



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – OBRAS HIDRÁULICAS

ESTUDIO ESTRATÉGICO DEL RÍO SANTIAGO EN EL TRAMO  
COMPRENDIDO ENTRE LA C.H. SANTA ROSA Y EL EMBALSE DE LA  
YESCA

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
FERNANDO HERNÁNDEZ SÁNCHEZ

TUTOR PRINCIPAL  
CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL

MÉXICO, D. F. ABRIL 2013

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M. I. López Rincón Germán  
Secretario: Dra. Reyes Chávez Lilia  
Vocal: Dr. Escalante Sandoval Carlos A.  
1 er. Suplente: M. I. Vázquez González Alba Beatriz  
2 do. Suplente: M. I. Mendoza Rosas Marco Tulio

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Guadalajara, Jalisco

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Escalante Sandoval Carlos A.

-----  
**FIRMA**

*A mi madre, por nunca perder la fe en mí y el apoyo que siempre me brindo.*

*A todos aquellos que se tomen el tiempo de leer este trabajo.*

*A mis maestros, por sus enseñanzas y guía para la realización de este trabajo.*

*A la Comisión Federal de Electricidad, por el apoyo brindado para la elaboración de esta tesis.*

*Al Dr. Humberto Marengo Mogollón y al Ing. Martín López Hernández, por el impulso y apoyo brindado sin el cual no estaría presentado este trabajo.*

*A mis compañeros de trabajo del Centro de Anteproyectos del Pacífico Norte, en especial a los Ingenieros Edgar Valencia y Nohemí Monroy.*

*A todos mis amigos y familiares, por los buenos deseos y apoyo mostrado durante el tiempo que me tomó terminar esta maestría.*



## Contenido

1.	Aspectos generales y antecedentes.....	11
1.1	Generalidades del proyecto .....	11
1.2	Localización y acceso.....	11
1.3	Descripción de la C. H. Manuel M. Diéguez .....	13
1.4	Situación actual .....	13
1.5	Estudios Básicos .....	17
1.5.1	Topografía y Batimetría disponible .....	17
1.5.2	Hidrología .....	20
1.5.3	Información Hidrométrica.....	21
1.5.4	Escurrimiento disponible.....	24
1.5.5	Determinación de las avenidas de diseño.....	27
1.5.6	Análisis de los gastos máximos afectados.....	27
2.	Estudio hidroenergético .....	30
2.1	Estudio hidroenergético Santa Rosa .....	30
2.1.1	Curvas Elevaciones – Áreas - Capacidades.....	30
2.1.2	Evaporación neta.....	32
2.1.3	Nivel de Aguas Mínimo de Operación (NAMINO).....	33
2.1.4	Simulación del funcionamiento de vaso .....	34
2.1.5	Tránsito de avenidas .....	39
2.2	Amuchiltite .....	40
2.2.1	Antecedentes .....	40
2.2.2	Informe Hidroenergético.....	41
2.2.3	Curva elevaciones-áreas-capacidades del vaso .....	41
2.2.4	Nivel de Aguas Mínimo de Operación (NAMINO).....	41
2.2.5	Evaporación neta.....	44
2.2.6	Simulación del funcionamiento de vaso .....	45
2.2.7	Tránsito de avenidas .....	49
3.	Información recopilada y estudios realizados.....	50
3.1	Método “Área – Reducción.....	51
3.2	Batimetría 2011.....	53
3.3	Caracterización de los azolves del embalse de la presa Santa Rosa .....	54
3.3.1	Resultados del laboratorio de mecánica de suelos.....	54

4.	Selección y optimización del esquema general de obras.....	58
4.1	Revisión, optimización y adecuación de los esquemas existentes para el P.H. Amuchiltite y la ampliación de la C.H. Santa Rosa .....	58
4.2	Túnel de carga .....	58
4.3	Propuesta de un nuevo aprovechamiento P. H. Amuchiltite.....	63
4.3.1	Obra de desvío .....	63
4.3.2	Gasto sobre el cauce del río Santiago susceptible a ser desviado en el sitio del proyecto Amuchiltite.....	64
4.3.3	Análisis de la obra de desvío .....	65
4.3.4	Análisis hidráulico.....	66
4.3.5	Obra de excedencias .....	68
4.3.6	Estructura de control.....	68
4.3.7	Obra de generación.....	74
4.3.8	Obra de contención.....	76
4.4	Sobreelevación la cortina actual de la C.H. Santa Rosa con casa de máquinas a pie de cortina 79	
4.4.1	Obra de Desvío .....	80
4.4.2	Obra de excedencias .....	83
4.4.3	Obra de generación.....	85
4.5	Sobreelevación de la cortina actual de la C.H. Santa Rosa y conducción hasta el NAMO del P.H. la Yesca.....	85
4.6	Propuesta para desazolve de la C.H. Santa Rosa .....	86
5.	Discusión de resultados.....	88
5.1	Hidrología .....	88
5.2	Opciones estudiadas .....	91
5.3	Evaluación económica del desazolve de la presa Santa Rosa .....	92
5.3.1	Túnel por margen derecha para desazolve.....	92
5.3.2	Remoción de sedimentos mediante maquinaria .....	93
5.3.3	5.3.3 Remoción de azolves en la zona de la obra de toma. ....	94
5.4	Evaluación de las alternativas. ....	95
5.4.1	Santa Rosa Evaluación Económica .....	95
5.4.2	Amuchiltite Evaluación Económica .....	97
6.	Conclusiones.....	99

## Índice de Tablas

Tabla 1-1 Estaciones hidrométricas ubicadas en la zona de estudio .....	22
Tabla 1-2 Esguerrimiento disponible a la central hidroeléctrica Santa Rosa II hm <sup>3</sup> .....	25
Tabla 1-3 Gasto máximo de las avenidas transitadas .....	28
Tabla 1-4 Hidrograma de las avenidas de diseño para los sitios del proyecto .....	29
Tabla 2-1 Curva Elevaciones-Áreas-Capacidades.....	32
Tabla 2-2 Evaporaciones en mm para el sito de la cortina de Santa Rosa.....	33
Tabla 2-3 Resultados del programa FUNVASO para la cortina con elevación 790 sobreelevada. .....	34
Tabla 2-4 Características generales de las opciones estudiadas.....	35
Tabla 2-5 Curva E-A-C para el sitio del P.H. Amuchiltite .....	43
Tabla 2-6 Esguerrimiento disponible al sitio Amuchiltite (hm <sup>3</sup> ).....	44
Tabla 2-7 Evaporación neta media mensual del sitio Amuchiltite.....	45
Tabla 2-8 Resultados de los funcionamientos de vaso .....	48
Tabla 3-1 Batimetría de 2006 complementada siguiendo la tendencia de la batimetría realizada en 1991.....	50
Tabla 3-2 Batimetría estimada .....	52
Tabla 4-1 Gastos de Diseño para el P. H. Amuchiltite en m <sup>3</sup> /s .....	65
Tabla 4-2 Resultados del análisis hidráulico de la alcantarilla del proyecto hidroeléctrico Amuchiltite .....	67
Tabla 4-3 Coeficiente de descarga por cargas diferentes a la de proyecto. Criterio USBR .....	70
Tabla 4-4 Resultados del análisis hidráulico del canal de descarga .....	72
Tabla 4-5 Volúmenes de excavación para la cortina.....	81
Tabla 4-6 Valores de las características del vertedor propuesto .....	83
Tabla 5-1 Errores mínimos estándar de la distribución de probabilidad .....	88
Tabla 5-2 Periodos de Retorno para Amuchiltite.....	89
Tabla 5-3 Resultados de la evaluación económica de las alternativas estudiadas para el sitio de Santa rosa.....	96
Tabla 5-4 Resultados de la evaluación económica.....	97

## Índice de Figuras

Figura 1-1 Ubicación del proyecto .....	12
Figura 1-2 Acceso a la zona del proyecto .....	12
Figura 1-3 Perfil del río Santiago .....	14
Figura 1-4 Vista panorámica de la Presa Santa Rosa, Jal. ....	15
Figura 1-5 Vertedor de Santa Rosa .....	16
Figura 1-6 Vista aguas arriba del vertedor .....	16
Figura 1-7 Trabajos realizados en el embalse .....	16
Figura 1-8 Cortina de La Presa Santa Rosa .....	17
Figura 1-9 Curvas de nivel del embalse de la presa Sta. Rosa en 2006.....	18
Figura 1-10 Vista de aguas abajo de la cortina .....	18
Figura 1-11 Batimetría de la zona cercana a la cortina de la C.H. Sta. Rosa .....	19
Figura 1-12 Registro de gastos máximos antes y después de cerrar el Lago de Chapala .....	27
Figura 2-1 Batimetría del año 2011.....	31
Figura 2-2 Generaciones para la opción sobreelevada, generando al pie de la cortina .....	36
Figura 2-3 Generaciones para la opción sobreelevada, con túnel de baja presión .....	37
Figura 2-4 Generaciones para la cortina actual, con túnel de baja presión.....	38
Figura 2-5 Potencias y generaciones para la opción sobreelevada generando al pie de la cortina .....	39
Figura 2-6 Hidrograma de diseño para Santa Rosa.....	40
Figura 2-7 Generaciones para el P.H. Amuchiltite .....	47
Figura 2-8 Generaciones para el P.H. Amuchiltite .....	48
Figura 2-9 Avenidas de diseño de las obras de desvío y de excedencias Amuchiltite .....	49
Figura 3-1 Curvas Elevaciones- capacidades con la batimetría realizada en 2006 .....	51
Figura 3-2 Representación de la sedimentación en un embalse .....	52
Figura 3-3 Predicción de sedimentos con base a la batimetría realizada en 2006.....	53
Figura 3-4 Vista en Google de la zona de estudio de la presa Sta. Rosa.....	54
Figura 3-5 Resultados de los estudios realizados por el laboratorio de mecánica de suelos. ....	55
Figura 3-6 Resultados de los análisis CRETIB.....	56
Figura 4-1 Vista de la conducción propuesta para reutilizar el vaso de la presa .....	59
Figura 4-2 Perfil de la conducción .....	59
Figura 4-3 Obra de toma para la conducción propuesta .....	60
Figura 4-4 Batimetría y ubicación de la obra de toma .....	60
Figura 4-5 planta de la obra de toma propuesta .....	61
Figura 4-6 Ubicación del desfogue y casa de maquinas.....	61
Figura 4-7 Sitio propuesto para la ubicación del pozo de oscilación .....	62
Figura 4-8 Perfil de la obra de generación y pozo de oscilación.....	62
Figura 4-9 Avenida máxima de estiaje con $Tr = 100$ años del P.H. Amuchiltite.....	66
Figura 4-10 Coeficiente de descarga $C_o$ , según el criterio del USBR .....	69
Figura 4-11 Coeficiente de descarga por cargas diferentes a la de proyecto. Criterio USBR .....	69
Figura 4-12 Constantes para determinar la forma de los cimacios USBR, CFE, 1970 .....	71
Figura 4-13 Sección de la cortina y casa de máquinas .....	77
Figura 4-14 Vista en planta del arreglo de las obras para la alternativa 1.....	77
Figura 4-15 Vista en planta del arreglo de las obras para el desvío.....	78

Figura 4-16 Vista en planta de la cortina .....	78
Figura 4-17 Planta del vertedor actual propuesto como obra de desvío. ....	80
Figura 4-18 Arreglo del Vertedor de Santa Rosa.....	81
Figura 4-19 Planta de la cortina de CCR propuesta para sobreelevar Santa Rosa.....	82
Figura 4-20 Perfil de la cortina de CCR propuesta para sobreelevar Santa Rosa. ....	82
Figura 4-21 Geometría de un cimacio con velocidad de llegada despreciable y talud vertical ..	84
Figura 4-22 Ecuación del cuadrante aguas arriba, para el sistema coordinado mostrado.....	84
Figura 4-23 Arreglo de la obra de generación actual.....	85
Figura 4-24 Patrón típico de sedimentación en presas.....	87
Figura 5-1 Resultados para la Obra de Excedencias de Santa Rosa .....	90
Figura 5-2 Perfil del túnel propuesto por margen derecha .....	92
Figura 5-3 Ubicación propuesta del túnel para azolves.....	93
Figura 5-4 MDE para la comparación de las batimetrías 2006 y 2011.....	94
Figura 5-5 Volumen a retirar para llegar a la toma del desagüe de fondo .....	95
Figura 5-6 Costo con relación a la potencia instalada del proyecto .....	97

## **Objetivo.**

Aprovechar el tramo del río Santiago comprendido entre el embalse formado por la central hidroeléctrica Manuel M. Diéguez (Santa Rosa) y el embalse del proyecto hidroeléctrico La Yesca y las poblaciones próximas a las márgenes del cauce del río Santiago localizadas aguas arriba de este embalse. Considerando un posible desazolve de la central hidroeléctrica Santa Rosa y se proponga una conducción o en su defecto optimizar el proyecto hidroeléctrico Amuchiltite. La finalidad del proyecto es generar energía eléctrica para el Sistema Interconectado Nacional

## Introducción

Con el objetivo de aprovechar el tramo del cauce del río Santiago ubicado entre la cola del embalse formado por el almacenamiento del Proyecto Hidroeléctrico (P.H.) La Yesca y el desfogue de la Central Hidroeléctrica (C.H.) Santa Rosa, este estudio pretende obtener el proyecto idóneo para optimizar los recursos económicos en función del soporte técnico que lo avale.

Los análisis de aprovechamiento hidroeléctrico se enfocarán en las siguientes dos alternativas:

- 1) Estudiar, predimensionar obras y evaluar técnica y económicamente el desazolve de la C.H. Santa Rosa y el incremento de la carga aprovechable por medio de una conducción con descarga en la cola del embalse al Nivel de Aguas Máximas de Operación (NAMO) que se generará con la construcción del P.H. La Yesca.
- 2) Optimizar y evaluar técnica y económicamente el P. H. Amuchiltite con generación a pie de presa y NAMO a nivel del desfogue de la C.H. Santa Rosa.

El análisis de las alternativas planteadas aportará las bases técnicas para definir el aprovechamiento hidroeléctrico adecuado del tramo del río Santiago en estudio.

Para determinar la cantidad y calidad de la energía generada por las alternativas que forman el “Estudio estratégico del tramo del río Santiago comprendido entre el NAMO del P.H. La Yesca y la C.H. Santa Rosa, Jal.”, fue necesario realizar, la simulación de funcionamiento del vaso; esto atendiendo a una demanda mensual constante y a una política deficitaria de energía durante el periodo analizado (promedio anual del 5%)

De acuerdo al estudio realizado para la optimización de niveles de operación en el vaso y a sus correcciones por haberse actualizado los escurrimientos conforme a la curva elevaciones-áreas-capacidades utilizados, se determino el Nivel de Aguas Mínimo de Operación (NAMINO) óptimo así como el NAMO propuesto para las opciones estudiadas (sobrelevando la cortina con y sin conducción, y la cortina con su altura actual, con conducción), se estudió la elevación para el NAMO a la cota 793 msnm, este último para no afectar al poblado de San Cristóbal de la Barranca con la opción de sobrelevar la cortina actual de Santa Rosa. El P.H. Amuchiltite cuenta con un estudio realizado en 2007 para el cual se actualizaron los datos de los escurrimientos en el periodo 1960-2011.

## **1. ASPECTOS GENERALES Y ANTECEDENTES**

### **1.1 Generalidades del proyecto**

La central inició su operación en 1964, diseñada para producir 324 GWh de energía media anual, con potencia total instalada de 64 MW y Factor de Planta (F.P.) medio de 0,43; generó eficientemente los primeros 15 años y después operó con valores menores al 80% de los valores de diseño, obteniendo generación media anual hasta 1993 de 260 GWh.

El sitio del proyecto recibe las aguas del cauce del río Santiago, que a su vez, aguas arriba y antes de la central hidroeléctrica Santa Rosa, capta las aportaciones del río Verde, afluente más importante en este tramo de cauce. Históricamente y de una forma más acentuada en la actualidad, las principales aportaciones provienen del río Verde.

El régimen del escurrimiento con origen en estas cuencas ha tenido importantes variaciones a través del tiempo. Además del incremento de la demanda por el creciente número de usuarios: domésticos, industriales y de uso pecuario, se tiene como repercusión la política de conservación del lago de Chapala, donde a partir de 1980 se contienen las descargas de este lago hacia el río Santiago. Por lo tanto, únicamente se cuenta con los escurrimientos originados por cuenca propia. Además de esta situación con respecto a los caudales disponibles, existe un decreto de reserva de los volúmenes en este tramo del río Santiago, para ser dispuestos en usos no consuntivos aguas abajo del proyecto de Arcediano.

### **1.2 Localización y acceso**

Se localiza en el poblado Santa Rosa, aproximadamente a 18 km del municipio de Amatitán, Jalisco y a 90 Km. de la ciudad de Guadalajara, Jalisco donde se encuentra la sede de la Gerencia Regional de Producción Occidente a la que pertenece la central. Figura 1-1.

El acceso principal a los sitios se realiza, por la carretera libre o por la Maxipista Guadalajara – Tepic. Después de cruzar la ciudad de Tequila, Jalisco sobre la carretera libre está la desviación hacia el balneario La Toma e inmediatamente hay otra desviación sin nombre que lleva a los poblados El Reparó y El Limón. Este camino es de terracería, para llegar al sitio se recorre una distancia de 8 kilómetros. Figura 1-2.



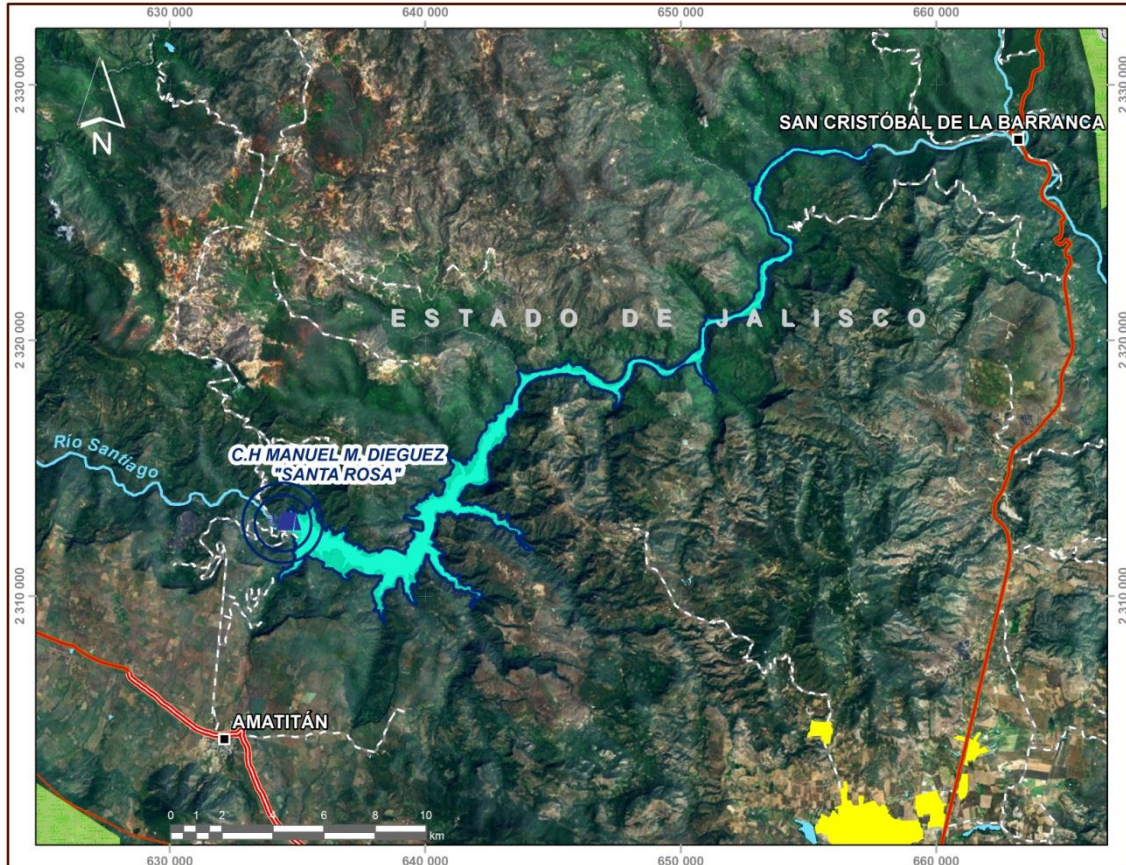


Figura 1-1 Ubicación del proyecto

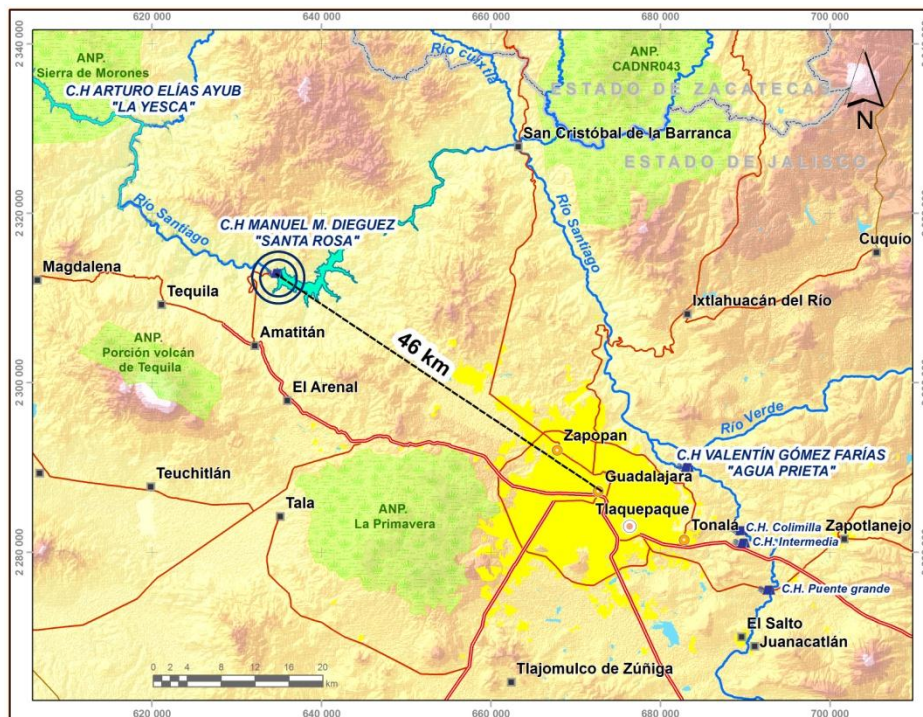


Figura 1-2 Acceso a la zona del proyecto

### 1.3 Descripción de la C. H. Manuel M. Diéguez

La casa de máquinas es del tipo subterránea y se encuentra a pie de la cortina en las coordenadas 20° 55' latitud norte y 103° 42' longitud Oeste, con un ancho de 16.00 m; largo de 42.00 m y altura de 15.00 m.

El área hidrológica de la cuenca propia es de 34,966 km<sup>2</sup>, con un escurrimiento medio anual de 2,557.85 Mm<sup>3</sup>, el gasto medio anual es de 81.10 m<sup>3</sup>/s. El vaso de almacenamiento es alimentado principalmente por el río Santiago. La avenida máxima registrada en Agosto de 1973 es de 6,900 m<sup>3</sup>/s.

La cortina es del tipo Arco-cúpula de concreto armado con una altura de 114.00 m desde el desplante, una corona de 150.00 m de longitud y 4.30 m de ancho, la elevación de la corona a 747.00 msnm y con elevación del parapeto a 748.50 msnm.

Originalmente el Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME) es de 748.00 msnm, el NAMO es de 746.46 msnm en estiaje y 744.00 msnm en época de lluvias y el nivel mínimo de operación (NAMINO) de 710.00 msnm pero en la actualidad es de 718.00 msnm por efectos del azolve.

En cuanto al área vertedora cuenta con un canal a cielo abierto con cresta controlada, tiene 4 compuertas radiales con una capacidad de descarga de 7,300 m<sup>3</sup>/s al NAME, la elevación de la cresta vertedora es de 731.50 msnm.

La central generadora inicia operaciones el día 4 de agosto de 1964, actualmente cuenta con 2 unidades y una capacidad total instalada de 61.20 MW.

### 1.4 Situación actual

La situación para las Centrales hidroeléctricas en México se espera complicada, por una parte las problemáticas sociales y ambientales que enfrentan los proyectos sean cuales sean sus dimensiones y la inminente llegada al término de su vida de diseño de varios proyectos, provoca que se deba tener en cuenta alguna estrategia para la rehabilitación o restitución del funcionamiento planeado de dichas presas. De lo anterior nace la necesidad de evaluar las posibles opciones para la C.H. Santa Rosa, ya sea su desazolve, la construcción de una conducción para aprovechar la carga generada por la presa y el embalse generado por el P.H. La Yesca, o con la implementación de un nuevo proyecto en un sitio intermedio como se puede observar en el perfil del río Santiago que se muestra en la Figura 1-3.

Las figuras 1-4, 1-5, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran la situación actual de la presa Santa Rosa.

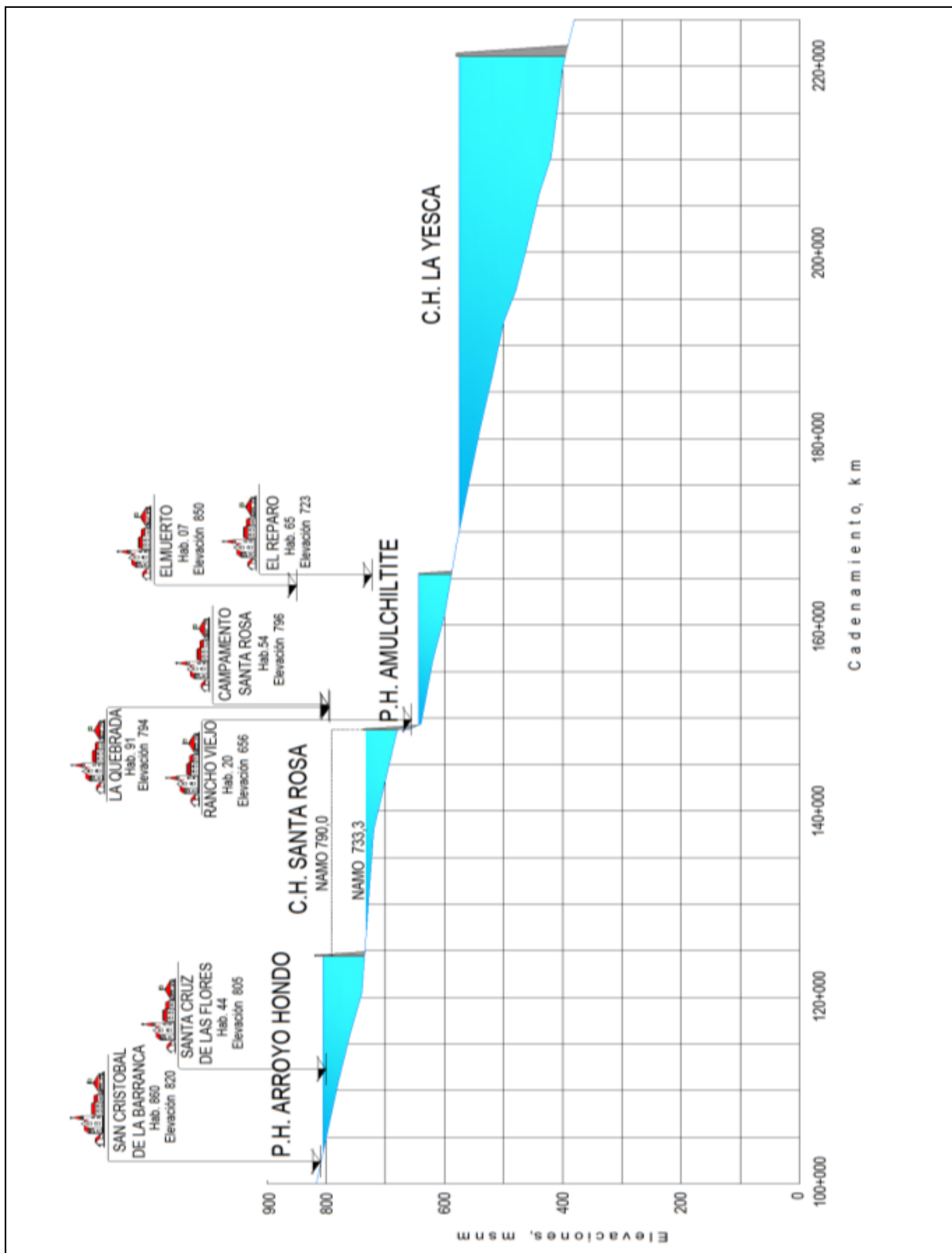


Figura 1-3 Perfil del río Santiago



Una vez desarrolladas en lo posible y analizadas estas alternativas se debe definir cuál es más adecuada para aprovechar este tramo del río Santiago, para lo cual se llevarán a cabo diversos estudios y actividades.

Los sitios alternativos del proyecto reciben las aguas del cauce del río Santiago, que a su vez, aguas arriba y antes de la central hidroeléctrica Santa Rosa, capta las aportaciones del río Verde, afluente más importante en este tramo de cauce. Históricamente y de una forma más acentuada en la actualidad, las principales aportaciones provienen del río Verde.

Se observa que actualmente el azolve sobrepasa en 8 m el nivel del piso de la obra de toma el cual se encuentra a los 697.00 msnm

Para mejorar el funcionamiento de la obra se recomienda desazolvar un área de 3720 m<sup>2</sup> aprox. con un volumen de 29, 760 m<sup>3</sup> para llegar a nivel del piso de la obra de toma.



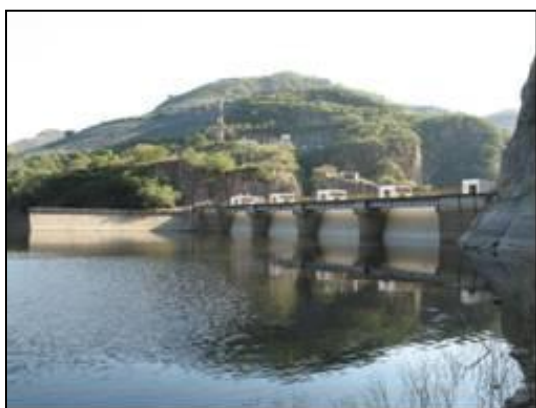
**Figura 1-4 Vista panorámica de la Presa Santa Rosa, Jal.**

**Tiene una capacidad total al NAME de 258.475 Mm<sup>3</sup>, el área del embalse es de 10.869 km<sup>2</sup>. El gasto medio anual es de 81.10 m<sup>3</sup>/s.**



**Figura 1-5 Vertedor de Santa Rosa**

El vertedor de excedencias es del tipo de canal abierto con cresta controladora, está constituido por 4 compuertas radiales de 14.00 m de ancho y 15.00 m. de alto, con una longitud de cresta vertedora de 56.00 m. La capacidad máxima de descarga es de 7300 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 1-6 Vista aguas arriba del vertedor**

Vertedores compuestos con compuertas radiales de 14.00 m de ancho y con una elevación de cresta 731.50 msnm.



**Figura 1-7 Trabajos realizados en el embalse**

Levantamiento batimétrico de la zona de Obra de toma de la presa Santa Rosa, Jal.



**Figura 1-8 Cortina de La Presa Santa Rosa**

**Presas Santa Rosa, Jal., está constituida por una cortina del tipo Arco-cúpula de concreto armado con una altura de 114.00 m y una longitud de corona de 150 m.**

**Las elevaciones de la corona es de 747.00 msnm y de parapeto de la cortina de 748.50 msnm.**

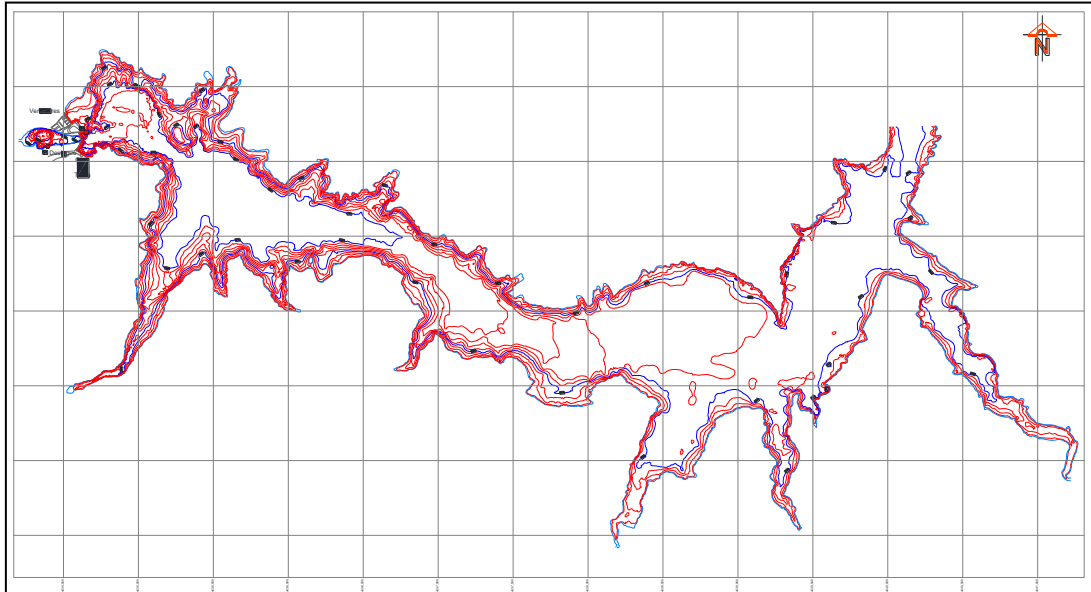
## **1.5 Estudios Básicos**

### **1.5.1 Topografía y Batimetría disponible**

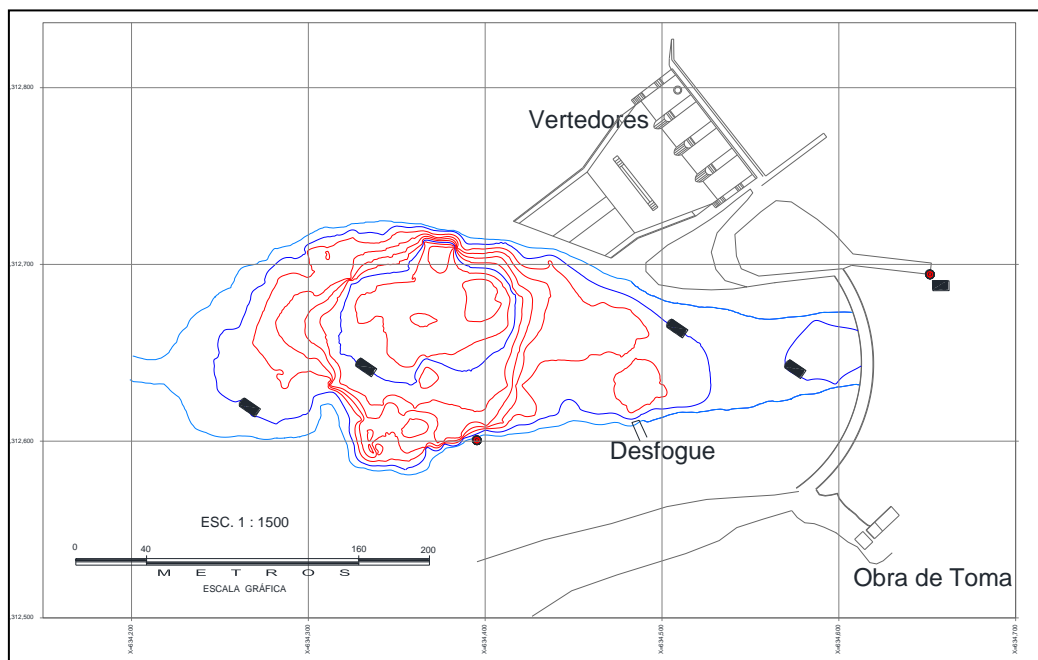
Actualmente se cuenta con la información de batimetrías realizadas en los años 2006 y 2011 (Figura 1-9, Figura 1-10 y Figura 1-11), así como con topografía de INEGI.

Cartas INEGI:

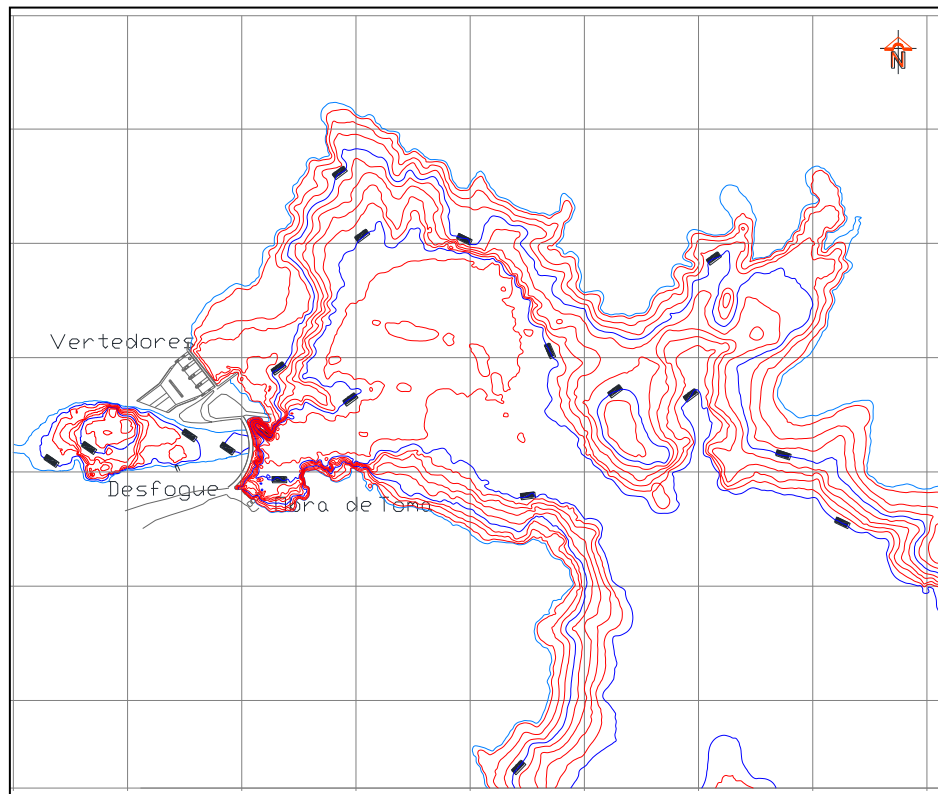
Hojas escala 1: 50 000; Trinidad García de la Cadena (F13D45), El Salvador (FD13D44), Tesistán (F13D55) y Tequila (F13D54)



**Figura 1-9** Curvas de nivel del embalse de la presa Sta. Rosa en 2006



**Figura 1-10** Vista de aguas abajo de la cortina



**Figura 1-11 Batimetría de la zona cercana a la cortina de la C.H. Sta. Rosa**

La batimetría de la presa y zona de desfogue de la C.H. Santa Rosa se realizó para recabar la información necesaria para su estudio y análisis, y con las características siguientes:

- El levantamiento se realizó del 14 al 18 de Noviembre de 2006, teniendo una lectura de escala promedio de 741.42 msnm en la presa y 654.40 msnm en el canal de desfogue.
- El sistema de elevaciones está referido al utilizado en la central.
- La equidistancia entre curvas es de 5 m.
- Distancias y profundidades dadas en metros.
- Levantamiento realizado mediante el sistema DGPS (sistema de posicionamiento global diferencial) y ecosonda digital de registro continuo.
- El sistema de coordenadas está referido a la proyección UTM.
- El trazo de las estructuras es esquemático.
- Generar la configuración del fondo de la presa.
- Levantamiento del espejo de agua para referir la delimitación de la batimetría.



- Secciones a cada 1 km. iniciando en la lámina de agua y terminando fuera del NAME, para la comparación con la fotogrametría de GYMSA de 1982 y determinar si es viable utilizarla o no.

### 1.5.2 Hidrología

El escurrimiento en los sitios en estudio será una función directa de la competencia por las aguas superficiales originada aguas arriba de éstos, para su uso para el suministro de agua para el consumo humano y usos pecuarios en los estados de Jalisco y Guanajuato.

Dada la situación de la disponibilidad de agua en las cuencas del río Verde y de la parte alta de la cuenca del río Santiago, es necesario hacer un balance de los volúmenes disponibles en ambas cuencas.

En general, la metodología utilizada consiste en la aplicación de la ecuación de continuidad, mediante la identificación y la relación adecuada de las variables hidrológicas que intervienen en el proceso del balance. Algunos aspectos relevantes considerados en el estudio mencionado fueron los siguientes:

- El río Santiago nace en el lago de Chapala, históricamente las salidas de este lago hacía el río Santiago son bastante significativas, sin embargo a partir del año 1980, con la finalidad de preservar el lago de Chapala, se determinó suspender las salidas del lago hacia este río.

Es decir, el escurrimiento disponible en el sitio del proyecto de la presa Arcediano en lo concerniente al río Santiago, es igual al escurrimiento presentado en este sitio menos los escurrimientos aportados por el Lago de Chapala al río Santiago, menos usos consuntivos, evaporaciones, exportaciones y variaciones en los embalses.

- Con los escurrimientos disponibles en el río Santiago al sitio del proyecto Arcediano, es necesario estimar la modificación del escurrimiento disponible por la aportación del río Verde hasta este sitio (3,8 m<sup>3</sup>/s), dada la operación del proyecto El Zapotillo.
- Se manejan otros dos volúmenes de reserva en el estado de Jalisco: 1,4 m<sup>3</sup>/s para las poblaciones de Tepatitlán y Valle de Guadalupe, abastecidas por la presa El Salto, y 0,4 m<sup>3</sup>/s para usos pecuarios, también en el estado de Jalisco, mediante la construcción de bordos.

Los sitios considerados reciben los escurrimientos, principalmente, de los ríos Verde y Santiago, por consiguiente la formación de sus avenidas corresponde a los eventos extraordinarios suscitados en las cuencas de ambos ríos.

Por otro lado, se tiene infraestructura hidráulica, que modifica y modificará el régimen de escurrimiento hasta el sitio; la existente se refiere a la central hidroeléctrica Santa Rosa y los proyectos son: la Presa Arcediano sobre el río Santiago, y El Zapotillo sobre el río Verde. Las obras en proyecto serán construidas en el corto plazo, por lo tanto se considera la influencia de esta infraestructura en la determinación de la avenida de diseño de la obras de excedencias.

Por lo tanto, el comportamiento del río Santiago antes de 1980 es sustancialmente diferente al régimen de escurrimiento presentado actualmente. Y después de iniciadas las obras de los proyectos también habrá un cambio significativo en su régimen. En consecuencia, es importante considerar estos aspectos dentro del análisis para la determinación de las avenidas de diseño.

Se tiene información de gastos máximos instantáneos en las estaciones hidrométricas Santa Rosa y Santa Rosa II, ubicadas, la primera en donde ahora está localizada actualmente la presa hidroeléctrica y la otra se reubicó aguas abajo y cercana a la central hidroeléctrica, por lo tanto los escurrimientos de ésta última están regulados por la presa de la central mencionada.

El período registrado entre ambas estaciones es de 1951 a 1994, sin información completa en el año 1966.

También, se tiene el registro de la estación hidrométrica La Yesca, ubicada aguas abajo de la anterior, casi en la confluencia con el río Bolaños. El período registrado por la estación es del año 1948 a 1999. La mayoría de los eventos donde se presenta el gasto máximo son coincidentes con los ocurridos en la estación Santa Rosa II.

En algunos casos no se tiene el día cuando ocurrió el evento en la estación La Yesca, pero el mes si se tiene, cuando este es coincidente, se presupone que la avenida corresponde al mismo evento, los valores en la mayoría de estos casos son proporcionales a los observados cuando se tiene la información completa de las fechas. Con ésta información se tendrá la posibilidad de generar las avenidas para los sitios propuestos y localizados entre las estaciones Santa Rosa y La Yesca.

En general, en este tipo de obras se asigna un Tr de 10 a 25 años. Sin embargo, según la normatividad de la Comisión Nacional del Agua (CNA) el Tr debe estar entre 50 y 100 años para grandes presas, categoría correspondiente al proyecto en estudio.

En cuanto al período de retorno de la obra de excedencias se consideran 10 000 años, por ser una obra con período prolongado de funcionamiento (50 años de vida útil).

### 1.5.3 Información Hidrométrica

Para la determinación del escurrimiento disponible al sitio del proyecto, se analizó la información disponible y en caso conveniente se adecuó y complementó. La información hidrométrica relevante para los sitios en estudio son los registros históricos de escurrimientos medios mensuales en las estaciones hidrométricas de La Boquilla,

San Cristobal II, Cuixtla, Cuixtla Canal Margen Derecha, Cuixtla Canal Margen Izquierda, Santa Rosa, Santa Rosa II y La Yesca, cuyos periodos de operación y registros se observan en la Tabla 1-1

**Tabla 1-1 Estaciones hidrométricas ubicadas en la zona de estudio**

Nombre de estación	Corriente	Localización No. de carta	Período registrado	Área drenada (km <sup>2</sup> )	Volumen escurrido medio anual (hm <sup>3</sup> )	Gasto medio anual (m <sup>3</sup> /s)	Avenida máxima
							Q m <sup>3</sup> /s
CUIXTLA	CUIXTLA	F13D45	1951 - 2006	854	129,27	4,14	1 000
CUIXTLA CANAL M D		F13D45	1986 - 1992	---	0,39	0,01	---
CUIXTLA CANAL M I		F13D45	1964-1971, 1986-1998	---	21,46	0,68	---
LA BOQUILLA	JUCHIPILA	F13D45	1948-1982, 1986-2006	8 534	300,16	9,92	1 295
SAN CRISTOBAL	SANTIAGO	F13D45	1951-1959, 1995-1999	33 220	1700,23	53,64	
SAN CRISTOBAL II	SANTIAGO	F13D45	1960-1997,2000-2006,2010-2011	24 667	1944,86	62,03	5 859
SANTA ROSA	SANTIAGO	F13D54	1951-1958,1972-1979,1995-1997	35 236	2708,59	85,39	
SANTA ROSA II	SANTIAGO	F13D54	1958-1994,1998-2006	35 243	2791,97	89,43	5 992
LA YESCA	SANTIAGO	F13D43	1948-1979,1981-1982,1984-2006	37 443	2865,84	95,23	6 223

La información fue obtenida del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas) editada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) hasta el año del 2006. La información del año 2007 en adelante, fue proporcionada por la CONAGUA y por la división hidrométrica de la CFE.

Ya con las matrices de escurrimiento histórico y los periodos de registro de cada una de las estaciones, se tomo la decisión de complementar los registros faltantes, principalmente de las estaciones de mayor interés, como lo son La Boquilla, San Cristóbal II, Cuixtla, Santa Rosa II y La Yesca, así como el definir el período de análisis. De tal manera que se decidió dividir el área de estudio en dos:

1. Los escurrimientos acontecidos aguas arriba de la C.H. Santa Rosa, los cuales involucran las estaciones de La Boquilla, Cuixtla y San Cristóbal II con un periodo de análisis de 1960-2007, omitiéndose las estaciones ubicadas en los canales de margen derecha e izquierda de Cuixtla, debido a los pocos registros y gastos pequeños.
2. Los escurrimientos aguas abajo de la C.H. Santa Rosa, involucrando las estaciones de Santa Rosa II y La Yesca con periodo de análisis de 1964-2006, la razón de iniciar el análisis en 1964, es que a partir de este año la C.H. Santa Rosa entró en operación

Se tienen registros de la estación hidrométrica Santa Rosa II ubicada aguas abajo de la C.H. Santa Rosa, la cual mide las extracciones y derrames, en donde dichos registros le hacen falta días de registros, la complementación de los datos se realizó a nivel diario, tomándose como el valor medio del día correspondiente y tomando un periodo de

Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

registro de 1964-2006. En la Tabla 1-2 se presentan los escurrimientos disponibles en el sitio de la E.H. Santa Rosa a nivel mensual.

