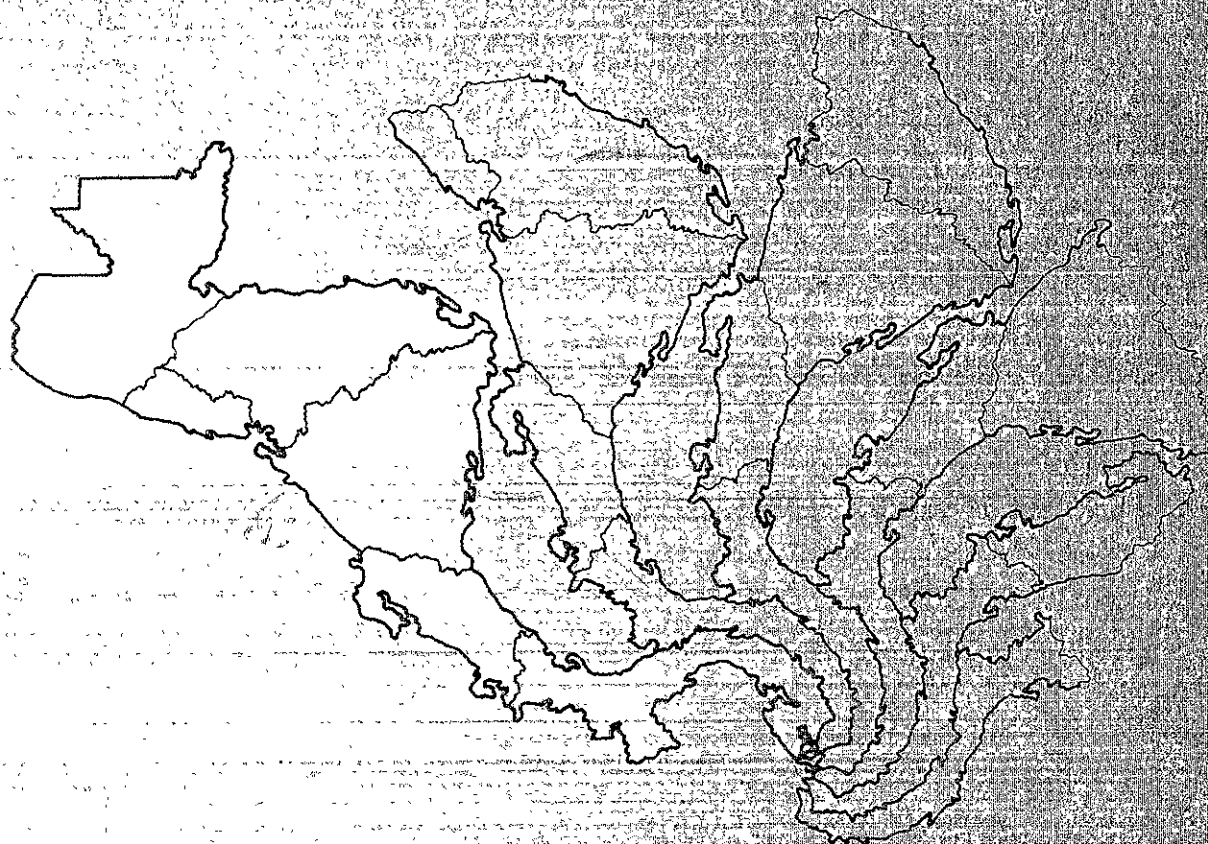


PROGRAMA DE ACTIVIDADES REGIONALES EN EL SUBSECTOR ELECTRICO DEL ISTMO CENTROAMERICANO (PARSEICA)

MODULO DE PLANEAMIENTO OPERATIVO



CONCEPTOS BASICOS DE PLANEAMIENTO OPERATIVO

Seminario I

Febrero de 1992

Documento preparado por PROMON, con el apoyo de ELETROBRAS.

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA

1.1 INTRODUCCIÓN

Los caudales de los ríos son causados por la escurrentía producida por precipitaciones y, en cuencas sin desarrollo de obras artificiales, las variaciones de niveles y descargas resultan de los cambios en la duración, frecuencia, intensidad y distribución espacial de la precipitación o de las características de la cuenca, las cuales determinan los valores de escurrentía directa.

El conocimiento de las variaciones y de las cantidades de agua que escurren por los ríos es esencial para el desarrollo adecuado de las actividades humanas. Registros de crecidas son requeridos para el diseño de estructuras hidráulicas y para la operación de sistemas de control de inundaciones; registros de descargas bajas son necesarios para la evaluación de las condiciones de sequías, control de derivaciones y preparación de medidas de conservación; y registros de largo período de caudales medios son exigidos para el diseño de sistemas de recursos hidráulicos y de producción hidroeléctrica.

La gestión, el control y el manejo de recursos hidráulicos únicamente pueden ser efectivos si existe acceso a informaciones precisas y continuas sobre caudales, y tales informaciones sólo pueden ser obtenidas satisfactoriamente a partir de una red de estaciones medidoras usualmente, pero no necesariamente, ubicadas y operadas como una parte de una red hidrológica más general.

El texto que se presenta tiene el objetivo de describir los aspectos más importantes de los requisitos de determinación de caudales a partir de actividades de campo y oficina, y que son respaldadas por mediciones de niveles y aforos de campo. Empero, no se pretende abordar todos los puntos que hacen parte de las funciones de operación de redes hidrométricas, a la vez que temas de este tipo se alejan del alcance de este seminario.

En lo que se refiere a los temas abordados a continuación, se anticipa que no están presentados los aspectos relacionados directamente con la planificación

de redes hidrométricas, diseño e instalación de estaciones fluviométricas u operación de redes y estaciones.

1.2 MÉTODOS PARA CALCULAR CAUDALES

Hay diversos métodos para aforar caudales de ríos, desde los tradicionales área-velocidad y técnicas estructurales y de dilución, hasta adaptaciones más recientes, involucrando métodos electromagnéticos, ultrasónicos y barcos en movimiento. Cada uno de estos métodos presenta ventajas y limitaciones lo que hace su elección dependiente de las condiciones locales, de los equipos y de los recursos disponibles para la institución responsable. El proceso más difundido es el Método Área-Velocidad.

