

REVISTA ENERGETICA ENERGY MAGAZINE



ORGANIZACION LATINOAMERICANA DE ENERGIA LATIN AMERICAN ENERGY ORGANIZATION

BASES DE UN NUEVO ORDEN PARA EL DESARROLLO
DEL SECTOR PETROLERO INTERNACIONAL

BASES FOR A NEW ORDER FOR DEVELOPMENT
OF THE INTERNATIONAL PETROLEUM SECTOR

OLADE: Permanent Secretariat

HIDROLOGIA PARA PEQUEÑAS CENTRALES
HIDROELECTRICAS

HYDROLOGY FOR SMALL HYDROPOWER STATIONS

Gustavo Silva Medina

GRUPOS GENERADORES PARA PEQUEÑAS
CENTRALES HIDROELECTRICAS

GENERATING SETS FOR SMALL HYDROPOWER STATIONS

Zulcy de Souza

AÑO 10 No. 2 AGOSTO 1986

YEAR 10 No. 2 AUGUST 1986

HIDROLOGIA PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS*

Gustavo Silva Medina 1/

RESUMEN

El tema se refiere básicamente a la recolección de información y su procesamiento en los estudios hidrológicos para pequeñas centrales hidroeléctricas.

El alcance del trabajo llega hasta la determinación de las series históricas que se utilizarán luego en los estudios de potencia y energía, diseño de obras de vertimiento y desviación, y manejo de los sedimentos.

Se ha hecho énfasis en el manejo de información escasa porque este es el común denominador cuando se trata de realizar estudios hidrológicos en cuencas pequeñas.

El texto se complementa con una bibliografía amplia que permitirá profundizar en las técnicas hidrológicas que se esbozan en estas notas.

1. INTRODUCCION

Los objetivos que debe cumplir el estudio hidrológico dentro de un proyecto de generación hidroeléctrica son los mismos para

* Trabajo presentado al II Curso Latinoamericano de Diseño de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), Bucaramanga, Colombia, 28 de Octubre-15 de Noviembre/1985.

1/ Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Bogotá, Colombia.

un desarrollo pequeño que para uno grande; en ambos casos el hidrólogo deberá utilizar al máximo la información disponible y aplicará las técnicas más apropiadas para obtener los resultados más confiables posibles.

Lo anterior indica que no puede hablarse de una hidrología diferente, exclusiva de los pequeños desarrollos hidroeléctricos. Sin embargo, por regla general, las pequeñas centrales hidroeléctricas están localizadas en zonas donde la información hidrometeorológica es escasa, y están asociadas con cuencas relativamente pequeñas en las cuales pueden aplicarse métodos simplificados y modelos matemáticos sencillos, sin pérdida importante en la confiabilidad de los resultados.

Dentro de este panorama, se tratará a continuación sobre la recolección y manejo de la información hidrológica en cuencas pequeñas, hasta 100 km², las cuales constituyen un alto porcentaje entre las que son utilizadas en las pequeñas centrales hidroeléctricas.

1.1 Objetivos del estudio hidrológico

El estudio hidrológico en un proyecto de generación hidroeléctrica tiene tres objetivos principales:

- Analizar los caudales medios del río en el sitio de captación, para estimar la curva de duración de caudales que servirá en los estudios de potencia y energía.
- Calcular los caudales de creciente para diseño de desviaciones y vertedores de exceso.
- Determinar el comportamiento de los sedimentos que el río transporta y estimar su magnitud, para diseñar las obras adicionales que garanticen el correcto funcionamiento de la captación, durante su vida útil.

1.2 Recolección de información

La búsqueda de la información básica que se requiere para

iniciar el estudio hidrológico comprende una investigación exhaustiva en las Entidades Oficiales y Particulares que hayan tenido relación con la zona de interés y con la región particular en la cual se halle localizada la cuenca del río que se va a aprovechar en el desarrollo hidroeléctrico.

Se hará, entonces, un inventario que incluirá los siguientes aspectos:

- Cartografía. Mapas con curvas de nivel, a escalas preferiblemente entre 1:10.000 y 1:100.000.
- Fotografías aéreas. Vuelos de diferentes épocas.
- Estudios anteriores sobre desarrollos de Ingeniería en la región. Deben incluirse monografías sobre la zona.
- Climatología. Registros sobre temperaturas, humedad, evaportación, pluviometría, dentro de la cuenca y en estaciones vecinas.
- Caudales. Incluye toda la información sobre caudales medios diarios, máximos instantáneos e hidrogramas de creciente, a lo largo del río.
- Uso de la tierra, actual y futuro, en la región. Dentro de este aspecto se incluyen las clasificaciones de suelos y la determinación de áreas potencialmente erosionables.

La determinación recolectada se analizará luego, de acuerdo con procedimientos que dependen de la calidad de los datos obtenidos, y con base en el análisis se programarán las labores de campo necesarias para complementar la información inicial.

Los trabajos de campo complementarios incluyen levantamientos topográficos, batimetrías, lecturas de niveles, aforos líquidos y sólidos, toma de muestras de sedimentos de fondo, y análisis de laboratorio.

Estas labores de campo se desarrollan generalmente durante un período corto, entre dos y cuatro meses, y su utilidad práctica está en que sirven para calibrar fórmulas y comprobar algunas de las suposiciones que, necesariamente, se hacen en el estudio.

