

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente



TESINA DE MASTER

---

## DESARROLLO DE UN PROTOCOLO PARA LA EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD DE PRESAS EN VENEZUELA: APLICACIÓN AL EMBALSE TRES RÍOS “EL DILUVIO”.

---

Valencia, Abril de 2009

Autor: José Daniel Rosales Maniglia

Director: Ignacio Escuder Bueno

*A mi Padre.*

## **Agradecimiento**

Muchas personas han hecho posible la realización de este trabajo, brindando su apoyo, asesoría, entusiasmo y confianza. Que sea el resultado de este estudio un tributo a su desinteresada colaboración.

- Mi esposa, mi madre, Reina y mis hermanos
- Mis amigos y colegas del Ministerio del Ambiente: José Gaspar, Luis Arconada, Verónica Valera, Genis Vivancos y Yemina Guiñán.
- Mis amigos y colegas del grupo ipresas, Luis Chaparro, Luis García, Armando Serrano, Javier Fluxia, José María Carrillo y Ana Vilaplana.
- Dr. Ignacio Escuder, director de la tesis.

A todos, mi sincero agradecimiento.

## Resumen

Venezuela es un país que posee abundantes recursos hídricos y una modesta infraestructura de regulación, con un parque de aproximadamente 100 grandes presas. Sobre este sistema de embalses a nivel nacional, recae la responsabilidad garantizar el suministro de agua para más del 90% de la población del país, abastecer los regadíos más importantes y la generación de más del 90% de la energía eléctrica consumida en el país.

Hoy en día no existe un marco legislativo o técnico que sirva de referencia para la gestión de la seguridad de las presas en Venezuela. La explotación de los embalses se realiza generalmente con criterios de administración del recurso y no con criterios de seguridad. Recientemente, en 1999 ocurrieron tres roturas de presas en el país producto de eventos hidrometeorológicos extraordinarios.

La elaboración de un protocolo de análisis de la seguridad para las presas de Venezuela, conforma el primer paso para crear un proceso de discusión interna con diferentes sectores de la sociedad en miras hacia una gestión más eficiente y segura de los embalses.

El protocolo que se desarrolla en este trabajo está basado en la revisión clásica de la seguridad tal y como se efectúa normalmente en el marco de la legislación española, añadiendo un análisis complementario cualitativo de Modos de Fallo. Este protocolo fue aplicado a un caso de estudio, el embalse Tres Ríos ubicado en el Río Palmar, Venezuela.

Como resultado, se obtuvo una de las primeras evaluaciones completas de seguridad realizadas a una presa venezolana, se verificaron diferentes aspectos de la seguridad como la revisión del archivo técnico (que en este caso fue la conformación formal del mismo), inspección a la presa, seguridad hidrológico-hidráulica, seguridad estructural, seguridad de accesos y comunicaciones, y seguridad funcional. Adicionalmente se conformó un grupo de trabajo para definir y analizar cualitativamente una serie de Modos de Fallo.

La sola elaboración de un protocolo de análisis de la seguridad aplicado al caso venezolano, representa un aporte en materia de gestión de la seguridad. La aplicación del mismo en un caso real, demuestra la utilidad práctica de esta metodología y deja de manifiesto una serie de necesidades que deben irse solventando para alcanzar un estado del conocimiento y de la técnica en el país acorde con los estándares internacionales en gestión de la seguridad de las presas y embalses.

## **Abstract**

Venezuela is a country with abundant hydraulic resources together with a modest regulating network, of approximately 100 large dams. Upon this regulating system nationwide, relies the responsibility of guaranteeing water supply for more than a 90% of country's population, the most important irrigating systems, and hydropower facilities, generating more than a 90% of demanded electricity in the country.

Nowadays, there are no legislative or technical guidelines to be considered as a reference for safety management of dams in Venezuela. Dam operation is generally guided by resource's administration criteria, instead of safety criteria. Recently, in 1999 three dam failures took place in the country during an extraordinary hydrometeorological event.

The elaboration of a Security Analysis Protocol, applied to the Venezuelan dams, would be the first step in order to create a process of internal discussion with different sectors from the society in the pursuit of a more efficient dam safety management.

The protocol that is developed in this work is based upon the classic safety evaluation standards, usually applies within the Spanish legislation, adding a qualitative complementary analysis of Failure Modes. This protocol was applied to a case of study, the "Tres Ríos" dam located in the Palmar River, Venezuela.

As a result, it was obtained one of the first complete evaluations of dam safety ever made to a Venezuelan dam. Different aspects related with safety, such as the review of the Technical Archive were verified (in this case, the very conformation of it), a field visit and inspection was realized, hydraulic - hydrological safety structural safety, communications safety, and functional safety were studied. Additionally a workshop session was carried out to define and to analyze a series of Failure Modes.

The very elaboration of a protocol for Dam Safety Analysis applied to the Venezuelan case, represents an important contribution in matter of safety management. Its application in a real case, demonstrates the practical utility of this methods and brings to the top a series of needs that should be solved to reach higher state of the knowledge and technique in the country.

## Resum

Veneçuela és un país que posseïx abundants recursos hídrics i una modesta infraestructura de regulació, amb un parc d'aproximadament 100 grans preses. Sobre este sistema d'embassaments a nivell nacional, recau la responsabilitat de garantir el subministrament d'aigua per a més del 90% de la població del país, abastir els regadius més importants i la generació de més del 90% de l'energia elèctrica consumida en el país.

Hui en dia no hi ha un marc legislatiu o tècnic que servisca de referència per a la gestió de la seguretat de les preses a Veneçuela. L'explotació dels embassaments es realitza generalment amb criteris d'administració del recurs i no amb criteris de seguretat. Recentment, en 1999 van ocórrer tres ruptures de preses en el país producte d'esdeveniments hidrometeorològics extraordinaris.

L'elaboració d'un protocol d'anàlisi de la seguretat per a les preses de Veneçuela, conforma el primer pas per a crear un procés de discussió interna amb diferents sectors de la societat en mires cap a una gestió més eficiente i segura dels embassaments.

El protocol que es desenvolupa en este treball està basat en la revisió clàssica de la seguretat tal com s'efectua normalment en el marc de la legislació espanyola, afegint una anàlisi complementàri qualitatiu de Modes de Fallada. Este protocol va ser aplicat a un cas d'estudi, l'embassament "Tres Ríos" ubicat en el Riu Palmar, Veneçuela.

Com resultat, es va obtindre una de les primeres avaluacions completes de seguretat realitzades a una presa veneçolana, es van verificar diferents aspectes de la seguretat com la revisió de l'arxiu tècnic (que en este cas va ser la conformació formal del mateix), inspecció a la presa, seguretat hidrològic hidràulica, seguretat estructural, seguretat d'accessos i comunicacions, i seguretat funcional. Addicionalment es va conformar un grup de treball per a definir i analitzar qualitativament una sèrie de Modes de Fallada.

La sola elaboració d'un protocol d'anàlisi de la seguretat aplicat al cas veneçolà, representa una aportació en matèria de gestió de la seguretat. L'aplicació del mateix en un cas real, demostra la utilitat pràctica d'esta metodologia i deixa de manifest una sèrie de necessitats que han d'anar-se'n resolent per a aconseguir un estat del coneixement i de la tècnica en el país d'acord amb els estàndards internacionals en gestió de la seguretat de les preses i embassaments.

# Índice

Capítulo 1: Introducción	1
Capítulo 2: Conceptos Básicos de Seguridad de Presas	3
2.1. Conceptos fundamentales .....	3
2.1.1 Concepto de Seguridad .....	3
2.1.2 Concepto de Riesgo .....	4
2.1.3 Niveles de Seguridad y Riesgo Aceptables .....	4
2.1.4 Fiabilidad .....	5
2.1.5 Probabilidad .....	5
2.1.6 La incertidumbre en el análisis de la seguridad .....	5
2.1.7 Análisis de Riesgo .....	6
2.1.8 Escenario de sollicitación .....	6
2.2. Evaluación Clásica de de la Seguridad .....	7
2.2.1 Revisión del Archivo Técnico .....	7
2.2.2 Inspección .....	7
2.2.3 Seguridad Hidrológica-Hidráulica .....	8
2.2.3.1. Seguridad hidrológica .....	8
2.2.3.2. Seguridad hidráulica .....	9
2.2.4 Seguridad Estructural .....	10
2.2.4.1. Modelos deterministas .....	10
2.2.4.2. Modelos probabilísticos .....	11
2.2.5 Seguridad de instalaciones Electromecánicas .....	11
2.2.6 Seguridad de Accesos y Comunicaciones .....	11
2.2.7 Seguridad Funcional .....	12

2.3. Evaluación Complementaria basada en el riesgo .....	13
2.3.1 Modos de Fallo .....	14
2.3.2 Escenarios de Solicitación .....	15
 Capítulo 3:	
Justificación de la necesidad del protocolo .....	16
 3.1. Antecedentes en obras hidráulicas .....	16
3.2. Incidentes en Presas de Venezuela .....	20
3.2.1 Falla de la presa El Cristo, 9 de abril de 1999 .....	21
3.2.2 Falla de la presa El Guapo, 16 de diciembre de 1999 .....	22
3.2.2 Falla de la Presa Játira, 17 de Diciembre de 1999 .....	23
 3.3. Necesidad de reglamentos, normativas y/o guías técnicas para el análisis de la seguridad de presas .....	25
3.3.1. Revisión de algunas legislaciones .....	25
3.3.1.1. Reino Unido .....	25
3.3.1.2. Noruega .....	25
3.3.1.3. Suecia .....	26
3.3.1.4. China .....	26
3.3.1.5. Austria .....	26
3.3.1.6. Alemania .....	27
3.3.2. Legislación de seguridad de presas en España .....	27
3.3.2.1. Instrucción de 1967 .....	27
3.3.2.2. Directriz de 1995 .....	33
3.3.2.3. Reglamento Técnico para la Seguridad de Presas 1996 .....	33
3.3.2.3. Guías Técnicas de Seguridad de Presas .....	35
 3.4. Limitaciones en la Aplicación .....	36
3.4.1 Recopilación de Información Básica .....	36
3.4.2 Instrumentación .....	37
3.4.3 Estructura organizacional .....	37

Capítulo 4: Protocolo de evaluación de la Seguridad de Presas y Embalses en funcionamiento en Venezuela	39
4.1. Consideraciones Previas .....	39
4.1.1. Sobre la Titularidad .....	39
4.1.2. Sobre la Explotación .....	40
4.2. Clasificación de las Presas .....	41
4.2.1. En función de sus dimensiones .....	41
4.2.2 En función del daño potencial .....	41
4.2.3 En función de su tipología .....	41
4.3. Revisión del Archivo Técnico .....	42
4.3.1. Archivo Técnico del Proyecto .....	42
4.3.2. Archivo Técnico de la Construcción .....	43
4.3.3. Archivo Técnico de la Explotación .....	43
4.3.4. Identificación de Carencias de Información .....	44
4.3.5 Identificación de las necesidades de inspección y análisis .....	44
4.4. Inspección Técnica .....	45
4.5. Evaluación de la seguridad Hidrológica-Hidráulica .....	47
4.5.1. Seguridad Hidrológica .....	47
4.5.1.1. Estudio de Crecientes .....	47
4.5.1.2. Crecientes a considerar .....	47
4.5.2. Seguridad Hidráulica .....	48
4.5.2.1. Estrategia de Laminación .....	48
4.5.2.2. Curvas de gasto de aliviaderos y desagües profundos .....	49
4.5.2.3. Tránsito de las Crecientes .....	49
4.5.2.4. Definición de niveles .....	49
4.5.2.5. Definición de Borde Libre .....	50
4.5.2.6. Evaluación del comportamiento hidráulico de los Aliviaderos	50
4.5.2.7. Análisis del tiempo de vaciado .....	51
4.5.1.8. Condiciones de la descarga .....	51
4.5.3. Recomendaciones .....	52

4.6. Evaluación de la seguridad Estructural .....	53
4.6.1. Descripción estructural de la presa .....	53
4.6.2. Caracterización geotécnica del sitio de presa .....	53
4.6.3. Propiedades de los materiales de construcción .....	53
4.6.4. Situaciones de Análisis .....	54
4.6.4.1. Situaciones Normales .....	54
4.6.4.2. Situaciones Accidentales .....	54
4.6.4.3. Situaciones Extremas .....	54
4.6.5. Descripción de las solicitaciones .....	54
4.6.5.1. Solicitaciones hidráulicas .....	54
4.6.5.2. Solicitaciones sísmicas .....	55
4.6.5.3. Empuje de los sedimentos .....	57
4.6.5.4. Variación térmica. ....	57
4.6.6. Análisis estructural para presas de fábrica .....	57
4.6.6.1. Análisis de estabilidad estática .....	58
4.6.6.2. Análisis del comportamiento tenso – deformacional .....	59
4.6.6.3. Consideración del efecto sísmico .....	60
4.6.7. Análisis estructural para presas de materiales sueltos .....	61
4.6.7.1. Análisis de estabilidad al deslizamiento .....	62
4.6.7.2. Análisis del comportamiento tenso – deformacional .....	63
4.6.7.3. Consideración del efecto sísmico .....	64
4.7. Evaluación de la seguridad de las Instalaciones Electromecánicas	65
4.7.1. Recomendaciones .....	65
4.8. Evaluación de la seguridad de Accesos y Comunicaciones .....	66
4.8.1. Accesos .....	66
4.8.2. Comunicaciones .....	66
4.8.3. Recomendaciones .....	66
4.9. Evaluación de la seguridad Funcional .....	67
4.9.1. Recomendaciones .....	67
4.10. Análisis cualitativo de Modos de Fallo .....	68
4.10.1. Definición de Escenarios de Solicitación .....	68

4.10.1.1. Escenario Hidrológico .....	68
4.10.1.2. Escenario Sísmico .....	68
4.10.1.3. Escenario de operación Normal .....	68
4.10.2. Procedimiento para la formulación de Modos de Fallo .....	69
4.10.2.1. Identificación de elementos susceptibles a fallar y determinación del modo de fallo de cada uno .....	69
4.10.2.2. Formulación de modos de fallo .....	69
4.10.3. Identificación de factores a favor y en contra .....	69
4.10.4. Identificación de necesidades de inspección vigilancia y auscultación .....	70
4.10.5. Evaluación cualitativa de Modos de Fallo .....	70
4.10.5.1. Clasificación de los Modos de Fallo .....	70
4.10.5.2. Jerarquización de los Modos de Fallo .....	71
4.10.6. Conclusiones y Recomendaciones .....	71
Capítulo 5:	
Evaluación de la Seguridad de la Presa Tres Ríos “El Diluvio”	72
5.1. Consideraciones Previas .....	72
5.1.1 Sobre la Titularidad .....	72
5.1.2 Sobre la Explotación .....	73
5.2. Clasificación de la Presa .....	74
5.2.1. En función de sus dimensiones .....	74
5.2.2. En función del daño potencial .....	74
5.2.3. En función de su tipología .....	74
5.3. Revisión del Archivo Técnico .....	76
5.3.1. Archivo Técnico del Proyecto .....	76
5.3.1.1. Estudios preliminares .....	76
5.3.1.2. Anteproyectos .....	76
5.3.1.3. Proyectos definitivos .....	78
5.3.2. Archivo Técnico de la Construcción .....	79
5.3.2.1 Memoria de Construcción .....	80
5.3.2.2 Modificaciones al Proyecto Original .....	80

5.3.2.3. Controles de Calidad .....	84
5.3.2.4. Información Geológica adicional .....	84
5.3.2.5. Planos definitivos de Construcción .....	84
5.3.3. Archivo Técnico de la Explotación .....	85
5.3.3.1. Puesta en Carga .....	85
5.3.3.2. Datos históricos de Niveles y Caudales .....	86
5.3.3.3. Instrumentación .....	86
5.3.3.4. Inspecciones y Vigilancia .....	86
5.3.3.5. Pruebas a las instalaciones electromecánicas .....	86
5.3.3.6. Informes de evaluación .....	87
5.3.3.7. Normas de explotación .....	87
5.3.3.8. Planes de emergencia .....	87
5.3.4. Identificación de Carencias de Información .....	87
5.3.5 Identificación de las necesidades de inspección .....	87
5.4. Inspección Técnica .....	88
5.4.1. Accesos .....	88
5.4.2. Entorno Geológico .....	89
5.4.3. Paramentos .....	90
5.4.4. Coronación .....	91
5.4.5. Instrumentación .....	91
5.4.6. Desagües .....	92
5.4.7. Aliviadero .....	93
5.4.8. Instalaciones Electromecánicas .....	94
5.4.9. Tomas .....	95
5.4.10. Zona inundable .....	95
5.5. Evaluación de la seguridad Hidrológica-Hidráulica .....	96
5.5.1. Seguridad Hidrológica .....	96
5.5.1.1. Estudio de Crecientes .....	96
5.5.1.2. Crecientes a considerar .....	102
5.5.2. Seguridad Hidráulica .....	102
5.5.2.1. Estrategia de Laminación .....	102
5.5.2.2. Curvas de gasto del Aliviadero y Desagües Profundos .	103
5.5.2.3. Tránsito de las Crecientes .....	110
5.5.2.4. Definición de niveles .....	112

5.5.2.5. Definición de Borde Libre .....	113
5.5.2.6. Evaluación del comportamiento hidráulico del Aliviadero .....	115
5.5.2.7. Análisis del tiempo de vaciado .....	122
5.5.2.8. Condiciones de la descarga .....	123
5.5.2.9. Recomendaciones .....	127
5.6. Evaluación de la seguridad Estructural .....	129
5.6.1. Descripción Estructural .....	129
5.6.2. Caracterización geotécnica del sitio de presa .....	130
5.6.3. Propiedades de los materiales de construcción .....	131
5.6.4. Situaciones de Análisis .....	131
5.6.4.1. Situación Normal .....	131
5.6.4.2. Situaciones Accidentales .....	131
5.6.4.3. Situaciones Extremas .....	132
5.6.5. Descripción de las sollicitaciones .....	132
5.6.5.1. Sollicitaciones hidráulicas .....	132
5.6.4.2. Sollicitaciones sísmicas .....	133
5.6.4.3. Empuje de los sedimentos .....	133
5.6.4.4. Variación térmica .....	133
5.6.5. Análisis estructural .....	134
5.6.5.1. Análisis de estabilidad al deslizamiento .....	134
5.6.5.2. Análisis del comportamiento tenso – deformacional .....	134
5.6.6. Conclusiones, recomendaciones y necesidades de análisis .....	134
5.7. Evaluación de la seguridad de las Instalaciones Electromecánicas .....	136
5.7.1 Recomendaciones .....	137
5.8. Evaluación de la seguridad de Accesos y Comunicaciones .....	138
5.8.1 Accesos .....	138
5.8.2 Comunicaciones .....	138
5.8.3 Recomendaciones .....	140
5.9. Evaluación de la seguridad Funcional .....	141
5.9.1 Recomendaciones .....	141

5.10. Análisis cualitativo de Modos de Fallo .....	142
5.10.1. Definición de Escenarios de Solicitación .....	142
5.10.1.1. Escenario Hidrológico .....	142
5.10.1.2. Escenario Sísmico .....	142
5.10.1.3. Escenario de operación Normal .....	142
5.10.2. Procedimiento para la formulación de Modos de Fallo .....	142
5.10.2.1. Identificación de elementos susceptibles a fallar .....	142
5.10.2.2. Formulación de modos de fallo .....	143
5.10.3. Identificación de factores a favor y en contra de cada Modo de Fallo .....	143
5.10.4. Identificación de necesidades de inspección vigilancia y auscultación .....	149
5.10.5. Evaluación cualitativa de Modos de Fallo .....	149
5.10.5.1. Clasificación de los Modos de Fallo .....	149
5.10.5.2. Jerarquización de los Modos de Fallo .....	149
5.10.6. Conclusiones del análisis cualitativo de Modos de Fallo ...	150
 Capítulo 6:	
Conclusiones y recomendaciones	152
 Referencias	154
 Anexo 1	158
Anexo 2	161

## Índice de figuras

Figura 2.1	Ejemplo de Árbol de Fallo	14
Figura 3.1	Cuenca hidrográfica del Orinoco	16
Figura 3.2	Evolución histórica del parque de presas	17
Figura 3.3	Distribución espacial de presas en Venezuela	17
Figura 3.4	Composición del parque de presas en función de su tipología	18
Figura 3.5	Presa de Camatagua, acueducto metropolitano	18
Figura 3.6	Presa de Guri, Central hidroeléctrica Simon Bolívar	19
Figura 3.7	Categorización de los incidentes en presas	20
Figura 3.8	Presa El Cristo durante su rotura	21
Figura 3.9	Inicio del desborde del canal rápido del aliviadero	22
Figura 3.10	Vaciado de embalse a través de la brecha	22
Figura 3.11	Vista de la presa El Guapo en proceso de reconstrucción	23
Figura 3.12	Presa Tocuyo de la costa	24
Figura 3.13	Brecha en el cuerpo de la presa	24
Figura 4.1	Mapa de zonificación sísmica de la norma COVENIN 1756	55
Figura 5.1	Sección principal de la presa	75
Figura 5.2	Planta general del proyecto 1961	77
Figura 5.3	Sección transversal de la presa seleccionada en 1982	78
Figura 5.4	Planta general del proyecto definitivo	79
Figura 5.5	Fotografía tomada en los inicios de la construcción	80
Figura 5.6	Descarga de fondo según proyecto original	81
Figura 5.7	Estado actual de la descarga de fondo	81
Figura 5.8	Descarga de fondo en condiciones actuales	82
Figura 5.9	Estado actual de la descarga de emergencia	82
Figura 5.10	Descarga adicional	83
Figura 5.11	Descarga adicional en operación	83
Figura 5.12	Apertura de la válvula de regulación	85
Figura 5.13	Vista aérea de la presa y sus accesos	88

Figura 5.14	Aspecto del estribo izquierdo	89
Figura 5.15	Estribo izquierdo sobre el rápido del aliviadero	89
Figura 5.16	Aspecto del espaldón de aguas abajo	90
Figura 5.17	Aspecto del espaldó de aguas arriba	90
Figura 5.18	Protección de los cables de piezómetros	91
Figura 5.19	Aparato de medición para piezómetros	91
Figura 5.20	Descarga de emergencia y adicional	92
Figura 5.21	Contacto sin rellenar entre los muros y las laderas	92
Figura 5.22	Vista frontal del aliviadero	93
Figura 5.23	Descarga de emergencia	93
Figura 5.24	Unidad de accionamiento de la válvula de regulación	94
Figura 5.25	Fuga en válvula de regulación	94
Figura 5.26	Ajuste de distribuciones probabilísticas	97
Figura 5.27	Hidrogramas de crecientes complejas	99
Figura 5.28	Hidrogramas de crecientes aisladas para distintos períodos de retorno	100
Figura 5.29	Hidrograma de la creciente máxima probable	101
Figura 5.30	Hidrogramas de diseño	103
Figura 5.31	Perfil longitudinal del aliviadero (Proyecto 1991)	104
Figura 5.32	Aproximación del flujo a la embocadura	104
Figura 5.33	Vista en planta de la embocadura del aliviadero (Proyecto 1991)	105
Figura 5.34	Geometría del perfil del vertedero	105
Figura 5.35	Determinación de la carga de diseño del vertedero	106
Figura 5.36	Curva de descarga del vertedero	107
Figura 5.37	Embocaduras de la torre de toma y descarga de fondo	108
Figura 5.38	Vista de la torre de toma desde aguas arriba	108
Figura 5.39	Ubicación e identificación de los sistemas de desagüe	108
Figura 5.40	Curva de gastos de la descarga de fondo	109
Figura 5.41	Curva de gasto de la descarga de emergencia	109
Figura 5.42	Curva de gasto de la descarga adicional	110
Figura 5.43	Curva de gasto del sistema de desagües profundos de manera conjunta	110
Figura 5.44	Aproximación de la curva Altura - Capacidad	111
Figura 5.45	Tránsito de la creciente de proyecto	111

Figura 5.46	Tránsito de la creciente extrema	112
Figura 5.47	Detalle de la cresta de la presa	113
Figura 5.48	Evolución de los niveles durante el tránsito de las crecientes de proyecto y extrema	115
Figura 5.49	Flujo sobre el vertedero	115
Figura 5.50	Canal de baja pendiente	116
Figura 5.51	Flujo en el canal para creciente de proyecto	116
Figura 5.52	Flujo en el canal para creciente extrema	117
Figura 5.53	Sistema de aireación	117
Figura 5.54	Detalle del escalón del aireador	118
Figura 5.55	Aireador en funcionamiento	119
Figura 5.56	Esquema de cálculo de flujo en el canal rápido	119
Figura 5.57	Sección longitudinal del lanzador	120
Figura 5.58	Trayectoria del chorro calculada para la creciente extrema	121
Figura 5.59	Lanzador funcionando como cuenco	122
Figura 5.60	Lanzador durante el pico del primer alivio	123
Figura 5.61	Evolución del nivel del embalse durante el vaciado	124
Figura 5.62	Descarga de fondo en condiciones actuales	125
Figura 5.63	Salida de la tubería de descarga de emergencia	125
Figura 5.64	Descarga adicional antes de su primera apertura	126
Figura 5.65	Descarga de emergencia y adicional, Diciembre de 2009	126
Figura 5.66	Estanque disipador al inicio de alivio	126
Figura 5.67	Erosión durante el alivio	127
Figura 5.68	Estado final del estanque disipador	127
Figura 5.69	Sección transversal de la presa	129
Figura 5.70	Sección transversal, detalle del núcleo impermeable	129
Figura 5.71	Sistema de fallas alrededor del sitio de presa	130
Figura 5.72	Válvula de regulación de tipo mariposa. Diámetro = 2,0 metros	136
Figura 5.73	Vista aérea de la vialidad	137
Figura 5.74	Acceso al aliviadero desde la coronación	138

## Índice de tablas

Tabla 4.1	Selección de las crecientes en función del tipo de presa	48
Tabla 4.2	Coefficiente de aceleración horizontal según norma COVENIN	56
Tabla 4.3	Selección de los terremotos de proyecto y extremo	56
Tabla 4.4	Selección de coeficientes de seguridad respecto al deslizamiento (Presas de fábrica)	59
Tabla 4.5	Selección de factores de seguridad con respecto a las tensiones	60
Tabla 4.6	Selección de factores de seguridad para la verificación al deslizamiento (Presas de materiales sueltos)	63
Tabla 5.1	Características del proyecto de 1961	76
Tabla 5.2	Características del proyecto de 1982	77
Tabla 5.3	Selección de las crecientes para la presa Tres Ríos	102
Tabla 5.4	Comparación de caudales descargados a NAM	106
Tabla 5.5	Estimación de la ola de diseño	114
Tabla 5.6	Asignación de parámetros, Roca y Aluvión	130
Tabla 5.7	Asignación de parámetros, Núcleo y Espaldones	131
Tabla 5.8	Votación para la asignación de Modos de Fallo	149
Tabla 5.9	Clasificación definitiva de los modos de fallo	150
Tabla 5.10	Orden de prioridad definitivo.	151
Tabla A2.1	Hidrogramas de crecientes complejas	162
Tabla A2.1	Hidrogramas de diseño	166

# Capítulo 1

## Introducción

El objetivo fundamental de esta tesina de Master es el de formular una herramienta para el análisis de la Seguridad de Presas y Embalses adaptada a la realidad de Venezuela, un país de abundantes recursos hídricos, con una modesta infraestructura de regulación y en donde, hasta la fecha no se ha publicado ningún reglamento, guía o recomendaciones técnicas en esta materia. De manera que el producto podrá ser un documento base para que se inicie un proceso de discusión interna en la comunidad de gestores de presas, proyectistas e investigadores de la Ingeniería Hidráulica en Venezuela, con miras a uniformizar criterios y formalizar una guía técnica propia.

Desde un punto de vista técnico, emitir un juicio ponderado sobre la seguridad de una presa, es una labor que implica un estrecho compromiso entre el análisis del comportamiento hidráulico y mecánico de la estructura, en todo su conjunto, los accesos, comunicaciones, instalaciones electromecánicas y la capacidad de operación; frente a los diferentes escenarios de sollicitación asociados a sus respectivas probabilidades de ocurrencia, con el criterio ingenieril basado en observación y la experiencia.

La estructura del análisis propuesto está basada en la normativa vigente en España, por considerarse que la misma es congruente con los estándares mundialmente aceptados. Se propone una herramienta basada en el análisis clásico de la seguridad complementada por un estudio de Modos de Fallo potenciales. Se justifica la importancia de desarrollar un análisis complementario de Modos de Fallo en el hecho que la poca disponibilidad de información que caracteriza el entorno de trabajo en presas en Venezuela, induce un elevado grado de incertidumbre en los análisis cuantitativos, de modo tal que este análisis complementario otorga la ventaja de enriquecer la evaluación con una mayor cantidad de criterio ingenieril, información secundaria y experiencia acumulada.

En primer lugar se plantea una revisión comentada del estado del conocimiento en materia de seguridad de presas, enunciando los conceptos básicos y explicando brevemente en qué se fundamenta el análisis tradicional de la seguridad para luego introducir el enfoque moderno de evaluación de la seguridad basada en el riesgo, de lo cual, para efectos de esta Tesina se ampliará únicamente el apartado referente a la formulación de Modos de Fallo.

Seguidamente, se plantea la justificación de la elaboración de este estudio para el caso venezolano, principalmente en el hecho que sobre el sistema de presas a nivel nacional recae la responsabilidad de la mayor parte del abastecimiento

de agua potable a la población así como también la generación hidroeléctrica. Por otra parte la falla de cualquier embalse implicaría en mayor o menor medida importantes pérdidas de vidas humanas, afecciones a las poblaciones y pérdidas económicas. Se mencionan una serie de incidentes acaecidos en presas venezolanas con su repercusión y para completar el capítulo de la justificación se mencionan las limitaciones que en materia de estructura de organización de la titularidad y acceso a la información técnica existen en el país.

En el cuarto capítulo, se desarrolla el protocolo de evaluación de la seguridad haciendo particular énfasis en la adquisición y catalogación de la información básica que conforma el archivo técnico así como también en la estructura organizacional que define la titularidad y responsabilidades sobre la seguridad de los embalses, todo esto como condiciones iniciales para que pueda elaborarse un análisis de seguridad de calidad y que sus resultados puedan ser de utilidad en la gestión. Seguidamente se describe de manera pormenorizada cada uno de los aspectos que deben ser cubiertos en el análisis, que son a grandes rasgos, la revisión del archivo técnico, la inspección de la obra, la evaluación de la seguridad hidrológico-hidráulica, la seguridad estructural, instalaciones electromecánicas, accesos, comunicaciones y seguridad funcional. Una vez desarrollado al detalle el protocolo de evaluación clásica de la seguridad, se indican los pasos a seguir para desarrollar el análisis complementario cualitativo de modos de fallo. De esta manera se concluye el desarrollo teórico de la tesis.

El quinto capítulo corresponde a la aplicación de la metodología antes descrita a un caso real, para lo cual fue seleccionado el embalse Tres Ríos (El diluvio) ubicado sobre el río Palmar en el Estado Zulia (Venezuela), se cubren los aspectos descritos en el protocolo, se realiza una revisión del archivo técnico, se comentan los pormenores de una inspección técnica realizada en diciembre de 2008, se desarrolla a nivel de detalle el análisis de la seguridad hidrológico-hidráulica, se plantean las necesidades de análisis en el aparte de la seguridad estructural, se analiza y se enuncian recomendaciones sobre la seguridad de accesos y comunicaciones la seguridad funcional.

Finalmente se desarrolla el análisis complementario cualitativo de modos de fallo, que se realizó en sesiones de trabajo de un equipo técnico, se definen las principales necesidades de inspección vigilancia y auscultación. Por último se clasifica en orden de prioridad a todos los modos de fallo.

El sexto capítulo corresponde a las conclusiones del estudio. Se analizan los resultados de la evaluación de la seguridad y se comenta sobre las ventajas y la aplicabilidad del protocolo enunciado en el capítulo cuarto.

## Capítulo 2

### Aspectos Básicos de Seguridad de Presas

#### 2.1. Conceptos fundamentales enfocados al análisis de Seguridad de Presas

El tema de la seguridad de presas ha sido discutido y estudiado concienzudamente por los organismos responsables de la gestión de estas estructuras así como las Comisiones de Grandes Presas en gran número de países. Se ha definido los conceptos fundamentales asociados a la seguridad y se ha formulado recomendaciones para el análisis de la misma, ampliamente aceptadas alrededor del mundo.

En ese orden de ideas, se estima necesario iniciar esta revisión del estado de arte citando y comentando algunas definiciones básicas.

##### 2.1.1 Concepto de Seguridad

La Seguridad de Presas puede definirse como la relación entre la capacidad de nominal que tenga una estructura para soportar carga, y la magnitud y modo en que dicha carga venga aplicada.

Por capacidad nominal de soportar carga se entiende que cada uno de los elementos que conforman una presa está fabricado de algún material con características mecánicas (resistencia, elasticidad, permeabilidad etc.) conocidas; que aún cuando las características mecánicas de los materiales no están uniformemente distribuidas en el elemento por causa del proceso de construcción, cada elemento ha sido diseñado con una capacidad teórica de trabajo entendiendo por esto, esfuerzos máximos que pueden soportar los materiales, caudales máximos que pueden transitar por los órganos de desagüe etc.

Por magnitud y modo en que la carga venga aplicada se entiende que las solicitaciones ejercidas sobre cada elemento son variables en el espacio y en el tiempo, siendo en todo caso posible que en condiciones extremas superen o se acerquen demasiado a los valores teóricamente admisibles por los materiales y previstos en la etapa de diseño.

De la relación entre los conceptos anteriores se puede intuir que la seguridad es el margen que separaría las condiciones reales que existen en la presa construida de las que llevan a su destrucción o deterioro (Soriano et al, 2008 [1])

Todo elemento de la presa operará en condiciones de seguridad mientras esté sometido a cargas menores que las que lo llevan a su rotura o pérdida de función.

Puede añadirse a esta definición que ante la cuestión de determinar cuál es ese estado de sollicitación último que conllevará a la falla de un elemento, existirá un enfoque determinista y otro probabilista.

Tradicionalmente las recomendaciones para el diseño de presas se basan en un enfoque determinista del estado de esfuerzos admisibles por los materiales y se ha formulado de este modo *Factores de Seguridad* que de manera conservadora, garantizan, con un buen margen de probabilidad, que el diseño esté siempre del lado de la seguridad.

### 2.1.2 Concepto de Riesgo

El riesgo es una medida de la probabilidad de ocurrencia de una falla en alguna o varias de las estructuras que componen la obra, asociada a la esperanza matemática de la aparición de un escenario de carga, en combinación con la capacidad de generar daños.

Anteriormente, al definir la seguridad se entendió por esta al margen que separa las condiciones de la estructura de aquellas que la llevan a su falla. El enfoque que se pretende dar al término riesgo es la probabilidad asociada a la reducción de ese margen hasta el punto de que ocurra esa falla, sin embargo también se asocia al término riesgo la capacidad de producir daños a partir de la ocurrencia del fallo; de este modo se está vinculando al sistema Presa-Embalse con la vulnerabilidad de las poblaciones ubicadas aguas abajo, el medio ambiente, los usuarios del agua etc.

El daño potencial que puede generar la falla de un elemento de la presa está también asociado al concepto de vulnerabilidad, entendida como la característica de una persona o grupo desde el punto de vista de su capacidad de anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de un acontecimiento no deseado.

### 2.1.3 Niveles de Seguridad y Riesgo Aceptables

La sola existencia de una estructura que pueda fallar, por poco probable que sea, generando daños considerables, implica que por alguna convención, la sociedad ha decidido asumir ese riesgo en virtud de los beneficios que obtiene de la obra en funcionamiento.

La determinación del nivel de seguridad adecuado es un problema fundamentalmente económico. Toda acción que obre en beneficio de la seguridad y no genere ningún costo considerable, se ejecuta sin más. En la práctica, las limitaciones en los recursos exigen que se lleve a cabo un estudio minucioso de la seguridad de la presa a fin de determinar cuáles son las medidas económicamente factibles que otorguen un razonable grado de confianza en la integridad de la Presa.

En este orden de ideas se comentan dos principios complementarios el uno del otro (Membrillera et al, 2005 [2]):

ALARP (*As Low As Reasonably Possible; tan bajo como razonablemente sea posible*), Principio utilizado como criterio social de aceptación, por el que los riesgos menores que un umbral máximo de tolerabilidad se asumen únicamente si su reducción resulta impracticable o si el coste necesario para ello es desproporcionado en comparación con la mejora de seguridad alcanzada.

DE MINIMIS: Recomendación normativa aplicada, en ocasiones, una vez que el principio ALARP ha agotado sus posibilidades. Se trata de una obligación legal para aplicar siempre medidas, cuando sean de bajo coste, aunque no resulten económicamente rentables.

#### 2.1.4 Fiabilidad

Probabilidad de que un sistema realice adecuadamente la función para la que fue diseñado, durante un periodo de tiempo determinado y bajo unas condiciones concretas. Su probabilidad complementaria es la probabilidad de fallo. (Membrillera et al, 2005 [2])

#### 2.1.5 Probabilidad

Medida del grado de confianza en una estimación, basada en la evidencia, sobre el valor de una magnitud o la posible ocurrencia de un evento futuro, ambos inciertos. Es una estimación sobre la verosimilitud de dicha magnitud o evento. Dicha medida posee un valor numérico comprendido entre cero y uno y, matemáticamente, está basada en axiomas. En cualquier caso, existen dos grandes interpretaciones para el concepto de probabilidad: (Membrillera et al, 2005 [2])

*Probabilidad objetiva o de frecuencia relativa:* se averigua a partir del resultado de un determinado experimento estacionario o con muestras procedentes de una población homogénea. Esta interpretación de probabilidad puede manejarse, por ejemplo, con los eventos hidrológicos o sísmicos, con los niveles de embalse a lo largo del año, etc. Se trata de un proceso deductivo. (Membrillera et al, 2005 [2])

*Probabilidad subjetiva:* es una medida cuantitativa de la creencia, juicio o confianza en la ocurrencia de un determinado evento. Dicha medida se obtiene considerando toda la información disponible de forma clara e insesgada. Todo tipo de información y juicio es admisible a la hora de estimar un valor de la probabilidad, esté basada en experimentos repetidos o no. Se trata de un proceso inductivo. (Membrillera et al, 2005 [2])

#### 2.1.6 La incertidumbre en el análisis de la seguridad

La incertidumbre es un concepto amplio que incluye la variabilidad; se trata de cualquier situación o hecho del cual no se posee certeza, esté descrita por una distribución de probabilidad o no. (Membrillera et al, 2005 [2])

*Incetidumbre natural, objetiva o aleatoria:* relacionada con la aleatoriedad inherente a los procesos físicos, tanto en el tiempo como en el espacio.

*Incertidumbre epistémica o subjetiva:* asociada a la limitación de información y el conocimiento exacto de la realidad. Puede desglosarse en la incertidumbre relativa al modelo que se define para describir el proceso físico y la vinculada a los parámetros (inferencia de valores procedentes de ensayos, errores de lectura o ejecución, etc.). (Membrillera et al, 2005 [2])

*Incertidumbre en la toma de decisiones:* surge a raíz del limitado conocimiento sobre el estado del sistema analizado (circunstancias ocurridas durante la construcción o explotación, deterioro, errores humanos, etc.) así como de los objetivos sociales que se persigue (vida útil esperada, beneficio social esperado, capacidad de inversión, etc.). (Membrillera et al, 2005 [2])

#### 2.1.7 Análisis de Riesgo

Utilización de la información disponible para estimar el riesgo que sobre personas, propiedades o medio ambiente puede tener cualquier evento con un potencial para causar daños. Implica una serie de pasos sistemáticos como la definición del alcance del análisis, la identificación de eventos o escenarios susceptibles de provocar daños y la estimación de riesgo. (Membrillera et al, 2005 [2])

#### 2.1.8 Escenario de sollicitación

En el ámbito del análisis de Riesgo, se utiliza frecuentemente la formulación de escenarios de sollicitación, entendidos como una combinación única de estados como, evento de inicio, nivel previo de embalse, estado de las compuertas o elementos hidromecánicos, Intensidad del viento, caudales fluyentes al embalse y existentes aguas abajo y modo de fallo entre otros. (Membrillera et al, 2005 [2])

Por tanto, un escenario permite concretar y establecer una serie de circunstancias de interés en el contexto de un análisis de riesgos. En este sentido, puede considerarse escenarios de sollicitación, escenarios de rotura, escenarios de crecientes, etc.

## 2.2. Evaluación Clásica de de la Seguridad

Siendo las presas estructuras complejas que comprenden un conjunto de subsistemas susceptibles a fallar de forma aislada o no, pretender que se pueda definir un único coeficiente de seguridad de manera global, es casi imposible. Es por este motivo que las metodologías de análisis de la seguridad normalmente subdividen el problema del análisis en diferentes parcelas.

Sin detallar todavía las particularidades de cada una de las líneas en las que se subdivide el análisis de la seguridad, a continuación se menciona la estructura básica del enfoque tradicional de la seguridad, que habitualmente se basa en los mismos criterios de diseño de las estructuras.

### 2.2.1 Revisión del Archivo Técnico

El archivo técnico debe ser el compendio de todos aquellos documentos relacionados con la el proyecto, construcción y explotación de la presa, debe contener como mínimo (Escuder, Soriano, 2008 [2]):

- Estudios previos de sitio de presa.
- Estudios geológicos y geotectónicos.
- Estudios hidrológicos.
- Estudios de materiales.
- Anteproyecto y Proyecto de las obras civiles.
- Planos de Construcción.
- Incidencias durante la construcción, ensayos de los materiales colocados en obra.
- Series históricas de las lecturas de todos los instrumentos de medición de variables internas y externas de la presa.
- Cualquier otro documento relacionado con la obra (incidentes, reparaciones, informes de seguridad, etc.)