El objetivo principal de una estación fluviométrica es el de proporcionar registros de la descarga del canal abierto, en donde está ubicada. Una estación fluviométrica calibrada por el método área-velocidad obtiene registros u observaciones de nivel de agua y permite transformarlos en descargas por medio de una relación cota-caudal.

Tal relación cota-caudal es determinada desde mediciones de campo de los niveles de agua y las correspondientes descargas, y la calibración así obtenida se mantiene buena siempre y cuando no ocurran cambios significativos de las características del tramo en donde la estación está ubicada. Considerando que un canal natural de río está en constante mutación, él es fundamentalmente inestable y sus características están sujetas a cambios que afectan la calibración de la relación. Estos cambios pueden ocurrir gradualmente como resultado de un proceso lento de erosión o sedimentación, o pueden sucederse de forma repentina, como consecuencia de alteraciones del cauce. Además, cambios temporales pueden ocasionarse, en razón del aumento o disminución de la presencia de plantas acuáticas o por la deposición de residuos.

Por estas razones, se vuelve esencial mantener el establecimiento de la relación cota-caudal bajo continua revisión, de manera a asegurar su validez y redeterminar la relación cuando ésta se muestre significativamente alterada por cambios de cualquier naturaleza.

En su forma más sencilla, la medición por medio del método área-velocidad involucra la medición del área de la sección transversal del río y de la velocidad promedio del flujo a través de ella, siendo la descarga el producto de las dos cantidades. El área de la sección transversal es determinada por medio de sondeos de profundidad en un cierto número de verticales, junto con la medición de la distancia de esta vertical hasta un punto de referencia

en la orilla, y las velocidades son determinadas principalmente por observaciones de medidores de flujo o de corriente. La precisión obtenida en cada una de las dos medidas depende de las condiciones de integración del medidor de flujo y de la suficiencia y competencia de las observaciones de velocidad y profundidad.

Las velocidades también pueden ser determinadas por flotadores o por mediciones de la pendiente del flujo de agua, pero es generalmente aceptado que medidores de flujo, llamados de molinetes, tienen superioridad en precisión y su utilización es prácticamente universal. Generalmente, la utilización de otros procesos o equipos ocurren sólo cuando el uso del molinete se vuelve impracticable.

1.3 UBICACIÓN DE ESTACIONES

La precisión general de registros de estaciones fluviométricas es determinada por un gran rango de características físicas e hidráulicas del tramo del río en donde estén ubicadas, particularmente aquellas que controlan la estabilidad y la sensibilidad de la relación cota-caudal, y la adecuada ubicación de la estación debe ser decidida a partir de la disponibilidad de sitios donde las condiciones requeridas se presentan.

La condición más importante requerida para la selección de un sitio se refiere a las características de "control" de flujo. Se llama "sección de control" una región del curso de agua cuyas condiciones de flujo hidráulico permite asegurar que cualesquier ocurrencias aguas abajo no produzcan efectos hacia aguas arriba de tal sección.

Desde el punto de vista hidráulico, tal hecho equivale a la producción de régimen crítico de flujo en la sección, localizada o concentrada en una corta longitud del tramo. Tal situación se verifica en tramos donde ocurren "rápidos" o cascadas.

En un sitio ideal, con un control permanente aguas abajo, los caudales son función única del nivel o cota, de forma que durante ciclos de caudales crecientes o decrecientes, un nivel dado corresponda siempre a la misma descarga. No siempre es posible cumplir tal requisito y puede haber casos donde el propósito de la estación imponga límites en la ubicación, tales que la elección del sitio sea inevitable; por ejemplo, sitios de presas, puntos de salida de drenes, secciones críticas de inundaciones, tramos bajo influencia de mareas, etc.

Los requisitos exigidos para una perfecta ubicación de una estación fluviométrica son los siguientes:

- a. ubicación en un tramo recto y con secciones transversales uniformes;
- b. la profundidad para caudales bajos y la turbulencia durante caudales de crecidas deben ser compatibles con los equipos que se pretende utilizar;
- c. cauce estable;
- d. cauce y control libre de vegetación acuática;
- e. flujo confinado en la sección para grandes rangos de caudales;
- f. el acceso al sitio debe ser posible bajo cualesquier condiciones meteorológicas;
- g. la orientación del tramo debe ser normal a la de los vientos predominantes;
- h. sensibilidad, o sea, pequeñas variaciones de caudales produzcan relativamente grandes variaciones de niveles;
- i. el campo de visión desde la sección, hacia aguas abajo y aguas arriba, debe ser clara y desobstruida, y
- j. un observador local debe estar disponible para atender a rutinas propias de la operación de la estación.

1.4 SELECCIÓN DE EQUIPOS

La elección de equipos para utilización dependerá de las características del sitio, particularmente aquellas que afectan la estabilidad y la sensibilidad de la relación cota-caudal, el tipo y calidad de los datos requeridos, los recursos humanos y de apoyo disponibles, la inversión inicial y los costos de mantenimiento, y finalmente la disponibilidad de asistencia local. Esencialmente, los aparatos consistirán de los equipos descritos a continuación.

1.4.1 Medidores No-Registradores de Niveles

Pueden ser escalas verticales o inclinadas dispuestas en el flujo de agua, de las cuales pueden hacerse lecturas directas, o dispositivos flotadores con los cuales el nivel es medido indirectamente, por referencia a un punto fijo sobre la superficie de agua. Los medidores no-registradores son baratos y sencillos de instalar y mantener y, en ciertos locales, como lagunas y ríos anchos cuyos niveles suben y bajan lentamente, lecturas diarias o en dos veces por día, son suficientes para registro de niveles. Tienen, sin embargo, algunos inconvenientes, ya que es esencial que un observador haga las lecturas, lo que no siempre es posible, además de involucrar una pérdida de precisión. Su principal utilización, de esta manera, es como un medidor de referencia, del cual pueden tomarse lecturas para checar y ajustar la operación de registradores continuos.