A la vez que se desarrollan las labores de campo mencionadas se deberá continuar con la toma de datos sistemática en las estaciones pluviométricas, climatológicas y fluviométricas instaladas en la zona del proyecto y en áreas vecinas. Si es necesario, se instalarán estaciones adicionales, provisionales o permanentes, de acuerdo con las necesidades del estudio hidrológico.

2. ANALISIS DE LA INFORMACION HIDROMETEOROLOGICA

El primer paso dentro del análisis de la información es hacer un chequeo sobre la confiabilidad de los datos, el cual comprende análisis de doble masa para consistencia, justificación de anomalías, revisión de curvas de calibración, etc.

El análisis de doble masa se utiliza para comprobar la consistencia de los datos del registro de una estación, esto es, que todos los datos hayan sido tomados en las mismas condiciones, con lo cual se asegura que la serie es homogénea.

Las anomalías se refieren a aquellos datos que, a simple vista, o al ser procesados, no encuadran dentro del conjunto de registros de un determinado evento. Por ejemplo, hay una anomalía cuando un limnógrafo registra una creciente, pero los pluviógrafos instalados en la cuenca vertiente correspondiente no registran el aguacero que la generó; esta anomalía puede ocurrir por mala distribución de la red pluviométrica o por falta de sincronización entre los relojes de los aparatos.

Cuando la información es escasa, o sea cuando la longitud de los registros es corta o las series de tiempo resultan incompletas, los métodos estadísticos de confiabilidad no son aplicables. Este es el caso general cuando se trata de realizar estudios hidrológicos en cuencas de ríos pequeños, o en regiones aparta-

das, porque a la falta de cubrimiento de la red hidrometeorológica se suma la dificultad de acceso para tomar las observaciones. En estos casos, es necesario presumir que la información es aceptable para una primera aproximación, y deberá programarse un trabajo de campo adecuado para utilizar al máximo el tiempo disponible para realizar los estudios; este trabajo de campo entregará la información complementaria que servirá para extender las series históricas o para definir los parámetros de diseño, según los objetivos del proyecto.

Luego de clasificar la información, se procede a conformar las series de tiempo históricas, las cuales constituyen la base para los estimativos del comportamiento futuro del río y de la cuenca. Dentro de esta concepción del problema, se supone que los regímenes medios de lluvias, climatología y caudales definidos en la serie histórica, se mantienen durante los años correspondientes a la vida útil de las obras que se van a proyectar. Por esta razón, las series históricas deben cumplir con una serie de requisitos entre los cuales la longitud del registro y su confiabilidad son los más importantes.

En general, se considera que una buena serie histórica es la que conforma una "muestra representativa" de la población. En los estudios hidrológicos esta condición se halla en series climatológicas cortas, debido a que las variables que intervienen en el clima, como son la temperatura, humedad relativa, tensión del vapor, evaporación potencial, etc., tienen valores prácticamente definidos a nivel mensual multinanual, con pequeñas variaciones entre uno y otro año; por esta razón, series climatológicas de cinco años son suficientemente buenas. En cambio, cuando se trata de lluvias y caudales, la longitud óptima de la serie resulta casi siempre mayor que la disponible, porque oscila entre 10 y 50 años, dependiendo de la variabilidad ocasionada por el aspecto aleatorio de las lluvias y de la respuesta de la cuenca a los aguaceros.

En la mayoría de los casos es frecuente tener mejores registros de lluvias que de caudales; este hecho permite extender los registros de caudales mediante técnicas de regresión, las cuales funcionan razonablemente bien para valores anuales. También

pueden utilizarse métodos analíticos, basados en el comportamiento hidráulico del río y en el análisis de las componentes de la lluvia, para lo cual es indispensable emplear la información cartográfica disponible sobre la cuenca vertiente. Con la cartografía se calculan los parámetros fisiográficos de la cuenca, la pendiente de cauce, la pendiente media de la ladera, la elevación media de la cuenca, etc., y se define la capacidad de la cuenca para almacenar en forma natural las aguas superficiales.

Aun cuando se recomienda utilizar escalas de 1:10.000 hasta 1:100.000 en la cartografía, hay casos en los cuales esta información no existe por insuficiencia en el cubrimiento de ciertas regiones. Si el presupuesto del estudio lo permite, es recomendable ejecutar los trabajos de aerofotogrametría necesarios para obtener las restituciones del área de interés a las escalas apropiadas. Cuando las restituciones no son posibles, lo único que se puede hacer es trabajar con escalas muy pequeñas, por ejemplo mapas departamentales, o Atlas, con la consiguiente pérdida de precisión, especialmente en los cálculos de longitudes y pendientes.

De todas maneras, la información existente debe utilizarse al máximo, pero el alcance de los resultados obtenidos estará siempre sujeto a la calidad de los datos. Por esta razón, los modelos matemáticos sofisticados o los métodos más elaborados de cálculo no son recomendables cuando los datos son escasos o poco confiables.

3. PROGRAMA DE CAMPO PARA COMPLEMENTAR LA INFORMACION EXISTENTE

Como norma general, aún dentro de las etapas más avanzadas del proyecto, no se cuenta con el tiempo suficiente para desarrollar un programa de campo que proporcione toda la información requerida para complementar los registros históricos disponibles, con miras a obtener series hidrológicas que cumplan con las condiciones exigidas para ser consideradas "muestras representativas".

