en el aire generan determinada presión sobre la superficie es así como surge el concepto de presión de vapor. Este concepto no es muy distinto de la presión atmosférica sin embargo existen varios factores particulares que deben ser tomados en cuenta. Como se sabe la atmósfera es una mezcla de varios gases en conjunto, como son el oxígeno, el hidrógeno y el dióxido de carbono por mencionar algunos, sin embargo el valor buscado como presión de vapor es aquel que solo toma en cuenta la cantidad o concentración de vapor en una columna de aire, es decir, sin tomar en cuenta la presencia de los otros gases.

Es así como el peso de una columna de vapor sobre un área es definido como presión de vapor. Los factores que deben ser tomados en cuenta están fundamentados en la ley de adsorción y desorción la cual señala que el intercambio de agua en una fase compuesta por un líquido y un gas, representado análogamente como un cuerpo de agua en contacto con la atmósfera depende de forma importante de las condiciones de presión y temperatura del ambiente, en este caso de la atmósfera. Con base en esta ley se puede afirmar que la presión de vapor puede modificarse si varían éstas condiciones en los dos medios, por esto se puede asumir que a determinadas condiciones de presión y de temperatura existe un valor máximo del vapor que puede aceptar el aire en cuestiones de vapor, esto puede considerarse una saturación del mismo, es por esto que es conocido como punto de rocío.

Humedad absoluta: En cuestiones de las condiciones favorables para la precipitación es necesario que se tenga un porcentaje significativo de humedad en el aire es decir que exista agua evaporada en una cantidad suficiente en el medio para que pueda tener lugar la precipitación. Esto es medido con una serie de coeficientes los cuales representan la cantidad de vapor en un volumen determinado de aire, que es expresado por la fórmula:

$$\rho_v = \frac{\text{masa de vapor}}{\text{volumen de aire}} = \frac{M_v}{V}$$

Donde ρ_v es la humedad absoluta.

Agua precipitable: Para comprender este concepto es importante tomar en cuenta la explicación que se dio acerca del punto de rocío y la humedad en el aire ya que ambos son significativos en la determinación del agua precipitable del medio.

Primero, para definir el significado de agua precipitable se debe entender las condiciones que la provocan. Como se ha mencionado, el agua que se encuentra en forma de vapor en el aire no puede seguir aumentando de forma indefinida, sino que dependiendo de las condiciones de presión y temperatura en la zona de estudio existe un determinado límite de agua que el aire puede contener como vapor, para fines de este concepto se define como zona, al área determinada sobre la cual se encuentra una columna de aire específica.

Este límite puede variar dramáticamente en una misma zona, y es lo que hace posible el fenómeno de la precipitación. Haciendo un seguimiento detallado del proceso concerniente del ciclo hidrológico se llega al proceso que se explica a continuación.

En primer lugar, debido al principio de la evaporación, en que el agua bajo condiciones establecidas de presión y temperatura puede alcanzar, si se hace aumentar su temperatura, un punto llamado punto de ebullición a partir del cual el agua empieza a transformarse en vapor mientras su temperatura aumenta y es así como se empieza a saturar el aire del medio con vapor hasta que alcanza su límite.

Lo anterior lleva a la pregunta ¿cuándo se alcanza el límite? La respuesta es evidente mientras se tenga presente lo ya mencionado. Se tendría que contestar que el aire seguirá aceptando el vapor de agua hasta que el mismo alcance el grado de saturación mejor conocido como punto de rocío.

Aún sabiendo la naturaleza del punto de rocío y el límite de vapor en el aire es bastante ambiguo afirmar que el aire llega a saturarse ya que el vapor no permanece en condiciones constantes en el aire, por lo cual el seguimiento del proceso conduce la

atención al medio que contiene el vapor de agua ya que es el mismo que establece las condiciones en las que el vapor fluye e interactúa.

Como se mencionó en el apartado de presión atmosférica, ésta puede variar en proporción inversa a la altitud en que la presión esté siendo medida, a palabras más sencillas, la presión tiene una disminución gradual a medida que la altitud crece. Pero porqué esto es relevante para el fenómeno de la precipitación. La respuesta se encuentra en que al haber menos presión interactuando con el vapor, este empieza a aumentar su volumen. Se sabe por la ley general de los gases que al aumentar el volumen del vapor, este tendrá una disminución en su temperatura.

Esto inducirá el alcance del punto de rocío y comenzará la condensación de la masa de vapor. Esto ocurre debido a que las condiciones de temperatura y presión van cambiando conforme el vapor asciende. Debe recordarse que en condiciones de menor presión y temperatura el punto de rocío es más bajo, es decir, la cantidad de vapor que el aire puede contener se vuelve menor, así que una masa de vapor que ha ascendido hasta cierto punto en el aire y no lo satura, puede llegar a saturarlo a medida que asciende, incluso si la masa de vapor es la misma.

Dicho esto y tomando en cuenta que inicia el fenómeno de condensación, aún así las gotas o mas correctamente partículas de agua que se forman de dicho suceso son demasiado pequeñas entre 5 y 10 micras y por lo tanto su peso despreciable, esto provoca que incluso habiéndose condensado dichas partículas, estas permanezcan suspendidas en el aire.

No es hasta que se forman núcleos de condensación cuando dichas partículas de agua empiezan a unirse unas con otras, se forman gotas de mayor tamaño de 100 a 500 micras que pueden vencer la fricción del aire y finalmente precipitarse hacia la superficie terrestre. Es así como puede concluirse que el agua precipitable del ambiente, corresponde realmente a la magnitud de la masa de vapor presente en el mismo, es decir toda cantidad de agua presente en el aire, tiene la capacidad de precipitarse.

Intensidad: La intensidad de una tormenta está dada por la precipitación existente en la misma. El concepto en sí no es tan simple ya que se debe tomar en cuenta que una tormenta tiene una duración bastante variable con respecto de otros sucesos del mismo tipo y la cantidad de lluvia que se presenta en cada una de ellas no es de ninguna forma proporcional a la duración de las mismas.

Con esto se quiere decir que la intensidad de una tormenta se expresa como la altura de precipitación dada en un determinado periodo de tiempo, las unidades para expresarla por lo general son milímetros por hora. Es así como puede afirmarse que una tormenta intensa es aquella cuya altura de precipitación medida es grande con respecto a su duración, mientras que una tormenta que no lo es, tiene una altura de precipitación pequeña en un periodo de tiempo muy grande en comparación a la anterior.

La expresión para obtener la precipitación es la siguiente:

$$i = \frac{\text{alturadeprecipitación}}{\text{Duración}} = \frac{hp}{T} \left[\frac{mm}{hr} \right]$$

Curva masa: Esta se refiere a un tipo de gráfica que contrapone la altura de precipitación expresada en milímetros de lluvia, en el eje de las ordenadas, contra el tiempo transcurrido, por lo general expresado en horas, en el eje de las abscisas.

1.1.2 Mediciones de precipitaciones

Una vez conocido el fenómeno de la precipitación el siguiente paso es estudiarla para cuantificarla con el fin de registrar a detalle los aspectos e implicaciones que posee.

Por lo general las mediciones de la precipitación son realizadas en estaciones meteorológicas repartidas de forma sistemática dentro del área de estudio. Dichas estaciones tienen la función de recabar información y datos acerca del estado climático en

una zona determinada, cada estación cumple con ciertos estándares para garantizar la fiabilidad de los datos recabados.

Las estaciones meteorológicas o climatológicas poseen una determinada zona de influencia, es decir, los datos que recopila cada estación son significativos únicamente para una zona específica o de influencia, la información requerida puede provenir de más de una estación, dependiendo de la extensión del área de estudio.

Las estaciones tienen la capacidad de recolectar no solo datos de precipitaciones, sino además trabajan con información concerniente a la evaporación, velocidad del viento, presión atmosférica local, etc.

En lo concerniente a la medición de las precipitaciones existen diversos dispositivos que pueden aportar los datos necesarios para su estudio, ya que los factores que afectan la precipitación, como se describió en el inciso anterior, son variados en número y naturaleza y es de esperar que para la medición de cada uno de ellos exista un instrumento especializado para su medición y un protocolo para el registro y manejo de los datos.

A continuación se mencionan los instrumentos pertinentes y se adjunta una explicación de los principios de su funcionamiento.

Barómetro

Es un instrumento utilizado para medir la presión atmosférica por medio del principio de diferencia de densidades entre sustancias y la presión que se ejerce en la fase entre estas. De forma más detallada, el barómetro funciona con el principio de las presiones que ejercen entre sí fluidos de diferentes densidades.

Lo primero a tener en cuenta son las condiciones de cada uno de los fluidos, esto es clave para conocer la presión de uno o de otro. Primero que nada se desea saber la presión que ejerce la columna de aire sobre el área de estudio y ya que esta es técnicamente uniforme

debido a su naturaleza gaseosa, solo debe seleccionarse un punto de contacto representativo de la columna de aire. Dicho punto, técnicamente, puede ser cualquiera en el área, mientras se tenga presente que la variación de la altitud es lo que hace variar la presión, así que solo puede limitarse a un punto representativo en un plano localizado a la altitud deseada.

Una vez elegido el punto donde se localizará la interfase la pregunta es cómo medir la presión, si técnicamente no puede medirse directamente la columna de aire de una forma conveniente, la respuesta se encuentra en el segundo fluido, de naturaleza conocida el cual proporciona datos iniciales para interpretar los datos.

Se sabe que cuando dos fluidos se encuentren en contacto en un punto, aún cuando estos se encuentran en distintos niveles, ejercen la misma presión en el punto de aplicación una vez alcanzado el equilibrio. También se sabe que la presión ejercida por cada uno de los fluidos en el punto de contacto es equivalente al producto de su peso específico y la altura de la columna de fluido medida desde el nivel actual del fluido hasta la altura del punto de contacto lo cual se expresa de la siguiente forma:

$$P = \rho_{\text{fluido}} g (\Delta h)$$

Donde “ P ” es la presión, ρ_{fluido} es la densidad del fluido y (Δh) es la diferencia de alturas entre el punto de aplicación y la superficie de la columna del fluido y g es la constante de la aceleración de gravedad.

