

1. INTRODUCCIÓN.

El Proyecto Hidroeléctrico Río Cristal comprende el estudio de viabilidad en los varios campos que un proyecto hidroeléctrico conlleva. Este análisis contendrá temas vinculados con la topografía, hidrológica, estructuras de toma y producción energética. Al final del estudio se podrán dar conclusiones de la viabilidad tanto económica como técnica del proyecto.

Cabe resaltar que el capítulo 6, 7, 8 y 9 en lo posible se trató de hacer un resumen de un informe de Hidrología y Sedimentología elaborado por el ingeniero Oscar Villacís. El capítulo 10 es un resumen que se trató de hacer para la explicación de pautas que se encuentran dentro de un análisis de un proyecto hidroeléctrico. La información del resumen del capítulo 10 fue proporcionada por el Ingeniero Miguel Araque.

2. ESTUDIOS DE VIABILIDAD.

El objetivo en la planeación del proyecto hidroeléctrico es la determinación de su viabilidad. Por ello es conveniente realizar los estudios necesarios para obtener conclusiones con respecto a consideraciones técnico-económicas.

Las principales son:

- (1) Que el proyecto dé la solución a una necesidad social o económica presente o futura.
- (2) Que el proyecto corresponda al fin que se persigue en forma conveniente.
- (3) Que los servicios que se esperan obtener por medio del proyecto justifiquen su costo.

Con respecto al primer punto, la producción de energía es una necesidad no solo del país sino mundial. Una de las principales fuentes de energía son las termoeléctricas, pero en la actualidad se busca energía limpia y una de ellas son las centrales hidroeléctricas.

En el análisis del proyecto se incluirán costos referenciales y una estimación del TIR del proyecto en su vida útil.

3. PROYECTOS RELACIONADOS Y ESTUDIOS DE NECESIDAD.

El proyecto hidroeléctrico se encuentra en la zona de Balsapamba. Directa e indirectamente la población del lugar se relacionara con el proyecto siendo este una fuente de trabajo y al mismo tiempo generando desarrollo en el lugar.

Siendo la zona de Balsapamba una zona turística, habrá que tomar en cuenta mecanismos para que el proyecto no produzca de una manera elevada impactos ambientales. También se tendrá que visitar la zona para ver las zonas turísticas y los posibles trazos del proyecto.

4. ELABORACION DEL PLAN GENERAL.

El objetivo principal del proyecto se encuentra en la producción de energía eléctrica. La potencia instalada del generador dependerá principalmente de la ubicación de la zona de bocatoma y casa de maquinas.

Al ser la zona de Balsapamba una ubicación turística, se debe prever que el proyecto no influya de ninguna manera en el desarrollo turístico y de igual forma la conducción del proyecto se la debe analizar para que no tenga impactos directos con la población de la zona.

Para comenzar a estructurar el proyecto debemos tener en claro cual va hacer el alcance de los estudios. Al ser un análisis de prefactibilidad para la elaboración de un proyecto lo indispensable será tener la hidrológica y topografía del lugar. Por otro lado es indispensable hacer visitas a la población de Balsapamba para familiarizarse con la zona y hacer posibles conclusiones con respecto a la implantación del proyecto.

Al ser este un proyecto hidroeléctrico, habrá que tomar en cuenta posibles soluciones que se deban enfrentar durante el análisis que sean beneficiosos tanto como para la población y como para el proyecto en si.

5. LEVANTAMIENTO DE PLANOS.

El costo del levantamiento topográfico del proyecto representa contos elevados, por lo tanto todo el modelaje se lo desarrollara en cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar a escala 1:25000.

El primer paso es obtener las cartas topográficas en el Instituto Geográfico Militar, que en este caso estuvieron bajo el nombre de Balsapamba y San Miguel. Las cartas obtenidas están a escala 1:50000 y 1:25000.

Para el estudio se utiliza las dos cartas siendo la carta de 1:25000 la primordial para la obtención de volúmenes y la implantación del proyecto. La carta topográfica 1:50000 es de indispensable ayuda para el proyecto porque nos provee las áreas de la cuenca del Río Cristal.

Las cartas se las tendrá que digitalizar y pasarlas al programa Autocad en tres dimensiones para obtener valores más exactos de cubicación de tierras y de perfiles del terreno.

Este proceso es largo pero necesario para este análisis, caso contrario el estudio topográfico estaría fuera del alcance económico previsto para este trabajo.

Una vez ya realizada la digitalización del proyecto en Autocad, se procede con el levantamiento de las curvas de nivel con ayuda del programa Autocad Land, que en este caso las realice cada 20 metros para tener mejor exactitud en los cortes. También realice una digitalización de cada 40 metros para ver el área de influencia en la zona del proyecto.

Este proceso de digitalización se lo debe realizar de tal modo de que la carta topográfica quede exactamente igual a la digitalización incluyendo caminos existentes, quebradas, casas, etc., y lo mas importante que las coordenadas geográficas sean iguales.

Para el modelaje en la zona de bocatoma fue necesario de la ayuda de un GPS para proporcionarnos una mejor topografía del lugar. El GPS usado para este caso fue un eTrex de Garmin que almacena hasta 500 puntos topográficos. Los datos grabados son enviados a la computadora para su modelaje. Los siguientes planos se encuentran en la sección PLANOS TOPOGRAFÍA GENERAL

- La digitalización 1:50000 se lo puede observar en el anexo Plano 1
- La digitalización 1:25000 se lo puede observar en el anexo Plano 2
- La digitalización proporcionada por el GPS se lo puede observar en el anexo Plano 3

6. CARACTERISTICAS FISICO-CLIMATICAS DE LA CUENCA Y ZONA DE OBRAS.

6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA

Acceso

Al proyecto se llega desde la sierra a través de la vía Ambato-Guaranda-San José de Chimbo-San Miguel de Bolívar-Balsapamba, y desde la costa se llega por la vía Babahoyo-Juan Montalvo-Balsapamba.

Poblaciones

La cuenca de drenaje de los ríos Cristal y San Jorge tiene un área de 95 km² y tiene una densidad poblacional muy cercana a 30 habitantes por cada km². Los principales centros poblados que están cerca del proyecto son Balsapamba que se encuentra en las cercanías de la bocatoma y Montalvo que se encuentra en las cercanías de la casa de máquinas.

Potencialidades de la Producción Energética

Las líneas de transmisión del Sistema Nacional Interconectado están cerca del proyecto al igual que dos centros poblacionales que son Guaranda al Noreste y Babahoyo al Oeste.

6.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GENERALES DE LA CUENCA DE DRENAJE

Los ríos Cristal-San Jorge descargan en el sistema fluvial Cristal-San Pablo-Babahoyo-Guayas y por último desemboca en el Océano Pacífico y tiene sus nacimientos en la vertiente occidental de los Andes en las alturas superiores a los 2800 msnm.

El Gráfico No 1 muestra la cuenca de drenaje con la localización de algunas estaciones meteorológicas-hidrométricas.

- (a) Geográficamente, la cuenca del Cristal-San Jorge, hasta los sitios de obra, está comprendida entre las longitudes $79^{\circ} 05' 20''$ W a $79^{\circ} 10' 20''$ W y entre las latitudes $1^{\circ} 41' 40''$ S a $1^{\circ} 49' 10''$ S.
- (b) Es una cuenca de las estribaciones occidentales de los Andes con relieve fuerte y altitudes que van desde los 3000 msnm en la divisoria este de la cuenca hasta los 820 msnm en la estación hidrométrica Cristal AJ San Jorge.
- (c) Es un río de fuertes pendientes, la pendiente media (aritmética) del río es 14.8 % para el Cristal hasta la estación y de 18.9 % en el San Jorge hasta la estación.
- (d) La pendiente del río en el tramo de las obras es de 5.8 %.

6.3 CLIMATOLOGIA GENERAL DE LA CUENCA

A la cuenca perteneciente al río Cristal y al río San Jorge le influyen los siguientes factores físicos y de circulación atmosférica-oceánica.

-Factores de circulación atmosférica y oceánica:

(*) Por su localización al sur del “paralelo cero”, la circulación general de los vientos alisios es del Sur-Este.

(*) Las masas de humedad tropicales-marítimas provenientes del Pacífico y que se desplazan hacia el continente ascienden orográficamente por las estribaciones occidentales de la cordillera occidental y tienen su influencia en toda la cuenca.

(*) El desplazamiento de éstas masas cargadas con diferente grado de humedad e influencia mayor ó menor según la época del año se combinan con el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical.

-Factores Físicos

Son aquellos descritos con la presencia de la cordillera de los Andes que con su altura, relieve y orientación modela los afectos de aquella circulación atmosférica-oceánica.

La interacción de todos estos factores producen un régimen climático-pluviométrico caracterizado como “Tropical, Megatermico Húmedo” en la zona de las obras.

Lo que significa:

- Tropical, que significa un solo período lluvioso de enero a abril, una estación seca marcada de junio a noviembre y los otros meses son de transición entre estaciones.
- Húmedo, porque la lluvia media anual es del orden de 1500-2200 mm/año con una humedad relativa anual media de alrededor del 90 %.

El registro meteorológico de las estaciones más cercanas al proyecto indica, para la toma, (Est. Balsapamba) valores extremos de temperatura, desde 10° C (mínima absoluta) a los 34° C (máxima absoluta). Semejantemente, las humedades relativas extremas varían en un rango que va del 50% al 100% con una media de 90 %.

7. METEOROLOGIA

Se analizan los siguientes parámetros meteorológicos para el proyecto:

- Temperaturas y humedad relativa en sus tres parámetros característicos, mínimo – medio - máximo.
- Viento con su parámetro característico, el valor máximo.
- Lluvia con sus varios parámetros característicos; valores anuales - mensuales – diarios - lluvias intensas de corta duración.

7.1. RED DE MEDICIONES METEOROLOGICAS

En cuanto a lluvias comprende dos grupos de estaciones

- Interiores a las cuencas de drenaje del Cristal-San Jorge que son cuatro, una meteorológica y tres pluviométricas (en negrilla-cursiva en el Cuadro No 1).
- Exteriores y pertenecientes a las cuencas colindantes y otras pero de la misma vertiente del Pacífico.

Con ambos grupos se analiza regionalmente la variación de la lluvia en ésta zona de la vertiente del Guayas e igualmente los otros meteoros.

Las estaciones meteorológicas se instalaron en distintos años por lo que la longitud de los registros es variable. El detalle completo con sus características consta en el Cuadro No 1

Cabe indicar que hay déficit de cobertura para lluvias de los pisos altitudinales, de los 400 a 800 msnm / entre las cotas 800 a 2300 msnm / por encima de la cota 2300.

7.2. TEMPERATURAS-HUMEDAD RELATIVA-VIENTO EN LAS ESTACIONES

Las temperaturas han sido analizadas de forma regional para poder obtener valores para cualquier altitud en la cuenca que se encuentre en el rango de 100 a 3000 msnm.

El Cuadro No 3 contiene los datos de estaciones de la región en que consta un gráfico que relaciona la variable meteorológica con la altitud (variación altitudinal) y que se lo ha trazado para las temperaturas media ,máxima y mínima absolutas (Se ingresa al gráfico con la altitud del sitio que interesa para conocer las temperaturas).

El resumen de lo registrado en temperaturas, humedad y vientos en las estaciones consideradas se da en el siguiente cuadro.

Resumen Meteorológico para Estaciones en la Zona Centro de la Vertiente Occidental de los Andes

Nombre	Período De Registro	Temperatura Ambiente			Humedad Relativa		Viento Máximo (Km/h)
		Mínima (° C)	Media (° C)	Máxima (° C)	Mínima (%)	Media (%)	
Sto.Dgo de los Colorados	1963-1989	11.0	22.7	34.5	71	90	33
Chiriboga	1963-1983	0.3	16.3	29.6	58	88	29
Palo Quemado	1974-1986	10.2	19.9	31.0	43	90	50
Alluriquin	1977-1986	9.0	22.3	34.0	50	89	43
Pilaló	1963-1993	0.5	12.6	23.0	54	91	54
Pichilingue	1964-1993	15.4	24.6	36.7	41	84	54
Puerto Ila	1975-1993	14.1	24.2	34.5		90	32
El Corazón	1964-1998	9.0	17.9	30.2	65	94	32
Caluma	1964-1993	12.0	23.4	36.5		88	40
S. Juan La Mana	1964-1991	14.2	23.9	33.7		90	36

Coffea Robusta	1964-1973	16.3	25.1	36.0		83	
San Pablo de Atenas	1969-1994	0.0	13.0	28.2	36	93	65
Chillanes	1963-1994	0.3	13.6	27.4	48	87	58
Simiatug	1978-1980	1.0	10.6	20.0		84	
Tamboloma	1985-1989	0.0	7.5	17		90	50
Calamaca	1988-1997		8.9			82	72
Balsapamba	1976-1990	10	20.6	34.5		96	
- Los datos son un resumen extractado de la información contenida en informes hidrológicos de otros proyectos. En azul es estación en el interior de la cuenca.							

7.3. TEMPERATURAS, HUMEDAD, VIENTO EN LOS SITIOS DE OBRA

Del gráfico regional de temperaturas que sigue y de la observación de registros de Humedad Relativa en las estaciones se obtienen los siguientes valores:

Sitio	Temperatura Ambiental (°C)			Humedad Relativa (%)		
	Min.Abs	Media	Max. Abs.	Mínima	Media	Máxima
Cristal en la Toma	11.0	21.5	33,5	50	95	99
Casa de Máquinas	14.0	24.0	36,0	50	90	99

(Los valores de humedad han sido redondeados)

En cuanto a vientos se determina que habría velocidades máximas del orden de 40 Km/hora en la zona de toma - casa de máquinas, pero mayores hacia las divisorias superiores de las cuencas.