Además del factor tiempo se cuenta también con la limitación del presupuesto. Por estas razones, el programa de campo debe elaborarse cuidadosamente, y su desarrollo debe estar coordinado con las labores de oficina.

En el campo hidrológico, además de las visitas de reconocimiento general de la cuenca y de los sitios de interés del esquema propuesto, las labores complementarias incluyen la instalación, operación y procesamiento de datos de estaciones pluviométricas y fluviométricas, realización de aforos líquidos y sólidos, instalación de estaciones climatológicas sencillas, y lectura y procesamiento de registros de estaciones existentes.

Debe tenerse muy presente que, si el tiempo utilizado en el programa de campo es muy corto, la información obtenida resulta puntual y debe manejarse como tal. Así, por ejemplo, si se toman caudales medios diarios durante dos meses, esos valores no pueden utilizarse como medida del caudal medio anual multianual.

La utilidad de la información de campo, tomada en un periodo corto, está en que ella permite calibrar algunas de las fórmulas que se aplican dentro del estudio, y algunas veces sirve para comprobar en las etapas avanzadas del proyecto las suposiciones iniciales que necesariamente deben hacerse cuando la información existente es escasa.

Por último, es bueno recomendar que las labores de campo se programen teniendo en cuenta el régimen hidrometeorológico de la cuenca o de la región en la cual esté localizado el proyecto, con el fin de racionalizar la utilización del personal. Por ejemplo, no es conveniente realizar aforos diarios en una época en la cual se esperen pocas variaciones del caudal; los aforos, cuando el tiempo disponible es corto, deben estar dirigidos a determinar caudales de estiaje, caudales de creciente y condiciones medias.

4. DETERMINACION DE LA SERIE DE CAUDALES MEDIOS PARA ESTUDIOS DE GENERACION

El ideal para los estudios de potencia y energía es contar con una serie histórica de caudales medios diarios en el sitio de captación. Esto no es posible en la gran mayoría de los casos; sin embargo, cuando la serie existe y es representativa del régimen de caudales del río, los análisis de frecuencias permiten estimar parámetros que definen el comportamiento probable del río durante la vida útil de la obra.

La información que resulta del análisis de frecuencias se resume en los siguientes parámetros y gráficos:

- a) Curva de duración de caudales. Es un gráfico que presenta la probabilidad de ocurrencia de caudales medios. Se define como probabilidad de ocurrencia de un evento la probabilidad de que se presente un evento mayor o igual que ese. La curva de duración tiene formas típicas, según sean las características fisiográficas y de infiltración de la cuenca vertiente, y de acuerdo con el período tomado para análisis. Así, se habla de curvas de duración diaria, mensual o anual si los caudales medios analizados son diarios, mensuales o anuales, respectivamente; y de curvas típicas de ríos de montaña o de llanura.
- b) Caudal medio. El término se refiere al caudal medio anual multianual en un registro largo. Equivale aproximadamente al promedio de los caudales medios diarios de todo el registro.
- c) Caudal medio mensual multianual. Se refiere a los caudales medios mensuales de meses del mismo nombre. Por ejemplo, el caudal medio mensual multianual de Febrero, o caudal de Febrero, es el promedio a largo plazo de los caudales medios registrados en Febrero.
- d) Varianza. Es una medida de la dispersión de los valores de

una serie, con respecto al valor medio de la serie. En los análisis de caudales medios para generación de energía la varianza puede calcularse para los caudales medios diarios de un mes determinado, o para series mensuales multianuales, o anuales multianuales, según se requiera.

- e) Correlación serial. Este parámetro mide el grado de correlación o dependencia que existe entre términos consecutivos o desfasados de la serie. Es un término importante en el análisis de proyectos con almacenamiento, en los cuales la secuencia de los caudales es decisiva en la determinación del embalse útil. También es importante en la generación estocástica.
- f) Sesgo o asimetría. En los análisis de frecuencias de caudales medios se observa siempre que los valores máximos de la serie analizada son "k" veces mayores que el caudal medio de la serie, mientras que los caudales mínimos están limitados por cero, porque no pueden existir valores negativos. Este hecho da a las series de caudales medios una característica propia que se define como "sesgo hacia la derecha" o "asimetría positiva" que puede comprobarse matemáticamente en el análisis de frecuencias donde, por lo general, el "coeficiente de asimetría" estadístico resulta positivo. Sin embargo, la asimetría se reduce a medida que los períodos de análisis se hacen mayores; en efecto, el valor de "k" es alto en series de caudales diarios y próximo a uno en series de caudales anuales. Por esta razón, y además porque la varianza presenta un comportamiento similar en cuanto a que tiene un valor grande para series de caudales diarios y pequeño en series anuales, se asigna a las series de caudales medios anuales una asimetría igual a cero.

Una vez definidos los valores expuestos, obtenidos del análisis de frecuencias, se hace la proyección del régimen hidrológico hacia el futuro, de acuerdo con las características del proyecto. Por norma general, los proyectos se diseñan "a filo de agua" o "con embalse"; el tratamiento de cada caso particular puede resumirse como se presenta a continuación.