1.4.2 Registradores Continuos

La precisión de la determinación del caudal es gobernada principalmente por la precisión del registro del nivel, y es importante que la instrumentación usada pueda detectar y registrar niveles de agua eficientemente y con adecuación a los propósitos para los cuales son requeridas las mediciones.

El registro del nivel es usualmente producido por un flotador y un sistema de contrapesos, funcionando dentro de un pozo; el movimiento del flotador es utilizado para operar un mecanismo registrador, tal como una pluma o una cabeza impresora que puede reproducir un registro analógico gráfico o digital en una cinta magnética. Estos aparatos son usualmente llamados "limnógrafos".

Esencialmente, el registrador consiste de un elemento de tiempo y un elemento de altura de agua, que operan conjuntamente relacionando subidas o bajadas del nivel con el tiempo. El elemento de tiempo consiste de un reloj que mueve la carta gráfica dentro del abrigo.

En el caso de registradores digitales, es usado un mecanismo de codificación o digitalización para convertir la medida analógica del nivel de agua en una salida digital.

El requisito primordial de este tipo de registrador está en la eficiencia de desempeño con respecto a ambos, nivel y tiempo, pero en cualquiera de estos aparatos siempre es posible la ocurrencia de errores o desfases, por lo que se

requiere seguimiento sistemático y procedimientos de verificación, ajustes de campo, y mantenimiento.

Otros tipos de registradores continuos pueden ser mencionados, tales como los de bulbo de presión o inyectores de gas, los cuales detectan variaciones de la profundidad de la lámina de agua. Sin embargo, estos son usados principalmente para probar sitios, para operaciones de corta duración, o para sitios donde las condiciones no permiten la instalación de pozos de limnógrafos.

1.4.3 Medidores de Velocidad de Flujo

Los principales tipos de medidores de velocidad son los provistos de elementos rotatorios, de eje vertical o de eje horizontal, con hélices, los cuales proporcionan suficiente precisión de medidas de velocidad de flujo, cuando son usados de manera apropiada y bajo condiciones adecuadas. Están disponibles otros tipos de medidores, pero son utilizados sólo bajo condiciones especiales o para finalidades específicas. Entre estos pueden mencionarse los flotadores, que miden únicamente los flujos superficiales, péndulos, sensor Pitot (comúnmente utilizado para medidas en tuberías y conductos cerrados), además de otros más sofisticados como medidores electromagnéticos, acústicos, ópticos, etc., de utilización más limitada.

Los molinetes, como son llamados los medidores de tipo rotatorio, funcionan bajo el principio de relación lineal entre la velocidad del flujo y la velocidad de rotación del elemento rotatorio producida por la primera. Tal relación puede ser determinada a través de ensayos de laboratorio y ajustada periódicamente.

La rotación de la hélice, generalmente de material metálico, produce una señal de frecuencia que es transmitida a un receptor bajo el control del operador. Esta señal puede ser sonora, de luz o, como más modernamente se dispone, digital. Se determina, así, la frecuencia de rotación de la hélice y, con este valor, se calcula la velocidad del flujo en el punto donde está estacionado el medidor. Generalmente, tal punto está asociado a un segmento de área de la sección transversal y la velocidad calculada es adoptada como promedio de dicho segmento.

1.5 EJECUCIÓN DE AFOROS

En la calibración de una estación fluviométrica, es establecida una relación para todos los niveles de escurrentía, entre cota y caudal, tomando aforos de las descargas para diferentes estados de niveles. Básicamente, cada aforo involucra mediciones de profundidad y velocidad en un número de verticales espaciadas transversalmente a lo largo de la sección, y mediciones de ancho a través del curso de agua para cada vertical, desde un punto de referencia en la orilla. La velocidad es medida por molinete, las profundidades son medidas por medio de sondeos, con un peso suspendido por un cable que puede ser operado manualmente o por mecanismos. Aún, las profundidades también pueden ser medidas por ecobatímetros, y las distancias por medio de cintas metálicas o cables tendidos transversalmente. Finalmente, las distancias desde la orilla también pueden ser conocidas en el caso de que los aforos se ejecuten desde puentes en casos especiales.

La sección transversal es dividida en segmentos definidos por las verticales, en número suficiente como para asegurar el muestreo adecuado de las condiciones de flujo y del perfil del cauce. El espacio entre verticales depende del ancho, de las características morfológicas del cauce y de la variación de la distribución de velocidades a lo largo de la sección. En general, los intervalos no deben ser más anchos que la decimaquinta parte de la anchura total, en el caso de perfiles regulares, y que la vigésima parte de la anchura para perfiles irregulares; en el caso de canales revestidos de geometría regular, el número de verticales puede ser reducido sensiblemente. Las velocidades medidas en las verticales deben ser previamente probadas y verificadas, para comprobar que variaciones entre puntos correspondientes de verticales adyacentes no excedan el 20%.

Las observaciones de velocidad son usualmente hechas conjuntamente a las medidas de profundidad y esta condición es indispensable cuando el cauce es inestable. Para cada vertical, la profundidad es medida primero y su valor usado para determinar las posiciones de medición del molinete. La velocidad promedio en cada vertical puede ser determinada por un número de métodos diferentes, cada uno tomando la observación de la velocidad para una o más posiciones de la vertical. El método escogido puede variar de lugar a lugar y depende de una serie de factores cuyos efectos deben considerarse a fin de obtener el mejor resultado general: tiempo disponible, anchura y profundidad del agua, condiciones del cauce y del canal, variaciones instantáneas del nivel y precisión requerida. Hay tres métodos principales y un gran número de otros, los cuales aunque no recomendables para uso general, pueden ser aplicados convenientemente bajo condiciones del sitio

que el procedimiento normal es inadecuado o imposible. Estos tres métodos principales difieren en el número de posiciones de estacionamiento del molinete para la medida de velocidad. En condiciones especiales de baja profundidad, el aforo puede ejecutarse a mano, con soportes de apoyo para el molinete.