**Tabla 1-2 Escurrimiento mensual en la estación hidrométrica Santa Rosa hm<sup>3</sup>**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1 964	162,03	53,96	0,10	0,09	75,03	123,95	192,82	270,46	466,39	243,97	86,68	92,04	1767,52
1 965	77,77	64,08	115,75	107,49	109,13	163,14	119,50	1503,74	958,67	1165,29	264,58	115,20	4764,33
1 966	83,03	97,95	94,59	92,54	192,73	454,35	493,30	782,66	843,43	200,36	102,60	97,82	3535,36
1 967	103,20	99,30	117,18	156,73	149,90	163,83	771,54	1155,38	2955,91	1480,24	1072,43	733,80	8959,45
1 968	319,72	230,08	415,46	317,30	318,01	236,22	913,56	1021,94	769,96	155,30	106,45	132,50	4936,49
1 969	143,53	152,34	163,51	133,60	117,03	136,42	209,84	131,60	115,82	141,73	92,13	83,66	1621,22
1 970	77,25	64,72	102,12	138,16	133,14	150,79	533,71	500,09	682,22	381,48	104,35	95,91	2963,93
1 971	91,73	76,57	104,73	103,76	150,42	197,73	429,29	1410,26	1467,52	1402,46	564,30	161,22	6160,00
1 972	130,98	164,14	182,47	165,95	170,20	240,34	263,84	282,33	240,66	99,21	84,35	144,82	2169,29
1 973	137,46	67,59	75,03	128,80	139,04	139,54	960,88	2547,46	1508,57	724,53	232,07	150,15	6811,12
1 974	144,73	138,00	172,56	127,97	178,54	218,48	441,88	487,50	257,14	132,88	84,71	95,69	2480,08
1 975	102,07	92,73	125,73	136,18	162,58	167,22	723,24	1180,24	570,73	132,05	89,65	93,42	3575,84
1 976	117,00	129,59	142,96	135,26	142,56	130,10	1559,41	1296,44	717,72	807,58	518,09	307,56	6004,29
1 977	124,33	113,69	192,43	188,44	223,09	328,50	791,35	252,23	1015,73	123,58	92,74	133,19	3579,31
1 978	123,73	116,21	156,49	140,76	141,56	199,58	244,48	254,18	368,09	770,57	115,75	112,80	2744,20
1 979	103,43	92,11	139,18	126,71	136,47	131,61	162,79	310,21	207,90	81,53	78,46	83,81	1654,21
1 980	86,61	77,59	82,60	74,42	104,48	138,24	235,05	245,23	201,19	122,94	66,76	47,60	1482,72
1 981	42,67	44,77	49,00	53,49	74,18	154,84	571,91	290,60	264,15	80,39	73,94	112,69	1812,63
1 982	48,07	40,55	42,20	44,76	52,38	57,56	231,73	224,86	83,40	35,61	34,20	31,61	926,93
1 983	35,20	28,99	64,87	34,27	62,43	91,34	583,40	737,67	473,66	95,87	73,61	69,88	2351,19
1 984	44,06	29,16	34,59	37,64	24,99	166,83	678,57	616,44	395,90	81,20	42,75	43,89	2196,02
1 985	48,09	43,71	75,90	65,71	51,05	133,27	387,75	537,24	187,70	97,97	58,45	50,14	1736,97
1 986	47,29	41,49	43,31	68,39	88,03	150,85	751,94	260,61	385,19	245,04	47,30	41,34	2170,78
1 987	64,55	75,30	102,33	88,32	60,96	51,06	250,83	303,42	274,33	170,71	47,18	53,68	1542,67
1 988	44,88	51,04	109,22	90,82	93,84	82,56	508,80	1140,43	408,72	88,10	49,52	73,28	2741,20
1 989	9,30	97,97	111,31	77,00	55,42	46,81	123,05	163,15	301,50	81,52	49,04	48,90	1164,97
1 990	40,52	48,48	56,57	56,78	79,87	86,81	138,34	1291,54	644,09	260,97	142,96	48,11	2895,04
1 991	53,58	46,27	75,00	71,65	65,51	64,49	2768,62	587,42	474,66	157,57	48,36	39,14	4452,27
1 992	841,01	295,13	83,13	99,09	89,05	71,62	166,94	347,41	259,77	450,49	104,01	71,36	2879,01
1 993	64,61	50,28	62,30	57,95	78,05	85,39	403,79	235,77	292,93	70,11	52,10	28,57	1481,83
1 994	30,76	32,01	48,82	97,15	87,74	171,02	123,90	68,06	334,56	98,49	38,49	42,50	1173,50
1 995	12,46	16,61	58,80	65,22	38,84	145,38	293,49	567,26	475,94	131,92	79,89	27,40	1913,21
1 996	25,36	21,57	23,59	15,05	86,40	107,15	152,26	119,62	269,64	197,95	111,75	47,68	1178,03
1 997	21,89	21,56	53,55	75,40	59,61	138,14	278,93	93,03	32,43	7,65	34,25	27,93	844,36
1 998	22,04	14,89	26,79	99,55	46,76	54,39	147,14	334,58	506,82	374,38	53,57	0,00	1680,91
1 999	57,11	47,04	54,65	0,00	0,00	0,00	268,40	274,37	354,86	39,85	4,39	0,07	1100,74
2 000	55,26	9,05	42,23	73,70	9,81	159,94	170,84	84,27	11,61	19,68	8,00	70,68	715,08
2 001	127,58	130,48	99,54	95,65	82,37	55,58	190,55	271,72	254,25	40,26	40,44	49,44	1437,86
2 002	72,48	75,69	83,95	87,69	83,82	81,60	178,75	533,03	417,65	162,68	76,94	53,61	1907,89
2 003	64,76	32,76	63,80	77,42	78,29	87,01	379,02	723,57	1262,17	294,44	111,30	71,51	3246,06
2 004	45,32	23,55	72,56	40,51	0,00	251,86	268,80	352,75	1413,62	513,72	78,43	45,91	3107,04
2 005	40,23	54,14	76,90	73,61	75,75	51,17	160,20	253,54	282,11	293,93	128,60	92,17	1582,33
2 006	1,98	40,93	71,30	59,95	58,01	81,70	123,23	360,14	294,71	379,45	170,37	37,58	1679,36
<b>Media</b>	<b>95,11</b>	<b>75,44</b>	<b>94,63</b>	<b>92,58</b>	<b>98,31</b>	<b>138,33</b>	<b>449,95</b>	<b>567,55</b>	<b>551,26</b>	<b>293,85</b>	<b>128,28</b>	<b>92,10</b>	<b>2677,38</b>
<b>Mediana</b>	<b>64,61</b>	<b>54,14</b>	<b>76,90</b>	<b>87,69</b>	<b>83,82</b>	<b>136,42</b>	<b>268,80</b>	<b>347,41</b>	<b>385,19</b>	<b>155,30</b>	<b>79,89</b>	<b>70,68</b>	<b>85,75</b>
<b>Mínimo</b>	<b>1,98</b>	<b>9,05</b>	<b>0,10</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>119,50</b>	<b>68,06</b>	<b>11,61</b>	<b>7,65</b>	<b>4,39</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
<b>Máximo</b>	<b>841,01</b>	<b>295,13</b>	<b>415,46</b>	<b>317,30</b>	<b>318,01</b>	<b>454,35</b>	<b>2768,62</b>	<b>2547,46</b>	<b>2955,91</b>	<b>1480,24</b>	<b>1072,43</b>	<b>733,80</b>	<b>2955,91</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>129,16</b>	<b>57,63</b>	<b>66,92</b>	<b>55,03</b>	<b>61,34</b>	<b>81,93</b>	<b>468,11</b>	<b>503,91</b>	<b>529,95</b>	<b>351,87</b>	<b>183,62</b>	<b>113,25</b>	<b>190,15</b>
<b>Coef. de asimetría</b>	<b>1,36</b>	<b>0,76</b>	<b>0,71</b>	<b>0,59</b>	<b>0,62</b>	<b>0,59</b>	<b>1,04</b>	<b>0,89</b>	<b>0,96</b>	<b>1,20</b>	<b>1,43</b>	<b>1,23</b>	<b>0,07</b>

#### 1.5.4 Esgurrimiento disponible

En lo sucesivo se hablará del balance hidráulico, determinación del volumen disponible, del tramo comprendido entre la C. H. Santa Rosa y la estación hidrométrica La Yesca. Para obtener los esgurrimientos disponibles la C. H. Santa Rosa y al P.H. Amuchiltite, se toma como base el volumen medio anual disponible hasta la “Presca Santa Rosa” publicado en el Diario Oficial de la Federación en el año 2010, de tal forma que para hacer su distribución mensual, se realizó la suma de los esgurrimientos registrados en las estaciones de Cuixtla, La Boquilla y San Cristobal II tomando el periodo de 1960-2007, con el fin de determinar los factores de distribución anual y mensual, y a su vez obtener los esgurrimientos disponibles en el sitio de la cortina de la C.H. Santa Rosa y el P.H. Amuchiltite, que se muestran en la tabla 1-2 y 1-3

El resultado del balance hidráulico hasta el sitio de la C.H. Santa Rosa, es de un volumen medio anual de 1 922,32 hm<sup>3</sup>, es decir, un gasto medio de 60,91 m<sup>3</sup>/s y para el sitio del P.H. Amuchiltite, es de un volumen medio anual de 1 943,38 hm<sup>3</sup>, es decir, un gasto medio de 61,58 m<sup>3</sup>/s.

En lo que se refiere a los esgurrimientos en los sitios dentro de este proyecto. Para obtener estos esgurrimientos éstos mediante un factor de proporcionalidad, determinado este de acuerdo al incremento de área de captación a cada sitio, partiendo de la central hidroeléctrica Santa Rosa y hasta la estación hidrométrica La Yesca. Es posible realizar este proceso, dado que no existen afluentes importantes que confluyan con la corriente principal del río Santiago. Los factores de proporcionalidad para los sitios estudiados son: 1,034 para Santa Rosa y 1.0586 para Amuchiltite.

Con estos factores y las matrices de esgurrimientos disponibles en las estaciones hidrométricas se obtienen los esgurrimientos.

**Tabla 1-2 Esgurrimiento disponible a la central hidroeléctrica Santa Rosa II hm<sup>3</sup>**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1 964	116,33	38,74	0,07	0,07	53,87	88,99	138,44	194,19	334,86	175,17	62,24	66,09	1269,05
1 965	55,84	46,01	83,10	77,17	78,36	117,13	85,80	1079,66	688,32	836,66	189,96	82,71	3420,72
1 966	59,61	70,32	67,91	66,44	138,38	326,22	354,18	561,94	605,57	143,86	73,67	70,23	2538,34
1 967	74,10	71,30	84,14	112,53	107,63	117,63	553,95	829,55	2122,30	1062,79	769,99	526,86	6432,76
1 968	229,55	165,19	298,29	227,82	228,32	169,60	655,92	733,74	552,82	111,50	76,43	95,13	3544,33
1 969	103,05	109,38	117,40	95,92	84,02	97,95	150,66	94,49	83,16	101,76	66,15	60,07	1164,01
1 970	55,46	46,47	73,32	99,20	95,60	108,26	383,20	359,06	489,82	273,90	74,92	68,86	2128,06
1 971	65,86	54,98	75,19	74,50	108,00	141,97	308,22	1012,54	1053,66	1006,95	405,16	115,75	4422,80
1 972	94,04	117,85	131,01	119,15	122,20	172,56	189,43	202,71	172,79	71,23	60,56	103,98	1557,52
1 973	98,69	48,53	53,87	92,48	99,83	100,19	689,90	1829,04	1083,13	520,20	166,62	107,81	4890,29
1 974	103,91	99,08	123,89	91,88	128,19	156,87	317,26	350,02	184,62	95,41	60,82	68,70	1780,66
1 975	73,29	66,58	90,27	97,78	116,73	120,06	519,28	847,39	409,78	94,81	64,37	67,07	2567,41
1 976	84,00	93,05	102,65	97,12	102,36	93,41	1119,63	930,83	515,32	579,83	371,98	220,82	4310,99
1 977	89,27	81,63	138,16	135,30	160,17	235,86	568,18	181,10	729,28	88,73	66,58	95,63	2569,90
1 978	88,84	83,44	112,36	101,06	101,64	143,29	175,53	182,50	264,28	553,26	83,11	80,99	1970,30
1 979	74,26	66,14	99,93	90,97	97,99	94,50	116,88	222,73	149,27	58,53	56,33	60,18	1187,70
1 980	62,18	55,71	59,31	53,43	75,02	99,26	168,77	176,07	144,45	88,27	47,93	34,17	1064,57
1 981	30,64	32,14	35,18	38,41	53,26	111,17	410,62	208,65	189,66	57,72	53,09	80,91	1301,44
1 982	34,51	29,11	30,30	32,14	37,61	41,33	166,38	161,45	59,88	25,57	24,55	22,70	665,52
1 983	25,27	20,81	46,57	24,61	44,82	65,58	418,88	529,63	340,08	68,83	52,85	50,17	1688,12
1 984	31,63	20,93	24,83	27,02	17,94	119,78	487,21	442,59	284,25	58,30	30,69	31,51	1576,71
1 985	34,52	31,38	54,50	47,18	36,66	95,68	278,40	385,73	134,77	70,34	41,97	36,00	1247,12
1 986	33,96	29,79	31,10	49,10	63,21	108,31	539,88	187,11	276,56	175,93	33,96	29,68	1558,59
1 987	46,35	54,07	73,47	63,41	43,77	36,66	180,09	217,85	196,96	122,57	33,87	38,54	1107,62
1 988	32,22	36,64	78,42	65,21	67,37	59,28	365,31	818,81	293,46	63,25	35,55	52,61	1968,14
1 989	6,68	70,34	79,92	55,29	39,79	33,61	88,35	117,14	216,47	58,53	35,21	35,11	836,43
1 990	29,09	34,81	40,62	40,77	57,35	62,33	99,33	927,31	462,45	187,37	102,64	34,54	2078,60
1 991	38,47	33,22	53,85	51,44	47,04	46,30	1987,83	421,76	340,80	113,14	34,72	28,10	3196,67
1 992	603,83	211,90	59,69	71,15	63,93	51,42	119,86	249,44	186,51	323,45	74,68	51,24	2067,09
1 993	46,39	36,10	44,73	41,61	56,04	61,31	289,91	169,28	210,32	50,34	37,41	20,51	1063,93
1 994	22,09	22,98	35,05	69,75	63,00	122,79	88,96	48,87	240,21	70,71	27,63	30,51	842,55
1 995	8,95	11,93	42,22	46,83	27,89	104,38	210,72	407,28	341,72	94,72	57,36	19,67	1373,66
1 996	18,21	15,49	16,93	10,80	62,04	76,93	109,32	85,89	193,60	142,13	80,24	34,23	845,81
1 997	15,72	15,48	38,45	54,13	42,80	99,18	200,27	66,79	23,28	5,50	24,59	20,06	606,24
1 998	15,82	10,69	19,24	71,47	33,57	39,05	105,64	240,22	363,89	268,80	38,47	0,00	1206,87
1 999	41,01	33,77	39,24	0,00	0,00	0,00	192,71	196,99	254,79	28,61	3,15	0,05	790,31
2 000	39,68	6,50	30,32	52,92	7,04	114,83	122,66	60,51	8,33	14,13	5,75	50,75	513,42
2 001	91,60	93,68	71,47	68,67	59,14	39,90	136,81	195,09	182,55	28,91	29,03	35,50	1032,37
2 002	52,04	54,35	60,27	62,96	60,18	58,59	128,34	382,71	299,87	116,80	55,24	38,49	1369,84
2 003	46,50	23,52	45,81	55,59	56,21	62,47	272,13	519,51	906,22	211,40	79,91	51,35	2330,63
2 004	32,54	16,91	52,10	29,09	0,00	180,84	193,00	253,27	1014,96	368,84	56,31	32,96	2230,81
2 005	28,88	38,87	55,21	52,85	54,38	36,74	115,02	182,04	202,55	211,04	92,33	66,17	1136,09
2 006	1,42	29,39	51,19	43,05	41,65	58,66	88,48	258,57	211,60	272,44	122,32	26,98	1205,76
<b>Media</b>	<b>68,29</b>	<b>54,17</b>	<b>67,94</b>	<b>66,47</b>	<b>70,58</b>	<b>99,32</b>	<b>323,05</b>	<b>407,49</b>	<b>395,80</b>	<b>210,98</b>	<b>92,10</b>	<b>66,13</b>	<b>1922,32</b>
<b>Mediana</b>	<b>46,39</b>	<b>38,87</b>	<b>55,21</b>	<b>62,96</b>	<b>60,18</b>	<b>97,95</b>	<b>193,00</b>	<b>249,44</b>	<b>276,56</b>	<b>111,50</b>	<b>57,36</b>	<b>50,75</b>	<b>61,57</b>
<b>Mínimo</b>	<b>1,42</b>	<b>6,50</b>	<b>0,07</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>85,80</b>	<b>48,87</b>	<b>8,33</b>	<b>5,50</b>	<b>3,15</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
<b>Máximo</b>	<b>603,83</b>	<b>211,90</b>	<b>298,29</b>	<b>227,82</b>	<b>228,32</b>	<b>326,22</b>	<b>1987,83</b>	<b>1829,04</b>	<b>2122,30</b>	<b>1062,79</b>	<b>769,99</b>	<b>526,86</b>	<b>2122,30</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>92,74</b>	<b>41,38</b>	<b>48,05</b>	<b>39,51</b>	<b>44,04</b>	<b>58,82</b>	<b>336,09</b>	<b>361,80</b>	<b>380,49</b>	<b>252,64</b>	<b>131,83</b>	<b>81,31</b>	<b>136,52</b>
<b>Coef. de asimetría</b>	<b>1,36</b>	<b>0,76</b>	<b>0,71</b>	<b>0,59</b>	<b>0,62</b>	<b>0,59</b>	<b>1,04</b>	<b>0,89</b>	<b>0,96</b>	<b>1,20</b>	<b>1,43</b>	<b>1,23</b>	<b>0,07</b>
<b>%</b>	<b>3,55</b>	<b>2,82</b>	<b>3,53</b>	<b>3,46</b>	<b>3,67</b>	<b>5,17</b>	<b>16,81</b>	<b>21,20</b>	<b>20,59</b>	<b>10,98</b>	<b>4,79</b>	<b>3,44</b>	<b>100,00</b>



**Tabla 1-4 Esgurrimiento disponible al sitio del P.H. Amuchiltite hm<sup>3</sup>**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1 964	115,41	38,43	0,07	0,07	53,44	88,28	137,34	192,64	332,20	173,77	61,74	65,56	1258,95
1 965	55,40	45,64	82,44	76,56	77,73	116,20	85,11	1071,07	682,83	830,00	188,45	82,05	3393,49
1 966	59,14	69,76	67,37	65,91	137,27	323,62	351,36	557,47	600,75	142,71	73,08	69,67	2518,13
1 967	73,51	70,73	83,47	111,63	106,77	116,69	549,54	822,94	2105,41	1054,33	763,86	522,66	6381,54
1 968	227,73	163,88	295,92	226,00	226,51	168,25	650,70	727,89	548,42	110,62	75,82	94,37	3516,11
1 969	102,23	108,51	116,46	95,16	83,36	97,17	149,46	93,74	82,49	100,95	65,62	59,59	1154,74
1 970	55,02	46,10	72,73	98,41	94,83	107,40	380,15	356,20	485,92	271,72	74,32	68,31	2111,12
1 971	65,34	54,54	74,59	73,91	107,14	140,84	305,77	1004,48	1045,27	998,93	401,94	114,83	4387,58
1 972	93,29	116,91	129,97	118,20	121,23	171,18	187,93	201,10	171,41	70,67	60,08	103,15	1545,12
1 973	97,91	48,14	53,44	91,74	99,04	99,39	684,40	1814,48	1074,51	516,06	165,30	106,95	4851,35
1 974	103,09	98,29	122,91	91,15	127,17	155,62	314,74	347,23	183,15	94,65	60,33	68,16	1766,49
1 975	72,70	66,05	89,56	97,00	115,80	119,10	515,14	840,65	406,51	94,06	63,86	66,54	2546,96
1 976	83,33	92,31	101,83	96,34	101,54	92,67	1110,72	923,42	511,21	575,21	369,02	219,06	4276,67
1 977	88,56	80,98	137,06	134,22	158,90	233,98	563,66	179,66	723,48	88,02	66,05	94,87	2549,44
1 978	88,13	82,78	111,47	100,26	100,83	142,15	174,13	181,04	262,18	548,85	82,44	80,34	1954,61
1 979	73,67	65,61	99,14	90,25	97,21	93,74	115,95	220,95	148,08	58,07	55,88	59,70	1178,24
1 981	61,69	55,27	58,84	53,01	74,42	98,47	167,42	174,67	143,30	87,57	47,55	33,90	1056,10
1 983	30,39	31,89	34,90	38,10	52,84	110,28	407,35	206,99	188,15	57,26	52,66	80,26	1291,08
1 984	34,24	28,88	30,06	31,88	37,31	41,00	165,06	160,16	59,40	25,36	24,36	22,52	660,23
1 985	25,07	20,65	46,20	24,41	44,47	65,06	415,54	525,42	337,37	68,29	52,43	49,77	1674,68
1 986	31,38	20,77	24,64	26,81	17,80	118,83	483,33	439,07	281,99	57,84	30,45	31,26	1564,16
1 987	34,25	31,13	54,06	46,80	36,36	94,92	276,19	382,66	133,69	69,78	41,63	35,71	1237,19
1 988	33,68	29,55	30,85	48,71	62,70	107,45	535,58	185,62	274,36	174,53	33,69	29,44	1546,18
1 989	45,98	53,64	72,89	62,91	43,42	36,37	178,66	216,12	195,39	121,59	33,60	38,24	1098,80
1 990	31,97	36,35	77,80	64,69	66,84	58,81	362,40	812,29	291,12	62,75	35,27	52,20	1952,47
1 991	6,63	69,78	79,28	54,85	39,48	33,34	87,64	116,21	214,75	58,06	34,93	34,83	829,77
1 992	28,86	34,53	40,29	40,44	56,89	61,83	98,54	919,93	458,76	185,88	101,82	34,27	2062,05
1 993	38,16	32,96	53,42	51,03	46,66	45,93	1972,00	418,40	338,09	112,23	34,45	27,88	3171,21
1 994	599,02	210,21	59,21	70,58	63,42	51,01	118,90	247,45	185,03	320,87	74,09	50,83	2050,63
1 995	46,02	35,81	44,37	41,28	55,59	60,82	287,61	167,93	208,64	49,94	37,11	20,35	1055,46
1 996	21,91	22,80	34,78	69,20	62,50	121,81	88,25	48,48	238,30	70,15	27,41	30,27	835,85
1 997	8,87	11,83	41,88	46,46	27,67	103,55	209,04	404,04	339,00	93,96	56,90	19,52	1362,72
1 998	18,07	15,36	16,80	10,72	61,54	76,32	108,45	85,20	192,05	140,99	79,60	33,96	839,07
1 999	15,59	15,35	38,14	53,70	42,46	98,39	198,68	66,26	23,10	5,45	24,39	19,90	601,41
2 000	15,70	10,61	19,08	70,90	33,30	38,74	104,80	238,31	361,00	266,66	38,16	0,00	1197,26
2 001	40,68	33,50	38,92	0,00	0,00	0,00	191,17	195,42	252,76	28,38	3,13	0,05	784,02
2 002	39,36	6,45	30,08	52,49	6,99	113,92	121,68	60,03	8,27	14,02	5,70	50,35	509,33
2 003	90,87	92,94	70,90	68,13	58,67	39,59	135,72	193,54	181,10	28,68	28,80	35,22	1024,15
2 004	51,62	53,91	59,79	62,46	59,70	58,12	127,32	379,66	297,48	115,87	54,80	38,19	1358,93
2 005	46,13	23,33	45,44	55,15	55,76	61,98	269,96	515,38	899,01	209,72	79,28	50,94	2312,07
2 006	32,28	16,78	51,68	28,86	0,00	179,40	191,46	251,25	1006,88	365,91	55,87	32,70	2213,05
<b>Media</b>	<b>70,31</b>	<b>54,71</b>	<b>68,12</b>	<b>66,84</b>	<b>71,11</b>	<b>101,03</b>	<b>331,19</b>	<b>413,30</b>	<b>401,78</b>	<b>207,81</b>	<b>90,63</b>	<b>66,55</b>	<b>1943,38</b>
<b>Mediana</b>	<b>46,13</b>	<b>45,64</b>	<b>58,84</b>	<b>62,91</b>	<b>61,54</b>	<b>98,39</b>	<b>198,68</b>	<b>247,45</b>	<b>281,99</b>	<b>100,95</b>	<b>55,88</b>	<b>50,35</b>	<b>62,22</b>
<b>Mínimo</b>	<b>6,63</b>	<b>6,45</b>	<b>0,07</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>85,11</b>	<b>48,48</b>	<b>8,27</b>	<b>5,45</b>	<b>3,13</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
<b>Máximo</b>	<b>599,02</b>	<b>210,21</b>	<b>295,92</b>	<b>226,00</b>	<b>226,51</b>	<b>323,62</b>	<b>1972,00</b>	<b>1814,48</b>	<b>2105,41</b>	<b>1054,33</b>	<b>763,86</b>	<b>522,66</b>	<b>2105,41</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>93,45</b>	<b>41,80</b>	<b>48,72</b>	<b>39,92</b>	<b>44,45</b>	<b>58,58</b>	<b>337,92</b>	<b>365,22</b>	<b>384,40</b>	<b>256,63</b>	<b>133,93</b>	<b>82,43</b>	<b>137,81</b>
<b>Coef. de asimetría</b>	<b>1,33</b>	<b>0,76</b>	<b>0,72</b>	<b>0,60</b>	<b>0,63</b>	<b>0,58</b>	<b>1,02</b>	<b>0,88</b>	<b>0,96</b>	<b>1,23</b>	<b>1,48</b>	<b>1,24</b>	<b>0,07</b>
<b>%</b>	<b>3,62</b>	<b>2,81</b>	<b>3,51</b>	<b>3,44</b>	<b>3,66</b>	<b>5,20</b>	<b>17,04</b>	<b>21,27</b>	<b>20,67</b>	<b>10,69</b>	<b>4,66</b>	<b>3,42</b>	<b>100,00</b>

### 1.5.5 Determinación de las avenidas de diseño

Para el dimensionamiento de las obras de desvío y de excedencias es necesario determinar el gasto máximo y la forma de la avenida. En el caso de la Estación Hidrométrica de Santa Rosa y La Yesca habrá de considerarse el impacto generado tanto por la veda de aportación del lago de Chapala hacia el cauce del río Santiago, como por la regulación ocurrida en la central de Santa Rosa y la obtenida por los proyectos localizados aguas arriba.

### 1.5.6 Análisis de los gastos máximos afectados

Los gastos máximos en los sitios de los proyectos localizados sobre el río Santiago aguas abajo de su confluencia con el río Verde, a partir de 1980, han perdido la contribución correspondiente al Lago de Chapala. Por lo tanto, es necesario considerar las condiciones actuales del río Santiago y en consecuencia la disminución del gasto pico de las avenidas presentadas.

En la Figura 1-12 se muestra graficado el registro de gastos máximos anuales, en los que se observa la variación sensible en el régimen del escurrimiento del río Santiago, a partir de la aplicación de políticas para la preservación del Lago de Chapala en el año de 1980.

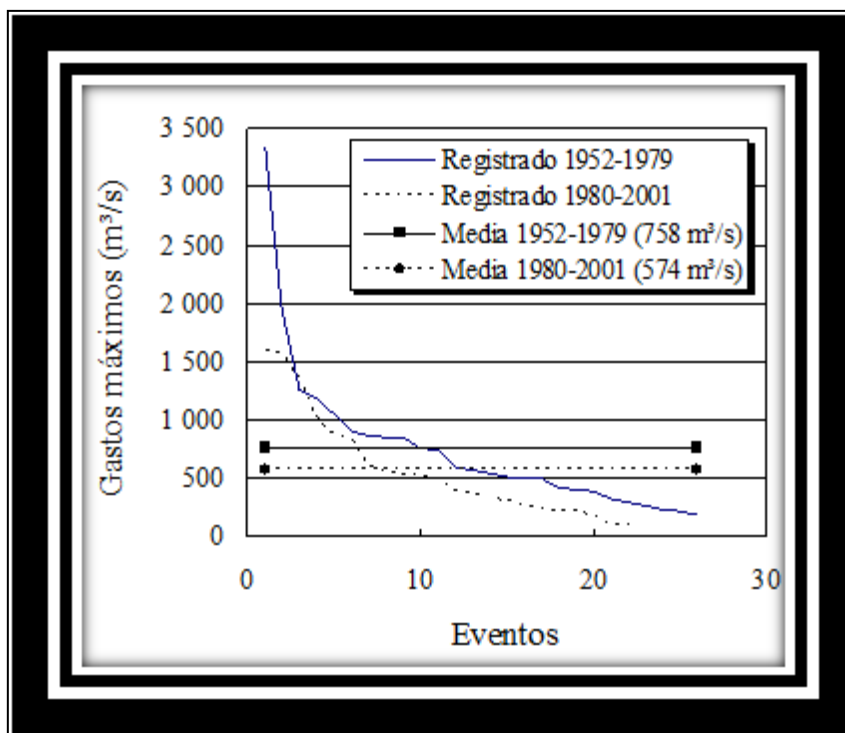


Figura 1-12 Registro de gastos máximos antes y después de cerrar el Lago de Chapala

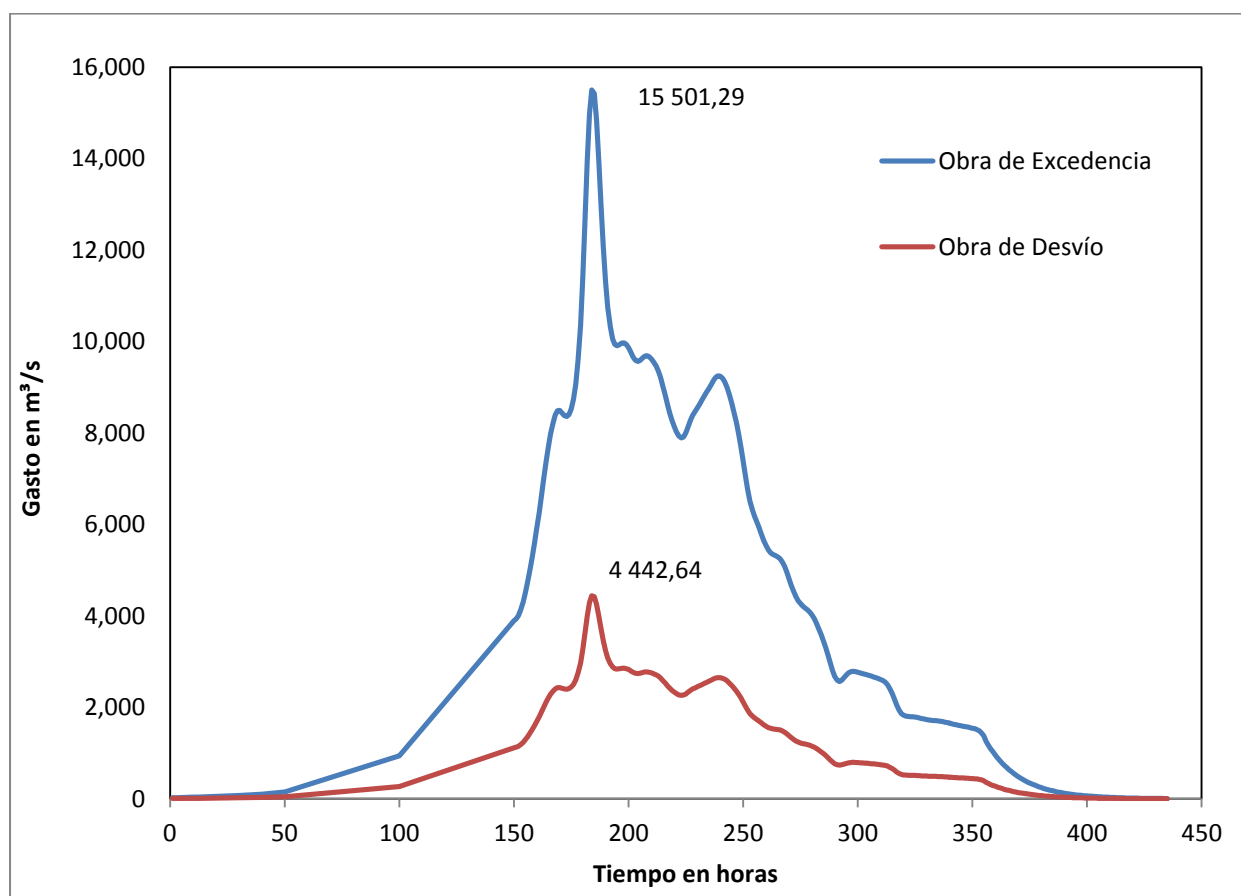


En la Tabla 1-3 se pueden ver los gastos máximos usados, considerando las avenidas determinadas para los sitios, en los sitios de proyectos y con los períodos de retorno de 100 y 10 000 años. En las tablas 1-5 y 1--6 se presenta el hidrógrama de las avenidas encontradas para estos dos sitios y los cuatros, asociadas a 100 y 10 000 años, respectivamente.

**Tabla 1-3 Gasto máximo de las avenidas transitadas**

	Tr (años)	Q de Entrada m <sup>3</sup> /s
<b>C.H. Santa Rosa</b>	100	7 197,23
	1000	15 377,87
<b>P.H. Amuchiltite</b>	100	7 254,99
	1000	15 501,29

Una vez transitadas las avenidas, se determina el gasto correspondiente a cada uno de los sitios involucrados en este análisis. La determinación de este gasto se hace en relación directa del área de la cuenca que corresponde a cada sitio. En la Tabla 1-4 y Figura 1-13 se muestran las avenidas de los sitios alternativos en el proyecto Santa Rosa para los períodos de retorno de 100 y 10 000 años, respectivamente.



**Figura 1-13 Hidrógrama para el sitio del P.H. Amuchiltite**

**Tabla 1-4 Hidrógrama de las avenidas de diseño para los sitios del proyecto**

Hidrograma Unitario		Santa Rosa II	Amuchiltite	Santa Rosa II	Amuchiltite	Santa Rosa II	Amuchiltite	Santa Rosa II	Amuchiltite	Santa Rosa II	Amuchiltite
		Tr 10 000 años		Tr 1 000 años		Tr 100 años		Tr 25 años		Tr 10 años	
n	Q	Q en m <sup>3</sup> /s									
1	0,00	24,81	25,01	18,32	18,46	11,61	11,70	7,11	7,17	4,12	4,15
10	0,00	34,49	34,77	25,47	25,67	16,14	16,27	9,88	9,96	5,73	5,77
20	0,00	49,74	50,14	36,73	37,02	23,28	23,47	14,26	14,37	8,26	8,33
30	0,00	71,74	72,31	52,97	53,40	33,58	33,84	20,56	20,73	11,91	12,01
40	0,01	103,46	104,29	76,40	77,01	48,42	48,81	29,65	29,89	17,18	17,32
50	0,01	149,21	150,41	110,18	111,06	69,83	70,39	42,76	43,11	24,78	24,97
60	0,01	215,19	216,92	158,90	160,17	100,71	101,52	61,67	62,17	35,73	36,02
70	0,02	310,35	312,84	229,16	231,00	145,25	146,42	88,94	89,66	51,53	51,94
80	0,03	447,58	451,17	330,50	333,15	209,48	211,16	128,28	129,31	74,32	74,91
90	0,04	645,50	650,68	476,64	480,47	302,11	304,54	185,00	186,48	107,18	108,04
100	0,06	930,94	938,41	687,41	692,93	435,70	439,20	266,81	268,95	154,58	155,82
110	0,09	1 342,60	1 353,37	991,38	999,34	628,37	633,41	384,79	387,87	222,93	224,72
120	0,13	1 936,29	1 951,83	1 429,77	1 441,24	906,23	913,50	554,94	559,39	321,51	324,09
130	0,18	2 792,51	2 814,92	2 062,01	2 078,56	1 306,96	1 317,45	800,33	806,75	463,68	467,40
140	0,26	4 027,35	4 059,67	2 973,82	2 997,69	1 884,90	1 900,03	1 154,23	1 163,49	668,71	674,08
150	0,25	3 864,09	3 895,11	2 853,27	2 876,17	1 808,49	1 823,01	1 107,44	1 116,33	641,60	646,75
160	0,38	5 860,14	5 907,18	4 327,17	4 361,90	2 742,69	2 764,71	1 679,51	1 692,99	973,03	980,84
170	0,55	8 426,32	8 493,95	6 222,05	6 271,99	3 943,73	3 975,38	2 414,97	2 434,35	1 399,13	1 410,36
180	0,73	11 301,88	11 392,59	8 345,39	8 412,37	5 289,56	5 332,02	3 239,10	3 265,10	1 876,59	1 891,65
190	0,73	11 233,70	11 323,86	8 295,05	8 361,62	5 257,66	5 299,85	3 219,56	3 245,40	1 865,27	1 880,24
200	0,64	9 786,96	9 865,51	7 226,76	7 284,77	4 580,55	4 617,31	2 804,93	2 827,44	1 625,05	1 638,09
230	0,55	8 478,63	8 546,68	6 260,68	6 310,93	3 968,21	4 000,06	2 429,96	2 449,46	1 407,81	1 419,11
240	0,60	9 172,15	9 245,77	6 772,78	6 827,14	4 292,80	4 327,25	2 628,72	2 649,82	1 522,97	1 535,19
250	0,48	7 326,07	7 384,87	5 409,63	5 453,04	3 428,79	3 456,31	2 099,64	2 116,49	1 216,44	1 226,20
260	0,36	5 486,98	5 531,02	4 051,62	4 084,14	2 568,04	2 588,65	1 572,56	1 585,18	911,07	918,38
270	0,31	4 782,28	4 820,67	3 531,27	3 559,61	2 238,23	2 256,19	1 370,59	1 381,59	794,06	800,44
280	0,26	3 989,00	4 021,02	2 945,51	2 969,15	1 866,95	1 881,94	1 143,24	1 152,42	662,34	667,66
290	0,17	2 652,34	2 673,63	1 958,51	1 974,23	1 241,36	1 251,33	760,16	766,26	440,40	443,94
300	0,18	2 746,02	2 768,06	2 027,68	2 043,95	1 285,20	1 295,52	787,00	793,32	455,96	459,61
310	0,17	2 586,48	2 607,24	1 909,87	1 925,20	1 210,54	1 220,25	741,28	747,23	429,47	432,91
320	0,12	1 812,98	1 827,53	1 338,72	1 349,46	848,52	855,33	519,60	523,77	301,03	303,45
330	0,11	1 718,61	1 732,40	1 269,03	1 279,22	804,35	810,81	492,55	496,50	285,36	287,65
340	0,11	1 640,38	1 653,55	1 211,27	1 220,99	767,74	773,90	470,13	473,90	272,37	274,56
350	0,10	1 533,77	1 546,08	1 132,55	1 141,64	717,85	723,61	439,58	443,11	254,67	256,72
360	0,06	947,60	955,20	699,71	705,33	443,50	447,06	271,58	273,76	157,34	158,60
370	0,03	481,13	484,99	355,27	358,12	225,18	226,99	137,89	139,00	79,89	80,53
380	0,02	244,28	246,24	180,38	181,83	114,33	115,25	70,01	70,57	40,56	40,89
390	0,01	124,03	125,03	91,59	92,32	58,05	58,52	35,55	35,83	20,59	20,76
400	0,00	62,97	63,48	46,50	46,87	29,47	29,71	18,05	18,19	10,46	10,54
410	0,00	31,97	32,23	23,61	23,80	14,96	15,08	9,16	9,24	5,31	5,35
420	0,00	16,23	16,36	11,99	12,08	7,60	7,66	4,65	4,69	2,70	2,72
430	0,00	8,24	8,31	6,09	6,14	3,86	3,89	2,36	2,38	1,37	1,38
431	0,00	7,70	7,76	5,69	5,73	3,61	3,63	2,21	2,23	1,28	1,29
432	0,00	7,20	7,26	5,31	5,36	3,37	3,40	2,06	2,08	1,20	1,20
433	0,00	6,73	6,78	4,97	5,01	3,15	3,17	1,93	1,94	1,12	1,13
434	0,00	6,29	6,34	4,64	4,68	2,94	2,97	1,80	1,82	1,04	1,05
435	0,00	5,87	5,92	4,34	4,37	2,75	2,77	1,68	1,70	0,98	0,98

## 2. ESTUDIO HIDROENERGÉTICO

El objetivo principal de este capítulo es el estudio de las alternativas de aprovechamiento hidroeléctrico en el tramo del río Santiago comprendido entre la C.H. Manuel M. Diéguez "Santa Rosa" y el NAMO del P.H. La Yesca (actualmente central hidroeléctrica C.H. Alfredo Elías Ayub "La Yesca"). Los análisis de aprovechamiento hidroeléctrico se enfocaron en las siguientes dos alternativas:

- 1) Estudiar, predimensionar obras, y evaluar técnica y económicamente el desazolve del embalse de Santa Rosa y el incremento de la carga aprovechable por medio de la sobreelevación de la cortina y de una conducción con descarga en la cola del embalse (NAMO) de la C.H. Alfredo Elías Ayub "La Yesca".
- 2) Actualizar, optimizar y evaluar técnica y económicamente el P.H. Amuchiltite con generación a pie de presa y NAMO a nivel del desfogue de la C.H. Santa Rosa.

### 2.1 Estudio hidroenergético Santa Rosa

Para determinar la cantidad y calidad de la energía generada por las alternativas que forman el "Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca.", se realizó la simulación de funcionamiento del vaso; esto atendiendo a una demanda mensual constante y a la política deficitaria de energía durante el periodo analizado (promedio anual del 5%).

De acuerdo al estudio realizado para la optimización de niveles de operación en el vaso y a sus correcciones por haber actualizado los escurrimientos y conforme a la curva elevaciones-áreas-capacidades utilizados; se determinó por medio del programa FUNVAS el NAMINO óptimo así como el NAMO propuesto para las opciones estudiadas (sobreelevando la cortina con y sin conducción, y la cortina con su altura actual, con conducción), se estudió la elevación para el NAMO a la cota 793 msnm, este último para no afectar al poblado de San Cristóbal de la Barranca con la opción de sobreelevar la cortina actual de Santa Rosa. El P.H. Amuchiltite cuenta con un estudio realizado en 2007 para el cual se actualizaron los datos de los escurrimientos en el periodo 1960-2011.

#### 2.1.1 Curvas Elevaciones – Áreas - Capacidades

Con la topografía obtenida básicamente de las cartas vectoriales de INEGI en escala 1:50 000, la batimetría (Figura 2-1) y la fotogrametría realizada por la GEIC en el 2011,

se obtuvo la curva elevaciones – áreas – capacidades (E-A-C) del embalse del P.H. Amuchiltite, Tabla 2-1.

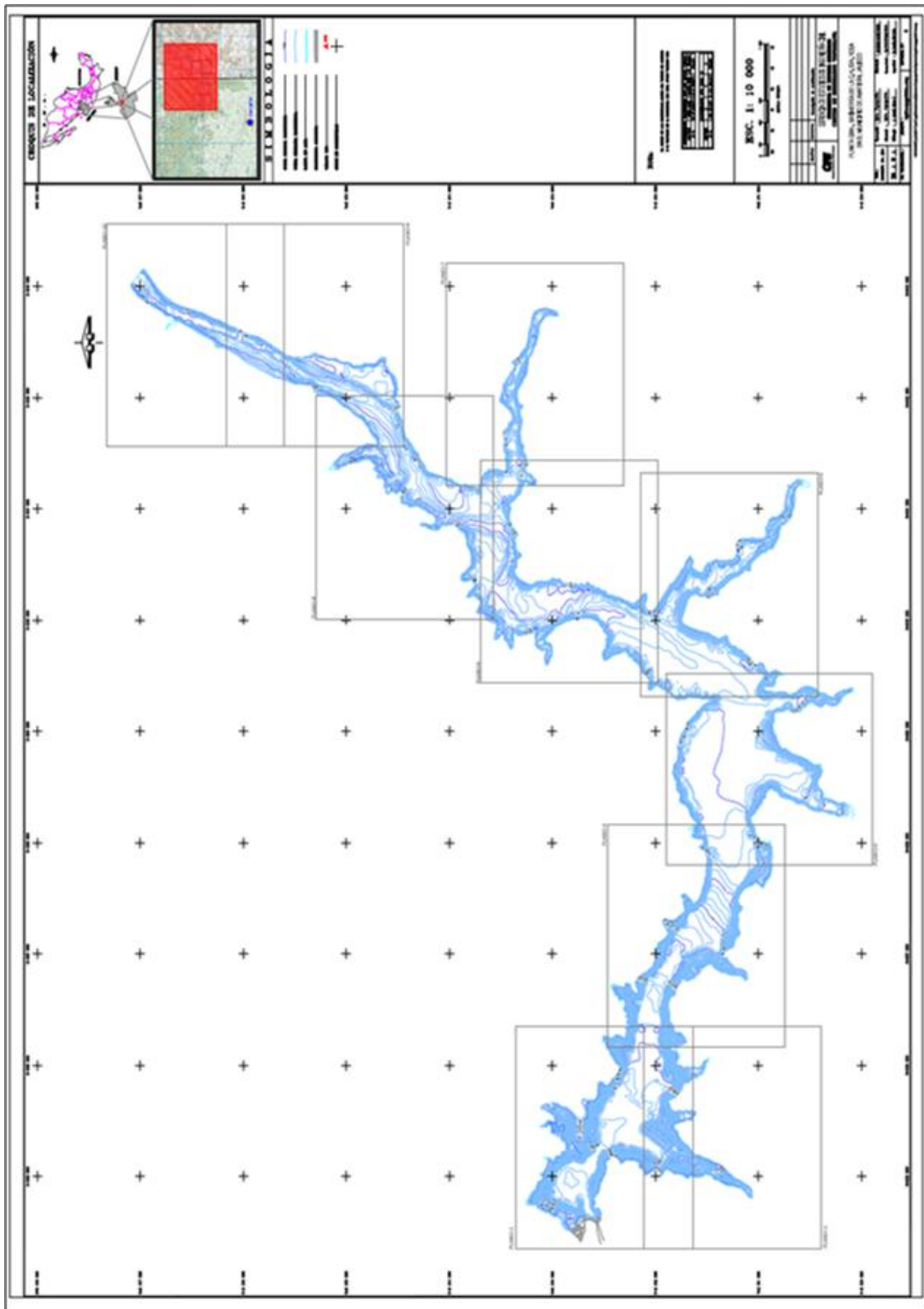


Figura 2-1 Batimetría del año 2011

**Tabla 2-1 Curva Elevaciones-Áreas-Capacidades**

ELEVACION INEGI	ELEVACION LOCAL SANTA ROSA	ÁREAS		VOLÚMENES
		msnm	Ha	km <sup>2</sup>
683	696	0,06	0,00	0,00
685	698	35,53	0,36	0,30
687	700	58,77	0,59	1,22
689	702	77,38	0,77	2,59
691	704	88,92	0,89	4,24
693	706	97,85	0,98	6,11
695	708	109,76	1,10	8,19
697	710	121,61	1,22	10,51
699	712	131,09	1,31	13,04
701	714	141,10	1,41	15,76
703	716	150,67	1,51	18,68
705	718	167,81	1,68	21,83
707	720	224,84	2,25	25,67
709	722	304,97	3,05	31,03
711	724	388,32	3,88	38,06
713	726	452,02	4,52	46,41
715	728	519,35	5,19	56,12
717	730	579,51	5,80	67,10
719	732	659,68	6,60	79,43
721	734	731,90	7,32	93,65
723	736	789,71	7,90	108,85
725	738	842,33	8,42	125,16
726	739	874,90	8,75	133,75
735	746,102	995,62	9,96	204,46
740	753,204	1 116,33	11,16	275,17
745	758,204	1 322,51	13,23	336,14
750	763,204	1 399,38	13,99	404,19
755	768,204	1 477,07	14,77	476,10
760	773,204	1 578,00	15,78	552,47
765	778,204	1 722,13	17,22	634,98
770	783,204	1 808,17	18,08	723,23
775	788,204	1 893,95	18,94	815,79
780	793,204	2 082,27	20,82	915,19
785	798,204	2 199,91	22,00	1 022,25
790	803,204	2 301,78	23,02	1 134,79
795	808,204	2 404,49	24,04	1 252,45
800	813,204	2 636,92	26,37	1 378,48
805	818,204	2 773,73	27,74	1 513,75
810	823,204	2 897,17	28,97	1 655,52
815	828,204	3 021,88	30,22	1 803,50
820	833,204	3 398,60	33,99	1 964,01

### 2.1.2 Evaporación neta

Con referencia a la evaporación neta media mensual se utilizaron los valores representativos de precipitación y evaporación observada mensual media anual de las

estaciones climatológicas: Santa Rosa (Tabla 2-2) la cual está localizada en el área de influencia del almacenamiento del proyecto.