7.4. LLUVIAS

Las lluvias se comportan mayormente según el denominado régimen occidental, con la época mas húmeda de enero a abril, es estiaje de junio a noviembre y siendo los meses de diciembre y junio los de transición entre estaciones.

7.4.1. Lluvias anuales en las estaciones y sitios de obra

Las estaciones del interior de la cuenca no son suficientes para interpretar la amplia variación espacial de la lluvia por lo que no se justifica el trazar un plano de isoyetas. La lluvia anual en las estaciones consta en las tablas mensuales dadas en los Apéndices A1.1 a A1.10.

En la cuenca del Cristal-San Jorge, las estaciones han registrado los siguientes valores anuales medios (obtenidos de las tablas de lluvias mensuales del Apéndice A)

Lluvias Anuales (mm / año) en estaciones interiores y aledañas-cercanas en el Período 1964-1998				
Estaciones		Año Seco	Año Medio	Año Húmedo
Balsapamba	820 msnm	820 (1968)	1465 (1964-1998)	2800 (1983)
Montalvo	80 msnm	660 (1981)	1840 (1976-1996)	3575 (1976)
Pisagua Montalvo	120 msnm	1800 (1990)	2630 (1987-1992)	3530 (1987)
Las Guardias	2325 msnm	445 (1977)	810 (1964-1978)	1070 (1975)
San Miguel de Bolivar	2450 msnm	435 (1977)	750 (1964-1998)	1280 (1982)
San Pablo de Atenas	2350 msnm	715 (1985)	1280 (1965-1998)	1855 (1983)
San José del Tambo	230 msnm	1120 (1968)	2415 (1964-1998)	5600 (1983)

En el mismo Apéndice A hay datos para otras estaciones exteriores.

Curva de variación altitudinal de lluvia anual aplicable a la cuenca del Cristal.

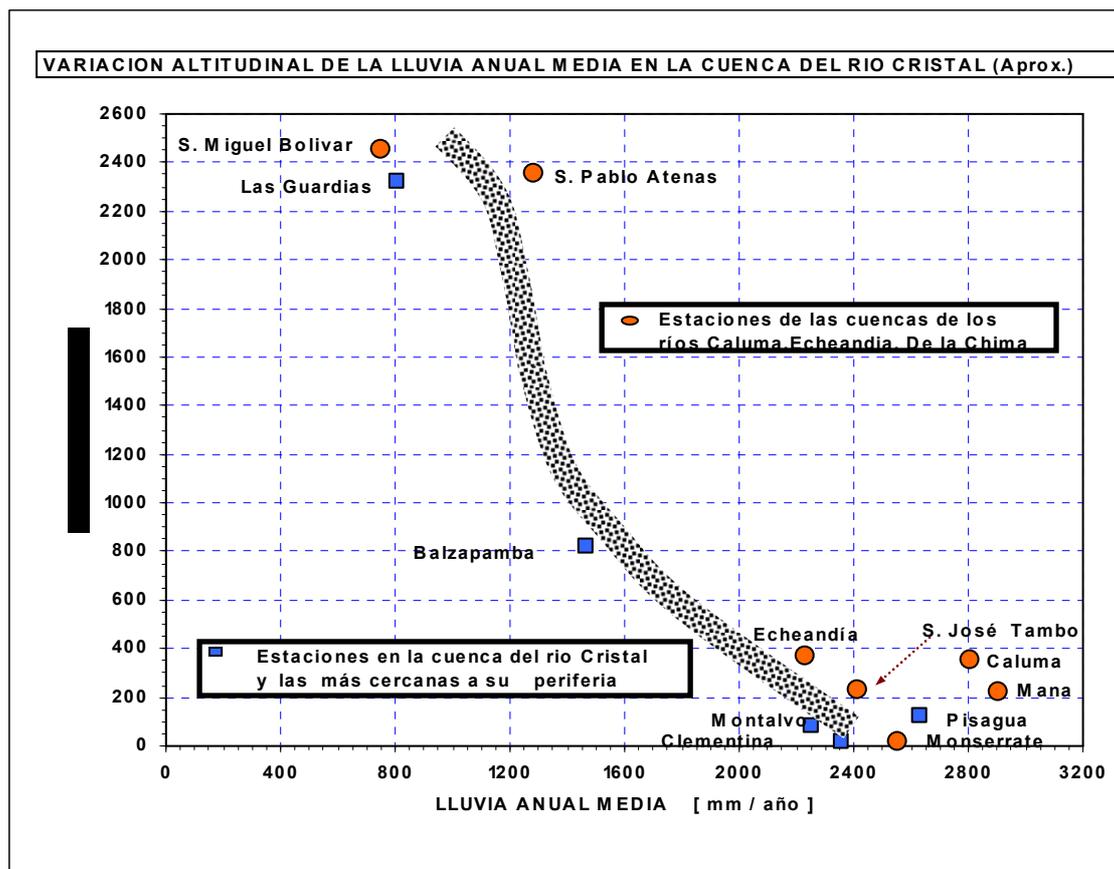
Para identificar el patrón de distribución de la lluvia anual en la cuenca se ha trazado un gráfico regional, Gráfico No 2. En éste gráfico a continuación, se aprecia lo siguiente:

- Debido a la carencia de estaciones se ha trazado una sola tendencia para las subcuencas del Cristal-San Jorge (aproximada).
- La variación de la lluvia es a disminuir con el ascenso en altitud de las cuencas.
- La lluvia anual media varia entre 2100 mm/año en la zona de la central y los 800 mm/año hacia las divisorias superiores de la cuenca.

Lluvias anuales en los sitios de obra

Las estaciones más cercanas a los sitios de obra son Montalvo para Casa de Máquinas y Balsapamba para la toma. Así, para caracterizar la distribución de lluvias se asume la variación mensual registrada en la estación meteorológica Balsapamba (pluviogramas adimensionales) como representativa para el Sitio de Toma y Montalvo para Casa de Máquinas. Su magnitud se cuantifica como sigue:

Del gráfico que sigue se obtiene la lluvia anual media para la toma y casa de máquinas. Las lluvias anuales para los años seco y húmedo se obtienen a través de los pluviogramas adimensionales mensuales de las estaciones (ver siguiente numeral).



El siguiente cuadro resume los valores anuales característicos en los sitios de obra:

Sitio	Lluvia Anual [mm / año]		
	Año Seco	Año Medio	Año Húmedo
Toma	865	1550	2970
Casa de Máquinas	620	2100	3340

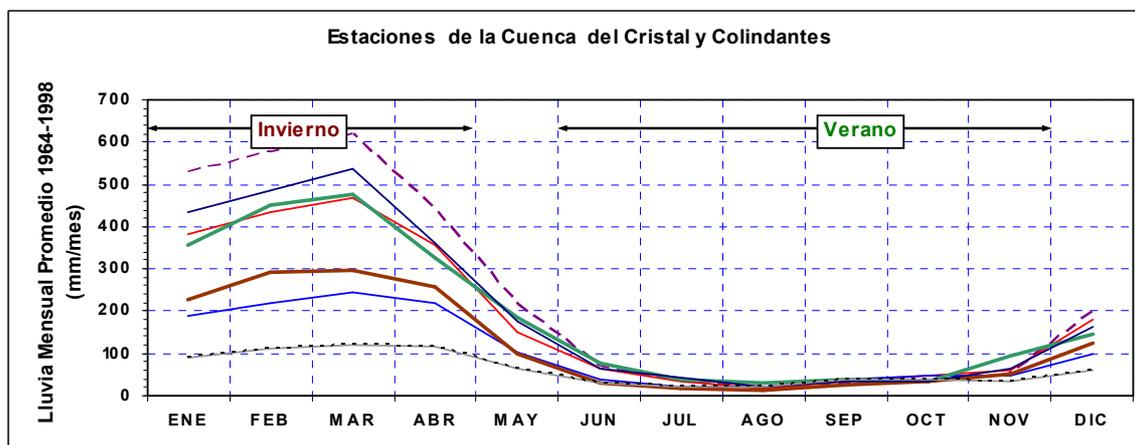
7.4.2. Lluvias mensuales en las estaciones y sitios de obra

Períodos Estacionales

Todas las estaciones registran un régimen que es conocido como occidental. En el Cuadro No 2a, No 2b constan los promedios mensuales de las estaciones y en el Gráfico No 3 se visualiza la distribución mensual de la que se deduce que (en promedio)

- Los cuatro meses de mayor lluvia (**INVIERNO**) van de **Enero hasta Abril**.
- Los seis meses de menores lluvias (**VERANO**) van de **junio hasta noviembre**.
- Los meses de Mayo y Diciembre son de transición entre verano e invierno.

En general el mes más seco es Agosto y el mes más húmedo es Marzo. El siguiente pluviograma muestra la distribución para las estaciones:



Lluvias Mensuales y Pluviogramas Característicos

Para los sitios de obra (toma y casa de máquinas), se generan pluviogramas mensuales de los años seco, medio (1964-1998) y húmedo. El Gráfico No 4 suministra el proceso de cálculo y las lluvias mensuales.

El siguiente cuadro da un resumen del año crítico - húmedo:

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Año húmedo en la Toma (mm/mes)											
535	510	520	555	105	150	190	55	30	65	95	160
Año húmedo en Casa de Máquinas (mm/mes)											
420	830	905	575	300	95	25	70	30	30	30	30

Los valores están redondeados.

El siguiente cuadro señala los **rangos de lluvias mensuales para los sitios de obras**

Sitio	Lluvias Mensuales Características (mm / mes)					
	Año Seco		Año Medio		Año Húmedo	
	Mes Seco	Mes Húm.	Mes Seco	Mes Húm.	Mes Seco	Mes Húm.
Toma	3	195	12	315	30	555
Casa-Máquinas	5	180	30	440	30	905

Se trazaron otros pluviogramas mensuales medios, ver el Gráfico No 3. Este gráfico tiene la finalidad de comparar el comportamiento similar de la lluvia en las estaciones.

7.4.3. Lluvias diarias en las estaciones y sitios de obras

La variabilidad de su magnitud y su distribución en el tiempo se indica a continuación.

- Lluvias máximas diarias registradas en las estaciones [P₂₄]

El Apéndice A2 da algunos registros anuales para las estaciones de la cuenca.

Del mismo apéndice se obtiene que para el sitio de Toma se esperarían lluvias máximas diarias en un rango min-max de 46 a 103 mm/día dependiendo de si el año es uno seco ó húmedo (son datos de la estación Balsapamba) y para el sitio de Casa de Máquinas se esperarían lluvias máximas diarias en un rango min-max de 40 a 190 mm/día dependiendo de si el año es uno seco ó húmedo (son datos de la estación Montalvo).

7.4.4. Lluvias intensas de corta duración

- Curvas intensidad-frecuencia-duración en los sitios de obra

Estas curvas son útiles para los diseños de los sistemas de drenaje que pudiesen necesitarse.

No se dispone al momento de los datos de Balsapamba y por lo tanto se utiliza el “Estudio de lluvias Intensas para el Ecuador” (publicación del INAMHI del año 2000). De acuerdo a ése estudio, la zona de obras está en la zona 30 (Cuadro No 4.1 de aquel informe) para la que se dan las siguientes ecuaciones de intensidad:

Zona	Duración de la lluvia	Ecuación de Intensidad de lluvia
30	5 min. hasta < 79 min.	$I_{(TR)} = 42.089 * t^{(-0.2952)} * Id_{(TR)}$
	79 min. hasta < 1440 min.	$I_{(TR)} = 432.57 * t^{(-0.8304)} * Id_{(TR)}$

En que:

t = Duración de la lluvia = Tiempo de concentración de la cuenca de interés

TR = Período de retorno, años, elegido según el tipo de obra.

$I_{(TR)}$ = Intensidad de la lluvia, mm/hora, para el valor elegido de “TR” y
para la duración de lluvia que interesa.

$Id_{(TR)}$ = Intensidad de lluvia diaria, mm/hora, para el valor elegido de “TR”.

Los valores de $Id_{(TR)}$ se obtienen de gráficos proporcionados en aquel estudio de intensidades (Cuadros No 2a hasta No 2e de aquel estudio).

El Apéndice A3 detalla el cálculo y a continuación algunos valores característicos:

Lluvias intensas en “ mm/hora ” para el sitio de obras				
Per. Retorno	5 minutos	15 minutos	30 minutos	60 minutos
T = 5	99	72	59	48
T = 10	107	78	63	52
T = 25	131	95	77	63

8. CAUDALES LIQUIDOS MEDIOS

Se genera la siguiente información:

- Caudales diarios disponibles en las estaciones Cristal AJ San Jorge y San Jorge AJ Cristal.
- Caudales diarios disponibles en el sitio de toma.
- Curvas de duración general a nivel diario y mensual para la estación y el sitio de aprovechamiento.

