

Determinación de la avenida de diseño y calibración de caudales en la cuenca del río Viejo para la protección de las obras civiles contra máximos eventos en el marco del afianzamiento del proyecto hidroeléctrico Larreynaga en Nicaragua, Centroamérica

Design flood assessment and flow calibration in the Viejo River Basin for flood protection of civil works in the frame of the Larreynaga Hydropower Development Project in Nicaragua, Central America

César A. Alvarado Ancieta. Ing. Civil. M.Sc.
*División de Ingeniería de Aprovechamientos Hidroeléctricos,
FICHTNER GmbH & Co.KG, Stuttgart, Alemania. alvaradoc@fichtner.de*

Resumen: La presencia creciente de fenómenos naturales, específicamente de tormentas tropicales en el sur de Norteamérica, Centroamérica y El Caribe ha puesto en relevancia la importancia de la avenida de diseño durante eventos máximos para la cual fueron construidas y serán proyectadas diversas obras de ingeniería, lo cual ha conllevado a la verificación de la avenida máxima de diseño, que es de singular importancia para eventos o fenómenos de corta duración en el tiempo, en cuencas pequeñas, presencia de avenidas instantáneas, donde la capacidades de retención y escurrimiento difieren. Para efectos de afianzamiento del proyecto hidroeléctrico Larreynaga, y teniendo en cuenta la presencia regular del huracán Mitch en la zona del proyecto, se presenta aquí el análisis aplicado para la determinación de la avenida de diseño y calibración de caudales para la protección contra máximas avenidas de las obras civiles del proyecto en la cuenca del río Viejo, en Nicaragua, Centroamérica.

Palabras Clave: Nicaragua, Avenida de diseño, Máxima avenida, Calibración de caudales

Abstract: The increasing number of natural phenomena and particularly tropical storms in the south of the United States, Central America and the Caribbean makes it vital that engineering works are calculated and built according to correct design floods for maximum events. This is of particular importance for rapid events or phenomena in small basins with the presence of flash floods and where there are different holding and run-off capacities. This article present the analysis applied to establish the design flood and flow calibration in the River Viejo basin in Nicaragua to guarantee the civil works forming part of the Larreynaga hydroelectric project with due consideration being given to the regular presence of hurricane Mitch in the project area.

Keywords: Nicaragua, Design flood, Maximum flood, Flow calibration

Objetivo

Estimación de la avenida de diseño y calibración de caudales en la cuenca del río Viejo para protección contra máximos eventos de las obras principales del proyecto hidroeléctrico Larreynaga: avenida de diseño de la presa, verificación de la capacidad hidráulica del cruce de un puente existente en el río El Cacao ubicado aguas arriba, en la cola, del futuro embalse, y seguridad contra inundaciones del río Viejo en la zona de la futura casa de máquinas. Por lo tanto el análisis que se efectúa en el presente artículo es para protección de las obras ci-

Objective

Estimation of the design flood and flow calibration in the River Viejo basin to protect the main civil works of the Larreynaga hydroelectric project against maximum events: flood design of the dam, verification of the hydraulic capacity of an existing bridge crossing the River El Cacao set upstream at the tailrace of the future reservoir, and safety against the flooding of the river Viejo in the area of the future powerhouse. The analysis made in the present article is geared towards the protection of the civil works and is not related to hydroelectric production.



viles y no se encuentra relacionado con la producción hidro-energética.

Introducción y descripción del área del proyecto

El proyecto de la C.H. Larreynaga, desarrollado por la Empresa Nicaragüense de Electricidad - ENEL, se ubica al sur del Municipio y Departamento de Jinotega, República de Nicaragua, Centroamérica, y se localiza al noreste de la capital, ciudad de Managua, a una distancia de 161 km, ver Figura 1. Específicamente, el aprovechamiento hidroeléctrico se encuentra ubicado aguas abajo de la existente C.H. Centroamérica sobre el río El Cacao, tributario del río Viejo. La cuenca del proyecto está localizada en la parte noroeste de Nicaragua entre los 13°05' y 13°10' latitud norte y entre los 86°00' y 86°05' longitud Oeste. El río Tuma, adyacente a la parte alta de la cuenca del Río Viejo, fue represado en los años 60 por la presa Mancotal, formándose de esta manera el Lago Artificial de Apanás con un área aproximada de 35 km².

Las aguas del lago artificial de Apanás son trasvasadas a través de una línea de aducción hacia la cuenca baja del río El Cacao, caudales que previamente son turbinados a través de la C.H. Centroamérica y descargadas al río El Cacao, río el cual a su vez unos kilómetros aguas abajo en su curso tributa sus aguas al río Viejo. El caudal turbinado de la C.H. Centroamérica es el principal aporte - caudal regulado - para generación energética en el proyecto hidroeléctrico Larreynaga, que será la primera central hidro-

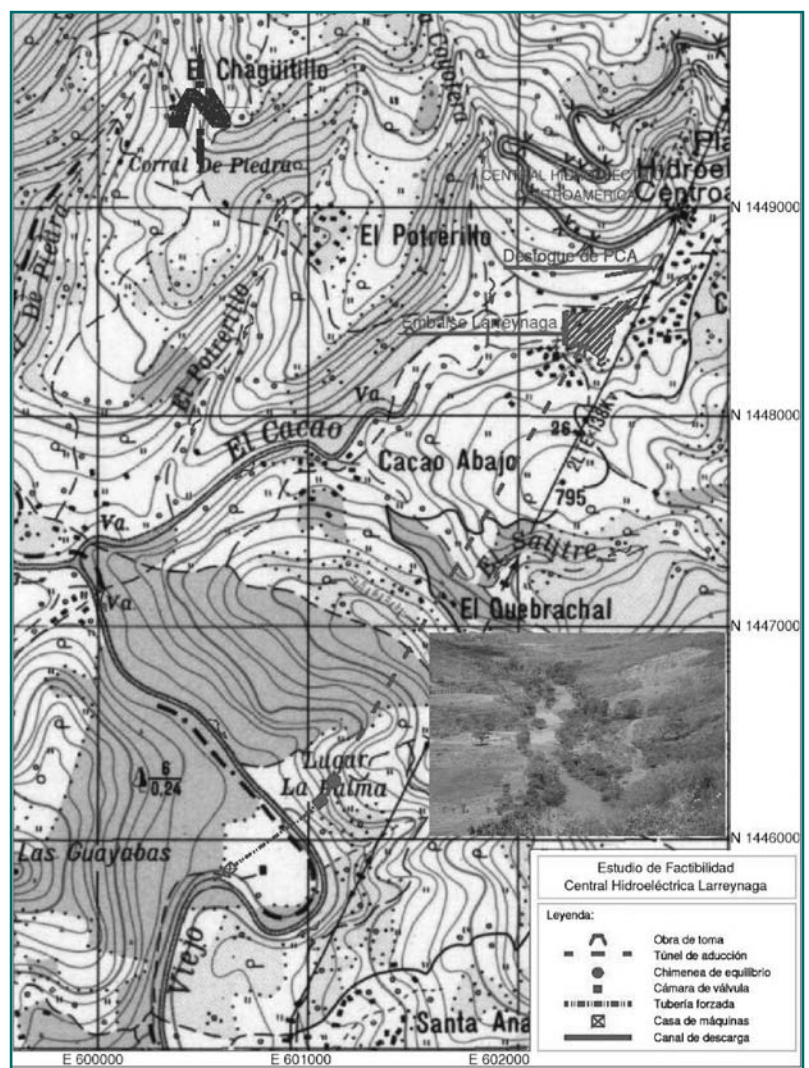
Fig. 1. Área de ubicación del proyecto C. H. Larreynaga/Location of the Larreynaga Hydropower Project.

Introduction and description of the project area

The hydroelectric power station project, carried out under the auspices of the Nicaraguan Electricity Company (ENEL), is set to the south of the Jinotega Municipality and Department and 161 km to the northeast of the Nicaraguan capital Managua. The hydroelectric development is set downstream from the existing Centroamerica Power Station on the River El Cacao, a tributary of the River Viejo. The project catchment area is located in the northwest of Nicaragua between latitude 13°05' and 13°10' north and longitude 86°00' and 86°05' west. The river Tuma set in the upper part of the River Viejo basin was impounded by the Macotal dam in the 60's to form the Apanas Reservoir with a surface area of approximately 35 km².