**Tabla 2-2 Evaporaciones en mm para el sito de la cortina de Santa Rosa**

Media	111,46	150,04	243,85	290,76	320,72	244,69	167,70	157,73	130,30	122,73	100,14	79,23	2063,14
Mediana	108,50	147,00	245,20	289,25	314,15	239,20	166,95	157,30	133,65	124,10	99,35	83,35	152,15
Mínimo	75,00	37,10	191,50	216,20	264,20	173,80	120,80	112,10	91,90	73,10	43,80	27,10	27,10
Máximo	164,60	215,70	317,10	388,50	398,60	324,60	221,70	210,60	154,80	178,30	162,30	132,30	398,60
Desv.	23,07	35,61	30,46	35,40	33,42	35,92	21,74	20,94	14,83	24,40	27,59	23,90	6,88
Coef. de asimetría	0,21	0,24	0,12	0,12	0,10	0,15	0,13	0,13	0,11	0,20	0,28	0,30	0,00
%	5,26	7,08	11,51	13,72	15,13	11,55	7,91	7,44	6,15	5,79	4,72	3,74	100,00

### 2.1.3 Nivel de Aguas Mínimo de Operación (NAMINO)

Con el fin de obtener la mayor cantidad posible de energía firme para el NAMO 790,00 msnm, se procedió a simular la elevación del NAMINO, hasta encontrar una cota tal que proporcione la máxima generación firme. Para tal efecto, se hizo la simulación del vaso con el programa FUNVAS, que realiza funcionamientos múltiples para un rango de NAMINO's predeterminado y de acuerdo a la política de operación ya establecida, es decir, busca en cada intervalo de NAMINO propuesto la demanda mensual de generación que proporcione un déficit medio anual de energía del 5% y un factor de planta medio similar al 0,25.

La vida útil de la central se considera de 50 años. En cuanto al volumen medio anual de azolves, se tiene información de volumen de sólidos en suspensión para la estación hidrométrica Santa Rosa II cuyo escurrimiento medio anual disponible es de 1 922 hm<sup>3</sup>.

Por otro lado, la estación hidrométrica de Santa Rosa II cuenta con registros de sedimentos en suspensión del periodo de 1963 a 1986. El acarreo en suspensión tiene un promedio anual de  $6,8 \times 10^{-5}$  del Volumen Escurrido Medio Anual (VEMA). Entonces el volumen de azolves generados hasta este punto de la cuenca es de 6,59 hm<sup>3</sup> ( $1\ 937 * 50 * 0,000068 * 50$ ).

No se tiene información correspondiente al sitio de Amuchiltite, por lo tanto, se considera el factor de 0,001 sugerido por la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). El escurrimiento medio anual al sitio de Amuchiltite es de 1 937 hm<sup>3</sup> y un escurrimiento por cuenca propia de 21 hm<sup>3</sup>. De ésta manera el volumen de azolve generado por cuenca propia al sitio del P.H. Amuchiltite es de 1,05 hm<sup>3</sup> ( $21 * 0,001 * 50$ ). Por lo tanto el volumen de azolves total al sitio del proyecto es de 7,64 hm<sup>3</sup>.

Con el volumen de azolve obtenido se entra a la curva E-A-C y se determina la elevación correspondiente.

Ésta primera parte del estudio sirvió para definir los niveles característicos de NAMO a la cota 790 y NAMINO a la cota 735, que posteriormente se emplearon para realizar los funcionamientos de vaso en cada con el P.H. Amuchiltite.

### 2.1.4 Simulación del funcionamiento de vaso

Una vez determinado el NAMINO, el NAMO y la información necesaria, se procedió a realizar el funcionamiento de vaso para Santa Rosa, proponiendo potencias instaladas, con el objeto de realizar una curva de potencia instalada vs generación y conocer el rango de potencias en el cual ése proyecto toma mayor relevancia. Este análisis se realizó a nivel diario, empleando del programa denominado FUNVASO. En la Tabla 2-3 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 2-3 Resultados del programa FUNVASO para la cortina con elevación 790 sobreelevada.

RESUMEN GENERAL												
Potencia Instalable MW	Potencia media MW	Número de horas	Carga bruta de diseño m	Gasto de diseño m <sup>3</sup> /s	Demanda diaria hm <sup>3</sup>	Volumen turbinado hm <sup>3</sup>	Derrames hm <sup>3</sup>	Generación media anual [GWh]			F.P.	Déficit %
								Firme	Secundaria	Total		
20	20,00	24,00	144,97	15,42	1,49	486,28	1 430,37	175,74	0,00	175,74	1,000	0,00
40	38,58	23,15	140,83	32,79	2,99	997,46	919,68	338,80	0,00	338,80	0,965	0,30
60	45,98	18,39	136,61	50,79	3,46	1 227,33	690,92	392,99	9,98	402,97	0,766	5,00
80	48,60	14,58	136,61	67,38	3,46	1 290,70	627,55	392,99	32,97	425,96	0,607	5,00
100	50,90	12,22	136,61	83,88	3,46	1 346,37	571,88	392,99	53,17	446,16	0,509	5,00
120	52,84	10,57	136,61	100,33	3,46	1 393,35	524,90	392,99	70,22	463,21	0,440	5,00
140	54,57	9,35	136,61	116,75	3,46	1 434,99	483,26	392,99	85,32	478,31	0,390	5,00
160	56,12	8,42	136,61	133,13	3,46	1 472,45	445,80	392,99	98,91	491,90	0,351	5,00
180	57,51	7,67	136,61	149,48	3,46	1 506,03	412,22	392,99	111,09	504,08	0,319	5,00
200	58,73	7,05	136,61	165,82	3,46	1 535,65	382,60	392,99	121,84	514,83	0,294	5,00
220	59,84	6,53	136,61	182,14	3,46	1 562,30	355,95	392,99	131,51	524,50	0,272	5,00
240	60,84	6,08	136,61	198,45	3,46	1 586,55	331,70	392,99	140,30	533,29	0,254	5,00
260	61,76	5,70	136,61	214,76	3,46	1 608,73	309,52	392,99	148,35	541,34	0,238	5,00
280	62,61	5,37	136,61	231,05	3,46	1 629,35	288,90	392,99	155,82	548,81	0,224	5,00
300	63,40	5,07	136,61	247,33	3,46	1 648,32	269,93	392,99	162,70	555,69	0,211	5,00
320	64,13	4,81	136,61	263,60	3,46	1 665,95	252,30	392,99	169,09	562,08	0,200	5,00
340	64,80	4,57	136,61	279,87	3,46	1 682,17	236,08	392,99	174,98	567,97	0,191	5,00
360	65,42	4,36	136,61	296,13	3,46	1 697,17	221,08	392,99	180,42	573,41	0,182	5,00
380	65,99	4,17	136,61	312,40	3,46	1 710,83	207,42	392,99	185,37	578,36	0,174	5,00
400	66,51	3,99	136,61	328,66	3,46	1 723,29	194,96	392,99	189,88	582,87	0,166	5,00
420	66,98	3,83	136,61	344,92	3,46	1 734,82	183,43	392,99	194,06	587,05	0,159	5,00
440	67,43	3,68	136,61	361,18	3,46	1 745,46	172,79	392,99	197,92	590,91	0,153	5,00
460	67,82	3,54	136,61	377,44	3,46	1 755,02	163,23	392,99	201,39	594,38	0,147	5,00
480	68,19	3,41	136,61	393,71	3,46	1 763,88	154,37	392,99	204,60	597,59	0,142	5,00
500	68,54	3,29	136,61	409,98	3,46	1 772,19	146,06	392,99	207,61	600,60	0,137	5,00
520	68,86	3,18	136,61	426,24	3,46	1 779,99	138,26	392,99	210,43	603,42	0,132	5,00
540	69,15	3,07	136,61	442,50	3,46	1 787,11	131,14	392,99	213,01	606,00	0,128	5,00
560	69,42	2,98	136,61	458,77	3,46	1 793,55	124,70	392,99	215,35	608,34	0,124	5,00
580	69,67	2,88	136,61	475,04	3,46	1 799,61	118,64	392,99	217,55	610,54	0,120	5,00
600	69,91	2,80	136,61	491,31	3,46	1 805,27	112,98	392,99	219,60	612,59	0,117	5,00
620	70,13	2,71	136,61	507,58	3,46	1 810,58	107,67	392,99	221,52	614,51	0,113	5,00
640	70,33	2,64	136,61	523,85	3,46	1 815,52	102,73	392,99	223,31	616,30	0,110	5,00
660	70,52	2,56	136,61	540,12	3,46	1 820,00	98,25	392,99	224,93	617,92	0,107	5,00
680	70,69	2,49	136,61	556,40	3,46	1 824,10	94,15	392,99	226,42	619,41	0,104	5,00
700	70,85	2,43	136,61	572,68	3,46	1 827,96	90,29	392,99	227,82	620,81	0,101	5,00
720	71,00	2,37	136,61	588,95	3,46	1 831,57	86,68	392,99	229,12	622,11	0,099	5,00
740	71,14	2,31	136,61	605,24	3,46	1 834,94	83,31	392,99	230,34	623,33	0,096	5,00
760	71,27	2,25	136,61	621,52	3,46	1 838,09	80,16	392,99	231,49	624,48	0,094	5,00
780	71,40	2,20	136,61	637,80	3,46	1 841,10	77,15	392,99	232,58	625,57	0,092	5,00
800	71,52	2,15	136,61	654,09	3,46	1 843,98	74,27	392,99	233,62	626,61	0,089	5,00



Los funcionamientos de vaso se realizaron para las diversas opciones estudiadas y cuando fue necesario incluir el P.H. Amuchiltite se realizaron los funcionamientos en cascada tomando en cuenta la regulación que se da por la sobreelevación de Santa Rosa. En éstos se puede observar la Generación Media Anual para cada opción con su respectivo funcionamiento de vaso, siendo las opciones estudiadas las que presentan un factor de planta de 0,4 y de 0,25 con la opción de la cortina sobreelevada generando al pie de la cortina junto con el P.H. Amuchiltite, los análisis de las generaciones, potencias y factor de planta se muestra en las Figura 2-2 Figura 2-3 y Figura 2-4.

Para estos funcionamientos se usó un volumen útil de 1 922,32 hm<sup>3</sup> que es el volumen asignado por la Conagua en el diario oficial el 29 de noviembre de 2010. Las características generales de las opciones del proyecto se presentan en la Tabla 2-4.

**Tabla 2-4 Características generales de las opciones estudiadas**

Concepto	Unidades	Cortina original y conducción BP	Cortina sobreelevada	Cortina sobreelevada y conducción B P
Escorrentamiento medio anual (1960-2011)	hm <sup>3</sup>	1 922,32		
Gasto medio del periodo	m <sup>3</sup> /s	60,96		
Volumen medio anual de azolves (2006-2011)	hm <sup>3</sup>	1,07		
Evaporación neta anual		1,84		
Capacidad al NAMO		86,36	1134,8	
Capacidad al NAMÍNO		0,30	210,0	
NAME	msnm	721,50	793	
NAMO	msnm	733,30	790	
NAMINO	msnm	696,80	755	
Elevación original del cauce	msnm	637		
Área de captación	km <sup>2</sup>	34 973		
Altura de Cortina	m	114	174,00	
Longitud de la corona	m	150	533,50	
Gasto máximo de diseño de la obra de excedencias (Tr= 10 000 años)	m <sup>3</sup> /s	7300	13 516	



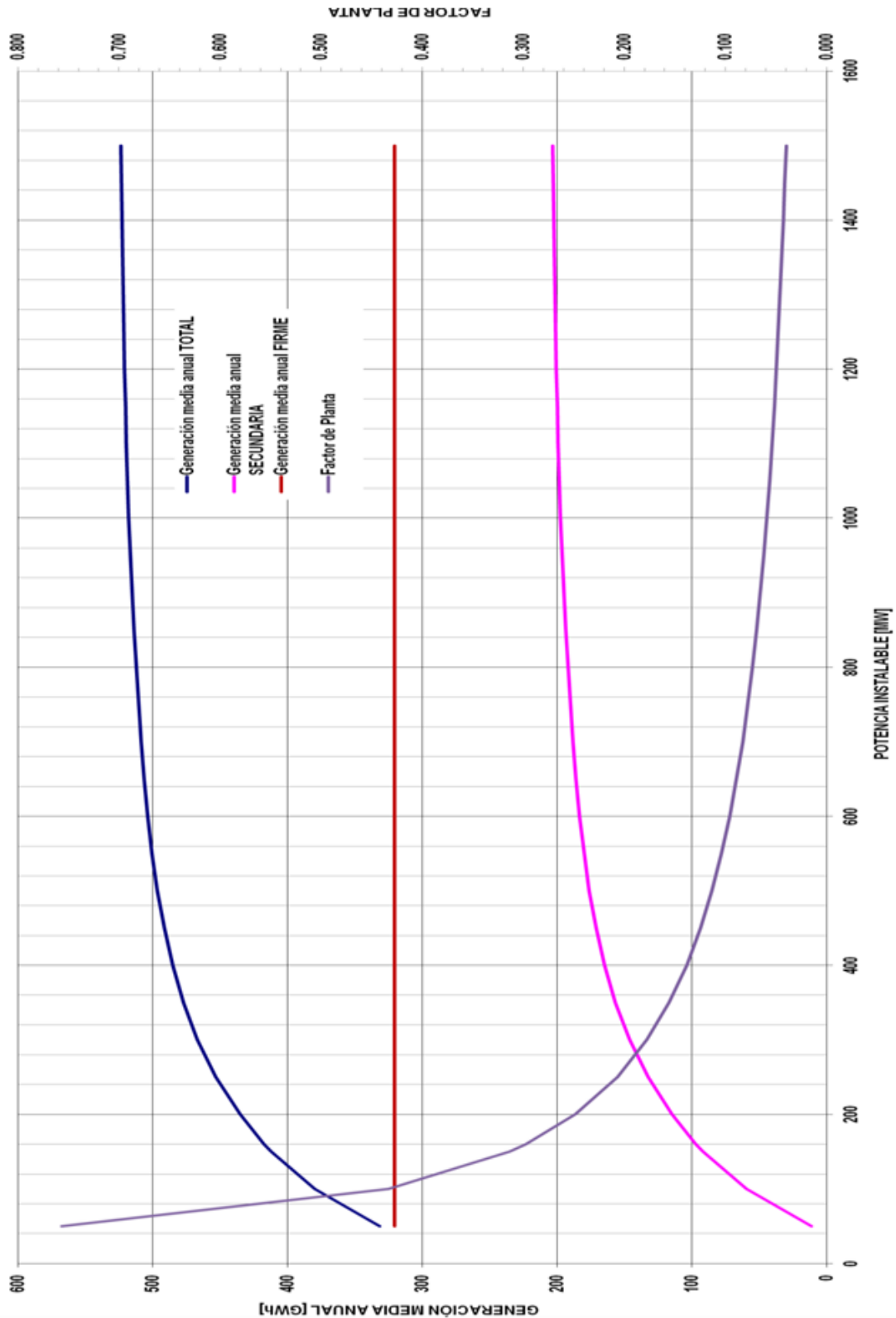


Figura 2-2 Generaciones para la opción sobreelevada, generando al pie de la cortina

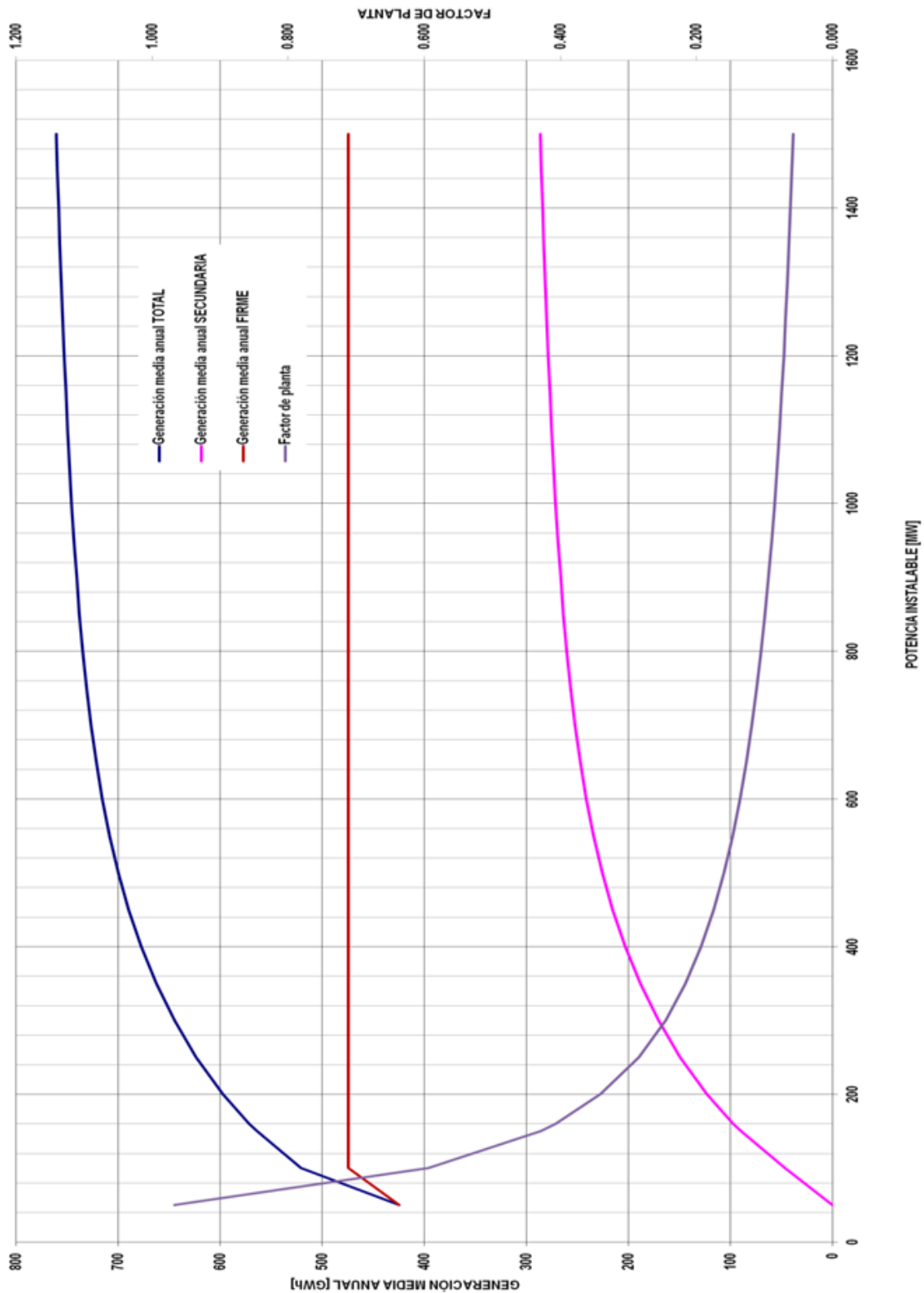


Figura 2-3 Generaciones para la opción sobreelevada, con túnel de baja presión

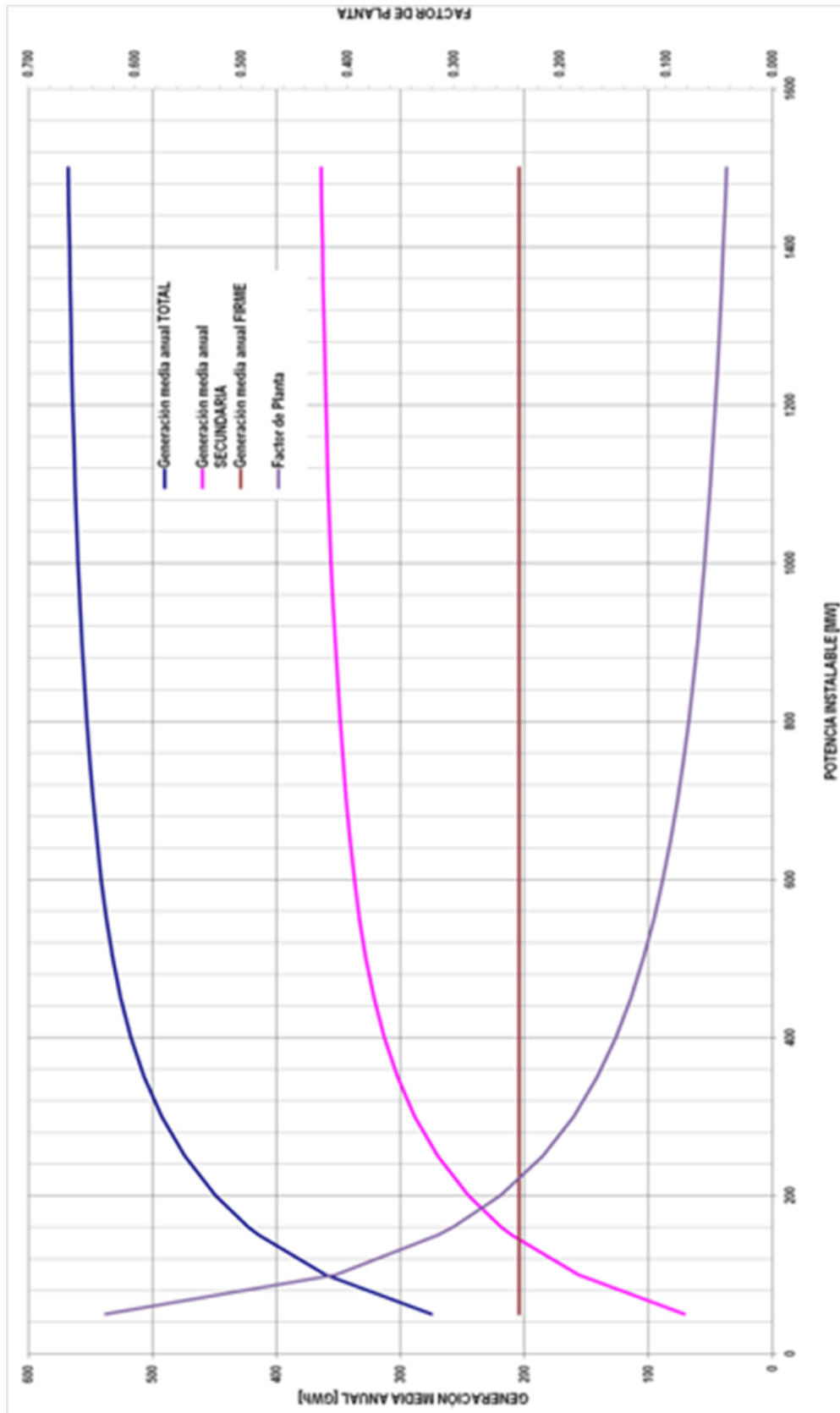
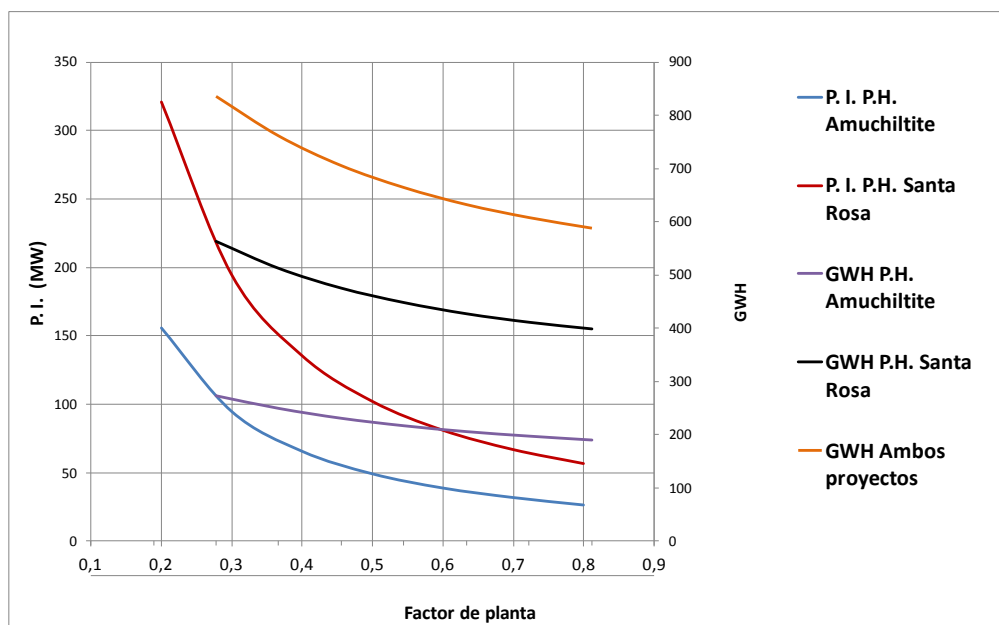


Figura 2-4 Generaciones para la cortina actual, con túnel de baja presión

En la Figura 2-5 se muestra la relación entre potencias, generación y el factor de planta para la opción seleccionada de cortina sobreelevada al trabajar en cascada con el P.H. Amuchiltite



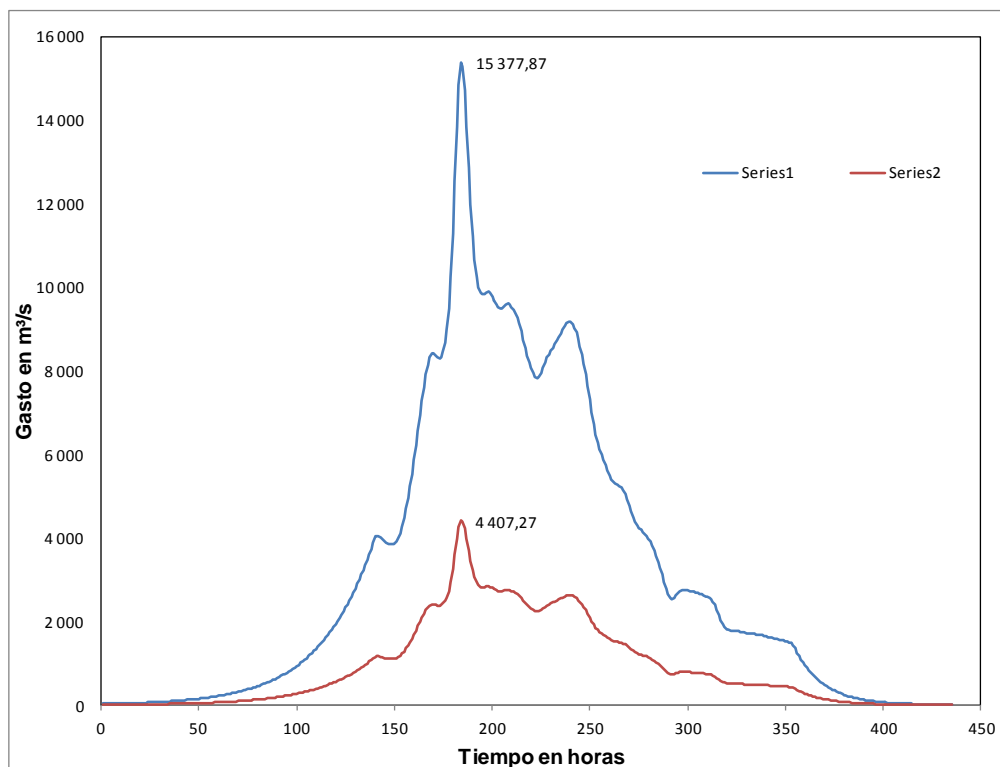
**Figura 2-5 Potencias y generaciones para la opción sobreelevada generando al pie de la cortina**

### 2.1.5 Tránsito de avenidas

Para controlar la avenida de entrada al vaso de 4 963 Mm<sup>3</sup> y pico de 15 377,87m<sup>3</sup>/s, y conocer la magnitud del volumen de regulación, se realizaron varios tránsitos de avenidas por la estructura de control del vertedor, hasta encontrar la solución más satisfactoria.

Con el NAMO conocido y un coeficiente medio de descarga de 2; se hizo variar la longitud efectiva de la cresta y la elevación de la misma transitando la avenida por la estructura de control, hasta cumplir las restricciones de gasto unitario que pasa por la cresta vertedora ( $\leq 200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) y la relación de esbeltez de las compuertas ( $1,4 \leq \text{carga}/\text{ancho} \leq 1,6$ ).

Los tránsitos se hicieron con la política de extracción de mantener el vaso el mayor tiempo posible en el NAMO, descargar el gasto que llega; y cuando este nivel es rebasado, operar con descarga libre, tratando además de conservar el NAMO hasta el final de la avenida, Figura 2-6.



**Figura 2-6 Hidrograma de diseño para Santa Rosa (año 2011).**

## **2.2 Amuchiltite**

### **2.2.1 Antecedentes**

Del estudio de prefactibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Amuchiltite, realizado en el año 2007, se definió que el NAMO adecuado es la elevación 634 msnm, considerando que el NAME es el nivel de desfogue de la C.H. Santa Rosa cuya elevación es 642,9 msnm. De este análisis resultó que el NAMINO es la elevación 618 msnm. Como parte de los resultados del estudio hidroenergético se determinó una potencia instalada de 40 MW correspondiente a un factor de planta de 0,37 y una generación media anual de 129,8 GWh, de la cual 51,42 GWh corresponden a la generación firme.

Para definir la cantidad y calidad de la energía que puede generar la planta del P.H. Amuchiltite con una determinada potencia instalable, fue necesario realizar funcionamientos de vaso con los niveles óptimos de operación (NAMO y NAMINO), que como parte de las recomendaciones realizadas por personal de la Subgerencia de Anteproyecto de la C.P.H., se decidió que el NAMO se considerará el desfogue de la C.H. Santa Rosa. Así entonces, el NAMO es la elevación 642,9 msnm y que sólo se confirmarán el NAMINO, la cota del desfogue, la Potencia Instalada y la energía generada por el mismo.

### 2.2.2 Informe Hidroenergético

Como condición de diseño se consideró una simulación del embalse en forma aislada, situación más crítica de generación y para evaluación del proyecto, ya que existe un embalse aguas arriba (C.H. Santa Rosa), ésta regula los escurrimientos y ayuda a que sea mucho más eficiente la generación y a obtener consecuentemente índices económicos más favorables para el mismo.

Otras condiciones de diseño fueron: fijar un déficit de energía durante el período analizado con promedio anual del 5%, generar a demanda mensual constante y fijar una potencia instalable inicial tal que proporcione un factor de planta medio, en todo el período analizado. Todo esto con una eficiencia global de la planta del 91,3% y con un nivel de desfogue constante e igual al obtenido en el río con el gasto total turbinable (590,00 msnm).

La información necesaria para efectuar la simulación del vaso de los proyectos, básicamente es la solicitada por el programa FUNVASO en lenguaje Fortran: niveles característicos, potencia instalable, matriz de escurrimientos (deducidas en el informe hidrológico), evaporación neta media mensual y curva elevaciones-áreas-capacidades (E-A-C) del vaso de almacenamiento.

La potencia instalable se sugiere de acuerdo al factor de planta requerido por la planta, dentro del contexto del Sistema Interconectado y de acuerdo a la región de demanda de energía.

Los niveles característicos, se refieren al nivel de aguas medio de operación (NAMO), al nivel de aguas mínimo de operación (NAMINO), al nivel de diseño y al nivel de desfogue.

### 2.2.3 Curva elevaciones-áreas-capacidades del vaso

Con la topografía obtenida básicamente de las cartas vectoriales de INEGI en escala 1:50 000 se obtuvo la curva elevaciones – áreas – capacidades del embalse. En la Tabla 2-5 se muestra la curva E-A-C

### 2.2.4 Nivel de Aguas Mínimo de Operación (NAMINO)

La cota del NAMINO depende de la acumulación de azolves en el fondo del vaso, los cuales son transportados por el flujo del cauce. Con la siguiente ecuación se determina

la capacidad de azolves requerida por el embalse:  $C. A. = \text{vida útil de la presa} * \text{escurrimiento medio anual} * \text{volumen de azolves gruesos}$ .

Con el fin de obtener la mayor cantidad posible de energía firme para el NAMO 642,90 msnm ya definido de acuerdo a lo explicado anteriormente, se procedió a simular la elevación del NAMINO, hasta encontrar una cota tal que proporcione la máxima generación firme. Para tal efecto, se hizo la simulación del vaso con el programa FUNVAS, que realiza funcionamientos múltiples para un rango de NAMINO's predeterminado y de acuerdo a la política de operación ya establecida, es decir, busca en cada intervalo de NAMINO propuesto la demanda mensual de generación que proporcione un déficit medio anual de energía del 5% y un factor de planta medio similar al 0,25.

Al observar las simulaciones realizadas y la forma que adopta la gráfica mostrada, se concluye que la elevación del NAMINO que ocasiona una demanda de energía mensual óptima corresponde a la cota 631,00 msnm. También se revisó que con esta cota de NAMINO no existiera una carga mínima inferior al 65% de la carga de diseño, o bien, que su variación máxima por debajo del nivel de diseño no rebase el 35% de la carga de diseño correspondiente.

La vida útil de la central se considera de 50 años, en cuanto al volumen medio anual de azolves, se tiene información de volumen de sólidos en suspensión para la estación hidrométrica Santa Rosa II cuyo escurrimiento medio anual disponible es de 1 922 hm<sup>3</sup>.

Por otro lado, la estación hidrométrica de Santa Rosa II cuenta con registros de sedimentos en suspensión del periodo de 1963 a 1986.

El acarreo en suspensión tiene un promedio anual de 0,000068, por lo que el volumen de azolves generados hasta este punto de la cuenca es de 6,59 hm<sup>3</sup> ( $1\ 937 * 50 * 0,000068$ ).

No se tiene información correspondiente al sitio de Amuchiltite, por lo tanto se considera el factor sugerido por la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) que es de 0,001. El escurrimiento medio anual al sitio de Amuchiltite es de 1 937 hm<sup>3</sup> (Tabla 2-6) y un escurrimiento por cuenca propia de 21 hm<sup>3</sup>, de ésta manera el volumen de azolve generado por cuenca propia al sitio del P.H. Amuchiltite es de 1,05 hm<sup>3</sup> ( $21 * 0,001 * 50$ ). De manera que el volumen de azolves total al sitio del proyecto es de 7,64 hm<sup>3</sup>.



**Tabla 2-5 Curva E-A-C para el sitio del P.H. Amuchiltite**

<b>Elevaciones m snm</b>	<b>Áreas ha</b>	<b>Capacidades millones m<sup>3</sup></b>
588	0,0000	0,0000
590	14,8889	10,3444
595	18,7301	13,0796
600	28,1074	16,4311
605	43,0207	20,5118
610	63,4701	25,4497
615	89,4556	31,3888
620	120,9771	38,4905
625	158,0347	46,9338
630	200,6283	56,9166
635	248,7580	68,6558
640	302,4238	82,3876
645	361,6256	98,3679
650	426,3635	116,8717
655	496,6375	138,1933
660	572,4475	162,6446
665	653,7936	190,5550
670	740,6758	222,2695
675	833,0940	258,1474
680	931,0483	298,5599
685	1034,5387	343,8883
690	1143,5651	394,5214
695	1258,1276	450,8522
700	1378,2261	513,2756
705	1503,8607	582,1844
710	1635,0314	657,9664
715	1771,7381	741,0004
720	1913,9809	831,6530
725	2061,7598	930,2742
730	2215,0747	1037,1940
735	2373,9257	1152,7188
740	2538,3128	1277,1274
745	2708,2359	1410,6674
750	2883,6951	1553,5522
755	3064,6904	1705,9576
760	3251,2217	1868,0189
765	3443,2891	2039,8281
770	3640,8925	2221,4319
775	3844,0321	2412,8294
780	4052,7076	2613,9708
785	4266,9193	2824,7560
790	4486,6670	3045,0339
795	4711,9508	3274,6020
800	4942,7706	3513,2064
805	5179,1265	3760,5424
810	5421,0185	4016,2552
815	5668,4465	4279,9412
820	5921,4106	4551,1498

Con el volumen de azolve obtenido se entra a la curva E-A-C y se determina la elevación correspondiente, en este caso corresponde aproximadamente a la cota 609 msnm.

**Tabla 2-6 Ecurrimiento disponible al sitio Amuchiltite (hm<sup>3</sup>)**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1 964	117,88	39,26	0,07	0,07	54,59	90,18	140,28	196,77	339,31	177,50	63,07	66,96	1 285,93
1 965	56,58	46,62	84,21	78,20	79,40	118,68	86,94	1 094,01	697,46	847,78	192,49	83,81	3 466,19
1 966	60,41	71,26	88,81	101,80	140,21	330,55	358,89	569,41	613,63	145,77	74,64	71,17	2 626,55
1 967	75,08	72,24	85,25	114,02	109,06	119,19	561,32	840,58	2 150,52	1 076,92	780,23	533,86	6 518,28
1 968	232,61	167,39	302,26	230,85	231,36	171,86	664,65	743,49	560,17	112,99	77,44	96,40	3 591,45
1 969	104,43	110,83	118,96	97,20	85,14	99,25	152,66	95,75	84,26	103,11	67,03	60,87	1 179,49
1 970	56,20	47,08	74,29	100,52	96,86	109,70	388,29	363,83	496,34	277,54	75,92	69,77	2 156,35
1 971	66,73	55,71	76,19	75,49	109,44	143,86	312,32	1 026,00	1 067,67	1 020,34	410,55	117,29	4 481,59
1 972	95,29	119,42	132,75	120,73	123,82	174,85	191,95	205,41	175,09	72,18	61,36	105,37	1 578,23
1 973	100,00	49,17	54,59	93,70	101,16	101,52	699,07	1 853,36	1 097,53	527,12	168,84	109,24	4 955,30
1 974	105,30	100,40	125,54	93,10	129,90	158,95	321,48	354,67	187,08	96,67	61,63	69,62	1 804,33
1 975	74,26	67,46	91,48	99,08	118,28	121,66	526,18	858,66	415,22	96,07	65,23	67,96	2 601,54
1 976	85,12	94,28	104,01	98,41	103,72	94,66	1 134,52	943,20	522,17	587,54	376,93	223,76	4 368,30
1 977	90,46	82,71	140,00	137,10	162,30	238,99	575,73	183,50	738,98	89,91	67,47	96,90	2 604,05
1 978	90,02	84,55	113,85	102,40	102,99	145,20	177,86	184,93	267,80	560,61	84,21	82,06	1 996,49
1 979	75,25	67,02	101,26	92,18	99,29	95,75	118,43	225,69	151,25	59,31	57,08	60,98	1 203,49
1 980	63,01	56,45	60,10	54,14	76,02	100,58	171,01	178,41	146,37	89,44	48,57	34,63	1 078,72
1 981	31,04	32,57	35,65	38,92	53,97	112,65	416,08	211,42	192,18	58,48	53,79	81,98	1 318,74
1 982	34,97	29,50	30,70	32,56	38,11	41,88	168,59	163,60	60,68	25,91	24,88	23,00	674,37
1 983	25,61	21,09	47,19	24,94	45,42	66,45	424,44	536,68	344,60	69,75	53,55	50,84	1 710,56
1 984	32,05	21,21	25,16	27,38	18,18	121,37	493,68	448,48	288,03	59,08	31,10	31,93	1 597,67
1 985	34,98	31,80	55,22	47,80	37,14	96,95	282,10	390,86	136,56	71,28	42,53	36,48	1 263,70
1 986	34,41	30,18	31,51	49,75	64,05	109,75	547,06	189,60	280,24	178,27	34,41	30,08	1 579,31
1 987	46,96	54,78	74,45	64,26	44,35	37,14	182,49	220,75	199,58	124,20	34,32	39,06	1 122,34
1 988	32,65	37,13	79,46	66,07	68,27	60,07	370,16	829,70	297,36	64,09	36,03	53,31	1 994,30
1 989	6,77	71,27	80,98	56,02	40,32	34,06	89,52	118,70	219,35	59,31	35,68	35,57	847,55
1 990	29,48	35,27	41,16	41,31	58,11	63,16	100,65	939,64	468,59	189,86	104,01	35,00	2 106,23
1 991	38,98	33,66	54,56	52,13	47,66	46,92	2 014,25	427,36	345,33	114,64	35,18	28,47	3 239,16
1 992	611,86	214,72	60,48	72,09	64,78	52,10	121,45	252,75	188,99	327,75	75,67	51,92	2 094,57
1 993	47,00	36,58	45,32	42,16	56,78	62,12	293,77	171,53	213,11	51,01	37,90	20,78	1 078,07
1 994	22,38	23,28	35,52	70,68	63,84	124,42	90,14	49,52	243,40	71,65	28,00	30,92	853,76
1 995	23,51	22,36	54,42	52,58	41,20	87,44	180,20	379,37	361,85	107,18	72,39	50,46	1 432,97
1 996	33,86	15,02	17,33	26,06	69,99	81,19	96,21	90,97	200,26	119,31	56,34	24,74	831,29
1 997	23,32	18,91	49,07	77,18	54,24	82,61	166,44	74,60	49,04	24,10	27,87	36,09	683,47
1 998	31,30	17,65	28,99	73,77	42,80	48,71	99,72	190,63	297,92	218,47	39,66	34,29	1 123,91
1 999	23,95	25,00	30,90	89,56	56,67	80,60	169,80	173,78	200,66	43,12	27,00	26,48	947,52
2 000	28,97	24,12	37,12	59,78	2,55	120,47	123,23	67,89	23,69	16,90	17,59	16,58	538,88
2 001	34,92	73,44	24,03	37,01	38,04	41,69	139,99	229,67	207,16	27,21	27,77	23,76	904,67
2 002	29,20	43,58	54,39	48,46	41,29	50,71	118,33	379,72	284,08	98,60	55,35	30,85	1 234,57
2 003	47,11	23,83	46,42	56,32	56,96	63,31	275,75	526,42	728,37	214,21	80,97	52,03	2 171,70
2 004	32,97	17,13	52,79	29,47	0,01	183,23	195,57	256,64	1 028,46	373,74	57,07	33,40	2 260,49
2 005	29,26	39,39	55,94	53,56	55,11	37,23	116,56	184,46	205,24	55,82	94,70	68,03	995,29
2 006	1,44	29,77	51,88	43,63	42,21	59,44	89,66	262,01	214,42	276,07	123,95	27,34	1 221,81
<b>Media</b>	<b>67,85</b>	<b>54,77</b>	<b>68,70</b>	<b>70,29</b>	<b>72,69</b>	<b>101,89</b>	<b>324,36</b>	<b>411,26</b>	<b>395,12</b>	<b>208,86</b>	<b>93,96</b>	<b>68,00</b>	<b>1 937,75</b>
<b>Mediana</b>	<b>38,98</b>	<b>39,39</b>	<b>54,59</b>	<b>64,26</b>	<b>58,11</b>	<b>95,75</b>	<b>182,49</b>	<b>252,75</b>	<b>280,24</b>	<b>103,11</b>	<b>57,08</b>	<b>50,84</b>	<b>1 578,23</b>
<b>Mínimo</b>	<b>1,44</b>	<b>15,02</b>	<b>0,07</b>	<b>0,07</b>	<b>0,01</b>	<b>34,06</b>	<b>86,94</b>	<b>49,52</b>	<b>23,69</b>	<b>16,90</b>	<b>17,59</b>	<b>16,58</b>	<b>538,88</b>
<b>Máximo</b>	<b>611,86</b>	<b>214,72</b>	<b>302,26</b>	<b>230,85</b>	<b>231,36</b>	<b>330,55</b>	<b>2 014,25</b>	<b>1 853,36</b>	<b>2 150,52</b>	<b>1 076,92</b>	<b>780,23</b>	<b>533,86</b>	<b>6 518,28</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>93,84</b>	<b>40,90</b>	<b>48,89</b>	<b>38,89</b>	<b>43,37</b>	<b>57,63</b>	<b>341,98</b>	<b>366,91</b>	<b>380,24</b>	<b>256,63</b>	<b>133,10</b>	<b>81,67</b>	<b>1285,36</b>
<b>Coef. de</b>	<b>1,38</b>	<b>0,75</b>	<b>0,71</b>	<b>0,55</b>	<b>0,60</b>	<b>0,57</b>	<b>1,05</b>	<b>0,89</b>	<b>0,96</b>	<b>1,23</b>	<b>1,42</b>	<b>1,20</b>	<b>0,66</b>
<b>%</b>	<b>3,50</b>	<b>2,83</b>	<b>3,55</b>	<b>3,63</b>	<b>3,75</b>	<b>5,26</b>	<b>16,74</b>	<b>21,22</b>	<b>20,39</b>	<b>10,78</b>	<b>4,85</b>	<b>3,51</b>	<b>100,00</b>

### 2.2.5 Evaporación neta

Con referencia a la evaporación neta media mensual se utilizaron los valores representativos de precipitación y evaporación observada mensual media anual de las estaciones climatológicas: Santa Rosa y Paso de La Yesca. La estación de Tequila aunque está localizada en el área de influencia del almacenamiento del proyecto no tiene información referente a láminas de evaporación observada.

En términos simples la evaporación neta es igual a la evaporación observada menos la precipitación. Pero aplicando el criterio de la SRH, la evaporación observada se multiplica por 0,77 que es el valor de la constante del evaporímetro y la precipitación se altera con el factor de (1-Ce), donde Ce es el coeficiente de escurrimiento.

El coeficiente de escurrimiento está en función del tipo uso del suelo, en este caso se trata de una unidad  $1 + Hh/2$  que es Litosol – Haplico con un lecho rocoso entre 10 y 50, casa de máquinas de profundidad y cobertura vegetal en bosque del 50% o pastizal regular. Mediante criterio de la SRH y con los datos mencionados resulta un factor de 0,24, con este, la precipitación media anual y una gráfica del mismo documento se encuentra el  $C_e = 0,06$ , por lo que el factor será:  $(1-0,06)=0,94$ .

La ecuación para determinar la evaporación neta resulta de:

$$\text{Evaporación neta} = (\text{evaporación observada} * 0,77) - (\text{precipitación} * 0,94).$$

En la Tabla 2-7 se muestra la evaporación neta media mensual. La última parte de esta tabla se hace una distribución proporcional de la evaporación neta en relación con el área de influencia de las estaciones climatológicas con información en la zona del embalse del proyecto en estudio.