Claramente toda evaluación de seguridad de una presa debe comenzar por una revisión del archivo técnico de la misma. De esta primera revisión se pueden identificar las carencias de información si las hubiere y recoger la información necesaria para llevar a cabo los posteriores análisis.

### 2.2.2 Inspección

Una vez revisado el archivo técnico será necesaria una inspección de las obras civiles que constituyen la presa y el embalse. Una inspección completa debe cubrir todos aquellos aspectos que sean accesibles en una visita de campo. En general se deben examinar:

- Cuerpo de Presa: paramentos de aguas abajo y aguas arriba, coronación y galerías de inspección si las hubiere.

- Desagües profundos: descarga de fondo, descargas intermedias, tomas de agua.
- Aliviaderos de Superficie.
- Estado de los estribos y el vaso del embalse.
- Instrumentación.
- Instalaciones electromecánicas.
- Accesos.

Es recomendable que la inspección de las obras se realice en compañía de profesionales y técnicos vinculados al proyecto, construcción y/o explotación de la presa, con el fin de recoger la mayor cantidad de información adicional sobre las singularidades de la obra.

### 2.2.3 Seguridad Hidrológica-Hidráulica

El ciclo hidrológico impone en el sistema presa-embalse una dinámica de aparición de niveles de agua, subordinados principalmente a tres aspectos: el hidrograma de entrada al embalse producto de la relación lluvia-escorrentía, la capacidad de las estructuras de desagüe, y la manera en que sean operados los sistemas. Es por este motivo que la seguridad hidrológica-hidráulica debe ser analizada de manera conjunta

#### 2.2.3.1. Seguridad hidrológica:

La evaluación de la seguridad hidrológica, entendida como la seguridad de una presa frente a eventos de creciente, está ligada de las denominadas seguridad hidráulica y estructural dado que, los niveles de lámina de agua a partir de los cuales se analiza la estabilidad de la presa son en combinación una consecuencia de:

- Las crecientes consideradas (asociada a una frecuencia)
- La capacidad de alivio.
- La fiabilidad de operación de válvulas y compuertas.
- Los resguardos establecidos.
- La estrategia de laminación adoptada.

Una posible medida de la seguridad hidrológica consistiría en la estimación de la probabilidad de ocurrencia de avenidas más perjudiciales a efectos de elevación de la lámina de agua que la creciente adoptada como extrema.

La determinación de la magnitud de esta avenida en términos de período de retorno debe estar establecida por una normativa o convención que no será en ningún caso ajena a la factibilidad económica y al daño potencial que pueda generar la falla del embalse.

Los criterios de evaluación de seguridad hidrológica variarán en concordancia con el tipo de presa, teniéndose que para las presas de materiales sueltos en general puede considerarse que cualquier sobrevertido conducirá a la falla de la

estructura, mientras que para las presas de concreto, ciertos sobrevertidos podrían ser tolerables.

La elevación de la lámina en el embalse, es en definitiva la variable fundamental en el análisis de la seguridad hidrológica, y comprendiendo que esta resulta de la combinación del evento de creciente, la capacidad de desagüe conjunta de los aliviaderos y descargas, y la estrategia de laminación adoptada; en este aparte del análisis se debe pormenorizar el estudio probabilístico de caudales de entrada al embalse de manera tal que se puedan generar posteriormente los tránsitos a través de las diferentes estructuras.

#### 2.2.3.2. Seguridad hidráulica:

Ante la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, sólo una buena ponderación de la fiabilidad en el funcionamiento de las estructuras hidráulicas, puede brindar un conocimiento amplio de las condiciones de seguridad hidráulica del embalse.

Las estructuras hidráulicas principales son los aliviaderos superficiales y los desagües de fondo que controlan el flujo de agua a través o aparte del cuerpo de presa. La seguridad de una presa dependerá por tanto, entre otros muchos factores, de la bondad del comportamiento de dichas estructuras para amplios rangos de caudales.

Aquellas estructuras que no sean capaces de evacuar el caudal requerido, no presenten la resistencia suficiente a las solicitaciones que éste impone, o no reintegren el flujo al cauce en unas condiciones adecuadas pueden fallar. Un fallo de las mismas puede a su vez traducirse tanto en un incremento de la descarga como un decremento de la misma, pudiendo acarrear el colapso de la presa y/o la producción de una avenida catastrófica. (Soriano et al, 2008 [1])

Como se ha mencionado en el aparte anterior, debe definirse una *Creciente de Diseño o de proyecto*. Esta vendrá dada por una frecuencia estadística de ocurrencia, determinada por el estudio hidrológico y su tránsito estará regido por el correcto funcionamiento de los órganos de desagüe.

Del mismo modo se determinará una *Creciente Extrema* para la cual el funcionamiento de estas mismas estructuras de desagüe sea llevado a condiciones límite sin comprometer la seguridad de la presa, ni generar inundaciones repentinas o de una magnitud desastrosa aguas abajo.

Por otra parte, el adecuado funcionamiento de aliviaderos superficiales con compuertas y, en general, los desagües intermedios y de fondo depende en gran medida del estado de conservación y fiabilidad operacional de compuertas y válvulas.

Dicha funcionalidad se encuentra consecuentemente ligada una serie de equipos electromecánicos e instalaciones sobre los cuales se comentará más adelante. En cualquier caso, la seguridad sobre la capacidad de operación de los desagües de profundos determinará, para estos elementos en concreto, que puedan o no ser considerados en el cálculo de los niveles correspondientes a la *Creciente Extrema* y de *Proyecto*.

Por último, cabe hacer mención especial a la respuesta hidráulica del cauce aguas abajo así como a los usos del suelo y poblaciones próximas al mismo que deben haberse estudiado en profundidad y revisarse de forma periódica para que el conjunto de operaciones de desagüe previstas en las normas de

explotación no conlleven, salvo casos muy excepcionales de compromiso para la seguridad de la presa, afecciones a personas o bienes (Soriano et al, 2008 [1]).

#### 2.2.4 Seguridad Estructural

La caracterización de la respuesta de la presa, ante la acción de todas aquellas solicitaciones previsibles, individualmente o en combinación según sea el caso; así como la interacción con sus cimientos y estribos, constituirá la base conceptual del análisis de la seguridad estructural.

Esta caracterización debe comenzar por la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales con los que fue construida la presa y los que se hallan en su cimentación y estribos. Nótese que esta parte del análisis es sensible al tipo de presa en estudio, sea esta una presa de Fábrica o de Materiales Suelos, y no se debe dejar a un lado el hecho que la distribución de las propiedades mecánicas de los materiales en el cuerpo de la presa no es en ningún caso homogénea, en consecuencia se han de formular hipótesis para construir modelos que reproduzcan tan fielmente como sea posible esta distribución. Por otra parte las características geomecánicas que se han de atribuir a los cimientos y estribos, provendrán de campañas de sondeos y estudios geotécnicos.

Seguidamente se debe realizar un estudio de las características de las solicitaciones que pueden ejercer acción sobre la presa. A este respecto puede mencionarse de manera general que dichas solicitaciones pueden clasificarse en: *Normales*, aquellas que corresponden al peso propio y empujes hidrostáticos propios de las condiciones regulares de operación; *Accidentales*, aquellas solicitaciones de breve duración pero alto impacto como subidas o descensos bruscos del nivel del embalse, sismos o cambios bruscos en las presiones intersticiales; y *Extremas*, aquellas que se presentan en situaciones de crecientes extremas durante las cuales se alcanzan los niveles máximos probables, malfuncionamiento de las estructuras de desagüe o disminución brusca de las capacidades resistentes de los materiales. Cada escenario de solicitación o combinación de ellos estará asociado a una probabilidad de ocurrencia.

La superposición de las solicitaciones con las capacidades resistentes de la presa y sus cimientos, constituyen el análisis estructural propiamente dicho, en este punto es necesario tomar en consideración que el modelo constitutivo de la presa debe ser el adecuado para obtener resultados más representativos de la realidad. En este sentido existen diferentes métodos y enfoques de análisis pudiéndose distinguir dos tendencias fundamentales, los Modelos Deterministas y los Estadísticos.

##### 2.2.4.1. Modelos Deterministas

Se confeccionan a partir de códigos de resolución numérica basados en las técnicas de los elementos finitos y de las diferencias finitas fundamentalmente, permitiendo la simulación del comportamiento de suelos, rocas, estructuras de hormigón, etc. así como la interacción entre los mismos. (Soriano et al, 2008 [1])

Estos modelos parten de una definición geométrica de la estructura, establecimiento de condiciones de contorno, elección de los modelos

constitutivos (reproducción del comportamiento tensional y deformacional), y por último la realización de las simulaciones de los escenarios pertinentes.

#### 2.2.4.2. Modelos probabilísticos

Se basan en las series históricas de las auscultaciones de las diferentes variables internas y externas a la presa, de manera tal que se pueden inferir relaciones reales entre unas variables y otras. Este tipo de modelos resultan especialmente útiles cuando se dispone de una amplia información sobre la historia de la presa, puesto que basa los resultados del modelo sobre datos reales. (Escuder, et al, 2008 [2])

#### 2.2.5 Seguridad de instalaciones Electromecánicas

Este apartado de la evaluación de la seguridad se refiere a todas aquellas instalaciones cuyo funcionamiento esté condicionado a la operación de equipos electromecánicos tales como Motores y Cilindros Hidráulicos, de los cuales normalmente depende la apertura de compuertas y válvulas.

Queda clara la vinculación de los equipos electromecánicos en la seguridad de la presa toda vez que la capacidad de descarga de los desagües y aliviaderos de superficie estén controlados por compuertas y válvulas. En dicho caso la seguridad hidráulica definida anteriormente recae sobre la fiabilidad de operación de estos equipos tanto en condiciones de explotación normal como en eventos hidrológicos extremos.

En este sentido la evaluación de la seguridad deberá contemplar el estado de mantenimiento de los equipos, la fiabilidad de la alimentación eléctrica y la capacidad de operación verificada en los rangos de caudales para los cuales han sido diseñados.

#### 2.2.6 Seguridad de Accesos y Comunicaciones

Este aparte se refiere a la evaluación de las condiciones de accesibilidad al sitio de presa en ocasión efectuar cualquier tipo de maniobra que redunde en la seguridad de la estructura y de las poblaciones ubicadas aguas abajo. Particularmente en caso de eventos extremos, debe estudiarse la accesibilidad a todas las cámaras de compuertas y válvulas aún cuando las mismas estén descargando los caudales máximos para los cuales fueron diseñados.

Hay que tener en cuenta que durante la ocurrencia de un evento extremo como un sismo de gran magnitud o una creciente extraordinaria, puede darse el caso que se bloquee alguna de las carreteras de acceso o se imposibilite el paso de una margen del río a la otra por causa de un desbordamiento aguas abajo de la presa.

Este tipo de situaciones deben ser estudiadas previstas de modo tal que la seguridad de la estructura no se vea comprometida por la imposibilidad física de operar los equipos aún cuando los mismos estén en perfectas condiciones.

Por otra parte resulta indispensable conservar siempre un canal de comunicación expedito entre el operador de la presa y las sedes centrales de

administración de gestión de la cuenca, administración de desastres, autoridades municipales, comunidades etc.

### 2.2.7 Seguridad Funcional

La seguridad funcional se refiere a la capacitación técnica de los encargados de operación de los sistemas y toma de decisiones en situaciones de operación normal y eventos extremos, siendo factible que desde el punto de vista estructural una presa sea suficientemente segura, siempre puede darse el caso que una mala operación comprometa la seguridad.

Para ello debe evaluarse la capacidad de respuesta del personal responsable, la capacitación y la existencia de manuales de procedimientos claros y consistentes con la necesidad de preservación de la seguridad de la estructura y las poblaciones aguas abajo de la misma.

### 2.3. Evaluación Complementaria de la Seguridad Basada en el Riesgo

La evaluación tradicional de la seguridad hasta ahora descrita, constituye una aproximación conservadora de la respuesta de la presa ante solicitaciones discretas, claramente previsible desde un enfoque determinista y fundamentado en la experiencia acumulada de muchos años de diseño y buena práctica de la ingeniería.

Como alternativa a ese enfoque tradicional basado en coeficientes de seguridad, se ha elaborado códigos basados en técnicas probabilistas modernas que definen las distribuciones estadísticas de las variables y fijan los umbrales admisibles de las probabilidades de fallo. (Membrillera et al, 2005 [2])

No obstante, en el contexto de la seguridad de presas y embalses ambas metodologías se complementan. Dentro del Análisis de Riesgo, el enfoque clásico puede considerarse como un punto discreto englobado en un continuo formado por diferentes condiciones de carga y respuestas del sistema (Bowles et al, 1997 [3]). Dentro de las prácticas tradicionales de gestión de la seguridad de presas, el Análisis de Riesgo puede servir para completar y perfeccionar el proceso mediante el reconocimiento explícito de los riesgos y el tratamiento formal de las incertidumbres (ICOLD, 1995 [4]). (Membrillera et al, 2005 [2])

Este enfoque estadístico del problema de la seguridad de las presas orientado a la estimación de la probabilidad de ocurrencia de una falla y al riesgo de sufrir una serie de daños potenciales, involucra entre otras cosas un estudio minucioso de:

- Múltiples escenarios de sollicitación.
- Probabilidad de ocurrencia de los Escenarios y la Persistencia en el tiempo de la sollicitación.
- Mecanismos de Rotura o Modos de Fallo coherentes con las singularidades de la obra. Discretizados como una sucesión de eventos simples (Árboles de Fallo).
- Probabilidad de ocurrencia de cada uno de los eventos que involucra el modo de fallo.
- Caudales que se registrarían aguas abajo para mecanismo de falla.
- Áreas potencialmente inundables aguas abajo de la presa en función del caudal de salida.
- Daños generados por la inundación en términos económicos y de vidas humanas.
- La incertidumbre asociada a todas las estimaciones.

Una vez cubiertos estos aspectos, la metodología comprende un análisis numérico de las combinaciones de probabilidades de ocurrencia de los escenarios y un estudio de la respuesta del sistema tomando en cuenta la incertidumbre.

Las aplicaciones del análisis de riesgo en sistemas de gestión de integral de la seguridad son muchas, asimismo en el análisis de la factibilidad económica de una medida de protección aporta información valiosa par la toma de decisiones.

Sin embargo para efectos de este estudio, se destacará únicamente el uso de la herramienta de formulación de Modos de Fallo por considerarse que en entornos

de limitado acceso a la información, y elevada incertidumbre, el análisis de riesgos difícilmente arrojará resultados numéricamente exactos, sin embargo se estima que existe en la formulación de los Mecanismos de Fallo, un valor agregado en materia de seguridad puesto que proporciona una visión más realista que la evaluación tradicional de la seguridad ya que incorpora el criterio ingenieril, la experiencia y las singularidades de la presa al análisis.

### 2.3.1 Modos de Fallo

Los *modos de rotura* constituyen la serie de eventos que pueden conducir a un funcionamiento inadecuado del sistema presa-embalse o alguna parte del mismo. (Membrillera, 2008 [5])

La formulación de Modos de Fallo es un proceso al que se puede llegar una vez atravesada una serie de etapas previas. Teniendo un conocimiento amplio del archivo técnico de la obra, habiendo realizado inspecciones técnicas pormenorizadas (o durante las mismas), y luego de efectuar el análisis clásico de la seguridad, se puede proceder a enunciar los posibles mecanismos de rotura de la presa. Es recomendable que esta formulación provenga del consenso de un equipo de profesionales vinculados al proyecto de la presa, construcción, explotación, gestión y mantenimiento; ya que de este modo se garantiza que se incorpora en el análisis la mayor cantidad de experiencia profesional vinculada a las singularidades de la obra.

Un modo de fallo comprende en sí mismo una sucesión de eventos que deben ocurrir para que se presente un fallo. A esta sucesión de eventos se le denomina *Árbol de Fallos*. Esta sucesión se inicia con un evento desencadenante que será consecuencia directa de un escenario de sollicitación considerado. En la siguiente Figura se muestra un ejemplo de árbol de fallo para una presa de materiales sueltos por erosión interna del núcleo:

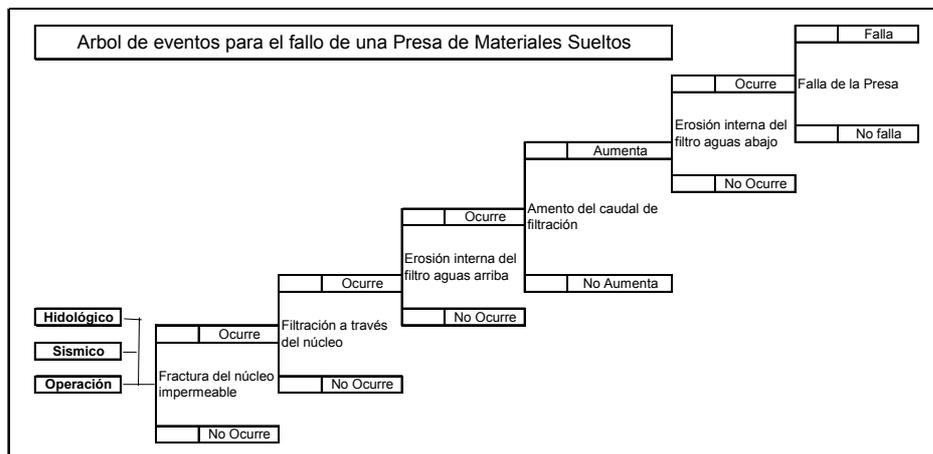


Figura 2.1. Ejemplo de Árbol de Fallo

Si el evento desencadenante es a su vez seguido de una serie de pasos intermedios identificados como mecanismo de fallo, la verificación de todos ellos conducirá a la falla de la estructura.

Cada uno de los eventos de desencadenará como consecuencia de todos los anteriores en el orden de aparición en el árbol de fallo, sin embargo su probabilidad de ocurrencia es independiente de la de aquellos.

### 2.3.2 Escenarios de Solicitación

Anteriormente se definió al escenario de solicitud como una combinación única de estados como, evento de inicio, nivel previo de embalse, estado de las compuertas o elementos hidromecánicos, Intensidad del viento, caudales fluyentes al embalse y existentes aguas abajo. Para efectos prácticos en lo que respecta al análisis de Modos de Fallo, lo usual es que se consideren tres tipos de escenarios fundamentales:

- Escenario de evento hidrológico: es aquel escenario de solicitud en donde las cargas hidrostáticas vienen impuestas por un evento de precipitación de características definidas y asociado a una probabilidad de ocurrencia. La persistencia en la aplicación de esta carga dependerá de las características de la cuenca.
- Escenario sísmico: es aquel escenario en el cual las solicitudes vienen dominadas por la ocurrencia de un movimiento sísmico de magnitud definida y asociada a una probabilidad de ocurrencia. La persistencia de la aplicación de esta carga es generalmente muy corta si embargo la magnitud de la misma puede ser considerable.
- Escenario de operación: es aquella combinación de cargas propias de la explotación normal de la presa, que a pesar de no ser de una magnitud fuera de los rangos previsibles, tienen una persistencia de aplicación prolongada.

La formulación de los modos de fallo está siempre ligada a los escenarios de solicitud, pudiendo darse el caso que un mismo modo de fallo pueda ser desencadenado por varios escenarios de solicitud diferentes.

## Capítulo 3

### Justificación de la necesidad del Protocolo

Como se explicará a continuación, diferentes circunstancias han marcado el desarrollo de la infraestructura de regulación hidráulica en Venezuela, de la mano de las mismas particularidades económicas, sociales y políticas que forman parte de la historia contemporánea del país.

#### 3.1. Antecedentes en obras hidráulicas

Venezuela, es un país de abundantes recursos hídricos y sin embargo las principales demandas de agua se ubican por contraste en las zonas más secas. Particularmente y como ejemplo más representativo, la cuenca hidrográfica del río Orinoco, Figura 3.1, el cuarto los río más caudaloso del mundo, ocupa más del 70% del territorio nacional y en ella reside una población que no supera el 20% del total del país. En contraposición, la mayor parte de los habitantes y actividades económicas están ubicadas en la región norte costera, cuenca del Mar Caribe y del Lago de Maracaibo.

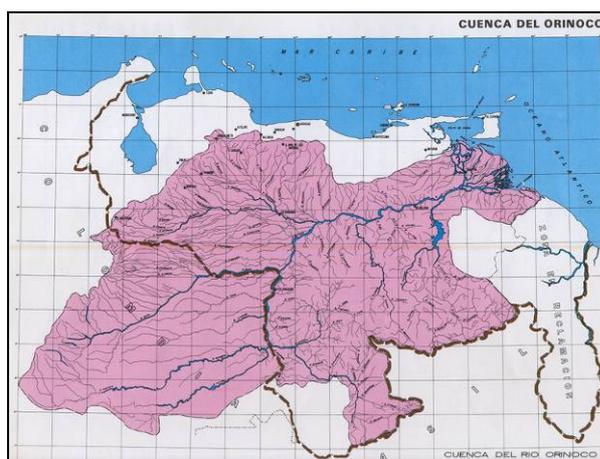


Figura 3.1. Cuenca hidrográfica del río Orinoco

Esta desigual distribución de demandas y disponibilidades de agua ha impulsado el desarrollo de la infraestructura de regulación hidráulica a nivel nacional. A principios del siglo XX se comienza la construcción de la primera gran presa en

Venezuela, desde entonces el crecimiento de estas obras de regulación ha tenido un ritmo desigual frecuentemente interrumpido, Figura 3.2, teniéndose que la mayoría de las presas fueron construidas en el período comprendido entre 1960 y 1980, con lo cual una buena parte de los embalses actualmente en explotación supera los 40 años de funcionamiento.

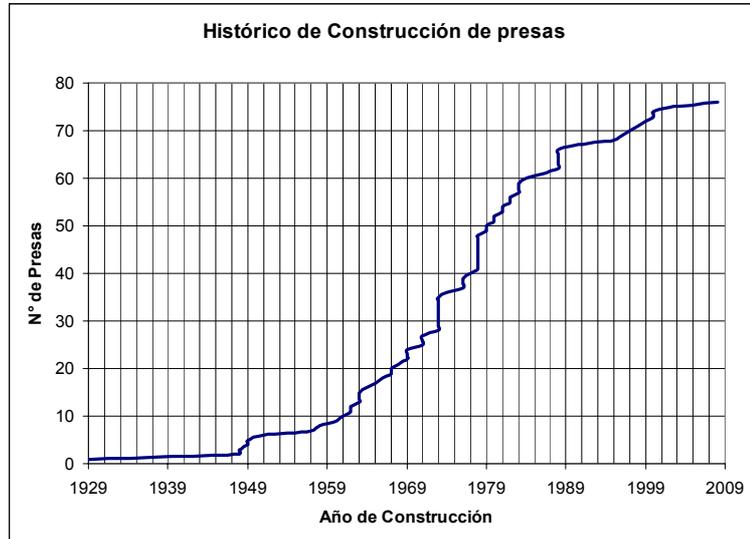


Figura 3.2. Evolución histórica del Parque de Presas

De forma general puede añadirse que, en correspondencia al desarrollo demográfico del país, las grandes presas están en su mayoría ubicadas en el eje norte costero del país y en la cuenca del Mar Caribe como lo indica el mapa anexo. En la Figura 3.3 se muestra los ríos en los cuales se ha construido grandes presas en Venezuela.

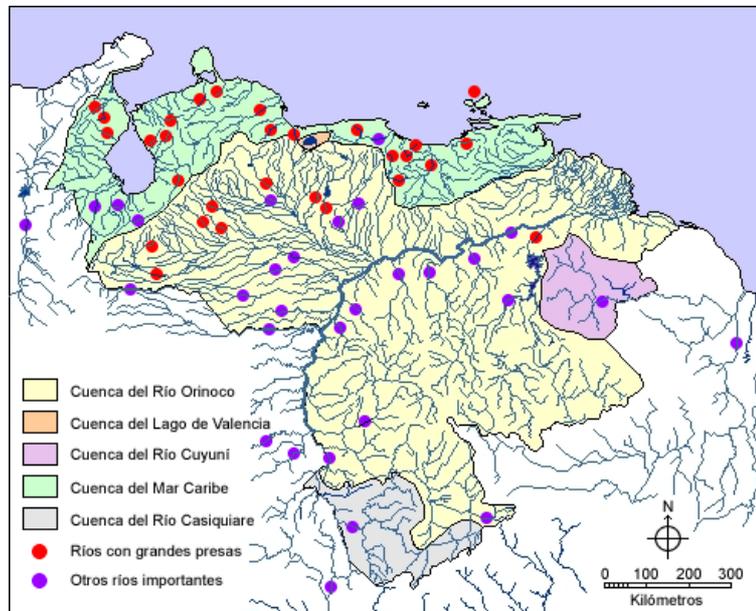


Figura 3.3. Distribución espacial de Presas en Venezuela

La cordillera de la costa es un sistema montañoso que partiendo en occidente de la cordillera de los Andes Venezolanos, prácticamente recorre en dirección Este

– Oeste la mayor parte del norte del país constituyendo además la divisoria hidrográfica entre las cuencas del Orinoco y del Mar Caribe.

Las condiciones geológicas predominantes en los emplazamientos de las grandes presas en Venezuela, han conducido al diseño y construcción de presas de materiales sueltos (aproximadamente el 79% del parque de presas, Figura 3.4), siendo poco frecuentes los casos en donde se halla roca competente para cimentar presas de fábrica. Es importante destacar que además es esta la zona de mayor actividad sísmica.



Figura 3.4. Composición del parque de presas en función de su tipología

La mayoría de las grandes presas de Venezuela, forman parte de los sistemas de distribución de agua potable y regadíos a nivel nacional, siendo las aguas superficiales la fuente principal (mas del 90%) de estos suministros. En la Figura 3.5 se muestra una imagen de la presa de Camatagua, principal embalse del sistema de abastecimiento del área metropolitana de Caracas.



Figura 3.5. Presa de Camatagua, acueducto metropolitano.

Las Grandes presas más importantes del país se encuentran en la cuenca del río Caroní, su función principal es la producción hidroeléctrica, siendo el caso que más del 80% del suministro eléctrico del país dependa de estas centrales.

El sistema conformado por las presas Guri, Tocoma, Caruachi y Macagua, todas sobre el río Caroní, regulan en conjunto un volumen de  $157.000\text{Hm}^3$ , un 93% de el volumen total regulado por todo el sistema de embalses del país.

Las características de esta cuenca difieren notablemente de las de la zona norte en cuanto a geología e hidrología. Se trata del segundo río más caudaloso de Venezuela con un gasto medio de  $10.000\text{ m}^3/\text{s}$  aproximadamente y adicionalmente es la región con menos sismicidad del país por tratarse de la formación geológica del macizo guayanés. En la Figura 3.6, se observa la presa de Guri, la presa más importante del país, en producción hidroeléctrica, envergadura de la obra y volumen regulado.



*Figura 3.6.* Presa de Guri, central hidroeléctrica Simon Bolívar

Como se puede notar existen grandes contrastes en el sistema de presas de Venezuela en términos de volúmenes almacenados, tipos de presas y usos fundamentales.

Esta desigualdad no es solo estructural, también es notable la diferencia entre el estado de mantenimiento y cuidado de la seguridad entre las grandes presas de las centrales hidroeléctricas con respecto al resto.

Queda evidenciado que existe una alta dependencia del sistema de embalses a nivel nacional para garantizar casi la totalidad de las actividades económicas del país, por este motivo, la seguridad de estas estructuras debe tener un tratamiento especial.

### 3.2. Incidentes en Presas de Venezuela

A pesar de no contar con un conjunto de presas demasiado numeroso en comparación a otros países, en Venezuela se ha registrado varios incidentes relacionados con la seguridad de presas y embalses, de diferentes magnitudes y consecuencias.

El Ing. Luis miguel Suárez documenta en su libro Incidentes en las Presas de Venezuela [6], 29 incidentes relacionados con la seguridad de presas en el país, si bien no todos ellos han conducido a la rotura o falla total del embalse.

El estudio de las causas que han originado los incidentes en presas, es de gran utilidad a la hora de definir las principales carencias de inspección y vigilancia en estas la gestión de estas estructuras. En la Figura 3.7, se muestra una repartición porcentual de las causas de los incidentes clasificados en varias categorías.

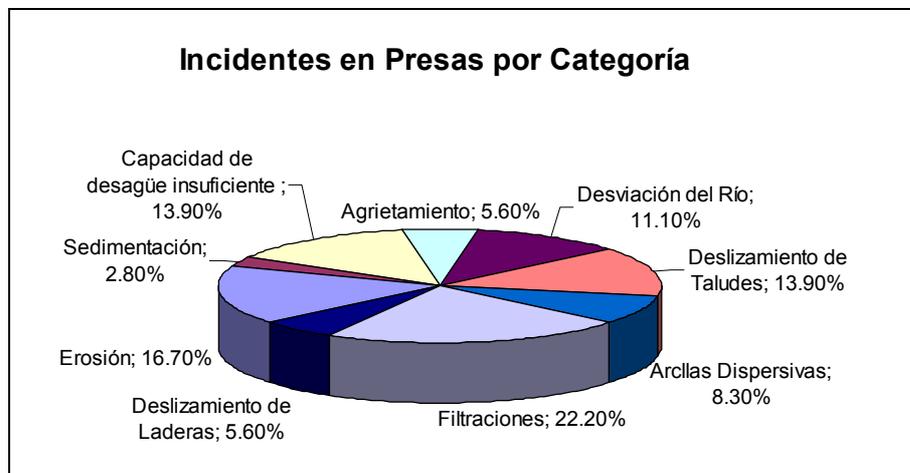


Figura 3.7. Categorización de los incidentes en presas, (Suárez L., 2002 [6])

De los 29 incidentes referidos, solo 3 condujeron a la rotura completa de grandes presas: El Guapo, Tocuyo de la Costa y El Cristo. Al respecto conviene destacar lo siguiente:

- Las tres presas fallaron bajo escenarios de solicitaciones hidrológicas.
- Las tres presas fallaron en el año 1999, El guapo y Tocuyo de la Costa, lo hicieron durante el mismo evento hidrológico con solo un día de diferencia, estando ambas ubicadas en la zona norte costera del país.
- Las tres presas eran de materiales sueltos.
- Las tres presas están ubicadas en la región norte – costera del país
- A ninguna de estas presas se le practicó con anterioridad a la falla una evaluación completa de la seguridad.

En un parque de 100 presas, la falla de 3 de ellas representa un porcentaje del 3% del total de estas estructuras en operación. Vale destacar que según las estadísticas de la comisión internacional de grandes presas, la media mundial de fallas en grandes presas es de alrededor del 1%, visto lo cual el porcentaje de fallos en presas supera ampliamente la media mundial, (Suarez, L., 2002 [6]).

Normalmente, los incidentes acaecidos en las presas de Venezuela son atendidos de manera correctiva y muy pocas veces se ha realizado intervenciones preventivas y evaluaciones de la seguridad de una presa con miras a anticiparse a la ocurrencia de eventos de rotura.

Desde el punto de vista de gestión de la seguridad de presas, la recopilación y estudio pormenorizado de cada uno de estos incidentes, indagando sus causas, justifica la necesidad de emprender un programa de evaluación de seguridad a nivel nacional, con la finalidad de advertir con suficiente antelación la eventual ocurrencia de un evento similar en cualquiera de las estructuras en operación.

Vale la pena mencionar y describir brevemente algunos de los incidentes más relevantes:

### 3.2.1 Falla de la presa El Cristo, 9 de abril de 1999

La presa El Cristo ubicada en el estado Falcón, sirve para el abastecimiento de agua potable a la población de Mirimire. Se trata de una presa de materiales sueltos, homogénea de arcilla, con una altura máxima de 22 metros.

Durante un evento hidrológico que afecto regionalmente la zona noroeste del país, esta presa falló luego de experimentar un sobrevvertido por coronación, siendo una presa de arcilla, se produjo inmediatamente una erosión en el espaldón de aguas abajo formándose una brecha que se agrandó progresivamente hasta que se vació totalmente el embalse. En la Figura 3.8, se observa el momento en que se vaciaba el embalse a través de la grieta.

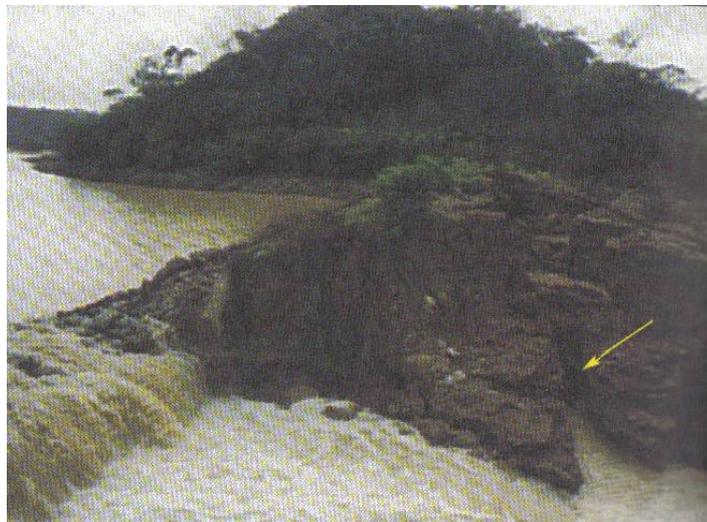


Figura 3.8. Presa El Cristo durante su rotura, (Suárez L., 2002 [6])

Se atribuye la rotura de esta presa a una serie de factores que actuaron en conjunto:

- Ocurrencia de un evento de precipitación extraordinario (Período de retorno 1000 años)
- Estimación deficiente de los aportes al embalse, subdimensionamiento de las estructuras de alivio.

### 3.2.2 Falla de la presa El Guapo, 16 de diciembre de 1999

Tal vez el incidente más emblemático y documentado, asociado a la seguridad de Presas en Venezuela fue la falla de la Presa El Guapo, Construida sobre el río Guapo en el Estado Miranda. Se trataba de una presa de tierra zonificada con núcleo central de arcilla y una altura máxima de 60 metros

Los días que precedieron a la rotura se caracterizaron por un evento meteorológico extremo que ocasionó numerosos aludes torrenciales en varios sistemas montañosos de la cordillera de la costa, dándose el caso que en el litoral central, estado Vargas, estos flujos torrenciales produjeron la peor tragedia natural de los últimos 50 años en la historia de Venezuela, dejando numerosas poblaciones incomunicadas, destruidas y produciendo un número de pérdidas humanas que supera los 10.000 habitantes.

En este entorno de contingencia nacional, el embalse El Guapo, experimentó una creciente extraordinaria, se produjo la falla del aliviadero al ser sobrepasada su capacidad de descarga, formándose una brecha en el contacto de la presa con el estribo izquierdo. El aliviadero anterior había sido diseñado para un caudal de 101,8 m<sup>3</sup>/seg. (Posteriormente se comprobó que estaba muy por debajo de la capacidad requerida). Las Figuras 3.9 y 3.10, ilustran la evolución del mecanismo de fallo de la presa.



Figura 3.9. Inicio del desborde del canal rápido del aliviadero.



Figura 3.10. Vaciado del embalse a través de la brecha

La actuación oportuna y coordinada del personal técnico encargado de la explotación de la presa (Hidrocapital, Hidroven, Ministerio del Ambiente), las

Autoridades Regionales y Protección Civil, evitó que esta rotura produjera numerosas víctimas mortales, ya que se procedió a la evacuación del pueblo de El Guapo, ubicado a 4 Km. aguas abajo de la presa.

A este respecto cabe mencionar que se actuó en consecuencia con la gravedad de la situación, sin embargo para la fecha no existía ningún plan de emergencia o manual de procedimientos a aplicar en caso de rotura inminente. Dicho esto queda de manifiesto que la labor de los cuerpos de rescate y personal técnico de la presa fue en gran medida improvisada y afortunadamente produjo resultados satisfactorios.

En cuanto a las causas de la falla, mucho se ha escrito, queda de manifiesto que el estudio hidrológico que dio como resultado el diseño del antiguo aliviadero había subestimado el pico de la creciente extrema, situación que se hubiera advertido si se hubieran realizado evaluaciones de seguridad durante la explotación de la presa. Nuevamente queda manifiesta la importancia de esta práctica.

Actualmente se ha reconstruido la obra (Figura 3.11) y se encuentra en etapa de puesta en servicio. En correspondencia del estribo izquierdo, donde se produjo la falla del antiguo aliviadero, se ha construido un bloque de Concreto Compactado con Rodillo sobre el cual se asienta el nuevo aliviadero (cuya capacidad de descarga es veinte veces mayor que el anterior), y contra el cual se procedió a apoyar la presa reconstruida en materiales sueltos como era el proyecto original.



*Figura 3.11.* Vista de la presa El Guapo en proceso de reconstrucción

### 3.2.3 Falla de la Presa Játira (Tocuyo de la Costa), 17 de Diciembre de 1999

Un día después de la rotura de la presa el guapo, producto del mismo fenómeno climatológico, se produjo la falla de la presa de Tocuyo de la Costa. Esta presa de materiales sueltos está formada por un sistema de diques de arcilla homogéneos, con una altura máxima de 8 metros y una longitud total de 5,8 Km, su propósito es el abastecimiento de agua potable a la población de Tocuyo de la Costa, ubicada a 4 Km. de la presa.

La rotura se produjo por la acción de la carga hidrostática máxima, cuando el nivel del embalse se ubico pocos centímetros por debajo de la cota de coronación, en combinación con una zona de socavación a pie de presa ocasionada por el proceso erosivo de un meandro del Río Tocuyo. En la Figura 3.12 se observa la ubicación del río con respecto al pie del dique.



Figura 3.12. Presa Tocuyo de la costa, (Suárez L., 2002 [6])

En Figura 3.13, se observa el aspecto de la brecha abierta en el cuerpo de la presa luego de desaguarse el embalse en casi su totalidad.

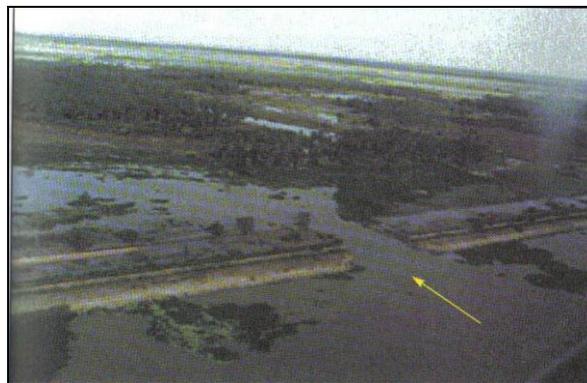


Figura 3.13. Brecha en el cuerpo de la presa, (Suárez L., 2002 [6])

Se atribuye la rotura de esta presa a una serie de factores que actuaron en conjunto:

- Ocurrencia de un evento de precipitación extraordinario (Período de retorno 1000 años)
- Estimación deficiente de los aportes al embalse, subdimensionamiento de las estructuras de alivio.
- No se realizó ninguna intervención correctiva del proceso erosivo que afectaba al pie de la presa.
- Falta de vigilancia y monitoreo del estado de conservación del cuerpo de la presa.

En este caso se evidencia una vez más la importancia de la realización de evaluaciones de seguridad periódicas; de haber sido así se pudieron haber tomado medidas correctivas que posiblemente hubieran evitado la rotura, y los daños generados.

### 3.3. Necesidad de reglamentos, normativas y/o guías técnicas para el análisis de la seguridad de presas.

Siendo la seguridad de presas un tema que afecta directa o indirectamente a todos los sectores de la sociedad, resulta fundamental establecer un marco legal, o cualquier tipo de convención para regular las actividades de proyecto, construcción, explotación, mantenimiento e inspección de presas, de modo que se pueda contar con criterios de seguridad lo más homogéneos posibles para todas las estructuras, aun siendo estas obras tan singulares.

Considerando que en Venezuela no existe todavía ninguna ley, reglamento o normativa que regule los criterios de diseño, construcción y demás aspectos ligados a la seguridad de presas, a continuación se hará una revisión de la estructura de las normativas de seguridad de presas en algunos países con amplia tradición en la gestión de este tipo de obras, con el fin de establecer comparaciones e introducir algunos conceptos relacionados con la seguridad de presas.

#### 3.3.1. Revisión de algunas legislaciones en materia de seguridad de presas.

##### 3.3.1.1. Reino Unido

En el reino unido existen más de 500 grandes presas según los registros de ICOLD, esto representa un promedio de 2 presas por cada 1.000 Km<sup>2</sup> de territorio (Delliou P., 1998 [7]).

El marco legal para la gestión de la seguridad de presas en el Reino Unido es el denominado Reservoirs Act (Decreto sobre Embalses) de 1975. Entre sus particularidades destaca (Hughes et al [8]):

- Impone al gobierno local la tarea de vigilar el cumplimiento del decreto en los embalses ubicados en su jurisdicción, manteniendo un registro público de las condiciones de los embalses, incluyendo datos técnicos, datos del titular, datos del panel de ingenieros relacionados con la obra, detalles sobre las inspecciones etc.
- Establece que el titular del embalse designe un ingeniero supervisor para hacer seguimiento del embalse en todo momento, debiendo hacer revisiones completas del embalse al menos cada 10 años.
- Establece como delito, el no cumplimiento de este decreto
- Indica procedimientos para la puesta fuera de servicio de un embalse.

##### 3.3.1.2. Noruega

En Noruega existen más de 300 grandes presas según los registros de ICOLD, esto representa un promedio de 1 presa por cada 1.000 Km<sup>2</sup> de territorio (Delliou P., 1998 [7]).