Sus magnitudes y proceso de cuantificación se indican en los siguientes numerales:

8.1. RED DE MEDICIÓN HIDROMETRICA

La cuantificación del recurso hídrico para el proyecto Cristal se basa en registros de la misma cuenca y de otros de la misma vertiente occidental (De la Chima en San José del Tambo, Echeandía en Echeandía, otras). Ver el Cuadro No 1 que contiene el listado de las estaciones y sus características:

- **La estación limnigráfica Angamarca en Pihuapungo.** De la cuenca del río Guayas, estuvo en el sitio Pihuapungo a 1.3 Km aguas abajo de la confluencia del río Yanayacu en el Angamarca y aproximadamente a 4 Km al Oeste de la población El Corazón. Instalada por INECEL ya no funciona. Se utilizan sus índices de sólidos.

- **La estación limnigráfica Echeandia en Echeandia.** En las estribaciones de la cuenca del río Guayas. Desde Oct/1978 está localizada en las inmediaciones de la población de Echeandia.
- **La estación limnimétrica Pilaló en la Esperanza.** Localizada aproximadamente a 4.5 km aguas abajo de la confluencia del Chiquinquirá con el Pilaló y aproximadamente a 25 km desde la población La Maná
- **La estación limnigráfica De la Chima en San José del Tambo.** Estuvo en las inmediaciones de la población del mismo nombre. Sus registros son muy cortos y, adicionalmente, los registros continuos no fueron completos, pues, los usuales problemas de funcionamiento, como taponamiento de los tubos comunicantes, frecuencia de las comisiones de mantenimiento, etc. , obligaron al uso de un gran porcentaje de lecturas del observador de campo (lecturas limnimétricas)
- **La estación limnigráfica Cristal AJ San Jorge.** Es la básica del proyecto Cristal Instalada por INAMHI funcionó durante dos períodos, el primero de Ene /1964 - Febrero / 1972 en que fue destruida por una creciente, reconstruida en Julio de 1980 funcionó hasta febrero de 1987 en que fue destruida por otra creciente.

Estuvo localizada aguas arriba del puente de hormigón que cruza el Cristal aproximadamente 500 m. antes de llegar a la población de Balsapamba (por el carretero S. Miguel de Bolivar - Balsapamba).

- **La estación limnimétrica San Jorge AJ Cristal.** De la cuenca del Cristal en las cercanías de la toma. Estuvo localizada a poca distancia de la confluencia del San Jorge con el Cristal. Funcionó desde enero de 1964 y fue destruida por una creciente en febrero de 1972.
- Hay otra estación, cuya información será utilizada en grado menor debido y es De Chima AJ Pesquerías.

El Cuadro No. 1 lista las estaciones y el Grafico No 1 presenta la ubicación de alguna de ellas, a continuación un resumen de las estaciones principales:

Estación	Área (km ²)	Registro Histórico	Tipo
Cristal AJ San Jorge	59	1964-1971, 1980-1987	LG
San Jorge AJ Cristal	36	1964-1971	LM
De Chima en S. José Tambo	395	Dic/1968 - Nov/1973	LG
Chima AJ Pesquerías	79	Dic/1968- Funciona	LG
Echeandia en Echeandia	383	Dic/1964 – 1994	LG
Angamarca en Pihuapungo	435	Feb/1984 – Ago/1991	LG
Pilaló en la Esperanza	228	Jun/1962 – Funciona	LM

LG: Estación limnigráfica

LM: Estación Limnimétrica

8.2. CURVAS DE DESCARGA LIQUIDA EN LAS ESTACIONES

Las curvas aquí suministradas se indican en los Gráficos No 5a y No 5b para las estaciones Cristal AJ San Jorge y San Jorge AJ Cristal:

Aforos

Para el Cristal AJ San Jorge se dispone de 25 aforos registrados en el período Feb/1964 a Jun/1997, aunque solo en 8 años de los 34 años del período se realizaron aforos y de lo aforado se deduce que:

- El 40 % de los aforos son en verano de julio a diciembre y los demás de enero a junio (época invernal). Su número total es deficitario para el control temporal (estacional) de la curva de descarga, aunque presumiblemente se tendrá una mejor certeza en los caudales firmes.
- La amplitud del rango aforado va desde $0.46 \text{ m}^3/\text{s}$ (Oct/1967) a $9.49 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abr/1965) , con lo que se cubre la parte media-inferior de la curva.

El listado de aforos se da en el Cuadro No 4a.

Para el San Jorge AJ Cristal se dispone de 14 aforos registrados en el período Feb/1964 a Jun/1997, aunque solo en 7 años de los 34 años del período se realizaron aforos y de lo aforado se deduce que:

- El 43 % de los aforos son en verano de julio a diciembre y los demás de enero a junio (época invernal). Su número total es aún más deficitario que en el caso del Cristal para el control temporal (estacional) de la curva de descarga.
- La amplitud del rango aforado va desde $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$ (Oct/1967) a $3.28 \text{ m}^3/\text{s}$ (May/1965).

El listado de aforos se da en el Cuadro No 4b.

Curvas de descarga

Respecto a la representatividad espacial-temporal de los aforos, las curvas han sido trazadas gráficamente y las ecuaciones definidas de su trazo en papel doble logarítmico y con la tendencia del punto de extrapolación con las curvas altura-área-velocidad.

Las curvas de Cristal AJ San Jorge se hacen válidas solo hasta 1971, pues en 1972 se destruyó la estación por una creciente y aunque se reconstruyó a mediados de 1980, se lo hizo en otro sitio un poco aguas abajo. Además no se dispone de aforos desde 1980 hasta 1987 en que una nueva creciente la destruye nuevamente (solo hay un aforo en 1983, a más de que en 1982 se reporta afectación a la sección de niveles por materiales arrojados por la construcción del nuevo carretero). Consecuentemente solo se calculan los caudales 1964-1971 y las curvas se trazan como envolventes para estar por el lado de la seguridad.

Las curvas de San Jorge AJ Cristal tienen validez solo para 1964-1971 pues las crecientes de 1972 también la destruyen y no se reconstruye.

El Apéndice B2 da un historial de la estación del Cristal.

Las curvas se suministran en los Gráficos No 5a, No 5b (en el Apéndice B1.a y B1.b constan las curvas Altura limnimétrica- Área de la sección y Altura limnimétrica-Velocidad media para ambas estaciones que sirvieron para aproximar el punto de extrapolación de la curva de descarga).

Curvas de descarga líquida en Cristal AJ San Jorge		
Ecuación	Validez	Período
$Q = 6.95 * [H]^{3.228}$	0.30 < H < 1.08 m.	1964-1966, 1969-1971
$Q = 7.61 * [H]^{2.71}$	1.09 < H < 2.0 m	
$Q = 9.0 * [H]^{2.468}$	0.20 < H < 2.0 m.	1967, 1968

Curva de descarga líquida en San Jorge AJ Cristal		
Ecuación	Validez	Período
$Q = 5.87 * [H]^{3.13}$	0.30 < H < 1.80 m.	1964 – 1971

8.3. CAUDALES DIARIOS EN LAS ESTACIONES

8.3.1. Caudales Diarios

Su proceso de cálculo es:

- Determinación de los caudales históricos-naturales en las estaciones.
- Cuantificación de usos consuntivos en las cuencas
- Determinación de los caudales disponibles en las estaciones, 1964-1994
- Transposición de caudales naturales al sitio de captación

8.3.1.1. Caudales histórico-naturales en las estaciones

- **Caudales registrados en la estación Cristal AJ San Jorge**

En Cristal AJ San Jorge, los caudales diarios propiamente registrados son del período Enero/1964 hasta Nov/1971 y, los caudales de Dic/1971-Dic/1994 son generados con los caudales de la estación De la Chima en San José del Tambo.

La tabla de resumen mensual se da en el Cuadro No 5. Son series naturales pues aguas arriba de la estación no hay usos consuntivos de significación.

Las tablas diarias constan en el Apéndice B3a.

- **Caudales registrados en la estación San Jorge AJ Cristal**

En San Jorge AJ Cristal, los caudales registrados son del período Ene/1964-Nov/1971 y el período Dic/1971-Dic1994 es determinado con Cristal AJ San Jorge (cuenca colindante de similar magnitud)

Las series diarias corresponden prácticamente a series naturales por cuanto, los usos consuntivos (abrevadero de animales, uso doméstico, etc.) no son significativos para reajustar las series.

La tabla de resumen mensual se da en el Cuadro No 6 y las tablas diarias constan en el Apéndice B3b.

- **Caudales de la estación De la Chima en San José del Tambo**

Los caudales utilizados son del “informe 11” listado en el numeral 1.3 arriba y corresponden al período 1964-1994.

Correlaciones de Caudal

Correlaciones Cristal AJ San Jorge (Y) – De Chima en S. José del Tambo (X)

(*) Se realizaron correlaciones para el período común de registro histórico Dic/1968-Nov/1971 y con caudales diarios.

(*) Las correlaciones fueron año por año para detectar días anómalos y poder eliminarlos de la correlación. También se realizaron correlaciones estacionales (invierno-verano).

(*) La correlación finalmente utilizada es la de todo el período 1968-1971 (en la que fueron eliminados menos del 1 % de los datos).

En general los coeficientes de correlación variaron entre 0.85 a 0.92.

Se utilizó la siguiente correlación: $Q(Y) = 0.157 Q(X) + 0.10$ y $r = 0.92$

Con ésta ecuación se extendió el período Dic/1971 – Dic/1994.

Correlaciones San Jorge AJ Cristal (Y) – Cristal AJ San Jorge (X)

(*) Se realizaron correlaciones para el período común de registro histórico 1964-Nov/1971 y con caudales diarios.

(*) Las correlaciones fueron año por año para detectar días anómalos y poder eliminarlos de la correlación.

(*) La correlación finalmente obtenida es la de todo el período 1964-1971.

Se obtuvo una correlación diaria 1964-1971 con un coeficiente $r = 0.80$ que sin embargo no se utiliza para completar San Jorge pues tiende a generar caudales firmes mayores en el San Jorge que en el Cristal, lo cual es irregular considerando que la cuenca del San Jorge es el 61 % de la magnitud del Cristal.

En su lugar y considerando que ambas cuencas son colindantes y de una magnitud relativamente pequeña, se adopta una ecuación de transposición para el período Dic/1971-Dic/1994 en función de las respectivas áreas de drenaje, así:

$$Q(Y) = 0.61 Q(X)$$

Correlaciones San Jorge AJ Cristal (Y) – De Chima en S. José del Tambo (X)

(*) Se realizaron correlaciones para el período común de registro histórico 1968-Nov/1971 y con caudales diarios.

Aunque la correlación es satisfactoria ($r \sim 0.92$) se decide no utilizar ésta correlación pues ambas cuencas son bastante disímiles en magnitud.

- Caudales registrados- extendidos en las estaciones

Las series de caudal se generan con las ecuaciones de éste informe. Se da las tablas mensuales del Cristal Y San Jorge en los Cuadros No 5 y No 6 para De la Chima en San José del Tambo en el Apéndice B4.

A continuación un resumen de caudales característicos:

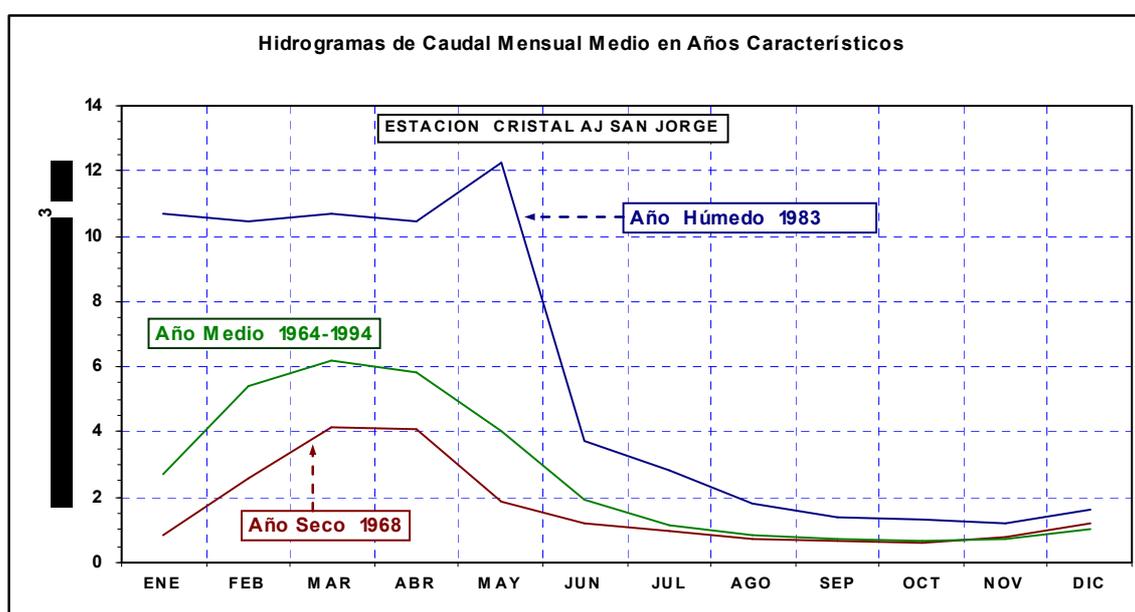
Caudales Característicos en cada estación [m ³ /s] 1964 – 1994				
Estación	Cristal AJ San Jorge	San Jorge AJ Cristal	De la Chima en S. José del Tambo	
Qmed (Período)	2.60	1.50	15.4	
Qmed (Año Seco)	1.44	0.61	5.80	
Qmed (Año Húm)	5.70	3.48	35.5	
Día Seco	0.23	0.23		
Día Húmido	31.5	19.2	200	

El Gráfico No 6 contrasta los hidrogramas de los caudales mensuales medios para tres de las estaciones en su registro histórico coincidente (1968-1971) y que muestra la correspondencia del régimen hídrico en las tres cuencas. Como comprobación se han graficado los datos de la Est. De Chima AJ Pesquerías también colindante hacia el Este. En

el Apéndice B4.b Constan las tablas mensuales de ésta última estación que muestra también el comportamiento especial de la producción de caudales en la zona, con altos valore de febrero a mayo y caudales muy bajos de julio a diciembre.