**Tabla 2-7 Evaporación neta media mensual del sitio Amuchiltite**

Estación	EVAPORACIÓN EN mm											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Santa Rosa	82,76	-353,84	189,81	56,75	236	-141,5	-113,2	-93,36	-209,47	-15,99	-100,998	66,78
Paso La Yesca	-115,43	-344,19	186,89	-139,3	154,31	-370	-82,5	-55,48	-164,05	90,31	-85,85	76,09
Evaporación neta en mm en el sitio del P.H. Amuchiltite												
Amuchiltite	62,94	-352,87	189,51	37,14	227,83	-164,3	-110,2	-89,57	-204,93	-5,36	-99,48	67,72

### 2.2.6 Simulación del funcionamiento de vaso

#### Información General

La simulación del funcionamiento del vaso se rige con el cumplimiento de la ecuación de continuidad, que expresada en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  dado es:

$$\Delta V = X - D \dots \dots \dots (2.1)$$

Donde:

X = volumen de entradas al vaso durante el intervalo  $\Delta t$ .

D = volumen de salidas del vaso durante el mismo intervalo.

$\Delta V$  = cambio del volumen almacenado en el vaso durante el intervalo  $\Delta t$ .

El vaso formado por la estructura de contención tiene la función de almacenar el volumen excedente en época de precipitaciones, para satisfacer la demanda cuando el escurrimiento en el río no es suficiente (época de estiaje).

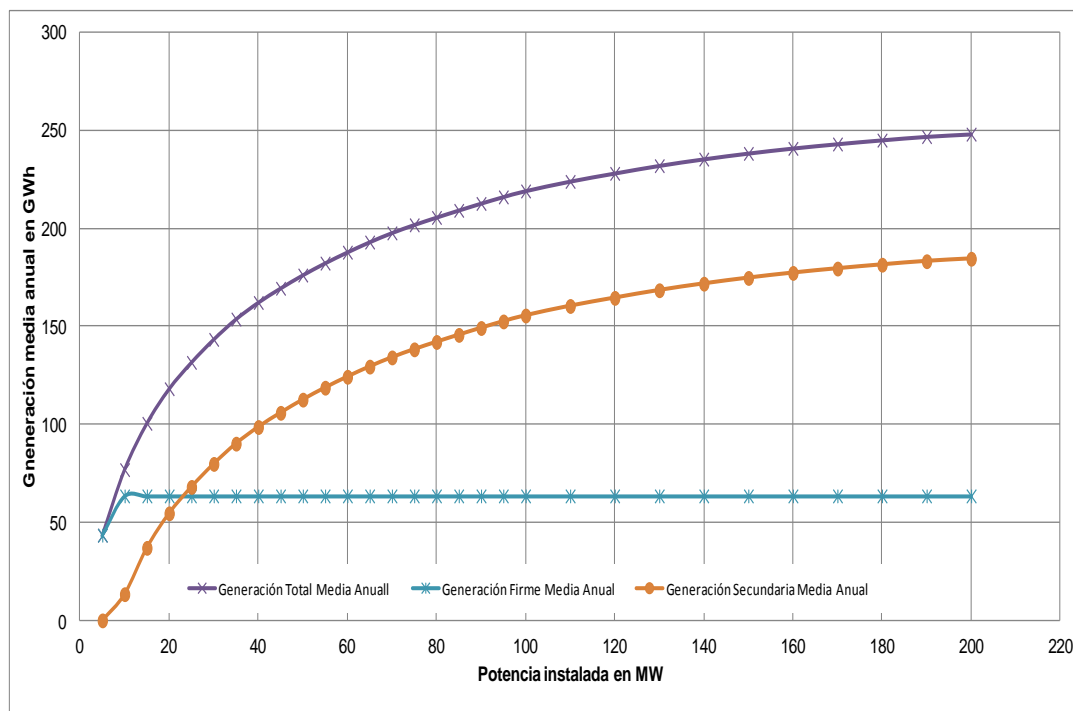
La información necesaria para efectuar la simulación de los proyectos considerados es:

- Niveles característicos
- Potencia instalable
- Matriz de escurrimientos
- Evaporación neta media mensual
- Curva elevaciones – áreas – capacidades (curva E–A–C) del vaso de almacenamiento.

La potencia instalable se sugiere de acuerdo al factor de planta requerido por la planta, dentro del contexto del Sistema Interconectado y de acuerdo a la región de demanda de energía, (se utilizarán los factores de planta con fines de comparación de 0,25, 0,40 y 0,60, en el primero de ellos se considera la utilización de las hidroeléctricas para suministrar energía intermedia).

Los niveles característicos, se refieren al nivel de aguas medio de operación (NAMO), al nivel de aguas mínimo de operación (NAMINO), al nivel de diseño y al nivel de desfogue.

Una vez determinado el NAMINO, el NAMO y la información necesaria, se procede a realizar el funcionamiento de vaso, proponiendo potencias instaladas, con el objeto de realizar una curva de potencia instalada vs generación y conocer el rango de potencias en el cual el proyecto toma mayor relevancia. Este análisis se realizó a nivel mensual, empleando del programa de FUNVASO. En La Figura 2-7 se muestran los resultados obtenidos



**Figura 2-7 Generaciones para el P.H. Amuchiltite**

Por otro lado, debido a que el embalse del proyecto es pequeño, se decidió realizar un funcionamiento de vaso a nivel diario tomando las consideraciones antes mencionadas, empleando una hoja de cálculo de Excel, con el objeto de ver las diferencias con respecto al análisis mensual.

Como resultados de este análisis, se observa que la generación para potencias instaladas por debajo de los 35 MW son casi iguales, y que por arriba de esta potencia instalada, en el análisis mensual se obtiene mayor generación, y por otro lado también se observa que el factor de planta varía en el funcionamiento mensual y diario, así como el volumen turbinado. En la Figura 2-8 se puede observar el comportamiento del funcionamiento vaso a nivel diario y mensual. Y en la Tabla 2-8 se observan los resultados obtenidos

Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

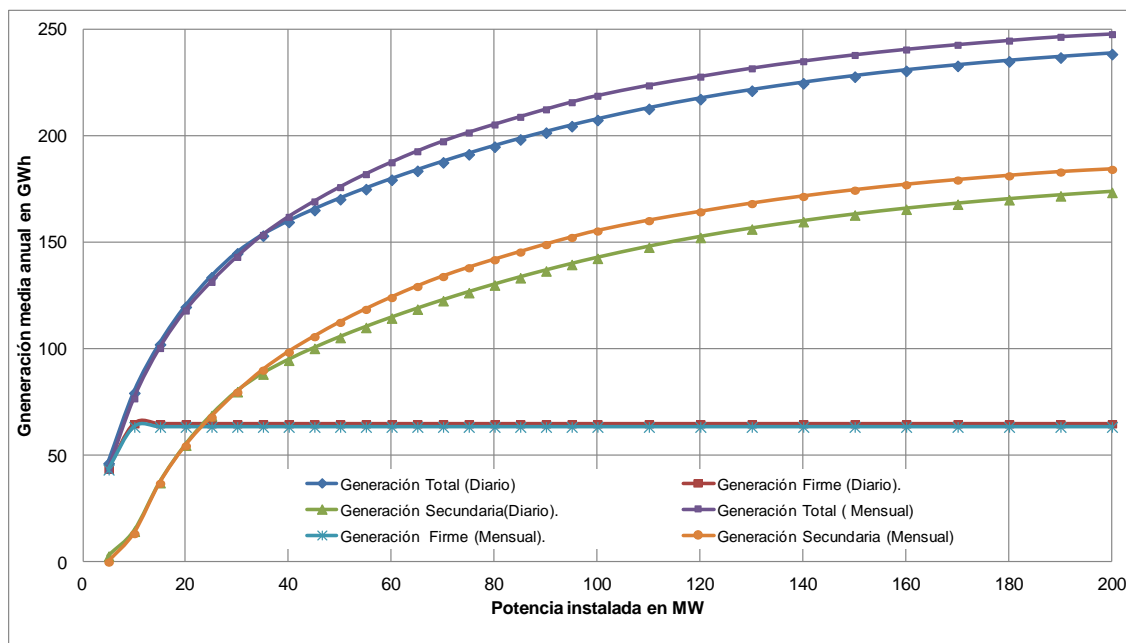


Figura 2-8 Generaciones para el P.H. Amuchiltite

Tabla 2-8 Resultados de los funcionamientos de vaso

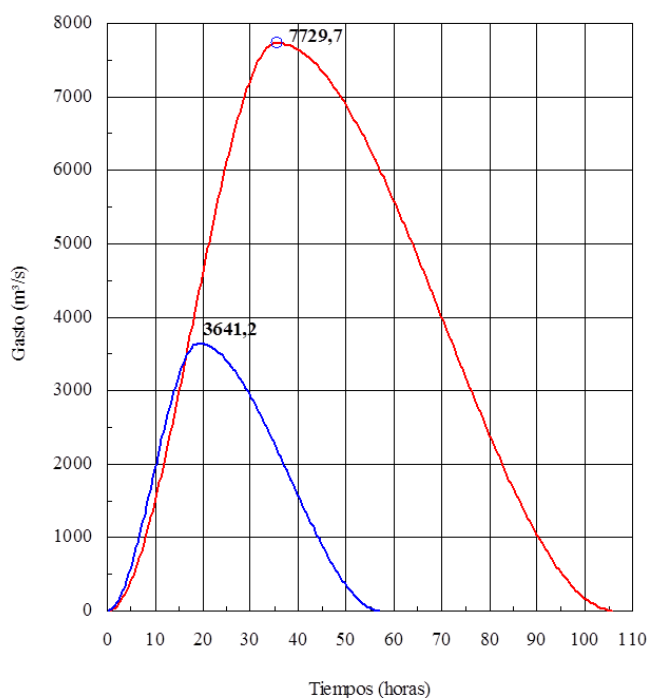
RESUMEN GENERAL						RESUMEN GENERAL					
POTENCIA [MW]	Volumen turbinado	GENERACIÓN MEDIA ANUAL [GWh]			F.P.	Volumen turbinado	GENERACIÓN MEDIA ANUAL [GWh]			F.P.	
		FIRME	SEC	TOTAL			FIRME	SEC	TOTAL		
<b>Funcionamiento Diario</b>						<b>Funcionamiento Mensual</b>					
5	347,56	43,57	2,83	46,40	1,00	325,56	43,44	0,03	43,47	0,99	
10	608,27	64,91	14,51	79,42	0,91	634,56	63,47	13,39	76,86	0,97	
15	777,81	64,91	37,31	102,22	0,78	866,28	63,48	37,00	100,48	0,88	
20	908,54	64,91	54,89	119,80	0,68	1 048,44	63,48	54,60	118,08	0,80	
25	1 011,81	64,91	68,77	133,68	0,61	1 179,72	63,48	68,05	131,53	0,72	
30	1 095,37	64,91	80,01	144,92	0,55	1 296,36	63,48	79,78	143,26	0,66	
35	1 157,03	64,91	88,30	153,21	0,50	1 402,92	63,48	90,10	153,58	0,61	
40	1 205,04	64,91	94,75	159,66	0,46	1 493,04	63,48	98,57	162,05	0,57	
45	1 246,52	64,91	100,33	165,24	0,42	1 569,12	63,48	105,82	169,30	0,53	
50	1 284,45	64,91	105,43	170,34	0,39	1 645,08	63,48	112,53	176,01	0,50	
55	1 319,55	64,91	110,15	175,06	0,36	1 708,44	63,48	118,62	182,10	0,48	
60	1 352,39	64,91	114,57	179,48	0,34	1 769,16	63,48	124,18	187,66	0,45	
65	1 383,45	64,91	118,74	183,65	0,32	1 822,56	63,48	129,36	192,84	0,43	
70	1 413,01	64,91	122,72	187,63	0,31	1 873,68	63,48	134,04	197,52	0,41	
75	1 441,10	64,91	126,49	191,40	0,29	1 919,28	63,48	138,16	201,64	0,39	
80	1 467,72	64,91	130,07	194,98	0,28	1 964,88	63,48	141,92	205,40	0,38	
85	1 492,96	64,91	133,47	198,38	0,27	2 010,48	63,48	145,53	209,01	0,36	
90	1 516,79	64,91	136,67	201,58	0,26	2 055,96	63,48	149,04	212,52	0,35	
95	1 539,38	64,91	139,71	204,62	0,25	2 101,56	63,48	152,38	215,86	0,34	
100	1 560,84	64,91	142,59	207,50	0,24	2 142,36	63,48	155,41	218,89	0,33	
110	1 599,74	64,91	147,83	212,74	0,22	2 204,40	63,48	160,27	223,75	0,31	
120	1 633,72	64,91	152,39	217,30	0,21	2 250,00	63,48	164,39	227,87	0,29	
130	1 663,19	64,91	156,36	221,27	0,19	2 295,60	63,48	168,28	231,76	0,27	
140	1 688,95	64,91	159,82	224,73	0,18	2 341,08	63,48	171,62	235,10	0,26	
150	1 712,13	64,91	162,94	227,85	0,17	2 386,68	63,48	174,56	238,04	0,24	
160	1 732,26	64,91	165,64	230,55	0,16	2 425,80	63,48	177,12	240,60	0,23	
170	1 749,84	64,91	168,01	232,92	0,16	2 456,16	63,48	179,33	242,81	0,22	
180	1 765,35	64,91	170,09	235,00	0,15	2 486,52	63,48	181,30	244,78	0,21	
190	1 778,88	64,91	171,91	236,82	0,14	2 513,04	63,48	183,08	246,56	0,20	
200	1 790,97	64,91	173,54	238,45	0,14	2 524,92	63,48	184,34	247,82	0,19	

### 2.2.7 Tránsito de avenidas

El estudio realizado en el 2011 arrojó los siguientes parámetros que caracterizan las avenidas en el sitio Amuchiltite:

Del análisis de gastos máximos mensuales al sitio del P.H. Amuchiltite, para la obra de desvío se pretende tomar los meses de estiaje los cuales comprenden los meses de Diciembre a Mayo, resultando el gasto máximo de 614 m<sup>3</sup>/s correspondiente a un período de retorno de 25 años, con el fin de conocer los gastos con los cuales se realizará el manejo del río para las obras preliminares y del análisis de gastos máximos anuales se tiene un gasto máximo de 4 443 m<sup>3</sup>/s para un periodo de retorno de 25 años, con el cual se dimensionará la obra de desvío definitiva durante la construcción del proyecto.

Para la obra de excedencias se seleccionó un periodo de retorno de 10 000 años, ya que se trata de una obra que tendrá un funcionamiento a lo largo de la vida de la presa, por tanto al gasto correspondiente a este período de retorno es de 15 501 m<sup>3</sup>/s, en la Figura 2-9 se muestra el análisis para los datos obtenidos al año 2007.



**Figura 2-9 Avenidas de diseño de las obras de desvío y de excedencias Amuchiltite**



### 3. INFORMACIÓN RECOPIADA Y ESTUDIOS REALIZADOS

Actualmente se cuenta con información de batimetrías correspondientes a los años 2006 y 2011, así como información hidrométrica y climatológica actualizada.

Además se cuenta con la curva elevaciones-áreas-capacidades con fecha de febrero de 1954, la batimetría de vaso realizada en octubre de 1979, por medio de sondeo sónico, batimetría del vaso realizada en abril de 1983, el estudio de ampliación C.H. Santa Rosa realizada en octubre de 1996, y la batimetría del vaso realizada en noviembre de 2006 como se muestra en la Tabla 3-1 y en la Figura 3-1.

**Tabla 3-1 Batimetría de 2006 complementada siguiendo la tendencia de la batimetría realizada en 1991**

Elev m	Área original 1964 ha	Cap. Original 1964 Mm <sup>3</sup>	Área 1979 ha	Cap. 1979 Mm <sup>3</sup>	Área 1991 ha	Cap. 1991 Mm <sup>3</sup>	Área 2006 ha	Cap. 2006 Mm <sup>3</sup>
636,8	0	0,00						
646,8	12	0,58						
651,8	35	2						
656,8	57	4						
664,8	128	11						
666,8	145	14						
671,8	204	23	0	0				
676,8	263	35	111	6	0	0		
681,8	327	49	155	13	60	4		
686,2	375	66	192	20	104	8	0	0
686,8	390	67	197	21	110	9	73	2
691,8	451	88	240	32	170	16	107	7
696,8	513	112	287	45	239	25	133	13
701,8	594	140	340	61	318	39	162	20
706,8	676	172	402	80	406	56	238	30
711,8	753	208	478	103	504	78	369	45
716,8	829	247	570	130	612	106	501	67
721,8	904	290	683	162	730	140	632	95
726,8	979	337	820	201	857	181	763	130
731,8	1061	388	986	247	994	230	894	172
733,3	1085	405	1042	262	1 036	246	1 025	186

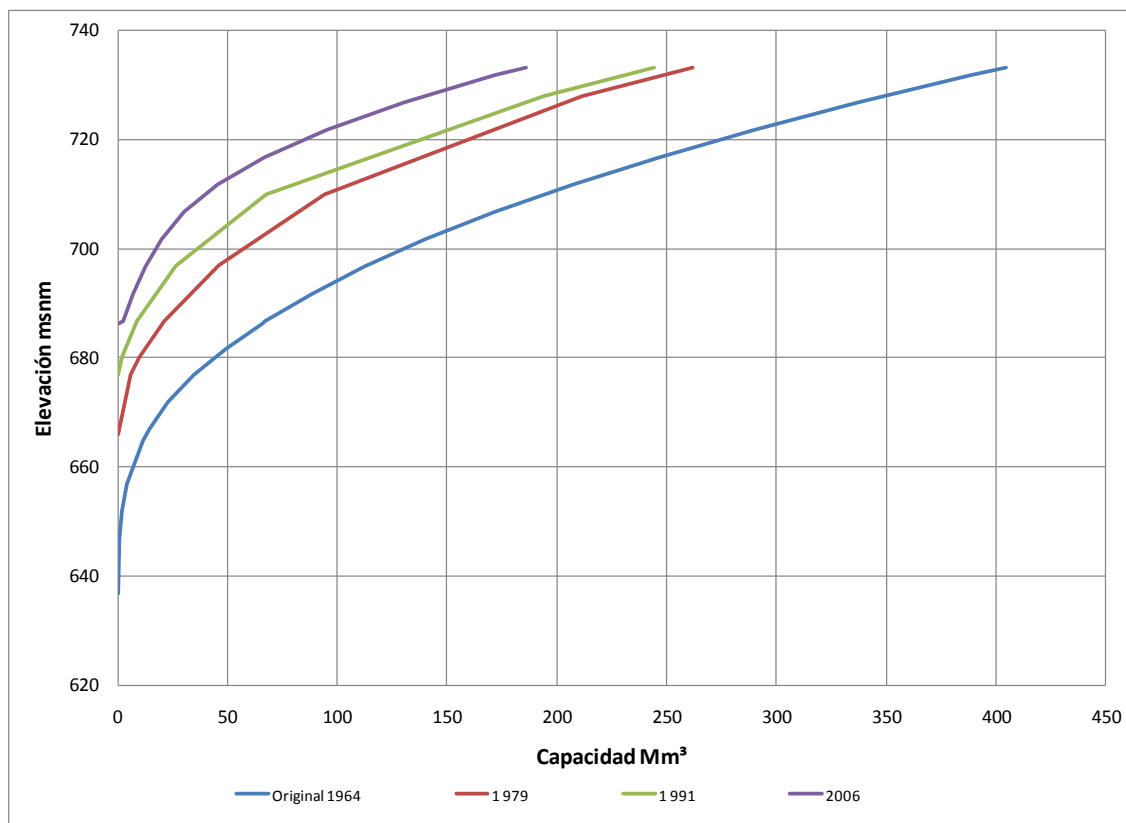


Figura 3-1 Curvas Elevaciones- capacidades con la batimetría realizada en 2006

### 3.1 Método “Área – Reducción”

Para la predicción del volumen de sedimentos se usó el Método “Área – Reducción”. Este método, de carácter empírico, distingue cuatro tipos distintos de embalses. Cada uno de ellos es analizado frente a un particular comportamiento en el proceso de sedimentación que se produce en el mismo.

Tipo	Depósito de sedimento en el embalse cercano a
I	Parte superior
II	Arriba de la parte media
III	Abajo de la parte media
IV	Fondo

Para determinar el tipo de vaso, se toma como referencia su forma a través de su curva de capacidades, analizada en un gráfico con coordenadas bilogarítmicas. De esta forma dicha curva se transforma en una o más rectas.

En función de la inversa de la pendiente (M) de esas rectas se identifican cuatro tipos de curvas características según las siguientes condiciones:

Inversa Pendiente (M)	Curva Tipo
4,5 a 3,5	I
3,5 a 2,5	II
2,5 a 1,5	III
1,5 a 1,0	IV

Los distintos tipos de curvas, determinadas a partir de estudios experimentales realizados en 30 almacenamientos en operación en los Estados Unidos de Norteamérica, permiten encuadrarlos en una o más de estas tipificaciones.

Para la reducción del área del vaso (Figura 3-2), Moody determinó funciones distintas para cada tipo, en función de la profundidad relativa del mismo, definida como una relación de su profundidad total. Dichas ecuaciones representan la distribución de los sedimentos en cada tipo de embalse de la siguiente forma.

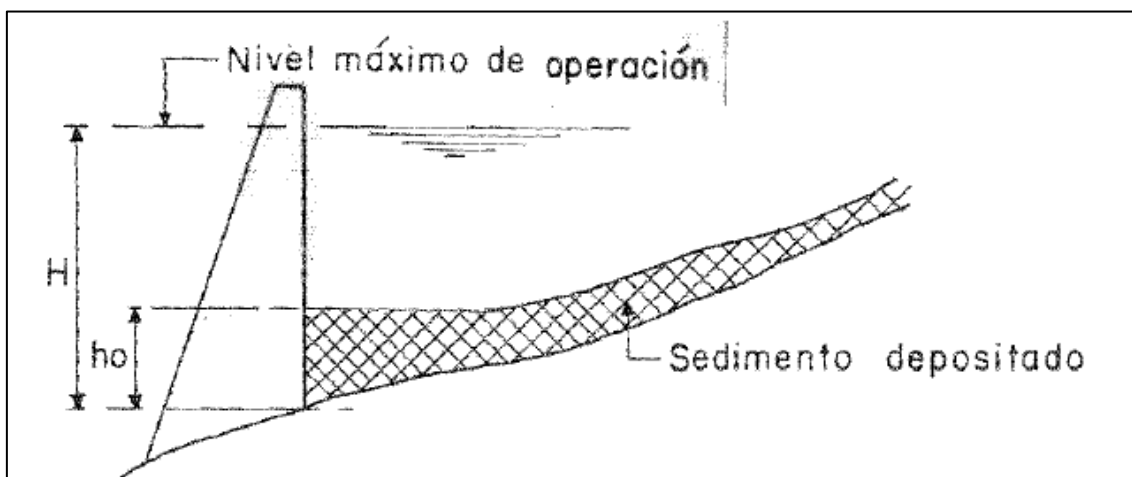


Figura 3-2 Representación de la sedimentación en un embalse

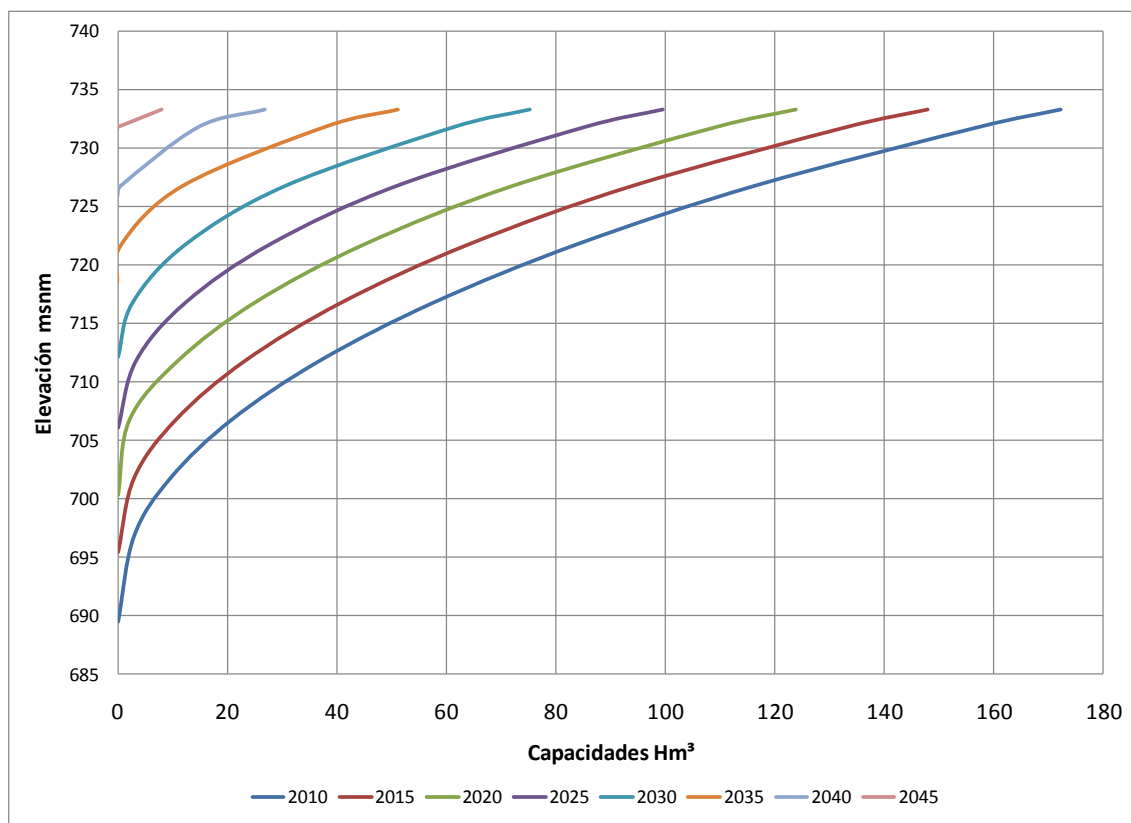
Para estimar la proyección del comportamiento temporal de los sedimentos, por ser la más reciente, se adoptó como batimetría base la levantada en el año 2006 y se presenta en la Tabla 3-2 a) y b) y en la Figura 3-3.

Tabla 3-2 a). Batimetría estimada

2010			2015			2020			2025		
Elevación msnm	Área ha	Capacidad Hm³	Elevación msnm	Área ha	Capacidad Hm³	Elevación msnm	Área ha	Capacidad Hm³	Elevación msnm	Área ha	Capacidad Hm³
689,5	0,00	0,00	695,5	0,00	0,00	700,4	0,00	0,00	706,1	0,00	0,00
696,8	90,45	2,90	701,8	105,93	2,93	706,8	123,71	2,08	711,8	121,46	3,23
701,8	177,65	9,60	706,8	201,71	10,62	711,8	225,75	10,82	716,8	241,18	12,30
706,8	271,40	20,83	711,8	300,21	23,17	716,8	338,25	24,92	721,8	379,23	27,81
711,8	366,74	36,79	716,8	407,55	40,87	721,8	465,89	45,03	726,8	549,93	51,05
716,8	469,48	57,69	721,8	527,76	64,25	726,8	620,79	72,20	731,8	818,44	85,26
721,8	583,04	84,01	726,8	671,37	94,24	731,8	858,50	109,18	733,3	1085,00	99,54
726,8	716,57	116,51	731,8	887,10	133,20	733,3	1085,00	123,77			
731,8	912,65	157,24	733,3	1085,00	148,00						
733,3	1085,00	172,22									

**b). Batimetría estimada**

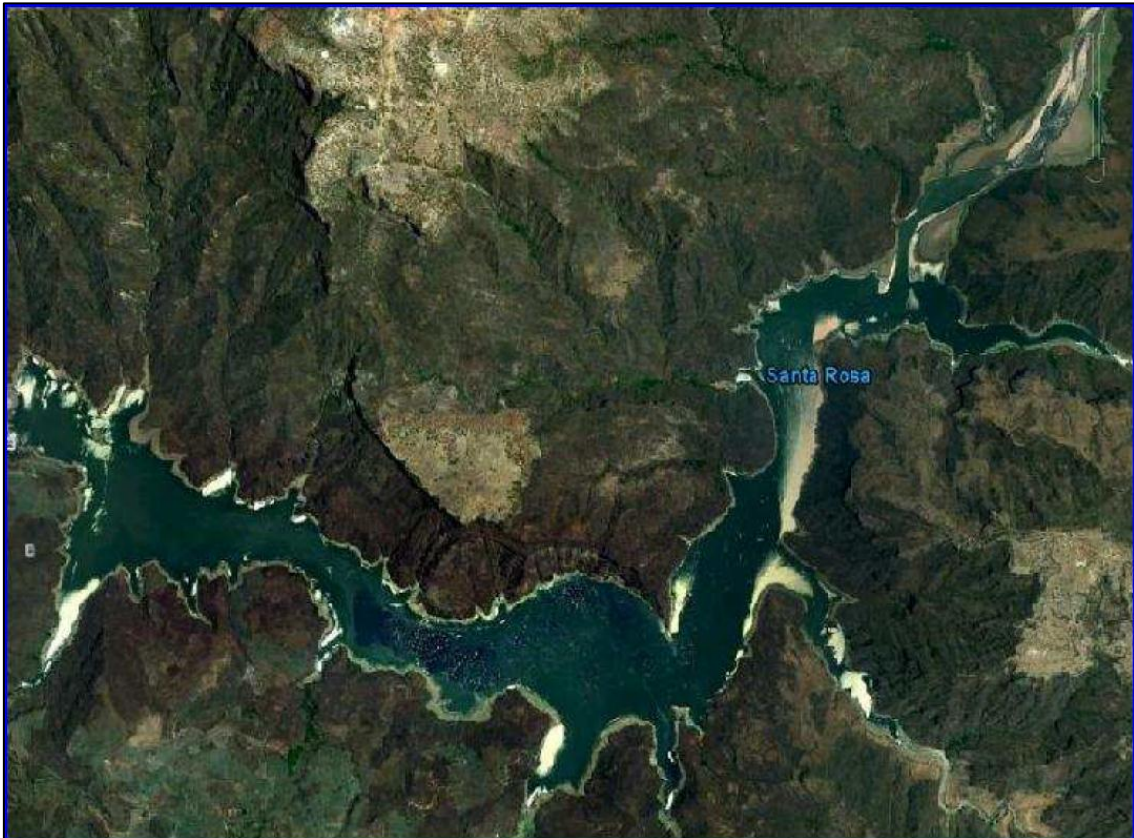
2030			2035			2040			2045		
Elevación msnm	Área ha	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Elevación msnm	Área ha	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Elevación msnm	Área ha	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Elevación msnm	Área ha	Capacidad Hm <sup>3</sup>
712,2	0,00	0,00	718,5	0,00	0,00	726,0	0,00	0,00	731,8	0,00	0,00
716,8	119,46	2,62	721,8	114,40	0,78	726,8	52,00	0,54	733,3	1085,00	8,14
721,8	270,57	12,38	726,8	333,40	11,98	731,8	536,96	14,68			
726,8	461,08	30,67	731,8	696,04	37,72	733,3	1085,00	26,85			
731,8	768,22	61,40	733,3	1085,00	51,08						
733,3	1085,00	75,31									



**Figura 3-3 Predicción de sedimentos con base a la batimetría realizada en 2006**

**3.2 Batimetría 2011**

La Batimetría 2011 se realizó en el embalse de Santa Rosa Figura 3-4 para generar información actual del azolve acumulado, esto para el análisis de los cambios en el fondo de la presa en comparación con datos y/o batimetrías anteriores. La información necesaria se recabó para su estudio y análisis, por medio de levantamientos batimétricos y topográficos, para con ella generar la configuración del fondo de la presa y con el espejo de agua para referir la delimitación de la batimetría.



**Figura 3-4 Vista en Google de la zona de estudio de la presa Sta. Rosa**

### **3.3 Caracterización de los azolves del embalse de la presa Santa Rosa**

Durante esta etapa se realizaron estudios para caracterizar los azolves depositados en el vaso de la presa Santa Rosa, esto con el fin de conocer sus características mecánicas y físico-químicas, y así sustentar el manejo que se les darán y las posibles obras y trabajos propuesto para su remoción.

#### **3.3.1 Resultados del laboratorio de mecánica de suelos**

La exploración y las pruebas de laboratorio realizadas se encaminaron a caracterizar geotécnicamente los materiales recuperados del embalse de la presa, como primera etapa del estudio geotécnico a nivel prefactibilidad.

Las elevaciones y espesores de los materiales detectados en los sondeos son los siguientes:

Con base en los resultados de los trabajos de campo y de laboratorio, se definieron los materiales en el embalse en forma general, en el sondeo SM-2 localizado en una zona cercana a la cortina, se observa que el azolve de 47 m de espesor está constituido por arcillas de consistencia muy blanda y, a partir de los 75 m de profundidad, su consistencia varía de blanda a media. En el sondeo SM-1, ubicado en la parte central del

vaso, el azolve de aproximadamente 47 m de espesor lo, constituyen intercalaciones de arcillas de consistencia muy blanda y arenas arcillosas. Finalmente, en el extremo del embalse (SM-4), el azolve de 6,65 m de espesor está conformado por arenas arcillosas de compacidad muy suelta. . En las Figura 3-5 y Figura 3-6 se muestran algunos de los resultados obtenidos y los resultados completos del estudio están en el anexo A.

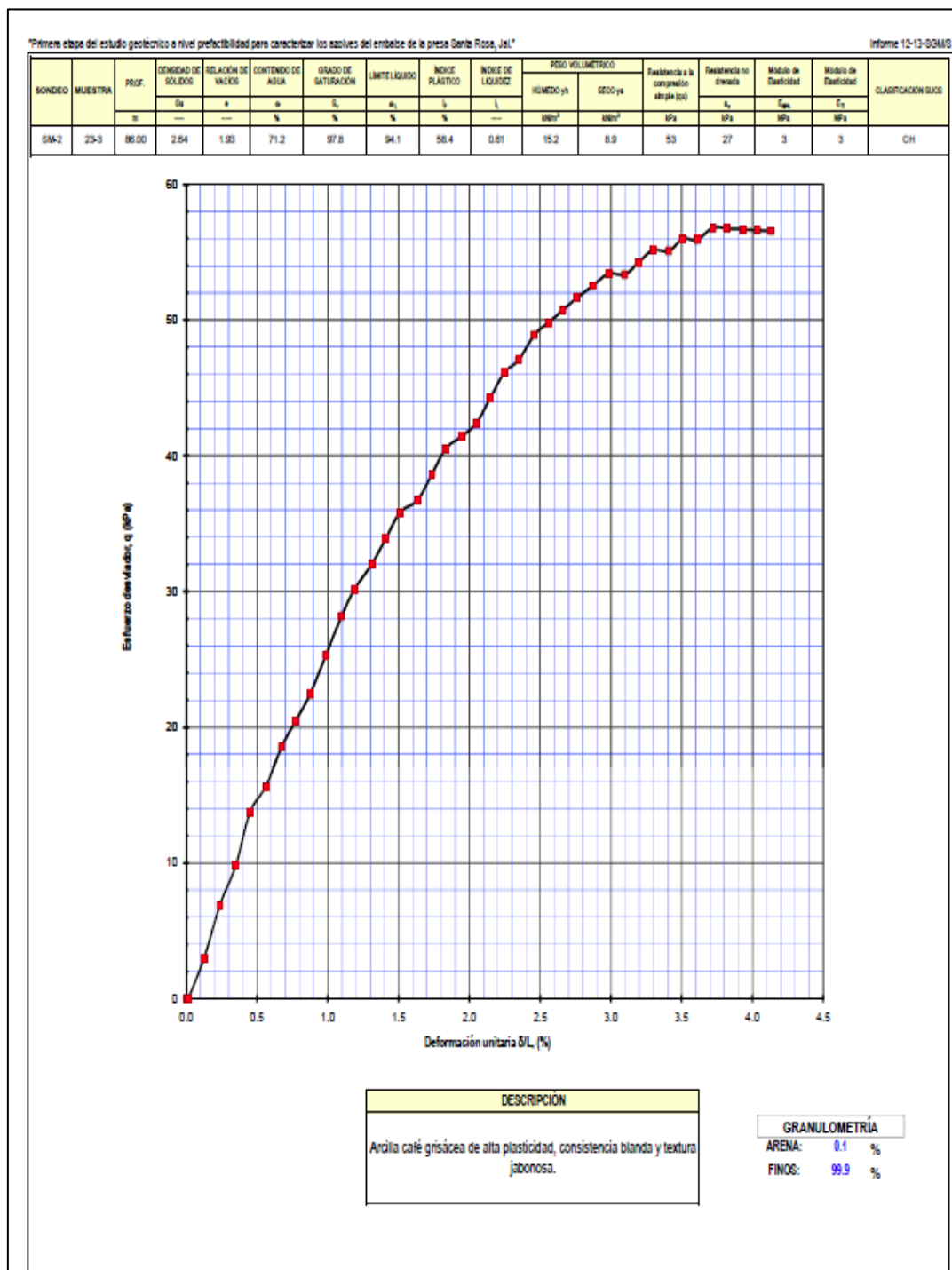


Figura 3-5 Resultados de los estudios realizados por el laboratorio de mecánica de suelos.

Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

No. DE LABORATORIO:	67002-4	FECHA DE INFORME:	15/12/2011
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:	M-1 (25.95-29.65)		
FECHA Y HORA DE MUESTREO:	15/10/2011		
MUESTREADO POR:	REMITIDA		
FECHA RECEPCION:	02/11/2011	MATRIZ:	ASOLVE

PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	I%	ANALIZADO
<b>CROMATOGRAFIA</b>					
NITRITOS	EPA 300-1993	mg/Kg	5.93	8.59	10/11/2011 ME1
NITRATOS	EPA 300-1993	mg/Kg	337.99	7.69	10/11/2011 ME1
AMONIO	NOM-021-SEMARNAT-2000	mg/Kg	408.78	0.73	16/11/2011 FQ
<b>FISICOQUIMICOS</b>					
CARBONO ORGANICO TOTAL	NOM-021-SEMARNAT-2000	%	1.120	5.00	28/10/2011 FQ2
MATERIA ORGANICA	NOM-021-SEMARNAT-2000	%	1.93	7.52	28/10/2011 FQ2
NITROGENO ORGANICO	NMX-AA-24-1984	%	0.05	2.20	17/11/2011 FQ2
OBSERVACIONES:					

No. DE LABORATORIO:	67002-5	FECHA DE INFORME:	15/12/2011
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:	M-2 (33.15-40.55)		
FECHA Y HORA DE MUESTREO:	18/10/2011		
MUESTREADO POR:	REMITIDA		
FECHA RECEPCION:	02/11/2011	MATRIZ:	ASOLVE

PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	I%	ANALIZADO
<b>CROMATOGRAFIA</b>					
NITRITOS	EPA 300-1993	mg/Kg	6.60	8.59	10/11/2011 ME1
NITRATOS	EPA 300-1993	mg/Kg	55.15	7.69	10/11/2011 ME1
AMONIO	NOM-021-SEMARNAT-2000	mg/Kg	673.39	0.73	16/11/2011 FQ
<b>FISICOQUIMICOS</b>					
CARBONO ORGANICO TOTAL	NOM-021-SEMARNAT-2000	%	2.060	5.00	28/10/2011 FQ2
MATERIA ORGANICA	NOM-021-SEMARNAT-2000	%	3.55	7.52	28/10/2011 FQ2
NITROGENO ORGANICO	NMX-AA-24-1984	%	0.12	2.20	17/11/2011 FQ2

No. DE LABORATORIO:	67002-6	FECHA DE INFORME:	15/12/2011
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:	M-3 (42.15-54.45)		
FECHA Y HORA DE MUESTREO:	20/10/2011		
MUESTREADO POR:	REMITIDA		
FECHA RECEPCION:	02/11/2011	MATRIZ:	ASOLVE

PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	I%	ANALIZADO
-----------	------------------	----------	-----------	----	-----------

No. DE LABORATORIO:	67002-6	FECHA DE INFORME:	15/12/2011
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:	M-3 (42.15-54.45)		
FECHA Y HORA DE MUESTREO:	20/10/2011		
MUESTREADO POR:	REMITIDA		
FECHA RECEPCION:	02/11/2011	MATRIZ:	ASOLVE

PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	I%	ANALIZADO
<b>CROMATOGRAFIA</b>					
NITRITOS	EPA 300-1993	mg/Kg	5.05	8.59	10/11/2011 ME1
NITRATOS	EPA 300-1993	mg/Kg	71.88	7.69	10/11/2011 ME1
AMONIO	NOM-021-SEMARNAT-2000	mg/Kg	703.00	0.73	16/11/2011 FQ
<b>FISICOQUIMICOS</b>					
CARBONO ORGANICO TOTAL	NOM-021-SEMARNAT-2000	%	1.450	5.00	28/10/2011 FQ2
MATERIA ORGANICA	NOM-021-SEMARNAT-2000	%	2.50	7.52	28/10/2011 FQ2
NITROGENO ORGANICO	NMX-AA-24-1984	%	0.09	2.20	17/11/2011 FQ2

Figura 3-6 Resultados de los análisis CRETIB.



Con base en los estudios se concluye que los materiales depositados en el embalse no se encuentran consolidados de manera importante, lo cual se observó al momento de realizar los sondeos para extraer las muestras y se comprobó con las pruebas realizadas en el laboratorio de mecánica de suelos, siendo estos conformados principalmente por arenas y arcillas saturadas con poca resistencia al corte con excepción de la parte profunda del sondeo SM-2.

De los resultados obtenidos se propusieron alternativas para el desazolve que se consideraron poco viables durante el desarrollo del proyecto, ya sea por la gran cantidad de infraestructura requerida o por el poco azolve que se podría remover por estos medios, ya sea retirando el azolve por medio de maquinaria o con bombeos, siendo estas propuestas una mejor alternativa para el mantenimiento posterior del embalse con una cortina sobreelevada.

Cabe hacer mención que de los análisis realizados para determinar las características CRETIB de los residuos, no se encontraron características de Corrosividad, Reactividad, Inflamabilidad, Explosividad, Toxicidad al ambiente y Biológicos-Infecciosos, fuera del rango permitido por la Norma correspondiente, con la excepción de un punto en la entrada del embalse en un único muestreo en el que el metal pesado Cadmio salió de los parámetros permitidos en la muestra once del sondeo número 4 (M-11, SM-4) y la alta presencia de agentes biológicos conocidos como coliformes fecales, además de una alta carga de materia orgánica, nitritos y nitratos.

## **4. SELECCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL ESQUEMA GENERAL DE OBRAS**

### **4.1 Revisión, optimización y adecuación de los esquemas existentes para el P.H. Amuchiltite y la ampliación de la C.H. Santa Rosa**

Debido a la situación actual de la C. H. Santa Rosa se identificó la necesidad de realizar alguna acción correctiva o de alguna índole similar para su mejora, básicamente se identificaron 3 posibles soluciones: el desazolve del embalse, la construcción de un túnel de carga para generación y la construcción de un nuevo proyecto en algún sitio entre la cortina y el vaso del P.H. La Yesca.

A partir de la visita realizada a los sitios alternativos de la cortina del proyecto hidroeléctrico Santa rosa y a la ubicación del proyecto Amuchiltite se consideró viable el sitio actualmente en estudio y se decidió a estudiar las posibilidades de distintas elevaciones para las cortinas siendo finalmente elegida la de baja altura con una elevación de corona a 644.90 msnm.

En lo respectivo al desazolve, se encuentra actualmente a nivel de estudio de alternativas para este, quedando descartado el uso del desagüe de fondo de la cortina debido a los malos resultados que ha dado en otros sitios, otra de las posibilidades es la construcción de un túnel o canal, para así por medio del llamado “flushing” desalojar los sedimentos que se han acumulado en el vaso. Finalmente se requiere revisar la posibilidad de hacer un dragado con su consecuente movimiento y disposición del material obtenido, aunque por los altos costos que este implica además de la dificultad para la disposición de los sedimentos esta alternativa se considera poco viable.

### **4.2 Túnel de carga**

Para esta alternativa se planea la construcción de un túnel de carga por la margen derecha de 16 km de longitud que usará el vaso de la actual Central “Manuel M. Diéguez” Santa Rosa para regular y suministrar carga a una casa de máquinas a cielo abierto que desfugaría en la cola del futuro embalse de La Yesca y que tendrá un desfogue a la elevación 580 msnm, Figura 4-1, Figura 4-2, Figura 4-3, Figura 4-4, Figura 4-5, Figura 4-6, Figura 4-7 y Figura 4-8.

# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

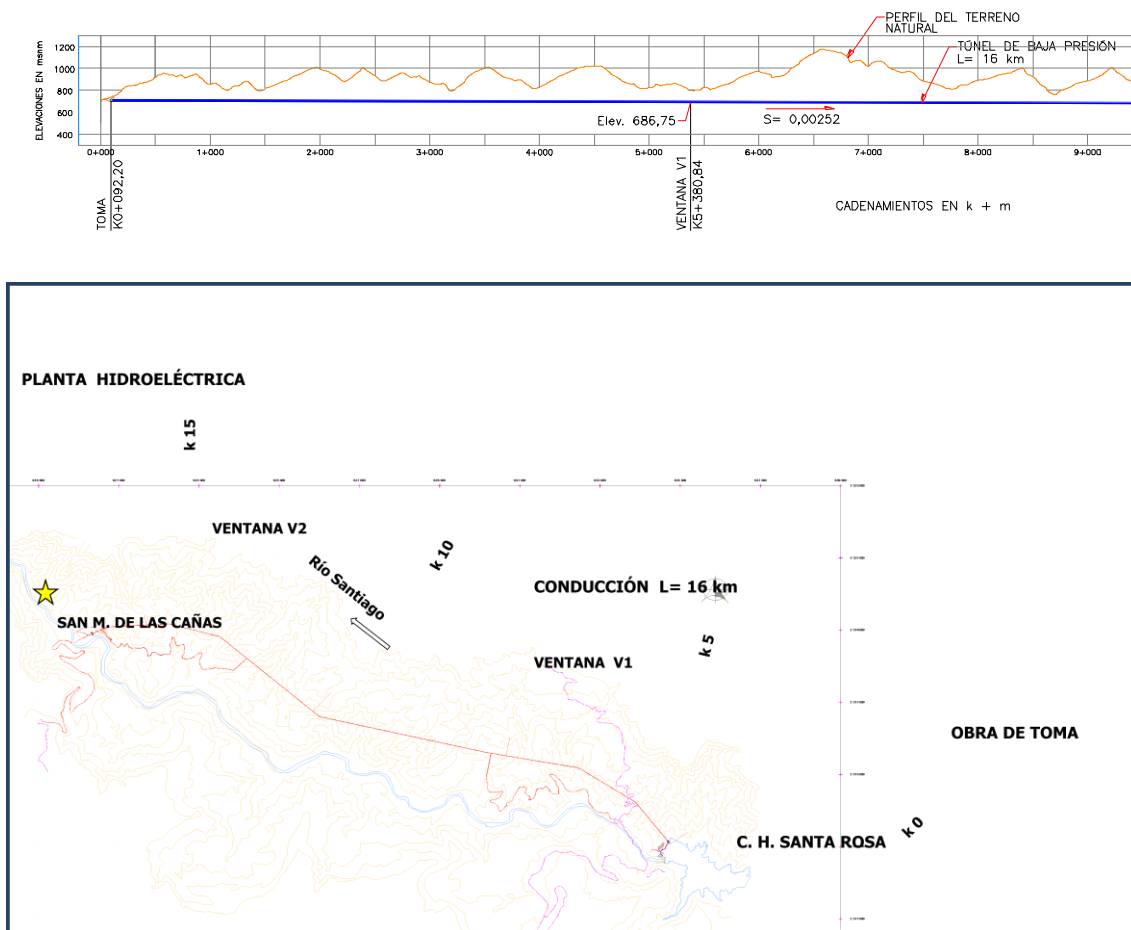
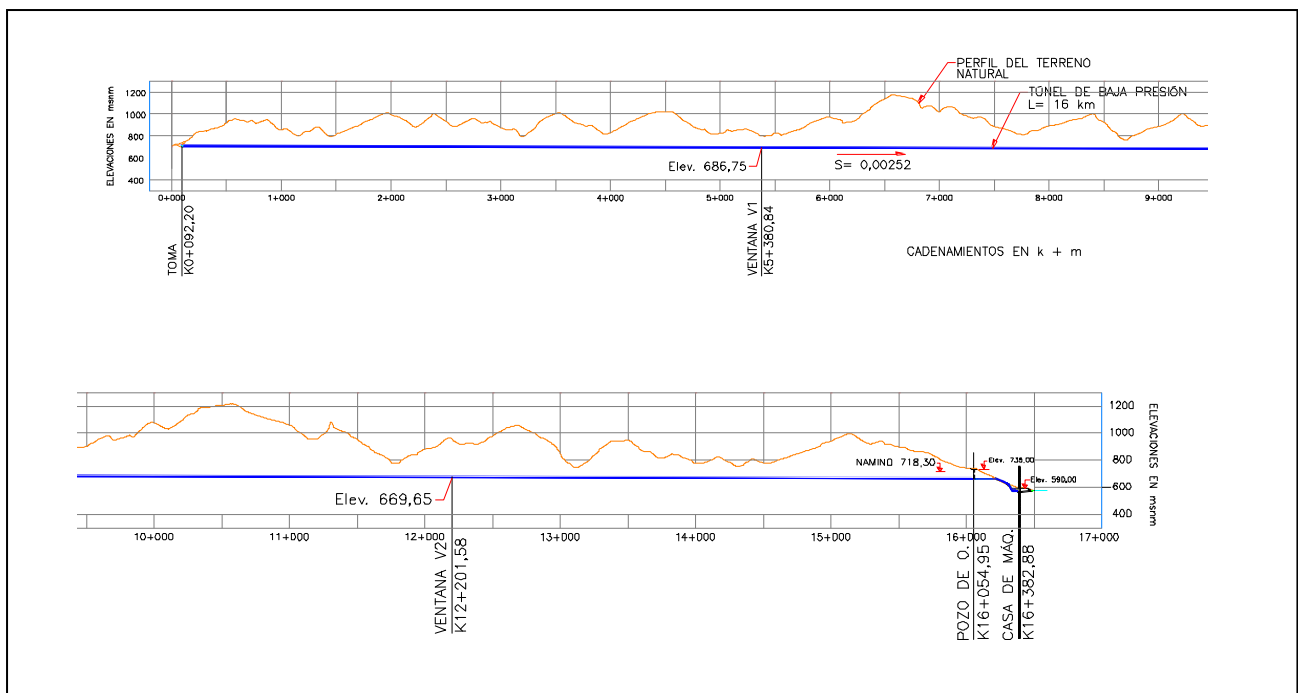
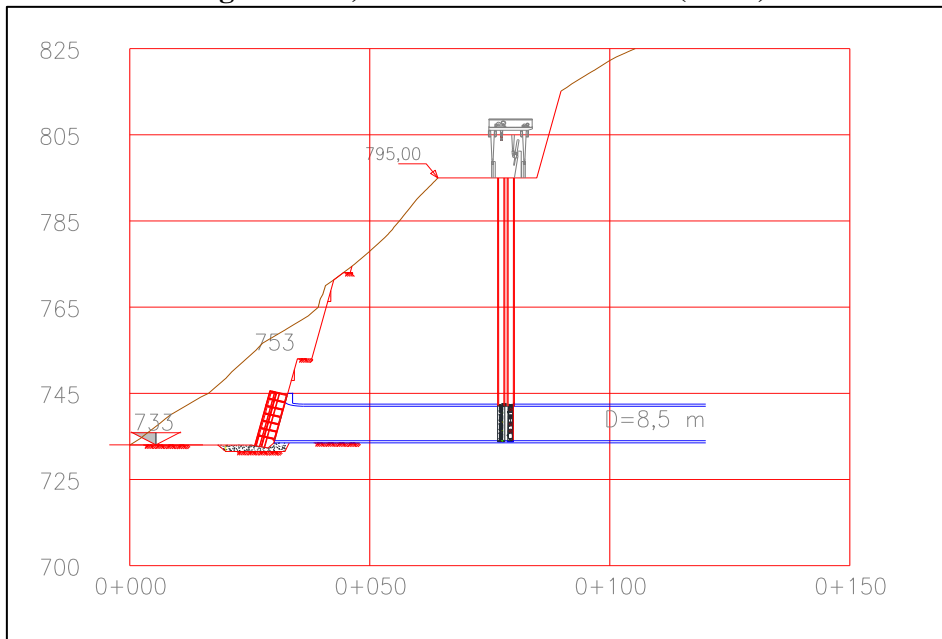


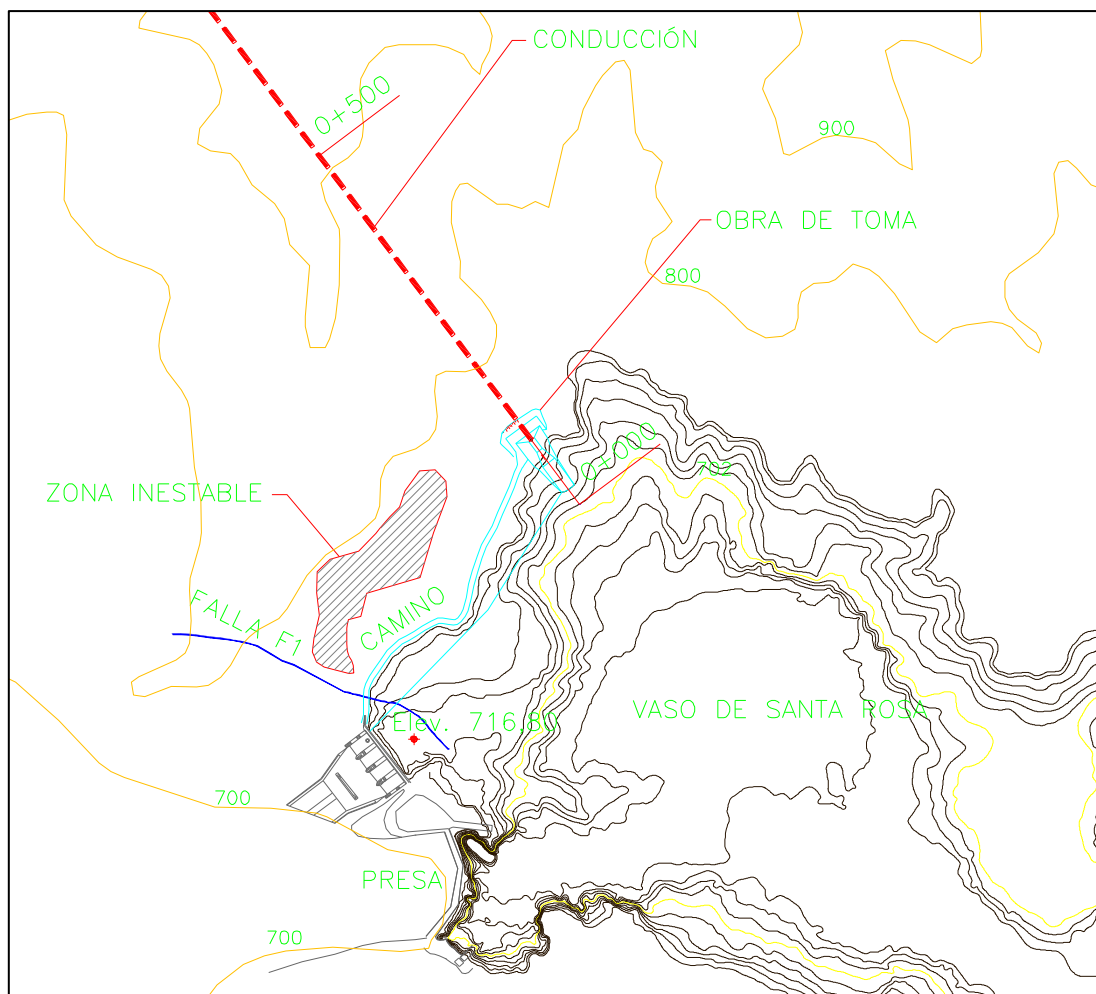
Figura 4-1 Vista de la conducción propuesta para reutilizar el vaso de la presa



**Figura 4-2 a) Perfil de la conducción (inicio)**



**Figura 4-3 Obra de toma para la conducción propuesta**



**Figura 4-4 Batimetría y ubicación de la obra de toma**

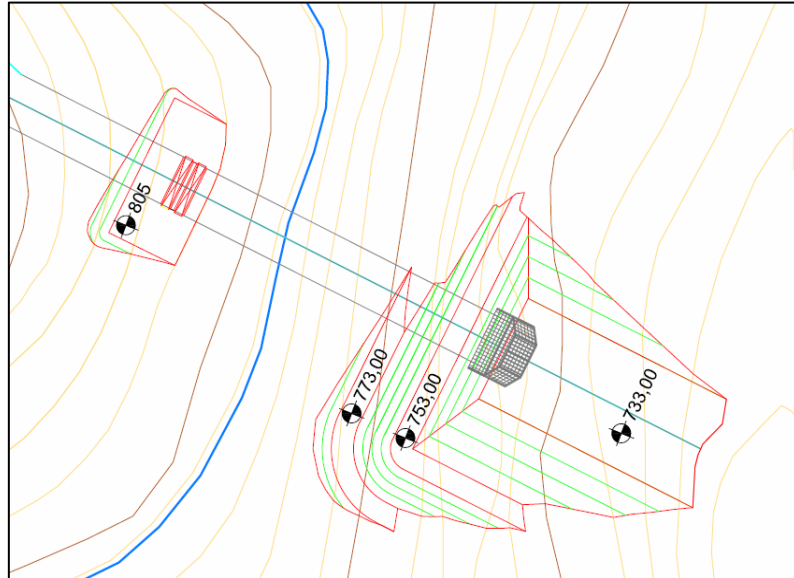


Figura 4-5 planta de la obra de toma propuesta

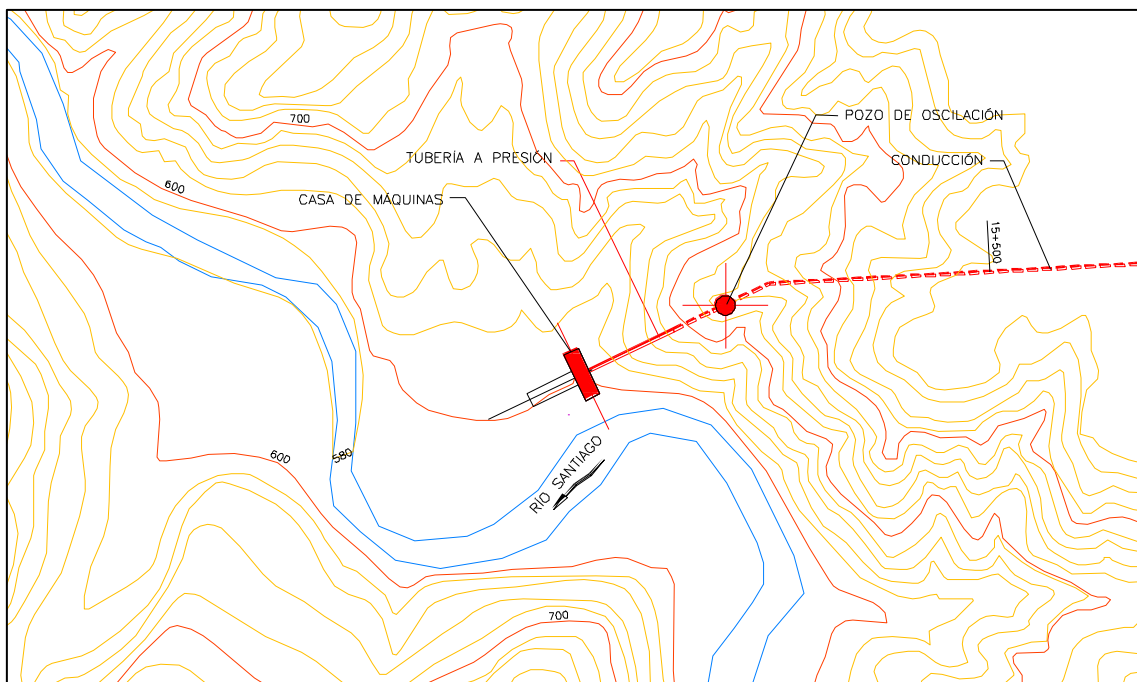


Figura 4-6 Ubicación del desfogue y casa de maquinas

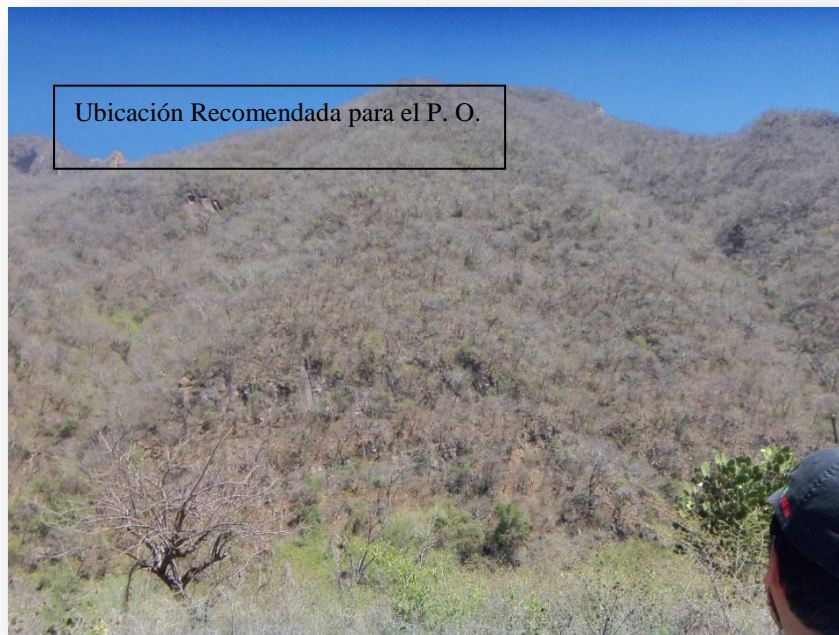


Figura 4-7 Sitio propuesto para la ubicación del pozo de oscilación

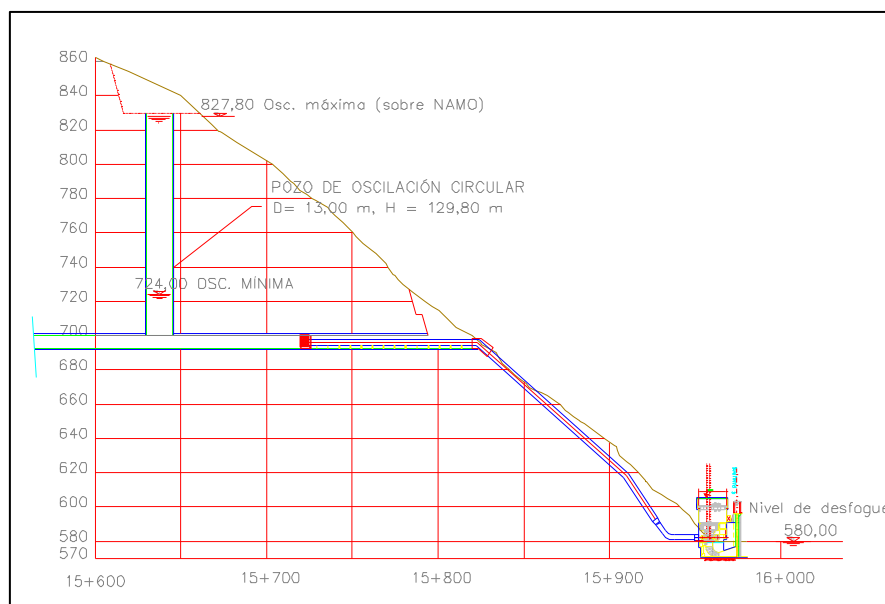


Figura 4-8 Perfil de la obra de generación y pozo de oscilación

La alternativa de un túnel de carga se planteó para usar el embalse de la presa Sta. Rosa como un tanque regulador a pesar de su alto nivel de azolves, haciendo que la planta de generación propuesta trabaje al hilo del agua, usando la poca capacidad del vaso para regular las entradas.

Para su ubicación se tomó en cuenta principalmente la carga disponible entre el vaso de Santa Rosa y el que se generará una vez concluido el P.H. La Yesca. Para ésta opción se

deben considerar los procesos de construcción asociados, los beneficios, las dificultades de la construcción de un túnel de 7m de diametro durante 16 km, el que si bien sirve para generar energía con la carga disponible en el sitio no resuelve nada con respecto al azolve del vaso dejando que este se continúe depositando en el sitio y que en el futuro continúe generando problemas, mención aparte se debe tener en cuenta que se cambiará el régimen de escurrimiento del río ya que al captarla y depositarla 16 km aguas abajo se dejará dicho tramo con un régimen distinto el cual deberá ser atenuado correctamente, dejando el gasto ecológico y promoviendo otras medidas de mitigación.

Un punto a tomar en cuenta es la zona inestable y la falla que se encuentra entre la obra de toma propuesta y el vertedor actual de la C.H. Santa Rosa, como se puede ver en la Figura 4.4, y que podría ocasionar problemas durante la construcción si no se caracteriza adecuadamente.

Este arreglo del túnel de conducción de baja carga se usó para las opciones estudiadas sobreelevando y sin sobreelevar la cortina, teniendo variaciones en la elevación de la obra de toma y variando algunos conceptos para la evaluación económica respectiva.

### **4.3 Propuesta de un nuevo aprovechamiento P. H. Amuchiltite**

Se consideró un funcionamiento en cascada con la opción de sobreelevar la cortina y generar a pie de presa en conjunto con una presa más baja (70m) en el sitio denominado Amuchiltite, con generación a pie de presa.

Para esta alternativa se realizó el funcionamiento de vaso en forma de cascada tomando en cuenta Santa Rosa, asimismo se tienen esquemas de obra, cálculos de la volumetría preliminares así como también el presupuesto correspondiente

#### **4.3.1 Obra de desvío**

En primer lugar, es fundamental analizar la necesidad real de que exista o no una obra de desvío en este proyecto en particular. Existen principalmente dos razones para pensar en la no proyección de una obra de desvío para este aprovechamiento. Por un lado, está propuesta una obra de contención de Concreto Compactado con Rodillos (CCR) y por otro lado, se cuenta aguas arriba con la central hidroeléctrica Santa Rosa que, con una finalidad precisa, podría considerarse como la estructura de control de escurrimientos y avenidas en el sitio de Amuchiltite.

La presas construidas bajo el procedimiento constructivo y con los materiales requeridos para la formación de la estructuras de Concreto Compactado con Rodillos (CCR), no sufren daños significativos en caso de presentarse una avenida durante su construcción, aún cuando éstas fuesen sobrepasadas por el flujo. Tal vez el daño más relevante podría considerarse el tiempo durante el cual no se podría continuar con la construcción de la cortina, pero dentro de una planeación adecuada del proceso



constructivo de las obras del proyecto hidroeléctrico, podría tenerse alguna actividad a desarrollar mientras pasa la avenida. Los recursos humanos y materiales con la previsión adecuada no se considera que tengan riesgo significativo.

En la central hidroeléctrica Santa Rosa se regulan los escurrimientos y las avenidas generadas hasta esta central, aún cuando su capacidad de almacenamiento ha sido mermada por el depósito de azolves. En temporada de estiaje los escurrimientos y las avenidas se reducen significativamente por lo cual cabe la posibilidad de contener dentro del vaso de la central los escurrimientos y avenidas en forma total o parcial. La cuenca de captación hasta la central hidroeléctrica es de (34 724 km<sup>2</sup>) y hasta el sitio de captación de este proyecto es de (34 993 km<sup>2</sup>), la diferencia es de únicamente 269 km<sup>2</sup>, es decir ni el 1 %. Por lo tanto y para fines prácticos, se consideran los resultados en la estación hidrométrica Santa Rosa válidos para el sitio del proyecto Amuchiltite.

Con referencia al almacenamiento disponible en la central hidroeléctrica, se agrega la capacidad creciente del vaso a formarse con la construcción de la cortina del proyecto hidroeléctrico Amuchiltite.

Por otra parte se tiene previsto proyectar, aproximadamente al centro del cauce, las obras de desfogue y de ser necesario el desarenador para la central. Inicialmente podría utilizarse esta estructura para dejar pasar el volumen escurrido hasta el sitio del proyecto. A reserva de confirmar sus dimensiones con el análisis hidráulico correspondiente, se le considera inicialmente de 10 m de ancho y 10 m de altura.

#### **4.3.2 Gasto sobre el cauce del río Santiago susceptible a ser desviado en el sitio del proyecto Amuchiltite**

La finalidad de este análisis es conocer el gasto que puede ser, por un lado almacenado en la central hidroeléctrica Santa Rosa sin permitir su salida, y por otro, el gasto para el cual se tendrían que dimensionar los conductos del desvío. El gasto que podría fluir por el río Santiago hasta el sitio del proyecto Amuchiltite podría suscribirse de dos maneras: temporadas de lluvias y estiaje.

En cuanto a la temporada de lluvias, definitivamente el valor donde se centra la importancia de este flujo es el obtenido del análisis bivariado de la avenida de diseño de la obra de desvío  $Q_{\text{máx.}} = 4\,443 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En temporada de estiaje, se pretende conocer la posibilidad de captar y almacenar el gasto por un corto período (mientras se levanta la cortina hasta una altura de 10 m -38 días). Por conveniencia este período debe tener por objetivo la optimización de las obras, por lo tanto debe considerarse su construcción dentro del estiaje (enero-mayo).

En la Tabla 4-1 el análisis de gastos máximos de diseño. En este cuadro se muestran los meses asociados a los gastos máximos que se podrían llegar a presentar. En este sentido, convendría iniciar la construcción de la cortina en el mes de febrero, que es el mes, en promedio, con menores escurrimientos.

**Tabla 4-1 Gastos de Diseño para el P. H. Amuchiltite en m<sup>3</sup>/s**

MES	Periodo de Retorno (Tr ), en Años.									
	5	10	15	20	25	50	100	500	1 000	5 000
ENE	108,71	130,42	152,34	234,40	560,02	1 398,01	2 129,11	3 715,38	4 382,21	5 919,49
FEB	102,32	127,64	157,16	224,79	301,43	1 049,24	673,60	1 049,24	1 207,59	1 572,66
MAR	106,88	133,10	168,60	394,03	612,77	2 698,06	1 650,47	2 698,06	3 139,34	4 149,87
ABR	115,90	141,84	163,58	188,39	220,77	793,42	500,89	793,42	916,74	1 201,04
MAY	115,67	139,88	165,28	206,09	254,24	389,62	508,16	764,86	873,21	1 121,34
JUN	136,49	360,95	483,38	559,04	614,35	775,85	929,37	1 275,40	1 422,90	1 764,40
JUL	1 068,81	1 530,98	1 801,32	1 993,14	2 141,92	2 604,08	3 066,24	4 139,36	4 601,52	5 674,63
AGO	1 250,73	2 049,34	2 621,90	3 081,20	3 470,37	4 877,55	6 624,46	12 313,49	15 671,89	25 610,06
SEP	997,65	1 539,83	2 365,17	2 575,91	2 701,29	3 022,39	3 303,79	3 914,49	4 171,56	4 769,11
OCT	839,80	1 226,95	1 412,87	1 537,61	1 631,75	1 915,23	2 191,41	2 822,16	3 093,01	3 718,03
NOV	148,14	1 139,81	1 273,60	1 342,53	1 390,60	1 525,49	1 650,34	1 927,63	2 046,11	2 317,69
DIC	114,34	136,71	158,85	203,98	305,99	599,18	855,00	1 409,41	1 642,94	2 186,65
Max Mens	1 250,73	2 049,34	2 621,90	3 081,20	3 470,37	4 877,55	6 624,46	12 313,49	15 671,89	25 610,06
Tr	5	10	20	25	50	100	500	2 000	5 000	10 000
ANUAL	1 774	2 574	3 938	4 443	5 909	7 255	10 204	12 689	14 324	15 501

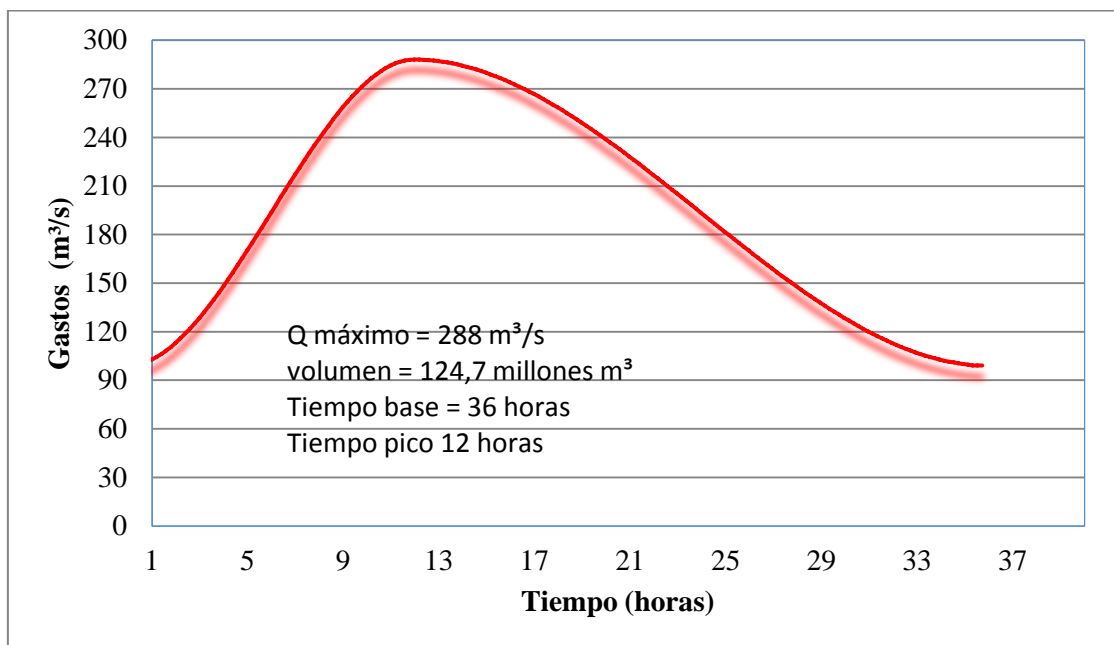
Dado el tipo de cortina propuesta se estima que no es necesaria la construcción formal de una obra de desvío para este proyecto hidroeléctrico. Se considera suficiente utilizar la estructura que habrá de ser finalmente desagüe de fondo y/o desarenador para desalojar los volúmenes escurridos hasta el sitio. Ésta estructura se encontraría integrada al cuerpo de la cortina; para dar las dimensiones propuestas a esta estructura, basta con elevar la cortina 10 metros y colocarle una compuerta de operación.

El gasto de la avenida es el estimado en el informe hidrológico es de 4 442,64 m<sup>3</sup>/s y el volumen de 576,88 millones m<sup>3</sup>. Ésta es la avenida que debe considerarse a transitar durante la construcción de la obra, donde a su vez debe considerarse la ejecución total de la cortina Figura 4-9.

#### 4.3.3 Análisis de la obra de desvío

La obra de desvío como estructura para el desalojo de los escurrimientos generados en la cuenca durante la temporada de estiaje, es necesario considerar una alcantarilla, misma obra que tendrá la finalidad de eliminar los sedimentos depositados en el fondo del vaso; por lo tanto, esta obra también será referida en lo sucesivo como desarenador, para hacer referencia a esta obra se mencionará de manera indistinta como desvío, alcantarilla o desarenador, procurando hacerlo conforme a su orden de funcionalidad.

Por otro lado, esta obra también puede operar para cubrir los objetivos de toma ecológica y desagüe de fondo.



**Figura 4-9 Avenida máxima de estiaje con Tr = 100 años del proyecto hidroeléctrico Amuchiltite**

#### 4.3.4 Análisis hidráulico

Se requiere analizar el funcionamiento hidráulico de la alcantarilla, la cual se encuentra alojada sobre la cortina, tomando como base las avenidas presentadas en la época de estiaje, con el fin de verificar la factibilidad de las dimensiones propuestas así como la suficiencia de la altura de la cortina levantada hasta ese momento.

El análisis hidráulico de la alcantarilla se llevó a cabo con las plataformas de software: Arc View y Hec RAS, la primera con el fin de obtener el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y así tener georreferenciada la información.

Se analizaron dos escenarios:

El primero considera la operación de la alcantarilla como la estructura requerida para el desalajo del volumen escurrido en época de estiaje. Dentro del mismo escenario se tienen dos casos:

- El primero se refiere a la avenida determinada para un período de retorno de 5 años.
- El segundo para una avenida asignada a un período de retorno de 100 años, la revisión del desarenador se realiza con la avenida obtenida para un período de retorno de 50 años y estimada a través de las avenidas máximas anuales.

Es suficiente realizar el análisis con la avenida asignada a un período de retorno de 100 años. El gasto de esta avenida es de 288 m<sup>3</sup>/s y su volumen de 124,7 m<sup>3</sup>/s. bajo estas condiciones es que se opera el programa Hec RAS.

Las condiciones que deben cumplirse con el modelo propuesto son:

1) La estructura (como alcantarilla) debe tener la capacidad para desalojar la avenida de gasto pico de 288 m<sup>3</sup>/s y volumen de 127,7 millones de m<sup>3</sup> sin que el nivel del agua creado por el embalse rebase la altura de la cortina alcanzada hasta el momento (9 m).

2) La velocidad mínima a registrarse como desarenador debe ser de 15 m/s.

Las dimensiones propuestas para la alcantarilla son: 12 m de ancho por 9 m de altura, por lo tanto, la cortina tendrá que estar construida al menos a la elevación correspondiente a esta altura (9 m).

**Tabla 4-2 Resultados del análisis hidráulico de la alcantarilla del proyecto hidroeléctrico Amuchiltite**

Elevación del piso de la estructura (m)	589	Elevación de la corona de la cortina (m)	644,9
Gasto total (m <sup>3</sup> /s)	2618,14	Tirante normal (m)	9
Conductos	1	Tirante crítico (m)	9
Gasto (m <sup>3</sup> /s)	2618,14	Longitud del conducto lleno (m)	54
Energía aguas arriba (m)	644,49	Velocidad aguas arriba (m/s)	24,24
Nivel del agua, aguas arriba (m)	644,49	Velocidad aguas abajo (m/s)	24,24
Energía aguas abajo (m)	596,52	Elevación de piso aguas arriba (m)	589,08
Nivel del agua, aguas abajo (m)	594,95	Elevación de piso aguas abajo (m)	588,82
Δ Energía (m)	47,97	Perdidas por fricción (m)	1,77
Δ Superficie del agua (m)	49,53	Perdidas Por salida (m)	31,23
Energía en la salida (m)	644,97	Perdidas por entrada (m)	14,97
Energía en la entrada (m)	644,49	Gasto vertido (m <sup>3</sup> /s)	1016,85
Sección de control en el conducto	Outlet	Carga media sobre la presa (m)	0
Superficie del agua en la entrada (m)	598,08	Carga máxima sobre el vertedor (m)	1,59
Superficie del agua en la salida (m)	597,82	Área hidráulica de descarga (m <sup>2</sup> )	403,83

Ambas condiciones se cumplen y pueden verificarse en la Tabla 4-2. La elevación máxima alcanzada es de 595,87 msnm, es decir, aproximadamente se forma un tirante de 7 m del embalse formado por ésta avenida.

Con referencia a la condición 2, la velocidad alcanzada es de 24 m/s, por lo cual se tiene un desarenador en posibilidad de operar adecuadamente para desalojar los sedimentos depositados junto a la cortina y en el fondo de su embalse. Ésta condición se revisó con la avenida máxima de diseño del proyecto, con la otra finalidad de conocer cuál sería el nivel alcanzado en el embalse una vez concluida la cortina y durante la vida útil de la presa

Lo anterior representa la condición más desfavorable, bajo la cual el desarenador funciona como conducto lleno y el nivel del agua que alcanzaría con esta avenida sobrepasa la elevación de la cresta vertedora de 1,59 m sobre el nivel del vertedor, considerando que todo el eje de la cortina vierte.

#### 4.3.5 **Obra de excedencias**

La finalidad de la obra de excedencias es controlar la descarga de los volúmenes excedentes a la capacidad útil del vaso de almacenamiento. La obra de excedencias debe tener la capacidad hidráulica suficiente y su descarga estar localizada de tal forma que no dañe ni el talud aguas abajo de la cortina, ni cualquier otra estructura adyacente.

Como resultado del tránsito de la avenida de diseño a través del vaso, se obtiene la carga máxima y el gasto máximo para el cual deben dimensionarse las diferentes estructuras que forman la obra de excedencias.

La obra de excedencias de este proyecto es un vertedor en cimacio de cresta libre e integrada al cuerpo de la cortina.

Las estructuras de esta obra en particular son:

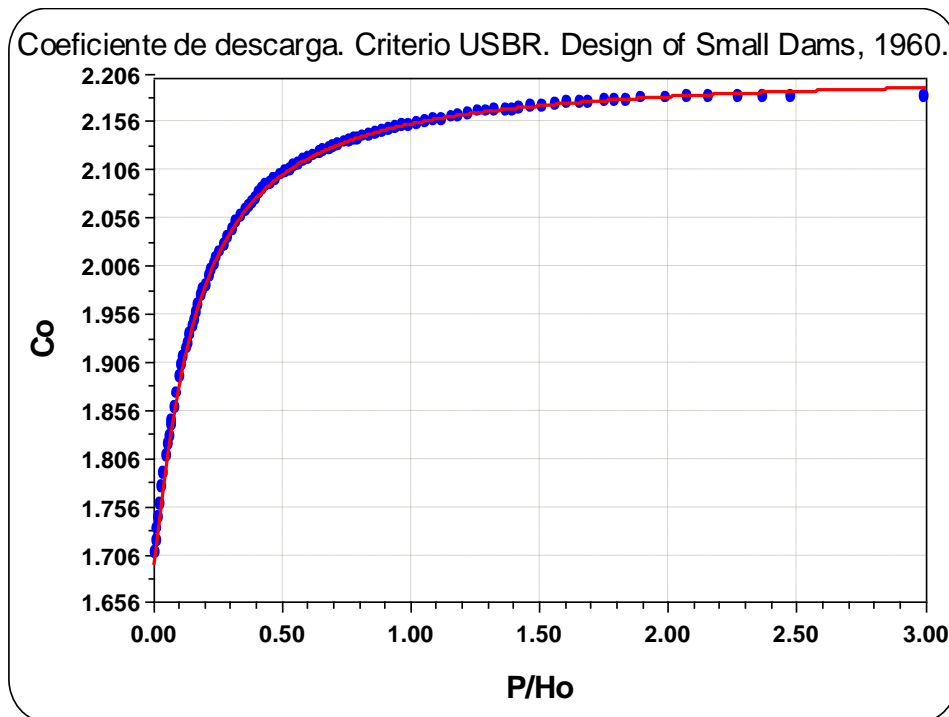
- estructura de control
- el canal de descarga
- la estructura terminal.

#### 4.3.6 **Estructura de control**

Su función es controlar y regular los derrames del vaso y es en consecuencia una componente muy importante de la obra de excedencias. En primer lugar, conviene verificar la capacidad de descarga de la estructura de control, que depende de sus dimensiones, la carga y su geometría. El efecto de estos factores se considera a través del coeficiente de descarga.

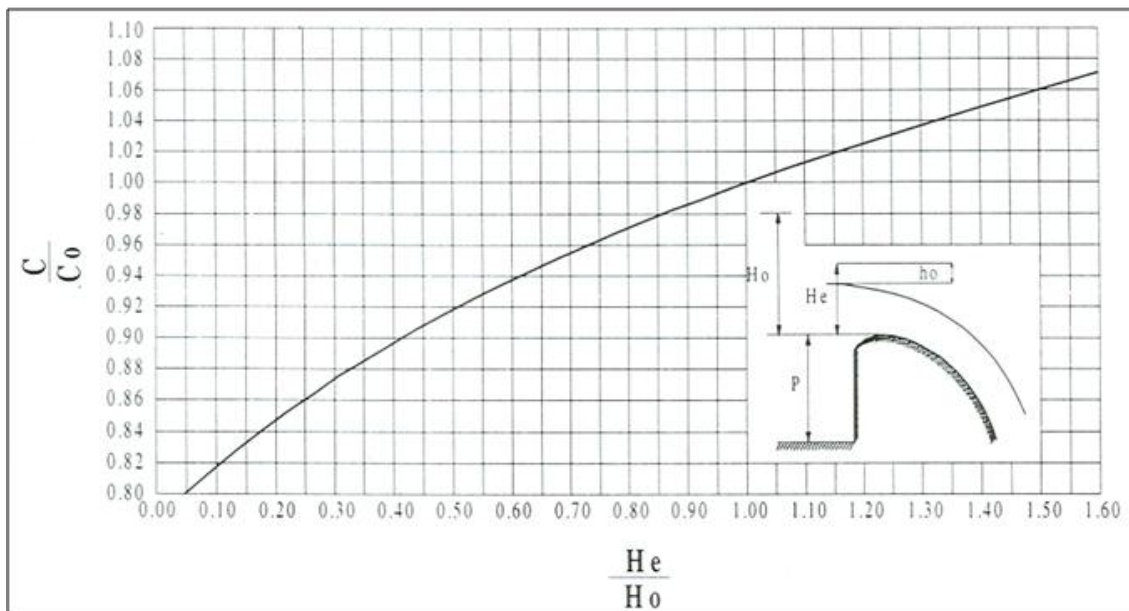
Para obtener el coeficiente de descarga  $C$  se debe considerar que la carga de operación en algunos períodos durante el tránsito de la avenida es diferente a la carga de diseño. Esto sucede conforme la avenida inicia y termina su paso por el vertedor. Al presentarse una avenida el nivel del agua se encuentra al nivel de la cresta vertedora o más bajo. Por lo tanto, al iniciar el vertido y hasta alcanzar el NAME, la carga de operación será inferior a la carga de diseño, y esto a su vez implica que el coeficiente de descarga sea menor al obtenido cuando se igualan las cargas de diseño y de operación.

Para un vertedor con talud aguas arriba vertical y velocidad de llegada despreciable ( $P/H_d > 1$ ;  $45/8,9 > 1$ ) el valor del coeficiente de descarga  $C_o$ , bajo el criterio del USBR, es de 2,181, véase la Figura 4-10 para los valores de la relación  $P/H_d$  superior a 3. Por otra parte, es necesario determinar el coeficiente de descarga para diferentes cargas de operación y de diseño, en la Figura 4-11, se obtiene a través de la relación  $H_d/H_e$  la relación  $C/C_o$ , con la cual se obtiene el valor de  $C$  una vez que ya es conocido el valor de  $C_o$  (2.181). En Tabla 4-3 se muestran los valores del coeficiente de descarga para diferentes cargas sobre la cresta del vertedor; se inicia a partir de este nivel y hasta el nivel de la corona de la cortina (644,90 msnm), la descarga se llevaría por toda la longitud de la cortina. El promedio del coeficiente de descarga para este rango de cargas es de 2,15.



**Figura 4-10** Coeficiente de descarga  $C_o$ , según el criterio del USBR

La longitud de la cresta vertedora es aquella por donde escurre el gasto del vertedor. Cuando existen pilas sobre la cresta vertedora y los estribos son de forma tal que causan contracciones en el flujo, la longitud neta de la cresta vertedora se disminuye por este efecto.



**Figura 4-11** Coeficiente de descarga por cargas diferentes a la de proyecto. Criterio USBR

**Tabla 4-3 Coeficiente de descarga por cargas diferentes a la de proyecto. Criterio USBR**

He	Nivel	He/Ho	C/Co	C
1,00	635,00	0,11	0,82	1,790
2,00	636,00	0,22	0,85	1,861
3,00	637,00	0,34	0,88	1,923
4,00	638,00	0,45	0,91	1,978
5,00	639,00	0,56	0,93	2,027
6,00	640,00	0,67	0,95	2,071
7,00	641,00	0,79	0,97	2,112
8,00	642,00	0,90	0,99	2,148
8,90	642,90	1,00	1,00	2,181
10,00	644,00	1,12	1,02	2,215
11,00	645,00	1,24	1,03	2,245
12,00	646,00	1,35	1,04	2,274
12,90	646,90	1,45	1,05	2,299
				<b>2,150</b>

Los estribos causan contracciones en el flujo, entonces la longitud neta de la cresta debe disminuirse por este efecto, la longitud efectiva se calcula con la ecuación:

$$Le = L - 2(N Kp + Ka) Hd \dots \dots \dots (4-1)$$

donde:

Hd, carga total sobre la cresta, en m

Ka, coeficiente de contracción por estribos

Kp, coeficiente de contracción por pilas,

L, longitud total neta en la cresta, en m

Le, longitud efectiva en la cresta, en m

N, número de pilas

No se tienen pilas, por lo tanto N y Kp son eliminados de la ecuación anterior. Ka = 0,02663 se obtiene según CFE, 1970

La longitud efectiva es  $Le = 135 - 2(0 + 0,02663) 8,90 = 134,5$  m.

En un vertedor con velocidad de llegada despreciable ( $P/Hd > 1$ ) y talud aguas arriba vertical, USBR recomienda para el cuadrante aguas abajo el uso de la ecuación general:

$$\frac{y}{Hd} = k \left( \frac{x}{Hd} \right)^n \dots \dots \dots (4-2)$$

donde:

k y n, constantes que dependen del talud del paramento aguas arriba

x y y, coordenadas de un sistema cartesiano

Hd, carga de diseño



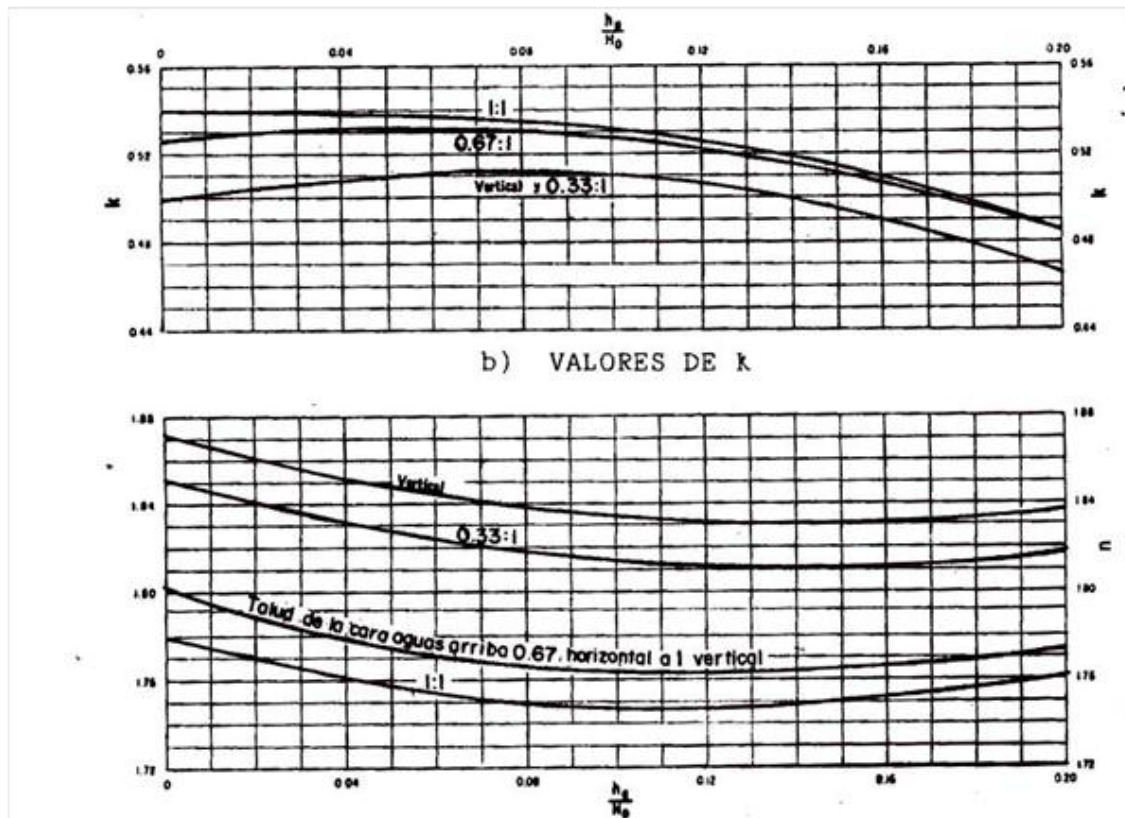


Figura 4-12 Constantes para determinar la forma de los cimacios USBR, CFE, 1970

Con talud vertical y la relación de la carga de velocidad de llegada y la carga sobre el vertedor, corresponde a  $k$  el valor de 1,872 y a  $n$  de 0,5002, al sustituir estos valores y la carga de diseño en la ecuación general se calcula una de las coordenadas una vez que se ha propuesto la otra Figura 4-12.

Los volúmenes liberados por la estructura de control se conducen al río aguas abajo de la presa a través de esta estructura. En trazo este canal se ha considerado un ángulo de  $8^\circ$  en su transición hasta la descarga. Este ángulo podría ser hasta de  $10^\circ$  según las recomendaciones de la extinta Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Para confirmar la adecuada operación del canal de descarga fue necesario llevar a cabo su análisis hidráulico. El análisis consiste en estimar las características hidráulicas del canal en diferentes secciones, mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli. El resultado obtenido es que el canal tiene un flujo estable bajo régimen supercrítico, véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los resultados del análisis hidráulico del canal de descarga.

**Tabla 4-4 Resultados del análisis hidráulico del canal de descarga**

N° sección	Cadenamiento (m)	Longitud		Ancho plantilla (m)	Taludes	Elevaciones		Área hidráulica (m²)	Radio hidráulico (m)	Velocidad (m/s)	Hf (m)	Carga velocidad (m)
		real (m)	teórica (m)			plantilla (msnm)	agua (msnm)					
1	0.00			135.00	0.00	631.03	642.45	1541.70	9.77	5.03		1.29
2	2.97	2.97	3	132.16	0.00	634.00	641.15	944.55	6.45	8.22	0.00	3.44
3	20.44	17.46	17	128.32	0.00	624.07	627.37	423.09	3.14	18.34	0.07	17.15
4	26.84	6.40	6	127.19	0.00	619.07	621.97	368.80	2.77	21.04	0.11	22.57
5	33.24	6.40	6	126.07	0.00	614.07	616.71	333.14	2.54	23.29	0.17	27.66
6	39.65	6.40	6	128.15	0.00	609.07	611.45	305.44	2.30	25.41	0.23	32.90
7	44.19	4.54	5	124.94	0.00	605.52	607.85	290.64	2.24	26.70	0.20	36.33
8	50.43	6.24	6	124.14	0.00	601.59	603.81	276.54	2.15	28.06	0.32	40.13
9	57.63	7.20	7	122.80	0.00	599.89	602.10	271.53	2.13	28.58	0.41	41.63
10	61.03	3.40	3	120.85	0.00	600.28	602.54	273.20	2.18	28.40	0.19	41.12

Por otro lado y para evitar cambios mayores en la geometría del proyecto original, es conveniente dar, después del estribo y antes de la contracción del canal, un cambio gradual al flujo. El cambio gradual evita zonas con probabilidad de cavitarse por la formación de vórtices. Para tal efecto, se propone entre el eje la corona de la cortina y los lados del canal de descarga una curva con radio de 7 m.

Para la altura del muro en el canal de descarga. En primer lugar se determina el tirante real. Cuando la velocidad en el canal es superior a 5 m/s existe inclusión de aire que aumenta los tirantes, teóricamente puede determinarse en forma aproximada con la fórmula de Douma.

$$U = 10 ((0,2 v^2 /g r) - 1 )^{1/2} \dots\dots\dots(4-3)$$

Donde:

- r, radio hidráulico, en m
- g, aceleración de la gravedad, en m/s<sup>2</sup>
- v, velocidad del escurrimiento, en m/s
- r, radio hidráulico, en m

Después el tirante real se obtiene con la expresión siguiente:

$$Y^* = y (1 + u/100)^{1/3} \dots\dots\dots (4-4)$$

Donde:

- y\*, tirante real con aire incluido, en m
- y, tirante, en m

El tirante en las diferentes secciones, en promedio, se incrementa por este fenómeno 12 cm.