4.1 Aprovechamientos a filo de agua

En este caso la toma se hace por medio de una presa derivadora. Aun cuando puede formarse ocasionalmente un depósito aguas arriba de la presa, la capacidad reguladora de ese depósito se considera despreciable. Los pondajes para regulación horaria están considerados dentro de esta clase.

Los datos hidrológicos básicos para los estudios de potencia y energía resultan del análisis de la curva de duración de caudales diarios. De esta manera, se deducen el caudal seguro, los rangos de generación de energías primaria y secundaria y los porcentajes de riesgo de falla.

Cuando la información existente no es adecuada para hacer los análisis de frecuencias de los caudales diarios en el sitio de toma, hay necesidad de deducir la curva de duración utilizando técnicas de regresión, modelos de generación de caudales, tránsito de caudales diarios o extensión de registros por medio de análisis regional.

4.2 Aprovechamientos con embalse

Los aprovechamientos con embalse regulador son más la excepción que la regla en el caso de pequeñas centrales; sin embargo, cuando las condiciones topográficas son favorables y los análisis de la demanda y de la capacidad del río lo requieren, se proyecta el embalse.

Los estudios de operación del embalse se realizan con ayuda de un modelo matemático de simulación en el cual las "entradas" están conformadas por series secuenciales de caudales medios, con intervalos o períodos que dependen de la capacidad reguladora del embalse. Por lo general, se comienza a trabajar con períodos mensuales y, posteriormente, de acuerdo con los resultados, se adopta el período más conveniente, el cual puede resultar mensual, quincenal o diario. Las "salidas" conforman series de caudales medios que van a las unidades generadoras.

Como en la mayoría de los casos, en estudios de pequeñas centrales, la información histórica es deficiente, la determinación de la serie de entrada representa un problema que debe resolverse de acuerdo con el tipo de información disponible. A continuación se mencionan algunos de los métodos que pueden utilizarse:

- a) Cuando existen registros de caudales en otras secciones del mismo río, es factible hacer tránsito de caudales para llevar la serie hasta el sitio de captación; para este tránsito se requiere hacer un estimativo del tiempo de viaje y de los caudales que se generan en la subcuenca que queda limitada por el tramo del río entre las estaciones consideradas.
- b) Si existen buenos registros de lluvia y pocos registros de caudal en el sitio de captación o en otros sitios del mismo río, el método de tránsito se complementa con estudios de regresión entre caudal y lluvia. La experiencia ha demostrado que las regresiones funcionan bien para valores anuales, pero son deficientes para valores mensuales o diarios. En este caso particular lo recomendable es generar una serie de caudales anuales a partir de las lluvias anuales, y a partir de los caudales anuales generar la serie de caudales mensuales utilizando para ello las características de la serie de caudales medios.
- c) Cuando sólo existen registros de lluvia, lo único que puede hacerse es estimar caudales anuales mediante aplicación de balances hidrológicos, basados en registros o estimativos de evapotranspiración, lluvias y pérdidas. Los caudales anuales pueden utilizarse luego para formar una serie aproximada de caudales mensuales.

Como se observa, la calidad de los datos disponibles determina la confiabilidad en la serie histórica; esta confiabilidad disminuye en la medida en que se tomen períodos de análisis más cortos. Así, las series de caudales anuales son mejores que las de caudales mensuales, mientras que las de caudales diarios son

poco aceptables, a menos que resulten de registros limnigráficos en el sitio de captación.

Una vez establecida la serie histórica de los caudales se procede a hacer un análisis de frecuencias y a calcular sus estadísticos, los cuales sirven para estimar los parámetros que se aplicarán en el proceso de generación de las series estocásticas que se utilizarán en el modelo de simulación.

5. CAUDALES DE CRECIENTE

Por regla general, no existen registros suficientes para aplicar los métodos de análisis de frecuencia y duración en series de caudales máximos o de aguaceros de corta duración, cuando se trata de hacer estudios hidrológicos en cuencas pequeñas. Sin embargo, cuando esos registros existen pueden aplicarse las técnicas convencionales basadas en las distribuciones de probabilidad de Gumbel, Pearson o Log Pearson, combinadas con la aplicación de los hidrogramas unitarios deducidos a partir de análisis de crecientes y sus correspondientes aguaceros.

Como la falta de información adecuada es la norma general en este tipo de estudios, los caminos a seguir para determinar los caudales de creciente para diseño de vertederos de exceso y obras de desviación son los siguientes:

- a) Uso de fórmulas empíricas basadas en algunas características físicas de la cuenca. Entre estas vale la pena mencionar las de Creager, Fuller, Myers. No son recomendables; hay opciones mejores.
- b) Aplicación del método racional. Además de la dificultad de estimar un adecuado coeficiente de escorrentía, su aplicación a cuencas de más de 1 km² de área no es recomendable porque no considera el efecto del almacenamiento en la cuenca durante el proceso de escorrentía, lo cual hace que sobreestime los caudales picos en magnitudes importantes.