The waters of the Apanas reservoir are diverted by a headrace line to the lower basin of the River El Cacao

Fig. 2. Plano de ubicación general/General site plan.



eléctrica de magnitud a implementarse en Nicaragua después de 35 años.

El proyecto y su objetivo

La Empresa Nicaragüense de Electricidad - ENEL - en el marco del Programa Energético que desarrolla para la nación nicaragüense, tiene como objetivo y responsabilidad implementar el proyecto de la Central Hidroeléctrica de Larreynaga mediante el aprovechamiento de las aguas turbinadas que descarga la casa de máquinas de la existente C.H. Centroamérica al río El Cacao, tal como se aprecia en el plano de ubicación general, Figura 2, y en el esquema hidráulico, Figura 3. El objetivo principal del proyecto es incrementar la oferta energética con una generación hidroeléctrica adicional de 73 GWh anuales mediante la C.H. Larreynaga, con una potencia instalada de 17 MW, utilizando el caudal turbinado de la existente C.H. Centroamérica de $22 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal que previamente es regulado y luego derivado desde el Lago de Apanás hacia la cuenca del río Viejo.

La proyectada casa de máquinas se situará sobre la margen derecha del río Viejo, aproximadamente 6,20 km aguas abajo de la existente casa de máquinas de la C.H. Centroamérica, la que se ubica sobre la margen derecha del río El Cacao, afluente del río Viejo.

El proyecto hidroeléctrico Larreynaga comprende el aprovechamiento de los caudales máximos turbinados (operación en punta) por la C.H. Centroamérica que descargan al río El Cacao, en la cuenca alta del río Viejo.

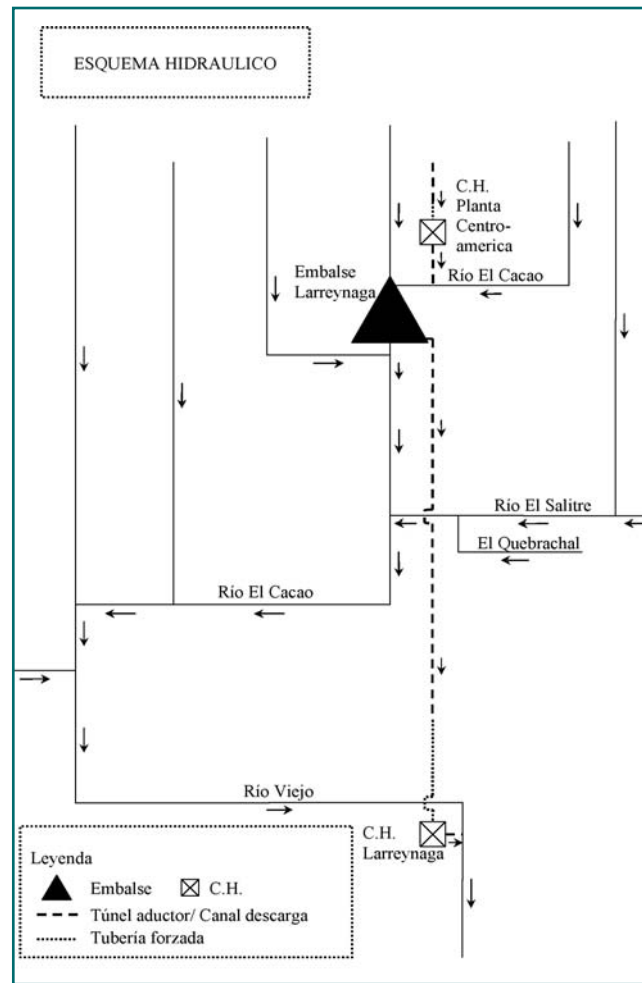


Fig. 3. Esquema hidráulico/
Hydraulic scheme.

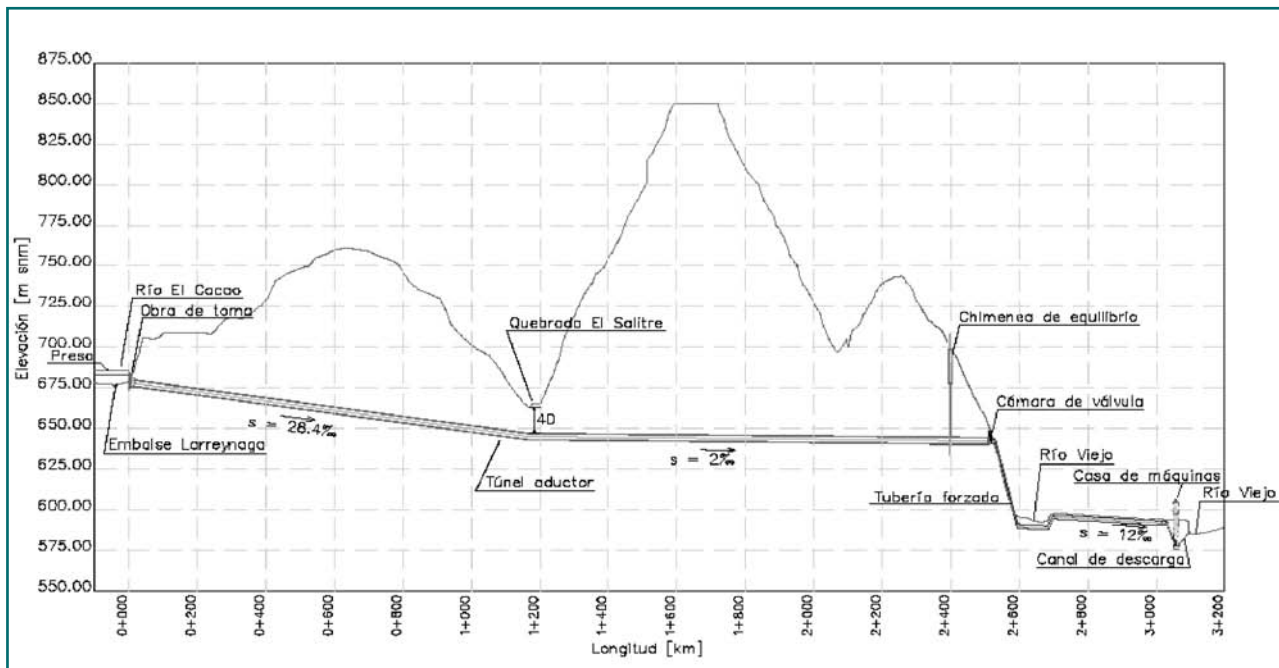


Fig. 4. Perfil longitudinal/
Longitudinal profile.

DATA TÉCNICA/TECHNICAL DETAILS	
importante del proyecto hidroeléctrico es el siguiente /important of the hydropower project is the following:	
Caudal de diseño/Design flow (m³/s)	22,00
Caída bruta/Gross head (m)	98,50
Caída neta/Net head (m)	88,00 - 90,00
Tipo de turbinas/Turbines	Francis, de eje horizontal/ Francis, horizontal axis
Número de turbinas/No. turbines	2
Potencia instalada/Installed capacity (MW)	17,00
Energía media anual/Average annual energy (GWh)	73,00

jo, hacia la cuenca baja, mediante una línea de aducción que permitirá una caída neta de aproximadamente 90 m. El perfil longitudinal del esquema se presenta en la Figura 4.

Cuencas de los ríos El Cacao y Viejo

El proyecto hidroeléctrico Larreynaga esta circunscrito como área de influencia a la cuenca intermedia-alta del río Viejo y consiste en el aprovechamiento de los caudales trasvasados del Lago de Apanás hacia el río El Cacao, afluente superior del río Viejo, siendo dichas descargas en aproximadamente un 100%, el principal aporte para generación de energía en el marco del proyecto.

El área de cuenca del río El Cacao medida a partir de la retención que se crea debido al embalse Larreynaga, mediante la presa del mismo nombre, es de 7,60 km², y su influencia hídrica para un aprovechamiento es inferior al 2% de los caudales turbinables provenientes de la C.H. Centroamérica. Por esta razón de magnitud del caudal medio anual del río El Cacao, siendo más aun éste un río no perenne, es que el caudal natural de éste río no es considerado para el aprovechamiento hidroeléctrico. Sin embargo, dicho caudal natural es considerado para su uso como caudal ecológico a ser suministrado para consumo aguas abajo de la presa Larreynaga.