La relación empírica sugerida por U.S.B.R. proporciona el bordo libre en términos de velocidad y energía del escurrimiento.

$$B. L. = 0,60 + 0,37 v y^{1/3} \dots\dots\dots (4-5)$$

Donde:

v, velocidad del escurrimiento, en m/s

y, tirante, en m

El bordo libre obtenido varía, siendo al inicio (en el tramo del cimacio) de 1,27 m, en el tramo recto del canal 1,84 m y en la estructura terminal de 1,98 m. En el cuadro 4.4 se muestra el cálculo para encontrar la altura del muro del canal de descarga.

La altura del muro en el cimacio del vertedor, con el ancho de la corona de la cortina, es de 12,9, altura del paramento de la cortina. En lo que es propiamente la rampa de descarga varía entre 12,9 y 4,4 m hasta el punto de tangencia del cimacio con el talud de la cortina, a partir de este punto la altura se mantiene en 4,4 hasta finalizar la estructura terminal.

El ángulo de salida propuesto para la cubeta de lanzamiento de salto de esquí es de 30°, conforme a la recomendación de U.S.B.R., que consigna valores hasta de 30° para este tipo de estructuras. Con estas estructuras se pretende que el agua salga como un chorro libre y se proyecte lejos de la presa para evitar la socavación.

La trayectoria del chorro de descarga con este ángulo de salida se calculó con la siguiente ecuación:

$$y = x \tan \alpha - \frac{x^2}{3.6(d+hv) \cos^2 \alpha} \dots\dots\dots (4-6)$$

La asignación de un ángulo de salida de 30° responde a la necesidad de tener una distancia de descarga del chorro con el gasto máximo de diseño, tal que no se ponga en riesgo la estabilidad alguna de las otras obras del proyecto y estructuras adyacentes al mismo. Para gastos menores al de diseño la cubeta de lanzamiento tiene un adecuado funcionamiento, que no afecta las laderas del cauce.

Por otro lado, con el objetivo de optimizar el volumen de obra, la elevación del labio de la cubeta debe ir lo más bajo posible, siempre y cuando el nivel del agua en el cauce del río a máxima descarga sea inferior a esta elevación.

Con la topografía existente se obtuvieron las características hidráulicas en una sección del río, de ésta forma se obtuvo que la elevación del cauce a máxima descarga es de 595,7 msnm.

La altura del labio de la cortina obtenida con el ángulo de salida de 30° y considerando un radio mínimo de curvatura que forma esta estructura, es de 601,52 msnm. El radio utilizado es de 15,0 m, obtenido al considerar una longitud superior a 5 veces el tirante,

que a la salida de la cubeta es de 2,44 m (véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Para desplantar la estructura de salida al nivel considerado como de roca sana (15 m por abajo del terreno natural) se requiere continuar con el talud después de la cubeta, igual al talud de la cortina.

#### 4.3.7 Obra de generación

La ubicación final de la planta hidroeléctrica está condicionada al tipo de cortina, al esquema general, la topografía y a los factores técnicos y económicos de todas las partes que conforman el aprovechamiento.

En el estudio de generación explicado en el capítulo 2, se determinaron los niveles característicos de operación del embalse y la capacidad instalable en la planta hidroeléctrica.

Para la conducción a presión, se consideran tuberías independientes para cada unidad turbogeneradora, al igual que en la selección del número unidades, se logra una mayor versatilidad en la operación de la planta, ya que en el caso de alguna avería de un conducción, la central seguirá operando parcialmente; no así cuando tenga una sola tubería que alimenta a varias unidades turbina – generador.

El cálculo del diámetro preliminar se puede efectuar mediante la siguiente expresión:

$$D = 0,7 \frac{P^{0,43}}{H^{0,65}} \dots\dots\dots (4-7)$$

Donde:

D=Diámetro de la tubería a presión

P = potencia, en kW

H = carga neta de diseño, en m

$$D = 0,7 \frac{35000^{0,43}}{43,5^{0,65}} = 4,42 \text{ m}$$

Con el gasto de diseño, la carga neta, la potencia instalable y la longitud de las tuberías, se estimaron los diámetros de la conducción a presión con las fórmulas estadísticas del USBR y Zarkaria, cuidando que la velocidad no excediera de 6 m/s en la tubería de alta presión.

El espesor del blindaje de la tubería de alta presión se calculó por espesor mínimo, por manejo y transporte, por operación normal con la carga al NAMO. La expresión que se utilizó para realizar el cálculo es la siguiente:

Espesor mínimo por manejo y transporte (mm)

$$E_{\text{mín}} = (D1 + 1\,000)/400 \dots\dots\dots (4-8)$$

Donde:

D1 = Diámetro de la tubería en mm

El espesor comercial correspondiente al calculado es de 12,7 mm y cumplen el criterio de espesor mínimo por fabricación y montaje. El peso total del blindaje es de 190,9 t.

Las pérdidas de carga ocurridas entre la estructura de toma y la de desfogue representa la energía transformada por el flujo para poder fluir entre estas secciones. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta las diferentes pérdidas de carga consideradas en este circuito hidráulico.

La pérdida de carga de 0,975 m representa una eficiencia hidráulica del 97.8%, al utilizar la carga bruta de 45 m  $([45 - 0,975] / 45)$ . Por otra parte la eficiencia global del sistema (hidráulica – turbina – generador) al considerar una eficiencia en las dos últimas de 95% y 98%, respectivamente, es de 0,911%.

**Tabla 4-5 Pérdidas de carga en la obra de generación**

Datos:	
Gasto	88,09
Número de unidades	2
Diámetro tubería de concreto	4,40
Velocidad	5,8
Carga de velocidad	<b>1,711</b>
<hr/>	
Rejillas	0,025
Entrada	0,094
Ranuras en compuertas	0,030
Cambio de sección	0,141
Cambio de dirección (2 curvas verticales)	0,088
Reducción	0,039
Fricción en tubería	0,351
Ranuras de desfogue	0,002
Fricción en el tubo de desfogue	0,003
Salida	0,204
Total en el circuito	<b>0,975</b>

La posición de la casa de máquinas obedece a criterios de optimación de la obra. La casa de máquinas requerida es una estructura de 15 m de ancho por 44 m de largo al nivel del piso de excitadores, en su interior aloja dos grupos turbogeneradores de 35 MW cada uno. La altura de la clave de la losa superior a la plantilla del tubo difusor es

de 31,70 m. Para el izaje de los equipos se propone una grúa viajera capaz de levantar en partes un rotor

El desfogue de los gastos turbinados al cauce del río se realiza con los tubos difusores que unen a su vez, a un canal de sección rectangular a cielo abierto de 40,10 m de longitud y 22,9 m de ancho de plantilla; inicia con elevación de 574,00 msnm con una contrapendiente de 30% y concluye a la cota 589,00 msnm del fondo del río. Por la posición de las compuertas del desfogue se ubica también la grúa pórtico para izaje de las mismas.

La zona para alojar los transformadores y equipos de ventilación es una plataforma a la elevación 592,50 msnm y está colocada justo a la izquierda de casa de máquinas, esto se hizo con el fin de tener la menor longitud en los buses eléctricos y ductos de aire de enfriamiento. Por las características del terreno fue necesario realizar, además de los cortes a cielo abierto, un terraplén con talud 1,2:1. El área propuesta para los transformadores está destinada a albergar dos transformadores de servicio y uno de emergencia.

La Subestación, es una plataforma de forma rectangular de 2 500 m<sup>2</sup>, ubicada en la margen izquierda a la elevación 650,00 msnm y adyacente al tramo del camino de acceso comprendido entre el poblado El Repara y la zona de obras. La plantilla está excavada a cielo abierto siguiendo la curva de nivel correspondiente y la cual se complementa con dos pequeños terraplenes de materiales excavados para regularizar a una forma rectangular de 50x50 m la superficie requerida. La conexión entre esta área y los transformadores se hace con una línea de transmisión de 800 m de longitud.

#### 4.3.8 Obra de contención

Para la obra de contención (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Figura 4-14, Figura 4-15 y Figura 4-16) se decidió por una cortina de CCR, el eje que se había propuesto originalmente y que se denominara alternativa 1 fue planteado antes de contar con la topografía a detalle, de ahí que se decidiera mover la cortina aguas arriba y con lo cual se cambio levemente el canal de desvío-desarenador, además de la ubicación del eje de la cortina.

Las características para este proyecto son:

- Cortina de CCR de 70 m altura.
- Desvío en canal a cielo abierto por margen derecha que posteriormente se planea usar como desarenador.
- Vertedor integrado al cuerpo de la cortina.



- Obra de generación también integrada al cuerpo de la cortina ubicada en la margen izquierda con casa de máquinas exterior que desfoga directamente sobre el cauce del río Santiago.

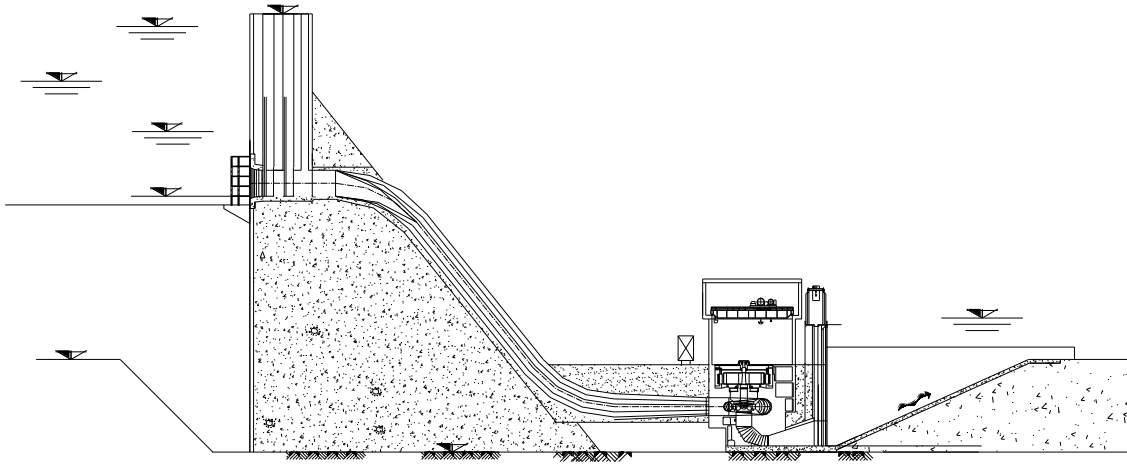


Figura 4-13 Sección de la cortina y casa de máquinas

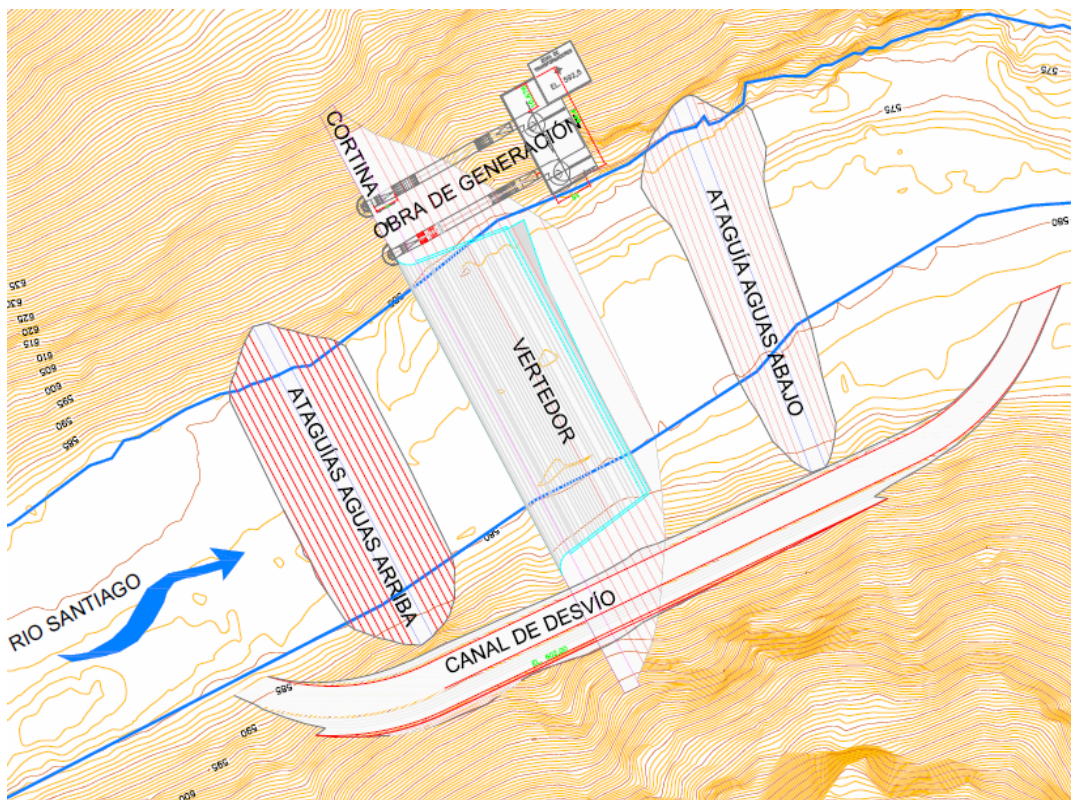


Figura 4-14 Vista en planta del arreglo de las obras para la alternativa 1



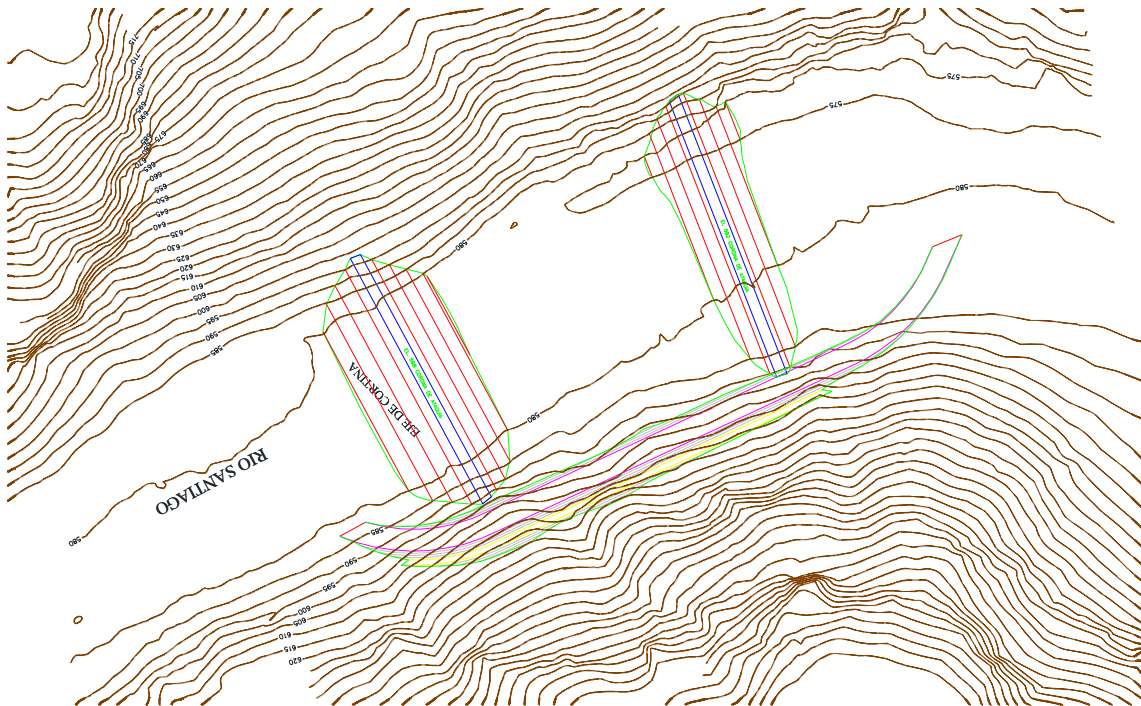


Figura 4-15 Vista en planta del arreglo de las obras para el desvío

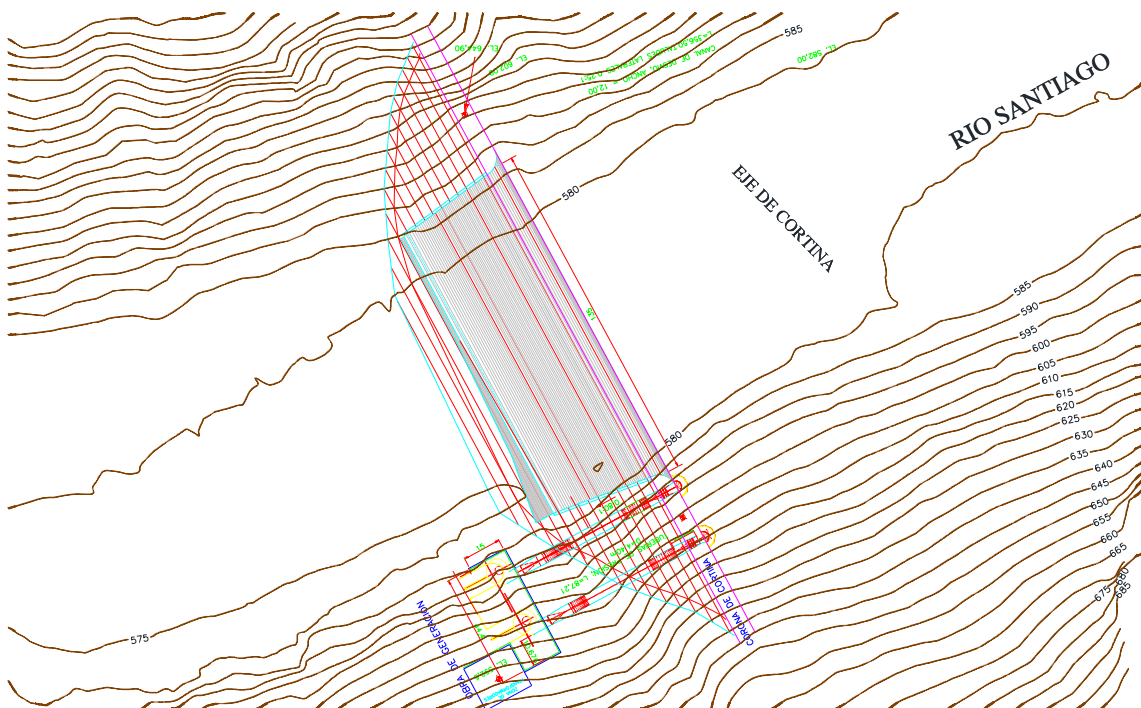


Figura 4-16 Vista en planta de la cortina

**Tabla 4-6 Datos del P. H. Amuchiltite**

Concepto	Unidades	Cortina original y conducción BP
Escorrentamiento medio anual	hm <sup>3</sup>	1 937
Aportación media mensual		161,48
Evaporación neta anual	hm <sup>3</sup>	1,84
Capacidad al NAMO		83,96
Capacidad al NAMÍNO		45,22
NAME	msnm	650,00
NAMO	msnm	642,90
NAMINO	msnm	590,00
Área de captación	km <sup>2</sup>	34 993
Altura de Cortina	m	70
Elevación de la corona	msnm	652,00
Nivel de la obra de toma	msnm	621

#### **4.4 Sobreelevación la cortina actual de la C.H. Santa Rosa con casa de máquinas a pie de cortina**

En esta opción se consideraron las condiciones de sobreelevación de la alternativa 2, sólo que en este caso no se consideró el túnel y se propuso la construcción de una casa de máquinas a pie de cortina por margen izquierda.

Se llevó a cabo el cálculo de los funcionamientos de vaso para las condiciones de niveles de aguas de cada alternativa, así mismo se realizaron los cálculos necesarios en cuestión de hidrología así como el presupuesto de la alternativa (Sicostos), en base a lo cual se realizó un análisis comparativo para elegir la opción que presenta una mejor relación Costo- Beneficio la cual será la más viable para su realización.

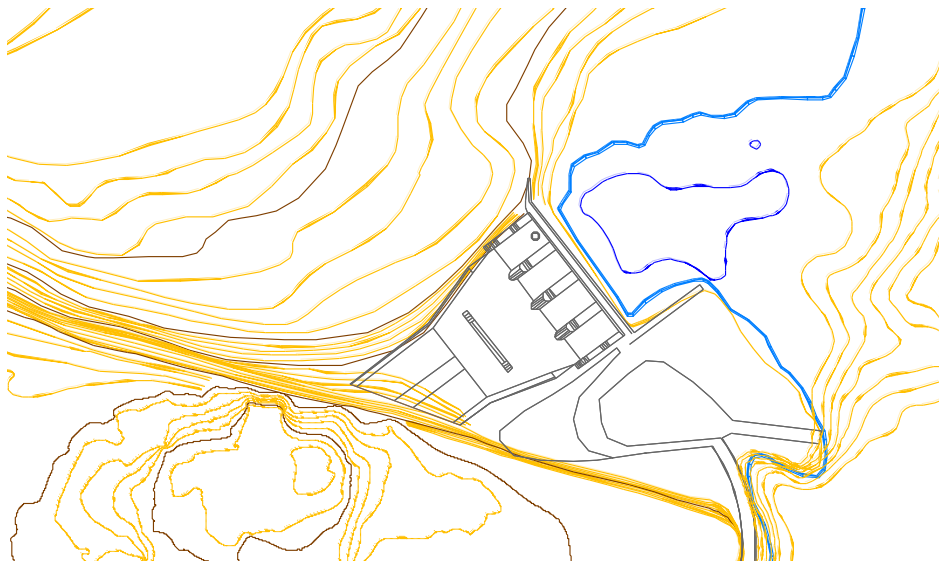
Al ser una opción de desarrollo más reciente no se encuentra tan avanzada como el esquema de obra de Amuchiltite y en general las obras propuestas para este estudio se hicieron para realizar la evaluación económica y posterior comparativa; así, de esta

manera poder elegir la opción más adecuada técnica y económicamente viable para desarrollar en el tramo del río Santiago que se está analizando

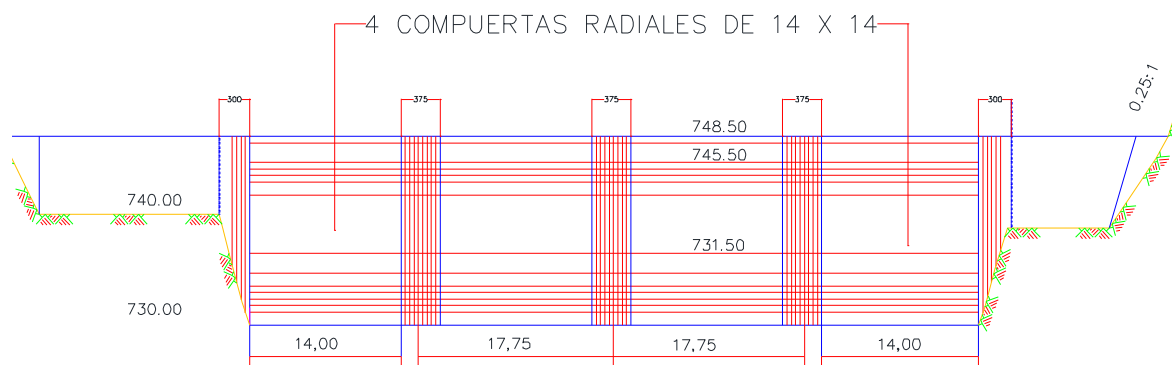
#### 4.4.1 Obra de Desvío

Después de analizar esquemas alternativos con las distintas opciones estudiadas, se llegó a la conclusión de que el río se puede manejar con la cortina actual, su almacenamiento, y su desfogue actual, ya que al continuar generando por medio del gasto turbinado que pasa por casa de máquinas se tiene una derrama importante, de manera conjunta usando el actual vertedor como un desvío para las avenidas máximas durante el tiempo de construcción de la cortina de ser así necesario, se puede hacer el manejo del río durante el periodo de construcción.

En las Figura 4-17 y Figura 4-18 se muestra el vertedor actual que se propone como una obra de desvío. Esto ya que la capacidad del vertedor es de  $13\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$  y la avenida que se requiere transitar para una obra de desvío es del orden de  $7\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ , con base en lo cual se propone el uso de 2 compuertas del vertedor durante el tiempo de construcción de la cortina para transitar la avenida extraordinaria que se pueda presentar y que supere la regulación proporcionada por la cortina actual del proyecto.



**Figura 4-17 Planta del vertedor actual propuesto como obra de desvío.**



**Figura 4-18 Arreglo del Vertedor de Santa Rosa**

#### 4.4.2. Obra de contención

En un inicio se estudiaron 3 opciones para el arreglo de obras, una con la cortina actual de Santa Rosa con una conducción de 16 km y 2 con una nueva cortina sobreelevándola 60 metros del tipo de concreto compactado con rodillo. De los estudios anteriores realizados en la zona se conocía que el emplazamiento de San Cristóbal de la barranca podría ser una limitante para la ubicación del NAMO por lo cual se decidió que llegara a la elevación 790,00 msnm. , las otras limitantes que se encontraron en las visitas, y de estudios previos fueron; la ubicación de la subestación actual de la C.H. Manuel M. Diéguez, así como las fallas geológicas que se tienen ubicadas en los años de operación de la central.

Considerando estos factores, se llegó a la propuesta de la ubicación y forma de la cortina que se muestra en la Figura 4-19 y Figura 4-20.

Una vez definida la opción de cortina de CCR sobreelevada como la más viable de acuerdo a las evaluaciones económicas resta por hacer los estudios de estabilidad de esta cortina con una variación a los taludes de la misma para revisar su comportamiento.

La cortina estará formada por una cortina de CCR con taludes de 0,8:1, se ubicará aguas abajo de la cortina actual de Santa Rosa, tendrá una elevación de 174,0 msnm desde el desplante y su corona estará a la elevación 795,00 msnm., con una longitud de 533,50 m

**Tabla 4-5 Volúmenes de excavación para la cortina**

Obra de contención. Volúmenes de obra	
Excavación en desplante (m <sup>3</sup> )	Concreto en cortina (Mm <sup>3</sup> )
226 700	1,6

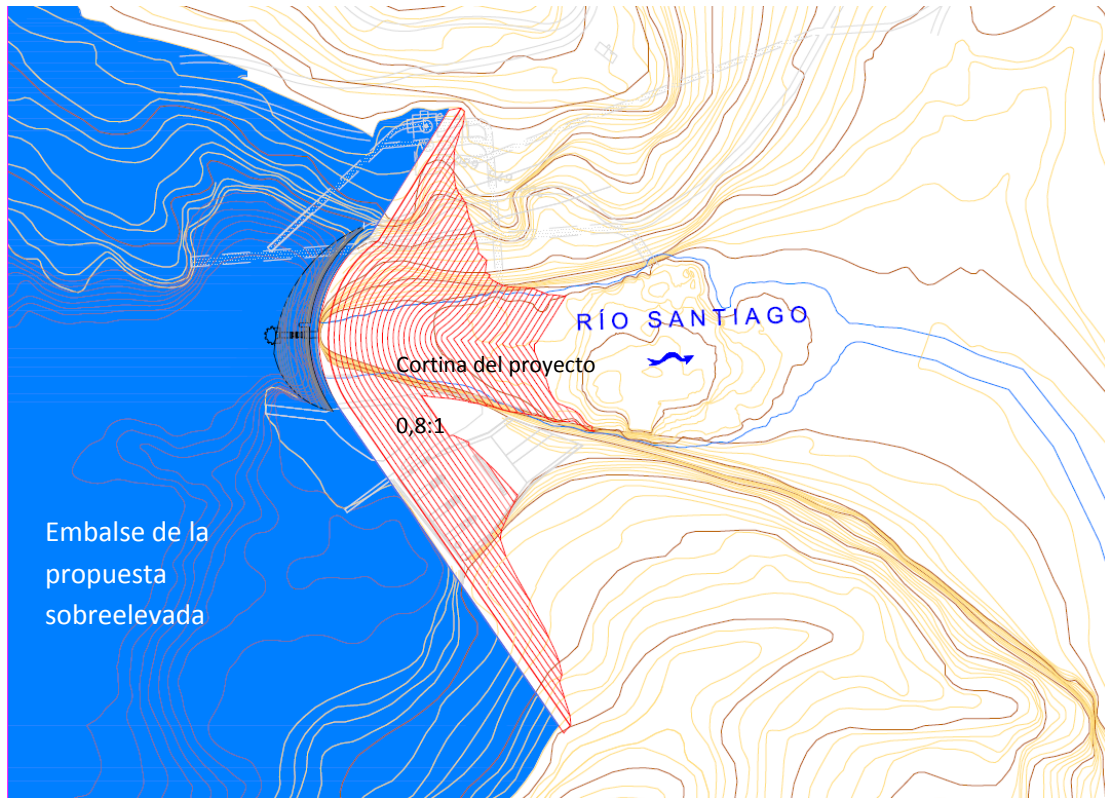


Figura 4-19 Planta de la cortina de CCR propuesta para sobreelevar Santa Rosa.

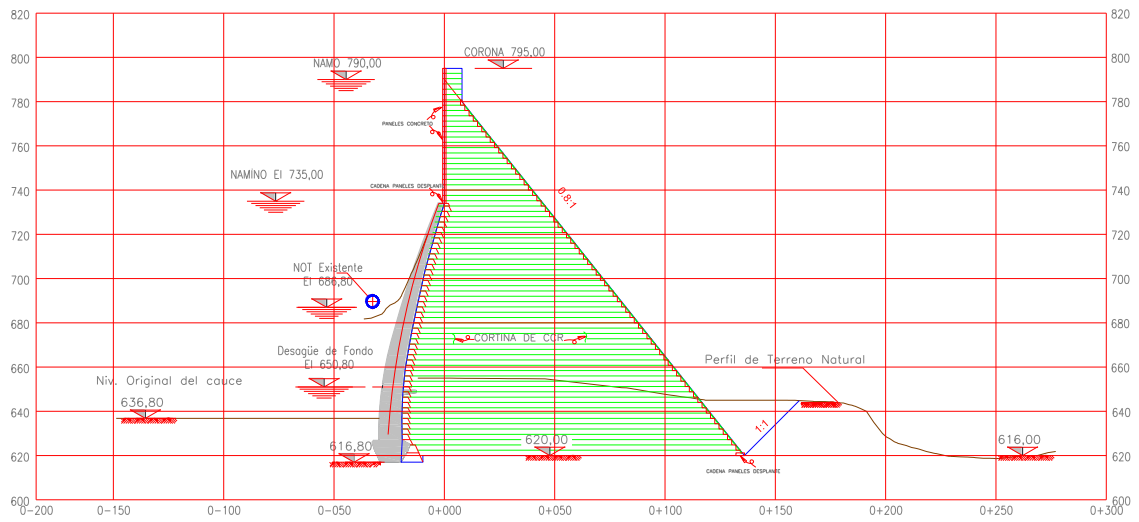


Figura 4-20 Perfil de la cortina de CCR propuesta para sobreelevar Santa Rosa.

#### 4.4.2 Obra de excedencias

Para definir la obra de excedencias se considero su ubicación tanto sobre margen izquierda y derecha pero debido a las fallas geológicas que se han encontrado se decidió que lo más factible era ubicar el vertedor sobre la cortina de CCR que se propone como obra de contención

El primer paso para obtener las dimensiones de la estructura de control tanto de obra civil como de equipo electromecánico, fue realizar múltiples tránsitos de la avenida de diseño , haciendo variar la longitud, la elevación y la carga sobre la cresta, tomando como nivel de conservación el NAMO de generación (790,00 msnm). En todos los tránsitos realizados se utilizó un coeficiente medio de descarga de 2. También se cuidó que el gasto unitario que pasará por la cresta vertedora no fuera mayor de 200 m<sup>3</sup>/s/m, y que las compuertas que se colocaran estuvieran en un rango de 1,4 a 1,6 de relación alto/ancho.

Dicho en otras palabras, la política de operación es mantener el vaso el mayor tiempo posible en el NAMO, descargando el gasto que se presente, y cuando se rebase este nivel, operar con descarga libre, al final de la avenida se debe conservar el mismo NAMO.

Los resultados a los que se llegó se muestran en la Tabla 4-6.

**Tabla 4-6 Valores de las características del vertedor propuesto**

NAMO msnm	Elevación de cresta msnm	Longitud efectiva m	Volumen de la avenida Mm <sup>3</sup>	Gasto de entrada m <sup>3</sup> /s	Gasto de salida m <sup>3</sup> /s	NAME msnm	Carga de diseño m	Gasto unitario m <sup>3</sup> /s/m
790	775	81	4 963,51	15 377,87	12 866,80	793,5	18,5	190

Capacidad al NAME Mm <sup>3</sup>	Capacidad al NAMO Mm <sup>3</sup>	Capacidad de regulación Mm <sup>3</sup>	Compuertas radiales				Área del embalse ha
			Número	b m	H m	h/b	
1 203,821	10 134,79	2 511,07	6	13,5	19,5	1,44	23.02

Para dimensionar preliminarmente el vertedor se utilizó un hidrograma de entrada con Tr de 10 000 años y gasto máximo de 15,377.87m<sup>3</sup>/s:

Con base en el hidrograma de entrada y proponiendo diferentes longitudes efectivas para la cresta, se calcula mediante la utilización del programa “FATRAN” el nivel del NAME, el gasto máximo descargado y el volumen de la avenida.

Después de varias corridas los resultados que se tomaron finalmente fueron los siguientes:

- NAME 793,5 msnm
- Longitud efectiva: 81m



- 6 Compuertas rectangulares de 13,5 x 19,5m.
- Volumen de la avenida 4 963,62
- Gasto máximo descargado 12 866,80

Para el diseño del cimacio se recurrió a las recomendaciones del U.S. Army Corps of Engineers que proponen diferentes perfiles en función de la velocidad de llegada, el talud aguas arriba y la relación P/Hd, Figura 4-21 y Figura 4-22.

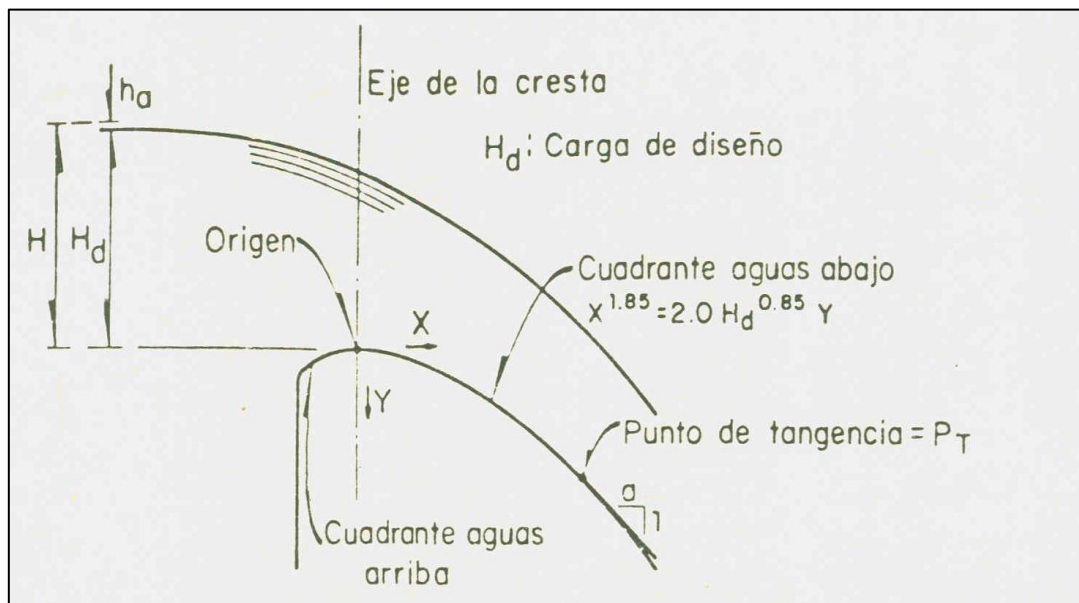


Figura 4-21 Geometría de un cimacio con velocidad de llegada despreciable y talud vertical

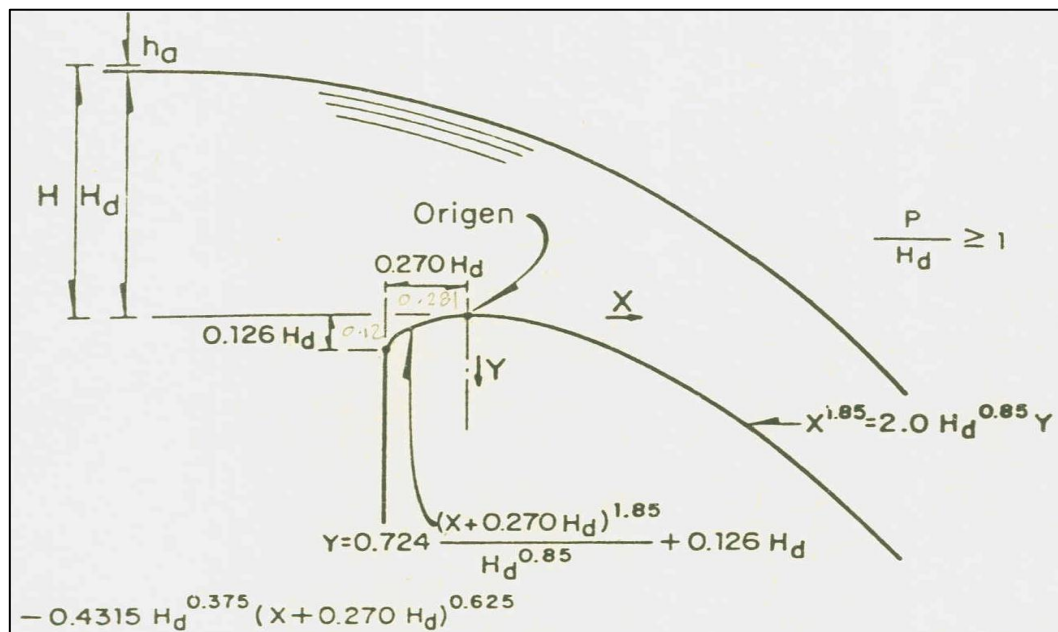


Figura 4-22 Ecuación del cuadrante aguas arriba, para el sistema coordenado mostrado



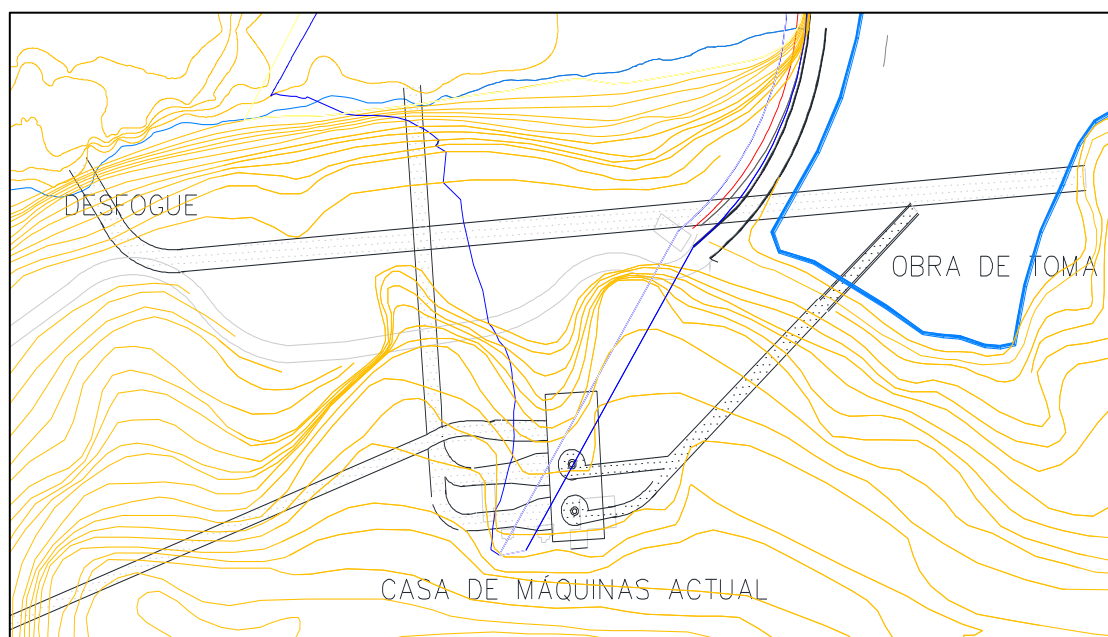
Una vez obtenido el perfil del cimacio se procedió a realizar los cálculos correspondientes para el perfil del agua sobre el mismo.

La obra de excedencias está compuesta por un canal de llamada, una estructura de control, 2 canales de descarga, cubeta deflectora y tanque amortiguador.

La estructura de control está formada por un cimacio tipo Creager, con el paramento aguas arriba vertical, cresta vertedora a la elevación. 775,00 msnm y 3 vanos de 13.5 m cada uno, por cada canal de descarga. El flujo estará controlado por 6 compuertas radiales de 13.5 m de ancho por 19.50 m de alto.

#### 4.4.3 Obra de generación

Para la Obra de Generación (Figura 4-23), se tiene como propuesta el rehabilitar la actual casa de máquinas, con ayuda del programa "HIDROMECH" se calcularon y propusieron las nuevas dimensiones de la casa de máquinas.



**Figura 4-23 Arreglo de la obra de generación actual**

#### 4.5 Sobreelevación de la cortina actual de la C.H. Santa Rosa y conducción hasta el NAMO del P.H. la Yesca

Para esta alternativa se considera sobreelevar la cortina actual hasta la elevación 795 (INEGI) y convertirla en cortina de CCR (Concreto Compactado con Rodillo) con talud de 0,8:1.

Se realizaron esquemas de obra para analizar el trazo correcto de la cortina y de la conducción de 16 km cuyo portal de salida se encontraría en la cola del embalse del P.H. La Yesca, mismo lugar donde se planea que esté ubicada la casa de máquinas.

Para las diversas alternativas se realizaron los cálculos de volumetrías para las obras de; contención, túnel de baja carga, casa de máquinas y se planteó la obra de excedencias. Esta alternativa toma los esquemas, volúmenes y valores del túnel de baja carga y de la cortina sobrelevada vistos con anterioridad.

#### **4.6 Propuesta para desazolve de la C.H. Santa Rosa**

En lo referente al desazolve se deben tener en cuenta varios factores o puntos relevantes en lo relativo a este tema, de los cuales se tratarán los más relevantes a continuación.

Tanto en ríos o embalses la velocidad disminuye al aumentar la profundidad de éstos y con esto se reduce la capacidad de arrastre de sedimentos y provoca sedimentación. Generalmente la sedimentación se inicia al formarse un delta en la cola del embalse, la tasa de sedimentación en el embalse varía según la producción de sedimentos de la cuenca, la tasa de arrastre de los arroyos y el modo de disposición depende del régimen del río, la frecuencia de las inundaciones, la geometría del embalse y su operación, el potencial de floculación, la consolidación de sedimentos, la densidad de corrientes y los cambios del uso de suelo durante la vida útil del embalse. Para el análisis de la sedimentación en embalses se debe tener en cuenta la capacidad útil y la capacidad muerta, la eficiencia de las contenciones y medidas de control, considerando el hidrograma de entrada, el arrastre de sedimentos, sus características, la configuración de terreno y el uso del suelo.

El concepto de esperanza de vida de los embalses se describe como: “el momento en que un depósito se espera que se encuentre del todo lleno de sedimentos”. Su obtención representa un reto ya que los sedimentos provienen generalmente de diversas formaciones geológicas, la tala de bosques, deslizamientos de tierra, etc., Una vez que la carga de sedimentos entrante se ha determinado, el análisis del perfil de remanso se combina con un análisis de transporte de sedimentos para calcular la cantidad que se espera de sedimentos. Todo esto para hacer una estimación de la vida útil del embalse con base en la cantidad de sedimentos que se consolidarán en él, teniendo en cuenta también algunas técnicas de manejo como el “flushing” o estructuras de control de sedimentos.

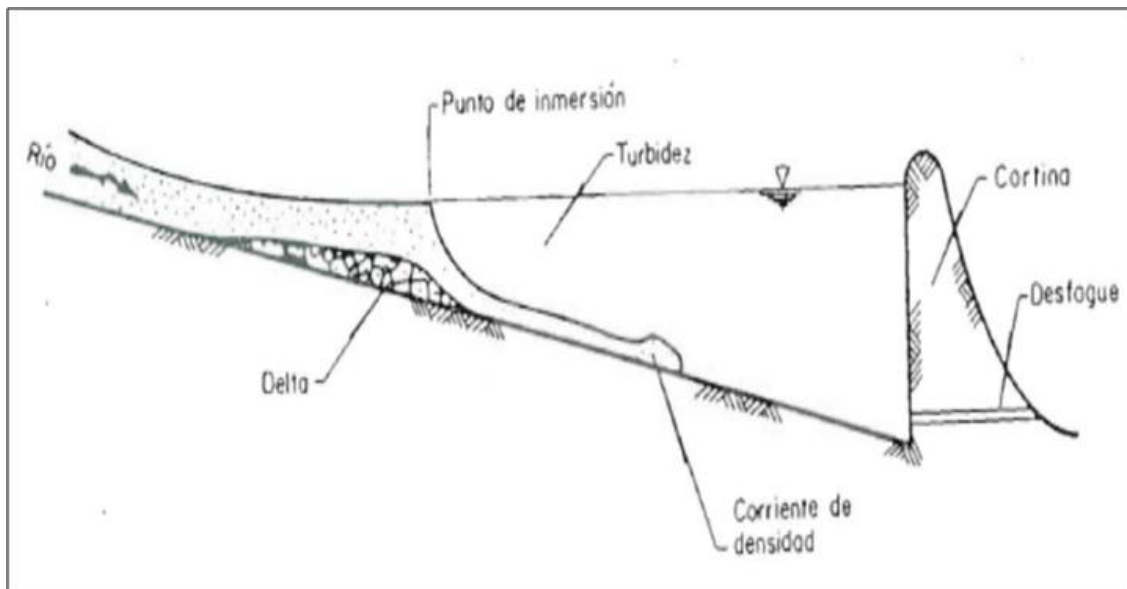
Debido a la gran cantidad de variables involucradas en el problema de la sedimentación de embalses, no se puede sugerir sólo una medida de control. Para acortar la discusión las medidas de control se pueden agrupar en categorías: control de la cuenca, control de las entradas y control de la deposición de los sedimentos.

El control de la cuenca suele ser la más eficaz de las medidas de control para las cuencas pequeñas, pero en las grandes puede ser una gran inversión a largo plazo. Para esto se deben realizar prácticas adecuadas para la conservación de los suelos y prevenir la erosión; la reforestación y medidas para aumentar la vegetación son importantes para el control de los sedimentos.

El control de las entradas o del flujo de los sedimentos se puede lograr por medio de un manejo adecuado de la cuenca complementándolo con estructuras de control para retardar los sedimentos en la cuenca. Se debe considerar la mejora del cauce y su estabilización con diques o canales para extraer los sedimentos y pantallas de vegetación.

El control de la deposición se inicia con el diseño adecuado de un depósito, en particular la posición y el funcionamiento de puntos de salida, vertedores y esclusas, extraen directamente los sedimentos de la corriente. Una vez producida la deposición existen varios métodos para la remoción de sedimentos. El dragado debe ser reducido al mínimo debido a su alto costo, el lavado o “flushing” y bombeo pueden ser tomados en cuenta como una alternativa viable para presas bajas. En los embalses con una baja capacidad de regulación, el lavado durante varios días en la temporada de avenidas a veces es suficiente para vaciar varios años de sedimentos acumulados. El lavado en embalses de gran capacidad puede ser contraproducente.