Con esto se llega al razonamiento de que si se conocen las características de uno de los fluidos y se somete a condiciones de control, es posible determinar la presión que el otro fluido ejerce, ya que es la misma que el fluido de control ejerce sobre el mismo punto. Primero que nada se confina al fluido de control en un contenedor graduado que permita medir la columna del mismo. Dicho contenedor será hermético y tendrá salida únicamente por el punto de contacto con el otro fluido (figura 1.1).

Finalmente, solo se debe observar cómo el sistema entra en equilibrio y se estabiliza la variación producida en las columnas de los fluidos, con lo cual solo habrá que medir la

altura de la columna del fluido de control ya que sus características son conocidas. Se tiene la densidad del mismo por lo cual solo hace falta calcular la presión con la expresión planteada ya que la presión que ejerce el fluido de control es la misma que la de el otro fluido que ahora puede llamarse aire de forma concreta, se toma como presión atmosférica al valor obtenido.

El fluido de control por lo general suele ser mercurio ya que por su gran densidad la columna equivalente no necesita ser demasiado alta y esto facilita el manejo del dispositivo.

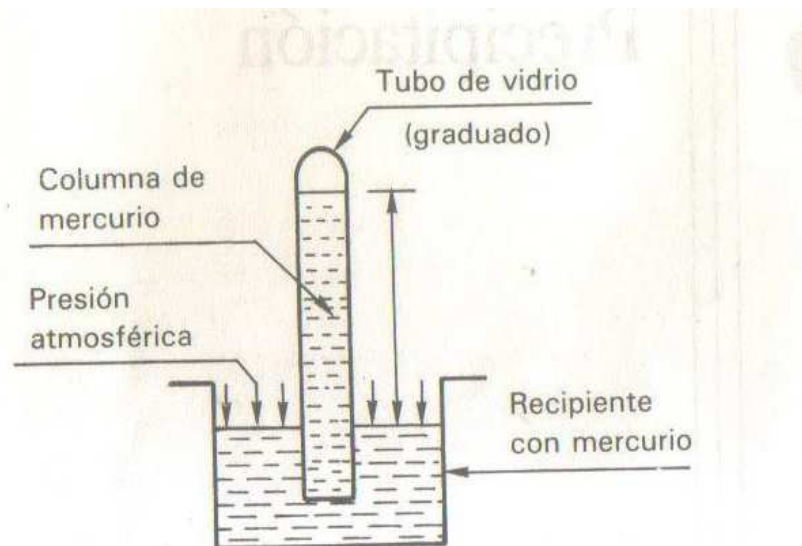


Figura 1.1. Esquema de un barómetro. (Referencia 6)

Pluviómetros y pluviógrafos

Los pluviómetros son dispositivos simples que permiten tomar lecturas de la altura de precipitación en una estación meteorológica. Sin embargo tienen una desventaja, el hecho de que no sea un dispositivo automático. Por lo general un pluviómetro solo puede tener el registro de la altura de precipitación que se produjo en un día.

Una persona comisionada debe tomar la lectura de la altura de precipitación cada día a la hora determinada por el Servicio Meteorológico Nacional, por lo general las lecturas son tomadas a las 8:00 horas.

Sin embargo este dispositivo se presta a imprecisiones debido a que el registro abarca un periodo de 24 horas, esto evita que se tenga un registro más preciso que pueda tener en cuenta datos como la intensidad de las tormentas y si se presentó más de una en el periodo transcurrido durante el día.

El dispositivo consta de un recipiente por lo general metálico, en forma de cilindro que contiene un recipiente más pequeño en su interior. La captación de las precipitaciones se da por medio de un cono que funge como área de captación y que se encuentra en la entrada del recipiente abarcando toda la superficie del mismo. Dicho cono conduce el agua hacia el recipiente más pequeño y deposita ahí el agua.

El recipiente interior del pluviómetro tiene una característica principal, la cual consiste en que el área de su base es diez veces menor a la del recipiente exterior, es decir al área de captación, esto es con el propósito de que la altura de precipitación pueda ser más apreciable. La relación provoca que cada centímetro medido dentro del recipiente más pequeño sea equivalente a 1 mm de agua en el recipiente grande, cuya área de captación es la que se toma en cuenta.

Esto ayuda en gran medida a tener lecturas más apreciables y precisas, al utilizar escalas mucho mayores se incrementa en gran medida la precisión del dispositivo. Cabe

mencionar que se coloca una malla en la entrada del pluviómetro para evitar la entrada de basura o sólidos que puedan alterar la lectura.

En la figura 1.2 se presenta el esquema descriptivo de un pluviómetro.

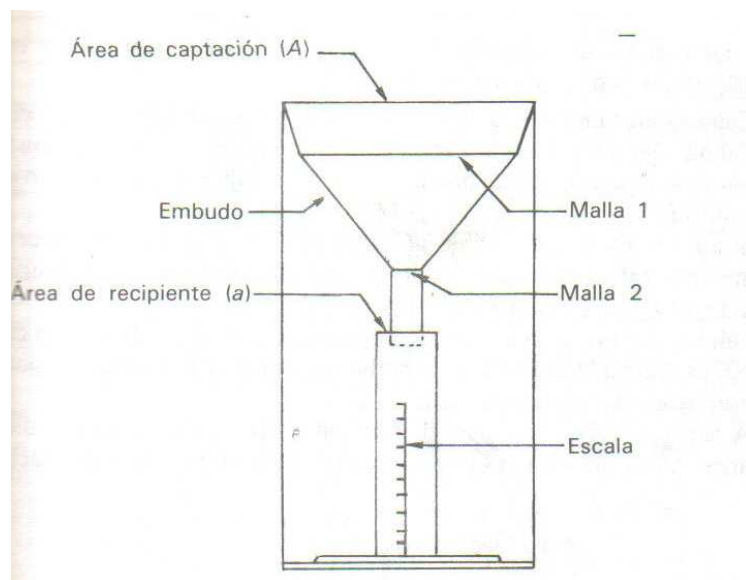


Figura 1.2. Esquema descriptivo de un pluviómetro. (Referencia 6)

Otro de los instrumentos para medir la altura de precipitación es el llamado pluviógrafo. Este dispositivo tiene un propósito parecido al del pluviómetro pero cuenta con diferencias sustanciales tanto en su funcionalidad como en la información que arroja la cual es considerablemente más precisa.

El pluviógrafo es un dispositivo que trabaja en cierta forma de manera automática, debido a que no necesita de un supervisor por grandes periodos de tiempo los cuales varían dependiendo del tipo de lecturas que se estén tomando. Estas pueden ir desde lecturas por hora, por días o incluso por semanas dependiendo los requerimientos.

El pluviógrafo como su nombre lo dice da un registro gráfico de las tormentas, más en concreto de su altura de precipitación con la ventaja de que este registro se da en tiempo real y de forma constante. Esto quiere decir que en el intervalo de las lecturas se tiene la altura de precipitación puntual de cada instante que se encuentre dentro de la duración de una tormenta con lo cual la cantidad de información que puede obtenerse es considerablemente mayor que con un pluviómetro.

Un ejemplo claro es que este dispositivo es capaz de mostrar datos con los cuales puede diferenciarse el inicio y el final de una tormenta además de poder diferenciar cuando no están teniendo lugar. Al tener un registro puntual de cada instante de una tormenta se puede saber también que tan intensa fue la misma al comparar la altura de precipitación con la duración de la tormenta.

Este dispositivo funciona con un filamento que es capaz de imprimir una línea sobre un rollo de papel llamado registro pluviográfico o pluviograma el cual está impreso con una escala que varía dependiendo de los intervalos del tiempo en el que se desee medir. El registro en contacto con el filamento tiene una rotación de forma constante de tal manera que la línea impresa expresa de forma real la lectura en ese instante.

El filamento está conectado a un flotador, el cual al subir las precipitaciones en el almacenamiento desplaza al filamento indicando un aumento en la altura de precipitación sobre el pluviograma que sigue girando de forma constante. Para el control de excedencias dentro del depósito del pluviógrafo existe un sistema el cual una vez que el filamento ha alcanzado la parte superior del registro, el depósito se drena de forma instantánea lo cual no provoca ninguna alteración en el registro ya que el registro se da a través de periodos de tiempo significativamente más largos que el tiempo de drenado, es por esto que no se pierden datos en el proceso (figura 1.3).

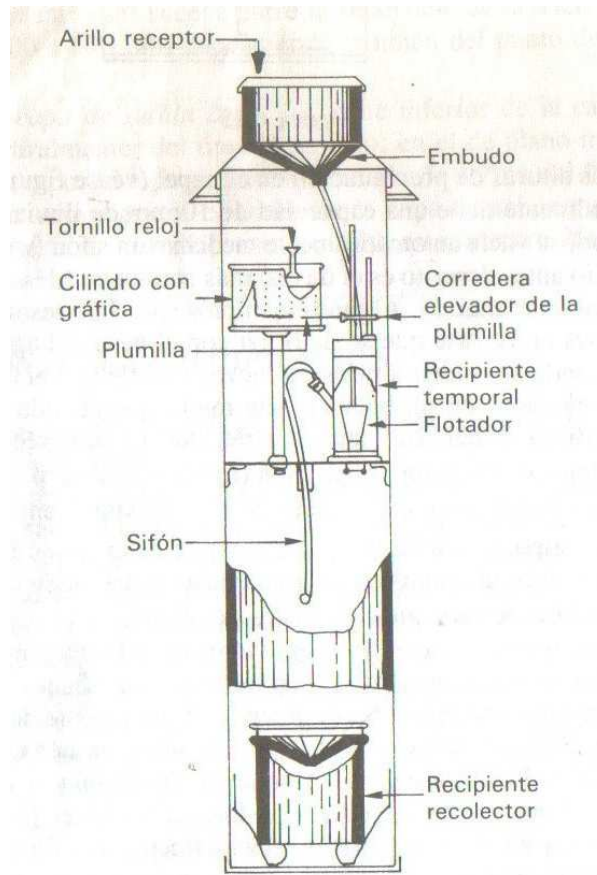


Figura 1.3. Esquema de un pluviógrafo. (Referencia 6)

1.1.3 Análisis de los datos de precipitación

Los datos obtenidos por medio de las mediciones deben someterse a un análisis para determinar la tendencia que presentan. Para esto existen métodos variados de procesamiento que permiten la interpretación de resultados para fines de diseño, con la consideración inicial de que los datos recabados, son representativos.