El órgano supervisor de la seguridad de las presas en todo el país es la Administración de Recursos Hídricos y Energía de Noruega (NVE), cuyo reglamento de seguridad vigente data de 1999, (T. Ljøgdø [9]). Resaltan los siguientes aspectos:

- Mantiene los criterios de diseño que han garantizado la seguridad de las presas existentes, promoviendo la implementación de nuevas tecnologías.

- Incluye el análisis de riesgo, permitiendo que el titular lleve a cabo su toma de decisiones basándose en análisis de este tipo.
- Divide a las presas en tres clases según el grado de consecuencias que podría generar su rotura.
- Establece criterios de cualificación para la estructura del equipo técnico del Titular.
- Establece sistemas de alarma y planes de emergencia.
- Se evalúa la protección contra sabotaje y acciones bélicas.

#### 3.3.1.3. Suecia

En Suecia existen alrededor de 200 grandes presas según los registros de ICOLD, esto representa un promedio de 0,4 presas por cada 1.000 Km<sup>2</sup> de territorio (Delliou P., 1998 [7]).

Hasta el año 1998 no existía en Suecia legislación alguna para el diseño y construcción de grandes presas, recayendo sobre el Titular la responsabilidad de la seguridad y la adopción de los criterios de diseño. Fue entonces cuando se publicaron los Lineamientos de Seguridad de Presas de la Asociación Sueca de Energía, que posee a grandes rasgos la siguiente estructura:

- Clasificación de las presas en función de las consecuencias de una eventual rotura.
- Normas de diseño y construcción para presas de materiales sueltos, presas de fábrica y aliviaderos.
- Establece las bases para la Organización, Mantenimiento y Vigilancia.
- Establece planes de emergencia.

#### 3.3.1.4. China

En china se tiene registro de alrededor de 86.000 presas, de las cuales más de 18.000 poseen una altura superior a 15 metros (uno de los criterios de ICOLD para definir a las Grandes Presas). Las presas en China son administradas por el Ministerio de Recursos Hídricos o por el Ministerio de Energía Eléctrica. Desde 1983, se ha publicado una serie de estatutos y guías para la seguridad de presas, entre las cuales se cuentan (Ye Li.qiu [10]):

- Gestión de la conservación de Proyectos Hidroeléctricos, 1983.
- Estatuto interno para la gestión de la seguridad en centrales hidroeléctricas, 1987.
- Ley de Aguas de la República Popular de China, 1988.
- Código de inspección de Presas Existentes, 1988
- Regulación de Controles de Inundaciones, 1991

#### 3.3.1.5. Austria

En Austria existen alrededor de 150 grandes presas según los registros de ICOLD, esto representa un promedio de 1,8 presas por cada 1.000 Km<sup>2</sup> de territorio (Delliou P., 1998 [7]).

El Ministerio de Agricultura, Agua y Gestión Forestal, es el organismo encargado de la confección de los reglamentos técnicos en Austria, se destacan las siguientes particularidades (R. Melbinger [11]):

- Se declara el interés público de las presas (sobretudo en cuanto a la seguridad) no pudiéndose afectar los derechos de terceras personas.
- Establece los parámetros técnicos para la construcción de nuevas presas y recrecimiento de existentes.
- Establece que el Titular debe mantener las instalaciones en un estado de mantenimiento acorde con el estado actual del conocimiento en materia de seguridad de presas.
- Establece el rol del equipo de expertos supervisores de la seguridad.

### 3.3.1.6. Alemania

En Alemania existen alrededor de 300 grandes presas según los registros de ICOLD, esto representa un promedio de 0,9 presas por cada 1.000 Km<sup>2</sup> de territorio (Delliou P., 1998 [7]).

Siendo una República Federal, cada uno de los 15 estados de Alemania posee su propia Ley de Aguas, por lo tanto es difícil describir de manera homogénea el panorama de la legislación. Se pueden citar algunas particularidades aplicables de manera general:

- Existen 6 tipos de presas sujetas a regulación clasificadas en función de su altura, ubicación y propósito.
- Distingue entre las situaciones de cálculo: normales, especiales y excepcionales, no sólo en función de las cargas actuantes, si no que incluye las condiciones del apoyo.
- Establece programas de mantenimiento, continuos, frecuentes e intensivos.

### 3.3.2. Legislación de seguridad de presas en España

En España existen alrededor de 1200 grandes presas según los registros de ICOLD, esto representa un promedio de 2,4 presas por cada 1.000 Km<sup>2</sup> de territorio (Delliou P., 1998 [7]). Es el país de Europa occidental con mayor número de grandes presas. Se dará un tratamiento especial a esta legislación por considerarse una base importante para el desarrollo de la metodología de evaluación que se presentará en el Capítulo IV.

Los principales reglamentos relacionados con la seguridad de Presas en España, que con diferentes niveles de aplicación, están vigentes en la actualidad son: la Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de Presas (1967), la Directriz de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (1995), el Reglamento Técnico de Seguridad de Presas (1996) y las Guías Técnicas de Seguridad de Presas del Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP) y el Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos (CICCP).

A continuación se comenta brevemente cada uno de estos documentos.

#### 3.3.2.1. Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de Presas (1967)

En esta instrucción se enuncian los conceptos básicos de diseño, construcción y explotación de las presas y sus obras anexas. Se mencionarán aquellos

aspectos relacionados con el apartado de Normas para Proyecto de Presas, ya que guarda estrecha relación con la metodología que se desea desarrollar

#### *Criterios Fundamentales (Artículos desde el 1 al 6):*

Se comienza por enunciar las definiciones esenciales en el ámbito del proyecto y construcción de presas, entre ellas se indican los criterios según los cuales una obra es calificada como “Gran Presa”, los descriptores geométricos de la presa como alturas, niveles particulares de la superficie del embalse, capacidades de almacenamiento etc.

Se establece una clasificación de las grandes presas en función de su tipo (de fábrica o de materiales sueltos), se definen los alcances de los Proyectos de Grandes Presas y se indican pautas en referencia a la coordinación de la realización de estos.

#### *Normas para el Proyecto de Presas (Artículos desde el 7 al 58):*

En este apartado, la instrucción hace una clara diferenciación entre cuales son las normas aplicables a todo tipo de presas y cuales son las consideraciones especiales para presas de fábrica y presas de materiales sueltos separadamente.

Para todo tipo de presas (Artículos desde el 7 al 25) es aplicable la realización de un anteproyecto, y proyecto de construcción, una Memoria Técnica que sea el compendio de todos los estudios de alternativas, justificaciones, estudios climatológicos, geológicos etc.

Deben realizarse suficientes planos de construcción para definir las obras y particularidades del terreno donde se ubiquen. A este respecto la instrucción especifica que como mínimo se incluya: Plano de la cuenca hidrográfica, Plano de situación del embalse, Plano del Embalse, Plano topográfico del sitio de Presa, Plano de la Presa y obras relacionadas, Plano de excavaciones, Plantas, perfiles y secciones suficientes para definir con claridad la presa y todas sus instalaciones, Planos de los accesos y dispositivos de control etc.

Debe elaborarse un pliego de condiciones que regule la ejecución de las obras. De igual manera se debe incluir un presupuesto general de toda la obra pormenorizando las diversas partes de la misma.

La instrucción detalla de manera específica los aspectos que se deben cubrir en los siguientes apartados:

- *Estudio Climatológico:* Información necesaria para realizar el estudio hidrológico, análisis estadístico de lluvias, temperaturas etc.
- *Estudio Hidrológico:* análisis del rendimiento de la obra, modificación del régimen de crecientes en el entorno de la obra, estudio de caudales máximos asociados a períodos de recurrencia, determinación de la creciete de Proyecto y la creciete máxima.
- *Estudio del Terreno:* capacidad de soporte a las solicitaciones propias de la presa, estudio geológico, sondeos, prospecciones, ensayos y pruebas y estudio de las características sísmicas de la zona.

- *Estudio de Disponibilidad: de Materiales:* Justificación en calidad, cantidad y factibilidad de aprovechamiento de yacimientos y canteras para la construcción de la presa y sus obras anexas.
- *Elección del Tipo de Presa:* Formulación de diferentes alternativas, estudio comparativo en el triple aspecto estructural, hidráulico y económico. Elección de aquella más idónea en términos de aprovechamiento de los recursos disponibles, justificado desde el punto de vista económico.
- *Capacidad del sistema de desagüe:* todos los elementos que de manera conjunta permitan el desagüe de una presa deben cumplir con ciertas prescripciones, por ejemplo: los caudales evacuados por los dispositivos sujetos a control nunca deberán ser superiores al caudal de la avenida en condiciones normales; los dispositivos de desagüe deben restituir el caudal al cauce sin generar daños por erosión; debe considerarse la posibilidad de reducir aguas abajo el riesgo de inundaciones mediante el uso de resguardos convenientes o cualquier otro dispositivo de regulación.
- *Aliviaderos de Superficie:* sobre la capacidad de los aliviaderos de superficie se indican una serie de prescripciones particularmente al caso en cual son operados por compuertas, imponiendo por ejemplo que se tengan como mínimo 2 compuertas y que las mismas puedan ser accionadas tanto manual como mecánicamente, por otra parte debe verificarse el tránsito de una creciente de 100 años de período de retorno en el supuesto que una de las compuertas fallase y se mantuviese cerrada.
- *Desagües Profundos:* Deben ejercer control sobre el nivel del embalse en condiciones normales y permitir el vaciado en tiempo prudencial. Se enuncian indicaciones sobre la capacidad de los desagües de fondo como por ejemplo: con el nivel del embalse a la mitad de la altura, tendrán como capacidad mínima el caudal medio del río; Todos los desagües profundos se proyectarán para poder funcionar correctamente, con la carga total del embalse, tanto en su apertura como en su cierre.
- *Sistemas de Auscultación y vigilancia:* Se proyectará el sistema de control necesario para conocer en todo momento el comportamiento de la presa y del terreno en relación por las previsiones del Proyecto durante las fases de construcción, puesta en carga y explotación.
- *Accesos y Comunicaciones:* Todo embalse importante debe disponer, salvo justificación especial, de un medio de comunicación eficaz con los poblados situados inmediatamente aguas abajo de la presa.

Por último, se indican procedimientos administrativos referentes a los plazos de ejecución y tramitación del proyecto.

Para Presas de Fábrica (Artículos desde el 26 al 49) entendiéndose por esta clasificación a aquellas construidas con concreto, dentro de las cuales se clasifican a las presas de Gravedad, de Contrafuertes, de Bóveda, de Arco Bóveda, Cúpula y Mampostería.

Para este tipo de presas, la instrucción especifica las siguientes solicitudes a considerar:

- *Peso Propio:* La densidad aparente de los materiales de construcción se justificará con la realización de ensayos. Se acepta para el cálculo del peso propio un valor de  $2,3 \text{ t/m}^3$  para la densidad del concreto. Si alguna particularidad del proceso constructivo influenciase el reparto tensional, será preciso tenerla en cuenta. Si más del 2% de los ensayos arrojasen una densidad menor a la de diseño, deberá comprobarse si ello afecta la seguridad de la obra.
- *Empujes Hidráulicos:* Se calcularán los empujes hidrostáticos sobre la presa, correspondientes al máximo nivel normal del embalse. El peso específico del agua para el cálculo de los empujes hidrostáticos será considerado normalmente igual a la unidad salvo en aquellos casos en que el agua contenga una fuerte proporción de elementos en suspensión.
- *Presiones intersticiales:* La presión de los fluidos que llenan los poros de la fábrica y de los terrenos actúa disminuyendo las presiones efectivas entre las partículas sólidas de los mismos y alterando por lo tanto, la estabilidad y resistencia de aquellos. Generalmente, se comprueba la estabilidad de la presa o del terreno en el que se apoya, estudiando el posible deslizamiento según un cierto número de superficies elegidas por consideraciones teóricas, así como según todas aquellas que presenten circunstancias de debilidad particular. Para conocer las presiones intersticiales es necesario, en principio, determinar la red de filtración, lo cual puede hacerse por medios analíticos, gráficos o experimentales. Toda la incertidumbre que sobre la forma de la red de filtración exista repercute en la magnitud probable de las presiones intersticiales y, por lo tanto, en la valoración del coeficiente de seguridad de la presa. Son, pues muy recomendables todas las medidas que tiendan a reducir el valor absoluto de esas presiones, con lo que se disminuye así la influencia relativa de sus variaciones sobre la estabilidad de la obra. Entre estas medidas, las galerías, los drenajes y las inyecciones contribuyen de manera decisiva a la seguridad de la presa.
- *Efecto del Oleaje:* Se determinarán la altura máxima previsible del oleaje y su efecto dinámico sobre el paramento.
- *Efectos Sísmicos:* este análisis se efectuará en correspondencia a la sismicidad de la zona en la cual está construida la presa. En las zonas de alta sismicidad, se realizará un estudio sismológico y tectónico que justifique las acciones previsibles. Las acciones sísmicas horizontales y verticales, se considerarán que separada y conjuntamente, actúan en la dirección más desfavorable. No se tendrá en cuenta la coincidencia con temporales o avenidas extraordinarias. Deberán considerarse los efectos hidrodinámicos del agua.
- *Retracción:* En el cálculo de la estabilidad de la presa se podrá prescindir del efecto de la retracción, siempre que en los métodos de construcción se prevean las precauciones que se indican para cada tipo de presa.
- *Variaciones de la Temperatura:* Los esfuerzos debidos a la dilatación y contracción del hormigón causados por las variaciones de la temperatura exterior, se deducirán tomando como base las condiciones climatológicas de la región y las características térmicas del concreto.

- *Otras Solicitaciones:* En casos especiales se tendrán en cuenta las vibraciones o esfuerzos dinámicos producidos por el funcionamiento de aliviaderos y órganos de desagüe, así como los impactos directos sobre la presa de posibles aludes o corrimientos del terreno.
- *Combinación de Solicitaciones:* La instrucción prescribe 6 situaciones de sollicitación distintas, dos normales y cuatro accidentales. Las situaciones normales son: Embalse vacío y Embalse lleno (a máximo nivel normal). Las situaciones accidentales son: Sismo en correspondencia con embalse vacío; Embalse lleno con drenajes ineficaces, Sismo con Embalse lleno, y Embalse a nivel Máximo probable.

La estabilidad de la Presa debe ser estudiada sujeta a las condiciones que se especifican en los siguientes apartes:

- *Estabilidad Estática de la Presa:* En este apartado se indica cuales efectos deben tomarse en consideración
- *Estabilidad Elástica de la Presa:* El régimen de tensiones de la presa se determinará aplicando los principios de la teoría de la elasticidad o los clásicos de la resistencia de materiales. El Proyecto deberá señalar los coeficientes de seguridad adoptados para las tensiones internas, en relación con la resistencia característica del concreto. Se exige que se realicen verificaciones en las situaciones de carga anteriormente descritas. Se indica que las cargas de trabajo a compresión del concreto nunca sobrepasarán los 80 kg/cm<sup>2</sup> ni los 10 kg/cm<sup>2</sup> a tracción.
- *Cargas de Rotura del Concreto:* Este aparte especifica las condiciones en las cuales deben tomarse y ensayarse las muestras del concreto colocado en obra a fin de obtener sus parámetros resistentes.
- *Resistencia de los Cimientos:* para su valoración se tendrá en cuenta la naturaleza y la estructura tanto del terreno de apoyo directo como de todo aquél que pueda afectar a la estabilidad de la presa. Cuando el terreno de cimentación presente discontinuidades en sus características mecánicas, y en particular sismicidad potencial, se considerará su influencia sobre la estabilidad de la presa.

### *Sistema de Auscultación*

En el Proyecto se han de prever los dispositivos necesarios y las normas que permitan, de forma elemental y rápida, conocer el comportamiento de la presa en cuanto a su seguridad. La instrumentación mínima requerida será: Medición de Movimientos Relativos entre la presa y el terreno; Medición de Temperatura interna y externa a la presa; Medición de Subpresiones, Medición de Movimiento Relativo entre juntas y bloques; Aforo de Filtraciones.

Para Presas de Materiales Suelos (Artículos desde el 50 al 58) se llamarán presas de materiales sueltos a aquellas cuyos elementos no estén ligados entre sí por conglomerantes hidráulicos. Se pueden clasificar estas presas en

Homogéneas y Heterogéneas, de acuerdo a su conformación prestando atención al elemento impermeable.

La comprobación de la estabilidad en presas de materiales sueltos, consistirá en determinar el coeficiente de seguridad al deslizamiento a lo largo de la superficie más desfavorable entre todas las posibles. La elección de la forma de las superficies de deslizamiento dependerá del tipo de presa en estudio.

Llamaremos "coeficiente de seguridad al deslizamiento" en cada una de las superficies estudiadas al número por el que habría que dividir la resistencia total al esfuerzo cortante de los materiales atravesados para el equilibrio fuese estricto.

La resistencia al esfuerzo cortante en cada punto se considerará, en general, igual a la definida por la ley de Coulomb en presiones efectivas, cuyos coeficientes se habrán determinado experimentalmente. Se considerará que las presiones efectivas son iguales a las totales menos la presión intersticial. Para la determinación de las presiones totales se tendrán en cuenta las fuerzas interiores en la cuña deslizante.

La instrucción prescribe los siguientes aspectos:

- *Estabilidad de la Presa:* deberá comprobarse para las distintas fases de la construcción, embalse lleno y desembalse rápido. En consecuencia, la estabilidad estará garantizada cuando se verifiquen los coeficientes de seguridad antes descritos. A este respecto la norma exige unos coeficientes mínimos para cada tipo de presa y casos de sollicitación:
- *Condiciones de los cimientos:* Se deberán investigar mediante los oportunos reconocimientos las condiciones de resistencia e impermeabilidad de la cimentación, extendiendo su estudio a un número suficiente de puntos de la superficie de apoyo.
- *Impermeabilización y Drenaje:* El elemento de la presa destinado a impedir el peso del agua será estudiado y ejecutado con un cuidado especial. Se extremarán los cuidados en el contacto entre el elemento impermeable y el cimiento y laderas, previendo disposiciones adecuadas para un enlace perfecto.
- *Coronación y Resguardo:* En este tipo de presas no se admite la posibilidad de vertido sobre la coronación. No se admite en principio la colocación de aliviaderos de ningún tipo sobre el cuerpo de la presa, siendo precisa, en caso contrario, una especial justificación, tanto de la necesidad de la solución como de la eficacia de las disposiciones proyectadas para evitar toda inseguridad en la obra. La anchura de la coronación se establecerá en función de la sismicidad de la zona. El resguardo será, como mínimo, de vez y media la altura de la máxima ola posible originada por el viento.
- *Paramentos:* en líneas generales, el paramento de aguas abajo debe ser protegido contra los efectos de la erosión provocados por las lluvias, y el paramento de aguas arriba deberá estar protegido contra el oleaje.
- *Tomas de Agua y Desagües:* En las presas en las que la impermeabilidad esté confiada a zonas compuestas por tierras, debe evitarse la construcción de conductos a través de las mismas, por el riesgo que ello supondría para la permanencia de la totalidad de la obra en caso de rotura. Cuando, por circunstancias especiales, se decida atravesar con conductos las zonas impermeables de la presa, aquéllos consistirán en galerías lo bastante armadas para resistir las presiones

que han de soportar, tanto durante la construcción como durante la explotación, y al menos, desde el paramento de aguas arriba de la zona impermeable, hasta su salida aguas abajo, la galería deberá permanecer en seco y ser visitable.

#### *Sistemas de Auscultación:*

Se dispondrán en el Proyecto los sistemas de medida que permitan determinar la magnitud de los asentamientos y corrimientos de la presa y de la cimentación y las presiones del agua intersticial durante la construcción, puesta en carga y explotación de la obra.

#### 3.3.2.2. Directriz de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones 1995

Después de la rotura catastrófica de la Presa de Tous en el año 1982, se impulsa en España la actividad de legislación y reglamentación en materia de protección contra inundaciones, en ese contexto se decreta esta directriz. En el apartado 3.5 de este documento, se trata específicamente el tema de la planificación para emergencias relacionadas con rotura o avería de presas. Sobre este apartado se comenta:

- Planes de Emergencia: se definen el concepto, funciones básicas, alcances según la clasificación de la presa. Se detalla el contenido de estos planes que en cuanto a: Análisis de la seguridad de la presa, Normas de actuación, Organización, Medios y Recursos.
- Interacción entre los planes de emergencia de la presa y los planes de protección civil a nivel regional: Escenarios de seguridad, Comunicación de los incidentes y centros de coordinación.

#### 3.3.2.3. Reglamento Técnico para la Seguridad de Presas (1996)

El reglamento tiene por objeto determinar las normas técnicas precisas para la seguridad de las presas y embalses. A tal fin, establece los requisitos y condiciones técnicas que deben cumplirse durante las fases de proyecto, construcción, puesta en carga, explotación y estado de fuera de servicio de las presas y embalses, en orden a alcanzar sus óptimas condiciones de utilidad y seguridad que eviten daños a las personas, a los bienes y al medio ambiente.

En primer lugar se indica cuáles estructuras reciben la denominación de “Grandes Presas”, siendo estas últimas aquellas que cumplan al menos con una de las condiciones siguientes:

Altura superior a 15 metros medida desde la parte mas baja de la cimentación hasta la coronación.

Altura comprendida entre 10 y 15 metros siempre que cumplan con alguna de las siguientes características: Longitud de coronación mayor de 500 metros; Capacidad de embalse superior a un hectómetro cúbico; Capacidad de desagüe superior a 2.000 m<sup>3</sup>/s.

Seguidamente se indica otra clasificación, esta vez con respecto al riesgo, teniéndose tres categorías A, B y C en función de los daños potenciales de una eventual rotura en términos económicos y de vidas humanas.

Conviene resaltar los siguientes aspectos del reglamento:

- *Obligaciones del titular de la presa:* se indican las obligaciones administrativas del titular en etapa de construcción y explotación de la presa. El titular debe promover inspecciones periódicas a la presa y llevar registro de las lecturas de toda la instrumentación. Deberá elaborar normas de explotación a fin de respetar los resguardos de diseño, la variación de los niveles, el accionamiento de los desagües etc.
- *Vigilancia e inspección de la presa:* esta actividad tiene los siguientes objetivos: Revisar e inspeccionar proyecto y construcción de nuevas presas; Analizar modificaciones de proyecto; Comprobar el cumplimiento del programa de puesta en carga y Normas de Explotación; Analizar los resultados de las inspecciones periódicas etc.
- *Planificación de Emergencias:* se indica la necesidad de elaboración e implantación y actualización de los planes de emergencia en de avería grave o rotura. Esta responsabilidad recae sobre el titular.
- *Exigencias de seguridad:* Se analizarán las diversas causas que, tanto de manera independiente como combinada, pueden generar la rotura de la presa, así como los efectos de la misma, aguas abajo.
- *Crecientes a Considerar:* El criterio básico para la selección y la determinación de las avenidas de proyecto será el del riesgo potencial asumible. En este sentido se indican dos tipos de crecientes: Creciente de Proyecto, máxima a considerar para el diseño de los desagües y aliviaderos en forma correcta; y Creciente Extrema, la mayor creciente que la presa pueda soportar sin que se produzca rotura.
- *Niveles del embalse:* En las fases de proyecto y explotación se definirán los niveles de embalse siguientes: Nivel Máximo Normal (NMN): Es el máximo nivel que puede alcanzar el agua del embalse en un régimen normal de explotación; Nivel para la Avenida de Proyecto (NAP): Es el máximo nivel que se alcanza en el embalse considerando su acción laminadora, cuando recibe la creciente de proyecto; Nivel para la Avenida Extrema (NAE): Es el máximo nivel que se alcanza en el embalse si se produce la avenida extrema, habida cuenta la acción laminadora del mismo.
- *Resguardos:* Se entiende por resguardo la diferencia entre el nivel de agua del embalse en una situación concreta y la coronación de la presa. A los efectos de la definición del resguardo, se entenderá como cota de coronación la más elevada de la estructura resistente del cuerpo de la presa.
- *Capacidad de los Órganos de desagüe:* Se comprobará que el funcionamiento de los órganos de desagüe con condiciones límite para la avenida extrema no compromete la seguridad de la presa.
- *Comprobación Estructural:* En el proyecto y en cada una de las revisiones posteriores, deberá comprobarse el comportamiento estructural de la presa ante diversas sollicitaciones y combinaciones posibles de ellas, y se razonarán los niveles de seguridad que se adoptan en cada caso según la clase de sollicitación considerada, la probabilidad de ocurrencia de la misma y su previsible permanencia. Se

considerarán tres tipos de solicitudes, Normales, Accidentales y Extremas.

- *El embalse y la cerrada:* Deberán analizarse las características morfológicas y geológicas del vaso y del emplazamiento de la presa que pudieran afectar a la seguridad. El alcance de las investigaciones y estudios a realizar será tal que permita conocer las características del terreno de apoyo de la presa y del vaso del embalse a fin de evaluar la resistencia, deformabilidad, permeabilidad y estabilidad físico-química del terreno.
- *Medidas complementarias de la seguridad:* en este apartado se indica la manera de aplicación de medidas como la Auscultación, el diseño conveniente y mantenimiento de los accesos y sistemas de comunicación, la alimentación eléctrica de los sistemas etc.

Finalmente el reglamento aclara la diferenciación entre las fases de Proyecto, Construcción, Puesta en Carga, Explotación y Puesta Fuera de Servicio. Y Todo lo referente al proceso constructivo de manera detallada haciendo énfasis en los controles de calidad y estudios a desarrollarse durante esta fase.

#### 3.3.2.4. Guías Técnicas de Seguridad de Presas

El comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP) y el Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de España, han publicado una serie de Guías Técnicas de la Seguridad de Presas, en las cuales se lleva a cabo revisiones del estado de arte en diferentes áreas relacionadas con el diseño, construcción y explotación de presas. Constituyen una referencia importante para la realización de evaluaciones de seguridad. Las guías publicadas son:

- N°1 Seguridad de Presas
- N°2 Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas
- N°3 Estudios geológico – geotécnicos y de prospección de materiales
- N°4 Avenida de proyecto
- N°5 Aliviaderos y desagües
- N°6 Construcción de presas y control de calidad
- N°7 Auscultación de las presas y sus cimientos

### 3.4. Limitaciones en la Aplicación

Organizar el sistema nacional de Presas de manera tal que se pueda realizar una gestión eficiente de la seguridad en Venezuela, es una tarea que conlleva la superación de numerosos obstáculos en lo técnico, administrativo, y político.

Pocas presas en Venezuela están siendo monitoreadas con la regularidad necesaria y son consecuentemente explotadas con criterios que favorezcan a la seguridad, de hecho la gestión de los embalses se hace fundamentalmente en función de la garantía del recurso para los sistemas de abastecimiento, con lo cual los administradores de los sistemas tienden a mantener los niveles más altos posibles en el embalse con el fin de enfrentar contingencias producto de años especialmente secos.

En materia de evaluación y gestión de la seguridad de presas hay en definitiva mucho por hacer, a continuación se identifican algunas de las limitaciones que deben ser superadas para alcanzar un estado de conocimiento más fiable de la situación de los embalses en cuanto a su seguridad.

#### 3.4.1 Recopilación de Información Básica

El Ministerio de Obras Públicas (MOP) fue el encargado de construir la gran mayoría de las presas de Venezuela. Posteriormente en el año 1976 fue creado el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (MARNR), el cual se encargó de la construcción del resto de la infraestructura de regulación. Fuera del Ministerio del ambiente sólo las compañías estatales de producción y distribución de energía eléctrica EDELCA (Electrificación del Caroní) y CADAFE (Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico) han construido presas con la finalidad de generación de energía.

Cada uno de estos entes por separado ha administrado los contratos de construcción de acuerdo a las leyes de contrataciones vigentes en la república y guardan archivos de carácter administrativo en los cuales reposan Estudios Previos, Proyectos e informes de Inspección durante la construcción.

Sin embargo, hasta la fecha no se ha llevado correctamente un archivo técnico de las presas propiamente dicho, razón por la cual, de cara al análisis de la seguridad que se desea efectuar, la recopilación de la información es una tarea bastante compleja, siendo necesario remitirse a los archivos del ente que construyó la obra, y dándose el caso en que los mismos están deteriorados o incompletos.

Sobre la conformación del archivo técnico se hablará en capítulos posteriores, de momento es necesario aclarar que la información referente a la vida de la Presa debe recibir un tratamiento diferente, todos los documentos relacionados al proyecto construcción y puesta en funcionamiento de este tipo de obras, debe estar catalogado y accesible para efectos de explotación eficaz y sucesivas revisiones de seguridad y toma de decisiones a la hora de ejecutar acciones correctivas si fuera el caso.

En definitiva se tienen las siguientes limitaciones:

- Difícil acceso a la información
- Información, incompleta y no catalogada

- Vacíos de información y falta de actualización de un gran número de estudios.

### 3.4.2 Instrumentación

La mayoría de las presas que actualmente están en funcionamiento en Venezuela carecen de instrumentos de medición de todas las variables que se considera conveniente conocer. En algunas situaciones los instrumentos fueron instalados durante la construcción y sin embargo no se han tomado lecturas de los mismos. En otros casos los instrumentos han sido averiados accidental o intencionadamente.

El problema de la escasa instrumentación en las presas tiene sus orígenes probablemente en el hecho que en la estructura administrativa no está designado un equipo responsable o encargado a cada presa en particular, entre cuyas funciones estaría lógicamente la toma de las lecturas y el mantenimiento de los instrumentos de auscultación. Este tema será tratado en el siguiente apartado.

En definitiva, el vacío existente en los registros de las variables internas y externas de las presas en un importante número de años de operación, representa un gran obstáculo para inferir las condiciones reales de trabajo de los materiales colocados en la presa y formular hipótesis fiables sobre el estado de la estructura.

### 3.4.3 Estructura organizacional

La estructura organizacional para el manejo de las presas en Venezuela no está definida con claridad, presentándose frecuentemente un conflicto entre la titularidad y la gestión.

En principio, el Ministerio del Ambiente, siendo el ente rector en materia de recursos hídricos, es el titular de todas las obras de regulación. No obstante la explotación de las presa viene efectuada principalmente por los operadores de acueductos (Empresas Hidrológicas, filiales del Ministerio del Ambiente), Empresas Hidroeléctricas estatales y Comunidades de regantes.

Ante tal diversidad de operadores de las obras de regulación, resulta necesaria una unificación de criterios en cuanto a la gestión de la seguridad de estas obras.

Generalmente los operadores de los sistemas de abastecimiento cargan con la responsabilidad del suministro y el mantenimiento y ampliación de las redes de distribución, de manera tal que no ocupan una fracción importante de su presupuesto ni de su personal técnico en el mantenimiento de los embalses, ya que la titularidad de los mismos pertenece al Ministerio del Ambiente. Como consecuencia, salvo contadas excepciones, las entidades que realizan la explotación no tienen prácticamente ninguna responsabilidad sobre la seguridad de la presa, mas allá de las que le imponen los criterios de garantía del suministro.

No está establecido de manera normativa que el titular de la presa mantenga un equipo encargado del mantenimiento y operación de las presas en sitio, por este

motivo se dan muchos casos en los que el personal técnico capacitado para operar órganos de desagüe y compuertas se encuentra a varias horas de camino, teniendo así una muy limitada capacidad de respuesta inmediata ante situaciones de emergencia.

Por otra parte la ausencia de personal fijo en las instalaciones trae como consecuencia que a falta de vigilancia, ocurran actos de vandalismo contra las instalaciones, robos de componentes eléctricos y sabotaje.

Para que cualquier programa de gestión de la seguridad de presas a nivel nacional o regional pueda tener éxito, será necesario un cambio en la estructura institucional o funcional en cuanto al tratamiento de estas obras.

## Capítulo 4

### Protocolo de evaluación de la Seguridad de Presas y Embalses en funcionamiento en Venezuela.

A continuación se presentan las pautas para llevar a cabo la evaluación clásica de la seguridad de una presa en funcionamiento, en el proceso se cubrirán aspectos que incluyen de la revisión de los archivos técnicos de la presa, las inspecciones técnicas a las obras en funcionamiento, la evaluación de la seguridad en sus aspectos, hidrológico-hidráulico, estructural, instalaciones electromecánicas, accesos, comunicaciones y funcionalidad.

#### 4.1. Consideraciones Previas

Una evaluación de seguridad es la comparación entre los resultados del análisis del comportamiento de la estructura en función de los parámetros de diseño, solicitaciones y condiciones de operación; con una serie de “valores admisibles” de márgenes de seguridad. Estos últimos deben estar recogidos en reglamentos y/o recomendaciones técnicas especializadas.

Ante la ausencia de normativas técnicas en la materia (véase Capítulo III), este protocolo de evaluación de la seguridad propone a su vez algunos de los parámetros de comparación necesarios para determinar si la presa es suficientemente segura en cada uno de los aspectos analizados separadamente

Una buena evaluación predecirá el comportamiento de la presa ante los diferentes escenarios de solicitación con menor incertidumbre, en la medida que se cuente con información suficiente y de calidad, en combinación con hipótesis de cálculo de la respuesta del sistema bien fundamentadas.

##### 4.1.1. Sobre la Titularidad

Es necesario establecer como principio, que las evaluaciones llevadas a cabo con el presente protocolo, tendrán utilidad y harán un aporte cierto a la gestión de la seguridad de la presa siempre y cuando el Titular de la obra, designe un equipo calificado como encargado de la explotación y lleve a cabo un seguimiento periódico del estado de conservación de las obras, ajustando los estándares de gestión según se actualice el estado del conocimiento en esta área.

La toma de decisiones en cuanto a las inversiones necesarias para mantener los niveles de seguridad en las presas, en los rangos que convencionalmente se tengan por aceptables, recae sobre el Titular. Dichas decisiones serán mas acertadas, eficaces y económicamente viables, en la medida que el Titular esté mejor informado sobre el estado de seguridad de la obra.

La realización de evaluaciones periódicas de la seguridad contribuirá a la mitigación de riesgos siempre que las recomendaciones y conclusiones de las mismas sean tomadas en cuenta oportunamente.

#### 4.1.2. Sobre la Explotación

El equipo responsable de la explotación debe estar conformado por personal capacitado y entrenado en los conceptos básicos de seguridad de presas, su estructura organizacional será definida por el titular. Entre sus funciones fundamentales se indican las siguientes:

- a) Promover inspecciones periódicas y evaluaciones de seguridad para verificar el estado de conservación de las obras y equipos.
- b) Custodiar, mantener y actualizar los Archivos Técnicos.
- c) Efectuar la auscultación de la presa y conservar registros de la misma en los Archivos Técnicos correspondientes.
- d) Comunicar los episodios excepcionales y las circunstancias anómalas que pudieran producirse, promoviendo de manera simultánea su estudio y análisis, así como disponer los medios necesarios para proceder a su reparación en el caso que proceda.
- e) Elaborar las Normas de Explotación de la presa y el embalse, que se incorporarán al Archivo Técnico de la misma.

## 4.2. Clasificación de las Presas

Dada la heterogeneidad del parque de presas en cuanto a singularidades propias de cada obra, en beneficio del análisis, es necesario establecer distinciones entre las presas a analizar en términos de dimensiones, riesgo potencial y tipología.

Los criterios de clasificación dentro de los cuales deberá catalogarse la presa objeto de estudio serán los siguientes:

### 4.2.1. En función de sus dimensiones

La clasificación en función de las dimensiones se realizará siguiendo el criterio de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) como se explica a continuación.

Se clasificarán como “Grandes Presas” a aquellas que cumplan al menos una de las siguientes condiciones:

- a) Altura superior a 15 metros, medida desde la parte más baja de la superficie general de cimentación hasta la coronación.
- b) Capacidad de embalse superior a 1.000.000 de metros cúbicos.
- c) Capacidad de descarga superior a 2.000 metros cúbicos por segundo.

Se clasificarán como “Pequeñas presas” a todas aquellas que no cumplan ninguna de las condiciones señaladas anteriormente.

### 4.2.2 En función del daño potencial

Como función del daño potencial que pueda derivarse de su posible rotura o del funcionamiento incorrecto, las presas pueden clasificarse en las siguientes categorías:

- a) Presas Tipo A: Presas de importancia estratégica ya que su eventual rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos, pérdidas humanas, prestación de servicios esenciales, daños materiales y medioambientales muy importantes.
- b) Presas Tipo B: Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños materiales o medioambientales moderados y/o afectar a un reducido número de viviendas con pérdidas humanas incidentales.

### 4.2.3 En función de su tipología:

- a) Presas de materiales sueltos: Todas aquellas presas cuyos elementos no estén ligados entre sí por un conglomerante. Presas de tierra homogéneas o zonificadas, Presas de Enrocado etc.
- b) Presas de Fábrica: Todas aquellas presas construidas con algún tipo de concreto. Presas de Gravedad, Arco, Bóveda etc.

### 4.3. Revisión del Archivo Técnico

Toda evaluación de la seguridad de una Presa, tendrá como punto de partida la revisión detallada del Archivo Técnico.

El Archivo Técnico de una presa es el compendio de todos aquellos documentos relacionados con el proyecto, construcción, puesta en carga e historial de operación de cada una de las estructuras que intervienen en la regulación del embalse. La información básica contenida en este archivo será la base de los análisis de la seguridad que se lleven a cabo durante la vida de la presa. La custodia y actualización del mismo han de ser responsabilidades del Titular de la Presa.

La revisión del Archivo Técnico consiste en verificar la cantidad y calidad de la información catalogada. Para la organización de este archivo se distinguen tres categorías fundamentales:

- Archivo Técnico del Proyecto
- Archivo Técnico de la Construcción
- Archivo Técnico de la Explotación

A continuación se detalla la información mínima necesaria por cada una de estas categorías:

#### 4.3.1. Archivo Técnico del Proyecto

En este aparte se debe encontrar toda la información disponible de la fase de proyecto, catalogada en las siguientes categorías:

- a) Estudios Preliminares: Estudio de Sitio de Presa, Estudio Hidrológico, Estudio Geológico, Estudio de Materiales y Préstamos.
- b) Anteproyecto: Elección del tipo y características de la presa, Ingeniería Básica de las obras.
- c) Proyecto Definitivo: Memoria descriptiva del proyecto a construir, Especificaciones de obra, Justificación de la capacidad de los sistemas de desagüe y aliviaderos, Instalaciones Electromecánicas, Sistema de auscultación y vigilancia. Obras anexas, Accesos y comunicaciones.
- d) Planos de Construcción: Todos los planos necesarios para definir completamente las obras y el terreno en el que se ubican. Como mínimo se deben encontrar: Plano de la cuenca hidrográfica, Plano de situación del embalse, Plano del embalse con curvas de nivel, Plano topográfico del sitio de presa, Planta general de la presa y de las obras relacionadas, Plano de excavaciones, Planta, perfiles y secciones suficientes para definir con entera claridad la presa y las obras e instalaciones, Planos de instalaciones electromecánicas, Planos detallados de los dispositivos de impermeabilización, Planos de las obras de desviación del río durante la construcción, Plano de los dispositivos previstos para el control y vigilancia de la presa, Planos de los accesos para la inspección y vigilancia de la obra
- e) Presupuestos y Pliegos de Licitación: Cantidades de obras, costos estimados y especificaciones de construcción. Condiciones que regulan la ejecución de las obras y las pruebas previstas.

#### 4.3.2. Archivo Técnico de la Construcción:

La documentación correcta del desarrollo de las obras y el proceso constructivo aportan una valiosa cantidad de información para el Análisis de la Seguridad. En este aparte se debe contemplar lo siguiente:

- a) Memoria de Construcción: Informe de la inspección de obras que contemple todos los aspectos relacionados al desenvolvimiento de la construcción en términos de control de calidad, cantidades de obra ejecutadas, cumplimiento de las especificaciones del proyecto, lapsos de ejecución, e incidencias. Información fotográfica del desarrollo de la obra.
- b) Modificaciones al Proyecto Original: las incidencias e imprevistos que surjan durante la construcción y conlleven justificadamente a modificaciones del proyecto original deberán ser recopiladas en los informes de inspección de obras y forman parte de este archivo.
- c) Controles de Calidad: Resultados de los ensayos y análisis de materiales de construcción, control de calidad de la fabricación y colocación de elementos concreto, selección colocación y compactación de materiales sueltos.
- d) Información Geológica adicional: información proveniente de las excavaciones para la cimentación, tratamientos de impermeabilización y drenaje, estabilización de laderas etc.
- e) Planos definitivos de Construcción: Planos detallados de cómo fueron construidas las obras, incluyendo todas las modificaciones sufridas durante el proceso constructivo.

#### 4.3.3. Archivo Técnico de la Explotación:

Durante la explotación normal del embalse se debe documentar e incluir en el Archivo Técnico, la siguiente información:

- a) Informe de Puesta en Carga: el protocolo de puesta en carga, las incidencias del llenado y las lecturas de los instrumentos durante este proceso deben estar recopiladas en un informe que se integra a este archivo.
- b) Datos históricos de Niveles y Caudales: registro de la evolución de los niveles del embalse, caudales descargados por los órganos de desagüe, frecuencia y datos de los aliviós ocurridos, datos provenientes de estaciones de aforo aguas arriba y aguas abajo de la presa, datos meteorológicos.
- c) Instrumentación: registro histórico de todos los aparatos de medición instalados interna y externamente a la presa, mediciones topográficas de los testigos de asentamiento, deformaciones, etc.
- d) Inspecciones y Vigilancia: informes periódicos del seguimiento de la explotación de la presa enfatizando cualquier evento extremo. Inspecciones generales y extraordinarias realizadas durante la explotación con sus correspondientes comentarios y recomendaciones.