La cuenca del río El Cacao tiene un área total aproximada de 22,30 km², con altitudes máximas que llegan hasta los 1400 m snm y mínimas de 600 m snm. El área de la cuenca del río El Cacao a partir del sitio de presa es de 7,60 km². La elevación media es de 935 m snm. El río El Cacao presenta un perfil, en toda su extensión, con pendiente alta, de aproximadamente del orden del 10%, lo que influye en gran medida para que los tiempos de concentración sean cortos, presentando crecidas rápidas y debido al área tan pequeña las crecidas son de baja intensidad al no tener suficiente capacidad de almacenaje, presencia de avenidas instantáneas (1). Esto es confirmado por observación de los pobladores de la zona, para definir el comportamiento histórico del río du-

and the flows pass through the turbines at the Centroamerica hydroelectric plant before being discharged in the river El Cacao which, in turn, flows into the River Viejo several kilometres downstream. The outflows from the Centroamerica Hydroelectric Plant serve as the main intake of regulated flow for power generation at the Larreynaga Hydropower Project, which will be the first such plant of any size to be introduced in Nicaragua over the last 35 years.

The project and its objectives

Within the framework of the Nicaraguan Energy Programme, the Nicaraguan Electricity Company (ENEL) is undertaking the Larreynaga Hydroelectric Plant project to harness the turbinated water discharged from the powerhouse of the existing Centroamerica power station into the river El Cacao. The general layout may be seen in the plan shown in Figure 2 and the hydraulic arrangement is shown in Figure 3. The main objective of the project is to increase power supply by the hydroelectric generation of an additional 73 GWh per year through the Larreynaga plant, with an installed capacity of 17 MW, using the 22 m³/s turbinated flow of the existing Centroamerica plant which is first regulated and then diverted from the Apanas reservoir to the basin of the River Viejo.

The proposed powerhouse will be set on the right bank of the River Viejo, approximately 6.20 km downstream from the existing powerhouse of the Centroamerica hydroelectric plant, set on the right bank of the River El Cacao, a tributary of the River Viejo.

The Larreynaga hydroelectric project consists of the harnessing of maximum turbine outflows from the Centroamerica hydroelectric plant discharged into the River El Cacao at the upper basin of the River Viejo, by an intake which will allow a net head of approximately 90 m. The plan arrangement of the hydraulic system is shown in Figure 4.

El Cacao and Viejo River basins

The Larreynaga hydroelectric project comes within the catchment area of the intermediate-upper basin of the River Viejo and will harness the flows diverted from the Apanas Reservoir to the River Cacao, an upper tributary of the River Viejo, with these flows making up almost the entire supply for energy generation at the new plant.

The El Cacao river basin, measured from the retention point of the Larreynaga dam and the reservoir of the same



Fig. 5. Vista del río El Cacao, inmediatamente aguas abajo del túnel de descarga de la C. H. Centroamérica/Viejo of the River El Cacao, immediately downstream of the discharge tunnel from the Centroamérica Hydroelectric Plant.

rante lluvias torrenciales, lluvias moderadas y durante la época seca, debido a que no se disponen de estaciones hidro-meteorológicas que puedan definir el comportamiento natural de la cuenca.

La cuenca del río Viejo, medida desde aguas arriba de la estación Santa Ana, ubicada en el sitio denominado como La Herradura, a la altura de la salida de descarga de la proyectada central hidroeléctrica, tiene un área total aproximada de 380 km², con altitudes máximas que llegan hasta los 1200 m snm y mínimas de 580 m snm. El río Viejo nace a una altura de 1200 m snm entre los departamentos de Jinotega y Esteli, y atraviesa la parte norte y central de Nicaragua antes de descargar sus aguas en el Lago de Managua. La elevación media es de 1061 m snm. El área comprendida por la cuenca del río Viejo sin integrar la cuenca del Lago de Apanás es de 380 km², con una longitud total de 118 km, la que está constituida principalmente por 16 sub-cuencas que drenan sus aguas al cauce principal formando el llamado río Viejo. El restante del área la compone básicamente el área de drenaje propia del cauce principal del río Viejo.

Condiciones morfológicas de los ríos El Cacao y Viejo en el área del proyecto

El área de influencia del proyecto sobre el río El Cacao, comprende su cuenca alta. La longitud del río en el tramo de dicha cuenca baja ha sido estimada en 3,40 km, la misma que es medida desde la entrega de caudales trasvasados del Lago de Apanás mediante el túnel de descarga de la existente C.H. Centroamérica hasta su confluencia con el río Viejo, ver Figura 5. La

name covers an area of 7.60 km² and its catchment for potential harnessing is less than 2% of the turbinized flows from the Centroamérica power station. In view of the annual average flow of the River El Cacao, which is not a perennial river, it is considered that the natural flow of this river is insufficient for hydropower development. However, this natural flow has been considered for use as an ecological flow which may be supplied for consumption downstream of the Larreynaga dam.

The El Cacao river basin covers a total area of 22.30 km² and has a maximum altitude of 1400 m and a minimum of 600 m above sea level. The El Cacao river basin downstream from the dam covers an area of 7.60 km² and has an average height of 935 m above sea level. The entire stretch of the El Cacao River falls steeply at around 10% and this leads to short retention times. The river is subsequently subject to rapid freshets and as the area is so small the high waters are of little intensity as there is insufficient storage capacity and these spill over and cause instant flooding (1). This has been confirmed by observations of those living in the area in order to define the behaviour of the river during torrential rains, moderate rainfall and during dry seasons, as there are no hydro-meteorological stations in the vicinity to define the natural behaviour of the basin.

The basin of the River Viejo covers a total area of around 380 km², measured upstream from the Santa Ana station set in the area of La Herradura to the discharge point of the future hydroelectric plant, and has a maximum altitude of 1200 m above sea level and a minimum height of 580 m. The source of the River Viejo is set at a height of 1200 m above sea level between the Jinotega and Esteli departments and crosses the northern and central part of Nicaragua before flowing into Lake Managua. The average elevation is 1061 m above sea level. The area covered by the River Viejo basin, without including the Apanas Reservoir basin, is around 380 km² and has a total length of 118 km. The basin is essentially formed by 16 sub-catchments whose waters flow into the main river channel to form the River Viejo. The remaining area is made up by the drainage area of the River Viejo proper.

Morphological conditions of the El Cacao and Viejo Rivers in the project area

The upper basin of the river Cacao forms the catchment area of the project. The river in this section of the basin is 3.40 km long, this being the same as that measured from the influx of water diverted from the Apanas Reservoir by the discharge tunnel of the existing Centroamérica hydroelectric power plant to its confluence with the River Viejo (See Fig. 5). This section of

pendiente del río en este tramo es de 2%. La velocidad máxima en éste tramo del río alcanza los 2,50 m/s para el caudal turbinable de C.H. Centroamérica de 22 m³/s.

El área de influencia del proyecto sobre el río Viejo, comprende la cuenca intermedia de éste río. Aquí, la longitud del río en el tramo de dicha cuenca ha sido estimada en 2,90 km, la misma que es medida desde la confluencia del río El Cacao sobre el río Viejo hasta donde se ubica la existente estación hidrométrica Santa Ana, específicamente aguas abajo del fin de la curva, en la zona denominada como La Herradura. La pendiente del río en el tramo aguas arriba de la curva, zona de La Herradura, es de aproximadamente 4,5%. Aguas abajo de la curva, zona de La Herradura, la pendiente del río es de aproximadamente 8,4‰.

La zona de La Herradura tiene un radio de 250 m y se caracteriza por tener dos rápidas, una localizada al principio de la curva y otra en el tramo final de la curva, alcanzándose velocidades de hasta 1,80 m/s y 3,90 m/s respectivamente durante períodos de máximas avenidas para un caudal de 200 m³/s.