El análisis o estudio de estos datos, permite adjudicar a la información recabada un comportamiento, que si bien no es exacto, tendrá una precisión considerable al tratar de reproducir los sucesos meteorológicos posteriores.

Primero que nada se tiene un concepto muy importante el cual se encuentra en varias ramas de la estadística y es aplicable a un sin número de problemas prácticos. Este es, desde luego, la media. Al momento de trabajar con este concepto lo importante es determinar la confiabilidad del mismo.

Es por esto que existen diversos métodos para obtener dicho valor que para cuestiones del presente trabajo se asocia a uno de los datos más importantes en cuestiones de precipitación que es la altura de precipitación (hp). A continuación se exponen algunos de los métodos más recurridos para poder determinar una media para la altura de precipitación.

Método aritmético

El método aritmético es uno de los más recurridos debido a su simplicidad, sin embargo hay que tomar en cuenta un factor muy importante al momento de emplearlo, en cuestiones de obtención de la media y de la estadística en general es importante recalcar el hecho de que algunos datos pueden no tener la misma influencia que otros en lo que se refiere a determinar un índice que los represente, es por esto que la media del método aritmético puede no ser un índice del todo representativo, sin embargo encaja en la categoría de lo estimado.

Para determinar este índice que dará un estimado de la altura de precipitación es necesario conocer ciertos elementos, como son los datos individuales de la altura de precipitación en un tiempo dado, y el número de datos obtenidos. Todo esto son condiciones conocidas impuestas desde el momento de la medición así que no habrá mayor problema en aplicar el modelo matemático que a continuación se expresa:

$$\overline{h_p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n hp_i$$

Donde “ n ” es el número de datos obtenidos y “ hp_i ” representa los valores individuales que serán sumados desde el primero (i) hasta el último valor (n).

Polígonos de Thiessen

Como se ha mencionado anteriormente, los datos de precipitación obtenidos en un estudio pueden provenir de diversas estaciones meteorológicas localizadas en ubicaciones distribuidas por toda la cuenca hidrológica.

Debido a la forma tan irregular de una cuenca, aunado al hecho de que no en toda la cuenca se presentan los mismos eventos meteorológicos se considera que los datos de cada estación tienen una influencia distinta en lo que respecta a la determinación de este índice.

La necesidad de un valor de precipitación media más preciso y confiable, da lugar al surgimiento de un método que, empleado de forma adecuada, puede compensar la imprecisión del método aritmético y reflejar de forma más notable la influencia de cada estación meteorológica y de sus datos.

El método consiste en atribuir a cada estación una determinada área de influencia para sus datos, esto se realiza de manera que se ajuste a la forma de la cuenca. La manera de condensar los datos en los valores de precipitación media es tomar los datos de cada estación y aplicar el método para cada periodo de tiempo, es decir se obtendrá un valor de altura de precipitación media para cada intervalo de tiempo dependiendo de cómo se seleccione. Al final los datos se resumen en una tabla de precipitaciones medias que representa a toda la cuenca.

En este punto se involucra el método de los polígonos de Thiessen utilizando las áreas para obtener un valor de altura de precipitación para toda la cuenca a partir de datos más particulares, el procedimiento para obtener los polígonos es más bien sencillo, sin embargo antes de aplicarlo se requieren más datos para poder trazar los polígonos.

El procedimiento requiere de una carta o plano en que se marca la localización, lo más preciso posible, de cada estación meteorológica, además de esto se requiere tener delimitado el parteaguas de la cuenca hidrológica en estudio. Debe contarse con los registros ya sea pluviográficos o pluviométricos de cada estación, estos deben cumplir el requisito de pertenecer al mismo periodo de registro, para poder unirse por medio del modelo matemático.

El trazo de los polígonos se da de la siguiente manera, primero se ubican todas las estaciones meteorológicas y se trazan líneas rectas entre todas ellas, cumpliendo la condición de que solo se tracen líneas entre las estaciones más próximas entre sí, de esta manera no habrá manera de que dichas líneas se intersecten entre sí. Posteriormente se procede a trazar líneas ortogonales en el punto medio de cada una de las primeras líneas que unen las estaciones, el trazo de las mismas se prolonga hasta que converjan en un punto.

De esta manera las líneas que convergen en un punto forman con las otras varios polígonos los cuales son los polígonos de Thiessen, sin embargo se podrá observar que dichos polígonos pueden llegar a abarcar zonas que se encuentran fuera del

alcance de la cuenca en estudio. Es por esto que, por lo general en el estudio de las cuencas hidrológicas se toma el parteaguas como límite absoluto de la misma. Esto quiere decir que las partes de los polígonos que se encuentran fuera del parteaguas no serán tomadas en cuenta para fines del método, a continuación puede observarse, a grandes rasgos, un ejemplo del trazo de los polígonos de Thiessen.

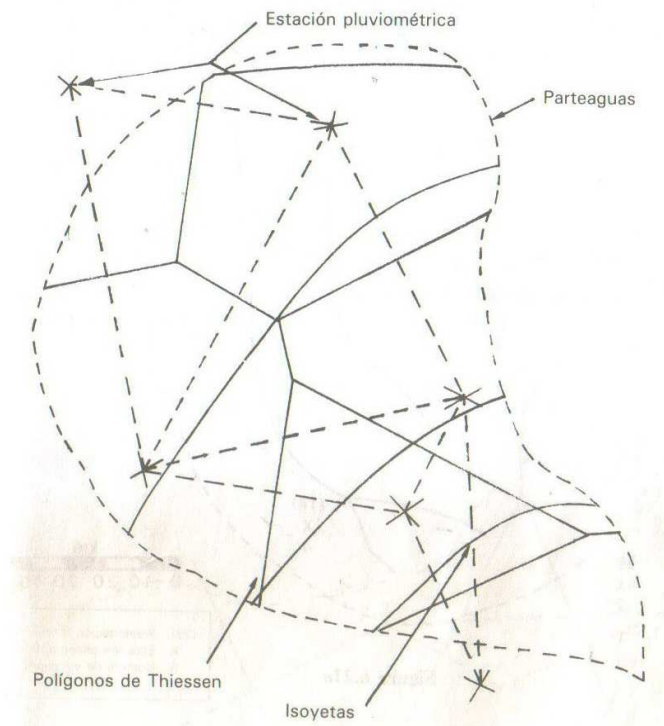


Figura 1.4. Ejemplo del trazo resultante de los polígonos de Thiessen.

Finalmente el modelo matemático aplicado para este método es el siguiente:

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n (A_i h_{pi})$$

Donde A_T se refiere al área total de la cuenca A_i es el área de la intersección de los polígonos con la cuenca delimitada por el parteaguas y h_{pi} es el dato del registro de la estación "i", se ha mencionado que dichos datos deben pertenecer al mismo periodo de tiempo para poder realizar el ajuste.

Método de las isoyetas

Antes de explicar el método en sí, debe aclararse qué es una isoyeta. Estas consisten en líneas que al ser trazadas sobre la carta o el esquema de la cuenca, representan todos los puntos en los cuales hay una altura específica de precipitación. Por lo general son trazadas en intervalos de 5 mm, lo que quiere decir que para cada variación de 5 mm en la altura de precipitación en una zona existe una única isoyeta que lo representa. Las isoyetas pueden tener una forma similar a la de las curvas de nivel.

El método es en realidad muy parecido al de los polígonos de Thiessen sin embargo existe una diferencia significativa, y esta se encuentra en el hecho de que las áreas de influencia tomadas en cuenta cambian radicalmente. Ya que ahora las áreas a considerar son las que se forman de la intersección del parteaguas y las isoyetas, sin embargo la similitud con el otro método consiste en el hecho de que estas áreas poseen un valor de precipitación media que a su vez es asociado con un área de influencia que, debido a la irregularidad de la cuenca y a la forma tan irregular que muestran las isoyetas, no son iguales.

Para este método el único requerimiento adicional con respecto al método de los polígonos de Thiessen es que las isoyetas sean de naturaleza conocida, es decir que se conozca su forma sobre la cuenca además de conocer el valor de altura de precipitación que la caracteriza.

En este método no participan de forma directa los valores representativos de las isoyetas ya que los valores empleados deben estar asociados a toda un área. Con esto se plantea que los valores correspondan a una media aritmética entre dos isoyetas, valor que se adjudicará al área entre las mismas. Al igual que en el método anterior se tiene un valor de área y de altura de precipitación correspondientes. A continuación se expresa el modelo matemático que ayudará a obtener el valor de la altura de precipitación media:

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n (A'_i \overline{h_{p_{isoyeta}}})$$

Donde A_T es el área total de la cuenta, A'_i es el área entre isoyetas consecutivas y $\overline{h_{p_{isoyeta}}}$ es la altura de precipitación media entre las isoyetas obtenida con el método aritmético.

Deducción de datos faltantes

Como en todo estudio de ingeniería existe la posibilidad de errores ya sea tecnológico, laboral o circunstancial. Es decir determinadas circunstancias pueden provocar que se vea comprometida la confiabilidad de los datos o incluso puedan llegar a faltar los mismos.

Sin embargo, al tomar las previsiones adecuadas dichos errores pueden verse minimizados y la información perdida puede ser supuesta de forma que la precisión en su suposición sea aceptable. Esto ocurre cuando se tiene en cuenta las implicaciones de que si la captura de datos falló en cierto intervalo de tiempo, aún así se tiene una mayoría de datos que fueron obtenidos de forma confiable.

De esta manera es posible extrapolar con base en los datos verídicos, aquellos datos que pueden estar faltando y para ello existen diversos métodos que varían en precisión y condiciones de uso, los cuales se mencionan a continuación.

Los métodos son variados y no pueden faltar los métodos aritméticos que aunque sean poco precisos, dan una idea bastante aproximada del dato dependiendo de las condiciones que se den, sin embargo el método aritmético para determinar los datos faltantes puede ser únicamente aplicado si las estaciones próximas a la estación de datos faltantes, tienen como máximo el 10% de diferencia en su valor de precipitación media anual.

Método de la Relación Normalizada

Como se mencionó anteriormente, los métodos tienen diversa precisión, sin embargo la limitante de su uso está más bien restringida por la naturaleza de los datos verídicos existentes y por las condiciones de su lectura. Un claro ejemplo es que este método solo puede ser utilizado cuando la precipitación media anual de las estaciones circundantes a la que posee el dato faltante difiere en más del 10%.