- e) Pruebas de las Instalaciones Electromecánicas: resultado de las evaluaciones realizadas a los accionamientos de válvulas y compuertas, informes de mantenimiento y reparaciones realizadas.
- f) Informes de evaluación: todas las evaluaciones de seguridad, estado y comportamiento de la presa, fiabilidad de las instalaciones electromecánicas, documentación de actividades realizadas o cualquier aspecto que pueda afectar la seguridad de la presa, deben formar parte del Archivo Técnico.
- g) Normas de Explotación: disposiciones necesarias para garantizar el buen funcionamiento y seguridad de la presa, tanto en condiciones normales como en las extraordinarias que fueran previsibles.
- h) Planes de Emergencia: indicaciones a seguir en caso de ocurrencia de eventos extraordinarios que puedan suponer una reducción apreciable de los factores de seguridad.

Queda establecido que el Archivo Técnico es de carácter dinámico, se alimentará constantemente de los pormenores de la explotación de la presa y de los resultados de todas las inspecciones y evaluaciones periódicas de la seguridad que se lleven a cabo.

#### 4.3.4. Identificación de Carencias de Información

Toda vez que se lleve a cabo una revisión del Archivo Técnico de la presa, se identificarán las carencias de información que este presenta, y se propondrán las acciones necesarias para completarlo, por medio de la actualización de los estudios hidrológicos y geológicos, realización de sondeos complementarios para determinar propiedades del terreno y de los materiales de construcción o cualquier otra actividad que el equipo revisor juzgue conveniente.

Nuevamente, el informe resultante de esta identificación de las carencias de información pasa a formar parte del Archivo Técnico como testimonio de una revisión previa y elemento facilitador para revisiones posteriores.

#### 4.3.5 Identificación de las necesidades de inspección y análisis

De la revisión del Archivo Técnico también se debe identificar aquellos aspectos que no han sido cubiertos en inspecciones técnicas anteriores, con la finalidad de facilitar el trabajo de campo en los siguientes apartados del protocolo de análisis de la seguridad.

#### 4.4. Inspección Técnica

De manera imprescindible, la Evaluación de la Seguridad de una presa en funcionamiento requiere la verificación en sitio de todas aquellas características observables que reflejen el estado y comportamiento de la presa y sus obras auxiliares.

Una inspección técnica completa debe cubrir siempre que sea posible los siguientes aspectos:

- a) Accesos: descripción del estado de mantenimiento y trazado de las vías de acceso vehicular al cuerpo de presa, coronación y obras auxiliares. Accesibilidad del personal técnico de operación y equipos de mantenimiento a las galerías de inspección, casas de máquinas, casetas de válvulas y cualquier elemento involucrado en la operación de los desagües, compuertas y aliviaderos.
- b) Entorno Geológico: observación de la geología superficial de la cerrada, las laderas ubicadas en los estribos de la presa, el vaso de almacenamiento, y la zona inundable aguas debajo de la presa. Todo esto con la finalidad de identificar posibles deslizamientos incipientes que puedan poner en riesgo la presa o alguna de las estructuras auxiliares.
- c) Paramentos: observación superficial de los paramentos aguas arriba y aguas abajo identificando posibles oquedades, indicios de filtración, grietas, deslizamientos o cualquier característica anómala que pueda indicar deterioro de los materiales de construcción o malfuncionamiento de los sistemas de drenaje y/o elementos impermeables.
- d) Coronación: la inspección de la coronación de la presa servirá para observar posibles asentamientos.
- e) Cuerpo de Presa: en aquellas presas que posean galerías de inspección es posible realizar una observación interna del cuerpo de presa, identificando la estanqueidad y el envejecimiento de los materiales, y si es posible los contactos con los estribos, pantalla de drenajes, filtraciones, arrastre de finos etc.
- f) Instrumentación: la suficiencia y buen funcionamiento de los equipos de medición debe ser verificada en campo, se verificará que no existan filtraciones no contabilizadas, asentamientos e inclinaciones no medidos y que en general se están registrando todas las variables internas y externas que puedan tener relevancia en el análisis del estado de la seguridad de la presa.
- g) Desagües: verificar que los órganos de desagüe están en condiciones operativas, presencia de posibles obstrucciones o daños estructurales en las conducciones producto del envejecimiento de los materiales (óxido, erosión, incrustaciones etc.), filtraciones o fugas en los elementos de unión, estado de mantenimiento y funcionamiento correcto de válvulas y compuertas.
- h) Aliviaderos Superficiales: observación de las condiciones de la aproximación al elemento de control hidráulico identificando posibles obstrucciones producto de material flotante (restos de árboles principalmente); estado de mantenimiento y capacidad de operación de compuertas si las hubiere; inspección visual del canal rápido identificando posibles daños por cavitación o desprendimientos de material; inspección del pie del aliviadero, elementos de disipación de

energía y canal de descarga al cauce receptor identificando posibles daños por erosión.

- i) Instalaciones Electromecánicas: pruebas de la fiabilidad de los accionamientos electromecánicos y oleodinámicos según sea el caso, para la apertura de válvulas y compuertas. Verificación de la fiabilidad del sistema de alimentación eléctrica, redundancia de sistemas y posibilidad de accionamiento manual de todos los sistemas en caso de contingencia.
- j) Tomas: verificación de la capacidad de las tomas de agua, identificación de posibles obstrucciones, determinar su posible incidencia en la seguridad de la presa.
- k) Zona inundable: inspección de las zonas inundables que deban ser objeto de monitoreo por los daños potenciales que puedan generar afectando la accesibilidad, la operación de los sistemas y produciendo daños aguas abajo.

De toda inspección realizada se compondrá un informe técnico que cubra los aspectos anteriormente mencionados, enunciando conclusiones y recomendaciones que serán añadidas al Archivo Técnico de la Explotación de la presa.

## 4.5. Evaluación de la seguridad Hidrológica-Hidráulica

El ciclo hidrológico impone en el sistema presa-embalse una dinámica de aparición de niveles de agua, subordinados principalmente a tres aspectos: el hidrograma de entrada al embalse producto de la relación lluvia-escorrentía, la capacidad de las estructuras de desagüe, y la manera en que sean operados los sistemas. Es por este motivo que la seguridad hidrológica-hidráulica debe ser analizada de manera conjunta

### 4.5.1. Seguridad Hidrológica

En este apartado se estudiará las características de la cuenca receptora y el régimen de lluvia-escorrentía al que estará sometido el embalse, basándose en los registros históricos disponibles de estaciones meteorológicas y de aforo en la propia cuenca y a nivel regional.

#### 4.5.1.1. Estudio de Crecientes

El estudio de crecientes para el análisis de la seguridad de la presa contemplará las siguientes actividades:

- a) Se realizará un estudio probabilístico de los hidrogramas de las crecientes entrantes al embalse y sus posibilidades de ser superadas anualmente. Para esta evaluación se considerarán los datos o referencias de las avenidas precedentes.
- b) Se evaluarán hidrogramas complejos producidos por trenes de tormentas solapadas en forma secuencial y se estudiará el tránsito de estas crecientes a fin de determinar si imponen condiciones más desfavorables que las crecientes aisladas.
- c) Se formulará el hidrograma de la Creciente Máxima Probable (CMP) aislada, estimada con un modelo de lluvia escorrentía.
- d) Se analizará y evaluará la incidencia de los caudales desaguados por los embalses de aguas arriba y la laminación que produzcan los de aguas abajo cuando sea el caso.

#### 4.5.1.2. Crecientes a considerar

En el proyecto y en la explotación de la presa se definirán razonadamente, en función de la clasificación frente al riesgo potencial de la presa, dos tipos de crecientes afluentes al embalse.

- a) Creciente de diseño: Máxima creciente que debe tenerse en cuenta para el dimensionado del aliviadero, los órganos de desagüe y las estructuras de disipación de energía, de forma que funcionen correctamente.
- b) Creciente extrema: La mayor creciente que la presa puede soportar. Supone un escenario límite al cual puede estar sometida la presa sin que se produzca su rotura, si bien admitiendo márgenes de seguridad más reducidos.

Se sugieren la selección de las siguientes crecientes en función de la clasificación de la presa objeto de análisis en la tabla 4.1:

PERIODO DE RETORNO DE LAS CRECIENTES		
Tipo de Presa	Creciente de Proyecto	Creciente Extrema
A	1000	5000-CMP*
B	500	1000

\*Creciente Máxima Probable (Presas de Materiales Suelos)

**Tabla 4.1.** Selección de las crecientes en función del tipo de presa

El criterio de la Creciente Máxima Probable se adoptará en aquellas situaciones donde las series históricas registradas sean de escasa longitud y se verificará en todo caso que esta sea de una magnitud superior a la creciente de un período de retorno de 5.000 años.

#### 4.5.2. Seguridad Hidráulica

En este apartado se evaluará la capacidad hidráulica, comportamiento y operación de los aliviaderos superficiales y desagües profundos.

##### 4.5.2.1. Estrategia de Laminación

Las características de las crecientes entrantes al embalse, estudiadas en el aparte anterior, dependen del ciclo hidrológico y de las condiciones de la hoya receptora principalmente.

La presa constituye un elemento de regulación que modifica las condiciones del escurrimiento aguas abajo subordinadas a dos aspectos:

- 1) La capacidad física de los órganos de desagüe y aliviaderos
- 2) La operación de las válvulas y compuertas que controlen el caudal descargado.

A la relación entre el caudal entrante al embalse y aquel que se decide y se puede evacuar, en términos de magnitud y distribución en el tiempo; se le llama estrategia de laminación.

La estrategia de laminación será ideada por el equipo responsable de la explotación de la presa tomando en cuenta los siguientes factores:

- a) Preservación del borde libre (resguardo), que garantizan la seguridad de la presa (este concepto se ampliará más adelante).
- b) Mitigación de daños aguas abajo aprovechando el efecto amortiguador del vaso de almacenamiento.
- c) Aprovechamiento óptimo del recurso regulado (este aspecto no influye en la seguridad de la presa)

Los desagües profundos normalmente están dotados de dispositivos electromecánicos que permiten la regulación de los caudales descargados. Por su parte los aliviaderos superficiales pueden estar o no dotados de compuertas cuya operación condiciona la descarga.

#### 4.5.2.2. Curvas de gasto de aliviaderos y desagües profundos

Se debe determinar analíticamente, una relación unívoca de Caudal Descargado Vs. Nivel del Embalse para cada uno de los elementos de desagüe en función del grado de apertura de válvulas y compuertas cuando sea el caso, valiéndose para ello de coeficientes de descarga debidamente justificados.

Cuando las singularidades del diseño hidráulico de los aliviaderos y descargas profundas así lo requieran, la determinación de las curvas de gasto se llevará a cabo mediante la realización de un modelo físico reducido en un Laboratorio de Hidráulica.

#### 4.5.2.3. Tránsito de las Crecientes

Definidas las magnitudes de las crecientes a considerar, conocidas las características del vaso de almacenamiento y de las estructuras de alivio; se procede a realizar el tránsito de las mismas a través del embalse y determinar los niveles máximos alcanzadas durante el evento hidrológico.

Se considerarán las siguientes hipótesis para el tránsito de la creciente:

- a) El embalse se encuentra en su Nivel de Aguas Normales (NAN) al inicio del evento hidrológico.
- b) No se tomará en cuenta el caudal descargado por los desagües profundos a no ser que la capacidad de los mismos sea comparable a los caudales descargados por los aliviaderos superficiales y además se justifique suficientemente la fiabilidad de operación de los mismos.
- c) Cuando se tome en cuenta el caudal descargado por los desagües profundos, se considerarán diversos escenarios de averías de los órganos de desagüe durante la explotación, analizando sus consecuencias sobre el tránsito de las crecientes.
- d) Cuando los aliviaderos superficiales estén controlados por compuertas, se supondrá que al menos una de ellas no está operativa, quedando totalmente cerrada durante todo el evento y se verificará en estas condiciones el tránsito de la Creciente de Proyecto.

Partiendo de las hipótesis anteriores, se realizará el tránsito de la Creciente de Proyecto y la Creciente Extrema, obteniendo la siguiente información:

- a) Hidrograma de Salida para cada Creciente
- b) Comparación del Hidrograma de Entrada con el Hidrograma de Salida

#### 4.5.2.4. Definición de niveles.

Para efecto de los análisis de seguridad se definen los niveles de embalse siguientes:

- a) Nivel de Aguas Normales (NAN): Es el máximo nivel que puede alcanzar el agua del embalse en un régimen normal de explotación sin que se produzca un alivio.

- b) Nivel de la Creciente de Proyecto (NCP): Es el máximo nivel que se alcanza en el embalse si se produce la creciente de proyecto, habida cuenta la acción laminadora del mismo.
- c) Nivel de Aguas Máximas (NAM): Es el máximo nivel que se alcanza en el embalse si se produce la creciente extrema, habida cuenta la acción laminadora del mismo.

#### 4.5.2.5. Definición de Borde Libre

Se define como borde libre o resguardo, a la diferencia entre el nivel de agua del embalse en una situación concreta y la coronación de la presa, entendida ésta como la cota más elevada de la estructura resistente e impermeable del cuerpo de la presa.

En la estimación del borde libre se debe tomar en cuenta el oleaje previsible en condiciones de tormenta y sísmicas separadamente.

Para la estimación del oleaje se debe tener en consideración la geometría de la superficie del embalse y su orientación con respecto a la incidencia del viento, la velocidad y la dirección del viento predominante.

Se debe estimar igualmente la magnitud del oleaje inducido por el efecto sísmico.

En relación a los niveles del embalse anteriormente definidos, se definen el borde libre para las siguientes situaciones particulares del embalse:

- a) Borde Libre Normal: Es aquel relativo al Nivel de Aguas Normales (NAN). Este resguardo, además de ser suficiente para el desagüe de las avenidas, será igual o superior a las sobreelevaciones producidas por los oleajes máximos previsibles, incluyendo los debidos a efectos sísmicos.
- b) Borde Libre Mínimo: Es aquel relativo al Nivel de la Creciente de Proyecto (NCP). Este resguardo será igual o superior a las sobreelevaciones producidas por los oleajes máximos previsibles, sin incluir los debidos a efectos sísmicos.

Para la creciente extrema se tolerará un agotamiento parcial o total del borde libre para presas de fábrica; en las presas de materiales sueltos, salvo que estén proyectadas específicamente para ello, no se admitirán vertidos por coronación teniendo en cuenta el oleaje producido por los vientos.

Se estudiará la evolución del borde libre durante el tránsito de la creciente de proyecto y la creciente extrema. De este análisis se determinará si el borde libre es suficiente para garantizar el tránsito de las crecientes sin que se produzca sobrevertido. De no verificarse esta condición se indicará cuál es la probabilidad de agotamiento del borde libre y cual sería la altura de la lámina sobrevertida.

#### 4.5.2.6. Evaluación del comportamiento hidráulico de los Aliviaderos

Se comprobará que el funcionamiento de los aliviaderos en condiciones límite para la creciente de proyecto y la creciente extrema no compromete la seguridad de la presa. Se verificará la potencial ocurrencia de fenómenos de cavitación en las zonas donde sean previsibles depresiones y altas velocidades.

Se constatará que las estructuras de aproximación a los aliviaderos superficiales son suficientemente amplias para permitir el paso de árboles u otros cuerpos flotantes que puedan llegar al embalse durante las crecientes.

#### 4.5.2.7. Análisis del tiempo de vaciado.

El vaciado parcial o total de una presa puede ser una maniobra fundamental para garantizar la seguridad de la misma cuando se presenten situaciones derivadas de eventos extremos o la explotación normal que así lo requieran.

Tratándose se volúmenes de agua considerables, se requiere que los órganos de desagüe estén en capacidad de llevar a cabo esta operación en el un tiempo razonable sin producir daños en la presa o aguas abajo.

Se considerarán las siguientes hipótesis para la estimación del tiempo de vaciado de la presa:

- a) El embalse se encuentra en su Nivel de Aguas Normales (NAN)
- b) Durante todo el proceso de vaciado del embalse, está ingresando el caudal medio del río

Se considerará que se ha efectuado un vaciado total de la presa cuando el nivel del embalse esté por encima de la captación más baja (descarga de fondo), sólo la altura de aguas mínima suficiente para que pueda circular el caudal medio del río a través de la misma.

El tiempo estipulado para alcanzar vaciado total no solo depende de la capacidad de los órganos de desagüe, está también ligado a las condiciones impuestas por el cauce receptor desde el punto de vista de la ocurrencia de inundaciones susceptibles a generar daños.

Por otra parte un vaciado muy rápido del embalse puede ser contraproducente desde el punto de vista estructural, no siendo en ningún caso recomendable que ocurra una descompresión violenta de los cimientos y cambios bruscos en el estado tensional del cuerpo de presa.

Por último, cualquier operación de vaciado genera una onda de creciente artificial aguas abajo de la presa. Tratándose de una operación controlada, se debe llevar a cabo tomando en cuenta todos aquellos criterios de mitigación de daños aguas abajo.

#### 4.5.2.8. Condiciones de la descarga

Debe verificarse que la restitución de los caudales descargados al cauce receptor se lleve a cabo de manera tal que no genere desequilibrios importantes en términos de arrastres de sedimento, provocando problemas de erosión que puedan comprometer las estructuras o la presa misma.

Por otra parte la maniobra de los órganos de desagüe no deberá dar lugar a caudales desaguados que originen daños aguas abajo superiores a los que se podrían producir naturalmente sin la existencia del embalse.

#### 4.5.3. Recomendaciones

Se enunciarán recomendaciones referentes a los aspectos observados durante la evaluación de la seguridad hidrológica hidráulica.

## 4.6. Evaluación de la seguridad Estructural

En este apartado se llevará a cabo el análisis del comportamiento del conjunto presa cimiento ante la acción de diferentes combinaciones de solicitaciones. Se definirán las características mecánicas de los materiales de construcción y la caracterización geotécnica del sitio de presa, se definirán situaciones de análisis y se llevarán a cabo los análisis de estabilidad teniendo en cuenta las particularidades de las presas según dos tipologías: Presas de Fábrica y Presas de Materiales Suelos.

### 4.6.1. Descripción estructural de la presa.

Se describirá de forma general la geometría de los componentes de la presa, detalles constructivos de la cimentación, secciones transversales y longitudinales, drenajes y disposición de los materiales de construcción.

### 4.6.2. Caracterización geotécnica del sitio de presa.

Se analizará los resultados de las campañas de prospección, ensayos de laboratorio, perfiles geológicos e informes de caracterización geotécnica del emplazamiento de la presa a fin de evaluar la resistencia, deformabilidad, permeabilidad, estructura, fisuración y estabilidad físico-química del material de la cimentación y estribos de la presa.

De esta caracterización se obtendrán los parámetros geomecánicos que se utilizarán posteriormente en los análisis de estabilidad y comportamiento tenso – deformacional.

### 4.6.3. Propiedades de los materiales de construcción.

Deberá constatarse que los materiales de construcción poseen las propiedades mecánicas prescritas en el proyecto de la presa.

En las presas de fábrica se verificará, de los reportes de inspección de obras, que los agregados y el diseño de la mezcla del concreto fueron los adecuados, que la colocación del concreto se llevó a cabo según las especificaciones y que se tomaron muestras representativas para su posterior ensayo de laboratorio.

En las presas de materiales sueltos se verificará que se seleccionaron los materiales según la granulometría indicada en el diseño de la presa y que la colocación se llevo a cabo según lo previsto alcanzando las densidades de compactación indicadas en el proyecto.

Estas propiedades deberán estar indicadas en los informes de inspección de obras. Es aconsejable realizar campañas de sondeo de las propiedades de los materiales de construcción mediante la toma de muestras y ensayos de laboratorio que permitan corroborar la calidad de los acabados de construcción y la evolución de las propiedades mecánicas de los materiales en el tiempo.

De esta caracterización se obtendrán los parámetros resistentes de los materiales de construcción que serán utilizadas posteriormente en los análisis de estabilidad y comportamiento tenso – deformacional de la presa.

#### 4.6.4. Situaciones de Análisis

Los análisis de la seguridad estructural se efectuarán considerando tres tipos de situaciones de análisis: normales, accidentales y extremas. Cada situación de análisis es un escenario de sollicitación en el cual la presa se encuentra en una serie de condiciones iniciales predeterminadas y está sometida a un conjunto de sollicitaciones dado. En cada situación de análisis se verificará la estabilidad de la presa admitiendo distintos factores de seguridad, razonados en función de la probabilidad de aparición del escenario.

##### 4.6.4.1. Situaciones Normales

Corresponden a la acción del peso propio, empuje hidrostático y a las presiones intersticiales con el embalse para distintos niveles inferiores al Nivel de Aguas Normales (NAN). Se considerará también el empuje de los sedimentos y los efectos debidos a la temperatura. La persistencia en el tiempo de estas situaciones es generalmente prolongada.

##### 4.6.4.2. Situaciones Accidentales

Corresponden a acciones de duración limitada que producen incrementos en las sollicitaciones tales como: Empuje hidrostático debido a un incremento del nivel del embalse hasta el Nivel de la Creciente de Proyecto (NCP); aumento anormal de las presiones intersticiales; o acciones sísmicas, de magnitud inferior o igual al Terremoto de Proyecto (TP).

##### 4.6.4.3. Situaciones Extremas

Corresponde a situaciones como: empuje hidrostático debido a la Creciente Extrema (Nivel de Aguas Máximas), sobreelevación extraordinaria por avería de las compuertas, situaciones anómalas de disminución de resistencia u ocurrencia del Terremoto Extremo (TE).

#### 4.6.5. Descripción de las sollicitaciones

Las sollicitaciones cuya acción debe considerarse en las distintas situaciones de análisis serán de los siguientes tipos:

##### 4.6.5.1. Sollicitaciones hidráulicas.

###### Empuje hidrostático:

El empuje hidrostático sobre la presa se tomará desde el nivel del embalse hasta el punto más bajo de la cimentación en cada bloque en las presas de hormigón, o del elemento impermeable en las presas de materiales sueltos.

Con respecto al nivel del embalse, el empuje hidrostático se calculará para tres situaciones diferentes: Nivel de Aguas Normales (NAN), Nivel de la Creciente de Proyecto (NCP) y Nivel de Aguas Máximas (NAM). Estos empujes se

considerarán perpendiculares al paramento mojado en presas de fábrica o al elemento impermeable en las presas de materiales sueltos.

Empuje Dinámico:

Se evaluará la interacción dinámica entre la presa y el embalse durante la ocurrencia de un sismo determinado (la selección de los sismos se explica en el apartado 4.6.4.2.), obteniendo la distribución de sobre empujes sobre el paramento resistente.

Presiones intersticiales:

Se estimará la magnitud y distribución de las presiones intersticiales en el cuerpo de presa y en los cimientos, se determinará la forma de la red de filtraciones tomando en cuenta las características de la presa y los registros de auscultación que se posean.

Acción del oleaje:

Se estimará la sobrepresión hidrostática ejercida por el efecto del oleaje inducido por la acción del viento así como también aquel inducido por efecto sísmico (ambos calculados en el aparte de seguridad hidráulica).

4.6.5.2. Solicitaciones sísmicas

La Norma Venezolana de Edificaciones sismorresistentes (COVENIN, 2001 [12]), está orientada a distintos tipos de edificaciones públicas, urbanas, rurales etc., sin hacer referencia específica a las obras de embalse.

En su Capítulo 4: “Zonificación Sísmica”, estipula que el país está dividido en 8 zonas según el Peligro Sísmico. Para cada una de estas zonas se indica los coeficientes de aceleración horizontal y vertical a ser empleados en el diseño y verificación de estructuras sismorresistentes. Adicionalmente dispone que “La zonificación de regiones adyacentes a embalses de más de 80 metros de altura, se regirá por estudios especiales”.

En ausencia de estudios sismotectónicos particulares enfocados al emplazamiento de la presa, se recomienda estimar las solicitaciones sísmicas valiéndose de la zonificación que se muestra a continuación:

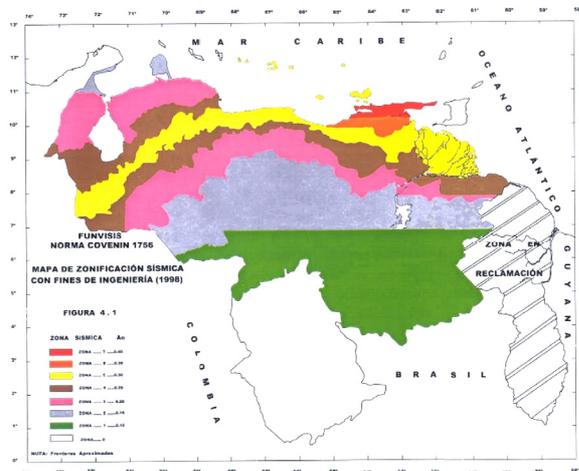


Figura 1. Mapa de zonificación sísmica de la norma (COVENIN, 2001 [12])

Las ocho zonas sísmicas se agrupan en tres categorías de acuerdo con su Peligro Sísmico. Para cada zona, la norma indica procedimientos y coeficientes que permiten determinar la aceleración máxima horizontal y el espectro del sismo de diseño. Adicionalmente establece que la aceleración vertical se tomara como el 70% de la aceleración horizontal en cada zona. A continuación se presenta la tabla 4.2 con estos valores.

ZONAS SÍSMICAS	PELIGRO SÍSMICO
7	Elevado
6	
5	
4	Intermedio
3	
2	Bajo
1	
0	

**Tabla 4.2.** Coeficiente de aceleración horizontal según norma (COVENIN, 2001 [12])

Se establecerán dos órdenes de magnitud para la estimación de las sollicitaciones sísmicas:

Terremoto de proyecto:

Sismo de magnitud previsible en la zona, que debe tenerse en cuenta para el diseño estructural de la presa y sus obras anexas de modo que el equilibrio estático y el comportamiento elástico de la presa se encuentre dentro de los límites admisibles garantizando un correcto funcionamiento estructural.

Terremoto extremo:

Máximo sismo que la estructura es capaz de soportar admitiendo un cierto grado de daño sin que ocurra un fallo de la presa. Supone un escenario límite al cual puede estar sometida la presa sin que se produzca su rotura, si bien admitiendo márgenes de seguridad más reducidos.

La elección de estos terremotos en términos de período de retorno, se realizará tomando en cuenta la clasificación de la presa con respecto al daño potencial y la sismicidad de la zona en que se ubique la presa.

Se propone la tabla 4.3 para la selección de los sismos:

PERÍODO DE RETORNO DE LOS SISMOS A CONSIDERAR			
Tipo de Presa	PELIGRO SÍSMICO		
	BAJO	INTERMEDIO	ELEVADO
A	Criterio COVENIN	T.P = 1000 años T.E = 5000 años	T.P = 1000 años T.E = Estudio Sismotectónico
B	Criterio COVENIN		

Peligro Sísmico Según la Norma Sismorresistente en vigencia

T.P = Terremoto de Proyecto; T.E = Terremoto Extremo

**Tabla 4.3.** Selección de los terremotos de proyecto y extremo

En aquellas situaciones en las que se seleccionen sismos de acuerdo a períodos de retorno determinados, debe verificarse que la magnitud de los mismos sea superior a la del criterio COVENIN [12] para la zonificación a que corresponda.

#### 4.6.5.3. Empuje de los sedimentos

Cuando sea previsible, dadas las características de la cuenca, que ocurra una acumulación importante de sedimentos sobre el paramento mojado de una presa, se estudiará el efecto incremental del empuje hidrostático en función del peso específico y la altura que pueda alcanzar la acumulación de sedimento.

#### 4.6.5.4. Variación térmica.

Se estudiará el efecto que las variaciones de temperatura del agua y del aire puedan tener sobre la presa en términos de dilataciones y cambios inducidos en el estado tensional de los materiales de la presa. Este efecto será estudiado únicamente en el cuerpo de las presas de fábrica o en las pantallas rígidas de las presas de enrocado.

#### 4.6.6. Análisis estructural para presas de fábrica

A continuación se especifican los aspectos que deben ser cubiertos en el análisis de la seguridad estructural enfocado a las presas de fábrica. Se verificará por separado la estabilidad estática de la presa, el comportamiento elástico.

De las tres situaciones de cálculo, anteriormente definidas, se ampliará el análisis para presas de fábrica distinguiendo otros escenarios más específicos que se describen a continuación (CNEGP, Guía N°1 [13]).

##### Situaciones Normales:

$N_1$  : Embalse lleno:

$N_{11}$  – Peso propio

$N_{12}$  – Peso propio + efectos térmicos

$N_2$  : Embalse vacío:

$N_{21}$  – Peso propio + empuje hidrostático (NAN) + presión intersticial con drenaje eficaz + efectos térmicos + empuje de sedimentos + ola máxima inducida por el viento.

##### Situaciones Accidentales:

$A_1$  : Embalse vacío:

$A_{11}$  – Peso propio + efectos térmicos + terremoto de proyecto

$A_2$  : Embalse lleno (NAN):

$A_{21}$  – Peso propio + empuje hidrostático (NCP) + ola de máxima inducida por el viento + presión intersticial con drenaje eficaz (si existe drenaje) + efectos térmicos

$A_{22}$  – Peso propio + empuje hidrostático (NAN) + ola de máxima inducida por el viento + presión intersticial con drenaje ineficaz + efectos térmicos.

$A_{23}$  – Peso propio + empuje hidrostático (NAN) + terremoto proyecto + ola sísmica + presión intersticial con drenaje eficaz (si existe drenaje) + efectos térmicos.

#### Situaciones Extremas:

$E_1$  : Embalse vacío:

$E_{11}$  – Peso propio + efectos térmicos + terremoto de extremo

$E_2$  : Embalse lleno (NAN):

$E_{21}$  – Peso propio + empuje hidrostático (NAM) + ola de máxima inducida por el viento + presión intersticial con drenaje eficaz (si existe drenaje).

$E_{22}$  – Peso propio + empuje hidrostático (NAN) + terremoto extremo + ola sísmica + presión intersticial con drenaje eficaz (si existe drenaje).

#### 4.6.6.1. Análisis de estabilidad estática

En este apartado se comprobará la estabilidad a deslizamiento del conjunto presa – cimiento, tanto en su estructura global como en cualquier parte que por su morfología pueda tener movimiento independiente del resto (CNEGP, Guía N°2 [14]).

La superficie más clara sobre la cual puede ocurrir deslizamiento será la de contacto entre la presa y su cimiento, sin embargo se analizará otras superficies factibles ubicadas principalmente en este entorno, especialmente cuando se identifiquen problemas de meteorización, bajo rozamiento interno, diaclasado, planos de discontinuidad en la cimentación o en los estribos, zonas de posible erosión etc.

La estabilidad frente al deslizamiento, deberá comprobarse en todas las situaciones anteriormente descritas (normales, accidentales y extremas) con excepción de aquellas en las que se encuentre el embalse vacío.

Sobre toda superficie plana donde se estime pueda ocurrir rotura y deslizamiento, se debe cumplir la siguiente condición (CNEGP, Guía N°2 [14]):

$$T \leq \frac{N.tg\phi}{F_1} + \frac{c.S}{F_2}$$

Donde:

T = Resultante de las fuerzas tangenciales.

N = Resultante de las fuerzas normales a la superficie

$\phi$  = Ángulo de rozamiento interno a lo largo de la superficie

c = Cohesión

S = Área movilizada

- $F_1$  = Coeficiente de seguridad con respecto al rozamiento  
 $F_2$  = Coeficiente de seguridad con respecto a la cohesión

La elección de los coeficientes de seguridad con respecto a la cohesión y al rozamiento, deberá estudiarse en función del tipo de presa y la situación de análisis, admitiéndose de manera general, coeficientes de seguridad menores en las situaciones extremas.

A continuación se propone una guía para la selección de los coeficientes de seguridad resumidos en la tabla 4.4 (CNEGP, Guía N°2 [14]):

SITUACIÓN	CLASIFICACIÓN DE LA PRESA			
	A		B	
	F1	F2	F1	F2
<b>NORMAL</b>	1,5	5,0	1,4	5,0
<b>ACCIDENTAL</b>	1,2	4,0	1,2	3,0
<b>EXTREMA</b>	>1,0	3,0	>1,0	2,0

**Tabla 4.4.** Selección de coeficientes de seguridad respecto al deslizamiento (Presas de Fábrica)

En presas de arco y de bóveda o presas de gravedad en las cuales existan anisotropías geológico – geotécnicas importantes en el sentido longitudinal a la cerrada, que puedan suponer alteraciones en el comportamiento resistente bidimensional, se llevará a cabo un análisis de tipo tridimensional que reproduzca el efecto de transmisión de lateral de las cargas, justificando la metodología a emplear, haciendo énfasis en los estribos o zonas de diaclasado especial.

#### 4.6.6.2. Análisis del comportamiento tenso - deformacional

Se realizará un análisis del comportamiento elástico evaluando el reparto interno de tensiones en el cuerpo de presa utilizando métodos de cálculo justificados, que modelizen tanto la estructura como el terreno de apoyo. En la actualidad el método de elementos finitos, el de mayor aplicabilidad y difusión ya que brinda soluciones prácticas y aplicables a la mayoría de los problemas que se presentan en el cálculo de presas.

Cuando el conjunto presa – cimiento presenta características homogéneas a lo largo de la cerrada y la presa es de alineamiento recto, pueden emplearse modelos bidimensionales que reproduzcan el comportamiento de tensión y deformaciones planas.

Para presas en las cuales se deba considerar el efecto tridimensional de reparto de tensiones laterales bien sea presas de arco y bóveda como presas de alineamiento recto con anisotropías importantes en el sentido longitudinal, de emplearán modelos tridimensionales para el estudio del reparto de tensiones.

Cualquiera que fuera el método de cálculo empleado, el resultado de este análisis será determinar la distribución de esfuerzos en el conjunto presa – cimiento con la finalidad de verificar si las tensiones y deformaciones esperadas son compatibles con las propiedades resistentes de los materiales de construcción de la presa, la cimentación y los estribos sin que ocurra rotura en ningún punto de la estructura.

Para efectos de este cálculo se tomarán las propiedades resistentes de los materiales de construcción y la caracterización geomecánica del material de la cerrada y la cimentación, que fueron definidas en los apartados 4.6.1 y 4.6.2. Se razonarán los valores elegidos para la resistencia a compresión y a tracción del concreto.

Se realizará el análisis para las situaciones descritas en el apartado 4.6.5. La relación entre los esfuerzos actuantes y las capacidades resistentes se expresará como un factor de seguridad, sobre el cual, se propone una selección de coeficientes a tomar en cuenta para esta verificación. Véase la tabla 4.5 (CNEGP, Guía N°2 [14]):

SITUACIÓN	CLASIFICACIÓN DE LA PRESA	
	A	B
NORMAL	3,0	2,5
ACCIDENTAL	2,0	2,0
EXTREMA	1,5	1,5

Tabla 4.5. Selección de factores de seguridad con respecto a las tensiones.

#### 4.6.6.3. Consideración del efecto sísmico

La selección de las sollicitaciones sísmicas a considerar se definió en el apartado 4.6.5.2, la acción de estas sollicitaciones sobre la presa se puede estimar mediante dos técnicas de análisis que se describen a continuación.

##### Análisis Pseudoestático:

Consiste en considerar la acción sísmica como un conjunto de fuerzas estáticas horizontales y verticales obtenidas como producto de las fuerzas gravitatorias por un coeficiente sísmico. La acción vertical actuará hacia arriba o hacia abajo según el efecto sea más desfavorable.

Las fuerzas horizontales debidas al sismo sobre la presa se calcularán según la expresión (CNEGP, Guía N°2 [14]):

$$F_h = \frac{a_c}{gr} p$$

Donde:

- $F_h$  = Fuerza horizontal estática producida por el sismo
- $a_c$  = aceleración de cálculo
- $g$  = aceleración de la gravedad
- $p$  = peso de cada volumen elemental de la presa
- $r$  = coeficiente de reducción (en general 1,5 salvo análisis detallado)

Las fuerzas verticales debidas al sismo se estimarán como el 70% de las fuerzas horizontales:

$$F_v = 0,7.F_h$$

#### Análisis dinámico:

Las técnicas de análisis dinámico involucran un mayor grado de complejidad en los cálculos, ya que se debe considerar el espectro de frecuencia de la aceleración sísmica. El valor de aceleración que se utiliza para el análisis pseudoestático, corresponde a la aceleración a la que se vería sometido un cuerpo infinitamente rígido apoyado en el terreno.

Se puede abordar el problema desde dos enfoques: Método del espectro de respuesta, y Cálculo dinámico completo de la estructura sometida al acelerograma originado por el sismo.

Este análisis se llevará a cabo sólo de manera complementaria al cálculo pseudoestático, en aquellas presas de Tipo "A" que estén ubicadas en zonas de peligro sísmico elevado. Para el resto de las presas será admisible el cálculo pseudoestático únicamente.

#### 4.6.7. Análisis estructural para presas de materiales sueltos

A continuación se especifican las comprobaciones estructurales que se deben llevar a cabo para el análisis de la seguridad en las presas de materiales sueltos.

De manera análoga a lo previsto para las presas de fábrica, se detallarán las situaciones de tipo normales, accidentales y extremas para las cuales se realizará el análisis estructural.

#### Situaciones Normales:

N<sub>1</sub> : Embalse lleno al nivel de aguas normales (NAN)

En esta situación se supondrá que las variables que pueden afectara la estabilidad tales como las presiones intersticiales en el núcleo (cuando sea el caso), y en el cimiento, alcanzan valores normales dentro del rango de variaciones previsto.

#### Situaciones Accidentales:

Para este tipo de situaciones transitorias se tomarán en cuenta las siguientes combinaciones

A<sub>1</sub> : Distintas fases de construcción

A<sub>2</sub> : Embalse lleno a nivel de la creciente de proyecto (NCP)

A<sub>3</sub> : Desembalse Rápido

A<sub>3</sub> : Embalse lleno (NAN) + Terremoto de proyecto

#### Situaciones Extremas:

Situaciones igualmente transitorias pero que someten a la presa a estados límite.

- $E_1$  : Embalse lleno a nivel de la creciente extrema (NAM)
- $E_2$  : Distintas fases de construcción + terremoto de proyecto
- $E_3$  : Fallo del sistema de drenaje + Terremoto de proyecto
- $E_4$  : Desembalse rápido + Terremoto de proyecto
- $E_5$  : Embalse lleno a nivel de aguas normales (NAN) + Terremoto extremo

#### 4.6.7.1. Análisis de estabilidad al deslizamiento

La comprobación de la estabilidad en presas de materiales sueltos, consistirá en determinar el coeficiente de seguridad al deslizamiento a lo largo de la superficie más desfavorable entre todas las posibles. La elección de la forma de las superficies de deslizamiento dependerá del tipo de presa en estudio.

Los métodos mayormente utilizados para el cálculo de la estabilidad son los de equilibrio límite, basados exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte. En estos métodos se asume que el suelo se comporta como un material Mohr-Coulomb, y que el factor de seguridad será el mismo para todos los deslizamientos (Vallarino, 2001 [15]).

Dentro de estos métodos, los procedimientos de mayor uso en la actualidad son los basados en el “método de las rebanadas”, tales como Morgenstern – Price, Spencer, Jambu y Bishop.

Estos métodos se basan en elegir una superficie de deslizamiento adecuada; para ello, hay que tener en cuenta las propiedades de los materiales y la geometría de la presa. La única condición que debe cumplir una superficie de deslizamiento es que sea viable como tal, es decir que su geometría haga posible el deslizamiento. En general las superficies de deslizamiento no deben cortar obras de concreto (como es el caso de las pantallas), ya que su cohesión las hace mucho más resistentes.

En algunos casos es necesario definir superficies mixtas planas, circulares, logarítmicas etc. En todo caso, se debe generar un número adecuado de superficies de deslizamiento coherentes con la estructura de la presa para que en su posterior análisis se pueda elegir aquella sobre la cual se estimen coeficientes de seguridad mínimos, siendo por lo tanto ésta la sección crítica.

Los métodos consistirán en dividir la superficie de deslizamiento en franjas verticales, asimilar a cada franja un elemento trapecial o triangular y evaluar de manera individual el equilibrio estático. Es aconsejable utilizar un método que tome en cuenta la interacción entre las rebanadas; en este sentido método de Jambu es uno de los más exactos, ya que el estado tensional de cada franja se plantea de manera general sin limitaciones ni hipótesis simplificadoras para las fuerzas entre las franjas.

Dada la complejidad de los cálculos se recomienda la utilización de un modelo numérico que reproduzca aceptablemente la geometría de la presa y su cimiento. Toda vez que se utiliza un modelo resistente basado en materiales con comportamiento según la ley de Mohr – Coulomb, el coeficiente de seguridad  $F$ , será el valor por el que han de dividirse la cohesión y la tangente del ángulo de

rozamiento interno de cada material, de modo que el modelo de cálculo indique que la presa es inestable.

En algunas ocasiones, cuando las cerradas son muy estrechas conviene tener en cuenta de manera aproximada el efecto tridimensional.

A continuación se propone un selección de factores de seguridad a tener en cuenta en el análisis de estabilidad de presas de materiales sueltos definidos en función del tipo de presa y la situación de cálculo, tabla 4.6 (CNEGP, Guía N°1 [13])

SITUACIÓN	CLASIFICACIÓN DE LA PRESA	
	A	B
<b>NORMAL</b>	1,4	1,4
<b>ACCIDENTAL</b>	1,3	1,2
<b>EXTREMA</b>	>1,0	>1,0

**Tabla 4.6.** Selección de coeficientes de seguridad para la verificación al deslizamiento (Presas de Materiales Suelos).

La selección de cualquier método de cálculo para la estabilidad de la presa será en todo caso suficientemente justificada toda vez que se realice una comprobación de la seguridad estructural.

Se justificará en todo caso la elección del método de cálculo para la estabilidad y se llevará a cabo la revisión de la seguridad ante el deslizamiento, para las situaciones descritas en el aparte 4.6.7.

#### 4.6.7.2. Análisis del comportamiento tenso - deformacional

En este apartado se realizará el análisis de las leyes de distribución de los campos de movimientos y tensiones en el conjunto presa – cimiento.