1.6 CÁLCULO DE LOS CAUDALES

A partir del aforo, el caudal total puede ser calculado por dos conjuntos principales de métodos: aritméticos y gráficos. La elección del método depende del equipo y del método observacional utilizado durante el aforo, de las condiciones del flujo en el momento del aforo, del tipo de curso de agua, y de la precisión requerida. Para el cálculo de aforos de rutina en estaciones normalizadas, es preferido el método aritmético pues permite suficiente precisión, son más sencillos y rápidos para ejecución y pueden ser implementados para procesamiento en computadora. Los métodos gráficos sólo son apropiados cuando han sido hechos múltiples puntos de toma de velocidades durante el aforo y son usados para verificar las características de flujo durante la implantación de la estación, o para obtener base efectiva de decisión de reducción de puntos de toma en operación continua.

Los principales métodos aritméticos son los siguientes:

- a. Método de la sección media: la sección transversal es tomada como constituida de un número de segmentos, limitados por dos verticales adyacentes. Se calcula la velocidad promedio en este segmento, como el promedio de las velocidades en cada vertical.
- b. Método de la sección intermedia: el segmento para el cual se calculará la velocidad media, es determinado por verticales virtuales intermedias a las verticales que sirvieron para la medición de las velocidades.

Los principales métodos gráficos se describen a continuación:

- a. Método de integración altura-velocidad: Se dibuja la curva ajustada de velocidades en función de la profundidad; para la curva ajustada se hace la integración gráfica para cada vertical.
- b. Método de las isolíneas de velocidad: todos los puntos de toma son considerados independientes de la vertical y se dibujan las curvas de igual velocidad; el cálculo se hace midiéndose las áreas limitadas por las velocidades básicas definidas.

1.7 CALIBRACIÓN DE LA ESTACIÓN

1.7.1 Relación Cota-Caudal

En la gran parte de los canales abiertos, el cálculo de caudales es hecho por medios indirectos y depende del establecimiento de una relación entre descargas y niveles. Se considera que la relación única existe y, si las condiciones básicas de ubicación de la estación fueron cumplidas, esta premisa es normalmente válida. Para una estación fluviométrica calibrada por el método área-velocidad, la relación cota-caudal es la agregación de todas las características del tramo del río en el cual la estación está ubicada. Esta relación es determinada correlacionando aforos con observaciones correspondientes de niveles, siendo la correlación hecha manualmente por medios gráficos y matemáticos, o directamente por técnicas computacionales. Esta relación se mantendrá buena hasta que alteraciones significativas ocurran en las características del tramo y, dado que los canales están continuamente en desarrollo y son inherentemente inestables, es fundamental mantener la relación bajo continua revisión, por medio del proceso sistemático de aforos y de cálculo de caudales.

1.7.2 Curva Cota-Caudal

La expresión más sencilla de la relación cota-caudal es la representación gráfica del trazado visual de la curva que se ajusta al conjunto de puntos graficados por los pares de valores. Donde una sección de control es efectiva para un rango de caudales, la curva se aproxima a una parte de una parábola, pero donde hay dos o más secciones de control, ella puede componerse de diferentes partes de varias parábolas, con inflexiones y reversiones de la curvatura, indicando cambios de la influencia de un control sobre el otro. El dibujo visual de la curva es inevitablemente un procedimiento subjetivo y, aunque bajo cuidadoso proceso, involucra algunas posibilidades de pérdida de precisión. En todo caso, para algunas situaciones, los aspectos propios del fenómeno físico e hidráulico pueden volver el proceso manual suficiente para los propósitos finales.

Una variación del procedimiento descrito arriba permite un examen más crítico de los resultados y está basado en la proposición de que sobre un rango restringido, la curva de la función polinomial puede aproximarse bastante por una función exponencial, la cual resulta en una línea recta cuando los puntos son graficados en papel con escalas logarítmicas. Tal hecho facilita el trazado de la curva y, como para ciertos rangos es una recta, disminuye las imprecisiones derivadas del carácter subjetivo.

En los casos de ríos intermitentes, hay que cuidarse de la determinación del origen, o sea, de las condiciones de caudales nulos, principalmente debido a que las imprecisiones en casos como éste pueden amplificarse.

Generalmente, los sitios escogidos para sección de aforos tienen características del canal que aseguran que, excepto para cambios ocasionales en el control, la relación entre nivel y descarga es substancialmente consistente. Bajo condiciones especiales (gradientes suaves y canal restringido) puede ocurrir el fenómeno conocido por histéresis, cuando el mismo nivel puede relacionarse con dos caudales, conforme los niveles estén crecientes o decrecientes. En tales casos, el dibujo de una única curva puede introducir imprecisiones en la determinación de caudales.

1.7.3 Tabla de Calibración

Para algunos propósitos, la expresión gráfica de la calibración puede ser adecuada, pero cuando la estación es operada para la obtención de registros continuos de caudales, es conveniente mantener una tabla de relación entre caudales y niveles, para estrechos intervalos de cota. En algunos casos, este procedimiento facilita el procesamiento computacional, y la actualización de informaciones en grandes bases de datos.

1.7.4 Ecuación Cota-Caudal

Aunque sea posible preparar la tabla de calibración tomando lecturas por intervalos en un gráfico aritmético o logarítmico e interpolar valores intermedios entre estas lecturas, la operación es laboriosa y requiere gran cuidado para asegurar que las diferencias sucesivas aumentan o disminuyen en proporción uniforme y apropiadamente. Por eso, se considera más apropiado determinar ecuaciones para la curva y computar los valores de tabulación a partir de ellas. Eso puede hacerse matemáticamente por medio de procedimiento de mínimos cuadrados, manualmente con una calculadora o computacionalmente directo desde los datos medidos, siendo aún aconsejable graficar los puntos para examen preliminar, a fin de evaluarse la necesidad de establecer rangos de agregación de datos.

Este procedimiento es subjetivo sólo en que se trata de definir las rectas de mejor ajuste, en caso de que tal opción sea disponible al operador. Si un número suficiente de puntos bien distribuidos está disponible, no debe haber dificultad para tomar tal decisión. Donde se disponga de un grupo de datos en las proximidades de un punto de quiebra esperado, es aceptable utilizar todo el grupo en el análisis de las rectas superior e inferior. El punto de

quiebra real es determinado por la solución simultánea de las ecuaciones relevantes.