El método tiene en sí una variante en su precisión, esto se debe a que la extrapolación de los datos adquiere más confiabilidad entre más estaciones circundantes existan con datos verídicos, sin embargo también existe un límite con respecto del mínimo de estaciones que deben ser usadas, es decir el método exige que para que los datos sean confiables, el número mínimo de estaciones que deben ser usadas para dicho propósito sean tres.

A continuación se presenta el modelo matemático desglosado para poder conocer su funcionamiento.

$$\bar{h}_{P_x} = \frac{1}{n} \left[\frac{p_x}{p_1} h_{p1} + \frac{p_x}{p_2} h_{p2} + \dots + \frac{p_x}{p_n} h_{pn} \right]$$

Donde las variables que llevan un subíndice con la letra "x" son los datos de la estación en estudio, mientras que las variables con un subíndice numerado corresponden a los datos de las estaciones auxiliares.

Las variables son de forma correspondiente las que a continuación se explican, "hp" con cualquier subíndice es la altura de precipitación de los periodos de tiempo de interés para el estudio, la "p" con cualquier subíndice representa la precipitación media anual de las estaciones correspondientes mientras que la "n" representa el número de estaciones auxiliares.

Curvas de precipitación-área-duración

Este método presenta uno de los enfoques más interesantes tanto en la hidrología superficial como en la estadística. En primer lugar se debe mencionar que éste método es el que implica la mayor variedad de información obtenida para operar, es requerida gran cantidad de información y está basado en más de uno de los métodos para determinar la precipitación dentro de los cuales se encuentran principalmente el método de las isoyetas y el método de los polígonos de Thiessen.

Por sobre todo, este método ofrece una extrapolación más allá de los cálculos aritméticos, pese a que los cálculos son necesarios para el desarrollo del método en sí. Éste método consiste en el desarrollo de curvas, mejor conocidas como gráficas, que representan una clara tendencia en cuestiones de área de influencia de los datos, además de proveer de valores de altura de precipitación para diversos tiempo en la cuenca. Esto es para reemplazar los datos faltantes de una estación.

Sin embargo, el método sólo proveerá datos relevantes para el periodo de estudio correspondiente.

Éste método requiere un proceso laborioso, de inicio hay que tomar en cuenta la información adquirida con los métodos mencionados, en este caso es necesario contar con el trazo y área de los polígonos de Thiessen sobre la cuenca hidrológica, además deben conocerse tanto las isoyetas que intersectan a la cuenca como el área que se forma de la intersección de las mismas con la cuenca.

Una vez obtenidos dichos datos se procede a obtener la altura de precipitación media de las estaciones auxiliares tanto con el método de los polígonos de Thiessen como con el método de las isoyetas, una vez obtenidos estos valores es cuando actúa la primera implicación del método.

Con propósitos de determinar una curva masa media es necesario poder determinar un factor de ajuste para afectar los datos, dicho factor de corrección es un cociente entre los valores de la altura de precipitación media obtenidos con los métodos anteriores, es decir que puede expresarse con la siguiente ecuación:

$$F.A. = \frac{\bar{h}_{p_{Thiessen}}}{\bar{h}_{p_{isoyetas}}}$$

Dicho factor de ajuste sirve para modificar los datos de precipitación media obtenidos a partir de los polígonos de Thiessen, es decir, se realizará el producto de la altura de precipitación media obtenida con los polígonos de Thiessen y el factor de ajuste obtenido con el modelo matemático anterior, esto es lo que dará lugar a la curva masa ajustada.

Posteriormente, una vez obtenida la curva masa se procederá a calcular los incrementos entre los datos consecutivos de estudio, esto dará lugar al valor en el que se incrementó la altura de precipitación por cada periodo de tiempo que haya transcurrido durante la duración del evento. Por supuesto dicha columna de incrementos empezará a presentar valores cercanos a cero y finalmente nulos mientras más se aproxima al final de la tormenta o evento meteorológico, esto es debido a que cuando la tormenta termina, el valor de altura de precipitación en el registro se vuelve constante.

Dicha columna de incrementos debe ser condensada en una tabla resumen, esta tabla se obtiene al realizar la suma de los incrementos, tomando como punto de partida el mayor incremento y sumándolo al número colindante de mayor magnitud, sin embargo el aspecto importante de esto es que se debe sumar hasta obtener un término que represente un periodo de tiempo preestablecido. Un ejemplo de esto es que si el registro muestra datos con una separación de una hora, y habiendo escogido un periodo de tiempo en el que se desee actúen las curvas, se deben sumar los términos hasta haber abarcado el número de horas sobre los que actuarán las curvas.

Es así como dichas tablas resumen dan columnas con valores de incrementos de la altura de precipitación que corresponden a un valor de tiempo que no es el original

en el registro, por ejemplo si el periodo seleccionado es de dos horas, los valores de incrementos estarán adjuntos a valores múltiplos de este número.

El método es algo laborioso ya que debe realizarse varias veces, dicho número depende en gran medida del número de isoyetas que intersecten a la cuenca hidrológica. Ya que las isoyetas en el orden que se decida desarrollar el método, fungen como fronteras temporales junto con la parte del parteaguas de la cuenca por el que se haya decidido empezar. Y así es como, mientras avanza el método, se debe realizar todo el procedimiento para estas subpartes de la cuenca, y una vez concluido el método en una fracción, se empieza de nuevo pero tomando en cuenta el área desde el lado del parteaguas seleccionado hasta la isoyeta contigua considerada. Finalmente el método se realiza para el área total de la cuenca.

Es así como se observa que las tablas resumen obtenidas al final, están asociadas a un área determinada y diferente unas de otras, con estos valores se pueden graficar las curvas sugeridas por el método y crear una tendencia que permita la deducción de los datos faltantes.

La tabla final que representará los resultados considerará una columna con los periodos de tiempo en que se dieron las alturas de precipitación de las tablas resumen, y en las columnas posteriores las alturas de precipitación con los datos de las tablas resumen, agrupando los datos que ocurrieron en áreas de extensión diferente pero en el mismo intervalo de tiempo. Finalmente se grafican las alturas de precipitación de un solo periodo de tiempo en el eje de las abscisas contra las extensiones de área a las que corresponden dichos datos, esto se realiza para todas las columnas de datos.

Es así como finalmente se obtienen con la altura de precipitación para diferentes periodos de tiempo en el intervalo de estudio con tan solo tener el dato del área de influencia de la estación a la que le faltan dichos datos. En la figura 1.5 se muestran las curvas para un problema aleatorio por cuestiones de visualización y perspectiva.

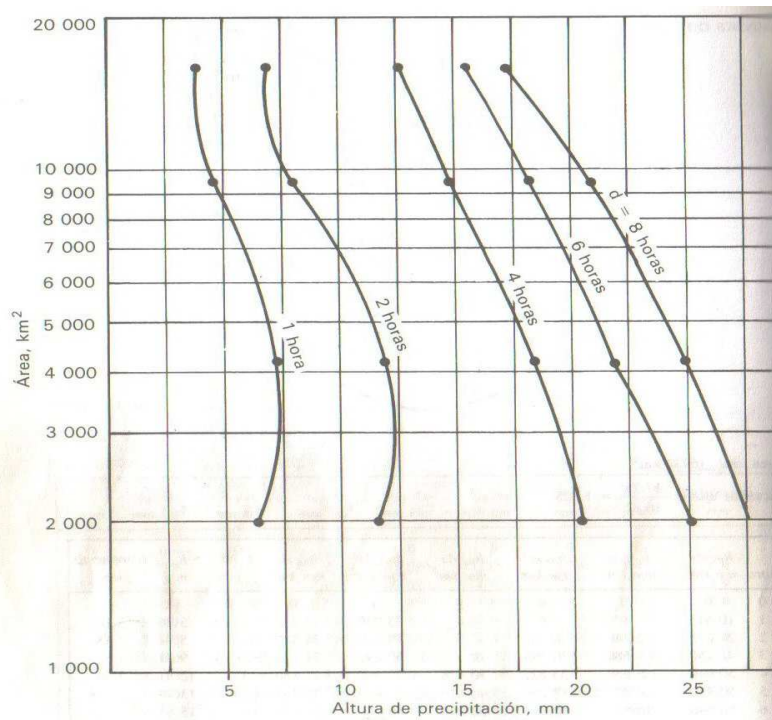


Figura 1.5. Curvas de precipitación-área-duración para un problema aleatorio. (Referencia 6)

Se aprecia que al introducir en este caso particular un valor de área la figura arroja cinco lecturas de altura de precipitación para los intervalos de una, dos, cuatro, seis y ocho horas.

1.1.4 Tormentas de diseño

En el diseño de una estructura que pueda ser afectada por una tormenta se debe tomar en cuenta la eficiencia de la misma, así como su capacidad para manejarla lo mejor posible. Esta consideración también tiene implicaciones en el costo de la obra, ya que una obra diseñada para manejar eventos de grandes magnitudes, puede resultar muy segura, sin embargo no sería nada rentable diseñar una obra con características que excedan por mucho sus exigencias reales.

Pero, ¿Cómo determinar las condiciones de diseño?, la respuesta se encuentra una vez más en los conceptos de estadística. Cuando se cuenta con registros de eventos

pasados, es posible determinar cuándo es más posible que se presenten las condiciones más desfavorables y así poder diseñar la obra ante las exigencias de dichas condiciones.

La tormenta de mayores proporciones para diseñar la obra se presentará cada determinado periodo de tiempo, el cual por lo general es expresado en años dependiendo de la magnitud del evento para el cual se quiera preparar la obra, a este periodo de tiempo se le llama periodo de retorno.

El método que a continuación se expone puede asociar no solo el periodo de retorno de un evento, sino también la intensidad y la duración del mismo, el método tiene como fin el desarrollo de una curva que asocie estas tres características.

Curvas intensidad-duración-periodo de retorno

El método para obtener estas curvas requiere ciertos datos iniciales, como se mencionó en la introducción al subtema estos consisten en datos de eventos anteriores, más específicamente en registros de las alturas de precipitación de años anteriores con las duraciones de dichas precipitaciones.

El método comienza con un concepto probabilístico, el cual es aplicado en términos de proceso de datos y que en este caso se desarrolla con un modelo propuesto por Weibull.

El registro tiene una organización por columnas. Cada columna tiene en ella los datos de altura de precipitación de los años con registro que poseen la misma duración.