El problema de azolves que tiene actualmente la C.H. Sta. Rosa los cuales llegan por encima del nivel de la obra de toma, causa que el vaso de la presa no pueda ya regular las entradas para la generación.



**Figura 4-24 Patrón típico de sedimentación en presas**

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Hidrología

Para el estudio hidrológico se actualizaron las matrices de escurrimiento que se encuentran en el área de influencia del estudio, esto generará cambios en las avenidas de diseño y los funcionamientos de vaso que se tenían para el P.H. Amuchiltite. Se decidió analizar las evaporaciones y los escurrimientos acontecidos aguas arriba de la C.H. Santa Rosa, los cuales involucran las estaciones de La Boquilla, Cuixtla y San Cristóbal II con un período de análisis de 1960-2011, omitiéndose las estaciones ubicadas en los canales de margen derecha e izquierda de Cuixtla, debido a los pocos registros y gastos pequeños. Las avenidas de diseño calculadas con la información hidrométrica se modificaron a razón de los eventos ocurridos entre ambos sitios en el periodo 2007-2011.

Para el análisis de los gastos de diseño se realizó la suma de los gastos máximos coincidentes, tal como se muestran en la Tabla 5-1.

**Tabla 5-1 Errores mínimos estándar de la distribución de probabilidad**

Función	Momentos		Máxima verosimilitud	
	2p	3p	2p	3p
Normal	685,608	-----	685,608	-----
Lognormal	362,588	380,853	470,695	537,199
Gumbel	483,920	-----	624,259	-----
Exponencial	346,716	-----	331,763	-----
Gamma	391,137	354,483	522,513	438,8
Doble Gumbel	251,513			
Ajuste de gastos máximos para diferentes distribuciones de probabilidad				
Doble Gumbel *	111,230			

\* Correspondiente al parámetro "p", modificado en función de la muestra de datos

Con la suma de los gastos máximos coincidentes se procedió a realizar un análisis de frecuencia de gastos máximos, criterio utilizado para la estimación de avenidas de diseño, cuyas características principales son: 1) descripción probabilística de la ocurrencia del gasto máximo, 2) extrapolación a períodos de retorno mayores a la longitud del registro, 3) construcción del hidrograma completo por métodos sintéticos o "mayoración", 4) los esfuerzos en este campo se han enfocado en la aplicación de nuevas distribuciones y métodos alternativos de estimación de parámetros. Las funciones probabilísticas empleadas son: Normal, Lognormal 2p, Lognormal 3p, Exponencial, Gamma 2p, gamma 3p, Gumbel y Doble Gumbel. Cada una de éstas ajustadas mediante los criterios de momentos y máxima verosimilitud. Además, la función Doble Gumbel tiene la oportunidad de modificar el parámetro 'p', por lo que se agrega una función más. De las funciones Lognormal y Gamma, ambas con 2 y 3 parámetros, sólo se elige la de mejor ajuste para extrapolar sus gastos. Gastos máximos asociados a un periodo de retorno, de la suma de los registrados en las EH Cuixtla, La Boquilla y San Cristóbal II.

**Tabla 5-2 Periodos de Retorno para Amuchiltite**

Distribución de probabilidad	Periodo de Retorno (Tr), en Años.											
	2	5	10	15	20	25	50	100	200	500	1 000	5 000
Doble Gumbel P=0,80	962,31	1 819,84	3 125,11	4 169,56	5 370,49	6 231,62	7 074,72	8 180,68	9 010,96	9 844,44	10 947,19	11 767,85
Doble Gumbel P=0,92	1 048,12	1 782,52	2 703,93	4 931,34	6 228,00	7 043,46	7 816,37	8 810,23	9 553,83	10 303,15	11 264,11	11 996,27
Normal	1 378,00	2 403,29	2 942,21	3 387,43	3 888,38	4 222,19	4 527,58	4 897,52	5 156,93	5 401,87	5 706,98	5 925,70
LogNormal	1 031,05	1 957,36	2 736,39	3 608,67	4 928,33	6 066,07	7 335,73	9 238,15	10 880,61	12 701,20	15 183,56	17 514,45
Gumbel	1 177,34	2 257,22	2 972,20	3 658,03	4 545,76	5 210,98	5 873,78	6 748,22	7 409,11	8 069,75	8 942,90	9 603,35
Exponencial	955,16	2 217,81	3 172,96	4 128,12	5 390,77	6 345,92	7 301,08	8 563,73	9 518,89	10 474,04	11 736,69	12 691,85

El período de retorno (Tr) asignado a la obra de desvío, debe seleccionarse, en primer lugar, considerando que es una obra con vida útil durante la etapa de construcción, de tal forma que las estructuras iniciales de un proyecto queden económicamente protegidas de inundación y daños. En segundo lugar, han de considerarse los siguientes aspectos: hidrología de la cuenca, topografía y geología de la boquilla, tipo de cortina, programa constructivo y análisis de los daños y atrasos potenciales.

En general y según la literatura especializada, a este tipo de obras debe asignarse un Tr de 10 a 25 años para la obra de desvío. Sin embargo, según la normatividad de la CONAGUA el Tr debe estar entre 50 y 100 años para grandes presas, categoría correspondiente al proyecto en estudio. En este caso, se diseñará la obra con un Tr de 25 años considerando que se puede aceptar un riesgo de falla hidrológico, el cual pueda rebasar la cortina en caso de presentarse una avenida mayor a la de diseño.

En cuanto al período de retorno de la obra de excedencias se consideran 10 000 años, por ser una obra con período prolongado de funcionamiento y por las grandes consecuencias que originaría la falla o ruptura de la presa.

Del análisis de gastos máximos mensuales al sitio del P.H. Amuchiltite, para la obra de desvío se pretende tomar los meses de estiaje los cuales comprenden los meses de Diciembre a Mayo, resultando el gasto máximo de 614 m<sup>3</sup>/s correspondiente a un periodo de retorno de 25 años, con el fin de conocer los gastos que se tendrán para el manejo del río en obras preliminares y del análisis de gastos máximos anuales se tiene un gasto máximo de 4 443 m<sup>3</sup>/s para un período de retorno de 25 años, con el cual se dimensionará la obra de desvío definitiva durante la construcción del proyecto.

Para la obra de excedencias se seleccionó un período de retorno de 10 000 años, ya que se trata de una obra que tendrá un funcionamiento a lo largo de la vida de la presa, por tanto al gasto correspondiente a este período de retorno es de 15 501 m<sup>3</sup>/s para Amuchiltite y 15 377 m<sup>3</sup>/s para Santa Rosa, Figura 5-1.

**P.H. Sta Rosa**

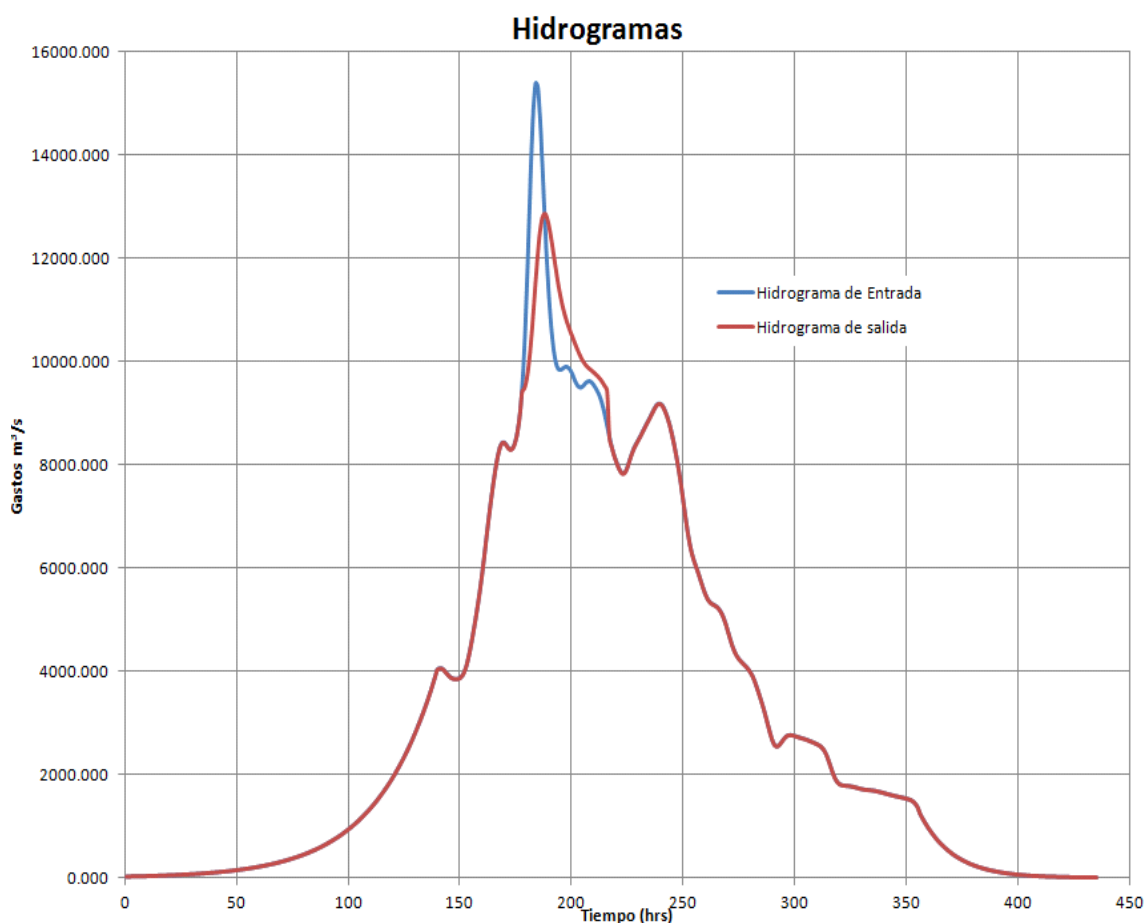
**DATOS DE ENTRADA PARA CÁLCULO DE PERFIL DE VERTEDOR**

**PARÁMETROS DEL PROYECTO**

Concepto	Entrada
Elev. Corona (msnm)	<b>795,00</b>
NAME (msnm)	<b>793,50</b>
Nivel de la cresta (msnm)	<b>775,00</b>
NAMINO (msnm)	<b>735,00</b>
Elev. Del cauce (msnm)	<b>630,00</b>
Longitud de la cresta (m)	<b>100,39</b>
Pendiente aguas abajo	<b>1,25</b>

**RESULTADOS DEL TRÁNSITO**

Concepto	VALOR
Período de retorno (años)	10 000
Coef. De descarga	<b>2,000</b>
Gasto máximo entrada (m³/s)	15377,87
Volumen de la avenida (millones de m³)	4963,51
Gasto máximo descargado (m³/s)	12866,80
Carga bruta de diseño	145,00
Elev. Máxima *	793,5



**Figura 5-1 Resultados para la Obra de Excedencias de Santa Rosa**

## 5.2 Opciones estudiadas

Con base a la información y estudios disponibles se analizaron varias alternativas, éstas se enuncian a continuación:

1. Sobreelevación de la cortina actual de la C.H. Santa Rosa y conducción hasta el NAMO del P.H. la Yesca.

Para esta alternativa se considera sobreelevar la cortina actual hasta la elevación 795msnm (INEGI) y convertirla en cortina de CCR con talud de 0,8:1.

Se realizaron esquemas de obra para analizar el trazo correcto de la cortina y de la conducción de 16 km cuyo portal de salida se encontraría en la cola del embalse del P.H. La Yesca, mismo lugar donde se planea que esté ubicada la casa de máquinas.

Para las diversas alternativas se realizaron los cálculos de volúmetrías para las obras de: contención, túnel de baja carga, casa de máquinas y se inició un planteamiento preliminar de la obra de excedencias.

2. Construcción de un túnel de baja presión de 16 km desde la C.H. Santa Rosa hasta el NAMO del P.H. La Yesca

En ésta alternativa se propuso la construcción del mismo túnel del caso anterior; sin embargo, no se consideró la sobreelevación de la cortina actual. De la misma forma se realizaron los funcionamientos de vaso para las condiciones de carga así como la evaluación económica.

3. Sobreelevación de la cortina actual de la C.H. Santa Rosa con casa de máquinas a pie de cortina.

En ésta opción se consideraron las condiciones de sobreelevación de la alternativa 2, que en este caso no se consideró el túnel y se propuso la construcción de una casa de máquinas a pie de cortina por margen izquierda.

Se llevó a cabo el cálculo de los funcionamientos de vaso para las condiciones de niveles de aguas de cada alternativa, asimismo se realizaron los cálculos necesarios en cuestión de hidrología así como el presupuesto de la alternativa (SICOSTOS), en base a lo cual se realizó un análisis comparativo para elegir la opción que presenta una mejor relación beneficio costo la cual será la más viable para su realización.

4. Optimizar y evaluar técnica y económicamente el P.H. Amuchiltite con generación a pie de presa y el NAMO al nivel del desfogue de la C.H. Santa Rosa

Finalmente se consideró un funcionamiento en cascada con la opción anterior y una presa más baja (70m) en el sitio denominado Amuchiltite, con generación a pie de presa.



Para esta alternativa se realizó el funcionamiento de vaso en forma de cascada tomando en cuenta Santa Rosa, asimismo se tienen esquemas de obra, cálculo preliminar de la volumetría, así como también el presupuesto correspondiente.

### 5.3 Evaluación económica del desazolve de la presa Santa Rosa

Se estudiaron diferentes opciones para desazolvar la cortina de la central y se realizó una evaluación económica para cada una de ellas. Las opciones analizadas fueron:

1. Un túnel de desazolve por margen derecha de sección circular con diámetro de 7 metros, pendiente de 0.0500, longitud de 1560 m y portal de entrada en la elevación 750 msnm.
2. Desazolvar por medio de camiones en temporada de estiaje.
3. Implementar alguna metodología para dragar el azolve desde la corona de la cortina hasta la elevación de la descarga de fondo y así ponerla en operación.

#### 5.3.1 Túnel por margen derecha para desazolve

Para esta opción se estudió la construcción de un túnel de 7 m de diámetro de sección circular por margen derecha por la cual en temporada de avenidas se dejen pasar los azolves que se acumulan en el embalse, como se muestra en las Figura 5-2 y Figura 5-3, esta opción se descartó debido a que la zona en la que se pretendía ubicar no presenta las características adecuadas para que funcione adecuadamente, ni para que se presente un arrastre de sedimentos importante.

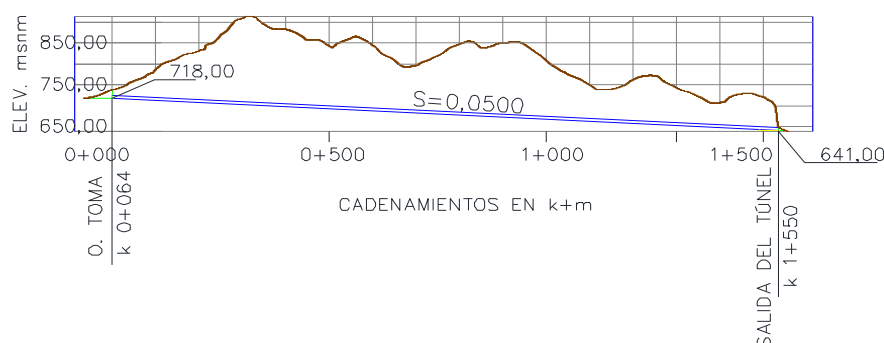
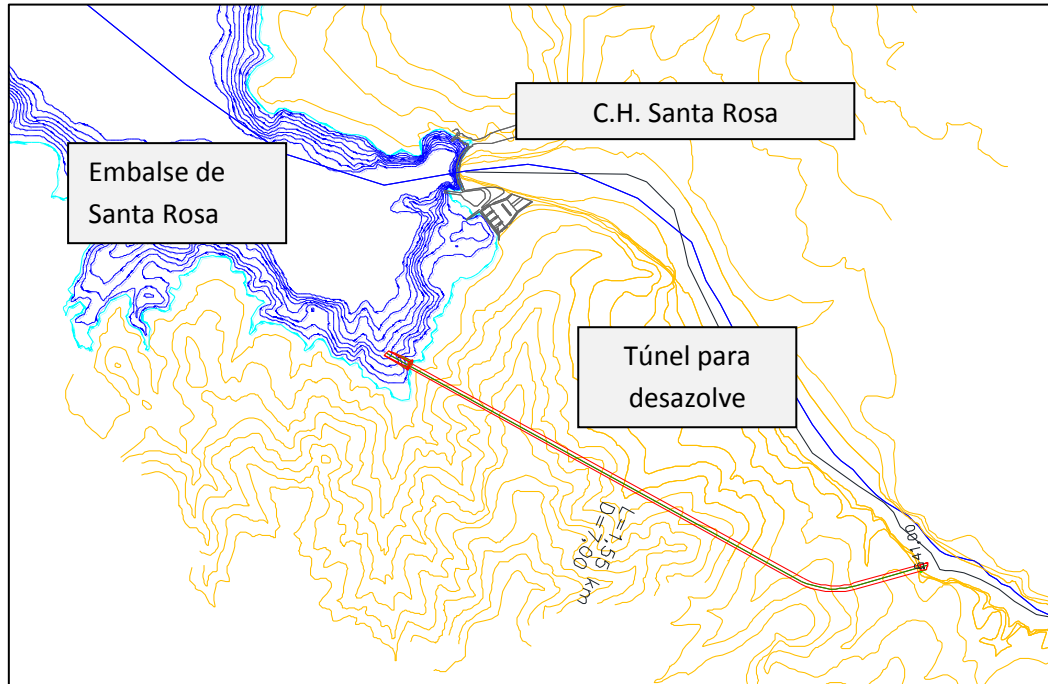


Figura 5-2 Perfil del túnel propuesto por margen derecha

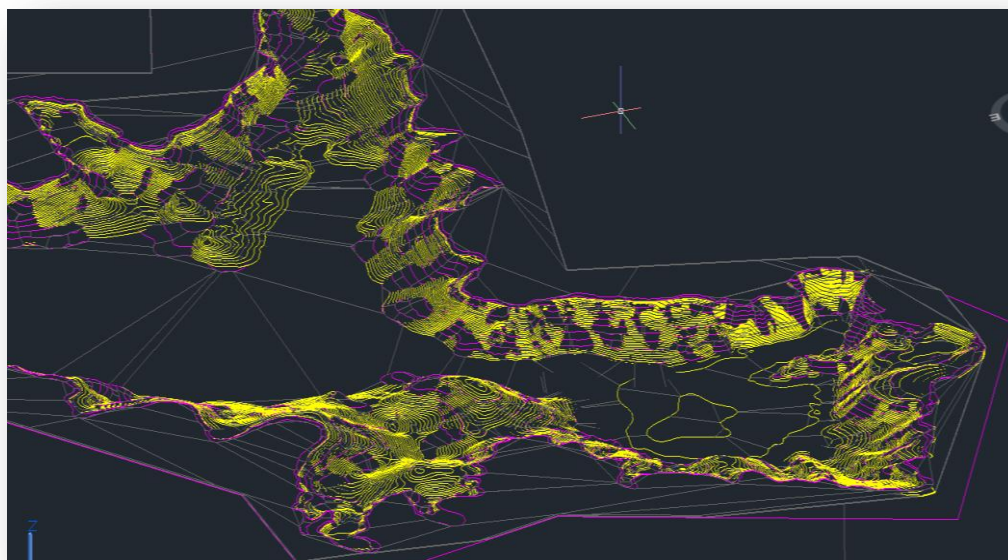


**Figura 5-3 Ubicación propuesta del túnel para azolves.**

### 5.3.2 Remoción de sedimentos mediante maquinaria

Con la batimetría de 2006 y 2011 se realizaron modelos digitales de elevaciones para cada una de ellas, con lo que se compararon las superficies obtenidas (Figura 5-4) de donde se calculó la diferencia en el volumen de sedimentos, aportado por la cuenca en ese período, siendo éste del orden  $5,36 \text{ hm}^3$ . Dicho volumen es un aproximado ya que la superficie de la batimetría de 2006 es solo una fracción de la obtenida para 2011.

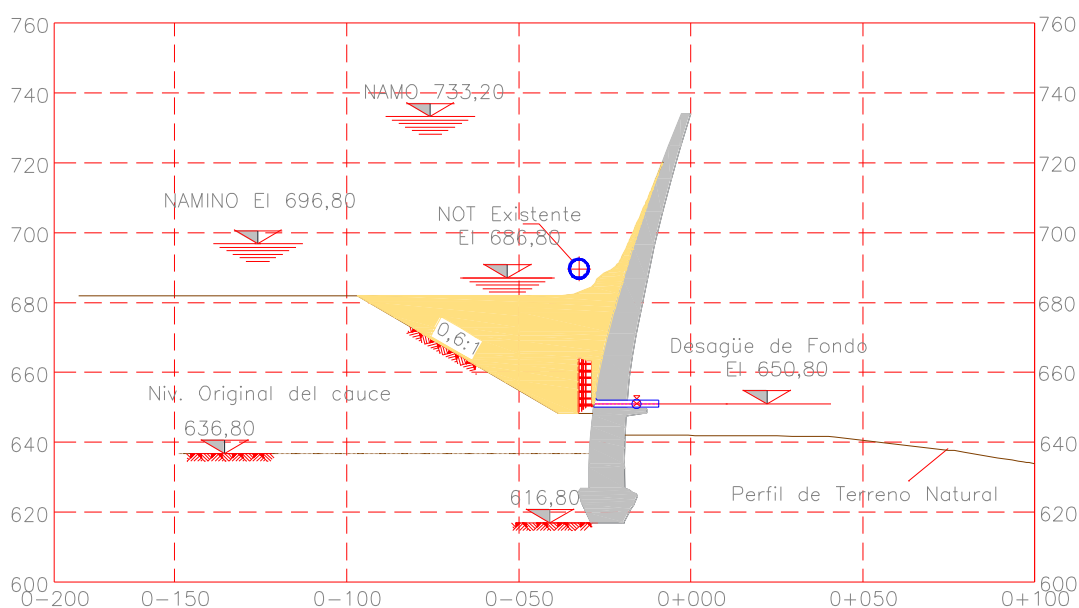
Se realizó el cálculo de la maquinaria necesaria para mover dicho volumen, considerando la duración de 8 meses. Dando como resultado la cantidad de 39 camiones con capacidad de  $10 \text{ m}^3$  para remover los  $1,07 \text{ hm}^3$  acumulados durante el período de lluvias, con el Precio Unitario P.U. de  $345,00 \text{ \$/m}^3$  el costo anual asociado sería de un total de \$370 Millones de pesos para el desazolve y de \$11 Millones de pesos para el acarreo de material a un P.U. de  $10,29 \text{ \$/m}^3$ , dando el total de \$381 Millones de pesos al año.



**Figura 5-4 MDE para la comparación de las batimetrías 2006 y 2011**

### **5.3.3 Remoción de azolves en la zona de la obra de toma.**

Se calculó el volumen de azolves que se ha depositado en la zona de la obra de toma y desagüe de fondo, Figura 5-5, esto con el objetivo de rehabilitar el desagüe de fondo para reutilizarlo y por medio de un “flushing” remover los azolves y recuperar la zona de la obra de toma. Para remover el material acumulado sobre el desagüe de fondo se debe llegar a remover los azolves acumulados a la cota 650,00msnm. El volumen a remover es de: 0,15 hm<sup>3</sup>, con un PU de desazolve de 345 \$/m<sup>3</sup>, el costo estimado es de \$50,71 millones de pesos. Para esta propuesta se tomaron en cuenta los estudios realizados a los azolves en el año 2011 y que indican que son principalmente arcillas arenosas, con lo cual se propone la remoción por medio de dragado o bombeo que deje un talud no mayor a 0,6:1.



**Figura 5-5 Volumen a retirar para llegar a la toma del desagüe de fondo**

Las 3 opciones fueron consideradas poco viables por la gran cantidad de recursos o infraestructura requerida para su implementación, siendo lo más adecuado la sobreelevación de la cortina actual y aplicar en conjunto una o varias de las opciones propuestas, al mismo tiempo la puesta en marcha de programas para evitar la erosión de las zonas afectadas y así disminuir los arrastres de sedimentos y de esta manera reducir los sólidos en suspensión que llegan al embalse.

#### **5.4 Evaluación de las alternativas.**

Se presentan los resultados de los análisis y comparativas realizadas a las alternativas estudiadas que se mencionaron con anterioridad y el porqué se eligió una sobre las demás alternativas, siendo los factores económicos y técnicos los que se tomaron en cuenta para dicha selección.

##### **5.4.1 Santa Rosa Evaluación Económica**

Con los resultados obtenidos en los funcionamientos de vaso, de las propuestas de las obras y sus cantidades de volúmenes se realizaron las evaluaciones económicas con la ayuda el programa SICOSTOS. En la Tabla 5-3 se presentan los datos de potencia, generación y niveles de operación resultantes de este estudio y que se utilizarán para el planteamiento de alternativas y su evaluación económica para las alternativas estudiadas, asimismo se presentan los resultados de dicha evaluación económica con sus

costos asociados y la relación beneficio-costo asociado a cada alternativa para el factor de planta (F.p.) de 0,4 usado.

**Tabla 5-3 Resultados de la evaluación económica de las alternativas estudiadas para el sitio de Santa rosa.**

Concepto Desfogue 580 = Conducción de 16 km Desfogue 643 = Generación al pie de presa		CORTINA DE CCR		CORTINA DE ARCO
		NAMO 790 Desfogue 580	NAMO 790 Desfogue 643	Desfogue 580
<b>PRESUPUESTO (mill. USD)</b>				
Factor de planta		0,4		
<b>OBRA CIVIL</b>				
Infraestructura		8,47	6,83	8,34
Obra de desvío		-	-	-
Obra de contención		124,03	112,76	15,78
Planta Hidroeléctrica		187,45	7,70	76,88
Obra de excedencias		-	-	-
<b>Costo de obra civil</b>		<b>320,53</b>	<b>127,59</b>	<b>101,30</b>
<b>Costo de equipo electromecánico</b>				
Planta hidroeléctrica		71,43	62,13	47,95
<b>Costo directo</b>		<b>391,69</b>	<b>189,72</b>	<b>149,26</b>
Inversión presupuestaria		439,30	203,05	167,08
<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA</b>		<b>Unidades</b>		
Potencia instalable	MW	120	136	45
Generación media anual	GWh	252,00	478,00	198,05
Generación secundaria	GWh	0	0	0
Generación firme	GWh	252,00	302,10	198,05
Generación firme en horas pico	GWh	149,76	170,16	56,16
Costo del kW instalable	USD/kW	3 660	1 891	3 885
Costo del kWh nivelado (t = 12%)	¢USD/kWh	23,87	7,61	12,47
Relación beneficio/costo		<b>0,58</b>	<b>1,21</b>	<b>1,00</b>

Para esta etapa del proyecto se analizaron y evaluaron económicamente los F.p. de 0,4 y 0,25 para las alternativas planteadas para el P.H. Santa Rosa, siendo los de 0,4 los que se eligieron para evaluarlos en conjunto con el P.H. Amuchiltite, esto para analizar con más detalle la opción de la alternativa sobrelevando la cortina y la puesta en marcha del P.H. Amuchiltite.

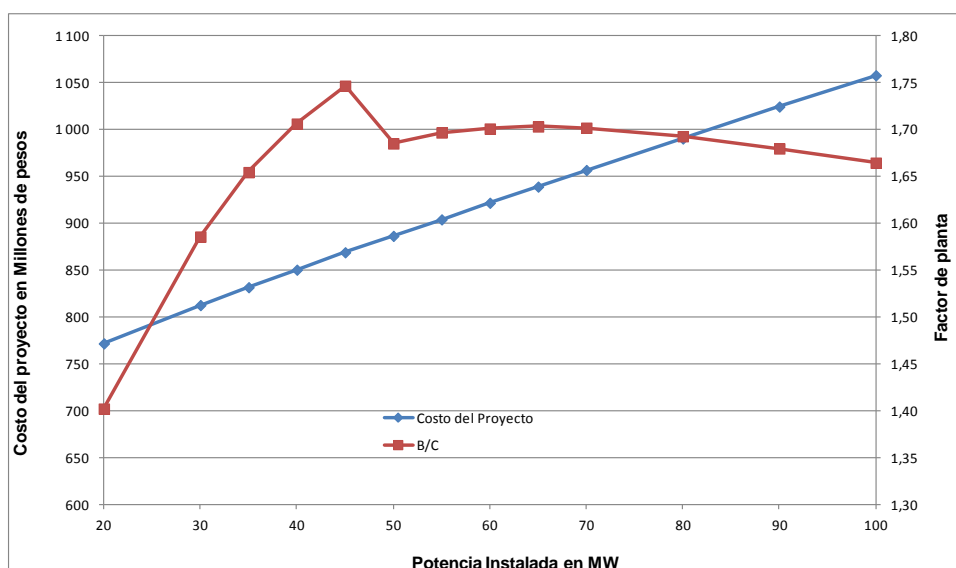
### 5.4.2 Amuchiltite Evaluación Económica

Del análisis de funcionamientos de vaso se realizaron evaluaciones económicas preliminares, tomando como base las cantidades de obra civil realizadas en el estudio de 2007, actualizando los costos a 2011 y cambiando los costos de equipo electromecánico para cada potencia instalada, en el rango de 20 a 100 MW, cuyos resultados se observan en la Tabla 5-4.

**Tabla 5-4 Resultados de la evaluación económica.**

PI MW	Generacion GWh		Costo Proyecto	Relación B/C	Tasa Interna de Retorno	Costo kW Intstable	Costo kW Nivelado	Número de Unidades	Factor de Planta
	Total	Firme	Millones de \$		%	\$	\$		
20	118,08	63,48	771,91	1,402	16,75%	38 595,69	1,002	1	0,80
30	143,26	63,48	812,80	1,586	18,86%	27 093,24	0,879	2	0,66
35	153,58	63,48	831,84	1,655	19,64%	23 766,95	0,843	2	0,61
40	162,05	63,48	850,54	1,706	20,23%	21 263,52	0,819	2	0,57
45	169,30	63,48	869,12	1,747	20,68%	19 313,72	0,804	2	0,53
50	176,01	63,48	886,60	1,685	20,47%	17 732,10	0,837	2	0,50
55	182,10	63,48	904,21	1,697	20,62%	16 440,11	0,826	2	0,48
60	187,66	63,48	921,93	1,701	20,68%	15 365,44	0,819	2	0,45
65	192,84	63,48	939,18	1,703	20,72%	14 448,86	0,813	2	0,43
70	197,52	63,48	956,86	1,702	20,71%	13 669,47	0,810	2	0,41
80	205,40	63,48	990,48	1,693	20,62%	12 381,05	0,780	2	0,38
90	212,52	63,48	1 024,57	1,680	20,48%	11 384,12	0,808	2	0,35
100	218,89	63,48	1 057,96	1,665	20,31%	10 579,57	0,811	2	0,33

De este análisis se puede observar que la potencia instalada con una relación beneficio/costo es la 45 MW, por lo que habrá que optimizar la potencia a instalarse y hacer una análisis más profundo para su evaluación económica, Figura 5-6.



**Figura 5-6 Costo con relación a la potencia instalada del proyecto**

**Tabla 5.5 Resultados de la evaluación económica de las alternativas estudiadas para el sitio de Amuchiltite.**

<b>Concepto</b>		<b>Amuchiltite Fp=0,37</b>	<b>Amuchiltite Fp=0,61</b>
<b>PRESUPUESTO (mill. USD)</b>			
Obra civil:			
Infraestructura		3,85	3,85
Obra de desvío		5,28	5,09
Obra de contención		32,92	31,50
Planta Hidroeléctrica		3,56	3,43
Obra de excedencias		5,45	5,25
Costo de obra civil		51,64	49,67
Costo de equipo electromecánico			
Proyecto parcial		20,19	11,77
Imprevistos de obra civil		3,57	3,38
<b>Costo directo</b>		<b>75,35</b>	<b>70,44</b>
<b>Inversión presupuestaria</b>			
<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA</b>	<b>Unidades</b>		
Potencia instalable	<b>MW</b>	66	22
Generación media anual	<b>GWh</b>	230,68	116,84
Generación secundaria	<b>GWh</b>	47,33	69,30
Generación firme	<b>GWh</b>	183,35	47,54
Generación firme en horas pico	<b>GWh</b>	82,37	27,46
Costo del kW instalable	<b>USD/kW</b>	1 142	2 947
Costo del kW/h nivelado (t=12%)	<b>¢USD/kWh</b>	5,45	8,47
Relación beneficio/costo		<b>2,38</b>	<b>1,25</b>



## 6. CONCLUSIONES

- Para el estudio hidroenergético de las alternativas de ampliación de Santa Rosa se obtuvo que la mejor opción sería sobreelevar la cortina y generar al pie de presa, esto en conjunto con la puesta en marcha del P.H. Amuchiltite sería la mejor opción con base a las comparativas hechas con la relación Costo-Beneficio de los proyectos.
- De los trabajos de batimetría, se puede constatar que el azolvamiento del embalse de la C.H. Santa Rosa ya llegó al nivel de la obra de toma, lo cual hace que actualmente la Central no funcione como fue diseñada, para lo cual es necesario proponer obras para su desazolve.
- Los estudios para caracterizar los azolves depositados en el embalse de la presa mostraron que no se encuentran consolidados de manera importante y que su remoción puede llevarse a cabo por medio de dragado o bombeo, sin embargo el alto costo de estos trabajos hace poco viable la implementación de esta opción, así como la remoción por medio de maquinaria de los azolves, ya que solo se tendría acceso a los que se han depositado en los márgenes del embalse siendo estos mínimos.
- De los estudios de mecánica de suelos se observó que los azolves están formados principalmente por arcillas y arenas, de los análisis realizados para determinar las características CRETIB de los residuos, no se encontraron características de Corrosividad, Reactividad, Inflamabilidad, Explosividad, Toxicidad al ambiente y Biológicos-Infeciosos, fuera del rango permitido por la Norma correspondiente, con la excepción de un punto en la entrada del embalse en un único muestreo, en ese punto el metal pesado Cadmio salió de los parámetros permitidos, además se tiene una alta presencia de agentes biológicos conocidos como coliformes fecales.
- Se propone la alternativa de CCR sobreelevándola a la cota 705 msnm generando al pie de presa, junto con el P.H. Amuchiltite como la mejor opción estudiada. El análisis de Costo-Beneficio correspondiente arrojó una relación B/C de 1,74, por lo cual el arreglo de una cortina sobreelevada con generación a pie de presa y la puesta en marcha del P.H. Amuchiltite sería el mejor esquema para aprovechar el tramo de Río Santiago para generación hidroeléctrica.

## **ANEXO A**

Las muestras de los sondeos fueron clasificadas preliminarmente en campo, se etiquetaron, protegieron y trasladaron al laboratorio de mecánica de suelos en la Ciudad de México, donde de acuerdo con las características del proyecto y del tipo de material, se realizaron las pruebas siguientes:

- Clasificación y contenido de agua natural (LMS-L02-R2 - ASTM D 2488-00)\*.
- Límites de consistencia (líquido y plástico) (LMS-L05-R4 - ASTM D 4318-00)\*.
- Porcentaje de finos (por lavado) (LMS-L45-R0 - ASTM D1140-00)\*.
- Densidad de sólidos en suelo menor que malla No. 4 (LMS-L07-R3 - ASTM D 854-06)\*.
- Resistencia no drenada con torcómetro de bolsillo. (ASTM D 4648-94).
- Compresión simple (qu) (ASTM D 2166-00).

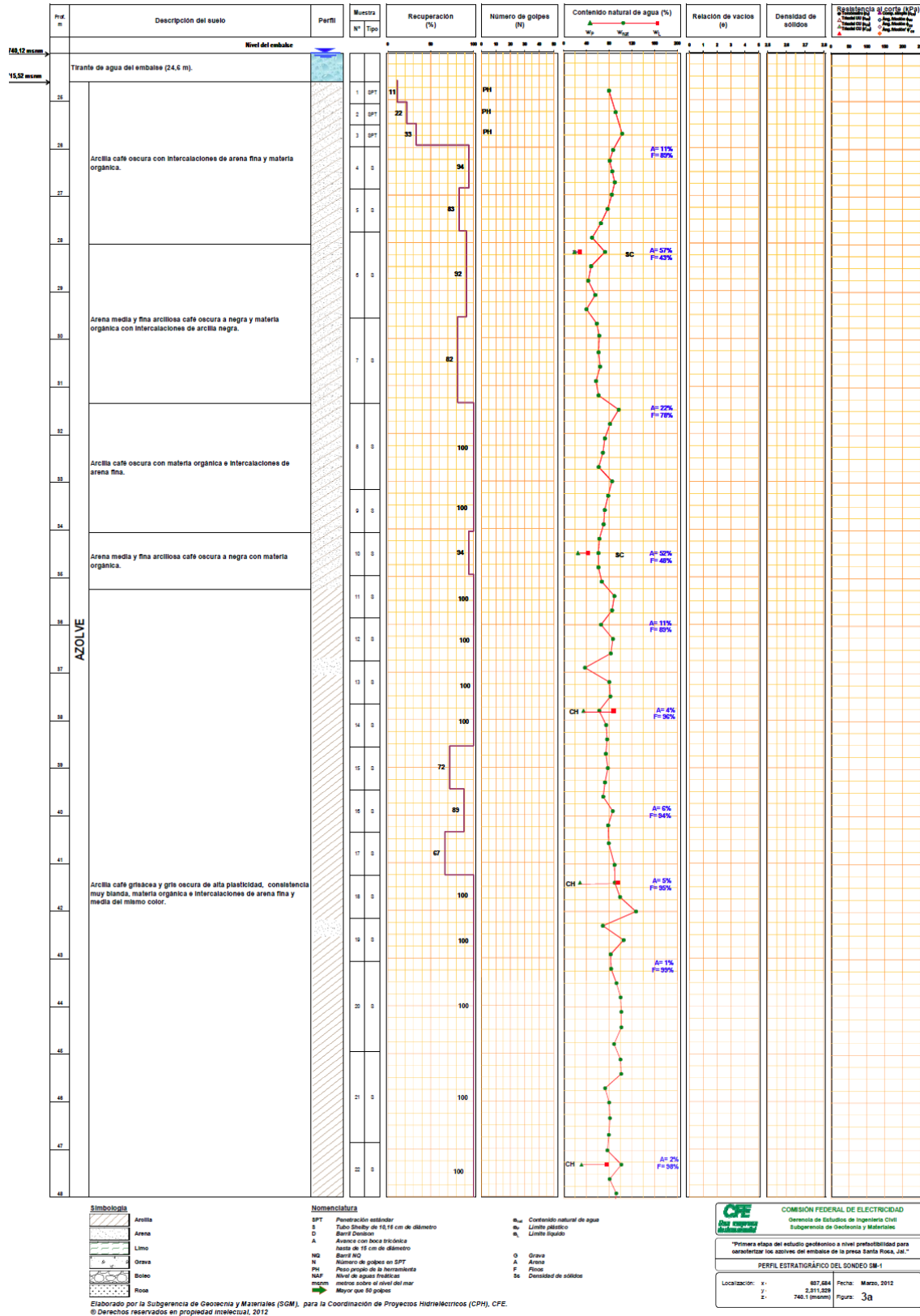
\* Pruebas ejecutadas con la norma NMX-C-416-ONNCCE-2003 y acreditadas bajo la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 ante la Entidad Mexicana de Acreditación (ema) N° C-081-016/06 del 6/09/06.

Los resultados de las pruebas ejecutadas se presentan en los perfiles estratigráficos de las figuras 3 a 6, y en las figuras 7 a 14 se muestran los resultados de las pruebas de compresión simple realizadas

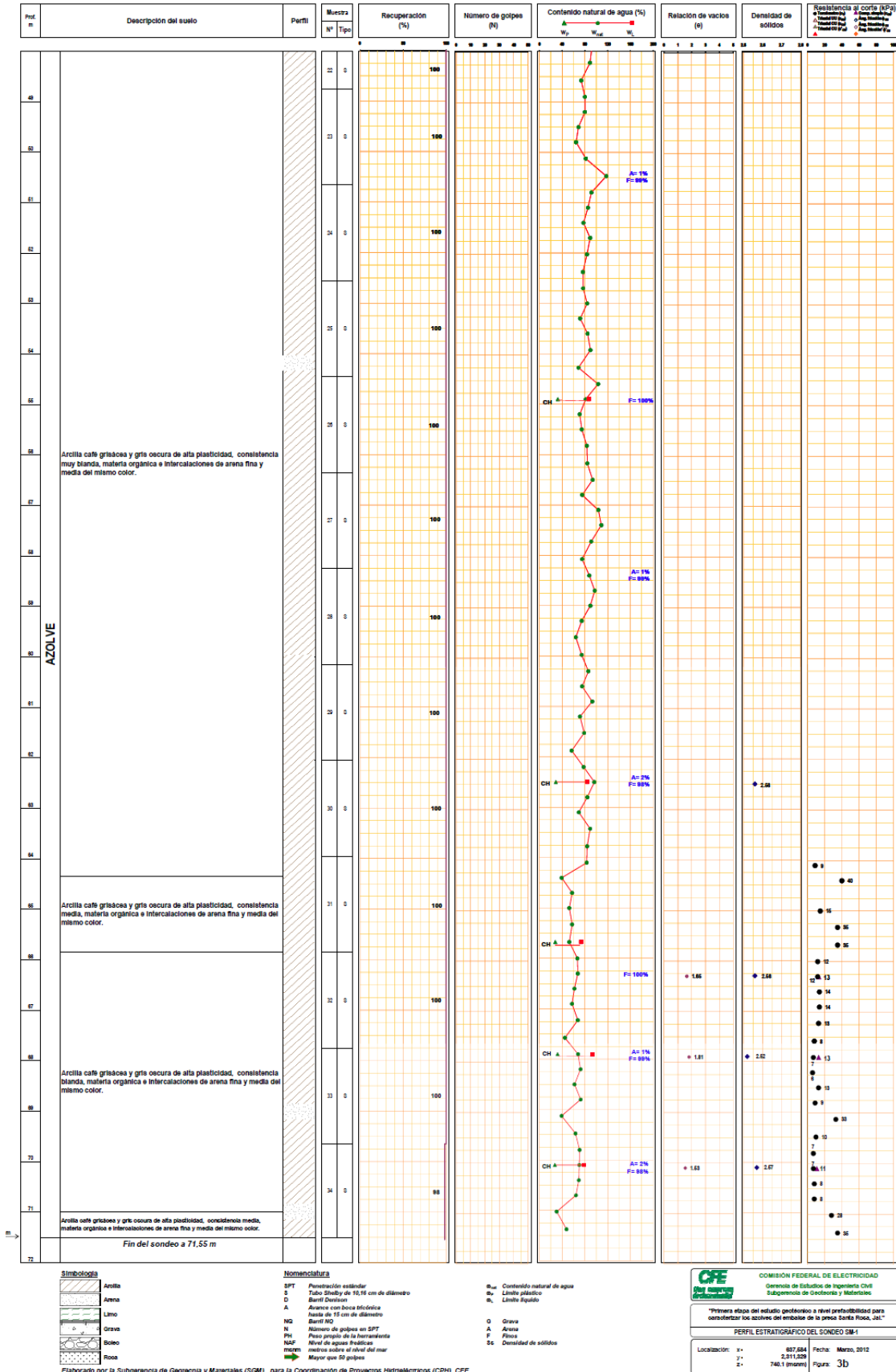
# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

"Primera etapa del estudio geotécnico a nivel prefactibilidad para caracterizar los azolves del embalse de la presa Santa Rosa, Jal."