La sección de los valles de los ríos Viejo y El Cacao en la zona del proyecto tiene taludes medianos y fuertes, con presencia de farallones y de sección transversal tipo U. El ancho del cauce principal es de aproximadamente 15 a 20 m con un calado medio de 1 a 2 m en el tramo del río El Cacao. En el tramo del río Viejo el ancho del cauce varía de 30 a 50 m con calados medios de 3 a 4 m. En el área del proyecto, la elevación máxima en el thalweg del río El Cacao esta sobre los 680 m snm, y la elevación mínima en el thalweg del río Viejo esta sobre los 580 m snm.

Caudal turbinado por C.H. Centroamérica hacia el río El Cacao

En base a la data disponible, se elaboró una curva duración de caudales turbinados a través de la C.H. Centroamérica, de la cual se concluyó que éste tiene muy poca influencia sobre el caudal natural en el río El Cacao, tal como se observará más adelante en la Tabla 2 para la descripción de la avenida de diseño de las obras civiles en éste río.

Aportes de la cuenca alta del río El Cacao

Se obtuvo acceso a data insuficiente correspondiente a caudales medios mensuales medidos en la cuenca alta del río El Cacao mediante una estación vertedero ubicada aguas arriba del inicio de la obra de toma para

the river descends at a grade of 2% and reaches a maximum speed of 2.50 m/s to provide a turbine flow at the Centroamerica Hydropower Plant of 22 m³/s.

The catchment area of the Rio Viejo project includes the intermediate watershed of this river. The length of the river through this basin has been estimated at 2.90 km, this being the same as that measured from the confluence of the El Cacao river with the Rio Viejo to the point of the existing Santa Ana hydrometric station set downstream of the end of the bend known as the La Herradura. The gradient of the river in the upstream section of the Herradura bend is approximately 4.5%. The river in the downstream section of the bend is approximately 8.4‰.

The La Herradura area has a radius of 250 m and is characterised by two rapids, one set at the beginning of the bend and another on the final section of the bend and which reach speeds of up to 1.80 m/s and 3.90 m/s respectively during period of maximum floods with flows of 200 m³/s.

The valley profiles of the Viejo and El Cacao rivers are formed by medium to steep slopes with scarps and a characteristic "U" shape cross-section. The River Cacao channel is approximately 15 to 20 m wide with average depths of 1 to 2 m, while the River Viejo channel is between 30 and 50 m wide with average depths of 3 to 4 m. In the site area, the maximum elevation at the thalweg of the River El Cacao is around 680 m above sea level and the minimum elevation at the thalweg of the River Viejo is around 580 m above sea level.

Outflow from the Centroamerica Hydroelectric Plant to the River El Cacao

In accordance with available data, a flow duration curve was established for the water passing through the turbines of the Centroamerica hydroelectric plant. This curve showed that this has very little influence on the natural flow of the river El Cacao, as may be seen in Table 2 showing the design flood assessment for the civil works on this river.

Inflows from the upper basin to the El Cacao River

It was impossible to gain access to sufficient information regarding the average monthly flows recorded in the upper watershed of the El Cacao river at the measuring station set upstream from the start of the intake works for the diversion of flows to the future Larreynaga hydroelectricity plant. From the evaluation carried out it was found that the available information

la derivación de caudales a la proyectada C.H. Larreynaga. De la evaluación efectuada se concluyó que la data disponible es de una corta serie incompleta, con la cual no es posible una evaluación del caudal que pudiera aportar esta pequeña cuenca, por lo que se efectuó una estimación basada en la precipitación media anual, área de la cuenca, factores de cuenca y escurrimiento. La estimación resultó en un caudal promedio anual de $Q = 0,35 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que representa un caudal estimado en época de avenidas de $Q = 0,70 \text{ m}^3/\text{s}$, sin consideración de eventos muy extremos como el de la presencia del Huracán Mitch.

Caudal ecológico

Se recomendó el suministro de un caudal ecológico, equivalente a $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal equivalente al aporte de la cuenca alta del río El Cacao conforme a las normas internacionales hasta $1/40$ del caudal medio anual.

Registro de caudales en Estación Hidrométrica Santa Ana, Río Viejo

Se colectó data con registros de descargas medias mensuales de la estación Santa Ana, la cual se encuentra ubicada aguas abajo del fin de la curva denominada como La Herradura, sobre el río Viejo. Sin embargo la data registrada en esta estación se encontró incompleta y no fue de mucha confiabilidad, motivo por el cual dichos registros fueron utilizados de manera parcial para estimación preliminar de capacidad hidráulica en el río Viejo para las avenidas de diseño.

Análisis de avenidas y calibración de descargas

Para el análisis de avenidas tanto en el río El Cacao, para el sitio de presa, como para el río Viejo para el sitio de casa de máquinas, se utilizó la data de precipitación máxima diaria en 24 horas disponible de la estación pluviométrica Jinotega, correspondiente a una serie de 30 años, comprendida entre 1970 y 1999, la misma que fue convertida a caudal y con la cual posteriormente se generaron nuevos caudales, teniendo en cuenta los parámetros de área de cuenca involucrada, elevación, temperatura y evaporación para los dos sitios mencionados arriba para el río Viejo, en la zona de estación Santa Ana, cercana a casa de máquinas; y para el río El Cacao en el sitio de presa proyectada y un puente existente. El análisis de avenidas se verificó mediante la calibración de caudales.

was incomplete and it was not possible to make an assessment of the flows which could be provided by this small watershed. As such, an estimate was made on the basis of the average annual rainfall, the area of the watershed, characteristics of the watershed and runoff. The estimate gave an average annual flow of $Q = 0.35 \text{ m}^3/\text{s}$, which represents an estimated flow during flood seasons of $Q = 0.70 \text{ m}^3/\text{s}$, without considering very extreme events such as the passing of Hurricane Mitch.

Ecological flow

An ecological flow equivalent to $0.50 \text{ m}^3/\text{s}$ was recommended. This being equivalent to the intake from the upper watershed of the El Cacao river and, in accordance with international standards, one up to $1/40$ of the average annual flow.

Flow recordings at the Santa Ana Hydrometric Station, River Viejo

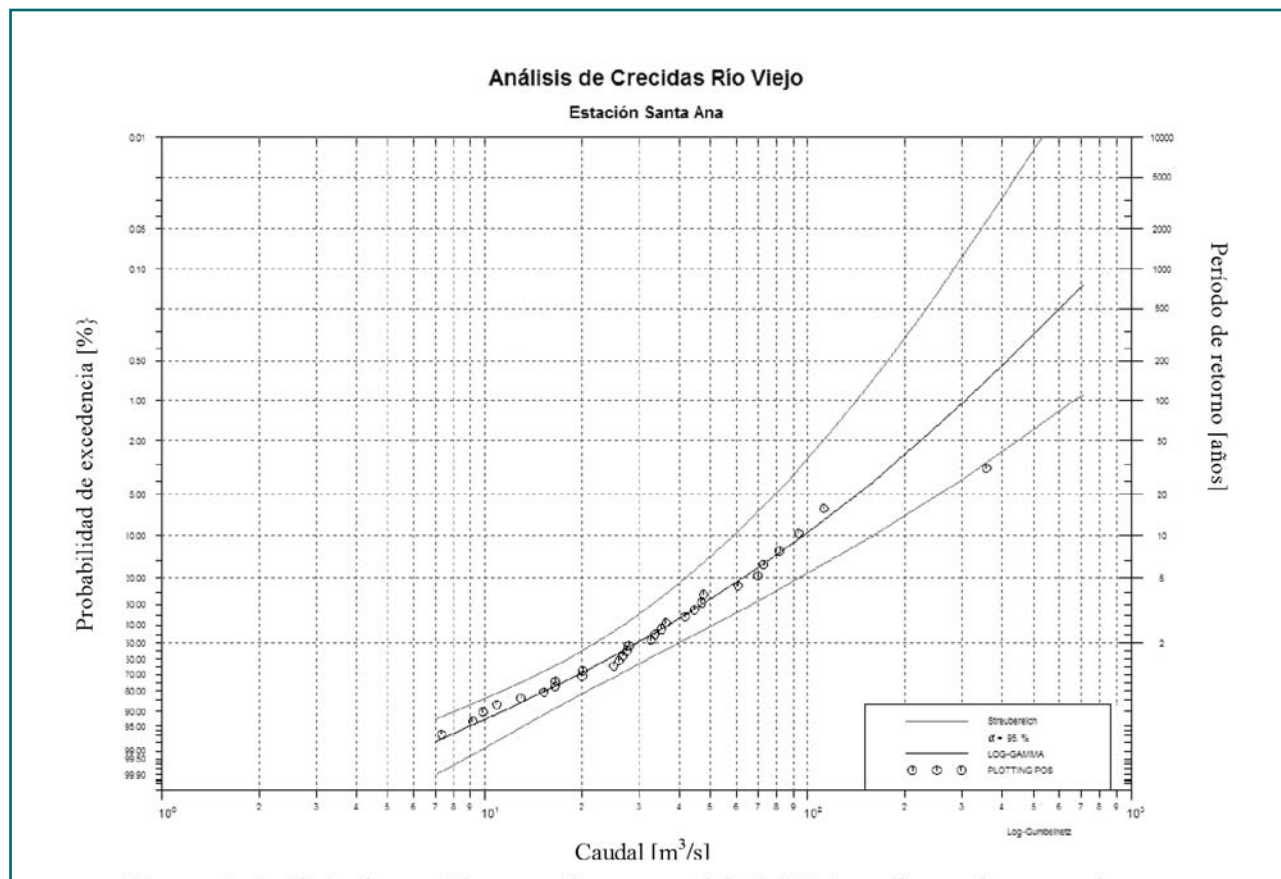
Data was collected on the average monthly discharges recorded at the Santa Ana station, set downstream from the end of the La Herradura bend on the River Viejo. However, the data recorded at this station was incomplete and not entirely reliable and the recordings were subsequently employed in a partial manner to make a preliminary assessment of the hydraulic capacity of the River Viejo for design floods.