El Apéndice B3.c da las respectivas correlaciones mensuales que lo corrobora.

En el siguiente gráfico se visualiza el hidrograma mensual para los años secos-húmedos y medio en la estación Cristal AJ San Jorge.



De él se deduce que la época de invierno va desde febrero a mayo, el verano desde julio hasta diciembre, siendo los meses de enero y junio los de transición entre estaciones.

8.4. CAUDALES DIARIOS, CURVAS DE DURACION GENERAL Y VARIACION ESTACIONAL EN LOS SITIOS DE LAS TOMAS

8.4.1. Caudales disponibles en los sitios de toma

Las series de caudales disponibles son las series naturales del río en el sitio de la toma tomando en cuenta una disminución del caudal por consumos mínimos aguas arriba.

Sitio de Toma en el Río Cristal.

Dado que los usos consuntivos para la cuenca del Cristal no son de significación, entonces se asumen las mismas series de caudal diario de la estación Cristal AJ San Jorge para la toma ya que la diferencia en áreas de drenaje es mínima.

Y los caudales en el sitio de toma se calculan como:

$$Q_{\text{(Cristal en la toma)}} \sim Q_{\text{(Cristal AJ San Jorge)}}$$

Los “ $Q_{\text{(Cristal en la toma)}}$ ”, a nivel diario constan en el Apéndice B1a (como Cristal AJ San Jorge) y el resumen mensual en el Cuadro No 5.

De lo calculado se obtienen los siguientes caudales disponibles característicos:

Río Cristal en el sitio de Toma						
Caudales Medios [m ³ / seg]						
Período	Año Seco	Año Húmedo	Mes seco	Mes Húmedo	Día Seco	Día Húmedo
1964-1994						
2.60	1.44	5.70	0.27	11.1	0.23	31.5

Lo señalado como caudal seco y húmedo son los extremos en todo el período.

Otros Potenciales Sitios de Toma en el San Jorge y Vergel

San Jorge

Para el río San Jorge se pueden asumir los mismos caudales de la estación San Jorge AJ Cristal pues está muy cerca del sitio de toma en el Cristal y la variación del área es mínima con respecto al probable sitio de aprovechamiento.

(San Jorge en la Toma) = Q (San Jorge AJ Cristal)

Los “Q (S. Jorge en la toma)”, a nivel diario constan en el Apéndice B1b (como San Jorge AJ Cristal) y el resumen mensual en el Cuadro No 6.

De lo calculado se obtienen los siguientes caudales disponibles característicos:

Río San Jorge en la confluencia con el Cristal						
Caudales Medios [m ³ / seg]						
Período	Año Seco	Año Húmedo	Mes seco	Mes Húmedo	Día Seco	Día Húmedo
1964-1994						
1.50	0.61	3.48	0.23	7.5	0.16	19.2

Vergel

Se debe aplicar la siguiente ecuación en función de Cristal AJ San Jorge:

Q (Vergel en la Toma) \sim [Área en Toma-Vergel / Área Cristal AJ Jorge] x Q (Cristal AJ San Jorge)

[Área en Toma-Vergel) = Área de la cuenca del Vergel hasta el sitio de su toma

Área Cristal AJ San Jorge = 59 Km²

Q (Cristal AJ San Jorge) = Tablas de Caudal Diario del Apéndice B1.a ó

Tabla de Caudal Mensual Medio del Cuadro No 5

8.4.2. Curvas de Duración General y Estacional en el Sitio de Toma.

- Curvas de duración general con caudal diario

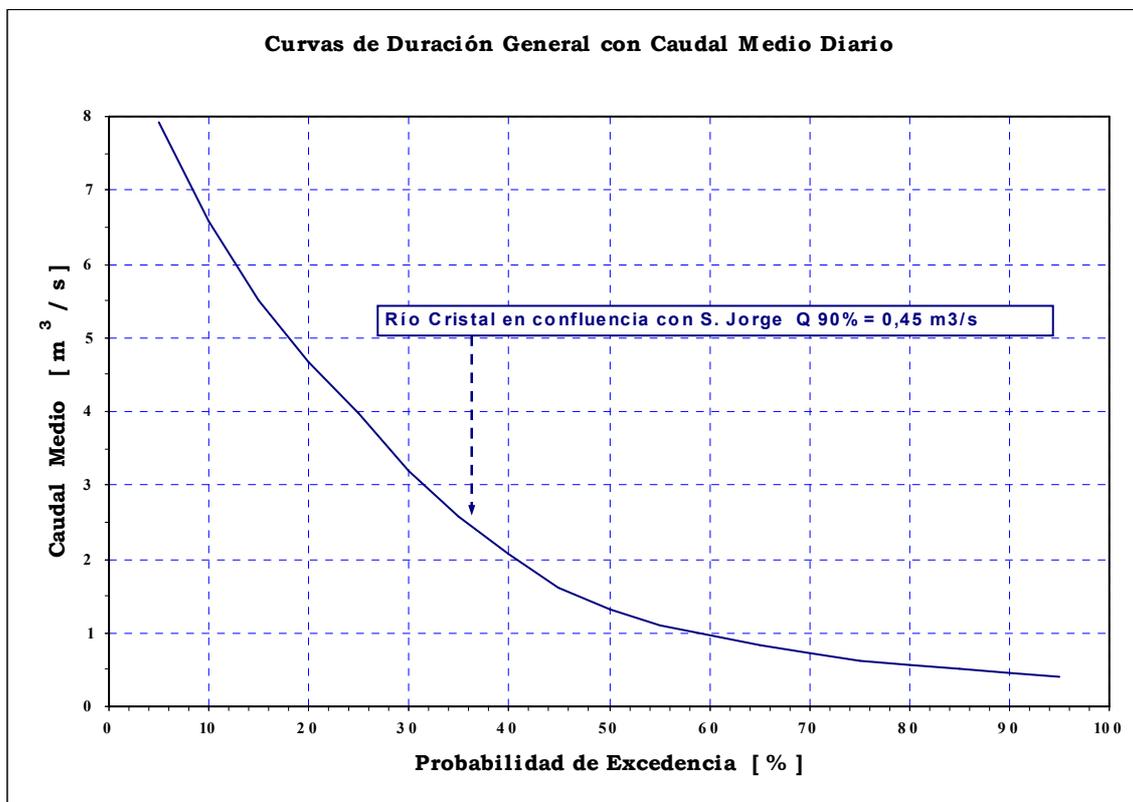
Sitio de Toma en el Río Cristal.

El siguiente cuadro resume algunos valores característicos para la curva de duración de todo el período 1964 - 1994:

SITIO	Qmedio	Q 25%	Q 50%	Q 75%	Q 85%	Q 90%
	m ³ /s					
Toma en el río Cristal	2.6	4	1.31	0.63	0.50	0.45

Los valores están redondeados.

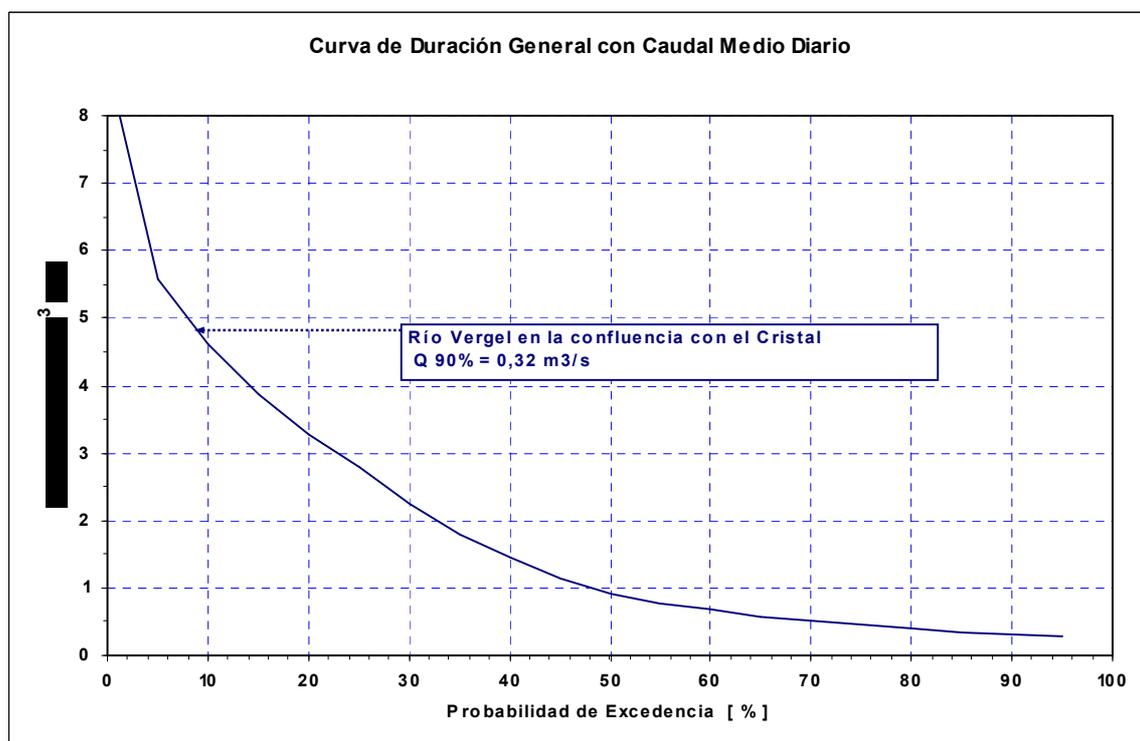
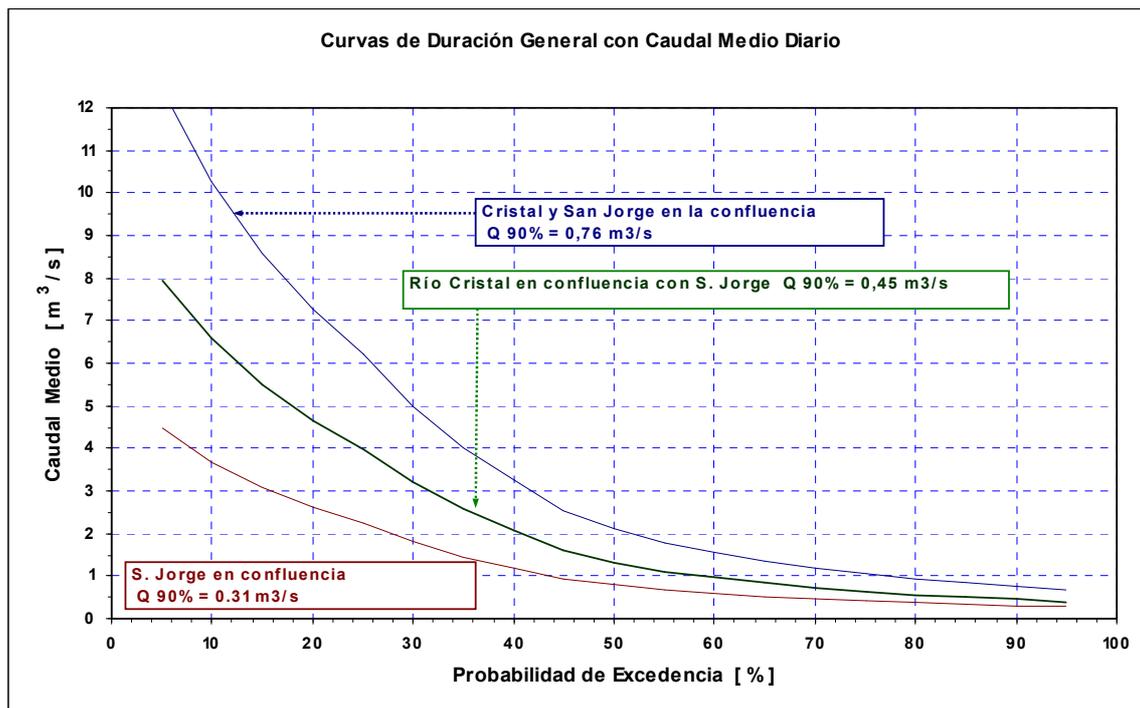
El Gráfico No 7a da la curva completa.



Sitio de Potenciales Tomas en los Ríos San Jorge y Vergel

Con las series diarias indicadas previamente se define que la curva de duración para la Toma - San Jorge es la misma que en San Jorge AJ Cristal y para el Vergel se multiplicaría la de Cristal en la Toma (Cristal AJ San Jorge) por la ecuación dada arriba.

El Gráfico No 7a da la curva para el San Jorge y el Gráfico No 7b para el río Vergel en la confluencia con el Cristal (no sitio de la probable toma). Ver los siguientes gráficos:



- Curvas de Variación Estacional.