En la mayoría de casos, la relación cota-caudal puede ser expresada por una ecuación de la siguiente forma:

$$Q = a (h - H)^b, \text{ siendo:}$$

- Q variable representativa de los caudales;
- h variable representativa de las lecturas de niveles;
- a, b coeficientes de la función, y
- H nivel de referencia, constante, representativo de las condiciones de flujo nulo.

Los valores de a y b son determinados para valores tentativos de H , y la terna de valores escogida debe ser la que resulte en el mejor ajuste analítico.

1.7.5 Extrapolación de la Relación Cota-Caudal

Las curvas de relación cota-caudal son originalmente destinadas a la interpolación de valores, y sus extrapolaciones arriba de los más altos o más bajos niveles aforados pueden estar sujetas a errores. Factores físicos tales como desbordes sobre las orillas para niveles de inundación, desplazamiento de los controles existentes para caudales bajos y altos, cambios en las condiciones de rugosidad, y otros, afectan la naturaleza de la relación en las extremidades y deben ser tomadas en cuenta.

La extrapolación de la relación debe ser evitada tanto cuanto sea posible, pero cuando esto es deseable, los resultados obtenidos deben ser verificados por más de un método. Informaciones adicionales deben ser conocidas, tales como, geometría de las áreas de inundación, condiciones físicas de cobertura vegetal de las orillas, cambios de controles, etc., a fin de orientar el análisis que debe desarrollarse. Entre los procedimientos posibles pueden destacarse los siguientes:

- a. si el control no se desplaza, para un intervalo arriba de cierto nivel, es posible estimar los caudales con la propia relación obtenida inmediatamente abajo;
- b. otro método sencillo consiste en extender separadamente las relaciones cota-área y cota-velocidad, obtenidas de los datos de aforos;

- c. graficándose el radio hidráulico de la sección en función de las profundidades en hoja logarítmica, usualmente resulta una línea recta que puede ser extrapolada;
- d. los conceptos de la fórmula de Manning, aplicados a la sección de la estación, también proporcionan medios de orientación de las variaciones de la relación arriba de los límites aforados;
- e. otras fórmulas hidráulicas pueden ser utilizadas, tal como la fórmula de Chezy;
- f. finalmente, en caso de disponibilidad de la información, es indispensable analizar las relaciones de estaciones cercanas, aguas abajo o aguas arriba, a fin de establecer un cruce de los datos y de los resultados, garantizando la consistencia a lo largo de tramos más extensos del río.

1.8 PRECISIÓN DEL MÉTODO ÁREA-VELOCIDAD

Cuando se considera la precisión proporcionada por el método, es necesario distinguir entre la precisión de un aforo aislado y aquella de la relación obtenida de un conjunto de aforos para diferentes niveles.

La incertidumbre de un aforo aislado no puede ser calculada o prevista con exactitud, pero estimaciones estadísticas de intervalos de tolerancia, dentro del cual puede estar contenido un valor real, pueden ser hechas analizando los componentes individuales de medición que actúan durante el aforo. Hay incertidumbres en las mediciones de anchura, profundidad, puntos de toma de velocidades, todos que dependen de la calidad de los instrumentos y métodos utilizados, y del propio método de determinación, área-velocidad, debido a limitaciones impuestas por el número de verticales, número de puntos en cada vertical y tiempo asignado para la observación de la velocidad.

La ISO - International Organization for Standardization - establece criterios tipificados para la estimación de las incertidumbres resultantes de los procedimientos generales de determinación de caudales, a partir de datos de estaciones hidrométricas.

Entre los estándares propuestos, se destacan los más importantes para los objetivos de este texto. Así, para límites de confianza del 95%, los porcentuales de incertidumbre más importantes son los siguientes:

- a. para la determinación aislada de un caudal: $\pm 7\%$;

b. para caudales medios diarios, mensuales o anuales: $\pm 5\%$.

1.9 CAUDALES NATURALES

La serie de caudales de una estación fluviométrica puede ser heterogénea, desde el punto de vista estadístico, en función de alteraciones ocurridas a lo largo del tiempo en la correspondiente área de drenaje. Típicamente, estas alteraciones ocurren debido a la sustitución de florestas y/o áreas agrícolas por otras culturas, o por áreas urbanizadas, o aún, por áreas inundadas. Estas últimas son utilizadas para almacenamiento de agua, inclusive de centrales hidroeléctricas. En términos prácticos, la importancia de esta heterogeneidad para planeamiento de la operación de un sistema hidroeléctrico depende de la relación entre el paso temporal adoptado (día, semana, mes o año) y la magnitud de la cuenca.

Por ejemplo, la lluvia precipitada sobre un suelo cubierto por vegetación, durante una hora, se descompone esquemáticamente en dos parcelas: i) el volumen escurrido superficialmente que irá a alimentar los esteros y los ríos, adónde llega bajo forma del llamado "escurrimiento superficial"; ii) el volumen filtrado en el suelo, el cual se disipará por la transpiración de la vegetación, por la evaporación directa del suelo, o, por percolación a través del macizo de suelo en dirección a las grietas y puntos bajos, donde asoma bajo la forma de "escurrimiento básico".

El aumento de la urbanización ocasiona el aumento del volumen superficial y la disminución del volumen filtrado en el suelo. Como consecuencia, la forma del hidrograma tiende a modificarse, presentando un incremento de escurrimiento superficial y una reducción del escurrimiento básico, conforme está ilustrado esquemáticamente en la Figura 1.1 a continuación. Obviamente, la serie será heterogénea, en caso de que haya interés por caudales horarios. Sin embargo, en caso de que la disminución de agua por evapotranspiración sea compensada por el aumento de la evaporación del agua retenida en las depresiones superficiales del terreno, el volumen total de escurrimiento a lo largo de un mes será prácticamente inalterado, para una pequeña cuenca hidrográfica. Es decir que, para la finalidad de un estudio con caudales mensuales, esta serie podría considerarse homogénea.