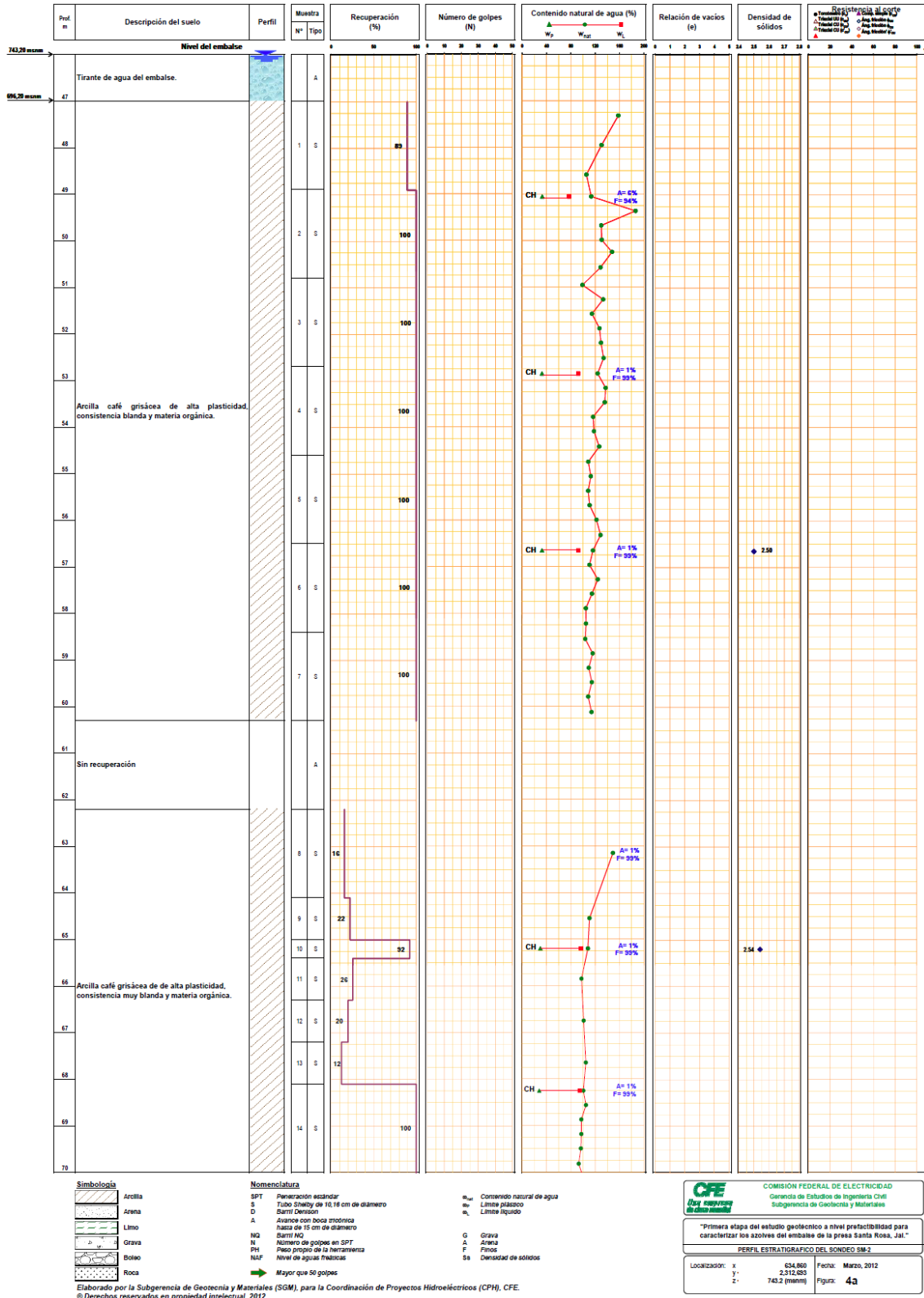
Informe 12-13-SGM/S



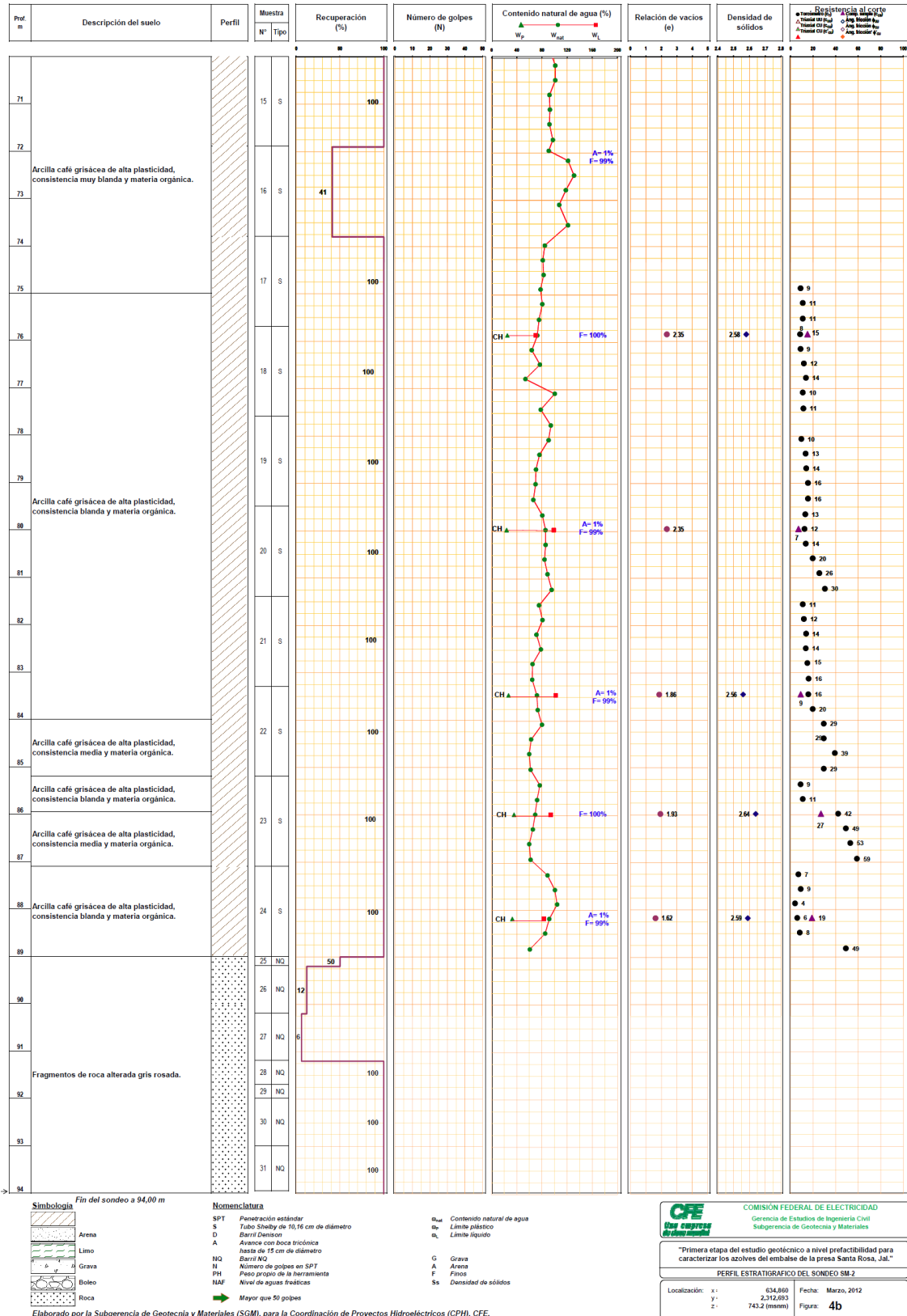
# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca



# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

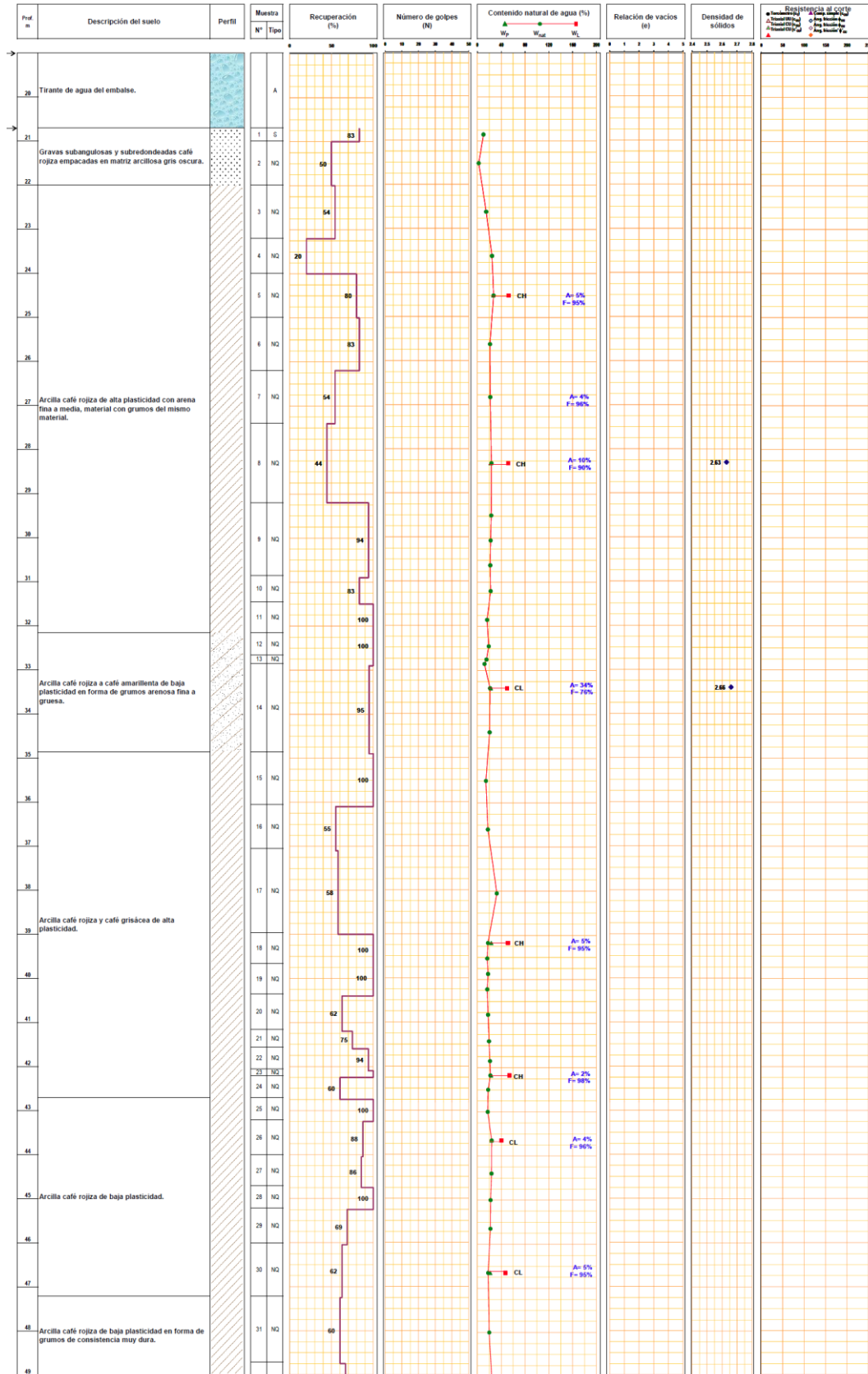


# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca





# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca



**Simbología**

- Arcilla
- Arena
- Limo
- Grava
- Boleo
- Roca

**Nomenclatura**

- SPT Penetración estándar
- S Tubo Shelby de 50,16 cm de diámetro
- D Barril Decimón
- A Alfiler con boca tridónica hasta de 15 cm de diámetro
- NO Barril NO
- N Número de golpes en SPT
- PN Pico original de la herramienta
- NAP Nivel de aguas freáticas
- ➔ Mayor que 80 golpes

Elaborado por la Subgerencia de Geotecnia y Materiales (SGM), para la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos (CPH), CFE.  
© Derechos reservados en propiedad intelectual, 2012

**Nomenclatura**

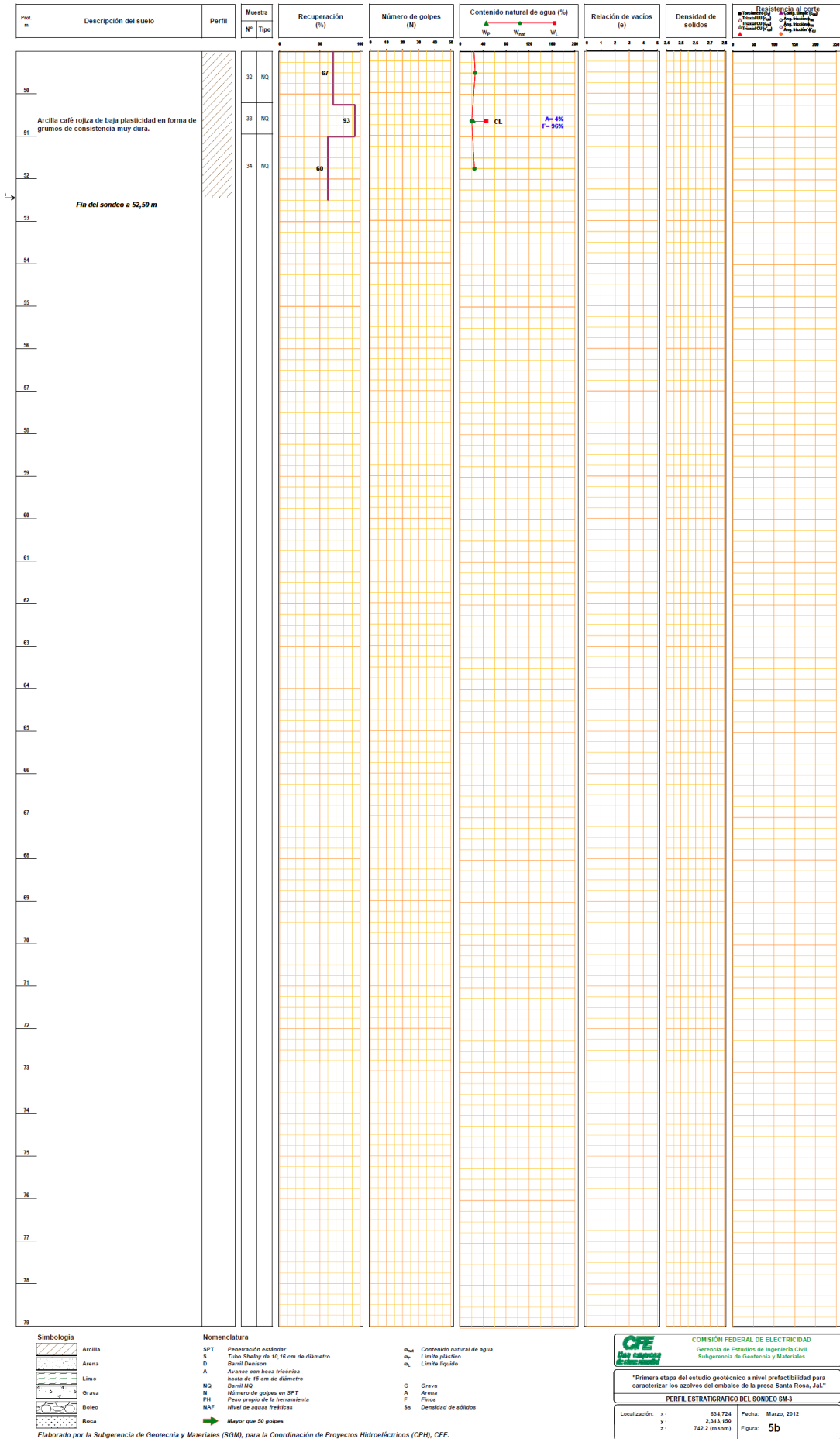
- W<sub>n</sub> Contenido natural de agua
- W<sub>p</sub> Límite plástico
- W<sub>L</sub> Límite líquido
- G Grava
- A Arena
- F Fines
- Ss Densidad de sólidos

**CFE** COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD  
 Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil  
 Subgerencia de Geotecnia y Materiales

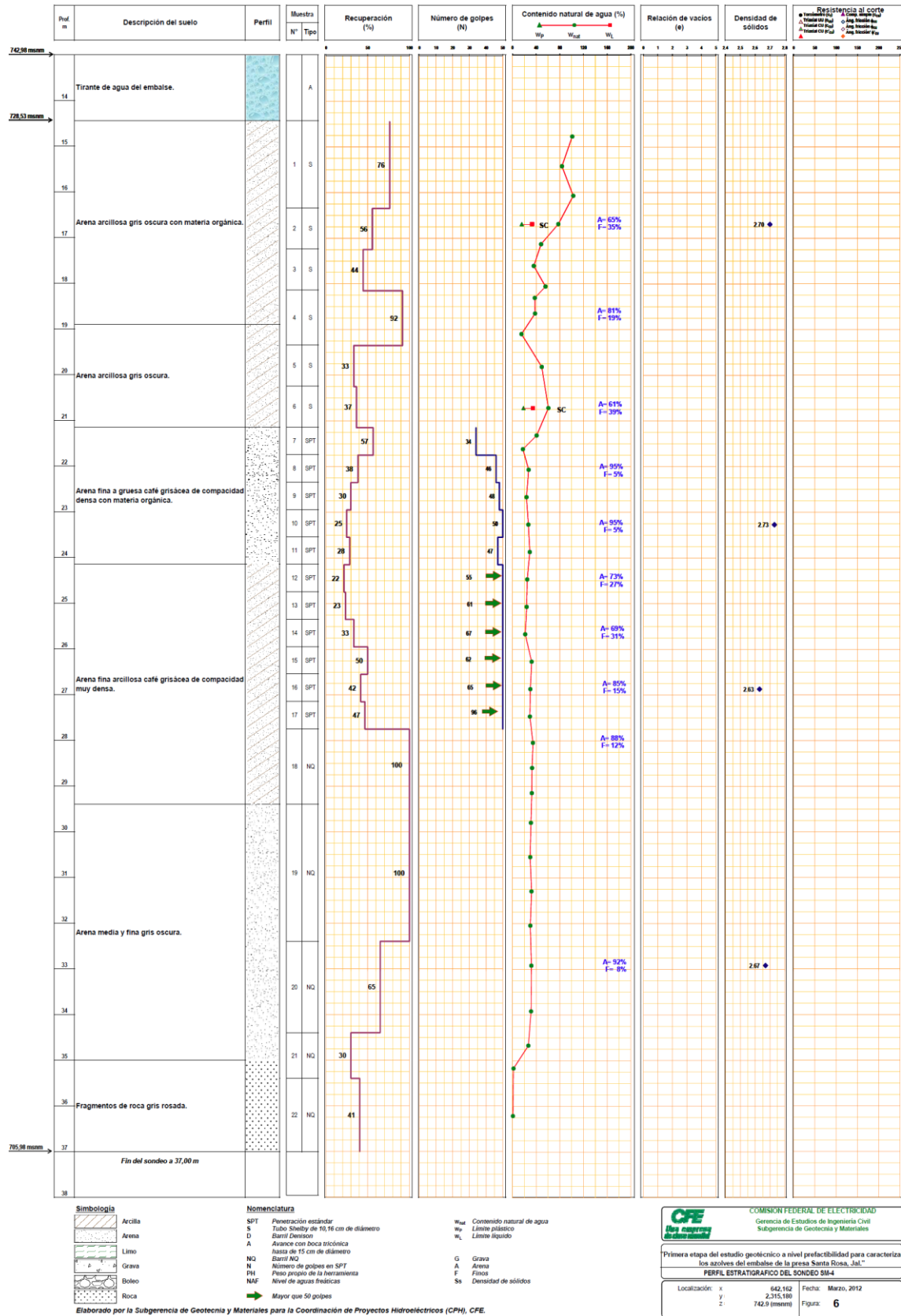
"Primera etapa del estudio geotécnico a nivel factibilidad para caracterizar los suelos del embalse de la presa Santa Rosa, Jal." **PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL SONDEO SM.3**

Localización: x: 634,724 y: 2,313,150 z: 742.2 (msnm) Fecha: Marzo, 2012 Figura: **5a**

# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

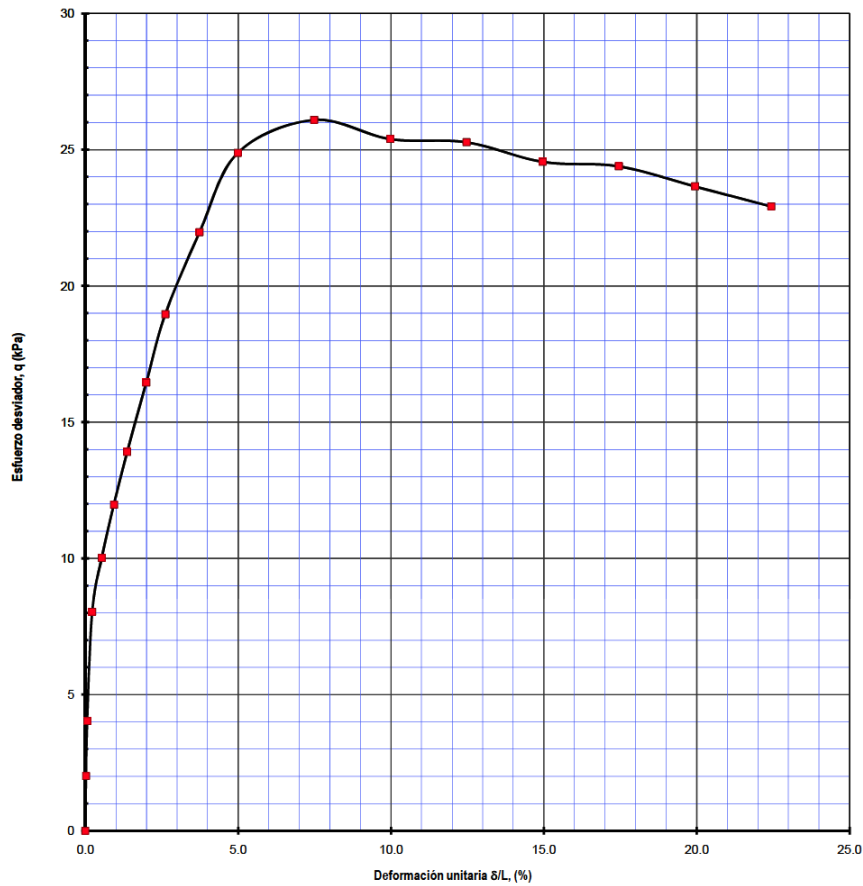


# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca



Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

SONDEO	MUESTRA	PROF. m	DENSIDAD DE SÓLIDOS	RELACIÓN DE VACÍOS	CONTENIDO DE AGUA	GRADO DE SATURACIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	ÍNDICE PLÁSTICO	ÍNDICE DE LIQUIDEZ	PESO VOLUMÉTRICO		Resistencia a la compresión simple (qu)	Resistencia no drenada	Módulo de Elasticidad	Módulo de Elasticidad	CLASIFICACIÓN SUCS
			G <sub>s</sub>	e	w	S <sub>r</sub>	w <sub>L</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>L</sub>	HÚMEDO y <sub>h</sub>	SECO y <sub>s</sub>	kPa	kPa	E <sub>50</sub>	E <sub>1</sub>	
SM-1	32-A1	66.30	2.56	1.65	64.4	99.9	73.6	55.8	0.84	15.6	9.5	26	13	1	3	CH



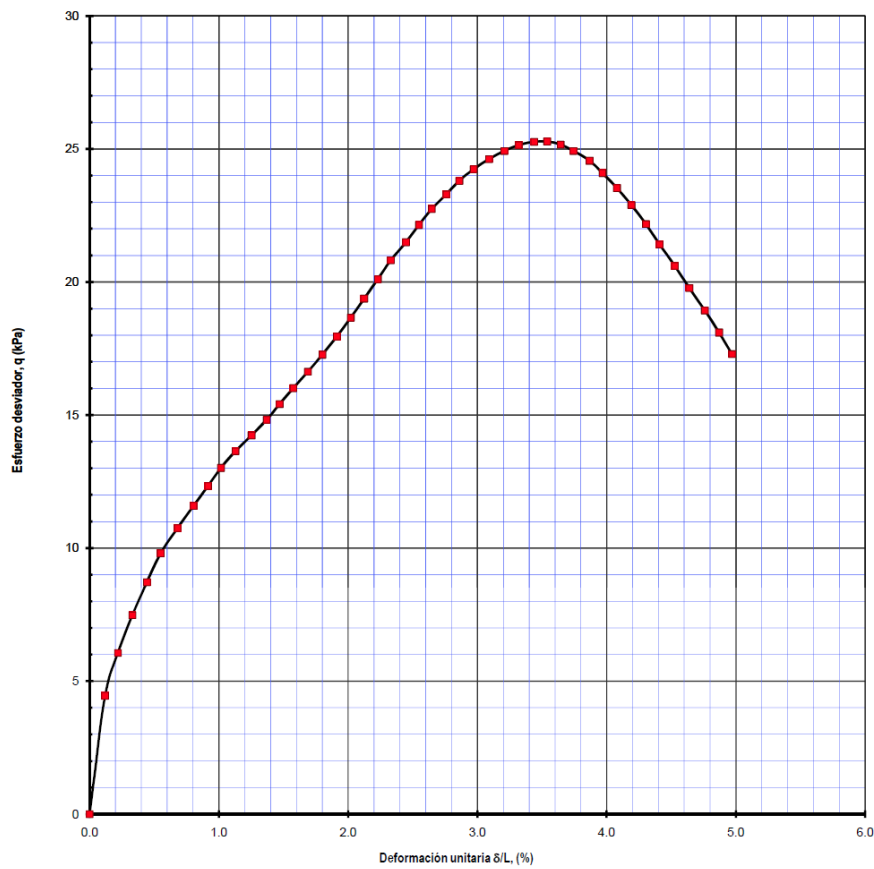
**DESCRIPCIÓN**  
Arcilla café grisácea de alta plasticidad, consistencia blanda y textura jabonosa.

**GRANULOMETRÍA**  
ARENA: 0.2 %  
FINOS: 99.8 %

<p>COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD GERENCIA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES</p> <p>PROYECTO: "Primera etapa del estudio geotécnico a nivel prefactibilidad para caracterizar los azolves del embalse de la presa Santa Rosa, Jal."</p>	<p>PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE</p> <p>FECHA DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA</p> <p>31/01/2012</p>	<p>NOTAS:</p>
	<p>FIGURA No.</p> <p>7</p>	

# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

SONDEO	MUESTRA	PROF. m	DENSIDAD DE SÓLIDOS	RELACIÓN DE VACÍOS	CONTENIDO DE AGUA	GRADO DE SATURACIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	ÍNDICE PLÁSTICO	ÍNDICE DE LIQUIDEZ	PESO VOLUMÉTRICO		Resistencia a la compresión simple (qu)	Resistencia no drenada	Módulo de Elasticidad	Módulo de Elasticidad	CLASIFICACIÓN SUCS
			G <sub>s</sub>	e	w	S <sub>r</sub>	w <sub>L</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>L</sub>	HÚMEDO γ <sub>h</sub>	SECO γ <sub>s</sub>					
			g/cm <sup>3</sup>	—	%	%	%	%	—	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>					
SM-1	33-A1	67.90	2.52	1.81	69.7	97.1	93.3	61.3	0.61	14.9	8.8	25	13	1	2	CH



**DESCRIPCIÓN**

Arcilla café grisácea de alta plasticidad, consistencia muy blanda con materia orgánica y textura jabonosa.

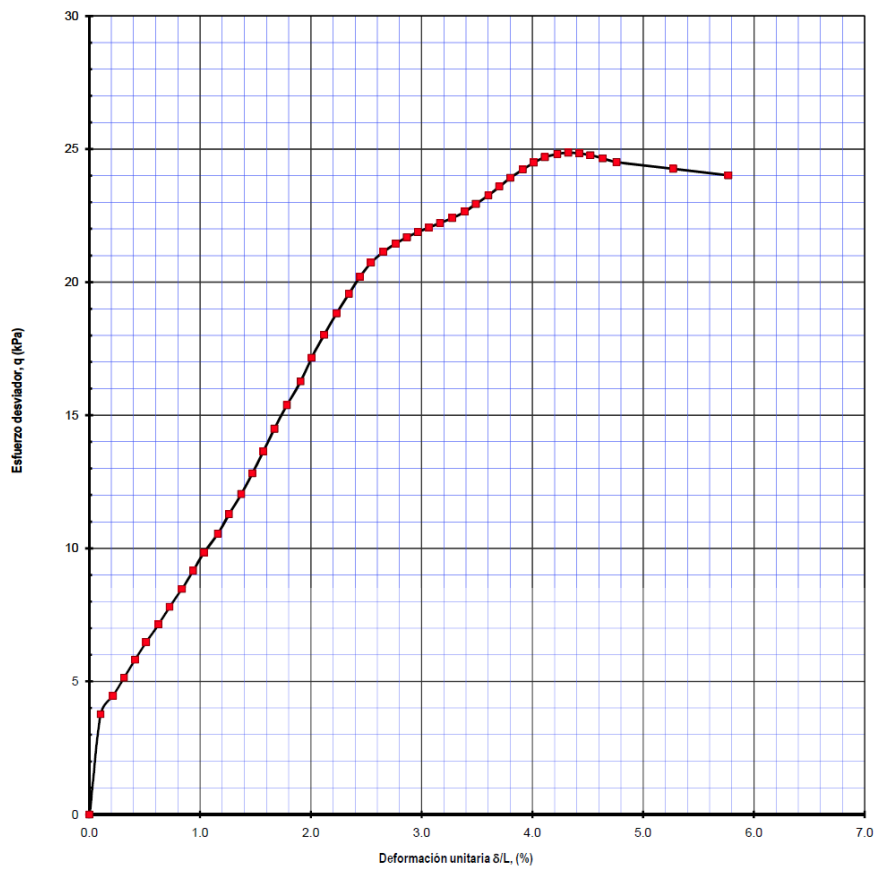
**GRANULOMETRÍA**

ARENA: 0.9 %  
FINOS: 99.1 %

	<b>COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD</b> GERENCIA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES		<b>PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE</b> FECHA DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA <b>31 enero 2012</b>	NOTAS: Presenta una fisura en la parte superior aproximadamente de 1 mm de espesor.
PROYECTO: "Primera etapa del estudio geotécnico a nivel prefactibilidad para caracterizar los azolves del embalse de la presa Santa Rosa, Jal."			FIGURA No. <b>8</b>	

# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

SONDEO	MUESTRA	PROF. m	DENSIDAD DE SÓLIDOS	RELACIÓN DE VAGÍOS	CONTENIDO DE AGUA	GRADO DE SATURACIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	ÍNDICE PLÁSTICO	ÍNDICE DE LIQUEZ	PESO VOLUMÉTRICO		Resistencia a la compresión simple (qs)	Resistencia no drenada	Módulo de Elasticidad	Módulo de Elasticidad	CLASIFICACIÓN SUIC
			G <sub>s</sub>	e	w	S <sub>r</sub>	w <sub>L</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>L</sub>	HÚMEDO y <sub>h</sub>	SECO y <sub>s</sub>					
			g/cm <sup>3</sup>	—	%	%	%	%	—	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>					
SM-1	34-A2	70.10	2.57	1.53	59.3	99.4	78.7	51.5	0.62	15.8	10.0	22	11	1	2	CH



**DESCRIPCIÓN**

Arcilla café grisácea de alta plasticidad de consistencia blanda y textura jabonosa

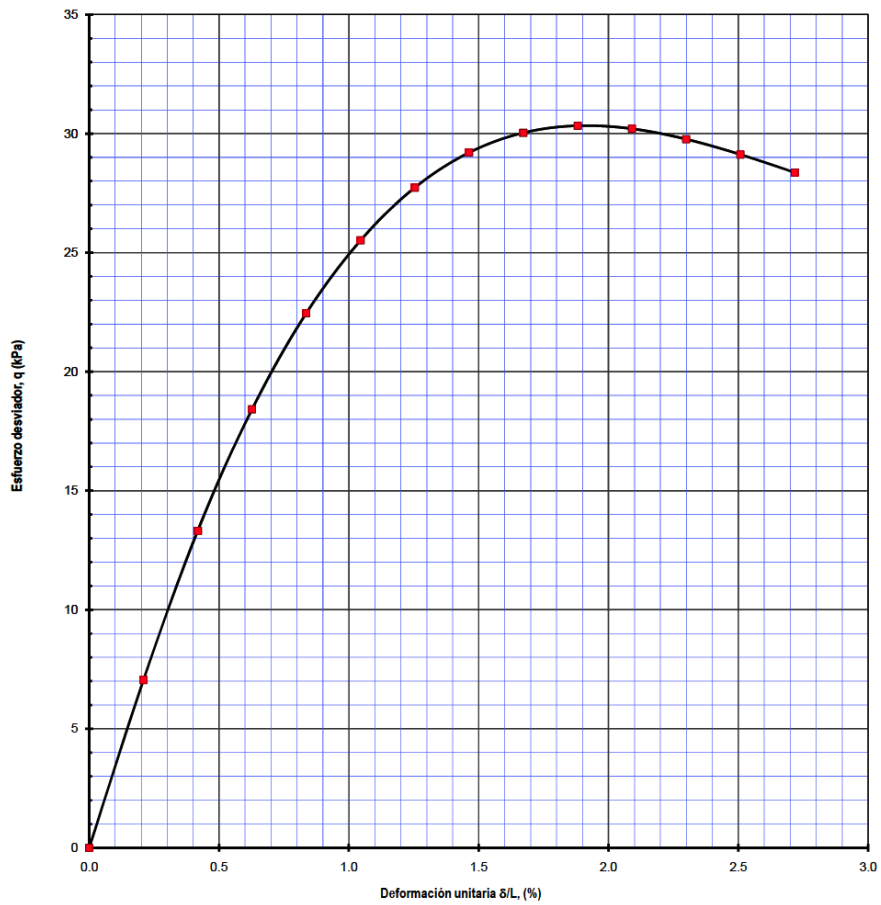
**GRANULOMETRÍA**

ARENA: 2.1 %  
FINOS: 97.9 %

	<b>COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD</b> GERENCIA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES		<b>PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE</b>		NOTAS:
			FECHA DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA		
PROYECTO:			<b>31 ENERO 2012</b>		
"Primera etapa del estudio geotécnico a nivel prefactibilidad para caracterizar los azolves del embalse de la presa Santa Rosa, Jal."			FIGURA No.	<b>9</b>	

## Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

SONDEO	MUESTRA	PROF. m	DENSIDAD DE SÓLIDOS	RELACIÓN DE VACÍOS	CONTENIDO DE AGUA	GRADO DE SATURACIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	ÍNDICE PLÁSTICO	ÍNDICE DE LIQUIDEZ	PESO VOLUMÉTRICO		Resistencia a la compresión simple (qs)	Resistencia no drenada	Módulo de Elasticidad	Módulo de Elasticidad	CLASIFICACIÓN SUCS
			$\rho_s$	$e$	$w$	$S_r$	$w_L$	$I_p$	$I_L$	HÚMEDO $\gamma_h$	SECO $\gamma_s$	kPa	$q_u$	$E_{50}$	$E_{11}$	
			g/cm <sup>3</sup>	—	%	%	%	%	—	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kPa	kPa	MPa	MPa	
SM-2	18-1	75.86	2.58	2.35	91.1	100.0	70.1	45.1	1.47	14.4	7.6	30	15	3	3	CH



DESCRIPCIÓN
Arcilla café de alta plasticidad, textura jabonosa de consistencia muy blanda

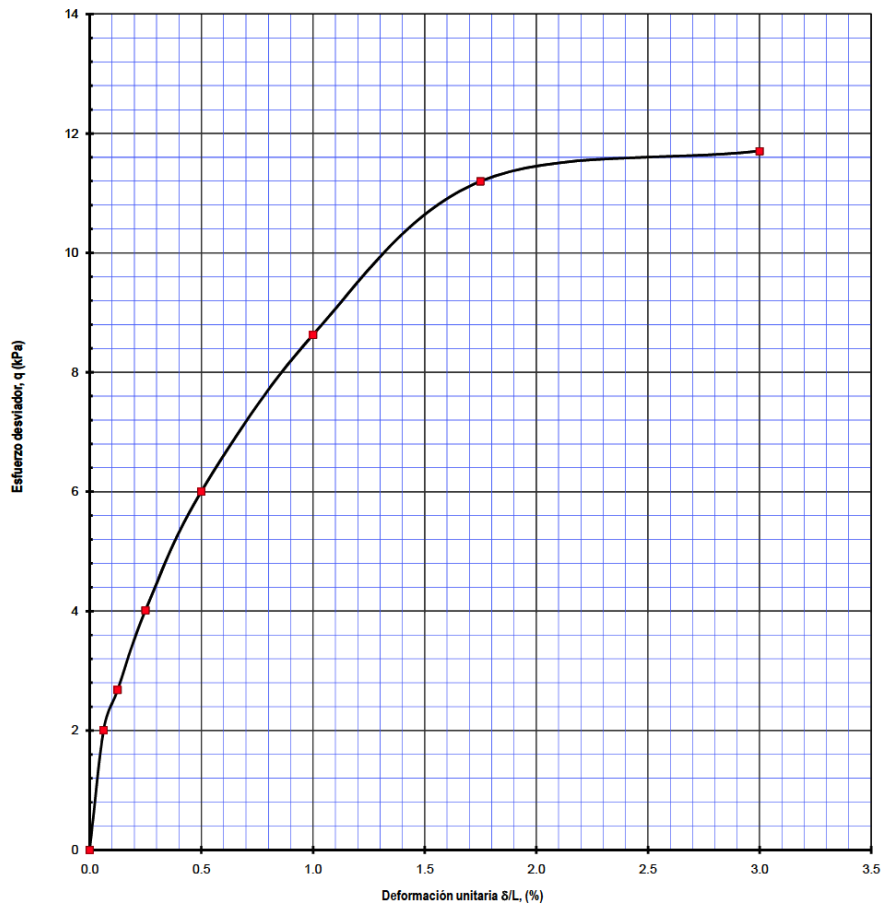
GRANULOMETRÍA	
ARENA:	0.4 %
FINOS:	99.6 %

	<b>COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD</b> GERENCIA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES		PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE		NOTAS:
			FECHA DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA		
PROYECTO:			20-DICIEMBRE-2011		
"Primera etapa del estudio geotécnico a nivel prefactibilidad para caracterizar los azoiles del embalse de la presa Santa Rosa, Jal."			FIGURA No.	10	



# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

SONDEO	MUESTRA	PROF. m	DENSIDAD DE SÓLIDOS	RELACIÓN DE VACÍOS	CONTENIDO DE AGUA	GRADO DE SATURACIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	ÍNDICE PLÁSTICO	ÍNDICE DE LIQUEZ	PESO VOLUMÉTRICO		Resistencia a la compresión simple (q <sub>u</sub> )	Resistencia no drenada	Módulo de Elasticidad	Módulo de Elasticidad	CLASIFICACIÓN SUCS
			G <sub>s</sub>	e	w	S <sub>r</sub>	w <sub>L</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>L</sub>	HÚMEDO y <sub>h</sub>	SECO y <sub>s</sub>	kPa	kPa	E <sub>50</sub>	E <sub>1</sub>	
SM-2	20-2	80.00	2.58	2.35	94.5	100.0	98.9	75.1	0.94	14.6	7.5	13	7	1	1	CH



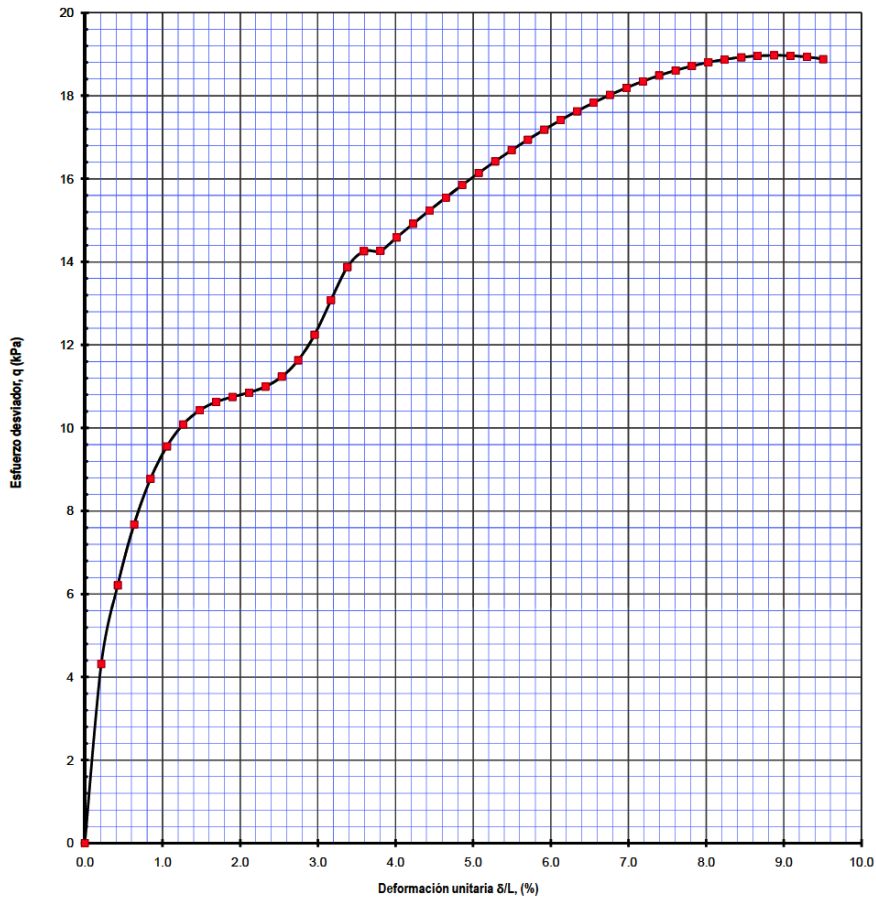
DESCRIPCIÓN
Arcilla café grisácea de alta plasticidad de consistencia muy blanda y textura jabonosa.

GRANULOMETRÍA		
ARENA:	1.0	%
FINOS:	99.0	%

<p style="font-size: small;">COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD GERENCIA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES</p>	<p><b>PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE</b></p> <p>FECHA DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA</p> <p><b>31 ENERO 2012</b></p>	NOTAS:
	<p>FIGURA No. <b>11</b></p>	
PROYECTO: "Primera etapa del estudio geotécnico a nivel prefactibilidad para caracterizar los azolves del embalse de la presa Santa Rosa, Jal."		

# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

SONDEO	MUESTRA	PROF. m	DENSIDAD DE SÓLIDOS	RELACION DE VACIOS	CONTENIDO DE AGUA	GRADO DE SATURACIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	ÍNDICE PLÁSTICO	ÍNDICE DE LIQUEZ	PESO VOLUMÉTRICO		Resistencia a la compresión simple (qs)	Resistencia no drenada	Módulo de Elasticidad	Módulo de Elasticidad	CLASIFICACIÓN SUCS
			Gs	e	w	Sp	LL	Ip	Li	HÚMEDO yH	SECO yS	kPa	ku	Eps	Es	
			g/cm <sup>3</sup>	---	%	%	%	%	---	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kPa	kPa	MPa	MPa	
SM-2	22-2	83.46	2.56	1.86	71.9	98.7	101.9	75.2	0.60	15.0	8.8	18	9	1	1	CH



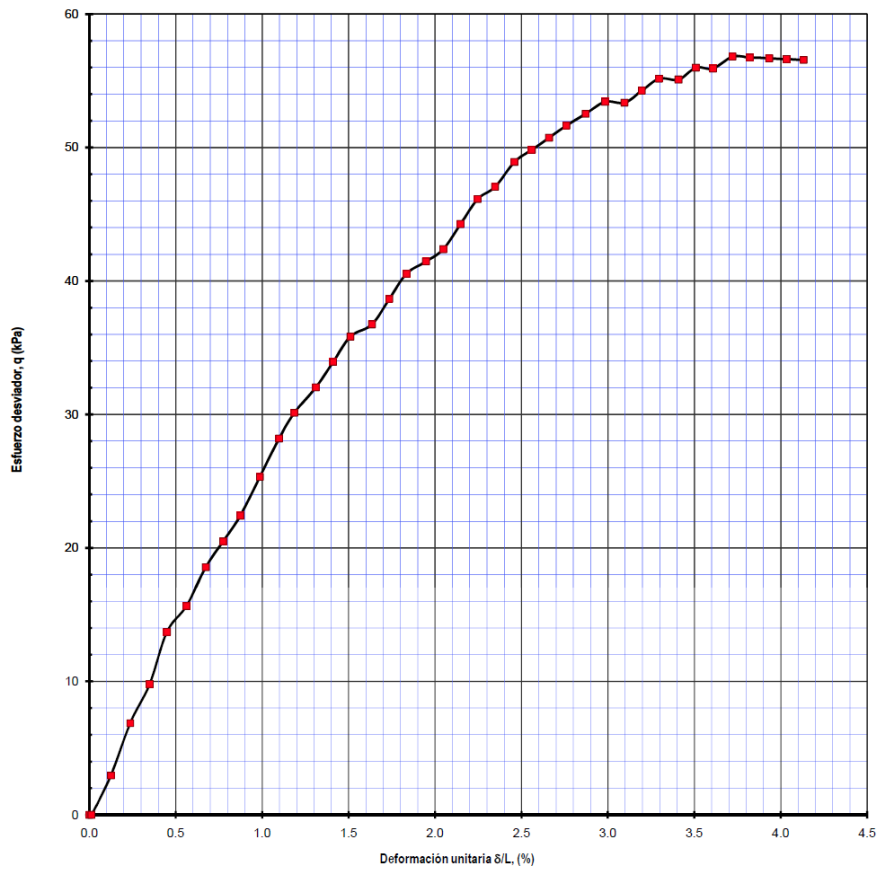
DESCRIPCIÓN
Arcilla café de alta plasticidad de consistencia muy blanda y textura jabonosa.

GRANULOMETRÍA		
ARENA:	1.1	%
FINOS:	98.9	%

	<b>COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD</b> GERENCIA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES		PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE	NOTAS:
			FECHA DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA	
			<b>20-DICIEMBRE-2011</b>	
PROYECTO:	"Primera etapa del estudio geotécnico a nivel prefactibilidad para caracterizar azolves del embalse de la presa Santa Rosa, Jal."		FIGURA No.	<b>12</b>

# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

SONDEO	MUESTRA	PROF. m	DENSIDAD DE SÓLIDOS	RELACIÓN DE VACÍOS	CONTENIDO DE AGUA	GRADO DE SATURACIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	ÍNDICE PLÁSTICO	ÍNDICE DE LIQUEZ	PESO VOLUMÉTRICO		Resistencia a la compresión simple (qs)	Resistencia no drenada	Módulo de Elasticidad	Módulo de Elasticidad	CLASIFICACIÓN SUCS
			Gs	e	w	Sr	ωL	Ip	IL	HÚMEDO y <sub>h</sub>	SECO y <sub>s</sub>					
			g/cm <sup>3</sup>	---	%	%	%	%	---	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>					
SM-2	23-3	86.00	2.64	1.93	71.2	97.8	94.1	58.4	0.61	15.2	8.9	53	27	3	3	CH



**DESCRIPCIÓN**

Arcilla café grisácea de alta plasticidad, consistencia blanda y textura jabonosa.

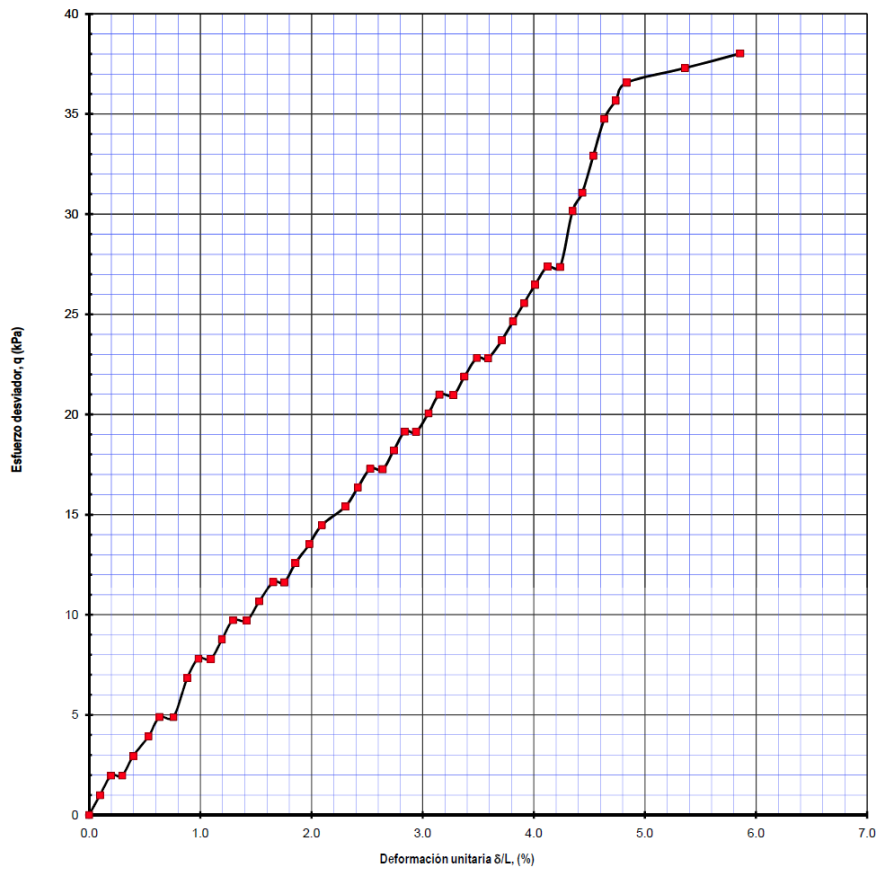
**GRANULOMETRÍA**

ARENA: 0.1 %  
FINOS: 99.9 %

	COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD GERENCIA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES		<b>PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE</b>		NOTAS:
			FECHA DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA		
PROYECTO: "Primera etapa del estudio geotécnico a nivel prefactibilidad para caracterizar los azolves del embalse de la presa Santa Rosa, Jal."			<b>1 FEBRERO 2012</b>		
			FIGURA No.	<b>13</b>	

# Estudio Estratégico del Río Santiago en el tramo comprendido entre la C.H. Santa Rosa y el embalse de La Yesca

SONDEO	MUESTRA	PROF. m	DENSIDAD DE SÓLIDOS	RELACIÓN DE VACÍOS	CONTENIDO DE AGUA	GRADO DE SATURACIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	ÍNDICE PLÁSTICO	ÍNDICE DE LIQUEZ	PESO VOLUMÉTRICO		Resistencia a la compresión simple (qs)	Resistencia no drenada	Módulo de Elasticidad	Módulo de Elasticidad	CLASIFICACIÓN SUCS
			Gs	e	w	Sr	LL	IP	IL	HÚMEDO y <sub>h</sub>	SECO y <sub>s</sub>					
			g/cm <sup>3</sup>	---	%	%	%	%	---	kNm <sup>-3</sup>	kNm <sup>-3</sup>					
SM-2	24.4	88.20	2.59	1.62	63.7	100.0	83.0	50.1	0.62	15.9	9.7	38	19	1	1	CH



DESCRIPCIÓN
Arcilla café grisácea de alta plasticidad, consistencia blanda y textura jabonosa.

GRANULOMETRÍA	
ARENA:	1.0 %
FINOS:	99.0 %

<p style="font-size: small;">COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD GERENCIA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL SUBGERENCIA DE GEOTECNIA Y MATERIALES</p>		<b>PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE</b>	NOTAS:
		FECHA DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA	
PROYECTO:		<b>1 FEBRERO 2012</b>	
"Primera etapa del estudio geotécnico a nivel prefactibilidad para caracterizar los azofoles del embalse de la presa Santa Rosa, Jal."		FIGURA No.	<b>14</b>