- c) Métodos hidráulicos, aplicación de las fórmulas de flujo en canales, con base en la geometría del cauce y la pendiente hidráulica. Presentan un buen procedimiento cuando se logran establecer rastros dejados por crecientes históricas.
- d) Hidrogramas unitarios sintéticos. La determinación del hidrograma sintético en una cuenca pequeña, menos de 100 km², es confiable cuando se cuenta con un plano topográfico que permita calcular las características fisiográficas de la cuenca con buena aproximación. Estas características son: área, longitud, ancho, pendiente del cauce, pendiente de la ladera, lagos, red de drenaje y elevación media. Los hidrogramas que resultan de aplicar el método de isocronas son preferibles a los que utilizan coeficientes deducidos en otras regiones; en este aspecto, los hidrogramas de Snyder y Taylor no son recomendables a menos que hayan sido debidamente calibrados. Son mejores los hidrogramas de Clark y el del Soil Conservation Service, SCS, cuyo desarrollo se encuentra en la bibliografía que se recomienda en estas notas. La complicación en la aplicación del método consiste en la escogencia de la lluvia apropiada, pero esta complicación es común a los otros métodos. Por lo general, hay necesidad de trabajar con lluvias máximas diarias registradas en la cuenca o en la región, y utilizar criterios que nacen del conocimiento que se tenga del régimen de aguaceros de la zona, para convertir una lluvia de 24 horas en un aguacero de corta duración.

6. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

La determinación de la carga de sedimentos que va a llegar al embalse o a las estructuras de captación vuelve a constituir un paso difícil dentro del estudio hidrológico porque la información sobre sedimentos es más deficiente que la información sobre caudales líquidos. Además, debe tenerse en cuenta que la construcción de las obras de derivación y captación afecta el régimen de transporte de sedimentos en el río.

No puede pretenderse, entonces, que, con una información deficiente se logren buenos estimativos sobre la cantidad y calidad de los sedimentos que van a llegar hasta las obras. Mientras no se mejore la información histórica no es recomendable utilizar métodos sofisticados ni modelos matemáticos en el cálculo de los sedimentos.

Como consecuencia de lo anterior, lo único que puede hacerse es determinar una carga de sedimentos probable a nivel anual, para lo cual puede utilizarse uno de los siguientes métodos:

- a) Asignar una carga específica en toneladas por kilómetro cuadrado por año, para el sedimento total, con base en estudios de tipo regional cuando existan estaciones de aforo de caudales sólidos, o por medio de comparación entre las características físicas, geológicas y meteorológicas de la cuenca en estudio y otras cuencas que tengan registros de sedimentos.
- b) Deducir una carga de sedimentos en suspensión como porcentaje de la erosión pluvial o pérdida de suelo anual en la cuenca, en caso de que ese dato haya sido establecido. A la carga de sedimentos en suspensión se añade una parte que oscila entre el 20 y el 30% de ese valor, para tener en cuenta la carga de fondo, con lo cual se determina un valor aproximado de carga total anual. Los porcentajes que deben utilizarse para aplicar este método dependen de la distribución de áreas potencialmente erosionables en la cuenca, distancia entre la fuente productora de sedimentos y el río, pendiente de la ladera, capacidad de transporte del río, régimen de lluvias, pendiente del cauce y granulometría del material de fondo.

Como la relación entre caudal sólido y caudal líquido en una sección de aforos no es única, la realización de pocos aforos simultáneos no representa mayor utilidad en el desarrollo de los estudios.

HYDROLOGY FOR SMALL HYDROPOWER STATIONS*

Gustavo Silva Medina 1,

SUMMARY

This article refers basically to gathering and processing information in hydrological studies for small hydropower basins.

The scope extends up to determination of the historical time series to be used later on in the studies on energy and power, design of diversion and spillway structures, and management of sediments.

Emphasis has been placed on the management of scant information since this is the common denominator of hydrological studies carried out in small basins.

The present text is supplemented by an ample bibliography which makes it possible to delve into greater depth in the hydrological techniques touched upon herewith.

1. INTRODUCTION

Within a hydropower project, the aims to be met by the hydrological study are the same for a small development site

* Document presented to the Second Latin American Course on Design of Small Hydropower Stations (SHPS), Bucaramanga, Colombia, October 28-November 15, 1985.

1/ Civil Engineer, National University of Bogota, Colombia.

as for a large one. In both cases, the hydrologist should take maximum advantage of available information and should apply the most suitable techniques in order to obtain as reliable results as possible.

Thus, one cannot speak of hydrology different from that of small hydroelectric developments. As a general rule, however, small hydropower stations are located in zones in which the hydrometeorological information is scarce and which are associated with relatively small basins where simplified methods and simple mathematical models can be applied without any important loss in the reliability of the results.

Collection and management of hydrological information in small basins (up to 100 km²) will be discussed below in this context. Such basins constitute a high percentage of the ones used for small hydropower stations.

1.1 Aims of the Hydrological Study

The hydrological study for a hydropower project has three major objectives:

- To analyze the mean flow of the river at the intake site, in order to estimate the flow-duration curve, which will aid in power and energy studies.
- To calculate the flow of water-level increases for the design of spillways.
- To determine the behavior of sediments carried by the river and to estimate their magnitude in order to design the additional structures which would guarantee the sound functioning of the intake during the project's lifetime.

1.2 Information-Gathering

The search for basic information required to start the

hydrological study includes an exhaustive investigation in public and private offices which have been involved in the area of interest and in the particular region in which the river basin to be tapped for the hydroelectric development is located.