Flood analysis and flow calibration

In order to make an assessment of floods on the River El Cacao (at the site of the dam) and on the River El Viejo (at the site of the powerhouse), data was employed regarding the maximum daily rainfall over 24 hours recorded at the Jinotega rain gauging station over a period of 30 years from 1970 to 1999. This information was converted into flows and new flows were established on the basis of the characteristics of the watershed, the height, temperature and evaporation for the two sites indicated for the River Viejo, in the area of the Santa Ana station, close to the powerhouse, and for the river El Cacao at the site of the proposed dam and at the point of an existing bridge. The flood analysis was then verified by flow calibration.

There follows the analyses corresponding to the site of the powerhouse in the river Viejo basin, at the Santa Ana station, and that corresponding to the El Cacao basin upstream at the site of the dam and the bridge.

Fig. 6. Análisis de crecidas para la cuenca del río Viejo en Santa Ana para la función de mejor ajuste a datos generados con registros de cuenca de Jinotega /Flood analysis for the River Viejo basin at Santa Ana for improved adaptation of data recorded at the Jinotega basin.



A continuación se efectúa el análisis correspondiente para el sitio de casa de máquinas en la cuenca del río Viejo, hasta la estación Santa Ana, y para la cuenca del río El Cacao, en el sitio de presa y puente aguas arriba.

Avenida de diseño y calibración de caudales en el río Viejo - Sitio de casa de máquinas

En base a la data de precipitación máxima diaria en 24 horas de la estación Jinotega, arriba mencionada, se generaron caudales para la cuenca del río Viejo, en el sitio de casa de máquinas para su protección contra inundaciones y para la zona de cruce con el río de la tubería forzada, teniendo en consideración que el área de cuenca involucrada, 380 km², es muy similar al área de cuenca de Jinotega. La metodología (2,3), fue complementada mediante una calibración de caudales, mediante un análisis de sensibilidad de rugosidades (4) y observación de pelo de agua (ver Figuras 7 y 8) durante el tránsito de la crecida máxima de Octubre de 1998 con el huracán Mitch, determinándose de esta manera la capacidad hidráulica en la zona para el tránsito de diversas avenidas de diseño para específicos períodos de retorno

Design flood and flow calibration of the River Viejo - Site of powerhouse

In accordance with data of the maximum daily rainfall over 24 hours recorded at the Jinotega station, flows were established for the River Viejo basin to ensure flood protection at the site of the powerhouse and at the point where the river meets the penstock. This data was taken on account of the fact that the 380 km² area of the watershed is very similar to that of the area of the Jinotega basin. The methodology (2,3) was complemented by flow calibration, by roughness sensitivity analysis (4) and observation of water level (see figures 7 and 8) during the period of maximum flood recorded in October 1998 on the passing of Hurricane Mitch. In this way it was possible to establish the hydraulic capacity of the area for the passage of diverse design floods over specific return periods (5). In the design a 10,000 year flood was selected to ensure the safety of the designed works under extraordinary events in tropical areas. Figure 6 shows the flood analysis for the River Viejo basin, at Santa Ana, for extreme values (6). The design floods estimated for the different return periods are shown in Table 1.

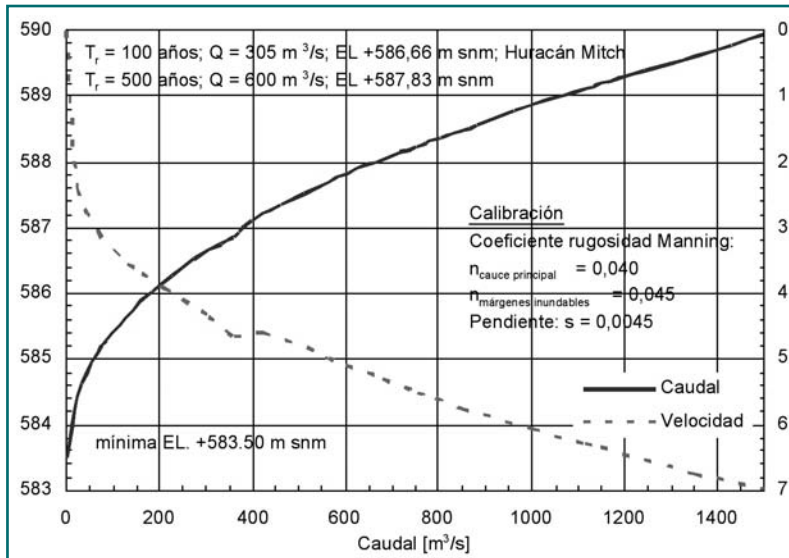


Fig. 7. Curva de descarga calibrada para la sección 12, zona de entrega de caudales de C. H. Larreynaga al río Viejo en Santa Ana/Calibrated discharge curve for section 12 at the flow inlet from the Larreynaga Plant to the River Viejo at Santa Ana.

(5). Para el diseño se seleccionó la avenida decamilenaria que otorga seguridad a las obras proyectadas para eventos extraordinarios en zonas tropicales. En la Figura 6 se presenta el análisis de avenidas para la cuenca del río Viejo, en Santa Ana para valores extremos (6). Las avenidas de diseño estimadas para los diversos períodos de retorno se presentan en la Tabla 1.

Las estimaciones de las avenidas de diseño presentadas arriba guardan relación con la calibración efectuada para la zona de La Herradura, curva muy cerrada, y para el pelo o nivel de agua observado durante el tránsito.

Fig. 8. Curva de descarga calibrada para la sección 24, zona de cruce de la tubería forzada de la C. H. Larreynaga sobre el río Viejo/Calibrated discharge curve for section 24 at the point where the penstock to the Larreynaga Plant crosses the River Viejo.