Sitio de Toma en el Río Cristal y en el río San Jorge

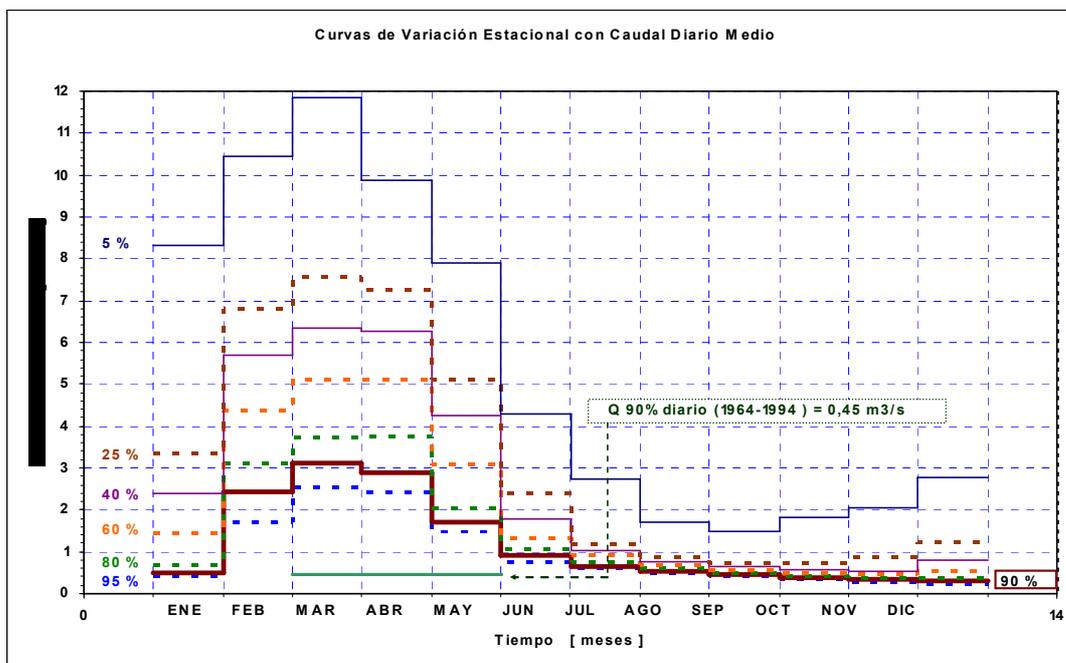
El siguiente cuadro resume los valores en cada mes del caudal Q 90% diario para el Cristal y San Jorge:

Curvas de Duración General mensuales con caudal diario medio [Variación Estacional]											
Sitio de Toma en el río Cristal Q 90% diario medio (m ³ / seg)											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0.48	2.41	3.10	2.89	1.72	0.90	0.66	0.52	0.46	0.38	0.34	0.31

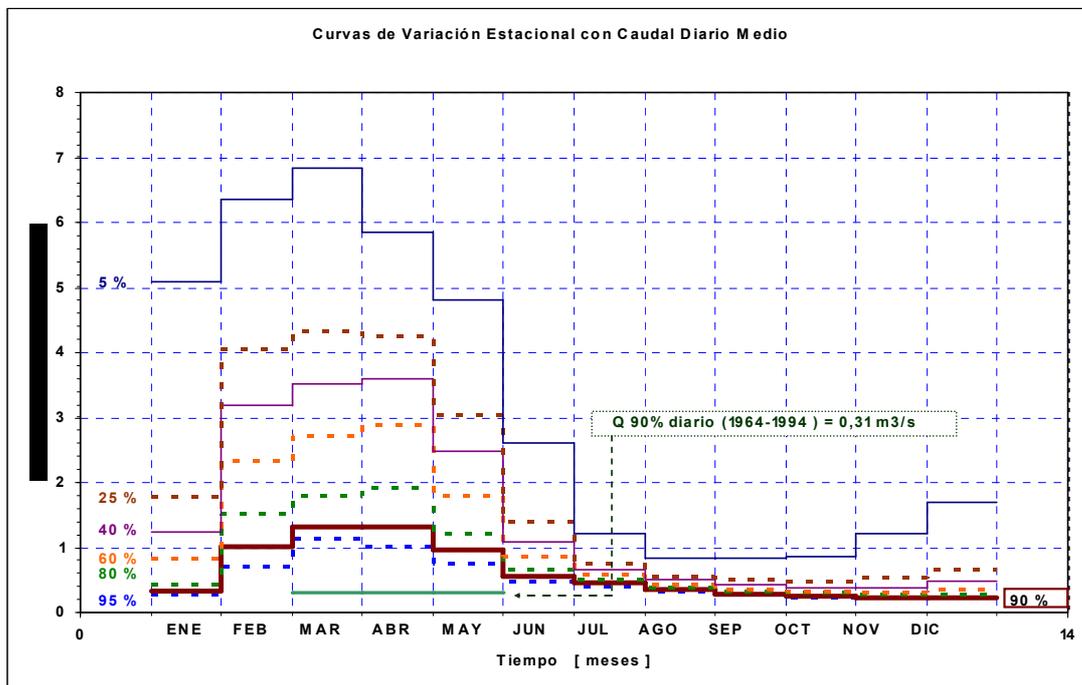
Río San Jorge Q 90% diario medio (m ³ / seg)											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0.33	1.01	1.32	1.32	0.96	0.55	0.45	0.34	0.29	0.25	0.23	0.23

Los Gráficos No 8a, No 8b y Cuadros No 7a, No 7b dan todas las frecuencias.

Curvas de Variación Estacional en Cristal en la Toma



RIO VERGEL



9. CRECIDAS

No existen otras cuencas del orden de magnitud de la del Cristal de las estribaciones occidentales de los Andes que hayan sido estudiadas para aprovecharlas en un análisis regional. (Cuencas de hasta 200 km²).

Consecuentemente, el cálculo de crecidas es función de lo registrado para la estación Cristal AJ San Jorge y de una comparación expedita de crecidas con algunas estaciones vecinas en las estribaciones de la cuenca del Guayas-Babahoyo (Pilaló en la Esperanza, De la Chima en San José del Tambo, Echeandía en Echeandía, las valoraciones puntuales de esas estaciones son de otros proyectos hidroeléctricos).

9.1. ANALISIS PROBABILISTICO DE CRECIDAS EN LAS ESTACIONES

Información Básica

La información utilizada corresponde a:

(*) Las crecidas registradas para la serie anual 1964-1972 de Cristal AJ San Jorge que se complementa con los registros regionales definidos en base a las estaciones Pilaló en la Esperanza , Echeandía en Echeandía, De Chima en S. José del Tambo.

Método de Calculo para las estaciones

El procedimiento utilizado por ser el más apropiado es el de un análisis probabilístico con las series de caudales máximos.

Para las obras permanentes interesan solo los caudales máximo-instantáneos anuales y para las obras temporales las series de máximos en los 5 ó 7 meses consecutivos secos.

Se ha calculado con varias distribuciones probabilísticas (Gumbel, Log-Normal, Pearson Tipo III, Log-Pearson Tipo III), aplicadas, tanto a la serie de caudales máximos anuales (un valor por año) como a la serie de caudales máximos de los cinco (5) y siete (7) meses consecutivos secos. Aunque se calcula con todas las distribuciones, se escoge una sola de ellas considerando los criterios de ajuste estadístico

Se calculan los valores:

$QM(T)$ = Caudal máximo instantáneo para T (años), (es el caudal más probable, identificado como QM en los cuadros).

La crecida calculada al 95% de confiabilidad es:

$QE(T)$ = Caudal máximo instantáneo para T (años) al 95% de confiabilidad (límites superior e inferior y, que para crecidas, se considera solo el superior).

El valor de "QE" suministra al diseñador un rango de selección del caudal de diseño que depende de su percepción de seguridad para las obras propias del proyecto y que compensan las incertidumbres inherentes a la longitud, relativamente corta, de las series de caudales y es un valor entre QM y QE, aunque bien puede seleccionar solo QM.

9.2. ANALISIS PROBABILISTICO DE CRECIDAS EN LAS ESTACIONES

Información Básica

La información histórica se la suministra en el Apéndice B5.

Método de Cálculo.-

Como se indicó previamente se realiza un cálculo probabilístico.

Para el Cristal el análisis se lo hace para el período 1964-1972:

- Debido a la asimetría se adopta la Pearson Tipo III, que modela con la asimetría propia de la serie.
- Se prefiere la distribución que utiliza los parámetros estadísticos calculados con la serie de caudales sin transformar (no conversión logarítmica ó de otro tipo).

Resultados

Cristal AJ San Jorge

Los caudales instantáneos calculados y dados en el Apéndice B5 corresponden a una serie de longitud muy corta (9 años), de manera que el análisis frecuencial tiene alguna incertidumbre por lo que se asumen los valores calculados al 95 % de confiabilidad a partir de T = 20 años.

Sin embargo, para minimizar la subvaloración de las crecidas se compara con los resultados de otras cuencas y se dan en el siguiente cuadro:

Caudales Instantáneos de Crecida en Cristal AJ San Jorge (Sitio de la Toma)				
Crecida	T = 10	T = 20	T = 100	T = 250
QM	32	38	50	58
QE	40	50	76	93

QM = Caudal más probable; QE = Caudal al 95 % de confiabilidad

Río San Jorge AJ Cristal.

Para éstos dos ríos se asumen los caudales específicos del Cristal y el cuadro de arriba se modifica a:

Caudales Instantáneos de Crecida en San Jorge AJ Cristal				
Crecida	T = 10	T = 20	T = 100	T = 250
QM	20	23	31	35
QE	24	31	46	57

Los caudales del cuadro son calculados como $Q_{(\text{San Jorge})} = [36/59] \times Q_{(\text{Cristal})}$

Río Vergel.

Para el Vergel depende del área de drenaje del sitio de potencial captación, así:

$$Q_{(\text{Vergel en la Toma})} \sim [\text{Área en Toma-Vergel} / \text{Área Cristal AJ Jorge}] \times Q_{(\text{Cristal AJ San Jorge})}$$

En que:

$$[\text{Área en Toma-Vergel}] = \text{Área de la cuenca del Vergel hasta el sitio de su toma}$$

$$\text{Área Cristal AJ San Jorge} = 59 \text{ Km}^2$$

$$Q_{(\text{Cristal AJ San Jorge})} = \left. \begin{array}{l} \text{Dado} \\ \text{en el Apéndice B6} \end{array} \right\} \text{ ó}$$

En el cuadro precedente arriba.

- **Crecidas anuales de diseño en la toma del Cristal para las obras permanentes**

Son las mismas crecidas ya definidas para Cristal AJ San Jorge.

- **Crecidas en Casas de Máquinas**

Se aplican los mismos caudales específicos de Cristal AJ San obteniéndose los siguientes resultados en

(m³/s):

Período de Retorno	Casa de Máquinas	
	QM	QE
T = 100	150	175
T = 250	225	275

Los valores están redondeados

QM: caudal más probable

QE : caudal al 95 % de confiabilidad

- **Crecidas estacionales para las obras temporales**

Se estiman para el sitio de toma en el Cristal y para los cinco (5, julio a noviembre) y siete (7, junio a diciembre) meses consecutivos de la época de caudales más bajos.

Los factores son:

Factor (5 meses) $\sim [8.7 \text{ (media de verano)} / 49(\text{media de crecidas-anales})] = 0.18$

factor (7 meses) $\sim [12.6 \text{ (media de verano)} / 49(\text{media de crecidas-anales})] = 0.26$

$Q_{\text{instantáneo (5 meses)}} = 0.18 Q_{\text{instantáneo (anual)}}$

$Q_{\text{instantáneo (7 meses)}} = 0.26 Q_{\text{instantáneo (anual)}}$

Los resultados constan en el siguiente cuadro:

Crecidas Instantáneas de Verano “QE”						
Sitio de Toma	5 meses consecutivos secos			7 meses consecutivos secos		
	T = 10	T = 20	T = 100	T = 10	T = 20	T = 100
Cristal AJ	7	9	14	10	13	20
San Jorge						

10. HISTORIA DEL MODELADO HIDRÁULICO

10.1. BREVE HISTORIA DE LA HIDRÁULICA Y LOS MODELOS REDUCIDOS EN EL MUNDO.

La ingeniería hidráulica es tan antigua como la civilización del hombre. Esto es evidente ya que el agua siempre ha sido un recurso vital para la supervivencia del hombre, y desde esta el hombre a tratado de controlar el agua para sus diversos usos. Es ahí donde podemos ver que las grandes civilizaciones fueron construidas en las proximidades de los ríos.

Del año 4000 al 2000 A. C. los egipcios y los fenicios ya tenían experiencias en problemas de agua, en la construcción de sus barcos y sus puertos. En ese tiempo, China, India, Pakistán, Egipto y Mesopotámica iniciaron el desarrollo de los sistemas de riego. Los chinos también experimentaron en la protección contra inundaciones, después del año 500 A. C. en la Grecia antigua se construyeron acueductos y se empezaron a desarrollar fórmulas para dichos sistemas. Después, básicamente se conoce la invención del molino de viento utilizado para extraer aguas subterráneas.

Ya en el siglo XVI se desarrollaron los principios de la hidráulica con científicos como Kepler y Torricelli,- alrededor del año 1800 Newton, Bernoulli y Euler perfeccionaron dichas teorías.

El primer modelo hidráulico fue creado en el año 1795 por el ingeniero Luis Jerónimo Fargue sobre un tramo del Río Garona. En 1885 Reynolds dio a conocer la relación existente entre la fuerza de la inercia y la fuerza de fricción interna en un modelamiento hidráulico. Hoy en día se lo conoce como número de Reynolds y es un parámetro adimensional muy significativo en los modelos hidráulicos.