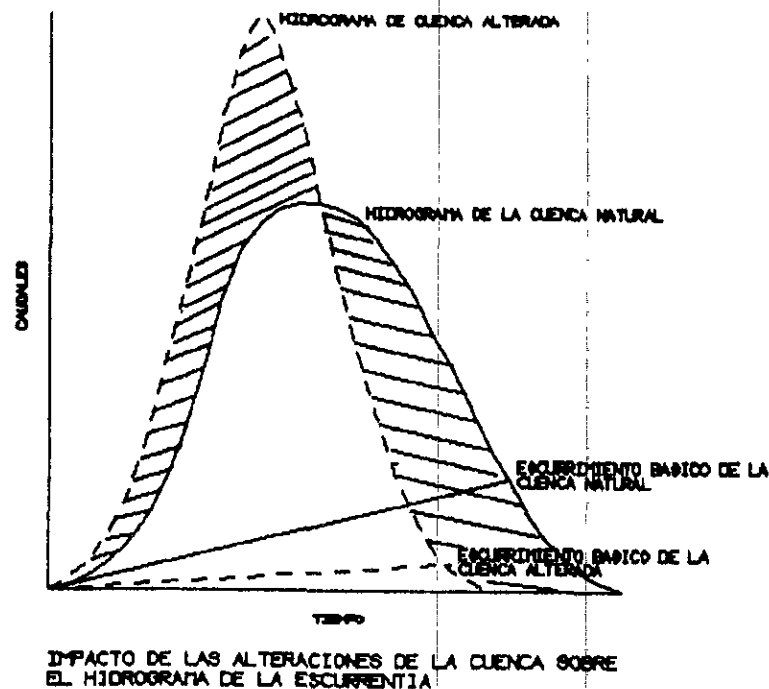


Figura 1.1

Considérese, ahora, el caso de que se construya un embalse con capacidad de regulación estacional en el área de drenaje de la estación; o sea, un embalse suficiente como para almacenar agua durante los meses húmedos, para utilización en los meses secos. En este caso, la serie de caudales mensuales será ciertamente heterogénea. La regla de operación del embalse utilizada en el pasado, no es necesariamente óptima. Si se desea evaluar cuales serían las consecuencias del empleo de otras reglas operativas distintas, se necesita simular la operación a partir de la serie de caudales que hubieran ocurrido, en caso de que el embalse no existiera, lo que significa a partir de la serie de caudales naturales. Esta serie es, por supuesto, homogénea. La serie de caudales naturales es también dato de entrada para los modelos estocásticos que producen escenarios hidrológicos alternativos para los estudios de planificación energética.

La consideración del efecto del embalse es hecha, en su forma más sencilla, a través del empleo de la ecuación de balance hídrico, asumiéndose que la evaporación directa de la superficie de agua del embalse sea equivalente a la

evapotranspiración que ocurriría en el área inundada, en el caso de que el embalse no hubiese sido construido.

Sea Y_m el caudal promedio en determinado intervalo de tiempo, medido en la estación hidrométrica, a partir de la relación cota-caudal. Sea ΔV , la suma de las variaciones de volumen de los embalses aguas arriba de la estación de referencia, obtenida a partir de los registros de nivel del embalse y de la relación entre elevación y volumen. Asuma que una variación positiva corresponda al llenado del embalse y recíprocamente. El caudal natural será:

$$Y = Y_m + \Delta V / \Delta t$$

donde Δt es el intervalo de tiempo considerado.

La relación entre nivel del embalse y volumen almacenado es, a veces, suficientemente imprecisa para resultar en errores intolerables en el uso de la ecuación de arriba. En tales circunstancias, es preferible estimar ΔV a partir del caudal promedio entrante Y_{Ra} , y defluente Y_{Rd} , de cada embalse.

$$\Delta V = (Y_{Ra} - Y_{Rd}) * \Delta t$$

Y_{Rd} puede ser estimado a partir del registro de producción de energía de la central, de las curvas de eficiencia de las turbinas (función de caída y descarga) y de la curva de descarga del aliviadero. Alternativamente, Y_{Rd} puede ser estimado a partir del registro de caudales de una estación fluviométrica ubicada inmediatamente aguas abajo del canal de restitución de la central. Por otra parte, Y_{Ra} sólo puede ser estimado por la suma de los caudales de los ríos aportantes al embalse, estimados a partir de los registros fluviométricos. Es preferible localizar estas estaciones fluviométricas de aguas arriba, en tramos de río libres de la influencia del remanso del embalse. Cuando esto no es posible, se recomienda la instalación de dos limnógrafos en cada aporte, de modo de permitir la estimación del caudal, tomando en consideración no sólo el nivel, sino también la pendiente de la lámina de agua.

La hipótesis de que la evaporación del embalse equivale a la evapotranspiración que ocurriría en el caso de que no hubiese el embalse, ni siempre es verdadera. Para verificarla, es necesario obtener una estimación de la tasa de evaporación del embalse, a partir de las observaciones de tanque evaporimétrico ubicado en las proximidades o, preferentemente, en un tanque flotante dentro del propio embalse. Es necesario también obtener una

estimación del índice de evapotranspiración de una cuenca fisiográficamente semejante a la del área inundada por el embalse.

Por ejemplo, considérese que la precipitación total que sucedió en un año cualquier sobre una cuenca semejante haya sido $P_s=1550$ mm. Este total es estimado por la media ponderada de las lecturas diarias (o continuas) de precipitación, registradas en estaciones pluviométricas y/o pluviográficas de la región. Considérese aún que la escurrentía total en las dos cuencas haya sido, a lo largo del año considerado, respectivamente.