Then an inventory is done, including the following aspects:

- Cartography: Maps with level curves, preferably on scales between 1:10,000 and 1:100,000.
- Aerial photographs: Flights during different seasons.
- Previous studies on engineering projects in the region, including monographs on the area.
- Climatology: Records on temperature, humidity, evaporation, rainfall, within the basin and in neighboring stations.
- Flows: Including all of the information on average daily flow and maximum instantaneous flow, as well as hydrographs for water-level increases, along the river.
- Current and future land use in the region: Within this aspect are included soil classifications and determination of potentially erosive areas.

The information gathered will then be analyzed according to procedures which will depend on the quality of the data obtained; and the field work needed to supplement the initial information will be programmed on the basis of this analysis.

The complementary field work includes topographical surveys, bathymetry, reading of levels, liquid and solid flow measurements, sampling of sediments at bottom, and laboratory analyses.

This field work is generally developed over a short time period (between two and four months), and its practical utility lies in the fact that it aids in adjusting formulas and verifying some of the assumptions which must necessarily be made in the study.

Meanwhile, during the field work, systematic data-gathering should continue in the pluviometric, climatological and fluviometric stations installed in the project area and in neighboring areas. If necessary, additional stations may be installed, whether provisional or permanent, according to the needs of the hydrological study.

2. ANALYSIS OF HYDROMETEOROLOGICAL INFORMATION

The first step within the information analysis is to check on data reliability. This calls for a double-mass analysis for consistency, justification of anomalies, review of adjustment curves, etc.

The double-mass analysis is used to verify the consistency of the data from station records, i.e., that all of the data have been collected under the same conditions, so as to assure series homogeneity.

The anomalies refer to those data which, at first sight, or even after processing, do not fit in with the set of records on a given event. For example, there is an anomaly when a limmograph shows a water-level increase but the rain gauges installed in the corresponding basin slope do not record the rainfall which brought it about. This anomaly can occur due to the poor distribution of the pluviometric network or due to the lack of synchronization between the clocks of the devices.

When information is scarce, i.e., when the length of the records is short or the time series prove incomplete, statistical reliability methods are not applicable. This is the general case when dealing with hydrological studies in small river basins, or remote regions, because the lack of

coverage of the hydrometeorological network must be added to the difficulty of access in making the observations. In these cases, it is necessary to assume that the information is acceptable for a first estimation, and adequate field work must be scheduled in order to maximize the time available for carrying out the studies. This field work will provide the complementary information which will aid in extending the historical series or in defining the design parameters, according to the project objectives.

After the information has been classified, historical time series will be formed to constitute the basis for estimates of the river's and the basin's future behavior. Within this conception of the problem, it is assumed that the average regimes for rainfall, climatology and flows defined in the historical series will remain the same throughout the lifetime of the project structures. For this reason, the historical series should meet a list of requirements, among which the length of the record and its reliability are the most important.

In general, it is considered that a good historical series is comprised by a "representative sample" of the population. In hydrological studies this condition is found in short climatological series due to the fact that the variables involved in climate, e.g., temperature, relative humidity, vapor tension, potential evaporation, etc., have values defined practically at the monthly level over multi-annual periods, with slight variations from one year to another. For these purposes, five-year climatological series are good enough. However, when dealing with rains and flows, the optimal length of the series is almost always greater than that available, because it fluctuates between 10 and 50 years, depending on the variability occasioned by the random aspect of rain and on the basin's response to showers.

In most cases, it is common to have better rainfall records than flow records. Flow records can be extended by means of regression techniques, and can work reasonably

well for annual values. Analytical methods based on the hydraulic behavior of the river and on the analysis of rainfall components can also be used; for these, it is imperative to use the cartographic information available on the basin. Through cartography, the basin's physiographic parameters are calculated (e.g., area, length of the river's watercourse, average basin width, slope of the bed, average slope of the banks, average basin elevation, etc.) and the basin's natural capacity for storing surface water can be defined.

Although it is recommended that scales of 1:10,000 up to 1:100,000 be used in mapmaking, there are cases in which this information is lacking, due to insufficient coverage of certain regions. If the study budget so permits, the necessary aerial photogrammetric work should be done to obtain restitutions of the area of interest on appropriate scales. When restitutions are not possible, the only alternative is to work on very small scales; for example, using departmental maps or an atlas, with the consequent loss of precision, especially for the calculation of lengths and slopes.

The existing information should be used as much as possible, but the soundness of the results obtained will always be subject to the quality of the data. For this reason, when data are scarce or not very reliable, sophisticated mathematical models or more elaborate methods of calculation are not recommendable.

3. PROGRAM OF FIELD WORK TO COMPLEMENT EXISTING INFORMATION

As a general rule, even within the most advanced project stages, there is not sufficient time to develop a program of field work which would provide all of the information required to complement the available historical records, in order to obtain hydrological series which would meet the conditions demanded for consideration of a "representative sample".

Besides the time factor, there are also budget constraints. For these reasons, the program of field work should be carefully prepared and its implementation should be coordinated with office tasks.

In the field of hydrology, in addition to general reconnaissance visits to the basin and to the sites of interest for the proposed scheme, the complementary work includes installation, operation and processing of data from pluviometric and fluviometric stations, realization of liquid and solid measurements, installation of simple climatological stations, and reading and processing of records from existing stations.