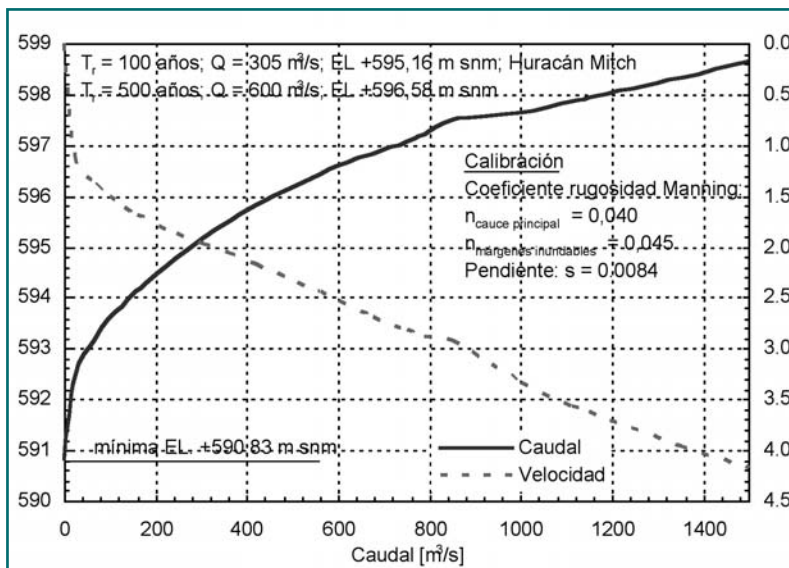


Tabla 1. Río Viejo en Santa Ana - Avenida de diseño para diversos períodos de retorno/
Table 1. River Viejo at Santa Ana - Design flow for different return periods

T_r (años)	Q (m³/s)
2	30
10	100
50	225
100	305
500	600
1000	790
10000	1840

The design flood estimates presented above bear a relation to the calibration carried out for the closed horseshoe area of La Herradura and for the water levels observed during the passing of Hurricane Mitch in October 1998. This was then established as the design flood with a return period of 100 years (see Figures 7 and 8).

Figure 7 shows the calibrated discharge curve for section 12 of the River Viejo, set at the end of the closed "horseshoe" area of La Herradura, immediately downstream of the flow delivery area of the projected discharge channel from the Larreynaga Hydroelectric Plant, as shown in Figure 9.

In the same way a calibrated discharge curve was prepared for section 24 of the River Viejo (see Figure 8), set at the beginning of the La Herradura bend, at the site of the future penstock to the Larreynaga Hydroelectric Plant.

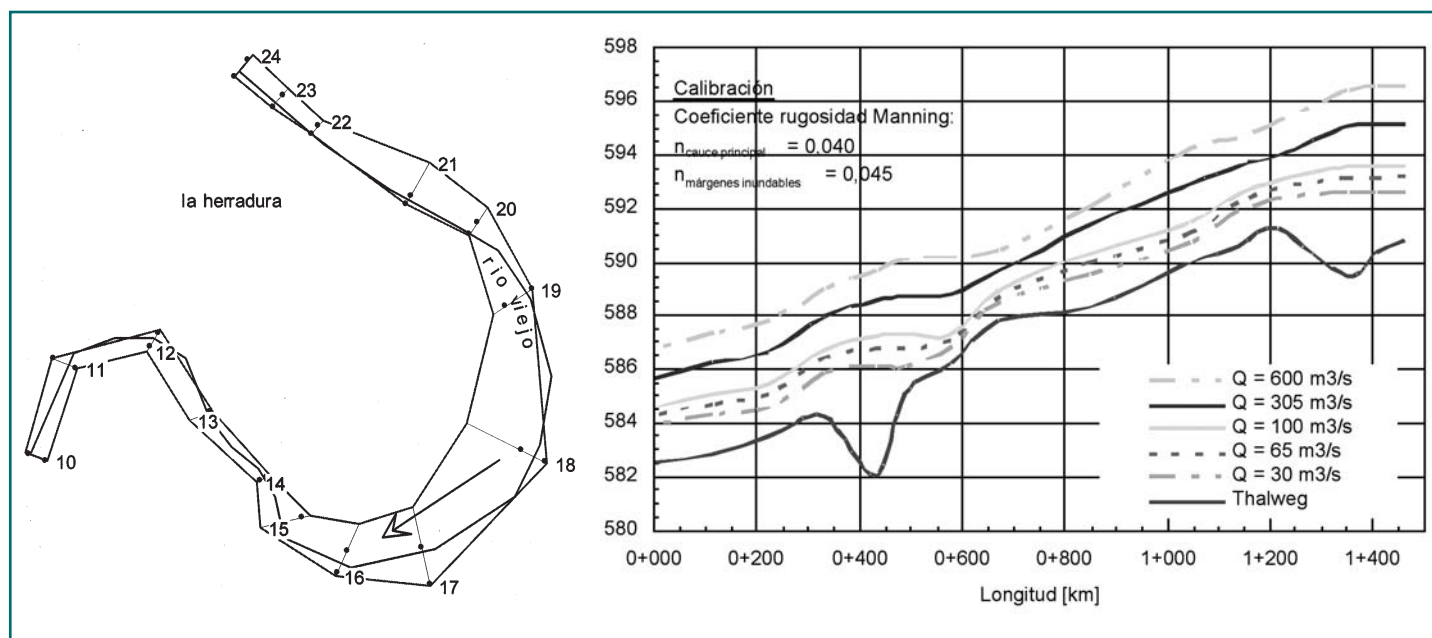
Figure 9 shows the hydraulic profile for design floods with different return periods for La Herradura area of the River Viejo at the site of the powerhouse. These calibrated water levels for discharges over different return periods ensure the safety of the powerhouse, with particular consideration for the flood protection dam defending the installations on the right bank of the river.

The calibrated discharge curve in section 12 (see Figure 7) is of particular interest for the positioning of the turbine axis of the Larreynaga Hydroelectric Plant and for the establishment of the draft height. This then serves as the basis for the calculation of losses, the establishment of the installed capacity and the hydropower production of the development.

The levels or rises in water level shown in figure 9 correspond to the hydraulic profile of design floods with different return periods in the La Herradura area of the River Viejo. The fact that a 10,000 year design flood has been taken into account then allows the introduction of the corresponding flood protection measures in the area of the powerhouse.

Design flood and flow calibration of the River El Cacao - Site of dam and bridge

As in the case of the powerhouse area, flows have been generated for the El Cacao river basin at the site of



to del huracán Mitch en Octubre de 1998, el cual se determinó fue para una avenida de diseño con un período de retorno de 100 años, ver Figuras 7 y 8.

En la Figura 7, se presenta la curva de descarga calibrada para la sección 12 en el río Viejo, la cual se ubica al final de la curva cerrada en la zona de La Herradura, inmediatamente aguas abajo de la zona de entrega de caudales del proyectado canal de descarga de la C.H. Larreynaga, tal como se observa en la Figura 9.

De manera similar se confeccionó la curva de descarga calibrada para la sección 24 en el río Viejo, ver Figura 8, ubicada al principio de la curva en la zona de La Herradura, por donde yacerá la tubería forzada de la proyectada C.H. Larreynaga.

En la Figura 9 se presenta el perfil hidráulico para avenidas de diseño de diversos períodos de retorno en la zona de La Herradura - Río Viejo, área de casa de máquinas. Con estos niveles de pelo de agua calibrados para descargas de diversos períodos de retorno se brinda seguridad a la casa de máquinas, en especial consideración para el dique de protección contra inundaciones que defiende a la obra en la margen derecha del río.

La curva de descarga calibrada en la sección 12, ver Figura 7, es de especial interés para ubicar la posición del eje de turbinas de la C.H. Larreynaga y fijación de la altura de succión, y de esta manera proceder con el cálculo de pérdidas en el esquema, determinación de la potencia instalada y producción hidroenergética para el aprovechamiento hidroeléctrico.

Los niveles o elevaciones de pelo de agua que se presentan en la Figura 9, correspondiente al perfil hidráulico para las avenidas de diseño con diversos períodos de retorno

Fig. 9. Perfil hidráulico para avenidas de diseño de diversos períodos de retorno en la zona de La Herradura - Río Viejo, área de casa de máquinas/Hydraulic profile for design floods of different return periods in the area of La Herradura in the Río Viejo, at the site of the future powerhouse.

the dam on the basis of the maximum daily rainfall over 24 hours recorded at the Jinotega station and when considering that the area of the watershed involved is 7.60 km² as opposed to the area of the Jinotega basin which is 50 times larger. In view of these circumstances, the drainage capacity of the small basin, the surface runoff and ground absorption are negligible in the case of the passage of a maximum flood such as one caused by Hurricane Mitch.