En el estado actual de la técnica, el método que proporciona la mejor aproximación al estado tenso – deformacional de la presa es el de elementos finitos. Toda vez que se escoja un modelo de cálculo, se debe razonar la elección del mismo en función de las dimensiones del modelo, las ecuaciones constitutivas y el grado de precisión que se espera en los cálculos.

El análisis se realizará sobre una o varias secciones transversales de la presa estudiando el comportamiento de deformación plana. Este análisis no es estrictamente válido en el entorno de las laderas si no se tiene en cuenta el efecto del reparto de tensiones en el sentido longitudinal, no obstante, se considera válida esta simplificación siempre que se justifique adecuadamente.

Cualquiera que fuera el método de cálculo empleado, el resultado de este análisis será verificar si las tensiones y deformaciones calculadas son compatibles con las propiedades resistentes de los materiales de construcción de la presa y la cimentación. En las presas de materiales sueltos debe prestarse particular atención a la evolución de los asentamientos, ya que pueden generar cambios en la geometría de la presa e incluso disminución de la cota de la coronación.

Para efectos de este cálculo se tomarán las propiedades resistentes de los materiales de construcción y la caracterización geomecánica del material de la cerrada y la cimentación, que fueron definidas en los apartados 4.6.2 y 4.6.3. Se

realizará el cálculo tenso deformacional para las situaciones descritas en el apartado 4.6.7.

#### 4.6.7.3. Consideración del efecto sísmico

La selección de las solicitaciones sísmicas a considerar se definió en el apartado 4.6.5.2. Los métodos de cálculo de la acción sísmica sobre la presa son el pseudoestático, el cálculo del movimiento de la coronación y el método de elementos finitos.

Debe tomarse en cuenta las siguientes particularidades para el análisis de presas de materiales sueltos:

- a) Estudiar la potencial ocurrencia de fenómenos de licuefacción tanto en cimentación como en cuerpo de presa
- b) Estudiar si el resguardo en coronación es suficiente para absorber eventuales asentamientos generados por el sismo
- c) Evaluación de la estabilidad de los taludes ante solicitaciones dinámicas.

#### 4.7. Evaluación de la seguridad de las Instalaciones Electromecánicas

En este apartado se debe evaluar las condiciones de operatividad de los accionamientos de válvulas y compuertas que ejerzan control sobre los desagües profundos y aliviaderos.

Se revisará el estado de conservación de las unidades oleodinámicas y motores eléctricos de accionamiento, basándose en su historial de funcionamiento y pruebas documentadas. Se estimará si es necesario o no realizar trabajos de rehabilitación, mantenimiento o sustitución de cualquier equipo que así lo amerite.

Se verificará el estado de conservación de los tableros eléctricos y sistemas electrónicos de control.

Las condiciones de la alimentación eléctrica han de ser revisadas enfocándose en la fiabilidad del suministro eléctrico en condiciones de operación normal y de contingencia. Se evaluará la presencia de sistemas de alimentación redundantes como grupos electrógenos alimentados con combustible ubicados en las casetas de accionamientos de válvulas y compuertas así como grupos electrógenos portátiles.

En aquellos casos en que la seguridad hidrológica – hidráulica este fiada a la operación de equipos electromecánicos, se debe prestar especial atención al estado de conservación de los equipos y a la realización periódica de pruebas de funcionamiento.

##### 4.7.1. Recomendaciones

Se formulara las recomendaciones que se considere necesarias en lo referente a este análisis.

#### 4.8. Evaluación de la seguridad de Accesos y Comunicaciones

La evaluación de la seguridad de Accesos y Comunicaciones consistirá en describir el estado de conservación, disposición y estructura de la red de accesos viales y peatonales a los dispositivos de control y zonas involucradas en la gestión de la seguridad de la presa; la infraestructura de comunicaciones entre el equipo encargado de la presa con el titular y autoridades competentes en materia de administración de situaciones de contingencia, también ha de ser analizada en este aparte.

##### 4.8.1. Accesos

Debe estudiarse de manera conjunta la accesibilidad a la presa y sus obras anexas medio de vehículos tales como carreteras y puentes, así como las conexiones internas practicables a pie por el personal encargado, tales como galerías de inspección, pasarelas, escaleras etc.

Se debe confirmar el estado de conservación y mantenimiento de todas las vías de comunicación y estudiar la vulnerabilidad de estos accesos en situaciones extremas como escenarios de crecientes y ocurrencia de sismos.

El acceso a todos los sistemas de regulación debe ser practicable durante la ocurrencia de la creciente de proyecto para cualquier presa, y durante la creciente extrema en aquellas presas en que los aliviaderos estén controlados por compuertas o la estrategia de laminación obligue a la utilización de los desagües profundos.

##### 4.8.2. Comunicaciones

El equipo encargado de la explotación debe contar, en el sitio de la presa con la capacidad de comunicarse con el titular de la presa, las autoridades de administración de emergencias a nivel local, gobierno regional, organizaciones comunitarias etc.

Sobre la capacidad de las comunicaciones se fundamenta la posibilidad de informar correcta y oportunamente de las condiciones de la explotación de la presa tales como niveles del embalse, caudales desaguados, lecturas de la instrumentación etc., de modo que la toma de decisiones pueda realizarse asertivamente contando con la mayor cantidad de información.

Se evaluará la capacidad instalada de comunicación por vía telefónica, radioeléctrica, Internet etc., tomando en cuenta el estado de conservación y mantenimiento de los equipos, y la capacidad de funcionamiento de estos durante situaciones de contingencia.

##### 4.8.3. Recomendaciones

Se enunciarán las recomendaciones del caso, una vez realizado este análisis.

#### 4.9. Evaluación de la seguridad Funcional

La seguridad funcional está referida a la capacidad del equipo de explotación para llevar a cabo las maniobras que sean requeridas en cada caso para preservar la seguridad de la presa.

Sobre el equipo responsable de la explotación, se debe realizar una descripción completa del personal y su capacitación, las condiciones de trabajo e idoneidad de las instalaciones in situ, y los materiales de los cuales se dispone para llevar a cabo las funciones. Se debe verificar que el personal posee el entrenamiento necesario para llevar a cabo las maniobras de operación en cada situación. Adicionalmente se debe estimar el tiempo de respuesta y la disponibilidad horaria del equipo en función de que la permanencia en las instalaciones de la presa sea continua o no.

Los manuales de procedimientos y normas de explotación deben explicar de la manera más simplificada y unívoca posible la actuación del equipo responsable de la explotación ante los diferentes escenarios cuya aparición sea previsible durante la vida de la obra.

##### 4.9.1. Recomendaciones

Se enunciarán las recomendaciones pertinentes luego de efectuado este análisis.

#### 4.10. Análisis cualitativo de Modos de Fallo

El análisis de cualitativo de modos de fallo que se propone como herramienta complementaria de este protocolo de evaluación de la seguridad de una presa, con la finalidad de incluir en el análisis la mayor cantidad de información adicional que refleje con mayor precisión las singularidades de cada presa.

A efectos de este análisis, se entenderá por modo de fallo aquella sucesión de eventos que desencadenen un fallo total de presa. Esta sucesión estará asociada a un determinado escenario de sollicitación y constara de un evento desencadenante, una serie de eventos de desarrollo y culminará por la rotura de la presa.

##### 4.10.1. Definición de Escenarios de Sollicitación

Los modos de fallo se considerarán dentro de los siguientes tres escenarios de sollicitación. No se excluye la posibilidad de que un mismo modo de fallo pueda desencadenarse a partir de dos o incluso los tres escenarios que se describen a continuación:

###### 4.10.1.1. Escenario Hidrológico

Se considerará como tal a toda creciente, modo de operación de los órganos de desagüe o combinación de las anteriores; que genere niveles del embalse superiores al Nivel de Aguas Normales (N.A.N), imponiendo como consecuencia mayores cargas hidrostáticas sobre la presa y sometiendo a diferentes grados de agotamiento la capacidad de los órganos de desagüe y aliviaderos. La magnitud y persistencia de estos niveles vendrá asociada a una probabilidad de ocurrencia que sin embargo no se analizará en este protocolo.

###### 4.10.1.2. Escenario Sísmico

Se considerará como tal al que se deriva de la ocurrencia de un terremoto, que somete a la presa y a sus estructuras anexas a condiciones variables de aceleración vertical y horizontal, diferentes a las del equilibrio estático. La persistencia de estos efectos se limita a un intervalo de tiempo limitado.

En este escenario se considera que el embalse se encuentra en su Nivel de Aguas Normales. Se descarta la ocurrencia simultánea de un sismo y una creciente en vista que la probabilidad conjunta es despreciable.

###### 4.10.1.3. Escenario de operación Normal

Se considera como tal al que se deriva de la explotación normal de la presa registrándose una combinación de niveles que resulta de los regímenes de escorrentía y la estrategia de extracción de caudales del embalse. Los niveles alcanzados en este escenario tienen mayor persistencia y son siempre inferiores o iguales al nivel de aguas normales.

#### 4.10.2. Procedimiento para la formulación de Modos de Fallo

Definidos los escenarios de sollicitación se procederá a la formulación de los modos de fallo, para ello se propone seguir el siguiente procedimiento:

##### 4.10.2.1. Identificación de elementos susceptibles a fallar y determinación del modo de fallo de cada uno

Se realizará un estudio de todos aquellos componentes de la presa y sus obras anexas, identificando aquellos cuya rotura o mal funcionamiento pueda formar parte de un mecanismo de fallo de la presa.

Se estudiará de qué maneras pueden fallar o dejar de funcionar cada uno de los elementos listados anteriormente bajo la acción de las sollicitaciones propias de los escenarios de sollicitación descritos en el aparte 4.10.1.

##### 4.10.2.2. Formulación de modos de fallo

Teniendo en cuenta la evaluación pormenorizada de la manera en que puede fallar cada elemento de la presa, se pueden construir mecanismos completos de fallo que deben poseer una estructura definida en la cual exista un evento desencadenante, una serie de eventos intermedios y la conclusión del modo de fallo será el fallo total de la presa.

Los modos de fallo estarán vinculados a cada escenario de sollicitación de los definidos en el aparte 4.10.1. No existen modos de fallo generalizados para todos los tipos de presas, esto se debe a que cada proyecto es único e irrepetible.

Para la formulación definitiva de los modos de fallo es recomendable que el equipo evaluador lleve a cabo sesiones de trabajo en grupo con personal de diferentes niveles de calificación, preferiblemente ligados al proyecto, construcción y/o explotación de la presa. Este grupo de trabajo deberá estar suficientemente informado sobre el proyecto de la presa y los resultados de la evaluación de seguridad hasta este punto ejecutada, de manera tal que con el aporte de su experiencia profesional y juicio experto se generen la mayor cantidad de mecanismos de fallo factibles.

##### 4.10.3. Identificación de factores a favor y en contra de cada Modo de Fallo

Una vez definidos los modos de fallo se procederá a identificar una serie de factores que actúan a favor o en contra de que se desarrolle el mecanismo que conduce a la rotura. Estos factores provendrán de las singularidades de la presa, y serán identificables en la medida que el equipo evaluador esté mejor informado sobre los pormenores del proyecto, incidencias de la construcción y resultados de las evaluaciones de seguridad realizadas anteriormente.

Los factores a favor y en contra complementan la definición del modo de fallo aportándole información adicional que facilitará el análisis cualitativo de los mismos, sobre el cual se comentará en el siguiente apartado.

#### 4.10.4. Identificación de necesidades de inspección vigilancia y auscultación

En el proceso de formulación de modos de fallo se pueden identificar las principales necesidades de información para mejorar el estado del conocimiento sobre la ocurrencia de mecanismos en particular, así como se podrá indicar las medidas de vigilancia y auscultación que por algún motivo se consideren de especial interés o urgencia.

Entre las necesidades generales más comunes se puede citar:

- a) Inspección de algún elemento estructural o de los sistemas de operación que se considere que pueda formar parte de un modo de fallo y que no haya sido observado
- b) Auscultación de parámetros asociados al comportamiento estructural de la presa como presiones intersticiales, filtraciones, asentamientos, movimientos diferenciales, etc., en una zona determinada, involucrada en un modo de fallo.
- c) Vigilancia de la evolución de algún proceso que se considere capaz de desencadenar un mecanismo de fallo.

#### 4.10.5. Evaluación cualitativa de Modos de Fallo.

Desde el punto de vista cualitativo, una vez que se ha definido una serie de modos de fallo de la presa, se puede realizar un análisis para ponderar cuáles de estos modos de fallo son más o menos factibles y establecer un orden de prioridad para orientar la toma de decisiones de cara a futuras intervenciones correctivas para elevar la seguridad de la presa.

##### 4.10.5.1. Clasificación de los Modos de Fallo

Como parte inicial del análisis cualitativo, se propone la siguiente clasificación para los modos de fallo según grados del I al IV (Membrillera et al 2005 [2]) que se describe a continuación:

###### Grado I:

Modos de fallo que claramente se consideren factibles al existir alguna condición o estado sintomático detectado, resultar la serie de eventos probables e implicar consecuencias potenciales importantes.

###### Grado II:

Modos de rotura considerados igualmente factibles, aunque con menores posibilidades de ocurrir o consecuencias reducidas.

###### Grado III:

Modos de fallo para los que la información disponible resulta, a todas luces, insuficiente aunque se estiman factibles y con consecuencias potenciales de magnitud elevada. Requieren una campaña de investigación urgente.

###### Grado IV:

Modos de rotura descartados y cuya aparición no se considera razonable.

Cada uno de los modos de fallo anteriormente formulados deberá ser clasificado en una o varias de las estas categorías anteriores, así se consigue tener una primera aproximación a la priorización de los mismos.

Es recomendable que esta clasificación sea igualmente establecida por consenso en un grupo de trabajo de la manera que se sugiere en el apartado anterior.

#### 4.10.5.2. Jerarquización de los Modos de Fallo

Como parte final de este análisis se deberá realizar un listado de los modos de fallo jerarquizados por orden de prioridad de mayor a menor, siendo en primer modo de fallo aquel que se considere que conlleve el mayor riesgo para la integridad de la presa y sobre el cual se considere que se deban orientar las primeras acciones correctivas.

#### 4.10.6. Conclusiones y Recomendaciones

Se enunciarán las conclusiones y recomendaciones correspondientes al análisis cualitativo de modos de fallo.

## Capítulo 5

### Evaluación de la Seguridad de la Presa Tres Ríos “El Diluvio”

A continuación se aplicará el protocolo definido en el Capítulo 4, al caso de estudio, La Presa Tres Ríos “El Diluvio”. Se cubrirán todos los aspectos posibles en virtud de la información recopilada, efectuando análisis pormenorizados de cada aspecto de la seguridad de la presa y se enunciarán las conclusiones pertinentes en cada caso.

#### 5.1. Consideraciones Previas

La Presa Tres Ríos, está actualmente en la etapa final de su construcción. Diversas circunstancias han marcado las etapas de diseño y construcción produciéndose modificaciones en la tipología de presa, y usos del embalse entre otras particularidades que serán descritas a continuación.

El objeto de este análisis es determinar el comportamiento de la presa y sus obras anexas en términos de seguridad frente a las solicitaciones para las cuales han sido diseñadas, en condiciones de operación y situaciones extremas.

##### 5.1.1 Sobre la Titularidad

El Titular de la Presa Tres Ríos es el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente. Una vez concluidas las obras y puesta en funcionamiento, la presa suministrará agua para dos usos principales: Acueducto de la ciudad de Maracaibo y Sistema de riego Diluvio – El Palmar.

Para efectos de la seguridad de la presa, la explotación debe ser llevada a cabo siguiendo procedimientos que salvaguarden la integridad de las estructuras. En algunas ocasiones las maniobras necesarias para garantizar la seguridad de la presa se contraponen a los criterios de gestión eficiente del recurso. Esta situación puede generar conflictos entre los usuarios del sistema y el titular de la presa.

Por este y otros motivos es imprescindible que el titular designe un equipo calificado que se haga responsable del manejo del embalse, promueva inspecciones periódicas y evaluaciones de seguridad, custodie y actualice los

Archivos Técnicos y elaborare las Normas de Explotación de la presa entre otras múltiples funciones.

#### 5.1.2 Sobre la Explotación

Por el momento la explotación de la presa, que ha consistido fundamentalmente en la gestión de los órganos de desagüe la está llevando a cabo el equipo de inspección de las obras, esto debido al hecho que la presa fue puesta en carga sin estar completamente construidas las descargas y el aliviadero.

Por otra parte, la tubería de aducción para el acueducto de Maracaibo está actualmente en construcción y el sistema de riego aún se encuentra al inicio de su desarrollo, por lo tanto al no haberse iniciado el aprovechamiento del recurso, el único criterio de explotación es el de la seguridad.

## 5.2. Clasificación de la Presa

La clasificación de la presa Tres Ríos de acuerdo a las categorías referidas en el protocolo de evaluación de la seguridad de presas es la siguiente:

### 5.2.1. En función de sus dimensiones

En función de sus dimensiones, entra en el criterio de clasificación de grandes presas de la ICOLD considerando que:

- a) La altura de la presa sobre sus cimientos es de 84,5 metros.
- b) La capacidad de embalse en su nivel de aguas normales es de 190 Hm<sup>3</sup>
- c) Capacidad de descarga superior a 2.000 metros cúbicos por segundo (Desaguando la creciente extrema)

### 5.2.2. En función del daño potencial

La presa Tres Ríos tiene una importancia estratégica ya que suministrará el 40% del abastecimiento de agua para la ciudad de Maracaibo, alimentará a un sistema de riego que debe abarcar 10.000 hectáreas cuando esté totalmente desarrollado. Una eventual rotura de la presa, ocasionaría moderadas pérdidas humanas ya que el centro poblado importante más próximo se encuentra a 40 Km. de distancia, sin embargo se están edificando aldeas para las futuras comunidades de regantes en un radio mucho mas cercano a la presa.

Aguas abajo del sitio de presa, el río palmar discurre por un cañón de unos 3 km de longitud que posteriormente da paso a una amplia planicie característica de la cuenca del lago de Maracaibo. Aunque no se ha efectuado un estudio de los efectos de la onda de rotura de la presa, es de esperarse que en esta planicie ocurra una expansión de la onda mitigando sus efectos aguas abajo en términos de lámina inundada. Por otra parte es previsible que ocurran daños considerables a la infraestructura de riego.

Como función del daño potencial y en vista de lo anteriormente expuesto, ésta presa se clasifica como Tipo A.

### 5.2.3. En función de su tipología:

La Presa Tres Ríos es de Materiales Sueltos zonificada, la estanqueidad viene conferida a un núcleo central impermeable de arcilla y los espaldones están contruidos con gravas de diferentes granulometrías. En la Figura 5.1 se observan la geometría de la colocación de los diferentes materiales:



### 5.3. Revisión del Archivo Técnico

La revisión del Archivo Técnico se realizó recopilando y catalogando toda la información disponible en formato digital y en físico a partir de la cual se construyeron tres categorías principales:

#### 5.3.1. Archivo Técnico del Proyecto

##### 5.3.1.1. Estudios preliminares

Los estudios preliminares de sitio de presa, hidrología, geología, materiales y sitios de préstamo, que se han reunido en esta revisión del Archivo Técnico, están contenidos en las memorias técnicas de los proyectos anteriores descritos en el siguiente apartado.

##### 5.3.1.2. Anteproyectos:

A continuación se resume cronológicamente la evolución del proyecto de la Presa El Diluvio, desde los primeros estudios preliminares hasta la fecha.

- a) ESPECIFICACIONES Y PLANOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA, ALIVIADERO Y OBRAS DE TOMA Y SALIDA DEL EMBALSE EL DILUVIO. Ingeniería de Suelos S.A. Caracas, Octubre de 1961.

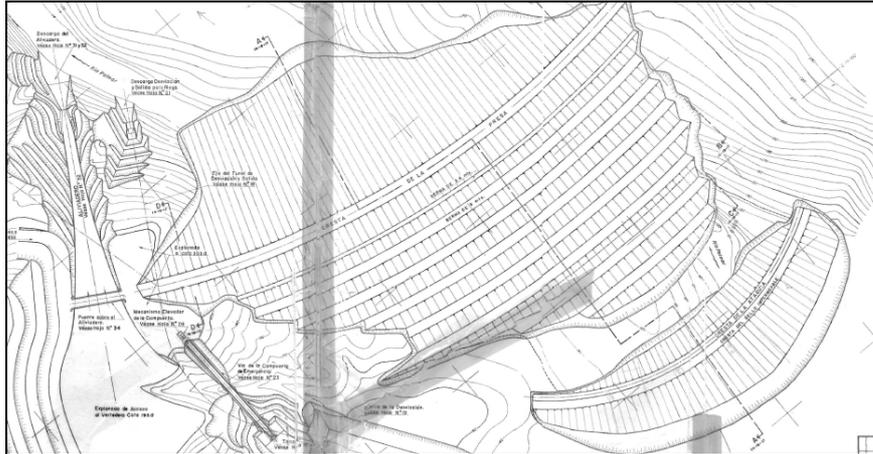
Primer proyecto desarrollado para el antiguo Instituto Nacional de Obras Sanitarias (INOS) del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Las características generales del proyecto se resumen en la tabla 5.1:

**Ingeniería de Suelos S.A. Caracas, Octubre de 1961**

EMBALSE	
Caudal Medio Regulado	11 m <sup>3</sup> /s
Volúmen Util	344 Hm <sup>3</sup>
Uso	Acueducto y Riego
PRESA	
Tipo de Presa	Escollera con núcleo de Arcilla
Altura de Presa	95 m.
Cota de Coronación	203,6 m.s.n.m
ALIVIADERO	
Creiente de Diseño	TR = 1000 años
Gasto Pico	4.135 m <sup>3</sup> /s
Capacidad Aliviadero	870 m <sup>3</sup> /s

**Tabla 5.1. Características del Proyecto de 1961**

Los primeros estudios hidrológicos de la cuenca del río Palmar, están reflejados en este proyecto sin mayor nivel de detalle. Los primeros sondeos geológicos del sitio de presa están brevemente mencionados en la memoria técnica y los resultados de las perforaciones están recogidos en los planos de proyecto. La presa de materiales sueltos con espaldones de escollera y núcleo de arcilla, posee alineamiento curvo hacia aguas arriba. En la Figura 5.2 se muestra la planta general de este proyecto:



**Figura 5.2.** Planta general del proyecto 1961

En el Anexo I se pueden revisar los ficheros correspondientes a la memoria técnica de este proyecto y planos detallados.

- b) OBRAS DEL EMBALSE EL DILUVIO, RIO PALMAR ESTADO ZULIA. Projecta S.A. Diciembre de 1982.

En 1982 se hizo una revisión general de la geología y la hidrología acompañado de un estudio económico de alternativas que arrojó como resultado cambios en el tipo y dimensiones de la presa. Se reprogramó la construcción de la presa en dos etapas y se modificaron los desagües y el aliviadero. Las características generales del proyecto se resumen en la tabla 5.2:

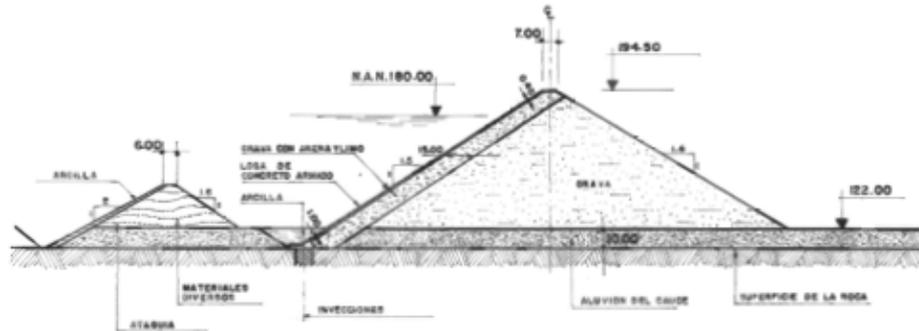
**Projecta S.A. Diciembre de 1982**

EMBALSE	
Caudal Medio Regulado	9,5 m <sup>3</sup> /s
Volúmen Util	180 Hm <sup>3</sup>
Uso	Riego
PRESA 1ra Etapa	
Tipo de Presa	Grava con losa de concreto
Altura de Presa	73 m.
Cota de Coronación	194,5 m.s.n.m
ALIVIADERO	
Creciente de Diseño	TR = 1000 años
Gasto Pico	3.600 m <sup>3</sup> /s
Capacidad Aliviadero	1.550 m <sup>3</sup> /s

**Tabla 5.2.** Características del Proyecto de 1982

Con este proyecto se inició la construcción del desvío del río y las excavaciones de los estribos, la sección de la presa se muestra en la Figura 5.3:

**FIGURA 5.**  
**SECCION TIPO IV**  
**PRESA DE GRAVA CON LOSA DE CONCRETO**  
 ESC. 1:2000



**Figura 5.3.** Sección transversal de la presa seleccionada en 1982

En el Anexo I se puede revisar la memoria técnica de este proyecto sin embargo no se cuenta con los planos de construcción de este proyecto ya que no han sido digitalizados ni reunidos en su totalidad.

#### 5.3.1.3. Proyectos definitivos

Iniciadas algunas de las obras del proyecto anterior, se identificaron debilidades en la geología de los estribos que impedían la cimentación de la losa de concreto en condiciones de seguridad, por este motivo se rediseño una presa de altura similar, esta vez de materiales sueltos, con espaldones de grava y núcleo impermeable de arcilla. Las características de la presa son similares a la anterior, el proyecto se denominó:

OBRAS DEL EMBALSE EL DILUVIO ESTADO ZULIA, PROYECTO DE LA PRESA. Luis Miguel Suárez Villar, 1991.

El alineamiento de la presa se mantuvo invariable con un recrecimiento en el estribo derecho en donde se detectaron mayores deficiencias en la roca de fundación. En la Figura 5.4 se presenta la planta general de la presa.



**Figura 5.4.** Planta general del proyecto definitivo

Este es en definitiva el proyecto según el cual fue construida la presa. La memoria técnica no incluye el proyecto del aliviadero ni las obras de descarga, que posteriormente sufrieron una revisión y su proyecto se modificó con respecto al de 1982. En el Anexo I se pueden revisar los ficheros correspondientes a la memoria técnica de este proyecto y planos detallados.

Posteriormente se realizó el estudio:

REVISIÓN DE LA CAPACIDAD DEL ALIVIADERO DEL EMBALSE EL DILUVIO ESTADO ZULIA. Luis Miguel Suárez Villar y CGR Consultores, 2001.

Revisión ampliada de los estudios hidrológicos incorporando un mayor número de registros, obteniendo una estimación más ajustada a las técnicas modernas la precipitación y la escorrentía de la cuenca del río palmar en el sitio de presa.

Se concluye que el aliviadero proyectado en 1982 no tiene capacidad suficiente para desalojar la creciente extrema y se propone la realización de un nuevo proyecto.

Este estudio será comentado con más detalle en la revisión de la seguridad Hidrológica – hidráulica.

Finalmente y como resultado de las recomendaciones del estudio de 2001 se realiza el proyecto:

PROYECTO DEL ALIVIADERO DEL EMBALSE EL DILUVIO ESTADO ZULIA. Luis Miguel Suárez, 2002.

Proyecto a nivel de ingeniería de detalle del aliviadero diseñado para los caudales estimados en el estudio de 2001.

### 5.3.2. Archivo Técnico de la Construcción:

La construcción de la Presa El Diluvio (Posteriormente Tres Ríos), ha pasado por diferentes etapas difíciles de documentar ya que las obras se han paralizado y reiniciado en diversas ocasiones. La construcción y la inspección técnica de las obras han sido llevadas por diferentes empresas, las sucesivas transiciones

de un equipo de trabajo a otro han dejado algunos vacíos de gestión no documentados siendo difícil recopilar la totalidad de la información.

#### 5.3.2.1 Memoria de Construcción:

En los archivos de la Dirección General de Equipamiento Ambiental del Ministerio de Poder Popular para el Ambiente, reposan todos los documentos administrativos relacionados con la contratación y desarrollo de las obras de la presa el diluvio desde sus inicios. Esta información consta principalmente de reportes de mediciones de cantidades de obra ejecutadas y adolece de informes técnicos sobre los controles de calidad y las modificaciones sufridas por el proyecto. Debido a su gran volumen, esta información no ha sido catalogada ni digitalizada.

En las oficinas ubicadas en el campamento de la presa, donde reside el equipo de inspección de obras, se ha ubicado valiosa información referente a la historia de la obra que actualmente está siendo digitalizada para ser incluida en este archivo. La siguiente fotografía (Figura 5.5) fue tomada durante los inicios de la construcción y se encuentra en los archivos de ésta oficina.



**Figura 5.5.** Fotografía tomada en los inicios de la construcción.

#### 5.3.2.2 Modificaciones al Proyecto Original:

A los efectos de identificación de modificaciones, se tendrá como proyecto original de la presa aquel realizado en 1991 por el Ing. Luis Miguel Suárez Villar, y del aliviadero y obras de desagüe a los proyectos realizados en 2002 por el mismo consultor. Ambos referidos en el aparte 5.3.1.

A continuación se describe con detalle las principales modificaciones a los proyectos originales.

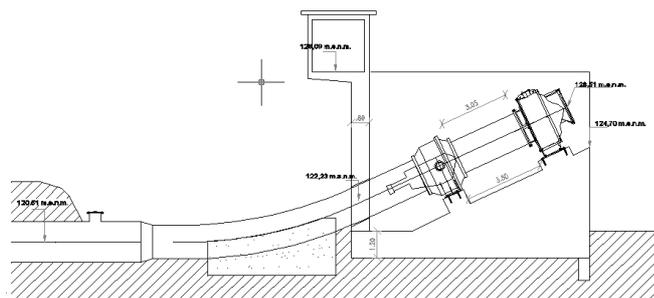
### Aliviadero:

El aliviadero fue construido siguiendo las especificaciones del proyecto original. La única modificación referida fue una leve rotación del eje de la estructura en dirección a su margen derecha. Esta modificación se realizó par evitar que la zona de impacto del chorro del lanzador del aliviadero, estuviese muy cerca de las casetas de válvulas. Esta modificación está referida en el comunicado escrito por el ingeniero proyectista en el año 2006, que se encuentra en el Anexo I.

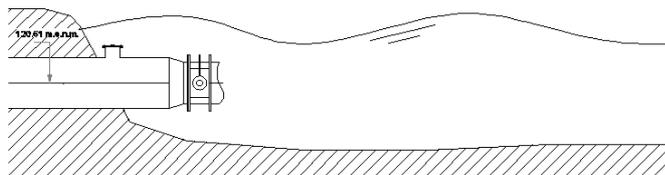
### Descarga de Fondo:

La descarga de fondo, originalmente fue proyectada para ser controlada por un sistema compuesto dos válvulas con accionamientos oleodinámicos, una de tipo esférica y otra de tipo Howell – Bungler, ambas de 1,5 metros de diámetro. La caseta en donde se ubicarán estas válvulas no ha sido construida.

Durante la operación de cierre del túnel de desvío se colocó al final del conducto de la descarga de fondo una válvula tipo Mariposa del mismo diámetro, dicha válvula sólo puede operar totalmente abierta o totalmente cerrada. En las siguientes Figuras 5.6 y 5.7, se puede observar el esquema original según el proyecto y se puede contrastar con la situación actual.



**Figura 5.6.** Descarga de Fondo según Proyecto Original



**Figura 5.7.** Estado actual de la Descarga de Fondo.

Esta modificación al proyecto conlleva un cambio en la capacidad de descarga y la operatividad de este sistema de desagüe, estas condiciones serán tratadas posteriormente en los análisis de seguridad hidráulica. La siguiente fotografía (Figura 5.8) muestra el estado actual de esta descarga.



**Figura 5.8.** Descarga de fondo en condiciones actuales

**Descarga de Emergencia:**

Tal y como estaba ideada en el proyecto de 1991, constaría de un sistema de válvulas idéntico al de la descarga de fondo. Este esquema fue sustituido por una válvula tipo Mariposa de 1,5 metros de diámetro que está ubicada en una bifurcación construida en el portal de salida del túnel de desvío. Adicionalmente se colocó un tramo de tubería del mismo diámetro y 40 metros de longitud con la finalidad de conducir el flujo hasta el estanque disipador. En la siguiente fotografía (Figura 5.9) se observa el estado actual de esta descarga.



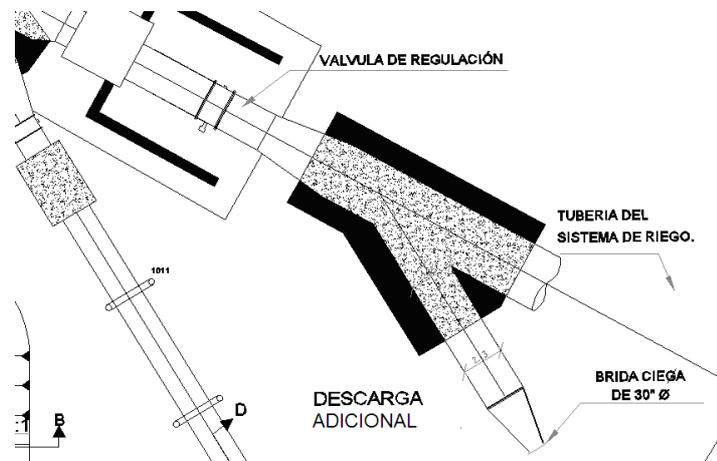
**Figura 5.9.** Estado actual de la descarga de emergencia.

Esta modificación al proyecto conlleva un cambio en la capacidad de descarga total del sistema de desagüe, estas condiciones serán tratadas posteriormente en los análisis de seguridad hidráulica.

Descarga Adicional:

Por considerarse que la capacidad de las dos descargas anteriores no era suficiente para ejercer un control sobre el nivel del embalse en caso de contingencia, y en vista de la posibilidad inminente de que ocurriese un alivio, una vez cerrado el desvío, con el aliviadero superficial incompleto y en obras; se proyectó una tercera descarga denominada Descarga Adicional.

Para ello fue necesario construir otra bifurcación aguas abajo de la válvula de regulación de la toma de riego y acueducto; colocar un segmento de tubería de 2,10 metros de diámetro embebido en un bloque de anclaje seguido de una reducción cónica y una brida de 30" (0,76 metros) de diámetro. La Figura 5.10 ilustra lo anteriormente descrito.



**Figura 5.10.** Descarga adicional

Esta modificación al proyecto conlleva un cambio en la capacidad de descarga. La siguiente fotografía (Figura 5.11) muestra el estado actual de este desagüe.



**Figura 5.11.** Descarga Adicional en operación

#### 5.3.2.3. Controles de Calidad:

La inspección de obras ha contado desde los inicios de la construcción con un laboratorio in situ con capacidad de realizar ensayos simples de las características de los materiales de construcción.

Los registros de estos ensayos reposan en los archivos de la inspección que se encuentran en el campamento de la presa, cuando finalice la construcción de la obra estos documentos pasarán a formar parte del Archivo Técnico de la presa.

#### 5.3.2.4. Información Geológica adicional:

Durante la construcción de la presa, diferentes circunstancias motivaron la realización de exploraciones y evaluaciones geológicas adicionales.

##### *Estribo Izquierdo*

Las obras de estabilización del estribo izquierdo se realizaron motivadas a la ocurrencia de deslizamientos en la ladera que frecuentemente obligaron a la paralización de los trabajos de excavación para la construcción del aliviadero.

Está referido en un comunicado del proyectista (Luis Miguel Suárez, 2006. incluido en el Anexo I), que durante la excavación para el aliviadero en el estribo izquierdo, se realizó una voladura de gran magnitud que desestabilizó el estribo.

En el Anexo I se refiere una serie de informes de actividades de la empresa Ingeotec, que proyectó y asesoró la construcción de las obras de protección de este estribo entre los años 2004 y 2005.

##### *Estribo Derecho*

Como se refirió en la revisión de los proyectos elaborados en 1961 y 1982, el hallazgo de una zona de debilidad en estribo derecho, implicó el cambio de tipo de presa de pantalla de concreto a presa de tierra zonificada.

Adicionalmente en el Anexo I se encuentra una evaluación geológica de este estribo realizada por la consultora Ingeotec en noviembre de 2004.

#### 5.3.2.5. Planos definitivos de Construcción:

Cuando las obras estén finalizadas deberá recopilarse la serie de planos “como construido” en el cual se tenga la versión definitiva de la obra culminada. Por el momento, y para efecto de los siguientes análisis de seguridad, se trabaja con los planos del último proyecto (1991) para la presa y (2002) para el aliviadero. Las mayores modificaciones al proyecto original son las correspondientes a los desagües profundos ya mencionadas.

### 5.3.3. Archivo Técnico de la Explotación:

Estrictamente, la presa no está en explotación, visto que del recurso regulado todavía no se está haciendo el uso previsto, por otra parte las obras de control del embalse no están culminadas en un 100%

A pesar de esto, el embalse fue puesto en carga, y se ha venido realizando algunas de las actividades propias de la explotación normal del embalse

#### 5.3.3.1. Puesta en Carga:

En Noviembre de 2006 se inició la puesta en carga del embalse, esta actividad se realizó sin la capacidad de regulación instalada, con lo cual la evolución de los niveles del embalse estuvo regida por el régimen de escorrentía de la presa y no se apegó a ningún protocolo de llenado.

Es importante añadir que para el momento del cierre del desvío el aliviadero se encontraba en obras construido en un 60% aproximadamente, por esta razón, se mantuvieron todas las válvulas de los desagües abiertas a su máxima capacidad con la intención de mantener los niveles del embalse lo más bajo posible.

Durante el primer llenado del embalse, y antes de la instalación de la tubería de conducción para el sistema de riego y acueducto, fue necesario realizar una apertura de la válvula de regulación en condiciones muy alejadas de su propósito de diseño. Esta apertura se realizó manualmente ya que no se contaba con alimentación eléctrica en la caseta y sometió la válvula a condiciones extremas que produjeron deterioros leves en la estanqueidad de las juntas. En la fotografía (Figura 5.12) se muestra la maniobra de apertura esta válvula.



**Figura 5.12.** Apertura de la válvula de regulación.

En el año 2008 se construyó una descarga adicional para incrementar el caudal evacuado, esta obra permitió reducir en nivel del embalse que se encontraba a 2 metros por debajo del nivel de alivio, otorgando el tiempo necesario para

culminar las obras del aliviadero que funcionó por primera vez en Noviembre del mismo año.

#### 5.3.3.2. Datos históricos de Niveles y Caudales:

El equipo de inspección de las obras toma registra diariamente el nivel del embalse, los registros reposan en las oficinas de la inspección en el campamento de la presa y serán incorporados al Archivo Técnico una vez culminadas las obras.

#### 5.3.3.3. Instrumentación:

Los aparatos de medición instalados en el cuerpo de presa han sido monitoreados con muy poca frecuencia durante la construcción de la presa, los registros están tomados de manera manual y recopilados en los libros de la oficina de inspección.

#### 5.3.3.4. Inspecciones y Vigilancia:

Se tiene documentada una inspección visual realizada por el Ing. Arturo Marcano en Octubre de 2007, la cual está recopilada en el Anexo I. En dicha inspección se revisaron los aspectos observables de las obras en culminación y se dan recomendaciones que luego serán tomadas en cuenta en los análisis de seguridad.

El personal de la Dirección de Proyectos del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, realiza inspecciones periódicas a las obras. Para esta evaluación, se realizó una inspección técnica en diciembre de 2008 la cual será comentada en el siguiente apartado.

#### 5.3.3.5. Pruebas a las instalaciones electromecánicas

No se tiene documentada ninguna prueba a las instalaciones electromecánicas, siendo el caso que la única operación de la válvula de regulación, única en poseer accionamientos oleoelectromecánicos, ha sido accionada de manera manual por no contarse con alimentación eléctrica.

#### 5.3.3.6. Informes de evaluación

El presente trabajo constituye la primera evaluación de seguridad jamás realizada a la presa Tres Ríos.

#### 5.3.3.7. Normas de Explotación

No se ha elaborado Normas de Explotación la Presa Tres Ríos, por el momento la responsabilidad de la explotación recae sobre el equipo de inspección técnica de la presa, el cual es dependiente del titular de la misma.

#### 5.3.3.8. Planes de Emergencia

No se ha elaborado Planes de Emergencia ni manuales de procedimientos para situaciones de contingencia.

#### 5.3.4. Identificación de Carencias de Información

A nivel de proyecto y estudios previos se cuenta con una cantidad apreciable de información que permite realizar los análisis de seguridad desde el punto de vista teórico basándose exclusivamente en los datos de proyecto. Debe sin embargo realizarse una revisión más exhaustiva de los archivos de la Dirección de Equipamiento Ambiental para recuperar estudios previos adicionales del sitio de presa, del aprovechamiento de la cuenca y cualquier otro documento relacionado con el proyecto.

La mayor necesidad de información corresponde a la etapa de construcción, es imprescindible definir los alcances de cada uno de los contratos de construcción, tener un registro preciso del control de calidad de los materiales colocados en cada una de las zonas de la presa. Para solventar estas carencias el Ministerio del Ambiente tiene previsto contratar una auditoría técnica de la construcción, cuyo producto final ha de esclarecer los vacíos de información descritos.

Se carece de los registros de la instrumentación a lo largo de las diferentes etapas de la construcción y durante los primeros llenados de la presa. Igualmente no se cuenta con registros de niveles diarios del embalse desde su puesta en carga y no se ha recogido información hidrometeorológica adicional

#### 5.3.5 Identificación de las necesidades de inspección y análisis

Se recomienda realizar una nueva campaña de sondeos y análisis de la estabilidad del estribo izquierdo de la presa, luego de finalizadas las obras del aliviadero, en vista que el proceso constructivo fue interrumpido numerosas veces por deslizamientos de la roca fracturada de los estratos más superficiales. De ser necesario se debe proceder al diseño de soluciones estructurales que garanticen la estabilidad de dicha ladera cuyo eventual deslizamiento comprometería el funcionamiento del aliviadero.