El arquitecto naval William Froude, en 1870, indicó la importancia de tal relación de la fuerza de inercia y de la fuerza de gravedad. El primer laboratorio hidráulico fue fundado en Dresden (Alemania), en 1891, por el Profesor Engels, y después de éste muchos otros aparecieron en casi todos los países del mundo y con base en sus funciones se pueden clasificar de la siguiente manera:

a.- Docencia e Investigación Pura

b.- Investigación Aplicada

Como lo dice el nombre el de docencia e investigación pura se los puede encontrar en las universidades e instituciones de docencia y las de investigación aplicada esta vinculado más al sector privado.

10.2. MODELO MATEMÁTICO.

El modelo matemático es la representación por medio de ecuaciones de la dinámica de un sistema. Es el tipo de modelo más importante para la ciencia y la tecnología.

Utilidad de los modelos matemáticos:

1.- Análisis, comprensión y evaluación de un sistema: relación entre variables.

2.- Diseño, mejoramiento, optimización: construcción de un nuevo sistema o reestructuración de un sistema existente.

3.- Predicción y pronóstico del comportamiento de un sistema (normalmente a partir de la simulación), como base para la toma de decisiones.

4.- Control: adición de nuevos componentes a un sistema, de manera que se obtenga un desempeño adecuado.

5.- Enseñanza y comunicación: transmisión del conocimiento que se tiene de un sistema de una manera universal y objetiva.

6.- Estimación de variables no medibles.

7.- Prueba de hipótesis.

8.- Procesamiento de señales: cancelación del ruido, compresión de datos, filtrado, interpolación.

Modelos matemáticos según su origen

- Teóricos o fenomenológicos. Se obtienen a partir de leyes, tienen gran penetración física, generalmente son difíciles de obtener, son aproximados
- Empíricos. Relativamente fáciles de obtener y usar, tienen poca penetración física ("cajas negras"), son más exactos que los teóricos (tan exactos como se desee), tienen validez limitada (según punto de operación, condiciones, etc.).
- Mixtos. "Cajas grises", su estructura se obtiene de manera teórica y algunos de sus parámetros se obtienen a partir de datos experimentales

Realidad sobre el modelado y la simulación:

- 1) Un modelo matemático es sólo una aproximación de la realidad.
- 2) Existe una gran distancia entre el mundo real y las descripciones obtenidas a partir de un modelo matemático por medio de la simulación.

3) Aunque no existe una relación exacta entre la realidad y la predicción, el modelo matemático permite comparar ciertos aspectos de interés, para los cuales se construye el modelo y sólo para esos.

4) El orden de un modelo matemático es sólo una muy buena simplificación matemática que no tiene explicación en el mundo real.

10.3. HIDROLOGÍA ESTOCASTICA

La hidrológica estocástica es la aplicación de procesos estocásticos (parte de la ingeniería de sistemas) al estudio y análisis de eventos hidrológicos.

Los Eventos Hidrológicos, tales como aguaceros, caudales, niveles de embalse, etc. son Eventos Estocásticos. Se caracterizan porque, de un lado tienen un patrón medio de comportamiento a largo plazo, y por el otro el pronóstico de sus magnitudes en un momento dado tiene un mayor o menor grado de incertidumbre.

Los proyectos que son diseñados y construidos se ponen en funcionamiento en futuro por lo que existe una variación en los datos hidrológicos proporcionados. Por ellos los eventos probabilísticos están sujetos a un grado de incertidumbre.

Caudal real = Caudal calculado +/- Incertidumbre

La proyección para el futuro se lo realiza mediante un análisis probabilística de los datos.

10.4. GENERACIÓN ESTOCÁSTICA DE SERIES HIDROLÓGICAS

Los proyectos relacionados al uso del agua por lo general utilizan este recurso de los ríos, por lo que los proyectos necesitan en su mayoría una bocatoma, una conducción, y un reservorio o canales adyacentes ya sea el caso.

Para el diseño de la estructura, es necesario tener los datos hidrológicos durante la vida útil del proyecto. Para lograr este propósito se pueden utilizar métodos que pertenecen a la hidrológica estocástica lo cuales tienen sus bases en los conceptos de la teoría de probabilidades y de la ingeniería en sistemas.

Uno de estos métodos consiste en determinar la Serie Histórica de Caudales de la Fuente, y con base en ella generar N series estocásticas de Caudales Virtuales, cada una de longitud igual a la vida útil del proyecto. Las N series generadas tienen igual probabilidad de presentarse en el futuro, y una de ellas, no se sabe cuál, será probablemente parecida a la serie real futura. Las series estocásticas permiten, entonces, contar con un panorama de posibilidades de lo que puede ocurrir con la fuente en el futuro. Este panorama será más amplio entre mayor sea el número N.

Como se mencionó anteriormente, para generar las series estocásticas es necesario realizar primero un análisis estadístico de Frecuencias de la serie histórica. Si no existe serie histórica o si esta es deficiente la Generación Estocástica no es aplicable.

10.5. ANTECEDENTES

El Sistema de Análisis de Ríos del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (HEC-RAS) es un software que permite el desarrollo de cálculos hidráulicos estáticos y dinámicos de cauces de ríos. Este software pertenece al Cuerpo Civil de Trabajos de Investigación de Ingeniería Hidrológica y Programas de Desarrollo.

La primera versión del HEC-RAS (versión LO), se emitió en Julio de 1995.

Este programa fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC), el cual pertenece al Instituto de Recursos Hídricos (IWR) del cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. Fue diseñado por Mr. Gary W. Brunner, jefe del grupo de desarrollo del HEC-RAS. El uso de interfaces y gráficos fue programado por Mr. Mark R. Jensen. Los modelajes estáticos y dinámicos fueron programados en gran parte por Mr. Steven S. Piper. El solucionario de ecuaciones de flujo no estático fue diseñado por Mr. Dr. Robert L. Barkau. El diseño de las funciones de canales fue realizado por Ms. Joan Klipsch. Las rutinas para el modelaje de ríos ciertos de hielo fueron desarrolladas por Mr. Steven F. Daly del Laboratorio de Investigación e Ingeniería de Regiones Frías (CRREL).

Mucha gente del HEC, contribuyeron en el desarrollo de este software, incluyendo: Vern R. Bonner, Richard Mayes, Jonh Peters, Al Montalvo y Michael Gee. Mr. Darryl Davis fue el director del desarrollo de este programa.

10.6. FILOSOFÍA GENERAL DEL SISTEMA DE MODELAJE

HEC-RAS es un sistema integrado de programas, diseñado para el uso interactivo de tareas múltiples. El sistema consta de una interfase de uso gráfico, separado del análisis de los componentes hidráulicos, almacenaje de datos y manejo de capacidad, gráficos y facilidad de reportes.

El sistema HEC-RAS contiene el análisis en una dimensión para tres componentes: (1) cálculos de flujo estático de perfiles de superficie de agua; (2) simulación de flujos dinámicos; y (3) cálculo de los límites de transporte de sedimentos. Un elemento clave es que en los tres componentes se usará una representación geométrica común y rutinas de cálculos hidráulicos. Adicionalmente para los tres componentes de análisis hidráulicos, el sistema contiene características severas de diseño que pueden ser utilizadas para calcular perfiles básicos de la superficie de agua. La versión actual de HEC-RAS sustenta cálculos de flujos estáticos y no estáticos.

10.7. RECUENTO DE LAS CAPACIDADES DEL PROGRAMA

HEC-RAS fue diseñado para desarrollar cálculos hidráulicos en una dirección para canales naturales y artificiales. A continuación se describen las capacidades del programa HEC-RAS.

10.8. CUADRO DE DIALOGO.

El programa utiliza esquemas de dialogo (cuadros) que ayudan y facilitan la aplicación del programa. Los cuadros de dialogo provee las siguientes funciones.

- Manejo de archivos
- Introducción y edición de datos
- Análisis hidráulicos
- Tabulación y despliegue gráfico de los datos y resultados.
- Facilidad de reportes
- Una línea de ayuda

10.9. PERFILES DE FLUJO ESTÁTICO SUPERFICIAL DEL AGUA.

Este componente del sistema de modelaje se propone para el cálculo de perfiles superficiales para flujo estático gradualmente variable. El sistema puede sustentar el trabajo en canales, sistemas o el alcance de un simple río. El componente estático del flujo es capaz de modelar regímenes subcríticos, supercríticos o mixtos.

Los procedimientos básicos de computación se basan en la solución de la ecuación de energía de una dimensión. Las pérdidas de energía son evaluadas por fricción (ecuación de Manning) y contracción y expansión (coeficiente multiplicado por el cambio en la velocidad). La ecuación de momento es utilizada en situaciones donde el perfil de la superficie del agua es rápidamente variable. Estas circunstancias incluyen el cálculo del régimen de flujo mixto (saltos hidráulicos), hidráulica de puentes y evaluación de perfiles de los afluentes de un río.

El efecto de obstrucciones como puentes, embalses, presas y estructuras en una inundación se podría considerar en los cálculos. El sistema de flujo estático es diseñado para aplicaciones del control de zonas de inundación y estudios para evaluar los encharcamientos

de los que producen las inundaciones. También las capacidades son accesibles para evaluar los cambios en los perfiles superficiales como en el mejoramiento de canales.

Las características especiales del componente de flujo estático incluye: un plan de análisis múltiple, cálculo múltiple de perfiles, puentes múltiples y /o análisis múltiple de embalses y optimización de separación de flujo.

11. LOCALIZACION Y COSTOS GENERALES DEL PROYECTO.

11.1. FORMULACIÓN DE PRESUPUESTOS.

Los datos para el presupuesto de la obra, principalmente se lo obtendrán como costos finales. En este caso se tendrá un costo referencial de la casa de máquinas, campamentos y bocatoma. Los principales componentes que dictaran el costo final de la obra serán la conducción, el reservorio y la tubería de presión. Para este análisis se discutirán varias alternativas de proyecto y se escogerá la mejor opción.

Al final del proyecto se tendrá un costo preliminar del proyecto y de la venta de energía, en el cual se tendrá que hacer un análisis económico para obtener la tasa interna de retorno del proyecto.

Otras obras como campamentos y mejoramiento de vías se tendrán como costos finales.

11.2. DETERMINACION DE CANTIDADES DE OBRA.

Las cantidades principales que tienen el mayor porcentaje al costo final del proyecto son el sistema electromecánico, el reservorio, la conducción y el acero. En el análisis del proyecto se tendrá que tomar la mejor opción en la cual tanto el movimiento de tierras como la cantidad de acero sean mínimos.

El reservorio es de regulación horaria servirá para abastecer de agua a la casa de máquinas en las horas pico en las épocas del año en que el caudal sea menor a la potencia instalada. Por esta razón el volumen del reservorio será único, pero la ubicación se tendrá que analizar para que no tenga grandes impactos en la zona.

Para el costo del sistema electromecánico se tendrá que tener el caudal de diseño que se lo presentara en la sección se cálculos.

11.3. LOCALIZACION DEL PROYECTO.

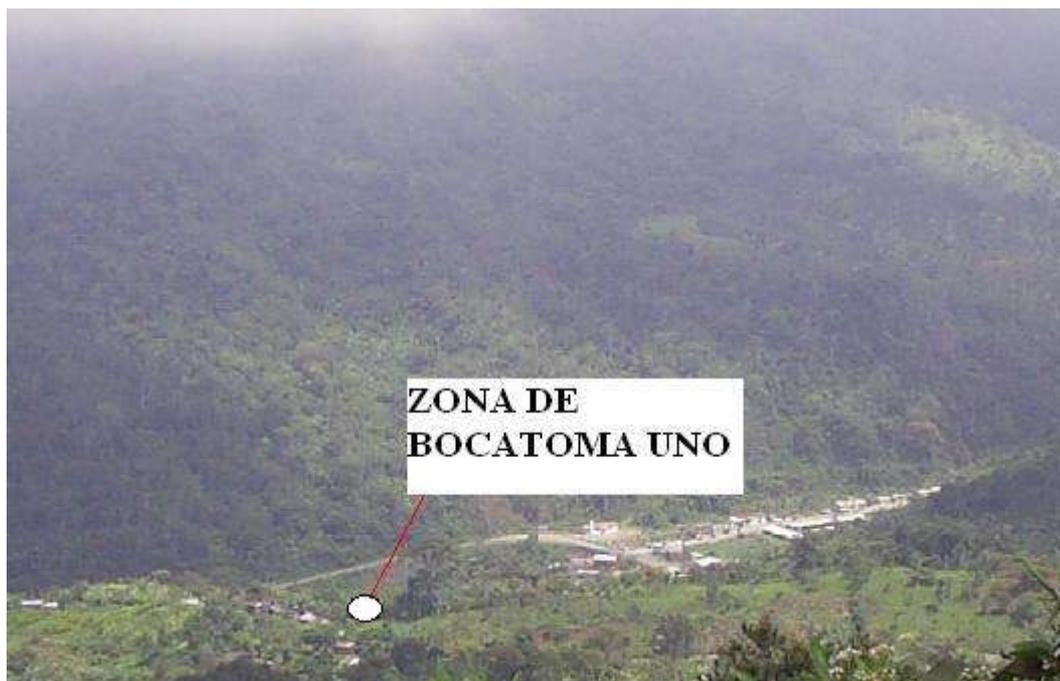
La zona de bocatoma debe ser especificada para hacer todos los cálculos hidráulicos. En este caso tenerlos un plano obtenido del Instituto Geográfico Militar el cual nos proporciona una buena información de la zona. Estas cartografías a parte de tener información geográfica también nos proporcionan información de densidad poblacional de la zona la cual es muy importante la implantación de un proyecto. Para este caso fue necesario visitar la zona de Balsapamba la cual es una población que se encuentra a orillas del Río Cristal.