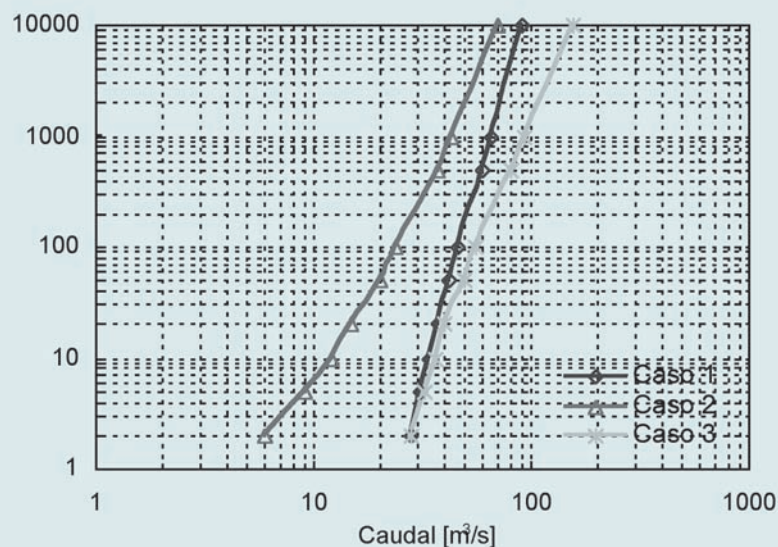
As such, three cases were analyzed (Table 2) taking the maximum daily rainfall over 24 hours as no data was available regarding maximum hourly rainfall at the Jinotega station. On this basis the maximum daily rainfall over 24 hours was amplified for a maximum hourly rainfall with data corresponding to the passage of Hurricane Mitch in October 1998 in order to establish the maximum daily rainfall over 24 hours for each case.

Three cases have been presented for the maximum design flood. Case 1 considers the discharges from the river El Cacao and the Centroamerica hydroelectricity plant, while cases 2 and 3 only consider the discharges from the river El Cacao for the cases of amplification. The essential basis here is that when a maximum event such as Hurricane Mitch occurs, the Centroamerica hydroelectric plant should be considered to be out of operation and, subsequently, not producing any discharge.

The methodology (2,3) was supplemented by flow calibration, by roughness sensitivity analysis (4) and observation of water level (see figures 7 and 8) during the maximum flood period recorded in October 1998 on the passing of Hurricane Mitch. In this way it was possible to

Tabla 2. Río El Cacao en sitio de presa - Avenida de diseño para diversos períodos de retorno/
Table 2. River El Cacao at the site of the dam. Design flow for different return periods

	Caso/Case 1	Caso/Case 2	Caso/Case 3
Area de cuenca (km ²) Basin area	7,6	7,6	7,6
Precipitación máxima diaria en 24 horas (mm) Maximum daily rainfall in 24 hours	301	301	960
T _r (años/years)	Q _{Río El Cacao} + Q _{C.H. Centroamérica} (m ³ /s)	Q _{Río El Cacao} (m ³ /s)	
2	28	6	28
10	34	12	36
50	42	20	49
100	46	24	56
500	59	37	80
1000	65	43	94
10000	92	70	156



en la zona de La Herradura - Río Viejo, permiten tomar las medidas de protección contra inundaciones para la zona de la casa de máquinas, habiéndose tomado para seguridad de la misma una avenida de diseño decamilenaria.

Avenida de diseño y calibración de caudales en el río El Cacao - Sitio de presa y puente

De manera similar que para el área de la casa de máquinas, en base a la data de precipitación máxima diaria en 24 horas de la estación Jinotega, se generaron caudales para la cuenca del río El Cacao, en el sitio de presa, teniendo en consideración que el área de cuenca involucrada es de 7,60 km², en comparación con la magnitud del área de la cuenca de Jinotega, el cual es más de 50 veces más grande. Ante estas circunstancias la capacidad de drenaje de la pequeña cuenca, esorrentía superficial y absorción del suelo, para el tránsito de una avenida máxima como la del huracán Mitch, es despreciable.

Debido a esta consideración se analizaron 4 casos como es presentado en la Tabla 2, en las cuales se toma la precipitación máxima diaria en 24 horas al no disponerse data disponible sobre precipitación máxima diaria horaria de la estación Jinotega y en base a éste fundamento se amplifica la precipitación máxima diaria en 24 horas, en base a un cálculo para una precipitación máxima horaria con la data para el tránsito del huracán Mitch en Octubre de 1998, y con esta concepción se determinan las precipitaciones máximas diarias en 24 horas para los casos que se presentan.

establish the hydraulic capacity of the area for the passage of diverse design floods over specific return periods. A 1000 year flood under case 3 was selected for the design of the gated spillway, as the extreme event for the flood way works of the dam, but when considering that this still had the capacity for a 10,000 year flood under Case 3, when the spillway and under sluice operated as flood ways. Additional safety was provided to the dam by a lowered crest at one abutment for extreme events, and considered as an additional case. This then ensured the safety of the designed works for extraordinary events in tropical areas. It should be indicated that the adopted design flood complied with case (n-1) of the German standards for the design of gated spillways and international recommendations (7), which allows the passage of a maximum flood through the spillway even when one of the gates is closed or not working.

The following design floods were then adopted for the floodway on the Larreynaga dam, when ignoring the controlled discharges from the Centroamerica plant (Table 3).

Figure 10 shows the calibrated discharge curve for a section set 50 m downstream from the dam. This area being of interest for the design of works such as the sluiceway and the gated floodway when knowing the depth downstream.

Finally, Fig. 11 shows the calibrated discharge curve for the area where the bridge crosses the River El Cacao, this being set downstream of the discharge tunnel from the Centroamerica plant. The curve, which takes into account the volume accumulated in the future

Se han presentado 3 casos para el diseño de la crecida máxima, el Caso 1, que considera las descargas del río El Cacao y de la C.H. Centroamérica existente, y los Casos 2 y 3 que sólo considera las descargas del río el Cacao para los casos de amplificación. El fundamento importante aquí es que cuando se presente un evento máximo como la del huracán Mitch, se debe considerar que la C.H. Centroamérica se encuentra fuera de operación, por lo tanto sus descargas son nulas.

Posteriormente la metodología (2,3), fue complementada mediante una calibración de caudales, mediante un análisis de sensibilidad de rugosidades (4) y observación de pelo de agua durante el tránsito de la crecida máxima de Octubre de 1998 con el huracán Mitch, determinándose de esta manera la capacidad hidráulica en la zona para el tránsito de diversas avenidas de diseño para específicos períodos de retorno. Se seleccionó para el diseño del aliviadero de compuertas la avenida milenaria, bajo el Caso 3, como evento extremo para las obras de alivio de la presa, pero considerando que aun esta en capacidad para una avenida decamilenaria del Caso 3, funcionando como obras de alivio, el aliviadero y la salida de fondo. Adicionalmente se brinda seguridad a la presa mediante una corona rebajada en un estribo para eventos extremos, el cual se considera como un caso adicional. De esta manera se otorga seguridad a las obras proyectadas para eventos extraordinarios en zonas tropicales. Cabe mencionar aquí que la avenida de diseño adoptada cumple con el caso (n-1) de las normas alemanas de diseño para el aliviadero de compuertas y recomendaciones internacionales (7), las cuales permiten el tránsito de la avenida máxima por el aliviadero aun cuando una de las compuertas se encuentra cerrada o fuera de operación.

De esta manera se adoptaron como avenidas de diseño para el aliviadero de crecidas de la presa Larreynaga, sin considerar las descargas provenientes de la C.H. Centroamérica -las cuales son descargas controladas-, las reflejadas en la Tabla 3.

En la Figura 10 se presenta la curva de descarga calibrada para una sección ubicada a 50 m aguas abajo de la presa, que es de interés para el diseño de las obras tales como salida de fondo, y el aliviadero de crecidas con compuertas conociendo el tirante agua abajo.