Primero se deben obtener las intensidades de las precipitaciones registradas, esto es posible debido a que se poseen los datos de la altura de precipitación y sus duraciones. Posteriormente se procede a ordenar los datos en orden de magnitud descendente, es decir de mayor a menor, esto sin importar el año de ocurrencia.

Posteriormente, se aplica el modelo conocido como la fórmula de Weibull con el cual se asocia en número y orden de los datos. Dicha fórmula arroja una serie de valores de los cuales hay tantos como años de registro se consideren. A continuación se presenta la fórmula de Weibull para definir el periodo de retorno.

$$T = \frac{n+1}{m}$$

Donde “*n*” representa el número de años de estudio, es decir el número de datos accesibles por cada columna de duración y la “*m*” representa la ubicación del dato en el orden de mayor a menor.

Una vez obtenidos y ordenados los datos se procede a desarrollar un modelo que maneja como variables la intensidad, la duración y el periodo de retorno, es digno de mencionarse que el modelo una vez calibrado, representará una familia de curvas que pueden ser obtenidas según se requiera.

El modelo se enuncia a continuación:

$$i = \frac{kT_r^m}{d^n}$$

Donde las variables son conocidas, “*i*” representa la intensidad de la tormenta de diseño, en $\frac{m}{h}$, “*T_r*” representa el periodo de retorno en años, “*d*” es la duración del suceso en minutos, esto es debido a que en los datos del registro se sugiere utilizar la duración de la tormenta en esta unidad, ya que los sucesos meteorológicos no suelen durar lo suficiente para poder considerar una unidad más grande. Se observa la presencia de otros valores en el modelo, dichos valores son constantes de calibración

de la ecuación que permitirán que el modelo adquiera las tendencias representativas acordes a los datos.

Las constantes de calibración se obtienen mediante el desarrollo de procesos logarítmicos de los datos del registro, esto es posible a que le planteamiento de ciertas ecuaciones permite realizar un cambio de variable que hace más manejable la información. Esto es requerido para poder plantear un sistema de ecuaciones que al ser resuelto proporcionará las constantes de calibración, en función de los logaritmos que se utilizan para realizar el cambio de variable.

A continuación se presentan los coeficientes a utilizar que se expresan en forma de sus ecuaciones iniciales. Lo siguiente es posible convirtiendo la ecuación del modelo a una ecuación logarítmica, y el resultado es el siguiente:

$$\log(i) = \log(K) + m \log(Tr) - n \log(d)$$

El modelo puede bien ser representado por el cambio de variable antes mencionado, el cual es expresado a continuación.

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$$

Donde se puede asumir que las variables han adoptado la siguiente forma para fines de la ecuación:

$$y = \log(i)$$

$$a_1 = m$$

$$a_2 = -n$$

$$a_0 = \log k$$

$$x_1 = \log Tr$$

$$x_2 = \log d$$

Con dichos cambios de variables y a partir de la ecuación que conforman se puede hacer un ajuste con correlación lineal y finalmente plantear un sistema de ecuaciones. El sistema de ecuaciones se obtiene a partir de tres tipos de datos que produce un sistema con igual número de incógnitas y ecuaciones. Dicho sistema se expresa a continuación:

$$\sum y = Na_0 + a_2 \sum x_2 + a_1 \sum x_1$$

$$\sum (x_1 y) = a_0 \sum x_1 + a_2 \sum x_1 x_2 + a_1 \sum x_1^2$$

$$\sum (x_2 y) = a_0 \sum x_2 + a_2 \sum x_2^2 + a_1 \sum x_1 x_2$$

La identidad de todas las literales es conocida, sin embargo este sistema ha tomado en cuenta un dato que no aparecía en las ecuaciones anteriores, es decir la literal “N” la cual representa el número total de datos iniciales. Es decir, no solo se refiere al número de años que abarca el ajuste, o al número de columnas para diferentes duraciones de evento, sino al número total de datos abarcando todos los años y todas las duraciones.

Una vez obtenidos los coeficientes a_0, a_1, a_2 , los cuales fungieron como incógnitas en este sistema, se utilizan las fórmulas logarítmicas propuestas anteriormente para el cambio de variable para determinar las constantes de calibración y así poder completar la ecuación para los datos específicos del caso.

Finalmente, una vez calibrada la ecuación con las constantes, se asignan los periodos de retorno deseados y se obtiene una curva y una tendencia para cada valor del modelo. En la figura 1.6 se presentan las funciones graficadas de manera logarítmica para observar a mayor detalle el comportamiento de las mismas cuando se le asignan varios valores.

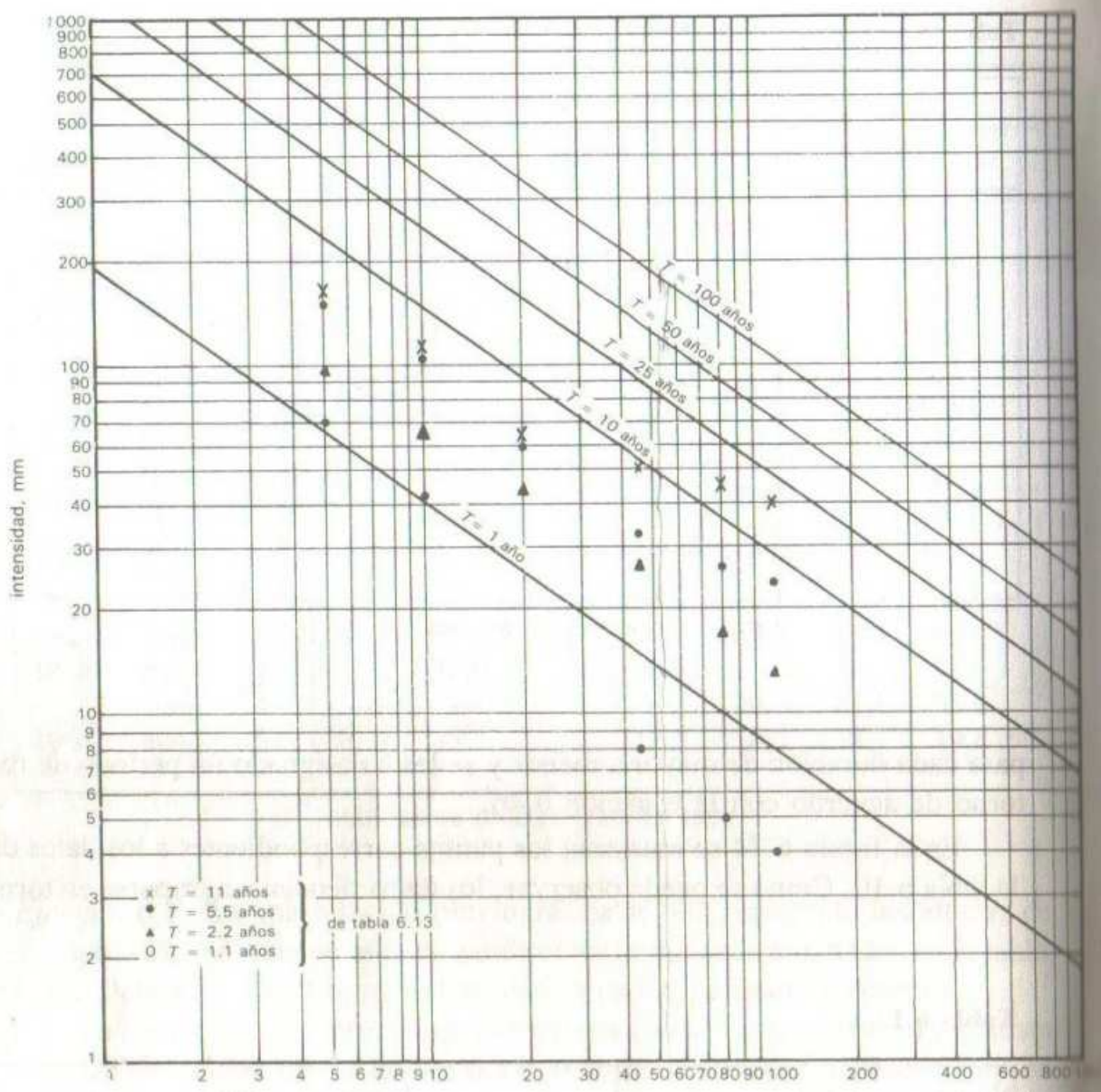


Figura 1.6. Curvas intensidad-duración-periodo de retorno graficadas en función logarítmica. (Referencia 6)

Sin embargo una vez considerado el periodo de retorno para el cual se desea diseñar, es posible tratar con curvas que expresan a la intensidad en función de la duración del evento, tomando en cuenta que dicha curva solo expresará los datos dentro del rango del periodo de retorno asignado (figura 1.7).

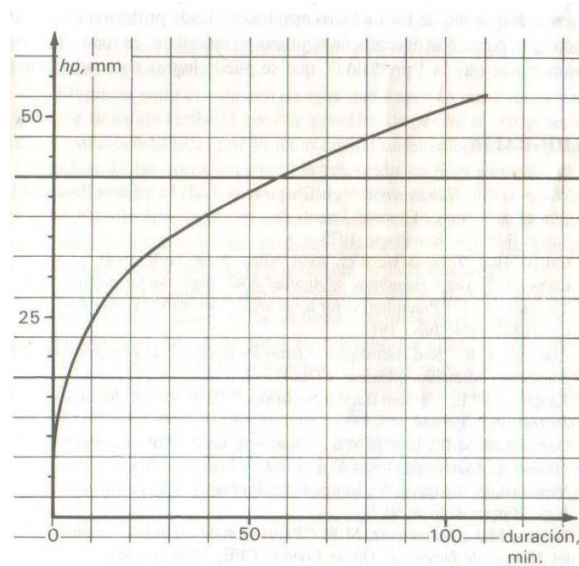


Figura 1.7. Curva de altura de precipitación vs duración para un periodo de retorno específico. (Referencia 6)

Se puede observar que es posible conocer la duración de las tormentas con una altura de precipitación determinada y así diseñar la obra para determinados límites en cuestiones de altura de precipitación y saber, en función de la duración, el gasto que se estará manejando, como se aborda más adelante en este documento.

1.2. INFILTRACIÓN

La infiltración en términos de un sistema, se conoce como las pérdidas de masa en el mismo, en el presente trabajo, está dada por la cantidad de agua de las precipitaciones que no escurre a través de la cuenca y que es absorbida por el suelo.