It should be kept in mind that if the time used for the program of field work is very short, the information obtained will be "spot" information and should be handled as such. Thus, for example, if the daily mean flows for two months are taken, these values cannot be used as a measure of the average annual flow over a multiannual period.

The utility of the field information compiled over a short period lies in the fact that it permits gauging some of the formulas applied within the study and, in advanced project stages, sometimes serves to verify the initial assumptions which must necessarily be made when there is a paucity of information.

Finally, it is good to recommend that the field work be programmed taking into account the hydrometeorological regime of the basin and/or region in which the project is located, in order to rationalize the use of personnel. For instance, it would be wise to do daily measurements during a period in which little variation can be expected in flow; when available time is short, the measurements should be geared to determining flows during dry periods, during flooding, and under average conditions.

4. DETERMINATION OF THE SERIES OF MEAN FLOWS FOR ELECTRIC POWER GENERATION STUDIES

The ideal for the studies on power and energy is to have an historical time series of average daily flows at the intake site. This is not possible in most cases; however, when the series exists and is representative of the river's flow regime, the analysis of frequency makes it possible to estimate parameters defining the probable behavior of the river during the project's life span.

The information which results from the analysis of frequency can be summarized in the following parameters and graphs:

- a) Flow-duration curves. This is a graph showing the probability of occurrence of mean flows. "Probability of occurrence" is defined as the probability that an event equal to or greater than this one could occur. The duration curve has typical shapes, according to the physiographic and infiltration characteristics of the basin, and according to the period of analysis. Thus, one can speak of daily, monthly, or annual duration curves if the mean flows analyzed are daily, monthly, or annual, respectively, and of mountain or plains rivers.
- b) Mean flow. This term refers to the average annual flow over a multiannual period when there are long records. It is approximately equivalent to the average of the daily mean flows for the entire record.
- c) Average monthly flow over a multiannual period. This refers to the average monthly flows in the same month of more than one year. For example, the multiannual monthly flow in February, or the February flow, is the long-term average of the mean flows recorded in February.
- d) Variance. This is a measure of the dispersion of a

series with respect to its average value. In the average flow analyses for energy generation, the variance can be calculated for the average daily flows for a given month, or for monthly series over multiannual periods, or for annual series over multiannual periods, as required.

- e) Series correlation. This parameter measures the degree of correlation or dependence existing between consecutive or non-consecutive terms in a series. It is an important term in the analysis of projects with storage facilities, where the sequence of flows is decisive in the determination of useful reservoir. It is also important in stochastic generation.
- f) Bias or asymmetry. In the frequency analyses for mean flows, it can be seen that the maximum values of the series under analysis are always "k" times the mean flow of the series, whereas the minimum flows are limited by zero because negative values cannot exist. This fact implies that the series of mean flows is characterized by a bias to the right, or by positive asymmetry, which can be proven mathematically in a frequency analysis, where the statistical asymmetry coefficient usually turns out positive. Nevertheless, asymmetry is reduced to the extent that the periods of analysis become longer; the "k" value is actually high in daily flow series and close to one in annual flow series. For this reason, and also because the variance has similar behavior in terms of the fact that it has a large value for daily flow series and a small value for annual series, the series of mean annual flows is assigned an asymmetry equal to zero.

Once the values have been defined and obtained from the frequency analysis, the hydrological regime can be projected to the future, in keeping with the features of the project. As a general rule, the projects are designed as run-of-the-river installations or with a reservoir. Each one of these cases is summarized below.

4.1 Run-of-the-River Sites

In this case, the intake is made through a diversion dam. Although a deposit may occasionally be formed upstream of the dam, the regulating capacity of the deposit is considered negligible. The pools used for hourly regulation are considered within this group.

The basic hydrological data for the studies on energy and power are outgrowths of the analysis of the daily flow duration curves. Hence, the "sure flow", the ranges of primary and secondary energy generation, and the percentage of defect risks can be deduced.

When existing information is not adequate for the flow analyses of the daily flows at the intake site, it is necessary to deduce the duration curve using regression techniques, flow generation models, daily flow transfers or extension of records by means of a regional analysis.

4.2 Reservoir Sites

The sites having regulating reservoirs are more the exception than the rule in the case of small hydro stations. However, when topographical conditions are favorable and the analyses of demand and river capacity so require, a reservoir can be planned for.

The studies on reservoir operation are carried out with the aid of a mathematical simulation model in which the inputs are made up of sequential series of mean flows, with intervals or periods depending on the reservoir's regulating capacity. Generally speaking, work begins with monthly periods and later on, depending on the result, the most convenient period is adopted: this can end up being monthly, bi-weekly or daily. The outputs include series of mean flows that reach the generating units.

Since in most cases of studies on small hydro stations the historical information is poor, determination of the input series represents a problem which must be solved in keeping with the type of information available. Some of the methods which can be used are listed below.

- a) When there are records on flows in other sections of the same river, it is feasible to transfer data on flow series to the intake site; for this data transfer, it is necessary to have an estimate of the time of travel and of the flows that are generated in the sub-basin which is bounded by the section of the river between the stations considered.
- b) If there are good records on rainfall and few records on flows at the intake site or at other sites along the same river, the data transfer method can be supplemented by regression studies between flow and rainfall. Experience has shown that regressions function well for annual values but that they are deficient for monthly or daily values. In this particular case, what is recommended is that a series of annual flows be generated from annual rainfall and that on the basis of the annual flows a series of monthly flows be generated, using the features of the mean flow series.
- c) When there are records exclusively on rainfall, the only thing that can be done is to estimate the annual flows by applying hydrological balances based on records or estimates of evapotranspiration, rains and losses. The annual flows can be used to form an approximate series of monthly flows.