$$Y_u = 16 \text{ l/s/km}^2 \text{ y } Y_s = 15 \text{ l/s/km}^2$$

Despreciando la diferencia de almacenamiento de agua en la cuenca "semejante", principalmente en el suelo, al inicio y al final del año, se tiene:

$$P_s = 1550 \text{ mm}$$

$$D_s = (15 \text{ l/s/km}^2)$$

$$(0,001 \text{ m}^3/\text{l})$$

$$(0,000001 \text{ km}^2/\text{m}^2)$$

$$(31536000 \text{ s/año})$$

$$D_s = 0,473 \text{ m}$$

$$D_s = 473 \text{ mm}$$

$$D_u = (16 \text{ l/s/km}^2)$$

$$(0,001 \text{ m}^3/\text{l})$$

$$(0,000001 \text{ km}^2/\text{m}^2)$$

$$(31536000 \text{ s/año})$$

$$D_u = 0,505 \text{ m}$$

$$D_u = 505 \text{ mm}$$

EVT_s = evapotranspiración en la cuenca semejante

$$EVT_s = 1550 - 473 = 1077 \text{ mm}$$

Considérese además, que la evaporación fue calculada, para este año, a partir de las lecturas del tanque evaporimétrico, en 1150 mm. Eso significa que la pérdida de agua para la atmósfera aumentó, por efecto de la construcción del embalse, en el total $1150 - 1077 = 73$ mm. Si no existiera el embalse, esta cantidad de agua estaría disponible para producción de energía, o para salir por el vertedero. Si el área inundada corresponde a, digamos, el 10% del área de drenaje de la cuenca aportante a la central, significa que $0,1 * 73 \text{ mm} = 7,3$ mm serían agregados al escurrimiento superficial D_u . En otras palabras, el caudal total en la central sería $(7,3/505) * 100 = 1,4\%$ superior al registrado, en caso de que el embalse no existiera. Cabe, por lo tanto, multiplicar todos los

elementos de la serie de caudales en este año por 1,014 , para descontar el efecto del embalse en la pérdida de agua para la atmósfera.

La construcción de un embalse produce, a veces, la pérdida de agua por percolación profunda. Como el "divisor de agua" de la capa freática no coincide necesariamente con los límites de la cuenca de drenaje, es posible que parte de esta agua se dirija hacia cuencas vecinas, constituyéndose en una pérdida no sólo para el proyecto hidroeléctrico, sino también para la cascada de aprovechamientos ubicados aguas abajo. Pueden ser utilizados trazadores para identificar la ocurrencia de estas percolaciones. En caso de confirmarse su existencia, no será correcto estimar la pérdida ocasionada por el embalse sólo con el uso de un tanque evaporimétrico. En tal caso, se debe utilizar la ecuación del balance hídrico para estimar la pérdida media total:

$$YRp = YRa - Yrd - (V2 - V1) / \Delta t, \text{ donde:}$$

$V1$ y $V2$ son las reservas de agua en el embalse al inicio y al final del período Δt (típicamente un año) considerado.

La transformación de YRp en una altura de agua HRp , para sustituir la altura de evaporación indicada por el tanque evaporimétrico (en el ejemplo, 1150 mm) es obtenida por:

$$HRp = YRp * (\Delta t) / AR, \text{ donde:}$$

AR es aproximadamente el área del embalse.

En rigor, el cálculo del efecto del embalse debería tomar en cuenta el hecho de que el área inundada varía con el volumen almacenado. Eso ha sido ignorado en el ejemplo anterior porque se adoptó un Δt largo, igual a un año, para permitir abandonar la diferencia del agua retenida en la cuenca al inicio y al final del período. Para efectos de elaboración de modelos de simulación, es necesario que se establezca una relación entre pérdidas (evaporación + percolación) y el nivel de almacenamiento.

Considérese el gráfico de la evolución histórica del almacenamiento a lo largo del tiempo, como en la Figura 1.2 abajo. Dividiéndose el gráfico en segmentos con almacenamiento aproximadamente constante (aunque con Δt eventualmente variable), se obtiene, para cada segmento, una pareja de observaciones $[V(i), YRp(i)]$, donde:

$V(i)$ almacenamiento medio a lo largo del segmento;
 i índice del segmento.

A partir de estos valores es posible estimar los parámetros (c, d) de la relación:

$$YRp = c + dV,$$

a utilizarse en los modelos de simulación y/o optimización.

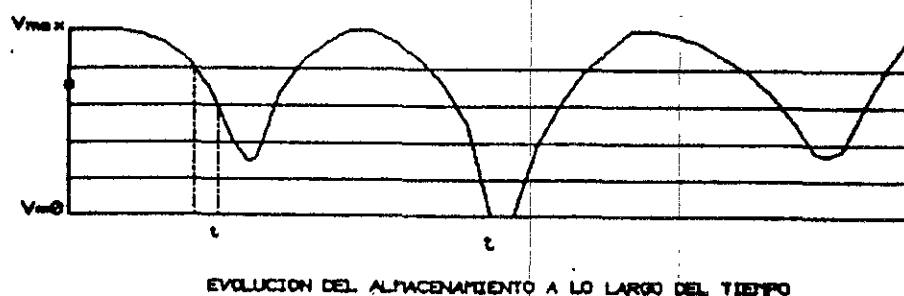


Figura 1.2

1.10 CENTRALES SIN ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS

Las estaciones fluviométricas con información más larga y confiable fueron ubicadas, en el pasado, tomando en consideración una serie de condicionantes, discutidas anteriormente, que no necesariamente coinciden con las necesidades del sector eléctrico. Consecuentemente, es común que no se tengan series largas de observaciones exactamente en el sitio en donde se construyó, o se construirá, la toma de agua de una central hidroeléctrica. En tal caso, hay que adoptar un procedimiento para "construir" una larga serie histórica de caudales naturales entrantes al proyecto hidroeléctrico, a partir de un conjunto de caudales naturales de estaciones fluviométricas de la misma cuenca. En este contexto, la "afluencia" o caudal entrante, es medida por el volumen escurrido durante un intervalo de tiempo suficientemente largo como para que se puedan despreciar los efectos de los transitorios

hidráulicos, o por el caudal promedio durante este intervalo, típicamente igual a una semana o a un mes. Las alternativas siguientes son en general utilizadas para construir la serie larga:

a. Regresión

Considérese que se disponga de una corta serie de caudales en el sitio de la toma de la central, $[y_1, y_2, y_3, \dots]$, observada simultáneamente con el caudal de alguna estación "vecina" $[x_1, x_2, x_3, \dots]$. Se adopta la siguiente relación entre X y Y :

$$Y = a + bX + Z$$

donde:

a, b parámetros "estimados" a partir de las observaciones comunes de X y Y

Z "error" del modelo que es una variable aleatoria con media cero.