El seguimiento de la instrumentación instalada se debe efectuar con regularidad y documentar para posteriores análisis.

Se recomienda efectuar sondeos a pie de presa e instalar la instrumentación necesaria para aforar eventuales filtraciones,

## 5.4. Inspección Técnica

Como parte de la evaluación de la seguridad de la Presa Tres Ríos, se realizó una inspección técnica a las obras el día 9 de Diciembre de 2008, en la que participaron los ingenieros Luis Arconada y Verónica Valera, del Ministerio del Ambiente y el Ing. Benedicto Rivera, responsable de la inspección de obras. A continuación se resumen los aspectos más importantes de esta inspección.

### 5.4.1. Accesos

La presa está ubicada a 30 Km. de la población de Villa del Rosario, se accede mediante una carretera de tierra en condiciones precarias. Una vez en el sitio de presa existen dos caminos vehiculares en ambos márgenes del río palmar, comunicados por un puente compuesto por una serie de alcantarillas. Tanto la carretera como el puente pueden verse interrumpidos en caso de un alivio de gran magnitud. En el caso particular del puente, de ser rebasado el estribo derecho de la presa quedaría incomunicado.

La carretera de la margen derecha conduce a la explanada al pie de la presa, margen derecha del estanque dissipador del aliviadero y a la coronación de la presa y margen derecha del aliviadero. En el proyecto está prevista la construcción de un puente sobre el vertedero cuyos trabajos sin embargo no se han iniciado. En la siguiente fotografía (Figura 5.13) se observa una vista aérea de la presa y sus accesos.



**Figura 5.13.** Vista aérea de la Presa y sus accesos

La carretera de la margen izquierda conduce al portal de salida del túnel de desvío donde se ubican las válvulas de regulación del sistema de desagüe.

### 5.4.2. Entorno Geológico:

La observación superficial del sitio de presa pudo arrojar información relevante sobre el estado del estribo izquierdo. Se pueden evidenciar indicios de deslizamientos y fracturas en el macizo rocoso. La siguiente fotografía (Figura 5.12) ilustra lo anterior.



**Figura 5.14.** Aspecto del estribo izquierdo.

No se puede acceder a esta terraza porque no está construido el puente sobre el aliviadero, se pueden notar los restos de los muros de contención fracturados parcialmente.

Hacia aguas abajo, la ladera izquierda del rápido del aliviadero muestra igualmente signos de fracturación de la roca que sugieren la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos. Obsérvese la Figura 5.15.



**Figura 5.15.** Estribo izquierdo sobre el rápido del aliviadero

#### 5.4.3. Paramentos

El paramento de aguas abajo tiene un buen aspecto general, no se observan deslizamientos, el enrocado de protección posee una pendiente uniforme. Se observó sin embargo la presencia de vegetación de gran tamaño. Varios árboles se ubican a la altura de la berma y el contacto con el estribo derecho. En la siguiente fotografía (Figura 5.16) se observa lo expuesto.



**Figura 5.16.** Aspecto del espaldón de aguas abajo

En el pie de la presa no se observan indicios de humedad que puedan sugerir filtraciones en los cimientos o falla de la pantalla de impermeabilización. Sin embargo no existe ningún dispositivo de medición de caudales filtrados si los hubiere.

El paramento de aguas arriba, al menos la parte visible del mismo se encuentra en buenas condiciones, no se observa ningún indicio de asentamiento o deslizamiento del espaldón. En la siguiente fotografía (Figura 5.17) se muestra la vista del mismo, se aprecia alguna diferencia en el color del material colocado en la zona del fondo (estribo derecho).



**Figura 5.17.** Aspecto del espaldón de aguas arriba.

#### 5.4.4. Coronación

Sobre la coronación no se ha construido la carretera definitiva. No se ha instalado ningún dispositivo que permita la medición de los asentamientos, con lo cual, la observación superficial no arroja información relevante sobre este aspecto.

#### 5.4.5. Instrumentación:

La escasa instrumentación de la presa no pudo ser observada durante la inspección, la caseta de los cables de los piezómetros instalados en el núcleo no ha sido construida, para resguardar los cables de los piezómetros se han formado montículos de arena en la coronación, que son removidos toda vez que se desea tomar una lectura. En las Figuras 5.18 y 5.19, se observa uno de los montículos y el equipo de medición.



**Figura 5.18.** Protección de los cables de piezómetros



**Figura 5.19.** Aparato de medición para piezómetros

Los monumentos de nivelación tampoco han sido colocados para control de asentamientos. El registro de niveles del embalse se realiza manualmente colocando miras topográficas sobre varias referencias en el paramento aguas arriba.

#### 5.4.6. Desagües

Todos los desagües de la presa están abiertos a su máxima capacidad para contribuir al mantenimiento del embalse en los niveles más bajos posibles mientras se culminan las obras. En la fotografía (Figura 5.20) se observan los desagües en funcionamiento:



**Figura 5.20.** Descarga de Emergencia y Adicional.

La caseta de la descarga de fondo no se ha comenzado a construir. Se espera de llegada de la estación seca que permita cerrar la descarga y trabajar en la fundación de la casa de válvulas.

El acceso a la descarga de emergencia y descarga de fondo, no es practicable a pie mientras esté en operación la descarga adicional. La única vía de paso está interrumpida por el chorro de ésta.

#### 5.4.7. Aliviadero

Se pudo observar el aliviadero en funcionamiento, esto permitió constatar las características del flujo, sin embargo no fue posible la observación del estado del concreto en el rápido para determinar eventuales daños por cavitación.

Un aspecto importante inspeccionado fue el contacto de los muros del aliviadero con los estribos rocosos, se pudo constatar la construcción de los anclajes previstos en el proyecto y la ausencia del material de relleno que debe colocarse en el espacio vacío entre la ladera y el muro, se considera que esta actividad es de inmediata atención. En la siguiente fotografía (Figura 5.21) se observa lo descrito.



**Figura 5.21.** Contacto sin rellenar entre los muros y las laderas.

Esta situación se repite en los dos estribos del aliviadero, con el agravante que el estribo izquierdo está completamente incomunicado como se observa en la siguiente fotografía (Figura 5.22).



**Figura 5.22.** Vista frontal del aliviadero

#### 5.4.8. Instalaciones Electromecánicas:

La válvula mariposa instalada en la descarga de fondo, se encuentra totalmente abierta y está actualmente sumergida por el elevado caudal descargado que genera niveles más altos en el estanque disipador. Esta válvula sólo se puede operar de forma manual, con un considerable nivel de riesgo para el operador ya que sería necesario accionar un volante que está sumergido.

Una válvula idéntica está instalada en la descarga de emergencia, a ésta se puede acceder normalmente para efectuar maniobras, sin embargo hay una restricción de apertura impuesta por la vibración de la tubería de descarga provisional. En la siguiente fotografía (Figura 5.23) se observa el volante de operación manual de ésta válvula. En la actualidad esta válvula está abierta a un 70% de su capacidad.



**Figura 5.23.** Descarga de emergencia

La única válvula con accionamiento hidráulico es la de regulación de la alimentación del sistema de riego y acueducto, esta válvula debe cerrarse para poder remover la brida en el caso que se necesite utilizar la descarga adicional. La unidad oleodinámica está instalada en una caseta desprovista de alimentación eléctrica, razón por la cual la válvula está siendo accionada manualmente. La Figura 5.24 se muestra la instalación de la unidad de accionamiento.



**Figura 5.24.** Unidad de accionamiento de la válvula de regulación

Se observaron fugas en la válvula de regulación que son de magnitud reducida sin embargo deben ser reparadas a la brevedad posible (ver figura 5.25).



**Figura 5.25.** Fuga en la válvula de regulación

#### 5.4.9. Tomas

La única torre de toma de agua que alimenta el túnel de desvío y el múltiple de descarga, se encuentra sumergida totalmente, razón por la cual su inspección no es posible en la estación lluviosa.

#### 5.4.10. Zona inundable

Todas las descargas profundas de la presa vierten hacia el mismo estanque disipador ubicado aguas abajo del trampolín del aliviadero. No se ha registrado hasta la fecha un desborde de este estanque que hubiera generado alguna afección sobre la accesibilidad a la presa o los sistemas de desagüe.

No se ha realizado ningún estudio para determinar qué caudales desaguados pueden generar desbordes del estanque disipador y consecuentes afecciones a la operatividad de los sistemas de desagüe.

## 5.5. Evaluación de la seguridad Hidrológica-Hidráulica

A continuación se analiza de manera conjunta los aspectos hidrológicos e hidráulicos del sistema Presa - Embalse. Para ello se procederá en primera instancia a definir las características de la cuenca, la precipitación y la escorrentía generada, asociada a una probabilidad de ocurrencia; y seguidamente, se analizará el tránsito de las crecientes a través del aliviadero y el comportamiento hidráulico de los distintos desagües.

### 5.5.1. Seguridad Hidrológica

En este apartado se estudiará las características de la cuenca receptora y el régimen de lluvia-escorrentía al que estará sometido el embalse, basándose en los registros históricos disponibles de estaciones meteorológicas y de aforo en la propia cuenca y a nivel regional.

#### 5.5.1.1. Estudio de Crecientes

El estudio hidrológico según el cual fueron diseñados los desagües y el aliviadero de la Presa Tres Ríos, fue el resultado de la actualización del estudio realizado para el proyecto de 1991. Dicha actualización se llevo a cabo en el año 2001 por los consultores Luis Miguel Suárez Villar y CGR Ingeniería, está incluido en el Proyecto "Revisión de la capacidad del aliviadero del embalse El Diluvio, Río Palmar Estado Zulia (2001)".

No contándose con suficiente información hidrométrica adicional de los últimos años, como para justificar la realización de una nueva actualización del estudio hidrológico, y considerando que la metodología empleada para la estimación de los hidrogramas de las crecientes de diseño se ajusta a las exigencias de este protocolo, se aceptan los resultados de este estudio para la evaluación de la seguridad.

A continuación se resumen los aspectos más relevantes del estudio hidrológico:

#### Información recopilada

##### a) Topografía:

Se trabajó sobre cartas 1:250.000, 1:100.000 y 1:25.000, estas últimas con curvas de nivel cada 20 metros, para delimitar la porción de la cuenca hidrográfica que aporta hasta el sitio de presa. El área calculada de la cuenca hidrográfica es de 890Km<sup>2</sup>, con cobertura vegetal de bosque tropical húmedo y poca intervención humana.

##### b) Precipitación:

Se recopilaron datos de láminas máximas para lluvias de diferente duración de cuatro estaciones pluviométricas (Las Lajas, El Diluvio, Las Delicias y La Cabaña) ubicadas en la zona de estudio. Los registros utilizados para el análisis van desde el año 1968 hasta 1989. Esto

representó el doble de los registros con respecto al estudio hidrológico del año 1990.

c) Escorrentía

Se utilizó la información de gastos máximos instantáneos de una estación hidrométrica ubicada inmediatamente aguas abajo del sitio de presa, registrada durante el período 1968 – 1989.

Procesamiento de la Información

Con la información recolectada se llevó a cabo una reevaluación de las curvas de gasto ajustadas según el método del U.S Geological Survey, según el cual la relación Altura – Gasto se expresa de la siguiente forma

$$Q = \alpha(H - \gamma)^\beta$$

Donde, Q representa el Caudal, H el nivel de agua y  $\alpha, \gamma$  y  $\beta$ , parámetros de ajuste.

Una vez definidas las curvas de gastos se procedió a seleccionar las crecidas máximas de cada año reprocesando la información por interpolación lineal para estimar los datos a nivel horario.

Distribución probabilística de Crecidas Extremas

El ajuste de distribuciones de probabilidades de caudales máximos anuales se efectuó ajustando tres distribuciones de probabilidades de eventos extremos: Gumbel, Log-Gumbel y Log-Pearson, Kite(1977). Posteriormente se comprobó que el mejor ajuste fue el de la distribución Gumbel. A continuación se muestran dichas distribuciones en la Figura 5.26:

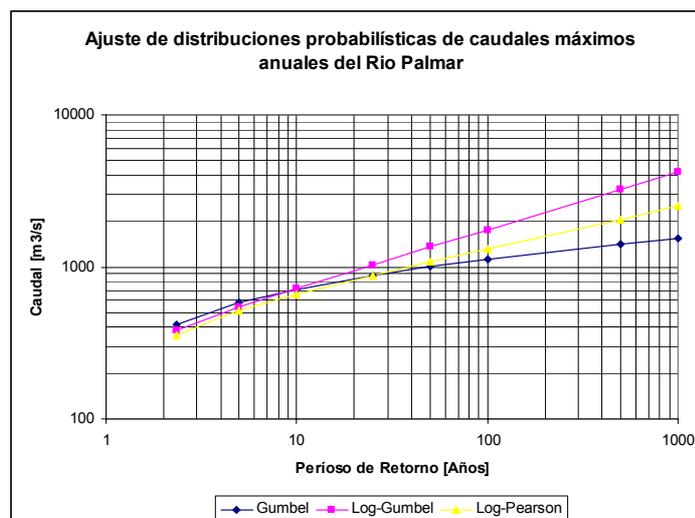


Figura 5.26. Ajuste de Distribuciones Probabilísticas

### Análisis de Hidrogramas de Crecidas Complejas

El estudio de crecientes complejas realizado por CGR Ingeniería, incluye una metodología de cálculo que está basada en Voskresensky (1967), que consiste en derivar el hidrograma típico promediando los hidrogramas complejos obtenidos en crecidas históricas. Dichos hidrogramas son posteriormente adimensionalizados, y promediados obteniéndose un hidrograma típico. Haciendo un análisis de extremos de volúmenes máximos anuales para una determinada duración, con el hidrograma adimensional antes derivado se puede obtener el hidrograma típico de la crecida asociada a ese volumen. De esta manera se garantiza que el volumen total del hidrograma esté asociado a un período de retorno, pero no se garantiza que el resto de las características del hidrograma lo estén.

Para solventar este problema, Cekota, Córdova y Rodríguez – Iturbe (1988), desarrollaron un método que garantiza que el hidrograma derivado tenga el gasto pico, gasto base, duración, volumen total y volúmenes parciales calculados para diferentes intervalos de tiempo asociados al mismo período de retorno.

De manera resumida el método consistió en:

a) Análisis de Extremos para Diferentes niveles de Agregación.

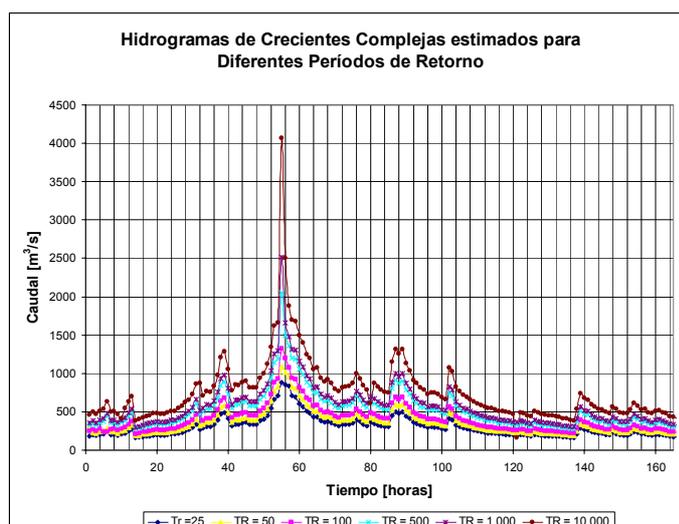
Fue seleccionado un intervalo de tiempo  $\Delta t$  de una hora para construir series anuales de volúmenes acumulados. Posteriormente se ajustó una distribución probabilística de extremos, siendo la distribución Gumbel la que dio el mejor ajuste. Esto permite definir una variable  $Z(n, Tr)$  la cual representa el volumen agregado en  $n$  intervalos de tiempo  $\Delta t$  asociada a un período de retorno  $Tr$ .

b) Estimación del tiempo y Gasto Base del Hidrograma.

Para esta estimación se construyó una nueva serie de diferencias entre los volúmenes acumulados en los diferentes intervalos de tiempo  $D(n, Tr)$ . Finalmente se grafican los resultados y se identifica el valor de  $n$  para el cual se produce una estabilización de las diferencias. Este valor de  $n^*$ , representa la duración total del hidrograma complejo para el período de retorno  $Tr$ .

c) Construcción de los Hidrogramas de Crecidas.

Los parámetros que faltan para determinar el hidrograma complejo se obtuvieron observando las crecidas históricas del río. El caudal base se determina cuando  $n$  es igual a  $n^*$ . Finalmente la construcción del hidrograma se realizó ubicando el pico de los mismos a un tercio del tiempo base, como es usual en cuencas de estas dimensiones. A continuación en la Figura 5.27 se muestran los hidrogramas estimados para las crecientes complejas de períodos de retorno de desde 25 hasta 10.000 años.



**Figura 5.27.** Hidrogramas de Crecientes Complejas

En el Anexo 2, “Hidrogramas de Diseño” se incluyen la tabla con los gastos horarios de los hidrogramas de las crecientes complejas.

### Análisis de Hidrogramas de Crecidas Aisladas incluyendo CMP

Los hidrogramas de crecidas aisladas fueron evaluados utilizando un modelo de lluvia – Escorrentía de eventos del tipo Onda Cinemática, calibrado en la cuenca del río palmar utilizando los datos de la estación hidrométrica El Diluvio. Las características de las subcuencas tributarias en términos de áreas, pendientes y rugosidades fueron calibradas en intervalos de 15 minutos. El procedimiento contempló los siguientes aspectos:

a) Análisis de Profundidad – Duración – Frecuencia:

Utilizando la información de láminas máximas para diferentes duraciones se ajustó una distribución probabilística de Tipo I Gumbel. De este modo se construyeron las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia para cada una de las estaciones pluviométricas.

b) Estimación de los hietogramas

Los hietogramas fueron estimados mediante la aplicación del método de los bloques alternos (Chow et al, 1988), tomando las láminas de lluvia máxima correspondientes a los diferentes periodos de retorno en cada estación.

c) Definición de la variación temporal de las tormentas de diseño

Se adoptó a la estación El Diluvio, como la más representativa de la cuenca, sin embargo fue necesario estimar coeficientes de corrección basándose en los registros de estaciones de cuencas vecinas para compensar el hecho que la estación El Diluvio está en la parte baja de la cuenca. Estos factores fueron estimados y van desde 1.03 hasta 1.13 para 24 horas.

d) Variación espacial de la precipitación

Tomando la información correspondiente a 21 tormentas registradas en la zona (datos del Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales Renovables "MARNR", 1984), se determinó que es necesario aplicar un coeficiente de reducción por área de 60 a 65%.

e) Precipitación Máxima Probable

El hietograma de la precipitación máxima probable (PMP) se obtuvo utilizando la metodología de Hershfield (1971) calculando los valores de K observados para diferentes duraciones de lluvia para todas las estaciones. Posteriormente se realizó el promedio y la desviación estándar de los valores extremos anuales afectados por coeficientes de reducción obteniendo la lámina asociada a cada duración de lluvia y finalmente estimando los hietogramas de PMP para cada estación.

Modelo de Crecidas

El método de empleado para la determinación de los hidrogramas fue el de la Onda cinemática que consiste en: construir hietogramas de diseño asociados a los períodos de retorno seleccionados con las curvas de Profundidad – Duración – Frecuencia da cada estación; determinar la lluvia efectiva que produce escurrimiento superficial con el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (U.S. Bureau of Reclamation, 1978); por último se realiza el tránsito a través de la red de cauces y se determinaron los hidrogramas de salida de casa segmento.

La calibración de este modelo se efectuó utilizando la información de gastos máximos instantáneos en la estación El Diluvio para el período 1958 – 1989. De esta manera se obtuvieron los hidrogramas de las crecientes para distintos períodos de retorno como se muestra en la Figura 5.28:

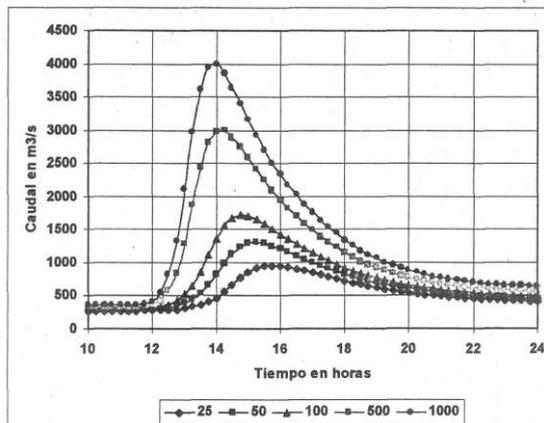
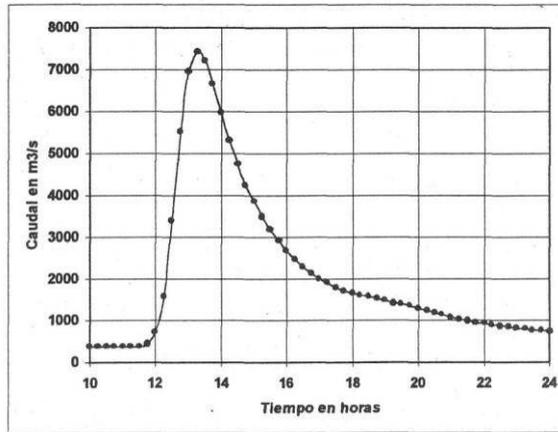


Figura 5.28. Hidrogramas de crecientes aisladas para distintos Períodos de Retorno

El hidrograma producido por la precipitación máxima probable se determinó utilizando el mismo modelo de lluvia escorrentía generándose el siguiente el hidrograma que se muestra en la Figura 5.29:

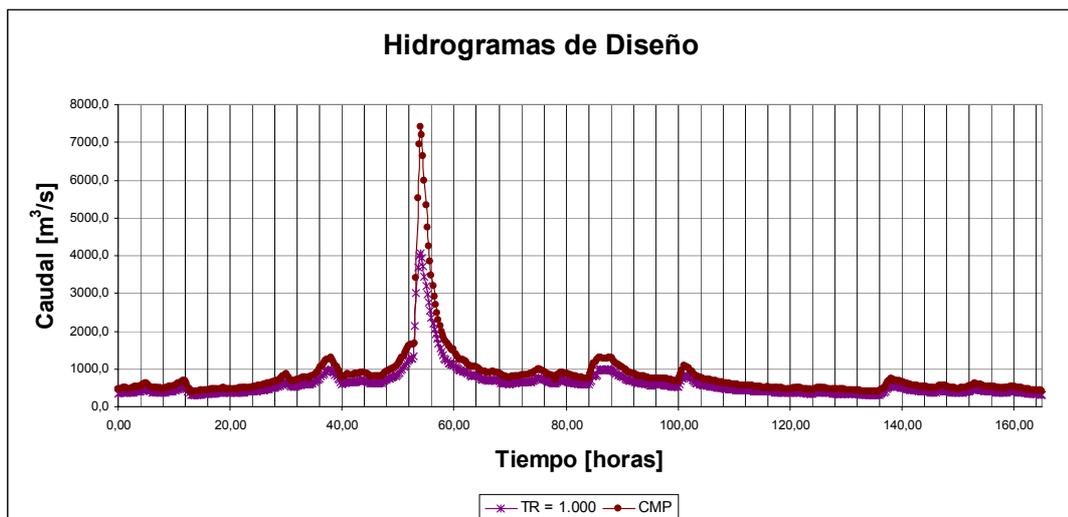


**Figura 5.29.** Hidrograma de la Creciente Máxima Probable

### Hidrogramas de Diseño

Finalmente, los hidrogramas de diseño fueron construidos utilizando los resultados de los dos análisis realizados (Caudales horarios y tormentas extremas) que tienen diferente agregación temporal (una hora y quince minutos).

Utilizando ambas fuentes de información se estructuraron los hidrogramas de diseño superponiendo las series generadas en los análisis de crecientes complejas y aisladas, haciendo coincidir los caudales picos de los hidrogramas y seleccionando siempre el registro mayor de ambas series. En la Figura 5.30 se muestran los hidrogramas de diseño obtenidos por este método.



**Figura 5.30.** Hidrogramas de diseño

En el Anexo 2, “Hidrogramas de Diseño” se incluyen la tabla con los gastos horarios de los hidrogramas de las crecientes de diseño.

### 5.5.1.2. Crecientes a considerar

En función de la clasificación de la presa, descrita en el apartado 5.2, se definen dos crecientes afluentes al embalse a considerar en este análisis de la seguridad. Estas son:

- a) Creciente de diseño: Para efectos de esta evaluación, se tomará como creciente de diseño a la correspondiente a 1000 años de período de retorno, indicada en el apartado 5.1.1 en la sección “Hidrogramas de Diseño”, siendo esta la máxima creciente que debe tenerse en cuenta para el análisis de comportamiento del aliviadero, los órganos de desagüe y las estructuras de disipación de energía, de forma que funcionen correctamente.
- b) Creciente extrema: Para efectos de este análisis se tomará como creciente extrema a la Creciente Máxima Probable (CMP), indicada en el apartado 5.5.1 en la sección “Hidrogramas de Diseño”; siendo esta la mayor creciente que la presa puede soportar en un escenario límite al cual puede estar sometida la presa sin que se produzca su rotura.

Se eligió como creciente extrema la CMP, por tratarse de una presa Tipo A, de materiales sueltos, en la cual no se puede tolerar ningún sobrevuerto (tabla 5.3).

Creciente de Proyecto	Creciente Extrema
TR = 1000 años	CMP

**Tabla 5.3.** Selección de las crecientes para la Presa Tres Ríos

### 5.5.2. Seguridad Hidráulica

En este apartado se evaluará la capacidad hidráulica, comportamiento y operación de los aliviaderos superficiales y desagües profundos.

#### 5.5.2.1. Estrategia de Laminación

A efectos de los posteriores análisis de tránsito de crecientes a efectuarse en este estudio, es necesario definir una estrategia de laminación como hipótesis de cálculo coherente con las condiciones de la presa y su eventual operación.

En este sentido, tratándose de una presa con un único aliviadero superficial de labio fijo, sin ningún tipo de control por compuertas, la descarga vendrá condicionada exclusivamente por la geometría del cimacio y la embocadura del aliviadero.

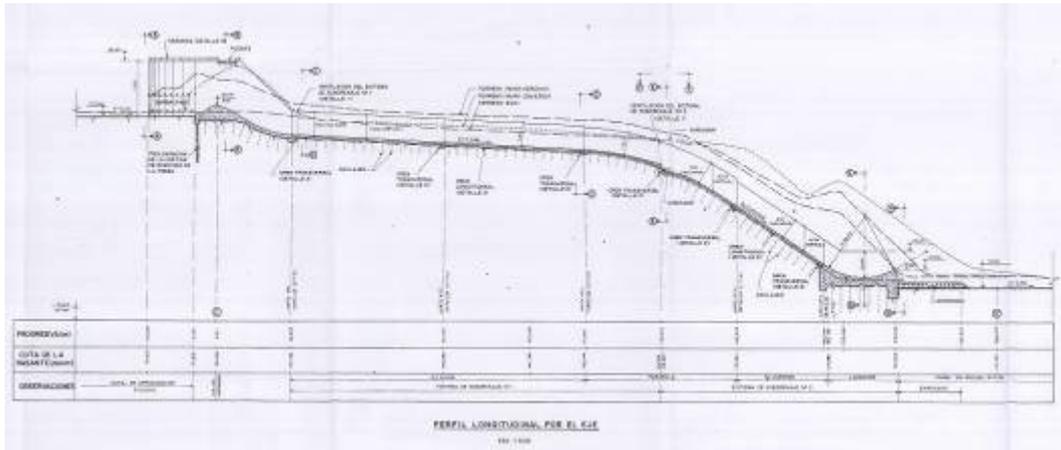
El tránsito de las crecientes se efectuará sin tomar en cuenta el caudal descargado por los desagües profundos, esto se debe a su reducida capacidad y poca fiabilidad de operación.

### 5.5.2.2. Curvas de gasto del Aliviadero y Desagües Profundos

#### Aliviadero

La Presa Tres Ríos cuenta con un aliviadero de superficie libre, de labio fijo perfil tipo Creager y alineamiento recto con un solo vano de 20 metros de amplitud, cuya cota de rebose está ubicada a 180 m.s.n.m.

La descripción detallada del aliviadero puede hacerse separadamente en las componentes: Embocadura, Canal de baja pendiente, Aireación, Canal rápido y Lanzador. El perfil longitudinal de la estructura se aprecia en la Figura 5.31.



**Figura 5.31.** Perfil longitudinal del Aliviadero (Proyecto 1991)

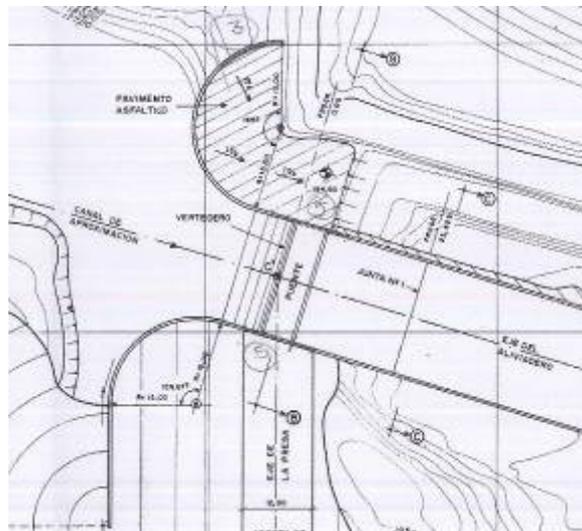
En este apartado se busca reproducir una relación unívoca entre la cota del embalse y el caudal desaguado por el vertedero, para ello el estudio se enfocará únicamente en la sección de control hidráulico que se ubica sobre la cresta del vertedero. Se tomará en cuenta las condiciones de la aproximación, la embocadura y la geometría del perfil del vertedero.

#### a) Condiciones de Aproximación y embocadura:

La embocadura del aliviadero, vista en planta consta de dos arcos de circunferencia de 15 metros de radio que conducen suavemente las líneas de corriente hacia la cresta del vertedero, en vista de lo cual se descarta cualquier efecto de contracción de la lámina descargada. La vista en planta se puede observar en las Figuras 5.32 y 5.33:



**Figura 5.32.** Aproximación del flujo a la embocadura



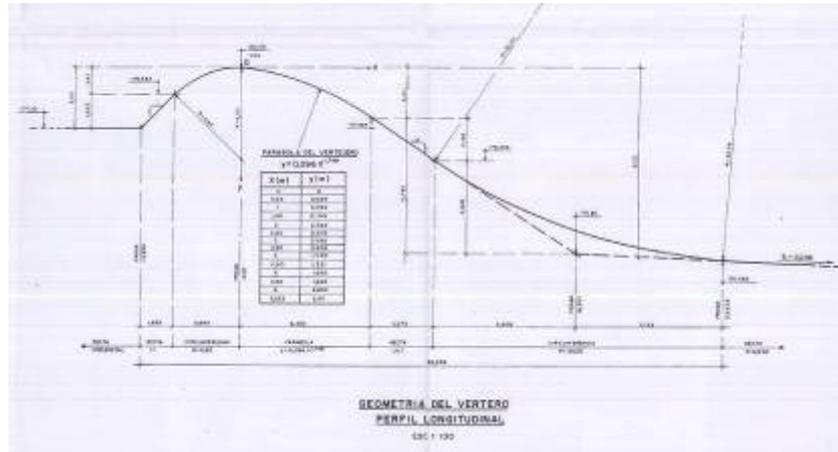
**Figura 5.33.** Vista en planta de la Embocadura del Aliviadero (Proyecto 1991)

El aliviadero está construido sobre el estribo izquierdo de la presa, no posee un canal de aproximación propiamente dicho sino una explanada excavada a la cota 177 m.s.n.m (3 metros por debajo de la cresta del vertedero), se considera que las velocidades de acercamiento del flujo al aliviadero sobre esta explanada son lo suficientemente pequeñas como para despreciar las pérdidas de energía por fricción.

b) Perfil del Vertedero:

La geometría del vertedero es una combinación de segmentos rectos, arcos de circunferencia y arco parabólico característico del perfil Creager. Desde aguas arriba hacia aguas abajo, como se muestra en la Figura, se observa: un plano inclinado con pendiente de 1:1; un sector cilíndrico de radio 4,60 metros, tangente al plano anterior y a la horizontal de la cresta del vertedero; una superficie parabólica tangente al plano horizontal que pasa por la cresta del vertedero y a otro plano inclinado ubicado agua abajo con una pendiente de 1,5:1 y finalmente un último sector cilíndrico

de 30 metros de radio con la curvatura invertida, tangente al plano anterior y al canal de baja pendiente (Figura 5.34).



**Figura 5.34.** Geometría del perfil del veredero

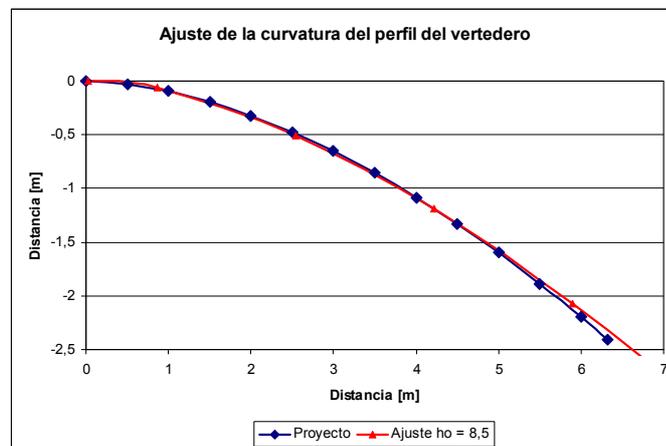
Finalmente, el cálculo de la curva de descarga se efectuó utilizando la expresión:

$$Q = \lambda K L (h)^{1,5}$$

Donde:

- h = Carga sobre el vertedero en metros
- K = Coeficiente de descarga para la carga nominal
- $\lambda$  = Corrección del coeficiente de descarga en función de la carga
- L = Longitud de la cresta del vertedero en metros

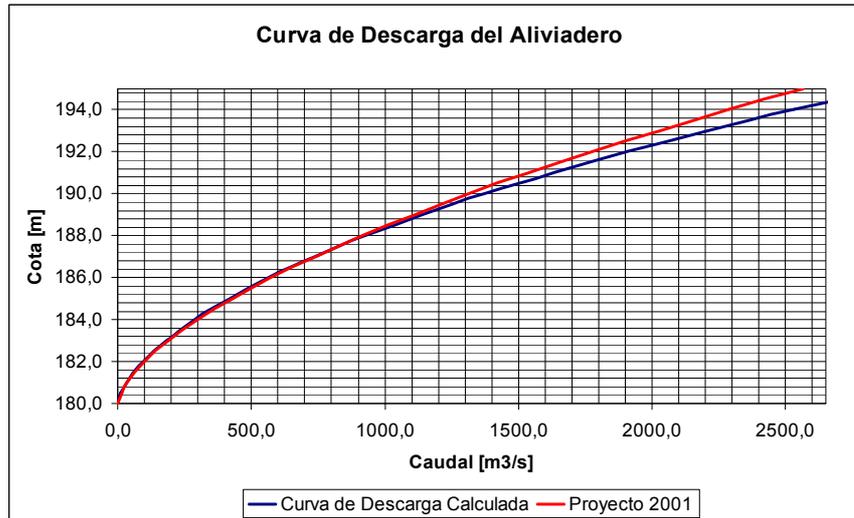
La curvatura del aliviadero fue diseñada en función de una carga nominal  $h_0$  de 9,9 metros, sin embargo se llevó a cabo un ajuste del perfil Creager al perfil del proyecto para determinar gráficamente este parámetro encontrándose que el mejor ajuste se da para una altura de diseño  $h_0$  de 8,4 metros tal y como se observa en la Figura 5.35.



**Figura 5.35.** Determinación de la carga de diseño del vertedero

El coeficiente K se tomará igual a 2,09, y se le aplicará un factor de corrección  $\lambda$  que se tomará igual a uno para  $h/h_0 = 1$ ; para otros valores de  $h/h_0$ , se aplicará una corrección lineal tomando en cuenta que para  $h/h_0 = 1,4$ ,  $\lambda = 1,237$  (CNEGP, Guía N°5 [16]).

De este modo, aplicando las correcciones anteriormente descritas se construyó la curva de descarga del vertedero, la cual es presentada en la Figura 5.36 comparada con la curva presentada en el proyecto de 2001.



**Figura 5.36.** Curva de descarga del vertedero.

De la comparación entre la curva de descarga estimada y la que se presenta en el proyecto del aliviadero, se puede notar que para cargas superiores a los 9 metros, la curva de proyecto está subestimada con respecto a la determinada analíticamente, esto se debe a que fue determinada con una  $h_0$  de diseño superior a la que se ha determinado gráficamente en esta evaluación. Como consecuencia, el diseño es más conservador en términos de capacidad de descarga del aliviadero. Como punto de comparación se muestra en la tabla 5.4 la relación entre los caudales descargados a nivel de aguas máximas (cota 194,50), que arroja una diferencia del 13%.

Caudal Descargado a Nivel de Aguas Máximas (194,50)		
Curva de Descarga Proyecto	2426,2	m <sup>3</sup> /s
Curva de Descarga Calculada	2702,3	m <sup>3</sup> /s

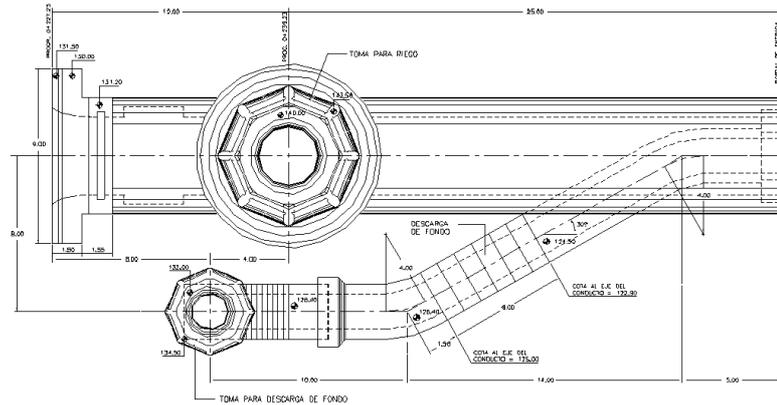
**Tabla 5.4.** Comparación de caudales descargados a N.A.M

### Desaques Profundos

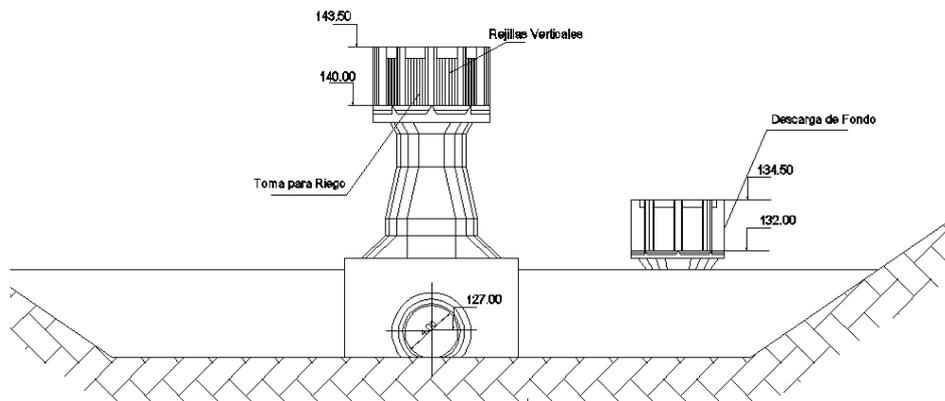
En el macizo del estribo izquierdo de la presa Tres Ríos existen dos conductos independientes. Uno de ellos es un túnel de sección circular de 4 metros de diámetro que sirvió como desvío del río durante la construcción de la presa y que actualmente alimenta a las tomas de riego y acueducto, así como las descargas de emergencia. El otro es un túnel de sección circular de 1,80 metros

de diámetros y alineamiento paralelo al anterior con embocadura independiente, el cual alimenta a la descarga de fondo.

En las Figuras 5.37 y 5.38, se muestran la vista en planta de la embocadura de la torre de toma y la descarga de fondo cuyos umbrales están ubicados en las cotas 142 y 132 respectivamente, durante la operación de cierre de del desvío la torre toma fue incorporada al túnel mediante la construcción de un codo de 90°. Ambas embocaduras son abocinadas en forma de “morning glory” y están dotadas de rejillas de retención de sólidos.