Las precipitaciones en las cuales no se tuvo la capacidad de infiltrar, escurren por la cuenca y alimentan los cuerpos de agua existentes en las partes de menor altitud, como son los ríos o lagunas. Para el cálculo y comportamiento de la infiltración aplican varios modelos.

1.2.1 Definiciones

La infiltración está estrechamente relacionada con las características del suelo en el área de estudio ya que dependiendo de parámetros como granulometría y contenido de humedad, el suelo desarrolla una característica llamada capacidad de infiltración, la cual es medida en las unidades estándar de la intensidad, es decir milímetros por hora.

Lo esencial en el ámbito de la infiltración es comparar los valores de la intensidad de una tormenta con la capacidad de infiltración, ya que esos hechos siguen cierta tendencia. Para empezar, haciendo la consideración inicial de que el suelo se encuentra seco y es el apropiado, antes del evento posee una capacidad de infiltración por lo general mayor que la de la intensidad de la lluvia $i \leq f_p$, donde “ i ” es la intensidad de la tormenta y f_p , la capacidad de infiltración. Esto provoca que el agua que se precipita en su mayoría sea absorbida por el suelo y el resto escurre por la superficie al no tener el suelo la capacidad de absorberla.

Cuando la tormenta se prolonga, la capacidad de la absorción del suelo va decreciendo y en determinado momento es menor que la intensidad de la tormenta $i \geq f_p$, cuando esto sucede el agua precipitada escurre por la cuenca.

Existen diversos métodos para determinar la infiltración, sin embargo para fines de esta tesis y por cuestiones de relevancia, solo se manejarán los datos de infiltración aplicables en áreas pequeñas.

1.2.2 Métodos para el cálculo de la infiltración

Mediante pruebas realizadas en la zona de estudio es posible poder determinar ciertos valores que ayuden a determinar la infiltración, esto es posible mediante los instrumentos adecuados. Las mediciones de la infiltración por lo general se hacen utilizando un infiltrómetro.

En general la medición de la infiltración se realiza obteniendo varios coeficientes por medio de métodos como: Criterio del coeficiente de escurrimiento, Método del número de curva y Criterio del United States Soil Conservation Service (USSCS). El cálculo de la infiltración que manejan dichos métodos se aplican en el área de toda la cuenca, lo cual no es recomendable para el diseño del dispositivo del que trata este trabajo. No se indagará en los métodos anteriores en este trabajo, sin embargo se hace alusión a ellos por mencionar los métodos existentes y crear una perspectiva de opciones.

1.2.3 Medición de la infiltración

Como se mencionó anteriormente, las mediciones de las infiltraciones se realizan por medio de un infiltrómetro. Debido a la naturaleza y operación de estos artefactos, los datos recabados por ellos sólo son confiables en áreas pequeñas, conveniente para los fines de este proyecto.

Primero que nada cabe mencionar que existen dos tipos de infiltrómetros que simulan las condiciones de la lluvia de manera más aproximada a las condiciones reales. Este apartado se enfocará más al infiltrómetro llamado de carga constante.

Los infiltrómetros de carga constante constan de dos tubos de diferentes diámetros hincados en el terreno de forma concéntrica. Dichos tubos poseen generalmente diámetros de veinte y cuarenta centímetros, respectivamente. Los tubos tienen una longitud de cuarenta y cinco a sesenta centímetros y por lo general se hincan de cuarenta a cincuenta centímetros.

Existen dentro de este tipo de infiltrómetros aquellos llamados de tubo simple, sin embargo es más recomendable utilizar los de tubo concéntrico debido a que el segundo tubo protege de las condiciones de la periferia al primero. El funcionamiento de los tubos una vez hincados consiste en añadir agua con buretas graduadas y mantener una columna de agua constante sobre el terreno a medida que ésta se va infiltrando. Si se toman las lecturas de las buretas en diversos tiempos es posible producir curvas que representen la infiltración con respecto al tiempo.

A continuación se presentan datos de granulometría para suelos en que se han realizado ensayos por medio de los infiltrómetros, correspondiendo a suelos de diferentes tipos y características (Tabla 1.1).

TABLA 1.1. Tamaños de grava.

Material grueso	Tamaños
Grava	3" – 3/16"
Grava gruesa	3" – 3/4"
Grava fina	3/4"-3/16"

La siguiente tabla contiene valores parecidos, pero aplicables a materiales finos (Tabla 1.2).

TABLA 1.2. Tamaños de arena.

Arenas	Tamaños
Arena gruesa	4.7625mm -1.651mm
Arena media	1.651mm-0.42mm
Arena fina	0.42mm-0.074mm

Ahora solo por perspectiva están los materiales que son técnicamente impermeables dependiendo las condiciones (Tabla 1.3).

TABLA 1.3. Suelos finos.

Finos	Tamaños
Limos	>0.005mm o >0.002mm
Arcillas	<0.005 o <0.002mm

Si se consideran como ciertas las definiciones observadas en estos materiales, se puede decir que en las mediciones realizadas con un infiltrómetro, los siguientes datos corresponden a valores considerados aceptables para áreas pequeñas (Tabla 1.4).

TABLA 1.4. Tasas de infiltración típicas para distintos tipos de suelos.

Tipo de suelo	Capacidad de infiltración (mm/h)
Suelo grueso	>100
Ligero	50-100
Medios	10-50
Pesados	5-10
Muy pesados	1-5

1.3 ESCURRIMIENTO

La parte de las precipitaciones que corresponde al escurrimiento es aquella, que por definición, no es capaz de infiltrarse en el suelo y debe escurrir por la superficie y sus cercanías, a este fenómeno se le conoce como “flujo en la superficie del terreno”. La parte de la lluvia que logra infiltrarse en las capas cercanas a la superficie y fluye dentro de éstas es conocido como “escurrimiento subsuperficial”, además de los dos anteriores existe un tercer tipo de escurrimiento, que sin embargo corresponde a aquella parte de las precipitaciones que logra infiltrarse hasta la capa de los mantos freáticos y es conocido como “escurrimiento subterráneo”.

Sin embargo el estudio del escurrimiento en un área considerablemente más pequeña a la cuenca como podrían ser las propuestas en capítulos posteriores de este

documento, es significativamente más particular y simple. Debido a cuestiones de área y además de que las mediciones se darán en condiciones más controladas y de hecho diseñadas de antemano, el escurrimiento en las mismas tendrá el comportamiento parecido al de un canal.

Con esta información se tienen que hacer las consideraciones correspondientes para poder definir el comportamiento al que se dará lugar, ya que los escurrimientos, en este caso serán, en cierto modo, controlados.

Una de las consideraciones iniciales es hacer notar que aunque el área de estudio del proyecto sea dramáticamente más pequeña que una cuenca promedio puede aplicarse uno de los conceptos utilizados para el estudio de las mismas, es así como se hace referencia al hidrograma.

El hidrograma es una curva que corresponde a la representación del gasto generado durante una tormenta y su variación con el tiempo. Una vez comprendido esto es posible conceptualizar que el hidrograma es una curva parecida en geometría a una campana de Gauss sin embargo debido a la variación aleatoria de las precipitaciones la curva es irregular, figura 1.8.

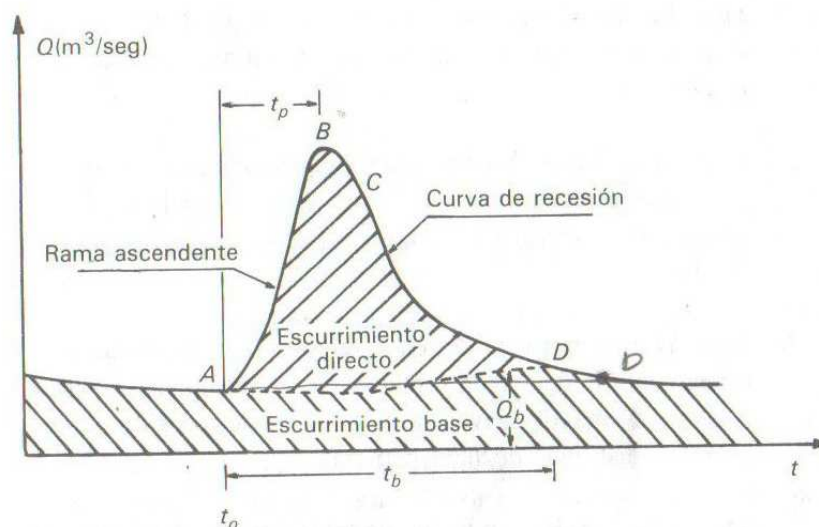


Figura 1.8. Esquema del hidrograma. (Referencia 6)

Sin embargo, el hidrograma presenta una tendencia de comportamiento la cual puede ser estudiada para determinar los distintos tipos de escurrimiento. El comportamiento presentado por un hidrograma por lo general es cuantificado en un periodo de tiempo considerable como por ejemplo un año. La tendencia presentada por el hidrograma es la de tener al principio una variación en el gasto casi nula, lo que significa que durante el periodo de tiempo en estudio, hay un gasto constante que se presenta antes de que tengan lugar las precipitaciones, a este gasto se le conoce como “gasto base”.

Sin embargo, una vez que llegan las precipitaciones, la variación en el gasto es tan grande en un periodo comparativamente corto que empieza a aumentar la pendiente de la curva de una forma que podría catalogarse de brusca tendiendo por supuesto a un valor máximo. Todo esto se da en un punto de inflexión de la curva llamado “punto de levantamiento”, la variación del gasto se produce en cuanto la tormenta comienza, y a partir de este punto los valores del gasto pueden seguir aumentando incluso después de que la tormenta termine si las dimensiones y forma de una cuenca lo permiten.

Como se mencionó anteriormente, una vez que el gasto empieza a aumentar, tiende a un valor máximo al cual se le llama “pico”, y es uno de los valores representativos de una tormenta, además de ser el que debe tomarse en cuenta para el diseño crítico. Después del punto máximo del hidrograma una vez que la tormenta empieza a cesar, la curva cambia su pendiente y empieza a descender el valor de gasto con respecto al tiempo, esto ocurre en un punto de inflexión después del pico.