As can be seen, the quality of the available data determines the reliability of the historical time series; the shorter the periods of analysis, the lesser the reliability. Thus, annual flow series are better than monthly flow series, and daily flow series are not very acceptable

unless they grow out of limnigraphic records at the intake site.

Once the historical time series of the flows has been established, an analysis of frequencies is done and statistics are calculated to aid in estimating the parameters that will be applied in the process of generation of stochastic series to be used in the simulation model.

5. INCREASES IN WATER LEVELS

As a general rule, when hydrological studies are being carried out in small basins, there are not enough records for application of the methods of analysis of frequency and duration in series of maximum flows or short-term showers. However, when these records exist, conventional techniques based on the Gumbel, Pearson or Pearson Log probability distributions can be applied, in combination with the application of the unit hydrograms deduced on the basis of an analysis of water-level increases and the corresponding rainfall.

Since a lack of suitable information is the general norm in this type of studies, the paths to be followed to determine the water-level increases for the design of spillways and derivation dams are as follows:

- a) Use of empirical formulas based on some of the physical features of the basin. Among these, it is worthwhile mentioning the Creager, Fuller, and Myers formulas. But these are not recommendable; there are better options.
- b) Application of the rational method. In addition to the difficulty of estimating an adequate runoff coefficient, their application to basins larger than 1 km² in area is not recommendable because it does not consider the effect of storage on the basin during the runoff process; this leads to significant overestimates of peak flows.

- c) Hydraulic methods, application of canal-flow formulas based on the geometry of the watercourse and the hydraulic slope. The procedure is sound when it is possible to establish evidence of past water-level increases.
- d) Synthetic unit hydrograms. The determination of a synthetic hydrogram in a small basin, less than 100 km², is reliable when there is a topographic map permitting calculation of the basin's physiographic features with a good approximation. These features are: area, length, width, slope of the waterbed, slope of the banks, lakes, drainage network and mean elevation. The hydrograms that result from application of the method of isochrones are preferable to those that use coefficients deduced from other regions; in this aspect, the hydrograms of Snyder and Taylor are not recommendable unless they have been duly adjusted. The hydrograms of Clark and the Soils Conservation Services (SCS), the development of which is found in the bibliography recommended herein, are better. The complication in applying the method lies in the selection of appropriate rainfall, but this complication is common to all of the other methods as well. Generally speaking, it is necessary to work with the daily maximum rains recorded in the basin or in the region, and to use criteria growing out of knowledge on the rainfall regime in the area, in order to convert a 24-hour rain into a short shower.

6. TRANSPORT OF SEDIMENTS

Determination of the load of sediments that will reach the reservoir or the intake structures comes to constitute a difficult step within the hydrological study because information on sediments is scarcer than information on liquid flows. In addition, it must be kept in mind that construction of the diversion dam and intake works affect the river's sediment-transport regime.

Thus, with deficient information, one cannot expect to obtain the quantity and quality of the sediments that will reach the works. As long as there is no improvement in the historical information, it is not recommendable to use sophisticated methods or mathematical models in calculating sediments.

Consequently, the only thing that can be done is to determine a probable load of sediments at an annual level, for which purpose one of the following methods can be used:

- a) To assign a specific load in tons per square kilometer per year for total sediments, on the basis of regional studies when there are measuring stations for solid flows or through the comparison of physical, geological and meteorological features of the basin under study with those of other basins for which sediment records exist.
- b) To deduce a load of sediments in suspension as a percentage of annual river erosion or loss of soil in the basin, in the event that this datum has been established. To the load of sediments in suspension is added a part which fluctuates between 20 and 30 percent of this value, in order to take into account the load at bottom, with which an approximate value for total annual load is determined. The percentages that should be used to apply this method depend on the distribution of potentially erodible areas in the basin, the distance between the sediment-producing sources and the river, the slope of the banks, the river's transport capacity, the rainfall regime, the slope of the waterbed, and the grain size of the material at bottom.

Since the ratio between solid flow and liquid flow is not unique, several simultaneous measurements will not yield greater utility in the development of the studies.

7. BIBLIOGRAPHY/BIBLIOGRAFIA

Ciriani, T.A., Maione, U., Wallis, J.R. Mathematical Models for Surface Water Hydrology. John Wiley & Sons, 1977.

Fritz, J.J. Small and Mini Hydropower Systems. McGraw-Hill Company, 1984.

Linsley, R.K., Franzini, J. Water Resource Engineering. McGraw-Hill, 3rd edition, 1979.

Linsley, R.K., Kohler, Paulhus. Hydrology for Engineers. McGraw-Hill, 3rd Edition, 1980.

Silva M., Gustavo. Hidrología Básica. Conferencias Universidad Nacional de Bogota, 1984.

U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Diseño de presas pequeñas. CECSA, México, 1979.

Viessman, W., Knapp, Lewis. Introduction to Hydrology. Harper & Row Publishers, 2nd edition, 1977.