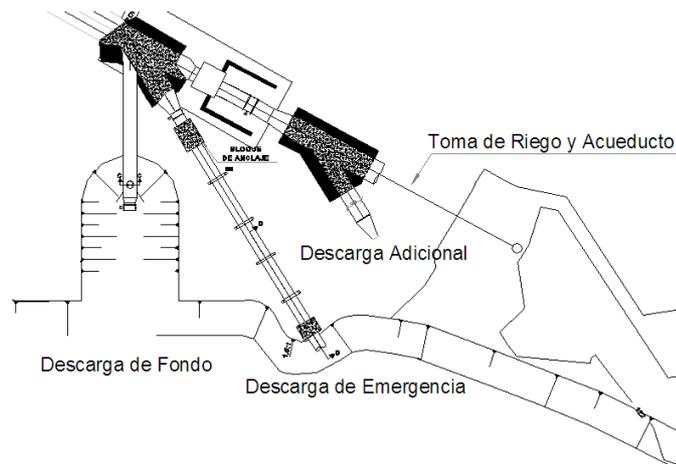


**Figura 5.37.** Embocaduras de la torre de toma y descarga de fondo



**Figura 5.38.** Vista de la torre toma desde aguas arriba

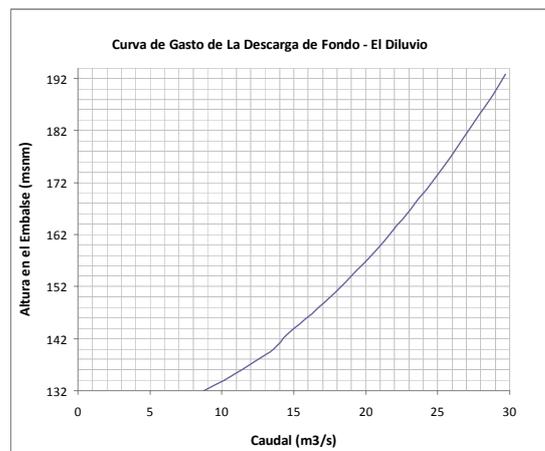
Los túneles conducen el flujo hasta un umbral de salida en donde se ubican las casas de válvulas para el control de las distintas descargas. A efectos de esta revisión se identifican tres dispositivos desagüe (Figura 5.39): Descarga de Fondo, Descarga de Emergencia, Descarga Adicional y Toma para Riego y Acueducto. Ver Figura



**Figura 5.39.** Ubicación e identificación de los sistemas de desagüe

a) Descarga de Fondo

Una vez descrita la configuración del sistema, se procede a determinar la curva de gasto de la descarga de fondo en función del nivel del embalse. Este análisis fue efectuado en la Dirección de Estudios y Proyectos del Ministerio del Poder Popular del Ambiente por la Ing. Genis Vivancos. Se verificó y se ratificó que la metodología de cálculo fue adecuada, se tomó en cuenta las pérdidas de energía localizadas y por fricción en todo el trayecto de la conducción y los resultados se muestran en la Figura 5.40 que sigue:

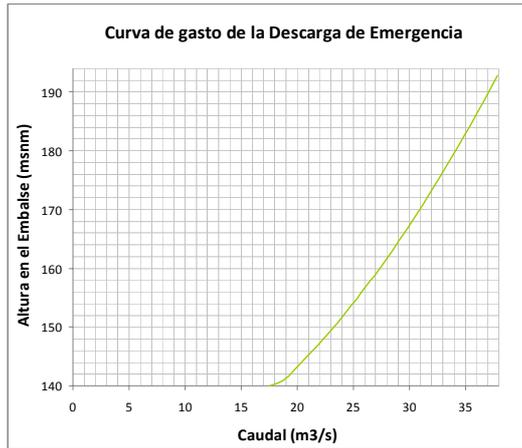


**Figura 5.40.** Curva de gasto de la descarga de fondo

b) Descarga de Emergencia

La descarga de emergencia, se ubica aguas abajo del portal de salida del túnel de desvío, donde fue construida una bifurcación de manera que el mismo túnel alimenta esta descarga y las tomas de riego y acueducto.

La curva de gasto resultante de la apertura de esta válvula fue determinada en la Dirección de Estudios y Proyectos del Ministerio del Ambiente, tomando en cuenta las pérdidas de energía localizadas y por fricción. Se puede observar en la Figura 5.41.



**Figura 5.41.** Curva de gasto de la Descarga de Emergencia

c) Descarga Adicional

La curva de gasto de esta descarga adicional fue determinada en la Dirección de Estudios y Proyectos del Ministerio del Ambiente, tomando en cuenta las pérdidas de energía localizadas y por fricción, obteniéndose la curva que se muestra en la Figura 5.42.

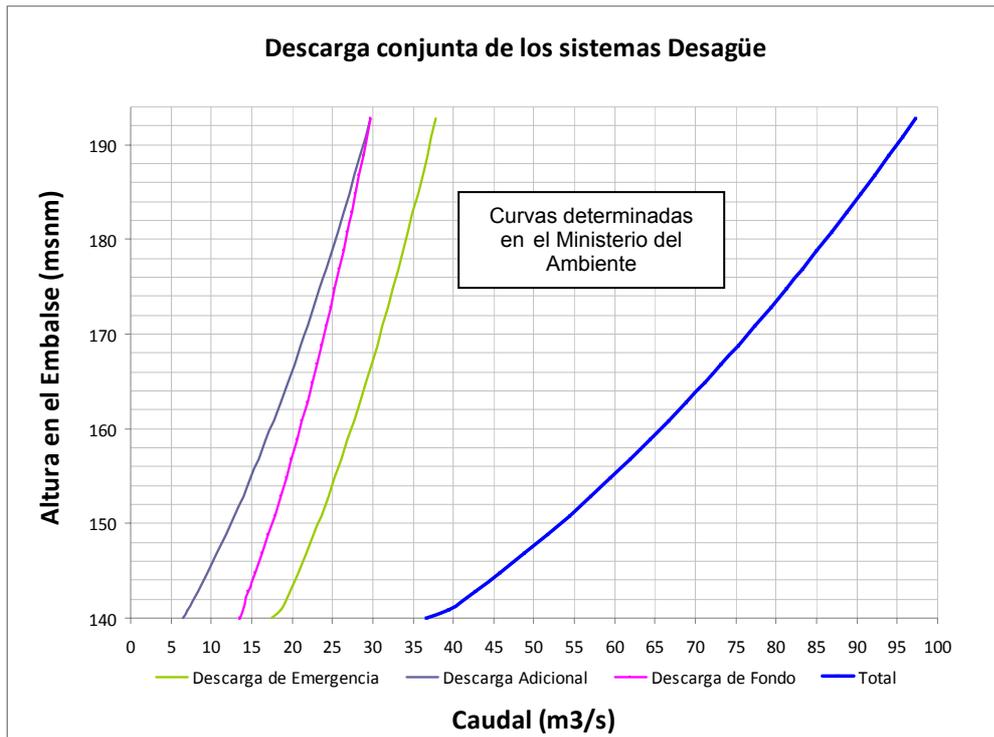


**Figura 5.42.** Curva de gasto de la Descarga Adicional

d) Toma para Riego y Acueducto

La toma para riego y acueducto está proyectada para un caudal máximo de 16 m<sup>3</sup>/s. La regulación de los caudales extraídos por esta toma se efectúa por medio de un conjunto de válvulas a la entrada del sistema de riego. Estos sistemas no son controlados por el equipo de explotación de la presa, razón por la cual, su operación no se tomará en cuenta en el análisis de seguridad.

Finalmente, para una visualización mas completa de la capacidad de operación conjunta de todo el sistema de desagües profundos se muestra en la Figura 5.43, la curva de gasto conjunta totalizando las capacidades de las tres descargas en función del nivel del embalse.



**Figura 5.43.** Curva de gasto del sistema de desagües Profundos de manera conjunta.

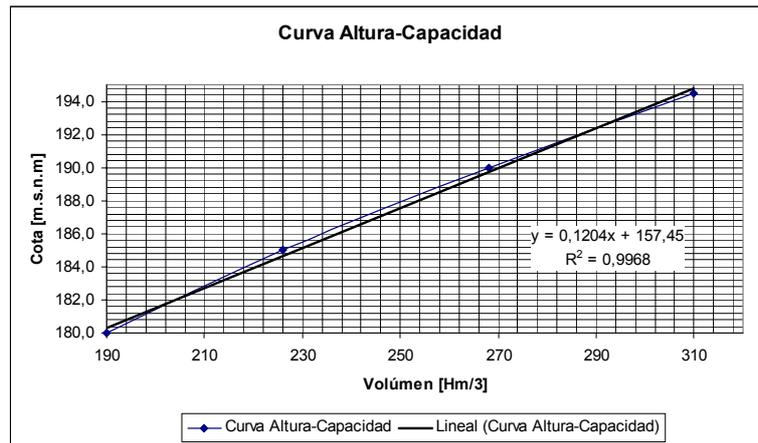
### 5.5.2.3. Tránsito de las Crecientes

Considerando las crecientes descritas en el aparte 5.5.1.2, se procede a continuación a realizar el tránsito de las mismas a través del sistema presa – embalse considerando las siguientes hipótesis:

- a) El embalse se encuentra en su Nivel de Aguas Normales (180 m.s.n.m) al inicio del evento hidrológico.
- b) No se tomará en cuenta el caudal descargado por los desagües profundos.

El tránsito se realizó con una discretización temporal de 15 minutos (la misma de los hidrogramas de diseño), verificando la ecuación de continuidad a cada intervalo considerando:

- a) El volumen entrante al embalse, considerando el caudal constante durante el intervalo de tiempo.
- b) La variación instantánea del nivel del embalse, incrementando el volumen inicial la misma cantidad que el volumen ingresado en el intervalo de tiempo y verificando en la curva Altura – Capacidad del embalse la cual fue aproximada por una función lineal para cotas por encima del Nivel de Aguas Normales. En la Figura 5.44 se muestra dicha aproximación.



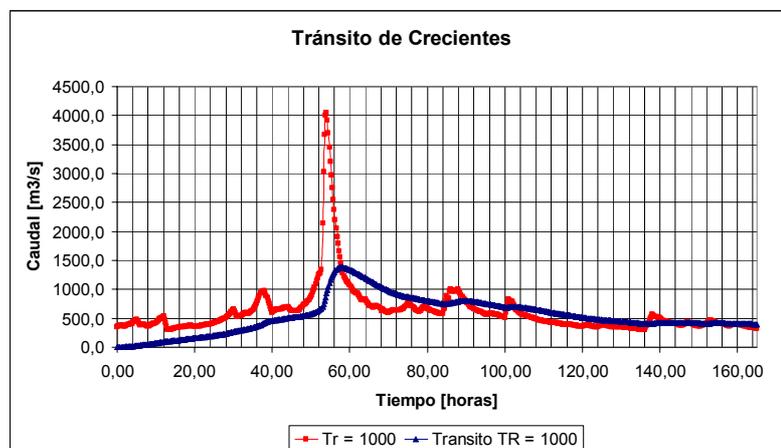
**Figura 5.44.** Aproximación de la curva Altura - Capacidad

- c) El caudal descargado, como función del incremento de nivel aplicado sobre la función de descarga del aliviadero antes determinada.
- d) El volumen evacuado en el intervalo de tiempo, considerando la descarga constante.
- e) El nivel del embalse al final del intervalo, realizando el balance entre el volumen entrante y el saliente, utilizando nuevamente la función de la curva Altura – Capacidad.

Tránsito de la Creciente de Proyecto

El tránsito de la creciente de proyecto, correspondiente al período de retorno de 1000 años, se realizó de la manera descrita anteriormente pudiendo determinar el hidrograma de salida que es mostrado en la Figura con su respectiva comparación con el hidrograma de entrada.

En la Figura 5.45, se puede observar el efecto de laminación de la creciente en el embalse la mitigación del pico del hidrograma que pasa de 4.051 m<sup>3</sup>/s en el hidrograma de entrada a 1.379 m<sup>3</sup>/s, cresta del hidrograma de salida.



**Figura 5.45.** Tránsito de la Creciente de Proyecto

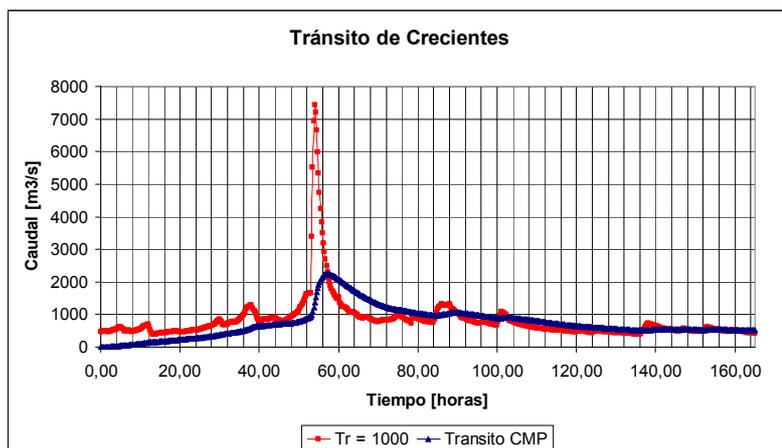
Se verifica que el aliviadero tiene sobrada capacidad para evacuar este caudal en condiciones de seguridad.

La carga máxima sobre el vertedero durante el tránsito de esta crecienta es de 10,2 metros. Como se mencionó anteriormente, la carga de diseño de este aliviadero es de 8,5 metros, con lo cual se garantiza que el caudal será desaguado sin producirse separación importante de la cara inferior de la lámina del paramento del vertedero.

### Tránsito de la Crecienta Extrema

El tránsito de la crecienta extrema, correspondiente a la Crecienta Máxima Probable, se realizó de la manera descrita anteriormente pudiendo determinar el hidrograma de salida que es mostrado en la Figura con su respectiva comparación con el hidrograma de entrada.

En la Figura 5.46, se puede observar el efecto de laminación de la crecienta en el embalse la mitigación del pico del hidrograma que pasa de 7.422 m<sup>3</sup>/s en el hidrograma de entrada a 2.243 m<sup>3</sup>/s, cresta del hidrograma de salida.



**Figura 5.46.** Tránsito de la Crecienta Extrema

Se verifica que el aliviadero tiene sobrada capacidad para evacuar este caudal en condiciones de seguridad.

La carga máxima sobre el vertedero durante el tránsito de esta crecienta es de 8,15 metros. Como se mencionó anteriormente, la carga de diseño de este aliviadero es de 13,4 metros. Para estas condiciones es previsible que la lámina inferior tienda a separarse del paramento del vertedero, generando una depresión, sin embargo la misma es aceptable considerando lo poco frecuentes que serán los alivios de esta magnitud y su poca persistencia en el tiempo.

#### 5.5.2.4. Definición de niveles.

Para efecto de los análisis de seguridad se definen los niveles de embalse siguientes:

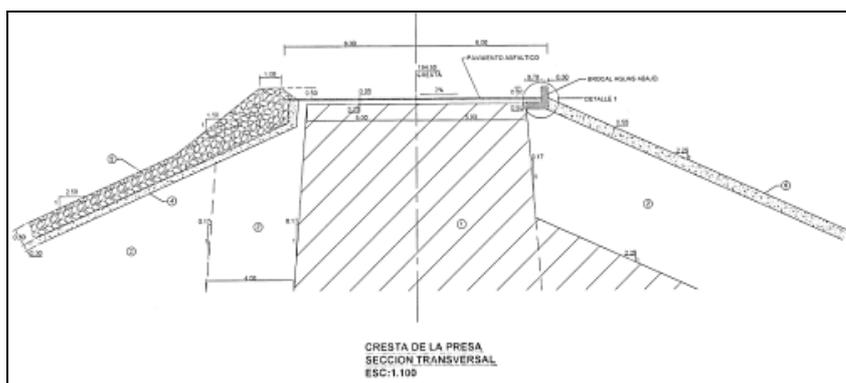
- a) Nivel de Aguas Normales (NAN): Es el máximo nivel que puede alcanzar el agua del embalse en un régimen normal de explotación sin que se

produzca un alivio. Coincide con la cresta del vertedero y se ubica en la cota 180,00 m.s.n.m.

- b) Nivel de la Creciente de Proyecto (NCP): Es el máximo nivel que se alcanza en el embalse al transitar la creciente de proyecto (TR = 1000 años en este caso). Se ubica en 190,20 m.s.n.m.
- c) Nivel de Aguas Máximas (NAM): El máximo nivel del embalse, alcanzable durante la ocurrencia de la creciente extrema (CMP en esta caso), se ubica en 193,4 m.s.n.m.

#### 5.5.2.5. Definición de Borde Libre

Para poder definir los bordes libres de la presa es necesario identificar primero cuál es la cota mas elevada de la estructura resistente de la presa. Para ello, observando la Figura, se puede identificar que el elemento impermeable de la presa, constituido por el núcleo de arcilla se eleva hasta la cota 194,50 m.s.n.m. Adicionalmente se realizó una protección permeable con enrocado de unos 0,50 metros (Figura 5.47).



**Figura 5.47.** Detalle de la Cresta de la presa.

A efectos de cálculo del borde libre se tendrá en cuenta la cota máxima de 194,50 m.s.n.m. como límite de la superficie resistente de la presa, sin embargo será admisible el agotamiento de la protección adicional con enrocado únicamente para el caso de la creciente extrema y por efectos de oleaje.

En la estimación del borde libre será tomado en cuenta el efecto del oleaje generado por la acción de los vientos. Para ello se debe previamente realizar el siguiente cálculo.

#### Determinación de la Ola de Diseño

En ausencia de datos precisos sobre la dirección y magnitud del viento en el embalse, se opta por determinar la ola de diseño de acuerdo a las recomendaciones de la "Norma Técnica para el proyecto y construcción de presas" del Ministerio de Obras Públicas de Italia de 24 de Marzo de 1982.

En la tabla 5.5, se indican las alturas de oleaje en metros para diferentes velocidades y longitud de "fetch", entendida esta como la longitud máxima del embalse en la dirección que incide el viento.

Estimación de la Altura de la Ola de Diseño							
Velocidad	Longitud de Fetch						
Km/h	1	2	4	6	8	10	15
100	1,09	1,51	2,09	2,52	2,89	3,21	3,88
80	0,86	1,19	1,65	1,65	2,28	2,53	3,07
60	0,63	0,88	0,88	1,21	1,68	1,87	2,26

**Tabla 5.5.** Estimación de la ola de diseño

No teniendo información precisa sobre la dirección y magnitud de los vientos, se realizará la estimación en las condiciones más desfavorables teniéndose un fetch de 2 Km y una velocidad de 100 Km/h. obteniéndose una altura de ola de 1,50 metros

#### Determinación de la Ola de inducida por efecto Sísmico

La altura de la ola inducida por efecto sísmico se puede determinar utilizando la siguiente fórmula (CNEGP, Guía N°2 [14])

$$A_s = KT\sqrt{gH} / (2\pi)$$

Donde:

- K = Aceleración sísmica horizontal máxima en [m/s<sup>2</sup>]  
T = Período natural del terreno en [s]  
g = Aceleración de la gravedad en [m/s<sup>2</sup>]  
H = Altura máxima del embalse en [m]

La aceleración sísmica horizontal máxima se determinó utilizando el coeficiente que propone la Fundación Venezolana de Investigaciones Sísmicas [FUNVISIS], según el mapa que se muestra en la Figura, la presa está ubicada en la zona sísmica número 3. El valor de coeficiente de aceleración horizontal según esta norma es 0,2.

En ausencia de otra información se tomó para el período del terreno el valor de 1 segundo (CNEGP, Guía N°2 [14]).

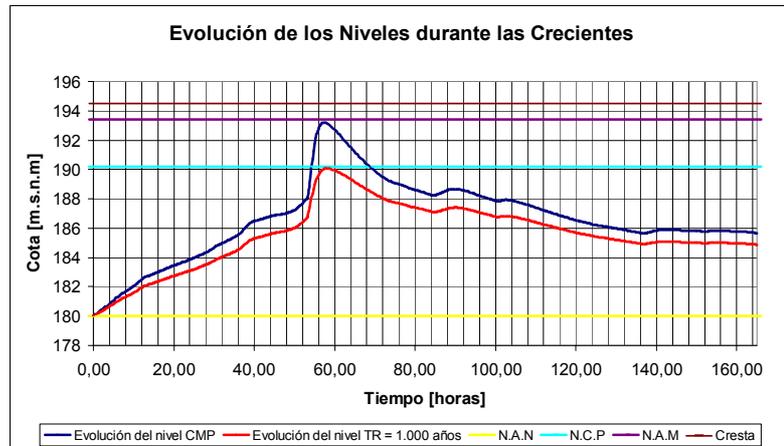
El valor estimado de la ola inducida por efecto sísmico fue de 0,73 metros.

Dicho lo anterior se definen:

- a) Borde Libre Normal: Relativo al Nivel de Aguas Normales (NAN). Igual a 12,27 metros. (tomando en cuenta los oleajes máximos inducidos por viento y sismo)
- b) Borde Libre Mínimo: Relativo al Nivel de la Creciente de Proyecto (NCP). Igual a 2,8 metros. (tomando en cuenta el nivel de la creciete de proyecto en combinación con el oleaje máximo sin tomar en cuenta el inducido por efecto sísmico)

Para el caso de la Creciente Extrema, el nivel alcanzado según el tránsito es de 193,4 m.s.n.m, dejando solo un resguardo de 1,10 metros, mas considerando la protección adicional con enrocado de 0,50 metros de altura, se puede validar este resguardo desde el punto de vista de la seguridad sin un riesgo considerable por efecto de sobrevertido.

Por último se muestra en la Figura 5.48, la evolución de los niveles para las crecientes de proyecto y creciente extrema con la finalidad de observar la persistencia en el tiempo de los niveles más elevados.



**Figura 5.48.** Evolución de los niveles durante el tránsito de las crecientes de proyecto y extrema.

#### 5.5.2.6. Evaluación del comportamiento hidráulico del Aliviadero

La revisión del comportamiento hidráulico del aliviadero se llevó a cabo constatando el buen funcionamiento para la Creciente de Proyecto y admitiendo un funcionamiento límite para la Creciente Extrema.

A efectos del análisis se dividió el aliviadero en los siguientes elementos:

a) Embocadura:

Como se describió en el aparte 5.5.2.1, las condiciones de aproximación y la geometría del vertedero permiten que la evacuación de los caudales esperados para los niveles de la creciente de proyecto y de aguas máximas. Para niveles superiores a la carga de diseño del perfil del aliviadero (9,9 metros), existe una separación de la lámina inferior de la vena de agua aliviada, sin embargo la depresión generada es de reducida magnitud y en vista de la poca frecuencia de estos alivios se considera aceptable. En la Figura 5.49 se observa el comportamiento del vertedero durante el primer alivio de la presa.



**Figura 5.49.** Flujo sobre el vertedero

b) Canal de baja pendiente:

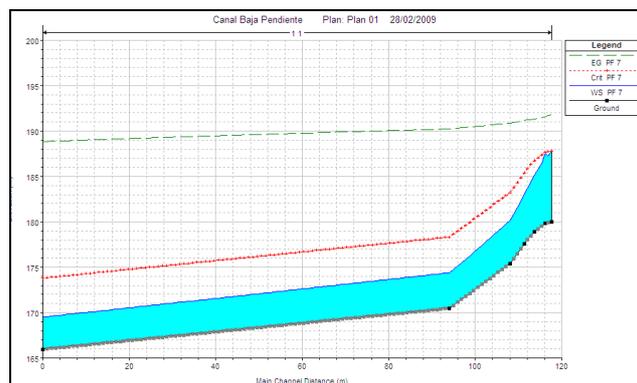
El canal sigue al perfil del vertedero tiene una longitud de 94 metros y pendiente de 4,8%, sobre él se desarrolla un perfil de flujo supercrítico con longitud suficiente para alcanzar la profundidad normal para todos los caudales transitados. En la Figura 5.50, se puede observar una perspectiva del canal en funcionamiento



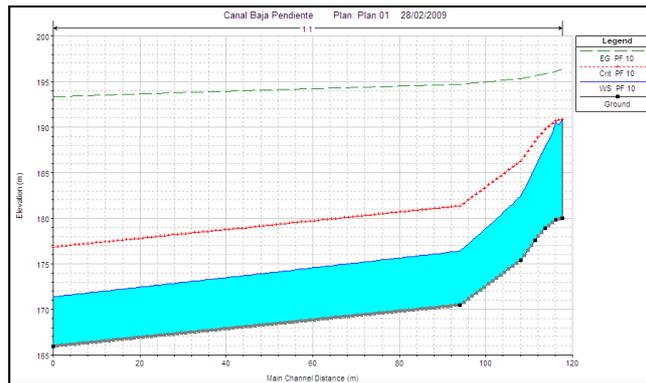
**Figura 5.50.** Canal de baja pendiente (MINAMB, Nov. 2008)

Utilizando el modelo de flujo con superficie libre HEC-RAS 4.0 del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE), se determinaron las profundidades del tirante de agua en este canal con la finalidad de verificar la altura de los muros laterales y determinar si el nivel del agua en esta canal obstaculiza de alguna manera el funcionamiento del vertedero.

Se hizo la verificación para la creciente de proyecto y la creciente extrema. A continuación en las Figuras 5.52 y 5.52, se muestran los perfiles obtenidos.



**Figura 5.51.** Flujo en el canal para Creciente de Proyecto



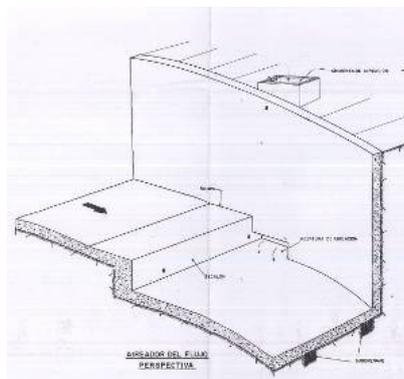
**Figura 5.52.** Flujo en el canal para Creciente Extrema

De los resultados obtenidos se verifica que el tirante máximo en el canal de baja pendiente sería de 6,1 metros durante la crecienete extrema. Considerando que los muros del aliviadero en este sector tienen una altura de 7,6 metros, queda demostrado que son suficientemente altos para transitar este caudal con seguridad.

La influencia del nivel de aguas abajo en el funcionamiento de vertedero es nula, ya que la sección crítica se ubica unos centímetros por debajo de la cota del umbral, 180 m.s.n.m y el anegamiento alcanzaría como máximo la cota 177,39 durante la crecienete extrema. Por este motivo, el nivel aguas abajo no ejerce ninguna influencia sobre la capacidad de desagüe del vertedero.

c) Aireación

La aireación de la lámina se efectúa por medio de un dispositivo ubicado al final del canal de baja pendiente antes de la entrada en el canal rápido. La incorporación del aire al flujo ocurre desde la solera del canal alimentado por dos chimeneas rectangulares laterales de 3,20 x 1,25 metros que se ubican aguas abajo de un escalón vertical de 2 metros de altura precedido de una pequeña rampa de 4 metros de longitud. Se puede observar en la siguiente Figura la geometría del escalón que produce la separación de la lámina inferior del flujo con respecto a la solera del canal creando una depresión que permite la incorporación de aire. La Figura 5.53 ilustra el funcionamiento de los aireadores.



**Figura 5.53.** Sistema de aireación

Aguas abajo del escalón se ubica una rampa de 7 metros de longitud seguida de una superficie parabólica tangente al canal de alta pendiente. La geometría del escalón se puede observar en la Figura 5.54.

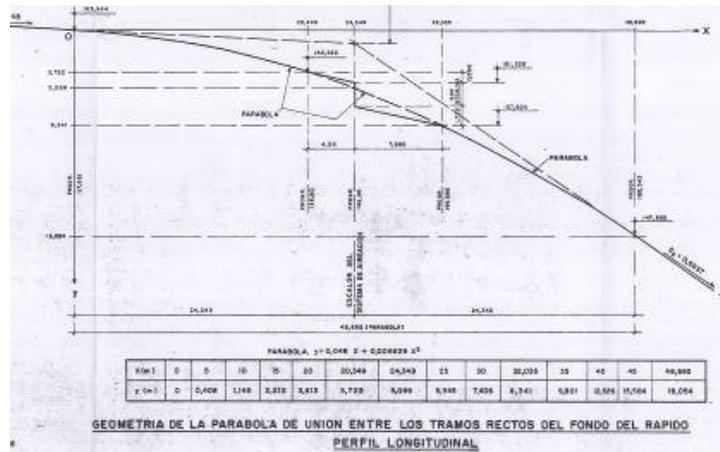


Figura 5.54. Detalle del escalón del aireador.

Observando la Figura 5.54, se descarta la posibilidad de anegamiento del aireador vista la elevada pendiente del tramo de aguas abajo.

Se evalúa el caudal de aire demandado por el flujo para verificar el funcionamiento de las chimeneas. Para esto se utiliza la expresión de Pinto et al (1982) (CNEGP, Guía N°5 [16]), según la cual el caudal de aire arrastrado desde la cavidad es igual a:

$$q_a = c.V_0.L_c$$

Donde:

- $q_a$  = Caudal específico de aire arrastrado en [m<sup>3</sup>/s.m]
- $c$  = Coeficiente dependiente del sistema de aireación
- $V_0$  = Velocidad de aproximación del flujo [m/s]
- $L_c$  = Longitud de la cavidad en [m]

Se tomo la velocidad del flujo para la creciente de proyecto igual a 19,4 m/s, y el coeficiente  $c = 0,033$  (CNEGP, Guía N°5 [16]), obteniendo un caudal de aire arrastrado de 22,5 m<sup>3</sup>/s, para cada chimenea. La velocidad media del aire en la chimenea resulta de 4,3 m/s, lo cual está dentro de los parámetros aceptables.

Durante el primer alivio documentado de la presa, el cual ocurrió en noviembre de 2008, se tomaron fotografías del aireador en funcionamiento para un alivio de aproximadamente 90 m<sup>3</sup>/s, en la Figuras 5,55 se puede observar el cambio notable en la concentración de aire evidenciado en el color blanco del flujo aguas abajo del aireador.



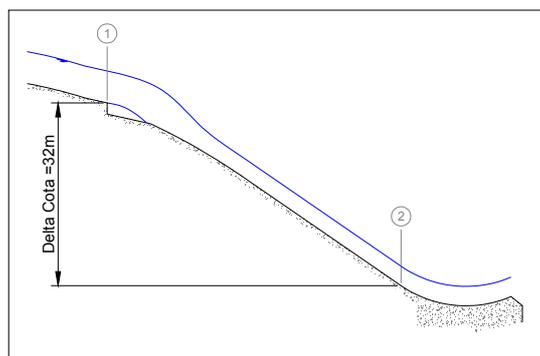
**Figura 5.55.** Aireador en funcionamiento (MINAMB, Nov. 2008)

d) Canal Rápido:

Aguas abajo del escalón de aireación anteriormente descrito, se encuentra el canal rápido con una pendiente de 69% y longitud 54 metros. Sobre este rápido se desarrolla perfil de flujo supercrítico acelerado con aire disuelto en el fondo y con aireación arrastrada de la superficie.

Para pendientes de esta magnitud no son aplicables las ecuaciones de flujo uniforme de Manning o Chèzy, se trata de un flujo que ha incorporado gran cantidad de aire y se forman trenes de ondas en la superficie que hacen que el flujo diste de ser uniforme.

Con el fin de estimar el orden de magnitud de las velocidades que puedan presentarse en el rápido se procedió a evaluar la ecuación de energía entre la sección aguas arriba del aireador y la sección final del canal rápido justo a la entrada del lanzador. Sin considerar las pérdidas de energía entre las dos secciones, toda la diferencia de energía potencial (diferencia de cota de 32 metros), se transforma en carga de velocidad, con lo cual se obtiene una velocidad máxima de 32 m/seg. El esquema de cálculo se ilustra en la Figura 5.56.



**Figura 5.56.** Esquema de cálculo del flujo en el canal rápido

En la sección 1 se tomaron las condiciones de flujo correspondientes a la Creciente de Proyecto. Con esta información se determina la energía específica según la ecuación de energía:

$$h_0 = y + \frac{v^2}{2g}$$

Despreciando las pérdidas de energía entre las dos secciones se tiene que:

$$h_2 = h_1 + \Delta z$$

Despejando se obtienen la velocidad y la profundidad del flujo que son respectivamente 32 m/s y 3,44 metros.

Ciertamente esta velocidad no se alcanzará en condiciones reales puesto que la fricción generada en el rápido introduce pérdidas de energía que redundan en un tirante de aguas mayor y una velocidad media menor. Velocidades inferiores a 30 m/s en un flujo bien aireado no suponen un riesgo apreciable de cavitación, cuando estas condiciones límite tienen una baja probabilidad de ocurrencia.

Con respecto a la altura del tirante de agua, ésta será mayor de lo que teóricamente se determinó (3,44 metros) debido a las pérdidas de energía no consideradas en el cálculo y al efecto de esponjamiento producido por el aire incorporado al flujo. En todo caso debe ser inferior a la profundidad alcanzada para el mismo caudal en el canal de baja pendiente (6,1 metros), con lo cual los muros laterales de 8 metros de altura son suficientemente elevados para transitar este caudal sin que ocurran desbordes.

Por lo anteriormente expuesto no hay motivos para pensar que el rápido pueda estar sometido a riesgo de corrosión por cavitación con una frecuencia apreciable.

e) Lanzador:

Al final del canal rápido se ubica un lanzador cuya forma es un sector cilíndrico de radio constante de 20 metros, cuya arista final se ubica en la cota 127 m.s.n.m. siendo el ángulo de lanzamiento de 30°. En la Figura 5.57, se muestra la sección longitudinal del mismo.

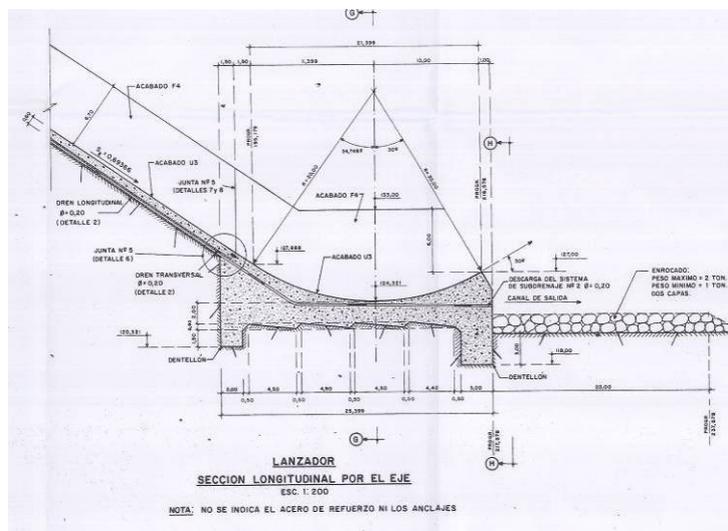


Figura 5.57. Sección longitudinal del lanzador

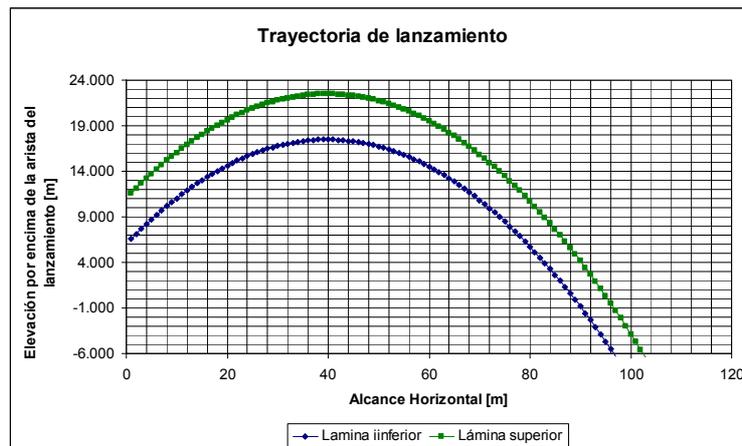
A continuación se determinan las características geométricas del lanzamiento. La ecuación de la trayectoria parabólica que describe el agua (CNEGP, Guía N°5 [16]), despreciando la fricción producida por el aire, es la siguiente:

$$z = h + x \cdot \tan \alpha - \frac{g \cdot x^2}{2v^2 \cos^2 \alpha}$$

Donde:

- z = Altura de la vena medida desde la arista de lanzamiento.
- h = Altura del lanzador sobre el cauce.
- x = Distancia horizontal desde la arista de lanzamiento.
- $\alpha$  = Angulo de lanzamiento sobre la horizontal.
- v = Velocidad del chorro en la dirección de lanzamiento.

Se fijó la velocidad en 30 m/s, como aquella correspondiente a la Creciente de Proyecto, calculada en el aparte anterior. De esta manera se definió la trayectoria y se determinó el alcance máximo del chorro lanzado, el cual fue de 98 metros. La trayectoria referida se observa en la Figura 5.58.



**Figura 5.58.** Trayectoria del chorro calculada para la creciente extrema.

Se determinaron las trayectorias de la lámina inferior y superior del flujo lanzado, sin considerar los efectos de la resistencia del aire y la emulsión del flujo. El alcance máximo del chorro se ubica sobre los 100 metros a partir de la arista del lanzador.

Durante el primer alivio de la presa en el Noviembre de 2008, se tomaron algunas fotografías del funcionamiento del lanzador, a continuación se muestran dos de ellas (Figuras 5.59 y 5.60), la primera con un caudal reducido por el cual el lanzador funciona como cuenco amortiguador, y la segunda con un caudal de mayor magnitud para el cual se observa el lanzamiento de la lámina.



**Figura 5.59.** Lanzador funcionando como cuenco



**Figura 5.60.** Lanzador durante el pico del primer

Se puede observar en la Figura que la lámina lanzada dista mucho de ser un chorro geoméricamente bien definido. Por el contrario la emulsión de aire expande el flujo contribuyendo a la disipación de energía y a mitigar los efectos erosivos aguas abajo.

Por la altura del lanzador con respecto al estanque, se desestima que pueda ocurrir un nivel aguas abajo que pueda anegar el lanzador.

#### 5.5.2.7. Análisis del tiempo de vaciado.

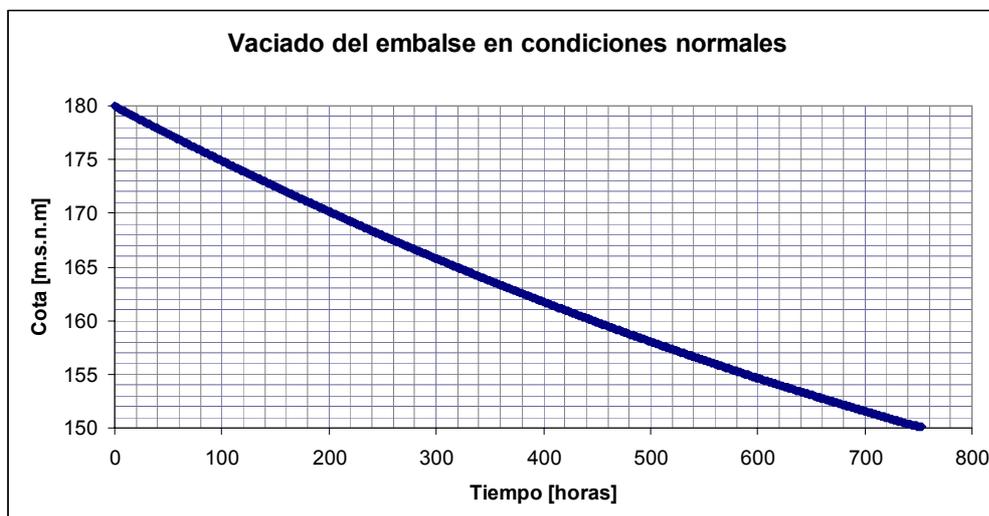
Para la Estimación del tiempo de vaciado en condiciones normales de la presa, se considerarán las siguientes hipótesis:

- a) El embalse se encuentra en su Nivel de Aguas Normales (180 m.s.n.m)
- b) Durante todo el proceso de vaciado del embalse, está ingresando el caudal medio del río ( $15 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Se considerará que se ha efectuado un vaciado total de la presa cuando el nivel del embalse esté por encima de la captación más baja, sólo la altura de aguas mínima suficiente para que pueda circular el caudal medio del río a través de la misma. A tales fines, considerando que el umbral de la torre de toma está en la

cota 140 m.s.n.m, se calculó el tiempo de vaciado de la presa hasta la cota 150 m.s.n.m.

El procedimiento de cálculo consistió en la integración paso a paso de los volúmenes entrantes y salientes del embalse tomando en cuenta el almacenamiento. En la Figura 5.61 se muestra la evolución del nivel del embalse durante la maniobra de vaciado.



**Figura 5.61.** Evolución del nivel del embalse durante el vaciado

Como puede observarse el nivel mínimo se alcanza a las 753 horas (30 días). El caudal pico de esta maniobra corresponde a la primera hora de vaciado y es de  $87 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esta maniobra se pondría en práctica únicamente en situaciones de contingencia, y el caudal pico se corresponde al de una creciente de período de retorno menor a 10 años, con lo cual no se espera que ocurran daños aguas abajo.

#### 5.5.2.8. Condiciones de la descarga

Todos los desagües de la Presa Tres Ríos, incluido el aliviadero de superficie libre, descargan en un estanque excavado sobre el lecho del río que descarga al cauce natural. Este estanque se ha formado naturalmente por el efecto erosivo de las descargas que se han efectuado desde la puesta en carga del embalse, se ha monitoreado periódicamente la evolución de la socavación que ya debe estar alcanzando la estabilidad.

Como se ha explicado, la construcción de los órganos de desagüe está aún incompleta, a continuación se estudiarán las condiciones de descarga del aliviadero y cada uno de los desagües en las condiciones actuales para identificar en qué forma afecta a la seguridad de la presa.

#### Descarga de Fondo:

Actualmente no se tiene control de maniobra sobre la descarga de fondo, ya que no se ha construido la caseta donde se debe montar la válvula Esférica y la Howell Bunger (ver apartado 5.3.2.2). En el estado actual, solo se cuenta con

una válvula tipo Mariposa que está abierta al 100% y sumergida en el estanque disipador como se ve en la Figura 5.62:



**Figura 5.62.** Descarga de fondo en condiciones actuales

El flujo a gran velocidad proveniente de esta descarga ha socavado el estanque disipador a un nivel que no se podrá determinar hasta tanto no se efectúe el cierre de la válvula y la construcción de la caseta.