Después de que la curva desciende lo suficiente, reduce su pendiente hasta volverse relativamente constante, de nuevo, y tiende al valor del gasto base, en el punto que la curva se estabiliza se considera otro aspecto del estudio, a este punto se le conoce como el “fin del escurrimiento directo”. Si por métodos geométricos y aritméticos se unen el punto de levantamiento con el punto del fin del escurrimiento directo, la parte de la curva que queda por sobre dicha línea representa en sí al escurrimiento directo, mientras que la parte inferior de la gráfica representaría al escurrimiento base.

En el pico producido en la curva hay dos ramas las cuales son nombradas como ascendente la primera y, rama descendente o curva de recesión la segunda. La rama ascendente es aquella que va desde el punto de levantamiento hasta el pico, siendo la rama descendente aquella que va del punto de inflexión hasta el punto del fin del escurrimiento directo.

Como se mencionó, la curva se encuentra expresada en función del tiempo y es de hacer notar que al levantamiento de la curva le corresponden valores de tiempo bastante importantes. El primero es conocido como tiempo pico (t_p) y es aquel que tiene lugar a partir del punto de levantamiento de la curva hasta el punto pico de la misma. El segundo, es medido a partir del punto de levantamiento hasta el punto del fin de escurrimiento directo (t_b).

1.3.1 Aforo

El aforo es una herramienta muy útil y de las más recurridas cuando se habla del estudio hidráulico o hidrológico de un fenómeno. El concepto de aforo es en realidad simple, se trata de averiguar la cantidad de agua que está pasando por unidad de tiempo en algún sistema delimitado como podría tratarse de una tubería, un río o un canal.

En términos más técnicos, el aforo es el cálculo del gasto que transita por una sección por medio de condiciones medidas o impuestas a dicha sección para facilitar la obtención de dichos datos. Existen varios métodos para aforar, la mayoría por no usar términos absolutos, están sustentados en la ecuación de continuidad del gasto para los fluidos $Q = VA$ donde "Q" es el gasto, "V" la velocidad media de la sección y "A" es el área de la sección, todos los términos deben expresarse en unidades compatibles. A continuación se hará mención de algunos métodos de aforo.

1.3.1.1 Sección control

La sección de control es el acondicionamiento de cierta parte del cauce para poder determinar el gasto. Se imponen condiciones geométricas a la sección transversal del mismo o bien éstas se miden con precisión. Las dos formas más recurridas de inducir una sección de control, consisten en colocar un vertedor de geometría conocida o inducir el tirante crítico.

Un vertedor es una estructura de aforo que debido a su geometría, crea una relación entre el gasto y el tirante medido en el punto en que se colocó. Es así que, con solo medir o tener en consideración este valor y manteniéndose constante se puede determinar el gasto medio que pasa por la sección. Existen distintos tipos de vertedores los cuales se utilizan según el caso se requiera, esto depende de la magnitud del gasto manejado o la localización del vertedor.

A continuación se presentan ejemplos de vertedores, los cuales guardan una estrecha relación entre sus dimensiones, gasto y el tirante medido (figura 1.9).

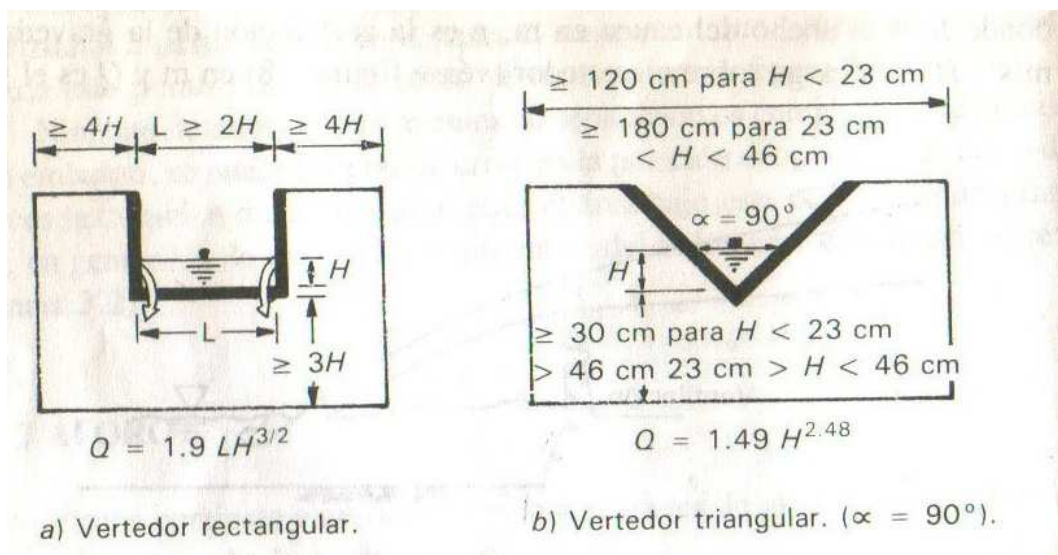


Figura 1.9. Esquemas y ecuaciones para vertedores rectangular y triangular.
(Referencia 6)

1.3.1.2 Relación sección pendiente

Este método tiene algunas consideraciones iniciales, y de manera ideal es mejor utilizarlo en cauces de forma regular debido a que requiere el cálculo del área hidráulica para llevarse a cabo. Este método toma en cuenta, la topografía y características de elevación del cauce, sin mencionar que varía dependiendo los materiales que conformen el fondo y las paredes del mismo.

En sí el método trata de determinar la pendiente hidráulica de un intervalo contenido a lo largo del cauce con una longitud "L", se trata de seleccionar un tramo del cauce donde el cambio en la pendiente topográfica del fondo sea más o menos regular. Se debe conocer la geometría de los puntos inicial y final del intervalo en estudio al menos hasta un punto aproximado además de tener en cuenta, como se ha mencionado, el material que lo conforma.

Con los datos anteriores se procede a determinar la pendiente hidráulica que puede ser determinada únicamente si se conoce la longitud horizontal del segmento de estudio y la diferencia de altura de los puntos iniciales y finales, como se puede deducir dichos datos son necesarios para poder determinar la diferencia de alturas entre los tirantes y poder obtener las pérdidas de energía existentes, de las cuales solo se consideran las provocadas por la fricción.

Una vez obtenidas las pérdidas por fricción se puede obtener la pendiente hidráulica con la ecuación:

$$h_f = S_f L$$

Donde h_f se refiere a las pérdidas por fricción, S_f representa a la pendiente hidráulica y "L" es la distancia medida horizontalmente entre los puntos.

Una vez obtenida la pendiente hidráulica resulta sencillo determinar la velocidad a la que el agua transita por la sección, para estos fines se utiliza el concepto de la hidráulica de canales conocido como la fórmula de Manning. El modelo se representa a continuación.

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

Donde "R" representa el radio hidráulico de la sección, y "n" es el coeficiente de rugosidad del material del cauce. Las demás variables se han mencionado anteriormente y son conocidas.

Una vez determinada la velocidad de la sección con la fórmula anterior únicamente falta aplicar el valor obtenido a la ecuación de continuidad del gasto para obtener la cantidad de agua transitando por el cauce.

En la figura 1.10 se presenta un esquema con los elementos más importantes del método mencionado.

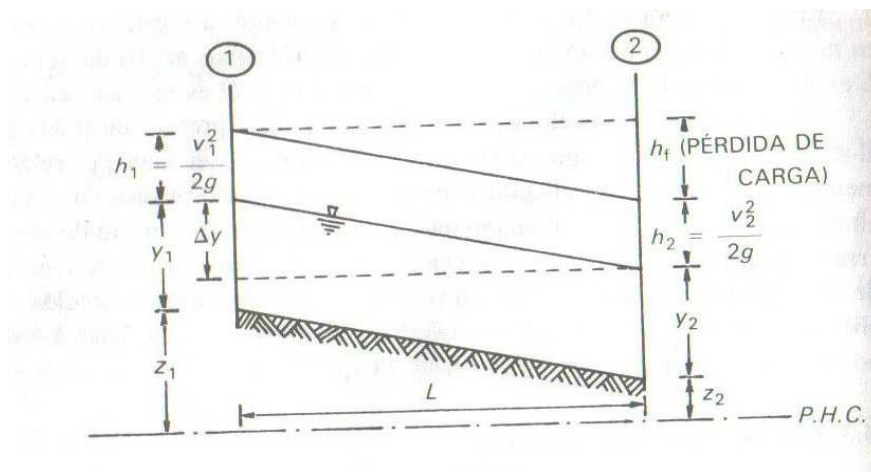


Figura 1.10. Esquema de líneas de energía en la conducción a cielo abierto. (Referencia 6)

Existen otros métodos de medición del gasto en cauces como podría ser el de sección-velocidad, sin embargo este método es únicamente recomendable para cauces con una sección demasiado ancha, ya que eso produciría una gran variación en la velocidad en las secciones del cauce, sin embargo no se indagará a fondo en este trabajo.

1.3.1.3 Nociones generales de canales rectangulares

Los canales tienen diferentes tipos de flujos los cuales presentan comportamientos particulares dependiendo de las características geométricas y topográficas del mismo. Una de las geometrías de más sencillo estudio es el canal rectangular debido a que las características principales del mismo como serían su radio hidráulico y el valor de su tirante crítico son considerablemente más fáciles de determinar que en algún otro tipo de canal.

El tránsito del agua por un canal depende de la acción de diversas fuerzas actuantes sobre el mismo, como el peso y la presión ejercida por el fluido en la plantilla del canal y la fricción que a su vez el canal ejerce en el líquido provocando las pérdidas graduales de energía.

Las fórmulas para el estudio de los canales han sufrido una evolución considerable, y han pasado a ser mucho más simples en el ámbito de determinar las pérdidas por fricción. Fue Manning quien finalmente encontró la relación que simplificó las fórmulas propuestas por Chézy, Gangullet y Kutter para finalmente obtener el coeficiente que representa la influencia de los distintos materiales sobre el flujo de los canales, dicho coeficiente se representa con la letra “n” y es conocido como el coeficiente “n” de Manning, existen diversos valores determinados experimentalmente algunos de los cuales serán mencionados a lo largo de este apartado. Después de la determinación del coeficiente finalmente la ecuación de Chézy tuvo una transformación y se expresó la velocidad en función de este nuevo coeficiente, la cual es conocida como la fórmula de Manning.

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

Los canales rectangulares de interés en este apartado son aquellos que poseen pendientes.