Primeramente mi zona de bocatoma fue ubicado en las coordenadas (zona uno)

$$X = 702928.497$$

$$Y = 9804933.799$$

La cual tenia una caída de altura de mas de 500 metros en relación con la casa de maquinas. Al visitar la zona, la densidad poblacional era muy grande y las personas de la localidad usaban el agua para cultivos de peces y de complejos de recreación. Hablando con personas de la localidad fue necesario hacer una visita aguas abajo del río para obtener datos del uso del agua en esa zona. El ultimo complejo turístico que usaba el agua del Río Cristal se encontraba cerca de un kilómetro de la zona de bocatoma uno. Visto que la zona de bocatoma uno produciría gran impacto en la localidad fue necesario buscar un sitio de bocatoma, la cual seria la final.



ZONA

DE

BOCATOMA

UNO

La nueva zona para la implantación de la bocatoma se encuentra en la descarga de la quebrada la Chorrera o como se le tiene conocido en el lugar La Cascada de la Milagrosa. Las coordenadas del nuevo sitio de obras de cabecera se encuentra en

 $X = 701285.165$ $Y = 9804562.323$



RIO SAN JORGE

En el nuevo lugar de la bocatoma fue en donde se realizo la recolección de datos por medio del GPS y se hizo un levantamiento topográfico en el programa Land.

12. DISEÑOS DE LAS OBRAS DE DERIVACION Y BOCATOMA

12.1. OBRAS DE DERIVACION

Las obras de derivación y bocatoma del Proyecto Hidroeléctrico Río Cristal, se las conceptúa conformadas por un azud de derivación, un desripiador, las obras de cierre y de empotramiento lateral en el lado izquierdo, y las obras de bocatoma y de cierre y empotramiento en el lado derecho. Los planos podemos verlos en la sección PLANOS BOCATOMA.

Los diseños a pesar de su complejidad fueron supervisados por el ingeniero Iván Vázquez que me guió durante el diseño de las obras de captación.

En lo que refiere al azud de derivación, esta es una estructura hidráulica sobre un lecho permeable. Este tipo de estructura hidráulica es una de las que más han sido utilizadas para situaciones en las que el lecho del río está conformado por un manto aluvial, que es el caso del Río Cristal en el sitio de implantación de las obras de derivación.

En el diseño del azud, se toma en cuenta los parámetros necesarios que tienen que ser implementados en este tipo de análisis, sobre todo en lo referente a la topografía, hidrología, geotecnia que se lo encuentra detallado en este análisis.

A continuación se detallan los diseños y cálculos del azud:

OBRAS DE DERIVACION Y BOCATOMA

AZUD DE DERIVACION

Datos:

$$Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$B = 20 \text{ m.}$$

TALUD AGUAS ABAJO → 1.5: 1.0 (H: V)

COEFICIENTE DE DESCARGA 2.18 (A SER COMPROBADO)

RESTRICCIONES LATERALES

Muro de ala Izquierdo con curvatura en la transición.

Muro divisorio entre el azud y el desripiador con curvatura final circular

$D = 0.60 \text{ m.}$

TALUD AGUAS ARRIBA 1:3.5 (H: V)

JUNTAS DE DILATACION: Con las dimensiones del azud, sólo es necesario incorporar una junta junto al muro divisorio con el desripiador, y en el otro lado, una junta en el muro de acercamiento a la estructura.

Los planos podemos verlos en la sección PLANOS AZUD

DISEÑO DEL AZUD EN LA ZONA DE LA CRESTA

Diseño Hidráulico del Azud

	Datos	Unidades
1.- Altura desde la cresta del azud hasta el río	5	(m)
2.- N # de vanos	1	
3.- Longitud de cada vano	20	(m)
4.- Ancho de cada pila	0	(m)
	Horizontal	Vertical

5.- Pendiente abajo del azud

1.5 1

6.- Cola de agua

7.- Condiciones de Roca

Buena

8.- Caudal de Diseño

150

(m³/s)

a) Altura de la cresta de agua

Ancho libre de descarga = 20 (m)

(m³/s/m)

Intensidad de Descarga = 7.5

Coefficiente de descarga C =

2.1

$$Q = CLH^{3/2}$$

H = 2.34

El máximo coeficiente de descarga C es 2.21, si no es afectado por otro parámetro hidráulico como sumergencia, velocidad de aproximación etc.

b) Efecto de acercamiento [Tabla 1](#)

P = Altura desde la cresta del azud hasta el río

$$\frac{P}{H} =$$

2.14

El coeficiente C que se escoge según la gráfica es: 2.19

c) Efecto de cabecera provocado por velocidad de acercamiento

Velocidad de acercamiento = 1.02 m/s

Cabecera provocada por velocidad de acercamiento = 0.05 m

Si el valor es pequeño se descarta

d) Efecto de la cola de agua

En este caso la altura total es:

$$d + H$$

Altura total = 7.34

$$\frac{H + d}{H} =$$

3.14

si es mayor de 1.7; el factor de descarga no es afectado por condiciones de cola de agua.

e) Efecto del talud aguas arriba

Con el valor $\frac{P}{H} = 2.14$ no se tiene ninguna incidencia del talud aguas

arriba en el valor del coeficiente de descarga

f) Ancho efectivo de Vertedero

$$Le = L - 2 * (N.Kp + Ka) * Hd$$

N = Número de pilas

Kp = Coeficiente de contracción de pilas

Ka = coeficiente de contracción de abultamiento

	Kp	Ka
For square nosed piers	0.02	
For round nosed piers	0.01	
For pointed nosed piers (90° cut water)	0.01	
		0.2
For sqare abutments with head wall		0.1
For rounded abutments with head wall		

3.28

Hd asumido 2.4 \longrightarrow Altura del agua escogida

(m)

N =

0

Kp =

0.01

Ka =

0.1

Le =

19.52

(m)

Se asume un coeficiente de descarga (C) de:

2.19

Q =

158.94

(m^3 / s)

(m^3 / s)

Q

>

Q

158.94

>

150.00

Sí pasa

La altura de agua de diseño Hd es:

2.4

(m)

g) Perfil aguas abajo desde el Azud

El perfil recomendado por Waterways Experiment Station Vicksburg Mississippi U.S.A, of

U.S Army es:

$$y = \frac{x^{1.85}}{2H_d^{0.85}}$$

Las coordenadas calculadas para el perfil aguas abajo del Azud es:

x (m)	y (m)
0	0.000
0.1	0.003
0.2	0.012
0.3	0.026
0.4	0.044
0.5	0.066
0.6	0.092
0.7	0.123
0.8	0.157
0.9	0.195
1	0.238
1.1	0.283
1.2	0.333
1.3	0.386
1.4	0.443
1.5	0.503
1.6	0.567
1.63	0.587
3.13	1.587
4.63	2.587
6.13	3.587

7.63

4.587

Punto tangente de coordenadas

La gradiente del Azud aguas abajo es:

Horizontal	Vertical
1.5	1

$$\frac{dx}{dy} =$$

0.666666667

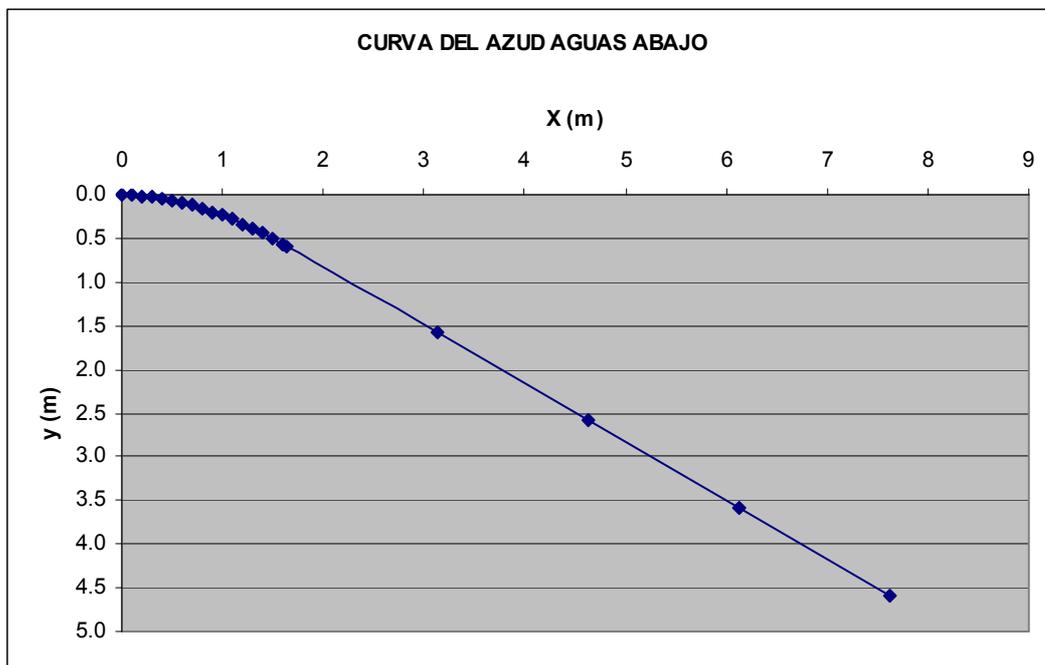
Ecuación diferencial para el perfil del Azud aguas abajo

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1.85x^{0.85}}{2H_d^{0.85}} =$$

0.666666667

x = 1.63

y = 0.59



13. DESRIPIADOR

El desripiador se lo planifica localizándolo en la parte izquierda de las obras de derivación, entre el azud y la obra de toma.

Esta localización coincide con el canal natural de flujos normales del río, el cual tiene su meandro hacia la orilla derecha, a la altura de las obras de derivación. De esta manera, al coincidir los canales de limpieza y desripiador, con el canal normal del río, los impactos que puedan producirse en el comportamiento geomorfológico serán menores.

La función principal del desripiador es dar limpieza a la entrada de las obras de toma. El desripiador constara de dos compuertas, las cuales serán abiertas solo en caso de crecida máxima y limpieza de las obras de toma. En los planos se puede ver la localización del desripiador. La descarga del desripiador se lo hace hacia un cuenco disipador y transición de entrega con protección de enrocado

El desripiador contara de dos compuertas las cuales serán automatizadas para una mejor operación de las mismas. Ya que el propósito del desripiador es dar limpieza a las obras de toma, estas serán abiertas cuando exista una cantidad de sedimentos que impida el correcto funcionamiento de las obras de cabecera. Ya que la apertura de las compuertas del desripiador ocasionara un diferente funcionamiento del azud y de las obras de toma, es necesario hacer los cálculos correspondientes a la estructura del desripiador.

Para los cálculos necesarios para el funcionamiento del desripiador fue necesario hacer un programa basado en Visual Basic y concatenado con el programa Excel. Los resultados finales del programa son ecuaciones las cuales se las programa a una computadora integrada conjuntamente con un sistema automatizado, el cual rige la altura de apertura de compuerta.

El ancho del desripiador se lo opto por 2.40 metros de canal. Los planos de la estructura los podemos ver en la sección de PLANOS DESRIPIADOR.

14. DISEÑO DEL DESARENADOR.

La composición del sistema de derivación, bocatoma y obras de cabecera del Proyecto Hidroeléctrico Río Cristal, están dentro de una completa interconexión hidráulica entre si. La determinación de las estructuras de entrada, canales y cámaras de desarenación y la descarga del sistema de derivación, esto es, con las curvas de descarga aguas abajo del azud y del desripiador, que se derivan en los estudios y diseños de calados de agua en el río para diferentes caudales, mediante el modelaje matemático desarrollado anteriormente por el programa HEC-RAS. El fondo del desarenador deberá tener una gradiente continua desde su inicio hasta la compuerta de limpieza, en el presente caso, se establece la máxima posible, que da como resultado a una gradiente del cerca del 2%, lo cual sería adecuado. Se han preparado varias alternativas de las características hidráulicas de las compuertas de purga. La alternativa escogida, es la que la descarga queda junto a la pared izquierda del desarenador, con lo que se introduce un funcionamiento de compuerta a descarga libre, y un ducto corto de descarga a perfil libre. El desarenador constara de dos compuertas las cuales van hacer sistematizadas para una mejor operación y el caudal de agua que entre al desarenador será controlado por las compuertas. Los cálculos de la entrada de agua en relación a la apertura de las compuertas se lo encuentran en las hojas anexas.

Para el caudal de diseño que esta entre 5 y 10 m³/s la cámara es capaz de sedimentar adecuadamente partículas hasta de 0.25 mm menores a las recomendadas para un proyecto hidroeléctrico que corresponde a 0.5 mm. La velocidad de sedimentación tiene que ser menor a 0.5 m/s, la cual es adecuada para la sección establecida. El ancho establecido para el desarenador tiene cerca de 13 m de ancho y el alto se lo establece por la cota de agua en al azud. El largo del desarenador tiene una longitud cercana a los 40 m el cual es óptimo para el sedimento de partículas en la estructura.