Para el período largo en el cual se tiene las observaciones X , pero no las Y , es natural que se quiera utilizar la ecuación arriba para llenar las lagunas de los registros de Y . Ocurre, empero, que el "error" Z del modelo, sólo puede ser cuantificado para el corto período de observaciones comunes. Si Y es desconocido, Z también lo será. La mayoría de los analistas adopta, entonces, un procedimiento simplista: sustituyen el valor desconocido Z por su mejor estimación, o sea, cero (valor medio de Z). De esta manera, para cada observación de X , se hace la mejor estimación para Y , o sea:

$$Y = a + bX$$

Se puede demostrar que la serie de valores de Y estimados de tal forma, tendrá un valor medio correcto. Sin embargo, la variabilidad (variancia) será inferior a lo que sería calculado, en caso de que los verdaderos valores Y , y no los estimados, estuvieran disponibles.

Eso ocurre porque, aunque el error Z tenga media nula, los valores de Z no son todos iguales a cero. Ignorar la variabilidad de Z tiene como consecuencia asumir que los caudales entrantes en la central hidroeléctrica son más regulares en el tiempo de lo que son en realidad.

Esta es una visión optimista de la naturaleza. Esto es, los estudios de simulación y/o optimización realizados con estas series de caudales tenderán a subevaluar los costos operativos reales.

Por otra parte, la utilización de la misma estación para dos o más centrales vecinas, tiene como consecuencia asumir que los caudales son más regulares en el espacio, de lo que de hecho son. Esto es, el coeficiente de correlación entre caudales simultáneos de dos centrales tenderá a ser más grande de lo que debería ser. Esta es una visión pesimista de la naturaleza, bajo el punto de vista del interés energético, a la vez que disminuye la importancia de eventuales "complementaridades" hidrológicas entre las centrales.

Una manera de evitarse, tanto las distorsiones optimistas (regularidad temporal) cuanto las pesimistas (regularidad espacial), en el análisis de un sistema hidroeléctrico, consiste en ajustar una distribución de probabilidades para las observaciones de Z disponibles para el período corto de observaciones comunes. Para el largo período que no se dispone de Y ni de Z , los valores de Z son "sorteados", en lugar de igualados a cero, con el auxilio de una computadora. Este abordaje escapa del alcance del presente texto, y será considerado en el texto sobre hidrología estocástica.

b. Variación con el área de drenaje

Considérese que el período corto de mediciones $[x_1, x_2, x_3, \dots]$ sea tan corto, o que no exista, de tal manera que la estimación de los parámetros (a, b) no pueda hacerse con un mínimo de seguridad. Suponga aún, que el área de drenaje de la toma de la central sea A y el área de drenaje de la estación fluviométrica sea A_1 . Para cada caudal X , calculado en la estación, el caudal Y en la central es estimado por:

$$Y = (A/A_1)^k \cdot X, \text{ donde:}$$

k es un parámetro característico de la cuenca.

El valor k es estimado por la pendiente de la recta que ajusta los pares de puntos (área de drenaje; caudal medio anual), adoptándose la escala log-log, donde cada punto corresponde a una estación fluviométrica de la cuenca en consideración. El valor de k es, en general, próximo de 1, como puede notarse en la Figura 1.3 a continuación, derivada para la cuenca del

Río Mississippi. Se nota que la pendiente de la recta, en este caso, es muy próxima de 45 grados.

Es conveniente utilizar datos de más de una estación fluviométrica, siempre que posible. Por ejemplo, supóngase que la estación fluviométrica 1 esté aguas abajo de la toma de la central y que las estaciones 2 y 3 estén ubicadas aguas arriba, cada una de ellas en diferentes formadores del río donde se localiza la toma. En este caso, se puede utilizar la siguiente ecuación de estimación:

$$Y = (X_2 + X_3) + ((A - (A_2 + A_3)) / (A_1 - (A_2 + A_3)))^k * (X_1 - X_2 - X_3)$$

Observación - El texto de las secciones 1.1 hasta 1.8 fue extraído del libro "Hydrometry Principles and Practices", editado por A.W.Herschey, capítulo "Measurement of Flow Velocity-Area", de autoría de J.C.Lambie.

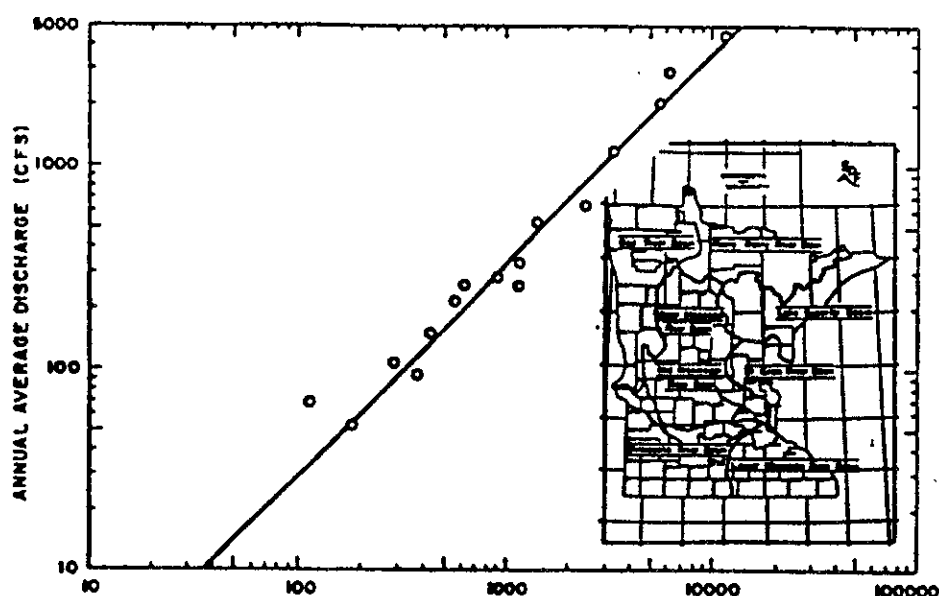


Figura 1.3