La energía en la hidráulica puede adoptar diversas formas, sin embargo para su estudio, estas fuerzas se han visto transformadas en valores con unidades longitudinales que dependiendo su magnitud expresan cierta cantidad de energía, dichos tipos de energía son llamadas cargas y son referidas a la carga de una columna de fluido equivalente a la cantidad y tipo de energía de la que procede.

Los tipos de cargas en estudio son la carga de presión, la carga de velocidad y la carga de posición, que conforman los tres tipos de energía que al transformarse unas en otras, dotan de movimiento al líquido. Sin embargo, al estar los canales expuestos a la atmósfera, la carga de presión manométrica ejercida sobre la superficie del líquido es nula, por lo cual la carga de presión sobre un canal tiene un valor de cero (figura 1.10).

La cuantificación de la energía en el flujo de un canal se da con la suma de todas las cargas actuantes, y como anteriormente se descartó a la carga de presión en su superficie, aún se tiene la carga de posición y de presión. A la suma de estas dos cargas se le llama energía específica, la cuál es determinante dentro del gasto, tirante y velocidad que el canal maneja.

La energía específica se presenta en tres regímenes distintos, el régimen crítico, sub crítico y súper crítico. Los cuales tienen sus diferencias en la manera en que varían sus tirantes y cargas de velocidad alrededor de cierto valor el cual es conocido como tirante crítico.

El tirante crítico de un canal es aquel que se presenta justo en el régimen crítico, es decir cuando la energía específica es la mínima requerida para que el canal con las condiciones que posee pueda transitar cierto gasto sin cambiarlo. Es así como los tirantes que se presentan por encima del tirante crítico se encuentran en el régimen sub crítico, un régimen caracterizado por tener tirantes elevados y una carga de velocidad menor (figura 1.11).

Por el contrario cuando el tirante de un canal se encuentra en valores menores al tirante crítico se encuentra en un régimen súper crítico, lo cual implica que al ser el tirante menor y la energía específica la misma, esta se verá transformada en carga de velocidad para compensarlo.

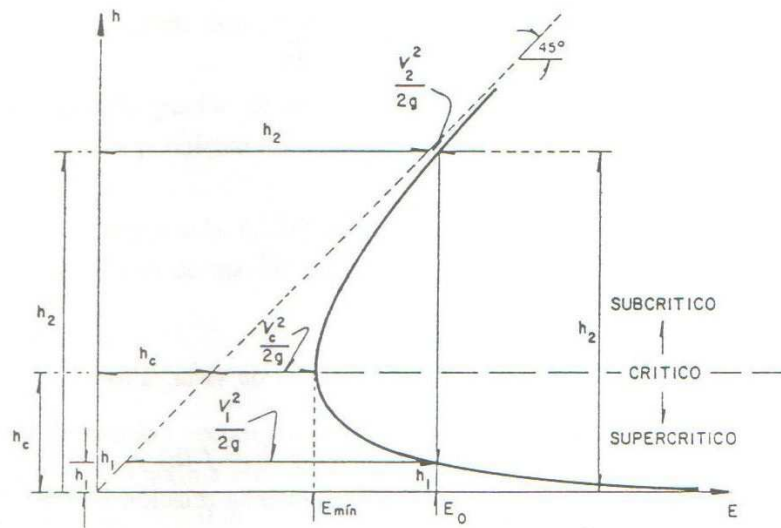


Figura 1.11. Gráfico que denota la distribución de tirante y carga de velocidad en distintos regímenes. (Referencia 3)

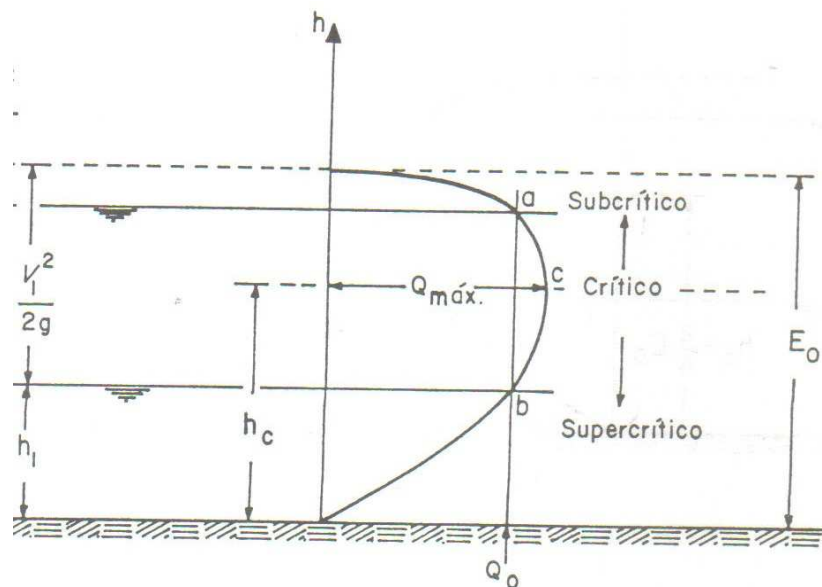


Figura 1.12. Esquema de perfil de distintos tirantes y su variación de gasto dependiendo del régimen de un canal. (Referencia 3)

La energía específica se presenta en tres regímenes distintos, el régimen crítico, sub crítico y súper crítico.

Cuando se habla de energía no se puede evitar hablar de eficiencia así que surge la cuestión de si cierta cantidad de energía específica es capaz de conducir diferentes gastos, y la respuesta es afirmativa. Debido a que el comportamiento de la curva de energía específica representa una parábola existe un valor mínimo de esta, dicho valor es llamado energía específica mínima y es la energía específica necesaria para que se dé un valor de gasto determinado en esas condiciones, además el valor de gasto presentado en un canal durante el régimen crítico es conocido como el gasto máximo que puede pasar por la sección con esas características.

1.4 Evaporación

1.4.1 Definiciones

Para empezar hay que preguntarse qué es en realidad la evaporación y por qué este fenómeno afecta los cálculos de un aforo o del funcionamiento de un sistema ya sea en mayor o menor medida.

Primero, se define la evaporación como el proceso por el cual el agua cambia de fase, desde un estado líquido a un estado gaseoso. Este proceso se ve inducido por diferentes factores siendo los principales, las condiciones de presión y temperatura.

La evaporación es causa de un importante intercambio de masa dentro de un sistema predispuesto a esto, como podría ser el que se propondrá en este proyecto, es por esto que es de gran importancia cuantificarlo. Debido a la dependencia que tiene la magnitud de este fenómeno con respecto a las condiciones del entorno existen métodos desde experimentales hasta empíricos para su medición los cuales se verán expuestos en este apartado.

1.4.2 Fórmulas empíricas para el cálculo

En el documento solo se hará mención a una de las fórmulas empíricas ya que ésta ejemplifica el punto establecido, de que las condiciones ambientales afectan la magnitud de la evaporación.

Fórmula de Meyer

La fórmula de Meyer fue propuesta en 1915 y maneja la variable de presión de vapor en el ambiente y la compara con los valores de saturación esto proporciona un valor de evaporación dentro del periodo de un mes para el cual fue diseñada la ecuación.

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

Donde “C” es un coeficiente experimental con un valor de 38 para depósitos pequeños como dispositivos de medición y de 28 para los depósitos grandes. Las presiones de vapor media y de saturación representadas con la literal “e” con el subíndice correspondiente pueden determinarse con otro modelo matemático, las unidades de la fórmula son pulgadas de mercurio, mientras que la otra variable “Vw” se refiere a la velocidad del viento a diez metros de la superficie de estudio en unidades de km/h.

1.4.3 Medición de la evaporación

Como en todo dato es necesario el uso de dispositivos para determinar su comportamiento en campo. Esto siempre es realizado por mediciones de alguna índole en este caso es utilizado un dispositivo especial llamado evaporímetro. El evaporímetro funciona de una forma muy parecida a un pluviómetro, sin embargo los conceptos de su uso son algo diferentes.

El evaporímetro consiste en un depósito en el cual se coloca cierta cantidad de agua y se deja expuesto a la intemperie, lo cual provoca que exista evaporación en el depósito, después este valor es medido con una regla graduada. Los valores de la evaporación son medidos durante varios días.

Deben realizarse correcciones en los valores medidos, sumándoles los valores de la altura de precipitación de la estación cercana, por lo general el evaporímetro suele estar en la estación. Dentro de los depósitos pequeños existe una mayor propensión a la evaporación por lo cual si se busca utilizar los valores mencionados para un depósito mayor como el vaso de una presa, deberá ajustarse con un factor de corrección que por lo general oscila entre 0.6 y 0.8.

1.5 BALANCE DE AGUA

Los factores anteriormente vistos influyen en el intercambio de masa que existe en un sistema hidrológico o mejor dicho el intercambio de agua, gracias a estos factores es posible estimar con mayor precisión la cantidad de agua que se conserva en las fronteras del sistema abierto del estudio.

Los factores anteriores representan los diversos caminos de entrada o salida que puede tomar el agua dentro de un dispositivo cuyas características serán planteadas en un capítulo posterior, pero no puede dejarse de lado que juntando los valores anteriores se determina y cuantifica el agua dentro del sistema y también se determina la cantidad de agua que adoptará cada camino diferente.

Primero, en todo sistema hidráulico se tiene la premisa de que el gasto entrante tiene que ser por fuerza el gasto que sale, sin embargo dependiendo el sistema del que se esté hablando y las salidas que se estén considerando, esto puede variar. En este trabajo no se menospreciará el efecto de ningún factor posible, por lo que se propone el siguiente balance:

$$Q_E = Q_s$$
$$Q_s = E_v A + Q_x + f_p A t + h_p A$$

Las literales fueron escogidas arbitrariamente pero a grandes rasgos significan lo siguiente, la literal “ Q ” representa los gastos de entrada, salida y excedencias, respectivamente. Mientras que la variable “ E_v ” representa la lectura de evaporación en unidades de longitud, la variable “ A ” representa el área de estudio sobre la cual actúan los datos, la variable “ t ” simboliza el tiempo de duración del evento meteorológico en unidades que sean compatibles, el índice “ f_p ” significa la capacidad de infiltración dentro del sistema y “ h_p ” representa, como se ha mencionado antes, la altura de precipitación.

El modelo anterior representa el balance total de un sistema propuesto, el cual se revisará más a detalle en el siguiente capítulo.