El principal objetivo del desarenador es dar menor velocidad al flujo de agua para que las partículas se sedimenten en el fondo de la cámara del desarenador. La cámara también consta de compuertas de purga que están situadas en un costado de la cámara y en el fondo de la cámara. Cuando las compuertas de purga se abren, limpian a su paso todas las partículas que han sido sedimentadas en el fondo de la cámara. Los planos del desarenador se los pueden ver en la sección PLANOS DESARENADOR

15. PRODUCCION ENERGETICA.

La producción energética del proyecto es dependiente de la caída bruta del proyecto y del caudal de diseño del proyecto hidroeléctrico. Cabe especificar que la potencia instalada no es el que rige en la producción energética. Para saber cual es la producción total de un proyecto es necesario obtener una tabla hidrológica la cual nos indique probabilísticamente el caudal que pasa por el río preferiblemente en cada mes del año. Con ellos tenemos una estadística de la cantidad de Gigawatt que el proyecto puede producir. Cabe resaltar que el estudio hidrológico es probabilística de muestreos hechos en el río Cristal y San Jorge.

Para el cálculo de la potencia generada dependiendo de factores del proyecto fue necesario hacer un programa basado en Visual Basic, utilizando los macros del programa Excel. Este programa fue necesario hacer ya que nos permite modelar el proyecto con diferentes caudales de diseño el cual es indispensable para saber la producción máxima del proyecto hidroeléctrico.

Para la producción energética se utilizaron los siguientes datos:

Cota de la bocatoma = 690-700 m

Cota del nivel del azud = 704.7 m

Perdidas en el desarenador = 0.3 cm.

Perdidas en la entrada a la conducción = 0.58 cm.

Perdidas en la conducción = 30 m

Cota del nivel del agua en el reservorio = 674.7 m

Cota del nivel del agua en el reservorio con factor de seguridad (factor de seguridad de 4.7 m) =
670 m

Longitud de tubería de presión = 2530 m

Cota de la casa de maquinas = 215 m

Caída bruta de agua = 455 m

Los resultados lo podemos apreciar en la hoja de resultados de **PRODUCCIÓN ENERGÉTICA**

16. RESERVORIO.

Reservorio de regulación horaria

El proyecto hidroeléctrico consta de un reservorio de agua. El reservorio está diseñado para cubrir demandas eléctricas en horas pico. En verano al ser el caudal menor al caudal medio es indispensable tener un reservorio el cual dará una generación que abastecerá en las horas de más consumo eléctrico en el país. El tiempo de producción máxima depende del volumen de diseño del reservorio.

En este caso el reservorio abastecerá de cuatro horas de producción de energía, cual con una necesidad de 7 m³/s, para un tiempo de 4 horas se necesitaría un reservorio con un volumen de 100800 m³, para redondear y tener una mayor producción en horas pico el reservorio es diseñado para captar un volumen de 110000 m³.

Como una obra de implantación del reservorio es un canal adyacente al reservorio que se conecta directamente desde la conducción hasta la cámara sin necesidad de pasar por el canal del reservorio. Este canal servirá en caso de mantenimiento del reservorio.

La cota de mando que regirá la producción energética será la cota prevista en el tanque de carga.

En caso de que existan taludes altos en la zona del reservorio se prevé una mejora del terreno en la zona inestable, y el uso de geo-textiles, y en todo caso hormigón lanzado para dar mayor estabilidad a los taludes.

Normalmente en etapas de estiaje lo que se prevé es llenar el reservorio durante las horas de menor consumo y generar a capacidad completa en las horas de mayor consumo. Este proceso representa una ventaja inmensa para el país por lo que se deja de producir energía eléctrica a base de combustible que tiene costos elevados. De la misma forma en invierno la producción máxima puede ser generada por un canal de desvío adyacente al reservorio.

El tanque de carga se lo situara en el costado de la nariz de la montaña en la cual se ah diseñado la tubería de presión. El tanque de carga constara de rejillas y compuertas las cuales estarán ubicadas según su función.

17. MODELACION EN HEC-RAS

El modelamiento matemático del río se lo realizó en el programa HEC-RAS, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.

A continuación se detalla los pasos a seguir para el modelamiento en el programa.

- a) Obtener la topografía del río a ser modelado.
- b) Obtener las secciones transversales del río a ser modelado, preferiblemente a cada 20 metros de distancia entre cada sección transversal.
- c) Importar los datos de las secciones transversales al programa HEC-RAS
- d) Obtener las distancias entre cada sección transversal e introducir los datos en el programa HEC-RAS.
- e) Introducir los coeficientes de Manning en el programa HEC-RAS
- f) Obtener la pendiente del río e introducir en el programa HEC-RAS.
- g) Proceder con la modelación en el programa HEC-RAS.

Los resultados del modelamiento se los pueden ver en la sección MODELAMIENTO MATEMÁTICO HEC-RAS

18. PROGRAMAS EN VISUAL BASIC.

Para este proyecto e desarrollado dos programas basados en el lenguaje de Visual Basic. Esto fue necesario ya que hay cálculos los cuales es conveniente modelarlos para obtener los resultados de una forma rápida. Visual Basic fue optado como programa fuente ya que tiene conexiones directas con Excel.

19. CÁLCULOS FINALES Y RESULTADOS

En la sección CALCULO DE TUBERÍA podemos apreciar los resultados que obtenemos en el proceso de cálculo de la tubería en el tramo obras de derivación-reservorio. Por lo que podemos ver en estos resultados tenemos una pérdida de altura de agua cernaza a los 30 m. En la sección de PRODUCCIÓN ENERGÉTICA podemos ver que es muy aceptable escoger un caudal de diseño de 7 m³/s, por lo que para un 50 % de probabilidad hay cuatro meses que el Río Cristal supera este caudal. La tubería en la parte de la conducción según los resultados va a tener 1.6 m de diámetro para que pase un caudal de 7 m³/s.

Cabe resaltar que estos valores son escogidos teniendo resultados, no cabe resaltar que si escojo un caudal de diseño de 4 m³/s este mal, más bien todo depende de la inversión que se tiene para el proyecto.

Para estar más seguros con los resultados de pérdidas, la tubería de conducción también fue calculada por medio del programa WATER CAD. En la sección CALCULO DE LA TUBERÍA POR MEDIO DEL PROGRAMA WATER CAD podemos apreciar los resultados del cálculo de la tubería. En este caso fue necesario introducir datos al programa del perfil del terreno y de la tubería. El programa WATER CAD nos entrega datos reales en cada tramo de la tubería que en este caso se la realizó a cada 50 m de longitud de la tubería y tenemos una pérdida total de cerca de 15 m de altura en pérdidas lineales. Estos datos concuerdan con los calculados paso a paso por la fórmula de Hazen-Williams, pero el único cambio es que en el proceso paso a paso escojo una velocidad no mayor a 4 m/s, que le da más vida útil a la tubería. El programa WATER CAD entrega datos exactos y una gráfica de lo que sucede en cada nudo que lo puede ver en la sección de PLANOS DE CALCULO DE TUBERÍA POR MEDIO DEL PROGRAMA WATER CAD.

Los resultados de la producción energética se puede decir que es la parte más importante del proyecto. Los resultados que se encuentran en la sección PRODUCCIÓN ENERGÉTICA tienen como resultados los siguientes datos:

Potencia media Mw = 12.12

Energía media Gwh = 106.18

Potencia instalada Mw = 26.91

El presupuesto general del Proyecto Río Cristal y los costos referenciales de construcción de obras son los siguientes:

	Total USD
Obras de derivación, bocatoma y cabecera	1'566.324
Obras de conducción	2'196.000
Reservorio de regulación horario	2'291.258
Obras complementarias en tubería de presión	561.889
Casa de maquinas y descarga final	518.724
Camino	40.272
Línea de transmisión	936.650
Obras electromecánicas	9'496.000
Imprevistos	2'640.000
Total	20'247.117
Diseño de ingeniería y seguimiento técnico de construcción	2'400.000
Seguimiento técnico y fiscalización de construcción	1'040.000
Gran total	23'687.117

Cabe resaltar que el presupuesto fue echo conjuntamente con datos referenciales obtenidos en la consultora I.C.P.

Actualmente hay un déficit en el país en lo que se refiere a la producción de energía eléctrica. Como podemos ver en la sección RESUMEN DE LA ESTADÍSTICA DEL SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO DURANTE EL PRIMER SEMESTRE DEL AÑO 2006, la producción de energía en el país es de aproximadamente 8.024 GWh. el cual 3.916 GWh es de generación hidráulica, 3.343 GWh es de generación térmica y 764 GWh es de importación de países vecinos.

El Proyecto Hidroeléctrico Río Cristal aportaría con 106.18 GWh. En el mismo informe del resumen eléctrico ecuatoriano en el punto A.3. Sección b, nos dice que las grandes consumidoras redondean la compra de energía a 5.01 USD centavos cada KWh. Esto quiere decir que la venta en su totalidad vendiendo a 5 centavos KWh del Proyecto Hidroeléctrico Río Cristal generaría ingresos de 5'300.000 USD. Haciendo un análisis inmediato de la venta de los bonos de carbón, esto implicaría un ingreso de cerca de 500.000 USD, por lo que los ingresos totales estarían rodeando los 5'800.000 USD.

A un costo total de proyecto de 23'687.117 USD con un ingreso anual de 5'800.000 USD tenemos una tasa de retorno que es la podemos ver en el cuadro en la sección ANALISIS FINANCIERO.

Para el Proyecto Hidroeléctrico Río Cristal se hizo dos análisis económicos. El primer análisis tiene como inversión inicial 23'687.117 dólares que es el costo del proyecto, con un interés del 8% anual y 3 años de gracia. El segundo análisis tiene como inversión inicial 29'373.300 dólares con un interés del 8%. En los dos casos la inversión del proyecto tiene que pagarse en 15 años plazo.

El Proyecto Hidroeléctrico Río Cristal tiene una tasa de retorno elevada que se debe a su venta de energía en relación costos de proyecto.

La tasa interna de retorno tiene el concepto de que cerca del 19% de la inversión inicial va a ser recuperada en el transcurso de un año en el caso donde la inversión inicial es de 23'687.117 dólares.

20. CONCLUSIONES

Durante el estudio de viabilidad del Proyecto Hidroeléctrico Río Cristal se han encontrado procesos que han sido mejorados para el análisis. Los programas elaborados tanto como para el estudio de compuertas como para la producción energética fueron desarrollados para implementarlos en otros proyectos hidroeléctricos. En el transcurso del estudio se encontraron soluciones que van hacia una optimización de la Central Hidroeléctrica Río Cristal.

En la actualidad en el país existe gran demanda en el sector eléctrico y no existe una capacidad total de abastecimiento por medio de centrales hidroeléctricas. Esto perjudica al país económicamente por lo que las centrales termoeléctricas que abarcan casi con el 50% de la producción de energía eléctrica en el país producen energía cara. En el RESUMEN DEL SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO se puede constatar que el costo de producción por kw por producción de centrales termoeléctricas superan los 10 centavos de dólar, en cambio el costo de producción eléctrica por medio de centrales hidroeléctricas son menores a 5 centavos de dólar.

El Proyecto Hidroeléctrico Río Cristal estaría aportando con cerca del 1.25% de la producción total del país.

Siendo esta la situación del país, y vendido la energía a 5 centavos de dólar por kw, el Proyecto Hidroeléctrico Río Cristal tiene viabilidad factible tanto económica como técnica, y cabe resaltar que tiene una tasa interna de retorno del 18%.

El estudio de viabilidad de este proyecto fue desarrollada en conjunto con la Consultora ICP, por lo que gran parte de los cálculos desarrollados fueron con la guía de un profesional.

Se demuestra la importancia de que dentro del sistema financiero se incluya un periodo de gracia de 3 años que cubre los tiempos de diseños y construcción. Tomando en cuenta lo anterior y un interés del 8% anual, incluyendo el periodo de gracia la tasa interna de retorno es del 18% y sin el periodo de gracia la tasa interna de retorno es del 14%.

Tomando en cuenta la diferencia de costos entre la producción hidroeléctrica y la producción termoeléctrica, de casi 10.5 centavos el kilovatio hora, el ahorro para el país es de sería de 11'148.900 de dólares anualmente.

El proyecto generara trabajo para la mano de obra existente en la zona de incidencia solucionando de esta manera uno de los problemas mas graves que tiene el país en la actualidad.

Mundialmente se esta concientizando por los daños causados con el calentamiento global en el desarrollo natural y humano. Con el inicio de La Revolución Industrial, la concentración de los gases de efecto invernadero de la atmósfera mostró incrementos. Los científicos consideran que estas adiciones son resultado de la quema de los combustibles fósiles.

Las emisiones de CO₂ que se producen por las centrales termoeléctricas van de 880 a 1.040 gramos por GWH en una central de carbón, 802 gramos en una central de fuel/diesel y 365 gramos por GWH en una central de ciclo combinado de gas natural.

Tomando en cuenta lo anterior la central hidroeléctrica Río Cristal con una producción anual de 106.18 GWH, reduciría las emisiones de carbono en 103.525 toneladas

Ese CO₂ equivale al que podría fijar un bosque de entre 60.000 y 70.000 hectáreas. También se evitará la emisión a la atmósfera de 4930 toneladas de dióxido de azufre y de 334 toneladas de óxidos de nitrógeno.

21. BIBLIOGRAFÍA

Villacís O., “HIDROLOGÍA Y SEDIMENTO PROYECTO HIDROELÉCTRICO RÍO CRISTAL”, 2005

E.S. Yarshney S.C. Gupta, R.L. Gupta, “Theoy & Desing of Irrigation Structures”, ROORKEE, THIRD EDITION, 1977