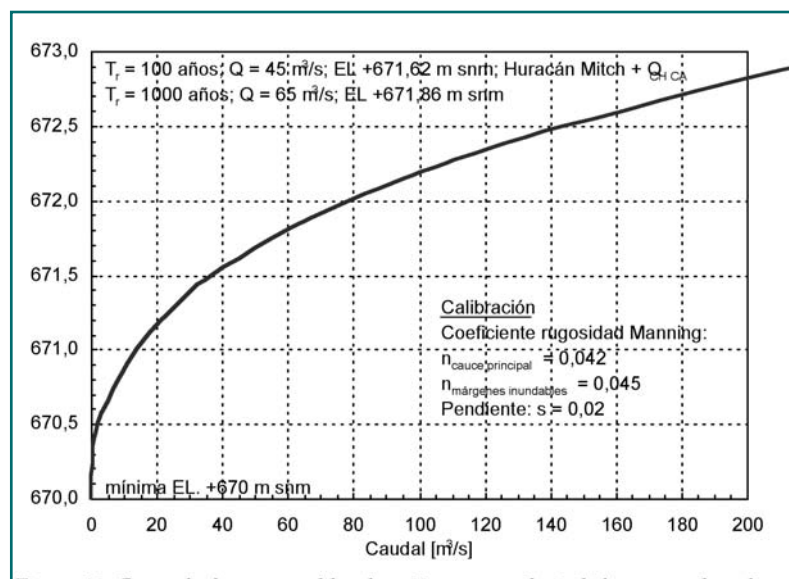


Fig. 10. Curva de descarga calibrada a 50 m aguas abajo de la presa sobre el río El Cacao/Calibrated discharge curve 50 m downstream from the dam on the River El Cacao.

Larreynaga reservoir, shows that the bridge would not be affected in the case of a maximum flood as the lower point of the superstructure is set 685.60 above sea level.

Conclusions

The hydraulic calibration carried out was developed for the definition of a design flood to offer the protection of important civil works such as the dam and powerhouse against flooding or maximum events.

Due to the scarce and incomplete data available at the hydrometric stations - the Centroamerica station on the River El Cacao and the Santa Ana station on the River Viejo - and the lack of rainfall data in the project area, this information was supplemented by more reliable data obtained at the neighbouring basin of Jinotega and observations of the water levels of flows recorded during maximum events such as Hurricane Mitch. In accordance with this rainfall data, flows were established for the basins of the River El Cacao, at the site of the dam, and for the River Viejo, at the site of the powerhouse, and this was complemented by a flow calibration based on roughness sensitivity analysis and existing water level observations. The design floods have been made for different return periods

Tabla 3. Descargas para Crecidas Máximas, sin descargas de C.H. Centroamérica/
Table 3. Discharges for Maximum Floods, not including discharges from the Centroamerica plant

Avenida de diseño milenaria, T_r (años)/1000 year design flood, T_r (years)	1000
Caudal de diseño, avenida milenaria, Q_{1000} (m³/s)/Design flow, 1000 year flood, Q_{1000} (m³/s)	95.00
Avenida de diseño decamilenaria, T_r (años)/10000 year design flood, T_r (years)	10000
Caudal de diseño, avenida decamilenaria Q_{10000} (m³/s)/Design flow, 10000 year flood, Q_{10000} (m³/s)	150.00

Finalmente, en la Figura 11 se presenta la curva de descarga calibrada para la sección del cruce del puente ubicado en el río El Cacao, aguas abajo del túnel de descarga de la C.H. Centroamérica, teniendo en consideración el volumen acumulado en el proyectado embalse Larreynaga, en el cual se observa que el puente no se ve afectado para el caso del evento de una avenida máxima, puesto que la elevación inferior de la superestructura es de 685,60 m snm.

Conclusiones

La calibración hidráulica efectuada fue desarrollada para la definición de la avenida de diseño para la protección contra inundaciones o eventos máximos de las obras civiles importantes, tales como la presa y casa máquinas.

Debido a la escasa data disponible e incompleta de estaciones hidrométricas –Centroamérica en río El Cacao y Santa Ana en río Viejo– e inexistente data pluviométrica en el área del proyecto, esta fue complementada con data pluviométrica de mayor confiabilidad disponible de la cuenca vecina de Jinotega, y observaciones de niveles de pelo de agua de caudales registrados para eventos máximos, tales como el Huracán Mitch. Específicamente en base a esta data pluviométrica se generaron caudales para las cuencas de los ríos El Cacao –sitio de presa– y Viejo –área de casa de máquinas–, siendo ésta complementada mediante una calibración de caudales, mediante un análisis de sensibilidad de rugosidades y observaciones de pelo de agua existentes. El diseño de avenidas se ha efectuado para diversos períodos de retorno, teniendo en especial interés a las avenidas de diseño requeridas para el aliviadero de la presa de gravedad sobre el río El Cacao y la correspondiente para la zona de cruce de la tubería forzada en el río Viejo y la protección contra inundaciones en el mismo río de la casa de máquinas, habiéndose seleccionado para ambos casos una avenida de diseño decamilenaria que otorga seguridad a las obras proyectadas para eventos extraordinarios en zonas tropicales.

Agradecimientos

Se agradece a la Empresa Nicaragüense de Electricidad - ENEL, por el permiso vertido como desarrollador del proyecto. El presente artículo se enmarca dentro del estudio de factibilidad de la central hidroeléctrica Larreynaga, elaborado por el consorcio FICHTNER GmbH & Co.KG de Alemania e IDISA Ingenieros Consultores de Nicaragua. ♦

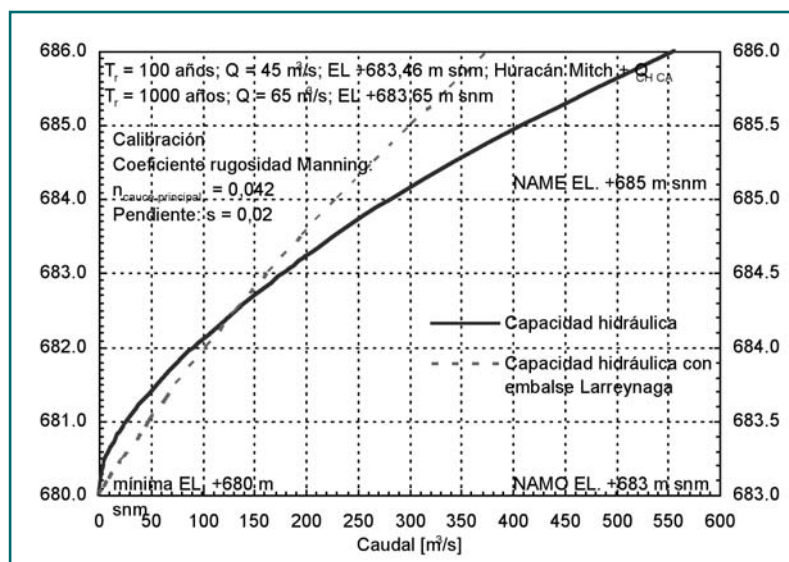


Fig. 11. Curva de descarga calibrada en el cruce del puente sobre el río El Cacao, aguas abajo del túnel de descarga de la C. H. Centroamérica/Calibrated discharge curve for the area where the bridge crosses the River El Cacao, downstream from the Centroamérica plant discharge tunnel.

and take on particular importance for the spillway of the gravity dam on the River El Cacao, the corresponding design flood for the area where the penstock crosses the River Viejo and for the flood protection on the same river of the powerhouse. In both these cases a 10,000 year design flood has been taken to ensure the safety of the works for flood protection during extraordinary events in tropical areas.

Acknowledgements

The author wishes to acknowledge the assistance of the Nicaraguan Electricity company (ENEL) in their capacity as project developer. The present article is on the frame of the feasibility study for the Larreynaga hydroelectric plant, prepared by the consortium FICHTNER GmbH & Co.KG of Germany and IDISA Ingenieros Consultores of Nicaragua. ♦

Referencias/References:

- (1) INSTITUTE OF HYDROLOGY WALLINGFORD (1994). *Flood Estimation for Small Catchments*, Report No. 124.
- (2) WMO (1986). *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation - Operational Hydrology*, Report No. 332.
- (3) MANIAK, ULRICH. (2000). *Hydrologie und Wasserwirtschaft. Einem Einführung für Ingenieure 4; Überarbeitete und erweiterte Auflage.*
- (4) CHOW, VEN TE - MAIDMENT, D. - MAYS, L. (1996). *Applied Hydrology.*
- (5) ICOLD (1992). *Selection of Design Flood - Current Methods*, Bulletin 82.
- (6) INSTITUTE FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURTECHNIK, Universität Karlsruhe (1995). *Hydrologie-Extremwertstatistik.*
- (7) CES CONSULTING ENGINEERS SALZGITTER (2001). *Estudio Definitivo para la Reconstrucción y Rehabilitación del Sistema de Defensas contra Inundaciones en el Bajo Piura y Modelo Matemático de Prognosis del Río Piura, Perú.*