#### Descarga de Emergencia

La descarga de emergencia, inicialmente proyectada con un mecanismo similar a la de fondo (ver apartado 5.3.2.2.), está actualmente controlada por una válvula de tipo mariposa de 1,5 metros de diámetro que descarga contra la atmósfera. Posee un tramo rectilíneo de tubería para conducir el caudal descargado al mismo estanque disipador del aliviadero. Esta conducción provisional tiene el inconveniente de no permitir la apertura completa de la descarga porque para aperturas mayores al 70% se registran fuertes vibraciones en la estructura e indicios de cavitación a pesar de poseer una chimenea de ventilación. En la Figura 5.63, se observa la salida de la tubería de descarga de emergencia.



**Figura 5.63.** Salida de la tubería de descarga de emergencia

### Descarga Adicional

Como se explicó en el aparte 5.5.2.1, se construyó una descarga adicional para aumentar la capacidad de descarga mientras el aliviadero no estaba construido del todo, para ello se construyó otra bifurcación aguas abajo de la válvula de regulación y se colocó una brida de 0,76 metros de diámetro cuya apertura sólo se puede efectuar cerrando la válvula de regulación. En la Figura 5.64 se muestra una vista de esta descarga.



**Figura 5.64.** Descarga adicional antes de su primera apertura

Una vez abierta esta descarga, lanza horizontalmente un chorro que impacta en el mismo estanque disipador. Esta descarga generó inicialmente una erosión que actualmente está estabilizada. En la Figura 5.65, se muestran las descargas de emergencia y adicional en funcionamiento.



**Figura 5.65.** Descargas de Emergencia y Adicional, Dic. 2009

### Aliviadero

El estanque disipador aguas abajo del lanzador ha sido excavado por la erosión que producen las diferentes descargas además de un gran volumen de material arrastrado durante el primer alivio del embalse. A continuación se ilustra la evolución de este estanque en una serie de fotografías (Figuras 5.66, 5.67 y 5.68).



**Figura 5.66.** Estanque disipador al inicio del alivio



**Figura 5.67.** Erosión durante el alivio



**Figura 5.68.** Estado final del estanque disipador

Como se puede apreciar, la energía del flujo arrastró una gran cantidad de material quedando descubierta la roca más fresca. A este punto es necesario agregar que este efecto era previsible y favorable en el sentido de ahorro de excavación a máquina, siendo el flujo de los aliviós el que determinará las dimensiones finales del estanque.

Sin embargo, el enrocado previsto al pie del lanzador no se ha construido aún, es necesario llevar a cabo esta actividad para proteger a la estructura de la erosión regresiva del fondo del cauce durante los aliviós.

#### 5.5.2.9. Recomendaciones

Efectuada la evaluación de la seguridad hidrológica – hidráulica, se recomienda lo siguiente:

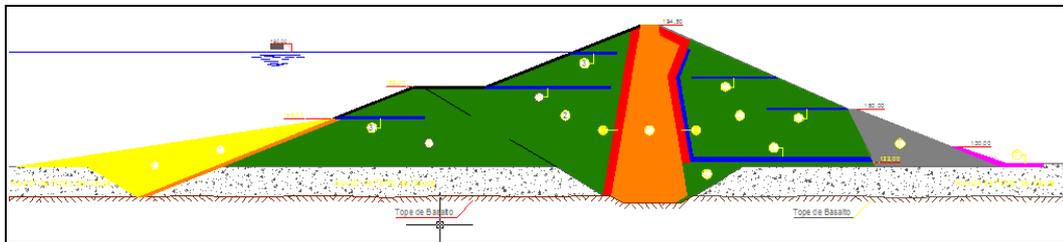
- I. Construir a la brevedad posible la protección con enrocado al pie del lanzador del aliviadero a fin de prevenir que un proceso de erosión regresiva comprometa la estabilidad de esta estructura.
- II. Proteger con enrocado las laderas del estanque disipador para evitar otros procesos erosivos que puedan afectar las casetas de válvulas o el pie de la presa.
- III. Inspeccionar periódicamente el estado del concreto en el canal rápido del aliviadero con la finalidad de detectar eventuales indicios de daños por cavitación
- IV. Completar la construcción de la descarga de fondo como ha sido prevista en el proyecto original, removiendo de ser posible la válvula mariposa a fin de disminuir las pérdidas de energía localizadas.
- V. Eliminar la restricción de apertura de la descarga de emergencia mejorando la aireación del conducto o removiendo la tubería anexa, siempre y cuando se prevean acciones para protección contra la erosión en la zona de impacto del chorro.

## 5.6. Evaluación de la seguridad Estructural

En este apartado no se ha realizado el cálculo detallado de la estabilidad en cada una de las situaciones de análisis, únicamente se ha planteado las bases de la evaluación del comportamiento del conjunto presa cimiento ante la acción de diferentes combinaciones de sollicitaciones. Se definirán las características mecánicas de los materiales de construcción y la caracterización geotécnica del sitio de presa, se definirán situaciones de análisis y se enunciarán las verificaciones de estabilidad que deben realizarse.

### 5.6.1. Descripción Estructural

La presa Tres ríos es de tierra zonificada con núcleo central de arcilla y espaldones de gravas, está provista de filtros aguas arriba y aguas abajo del núcleo central. Su sección transversal se puede observar en la Figura 5.69.

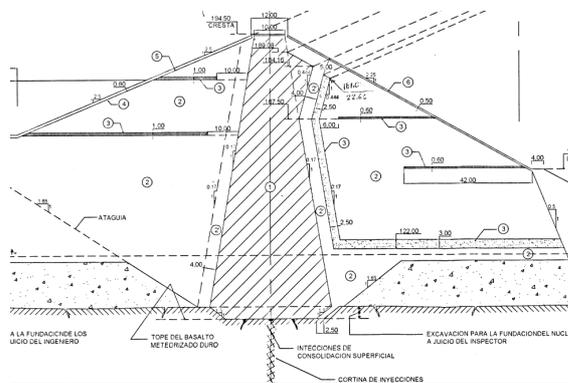


**Figura 5.69.** Sección transversal de la presa

El espaldón de aguas arriba posee una pendiente de  $1V : 2,5H$  y el de aguas abajo de  $1V : 2,25H$ . El núcleo de la presa tiene un ancho de 40 metros en la base y una altura máxima sobre cimientos de 84 metros. La coronación de la presa tiene un ancho de 12 metros.

El sobreancho que se observa en la parte superior del núcleo se proyectó con la finalidad de permitir un futuro recrecimiento de la presa.

Se construyeron drenes horizontales en el talud de aguas arriba para facilitar el drenaje del espaldón durante el vaciado de la presa. Aguas abajo del núcleo se construyó también un drenaje vertical. A lo largo de la cimentación se ejecutó una cortina de inyecciones de cemento para contribuir a la estanqueidad del cierre. En la Figura 5.70 se observe detalle del núcleo, filtros y drenajes.



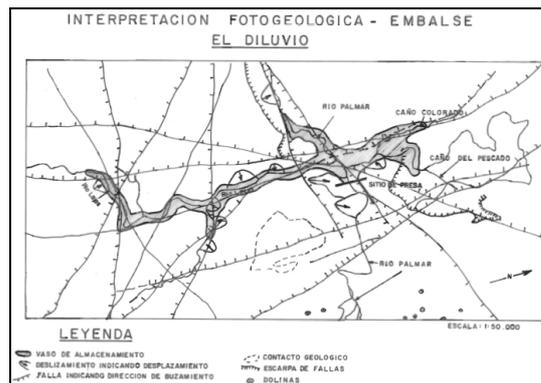
**Figura 5.70.** Sección transversal detalle del núcleo impermeable.

### 5.6.2. Caracterización geotécnica del sitio de presa.

La caracterización geotécnica del sitio fue llevada a cabo en el proyecto original de Ingeniería de Suelos S.A (Anexo 1), y revisada en 1982 por Proyecta S.A (Anexo 1). A continuación se resumen algunos aspectos del estudio geológico.

Geológicamente, la zona del emplazamiento de la presa comprende una secuencia de rocas ígneas paleozoicas sobre la cual sedimentaron discordantemente rocas del Cretáceo, afectadas posteriormente por esfuerzos mayores que generaron estructuras orientadas paralelamente al grano de la serranía, donde no afloran; estas rocas están cubiertas por montos aluviales cuaternarios. La base de la sección está constituida por rocas ígneas del tipo basalto pertenecientes a las llamadas "Rocas volcánicas del Totumo". La roca Caliza se presenta estratigáficamente en capas gruesas, macizas, con estratificación bien definida; este material controla una topografía muy abrupta que desarrolla elevados farallones donde es notoria la presencia de deslizamientos de bloques.

La estructura de falla más importante en la zona es una falla inversa denominada Falla de Lajas, la cual tiene un desplazamiento vertical de tal magnitud que sitúa a nivel de cota del río los afloramientos de caliza. En la Figura 5.71, se observa un mapa de interpretación del sistema de fallas en las inmediaciones del sitio de presa:



**Figura 5.71.** Sistema de fallas alrededor del sitio de presa

En el sitio de presa afloran exclusivamente rocas del tipo basalto, en donde no lo hacen, están cubiertas por suelos residuales (estribos) o por suelos aluviales de naturaleza granular grueso (valle).

La caracterización de la roca de cimentación del núcleo de la presa y al material aluvial sobre el que se apoyan los espaldones se resumen en la tabla 5.6 (L.M. Suárez, Anexo 1).

$\phi'$ (grados)	C' (Ton/m <sup>2</sup> )	$\gamma_{hum.}$ (Ton/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat.}$ (Ton/m <sup>3</sup> )
Aluvión del cauce			
32	0	2,00	2,10
Roca de fundación			
40	2	2,64	2,64

**Tabla 5.6.** Asignación de parámetros. Roca y Aluvión

### 5.6.3. Propiedades de los materiales de construcción.

Como se ha explicado, la presa tres ríos es de tierra zonificada con núcleo central de arcilla y espaldones de gravas. En el proyecto final de la presa (L.M Suárez 1991, Anexo 1), se indican los parámetros resistentes de estos dos materiales, los cuales se resumen en la tabla 5.7.

$\phi'$ (grados)	C' (Ton/m <sup>2</sup> )	$\gamma_{hum.}$ (Ton/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat.}$ (Ton/m <sup>3</sup> )
Material impermeable del núcleo			
25	0	2,14	2,15
Material permeable y semipermeable de los espaldones			
35	0	2,10	2,20

**Tabla 5.7.** Asignación de parámetros. Núcleo y Espaldones

Los valores referidos se corresponde al proyecto de la presa, no habiéndose efectuado ninguna comprobación de campo, toma de muestras o ensayo de estas propiedades luego de construida la presa. Estos son los valores empleados en la verificación estructural del Proyecto de 1991.

### 5.6.4. Situaciones de Análisis

Para la evaluación de la seguridad estructural de esta presa se considerarán las siguientes situaciones de análisis:

#### 5.6.4.1. Situación Normal

N<sub>1</sub> : Embalse lleno al nivel de aguas normales (NAN = 180 m.s.n.m.)

Se considerará para esta situación que las presiones intersticiales en el núcleo se distribuyen según la línea de saturación previsible con el embalse al nivel de aguas normales. Las sollicitaciones hidráulicas se calcularán en función del nivel del embalse adoptado. Se incluirá el efecto del oleaje inducido por el viento.

#### 5.6.4.2. Situaciones Accidentales

A<sub>1</sub> : Embalse lleno a nivel de la creciente de proyecto (NCP = 190,2 m.s.n.m.)

El estado de saturación del núcleo de la presa permanecerá igual al de la situación N<sub>1</sub>, Se incluirá el efecto del oleaje inducido por el viento.

A<sub>2</sub> : Desembalse Rápido

El estado de saturación del núcleo de la presa permanecerá igual al de la situación N<sub>1</sub>, el nivel del embalse se ubicará en la cota del umbral de la torre de toma (130 m.s.n.m).

A<sub>3</sub> : Embalse lleno (NAN = 180 m.s.n.m) + Terremoto de proyecto

El estado de saturación del núcleo de la presa permanecerá igual al de la situación N<sub>1</sub>, se incluirá el efecto del oleaje inducido por el sismo.

#### 5.6.4.3. Situaciones Extremas

E<sub>1</sub> : Embalse lleno a nivel de la creciente extrema (NAM = 193,4 m.s.n.m)

El estado de saturación del núcleo de la presa permanecerá igual al de la situación N<sub>1</sub>, Se incluirá el efecto del oleaje inducido por el viento.

E<sub>2</sub> : Desembalse rápido + Terremoto de proyecto

El estado de saturación del núcleo de la presa permanecerá igual al de la situación N<sub>1</sub>, el nivel del embalse se ubicará en la cota del umbral de la torre de toma (130 m.s.n.m).

E<sub>5</sub> : Embalse lleno a nivel de aguas normales (NAN) + Terremoto extremo

El estado de saturación del núcleo de la presa permanecerá igual al de la situación N<sub>1</sub>, Se incluirá el efecto del oleaje inducido por el sismo.

#### 5.6.5. Descripción de las solicitaciones

##### 5.6.5.1. Solicitaciones hidráulicas.

###### Empuje hidrostático:

El empuje hidrostático sobre la presa se tomará desde el nivel del embalse para cada situación de análisis, hasta el punto más bajo de la cimentación del núcleo impermeable en cada sección transversal de la presa que se desee analizar.

La distribución de empujes hidrostáticos se calculará para los niveles Nivel de Aguas Normales (NAN = 180 m.s.n.m), Nivel de la Creciente de Proyecto (NCP = 190,2 m.s.n.m) y Nivel de Aguas Máximas (NAM = 193,2 m.s.n.m). Estos empujes se considerarán perpendiculares al paramento aguas arriba del núcleo impermeable.

###### Presiones intersticiales:

Se debe determinar red de flujo a través del núcleo impermeable, describiendo la línea de saturación y estimando la distribución de presiones intersticiales en todo el campo de flujo.

No se cuenta con las lecturas de los piezómetros instalados de dos secciones del núcleo impermeable, cuando se posea esta información se podrá verificar si la distribución de presiones intersticiales se corresponde con la que se podría esperar teóricamente.

En el proyecto de la presa (Ing. Luis Miguel Suárez, 1991. Anexo 1), se describe lo siguiente en cuanto a la estimación de la red de flujo de la siguiente manera:

*“La malla de flujo fue determinada considerando una relación anisotrópica de las permeabilidades horizontales/verticales del material del núcleo, igual a 9, por efecto de la laminación que produce la compactación. Se supuso saturada la zona del filtro de aguas abajo comprendida entre el núcleo y el dren vertical.”*

Se considera que esta es una metodología apropiada sin embargo en el proyecto no se muestra los resultados del cálculo de la red de flujo.

Acción del oleaje:

Las sobrepresiones generados por el efecto del oleaje se determinarán para las magnitudes de ola estimadas en el aparte de seguridad hidrológica hidráulica, las cuales son (ver apartado 5.5.2.5) :

Ola Inducida por el viento: 1,50 metros

Ola Inducida por el sismo: 0,73 metros.

#### 5.6.4.2. Solicitaciones sísmicas

La presa Tres ríos está ubicada en la zona centro occidental del estado Zulia, de acuerdo con lo establecido en el mapa de zonificación sísmica de la norma COVENIN [12], se ubica en la Zona 3, considerada de peligro sísmico intermedio, a la cual corresponde un coeficiente de aceleración horizontal  $A_0 = 0,2$ .

En la revisión del estudio geológico realizada en 1982, se define la aceleración máxima horizontal del terreno como  $250 \text{ cm/s}^2$  y se estima la intensidad máxima de sismo en 10 MCS.

No se cuenta con un estudio mas detallado de la sismicidad de la zona a fin de determinar la magnitud del terremoto de proyecto y el terremoto extremo. Se recomienda utilizar los siguientes períodos de retorno:

Terremoto de proyecto:

Período de Retorno 1000 años

Terremoto extremo:

Período de Retorno 5000 años

#### 5.6.4.3. Empuje de los sedimentos

De producirse una acumulación de sedimentos, ésta ocurriría a nivel de la ataguía, disminuyendo la inclinación del paramento mojado de la misma y finalmente obrando a favor de la estabilidad de la misma, por lo tanto no se considerará este empuje en la evaluación de la seguridad estructural.

#### 5.6.4.4. Variación térmica.

No se considerará el efecto de las variaciones térmicas sobre el cuerpo de la presa por tratarse de una presa de materiales sueltos, construida con materiales de alta deformabilidad.

#### 5.6.5. Análisis estructural

A continuación se especifican las comprobaciones estructurales que se deben llevar a cabo para el análisis de la seguridad en la presa Tres Ríos.

##### 5.6.5.1. Análisis de estabilidad al deslizamiento

En el proyecto definitivo de la presa (L.M. Suárez 1991, Anexo 1), se describe el análisis de la estabilidad de la siguiente manera:

*“La estabilidad fue calculada mediante un programa de computadora que utiliza el método de Jambu. Se calcularon los factores de seguridad de centenares de superficies de falla, tanto circulares como rectas y combinaciones de ambas. El factor de seguridad mínimo obtenido para el talud de aguas abajo fue de 1,71 el cual se considera adecuado para las condiciones impuestas.”*

El método de Jambu es adecuado para la tipología de la presa, sin embargo no se indica cuáles son las situaciones de carga bajo las cuales se obtuvo ese factor de seguridad.

En el proyecto también se indica:

*“La estabilidad del talud de aguas arriba de la presa fue calculada para diferentes casos de vaciado rápido del embalse... después de considerar diferentes hipótesis referentes a la subpresión actuante en el espaldón después del desembalse rápido, y de calcular los factores de seguridad de centenares de superficies potenciales de falla, se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 1,40.”*

En este caso, tampoco se especifica cuáles son las hipótesis de cálculo en las cuales se obtuvo dicho factor de seguridad. No se especifica si se realizó alguna comprobación para solicitaciones sísmicas.

##### 5.6.5.2. Análisis del comportamiento tenso - deformacional

La evaluación del estado tenso-deformacional de la presa no se ha llevado a cabo, en ninguno de los informes que conforman la documentación del proyecto, se lleva a cabo una revisión del campo de tensiones y deformaciones en el cuerpo de presa.

#### 5.6.6. Conclusiones, recomendaciones y necesidades de análisis

El análisis de la seguridad estructural de la presa tres ríos no se ha efectuado completamente, los factores de seguridad obtenidos en el proyecto no aportan suficiente información referente al comportamiento de la presa en las situaciones que se prescriben en el aparte 5.6.4.

Se proponen las siguientes recomendaciones:

- I. Realizar un estudio detallado del estado de saturación del núcleo impermeable. Validar los resultados obtenidos con las lecturas de los piezómetros instalados en el núcleo.
- II. Ampliar los estudios sísmicos y realizar un análisis probabilístico que permita determinar las intensidades de los terremotos de proyecto y terremoto extremo, asociados a los períodos de retorno de 1000 y 5000 años respectivamente. Verificar que los resultados obtenidos para las aceleraciones de diseño son compatibles con los criterios de la norma COVENIN para el diseño de edificaciones sismorresistentes.
- III. La estabilidad al deslizamiento debe ser recalculada para cada una de las situaciones de carga (normales, accidentales y extremas), definidas en esta evaluación. Se obtendrán los factores de seguridad para cada una de estas situaciones y se deba razonar si el nivel de seguridad es aceptable dada la categoría del embalse.
- IV. Se debe realizar un estudio del estado tenso-deformacional utilizando un método de elementos finitos, para reproducir el campo de esfuerzos y deformaciones y verificar si son compatibles con la estabilidad de la presa o la generación de un modo de fallo.
- V. Se debe estudiar el potencialidad de ocurrencia de fenómenos de licuefacción en los materiales del cuerpo de la presa y de la cimentación.
- VI. Se debe estudiar si el resguardo en coronación es suficiente para absorber eventuales asentamientos generados por el sismo

## 5.7. Evaluación de la seguridad de las Instalaciones Electromecánicas

En el estado actual de las obras, como ya se ha comentado, no se ha concluido la construcción de la totalidad de las instalaciones para la regulación de los desagües de la Presa.

### Válvula de regulación

La única unidad oleodinámica instalada en la presa es la que acciona la válvula de regulación tipo mariposa de 2 metros de diámetro ubicada en la bifurcación a la salida del túnel de desvío. A pesar de estar dotada de todos los equipos electromecánicos para funcionar, el accionamiento de esta válvula siempre se ha efectuado de manera manual debido a problemas de alimentación eléctrica.

En el estado actual esta válvula está conectada a la tubería de aducción y en operación normal debe permanecer abierta a no ser que se deban efectuar operaciones de mantenimiento en la línea de aducción o apertura de la descarga adicional.

La unidad de accionamientos oleodinámicos de esta válvula está en perfectas condiciones por tener poco más de un año de haber sido instalada. En la fotografía (Figura 5.72) se observa que el accionamiento se lleva a cabo mediante cilindros hidráulicos equilibrados por contrapesos.



**Figura 5.72.** Válvula de regulación de tipo Mariposa Diámetro = 2,0 metros

La alimentación eléctrica de esta caseta de válvulas se efectúa por medio de una línea de transmisión que fue recientemente desmantelada por actos de vandalismo, los transformadores fueron retirados y almacenados en las oficinas del equipo de inspección para evitar que fuesen sustraídos. En estas condiciones no se puede tener garantía sobre el funcionamiento de esta instalación. Por otra parte se carece de otros sistemas de alimentación como un grupo electrógeno portátil.

El mal funcionamiento de esta válvula de regulación tiene implicaciones sobre el suministro al sistema de riego y al acueducto sin embargo, no representa un riesgo apreciable para la seguridad hidráulica de la presa.

### Descarga de Emergencia y Descarga de Fondo

Las dos válvulas restantes instaladas en los desagües de emergencia y de fondo, (de tipo mariposa de 1,5 metros de diámetro), poseen accionamientos mecánicos manuales por medio de volantes, los cuales no están resguardados en instalaciones cerradas, siendo posible que personas ajenas al equipo de explotación manipulen este sistema.

Como se comentó en el apartado 5.5.2.8, la válvula de regulación de la descarga de fondo se encuentra actualmente sumergida en el estanque disipador, la manipulación de esta válvula solo puede efectuarse para niveles bajos del embalse, cuando el caudal descargado impone niveles mas bajos en el estanque disipador.

#### 5.7.1 Recomendaciones

- I. Construir a la brevedad posible la caseta de válvulas para la descarga de fondo según las indicaciones del proyecto, con el fin de recuperar control sobre esta descarga.
- II. Restituir a la brevedad posible la alimentación eléctrica y custodiar esa instalación. Cuando se construya la caseta de válvulas de la descarga de fondo, la misma estará dotada de accionamientos oleodinámicos similares al de la válvula de regulación, con lo cual el problema de la alimentación eléctrica seguirá presente, el accionamiento manual de estas válvulas es posible pero impráctico desde el punto de vista operacional.
- III. Adquirir como mínimo un grupo electrógeno portátil con capacidad para alimentar los sistemas electromecánicos de accionamiento de la válvula de regulación y de las que están previstas a futuro.
- IV. Es aconsejable realizar pruebas periódicas de apertura y cierre de cada una de las válvulas de control sin distinguir aquellas que tienen accionamientos oleodinámicos de aquellas que no.

## 5.8. Evaluación de la seguridad de Accesos y Comunicaciones

### 5.8.1 Accesos

En la siguiente imagen se muestra la red de accesos a la presa y obras anexas. Para realizar una evaluación de las condiciones de los accesos a la presa es necesario reconocer los puntos neurálgicos de la red de vialidad que circunda la presa.



**Figura 5.73.** Vista aérea de la vialidad

En la fotografía (Figura 5.73) se identifica:

1) Puente:

Único paso sobre el río Palmar en una distancia de 30 Km. Está constituido por 6 alcantarillas de sección circular de 4 m de diámetro. No se ha efectuado un cálculo preciso del caudal máximo que puede circular sin que ocurra un rebose, sin embargo durante el primer alivio de la presa informes del equipo de inspección aseguran que trabajó casi al 100% de su capacidad. Una creciente de un período de retorno moderado podría rebasar esta estructura dejando incomunicado el estribo derecho de la presa, la coronación y la explanada a pie de presa. La única forma de acceder sería atravesando el río Palmar en el siguiente puente de aguas abajo.

2) Múltiple de descarga:

Por medio de una carretera de tierra se puede acceder al portal de salida del túnel de desvío donde se ubican los equipos electromecánicos que accionan la válvula de regulación y se puede acceder caminando a la descarga de fondo y la descarga de emergencia. Desde este punto se observa la margen izquierda del estanque dissipador y canal de descarga del aliviadero. Esta carretera de acceso conduce directamente hacia la caseta de la válvula de regulación. Cuando está en operación la descarga adicional, se restringe el acceso a la válvula de la descarga de emergencia.

3) Explanada a pie de presa:

Al pie de la presa se ubica una explanada en donde se ubicaron los talleres mecánicos durante la construcción y desde la cual se puede acceder al estanque disipador del aliviadero por su margen derecha. A este punto se accede desde la margen derecha del río, con lo cual es necesario atravesar el puente.

4) Coronación de la Presa:

Atravesando el puente y recorriendo una carretera de tierra excavada a media ladera se accede a la coronación de la presa, entrando por una amplia plataforma en el estribo derecho de la presa.

5) Aliviadero:

No hay un puente sobre la cresta del aliviadero. Considerando la necesidad de inspeccionar la ladera izquierda del aliviadero para monitorear el estado de fracturación de la roca que representa un riesgo de deslizamiento, la ausencia de este puente es un elemento perjudicial para la gestión de la seguridad de la presa. En la siguiente imagen (Figura 5.74) se nota el estado de aislamiento de la ladera izquierda.



**Figura 5.74.** Acceso al aliviadero desde la coronación

### 5.8.2 Comunicaciones

No se ha instalado ningún sistema de comunicación remoto que envíe o reciba información relacionada con la gestión de la presa. La locación aislada en la que se encuentra la presa es un aspecto desfavorable en este sentido.

La cobertura de telefonía celular es escasa e intermitente, sólo en las oficinas del equipo de inspección existe un teléfono celular fijo que eventualmente pierde la señal.

Dicho lo anterior queda claro que no existe un canal expedito de comunicación que permita al titular de la presa la toma efectiva de decisiones relativas a la seguridad con una capacidad de respuesta veloz toda vez que se presenten circunstancias extraordinarias que pongan en compromiso la seguridad de la presa.

### 5.8.3 Recomendaciones

- I. Debe proyectarse y construirse un puente que haga practicable el acceso a ambos márgenes del río Palmar como mínimo durante el desagüe de la creciente de proyecto.
- II. Debe construirse el puente sobre el aliviadero tal y como está previsto en las especificaciones del proyecto a fin de hacer posible el acceso a la ladera izquierda del mismo.
- III. Construir una pasarela que de acceso desde la caseta de control de la válvula de regulación hacia las descargas de emergencia y descarga de fondo.
- IV. Debe mejorarse el sistema de comunicaciones entre el equipo de explotación y el titular por medio de telefonía y de ser posible conexión a Internet par poder transferir y recibir información relacionada con la gestión de la seguridad.

## 5.9. Evaluación de la seguridad Funcional

La ausencia de una estructura formal en la administración de la seguridad de la presa trae como consecuencia la falta de efectividad y capacidad de respuesta en situaciones de contingencia.

No se ha designado formalmente un equipo encargado de la explotación de la presa, tampoco se ha elaborado normas de explotación y manuales de procedimientos para diferentes escenarios.

Evaluar la seguridad funcional en este caso particular es una difícil tarea porque no hay normas ni procedimientos establecidos cuyo cumplimiento se verifique o no. Como se ha dicho anteriormente, el único personal capacitado para operar los sistemas de desagüe y que actualmente presta servicio en la presa es el equipo de la inspección técnica de las obras.

Este personal no permanece 24 horas en las instalaciones, la mayor parte del equipo son residentes en la ciudad de Maracaibo, el tiempo de viaje por tierra hasta la presa es de aproximadamente 2 horas. Se puede asumir que el tiempo de respuesta entre la ocurrencia de un evento, y la puesta en práctica de alguna maniobra importante con el sistema de desagüe no será inferior a 24 horas.

En vista de lo anterior, la administración del embalse no se está llevando a cabo desde el punto de vista de la eficiencia de regulación del recurso, si no de la seguridad, y en este sentido la estrategia es mantener ha sido mantener todos los desagües abiertos a su máxima capacidad, buscando con esto mantener los niveles del embalse lo más bajo que sea posible.

### 5.9.1 Recomendaciones

- I. Debe designarse un equipo encargado de la explotación de la presa con funciones y responsabilidades bien definidas.
- II. Debe redactarse las normas de explotación y manuales de procedimientos a seguir por el equipo designado para la explotación.
- III. El equipo designado para la explotación debe contar con todos los recursos necesarios y poseer la reparación técnica suficiente para llevar a cabo las maniobras de los sistemas de desagüe tanto en condiciones de operación normal como en casos de contingencia.

## 5.10. Análisis cualitativo de Modos de Fallo

Como herramienta complementaria de este protocolo de evaluación de la seguridad de una presa, con la finalidad de incluir en el análisis la mayor cantidad de información adicional, se llevó a cabo un análisis cualitativo de Modos de Fallo de la Presa Tres Ríos.

### 5.10.1. Definición de Escenarios de Solicitación

Los modos de fallo que se formularán para la presa Tres Ríos podrán ser desencadenados por tres tipos de escenario de solicitud

#### 5.10.1.1. Escenario Hidrológico

Se considerará como tal a toda creciente, que genere niveles del embalse superiores al Nivel de Aguas Normales (N.A.N = 180 m.s.n.m), en un campo de variación que tiene como límite superior en nivel de la Creciente de Proyecto (NCP = 190,2 m.s.n.m.). La generación de los niveles en el embalse bajo este escenario considera independiente de la operación de los órganos de desagüe (ver aparte 5.5.2.3. Tránsito de crecientes).

#### 5.10.1.2. Escenario Sísmico

Se considerará como tal al que se deriva de la ocurrencia de un terremoto, que somete a la presa y a sus estructuras anexas a condiciones variables de aceleración vertical y horizontal, diferentes a las del equilibrio estático. La persistencia de estos efectos se limita a un intervalo de tiempo limitado.

En este escenario se considera que el embalse se encuentra en su Nivel de Aguas Normales (NAN = 180 m.s.n.m). Se descarta la ocurrencia simultánea de un sismo y una creciente en vista que la probabilidad conjunta es despreciable.

#### 5.10.1.3. Escenario de operación Normal

Se considera como tal al que se deriva de la explotación normal de la presa registrándose una combinación de niveles que resulta de los regímenes de escorrentía y la estrategia de extracción de caudales del embalse. Los niveles alcanzados en este escenario tienen mayor persistencia y son siempre inferiores o iguales al nivel de aguas normales.

### 5.10.2. Procedimiento para la formulación de Modos de Fallo

Definidos los escenarios de solicitud se procederá a la formulación de los modos de fallo, para ello se propone seguir el siguiente procedimiento:

5.10.2.1. Identificación de elementos susceptibles a fallar y determinación del modo de fallo de cada uno.

A continuación se detalla una serie de elementos de la presa Tres Ríos que pueden ser susceptibles a fallar interviniendo en un mecanismo de rotura de la presa.

- Espaldón de aguas arriba: Puede fallar por deslizamiento ante la ocurrencia de un sismo o por efecto de un desembalse rápido.
- Espaldón de aguas abajo: Puede fallar por deslizamiento ante la ocurrencia de un sismo.
- Núcleo impermeable: Puede fallar por agrietamiento, fisuración, o erosión interna, producto de una acción sísmica, una sobre elevación de las presiones hidrostáticas o en condiciones de operación normal.
- Filtros: Los filtros pueden fallar en situaciones de erosión interna de tal magnitud que se produzca un arrastre de la fracción fina.
- Muros laterales del aliviadero: Pueden romperse bajo la acción del empuje de la ladera, en situaciones de saturación, operación normal o sismo.
- Estanque disipador: Puede sufrir procesos de erosión regresiva que comprometan la integridad del aliviadero y puedan propagarse al pie de la presa en escenarios hidrológicos.
- Ladera del estribo izquierdo: Puede sufrir un deslizamiento durante la ocurrencia de un sismo o un evento hidrológico (existe historial de deslizamientos).

#### 5.10.2.2. Formulación de modos de fallo

Con la información recabada y los análisis realizados durante la evaluación de la seguridad se organizó una sesión de trabajo con un grupo integrado por 4 ingenieros que forman parte del programa de posgrado del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, y 3 estudiantes en proyecto de final de carrera de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Valencia.

La sesión fue moderada por el redactor de esta tesis y el trabajo consistió en informar al grupo de los resultados del análisis de la seguridad hasta este punto ejecutado, se realizó una presentación con una selección de los datos técnicos mas relevantes sobre las características del proyecto y luego de un intervalo de tiempo para que cada uno de los participantes elaborase sus propios mecanismos de fallo, se realizó un trabajo colectivo de formulación de modos de fallo, redactándose en definitiva 14 modos de fallo que se describirán posteriormente

#### 5.10.3. Identificación de factores a favor y en contra de cada Modo de Fallo

Definidos los modos de fallo, se procedió a identificar una serie de factores que actúan a favor o en contra de que se desarrolle cada uno de los mecanismos que conducen a la rotura.

Estos factores complementan la definición del modo de fallo aportándole información adicional que facilitará el análisis cualitativo de los mismos, sobre el cual se comentará en el siguiente apartado.

A continuación se enuncia cada uno de los modos de fallos formulados en la sesión de trabajo, especificando los factores a favor y en contra que fueron identificados.

#### Modos de fallo bajo escenario hidrológico:

H-0:

Erosión interna en el contacto del núcleo de la presa con el estribo izquierdo por encima del Nivel de Aguas Normales, arrastre de la fracción fina, aumento del caudal de filtración formación de una brecha. Fallo de la presa.

Factores a Favor:

- Incertidumbre sobre los acabados de construcción en esa zona específica.
- Falta de Auscultación

Factores en Contra:

- Reducida carga hidráulica a esa cota.
- Existencia de filtros.
- No se ha observado indicios de comportamiento anómalo.

H-1:

Deslizamiento del estribo izquierdo del aliviadero bloqueando la sección del vertedero, pérdida de la capacidad de alivio, sobrevertido por coronación, erosión del espaldón de aguas abajo. Fallo de la Presa.

Factores a favor:

- Deslizamientos ocurridos en el estribo izquierdo documentados en la construcción.
- Ladera con pendiente elevada.
- Esbeltez de los muros.
- Falta de Auscultación
- Espacio detrás de los muros expuesto a acción ambiental.

Factores en contra:

- Se ha realizado obras de estabilización del talud (aunque hubieran fallado parcialmente)
- Los muros del aliviadero están anclados al macizo.

## H.2:

Deslizamiento del estribo izquierdo del aliviadero obstruyendo el canal de baja pendiente provocando un rebose hacia el cuerpo de presa en dicha sección. Erosión del espaldón de aguas abajo, Fallo de la Presa

Factores a favor:

- Deslizamientos ocurridos en el estribo izquierdo documentados en la construcción.
- Ladera con pendiente elevada.
- Esbeltez de los muros.
- Falta de Auscultación
- Espacio detrás de los muros expuesto a acción ambiental.

Factores en contra:

- Se ha realizado obras de estabilización del talud (aunque hubieran fallado parcialmente)
- Los muros del aliviadero están anclados al macizo.
- Posibilidad de lavado del material acumulado en el canal.

## H-3:

Erosión al pie del aliviadero debido a un vertido de gran magnitud, colapso del trampolín por socavación de su base, rotura de las losas del aliviadero, erosión regresiva hasta pie de presa, deslizamiento del espaldón de aguas abajo. Fallo de la Presa.

Factores a favor:

- Inexistencia de la protección con escollera del pie del lanzador.
- Duración prolongada del hidrograma de salida (166 horas)
- Material de relleno al pie de la presa altamente erosionable
- Falta de Auscultación
- Ya se ha registrado un proceso erosivo tras el primer alivio. (10% de la capacidad de la creciente de proyecto).

Factores en contra:

- Distancia considerable entre el estanque disipador y el pie de la presa. (más de 60 metros)
- El trampolín está dotado de dos dentellones

## H-4:

Volcamiento del muro derecho del aliviadero por efecto del macizo, flujo por detrás del muro derecho del aliviadero, erosión del material de relleno, rebose hacia el cuerpo de presa. Erosión del espaldón de aguas abajo, Fallo de la Presa.

Factores a favor:

- Esbeltez del macizo y del muro.

- Falta de Auscultación
- Espacio detrás del muros expuesto a acción ambiental.
- Incertidumbre sobre la calidad de los acabados de construcción.

Factores en contra:

- No se ha documentado algún comportamiento anómalo en este sentido.

Modos de fallo bajo escenario de operación normal:

Op-1

Erosión interna en el núcleo impermeable, falla de los filtros, arrastre de la fracción fina, aumento del caudal de filtración, Fallo de la presa.

Factores a favor:

- Incertidumbre sobre la calidad de la colocación del material en los últimos 25 metros.
- Incertidumbre sobre la capacidad de que el enraizamiento de los árboles presentes en el espaldón de aguas abajo pueda afectar el núcleo impermeable.
- Es de esperarse que la cota del embalse alcance niveles altos durante muchos días al año
- El proceso constructivo fue interrumpido en dos ocasiones.
- Falta de auscultación

Factores en contra:

- La presa posee filtros aguas arriba y aguas abajo del núcleo impermeable.
- El núcleo de la presa posee una sección bastante ancha, ya que fue proyectada para poder realizarse una segunda etapa.

Op-2

Erosión interna en cualquier plano de la cimentación, arrastre de la fracción fina, aumento del caudal de filtración, Fallo de la presa.

Factores a favor:

- Incertidumbre sobre la calidad de la colocación del material en los últimos 25 metros.
- Es de esperarse que la cota del embalse alcance niveles altos durante muchos días al año.
- El proceso constructivo fue interrumpido en dos ocasiones.  
Falta de auscultación

Factores en contra:

- La presa posee filtros aguas arriba y aguas abajo del núcleo impermeable.
- El núcleo de la presa posee en promedio una sección bastante ancha con respecto a la altura, ya que fue proyectada para poder realizarse una segunda etapa (recrecimiento)

- A lo largo de todo el eje de la presa se realizó una pantalla de inyecciones para impermeabilización.

#### Op-3

Desembalse rápido, falla por deslizamiento del espaldón de aguas arriba, pérdida de sustentación del núcleo impermeable, falla del núcleo Fallo de la presa.

Factores a favor:

- Incertidumbre sobre la calidad de la colocación del material en los últimos 25 metros.
- El proceso constructivo fue interrumpido en dos ocasiones.
- Falta de auscultación.

Factores en contra:

- Es difícilmente practicable un vaciado rápido en vista de la reducida capacidad de las descargas.
- La pendiente de este espaldón es bastante suave (1:2,5).
- Existe una berma de 34 metros a la mitad de la altura.
- El cálculo de la estabilidad para este efecto según el proyecto arroja un factor de seguridad de 1,4.

#### Op-4

Proceso erosivo desde el filtro de aguas abajo hacia el material aluvial, formación de un conducto, la erosión llega hasta el núcleo, aumenta el caudal de filtración, se genera una brecha, Fallo de la Presa.

Factores a favor:

- No hay indicios de que se hubiera colocado un material de transición entre el filtro y el material aluvial.
- Falta de auscultación

Factores en contra:

- Este efecto solo puede ocurrir en la zona de cimentación en donde el núcleo y el filtro tienen su espesor máximo.

#### Op-5

Asentamiento diferencial entre el núcleo y los espaldones, fracturación en el núcleo, erosión interna en el núcleo falla de los filtros, arrastre de la fracción fina, aumento del caudal de filtración, Fallo de la presa.

Factores a favor:

- Diferencia de compresibilidad entre el material de fundación del núcleo y de los espaldones.
- Falta de auscultación.

Factores en contra:

- No existen indicios de este comportamiento

### Modos de fallo bajo escenario sísmico:

#### S-1

Deslizamiento del espaldón de aguas arriba, pérdida de sustentación del núcleo impermeable, falla del núcleo Fallo de la presa

Factores a favor:

- Espaldón de materiales sueltos sujeto a posible deslizamiento.

Factores en contra:

- Pendiente suave del espaldón (1:2,5)

#### S-2

Deslizamiento del espaldón de aguas abajo, pérdida de sustentación del núcleo impermeable, falla del núcleo Fallo de la presa

Factores a favor:

- Espaldón de materiales sueltos sujeto a posible deslizamiento.

Factores en contra:

- Pendiente suave del espaldón (1:2,5)

#### S-3

Pérdida de cota en la coronación por asentamientos generados durante el sismo, sobrevertido, erosión del espaldón de aguas abajo, Fallo de la Presa

Factores a favor:

- La presa es de materiales sueltos y puede sufrir deformaciones considerables durante un evento sísmico.

Factores en contra:

- El resguardo entre en nivel de aguas normales y la coronación de la presa es de 14,5 metros

#### S-4

Deslizamiento masivo en una ladera del vaso de almacenamiento generando una ola de tal magnitud que produzca un sobrevertido, erosión del talud de aguas abajo y fallo de la presa.

Factores a favor:

- En los estribos de la presa se han documentado deslizamientos de laderas, este comportamiento puede presentarse en alguna ladera del vaso de almacenamiento.

Factores en contra:

- No se ha documentado algún comportamiento anómalo en este sentido.

#### 5.10.4. Identificación de necesidades de inspección vigilancia y auscultación

Durante el proceso de formulación de modos de fallo se identificaron las siguientes necesidades de inspección, vigilancia y auscultación. Las cuales se han asociado a los modos de fallo involucrados y se resumen en la Tabla 5.8

NECESIDAD DE INSPECCIÓN VIGILANCIA Y AUSCULTACIÓN	MODOS DE FALLO INVOLUCRADOS
Revisión de la geología y potencial de deslizamiento de la ladera izquierda del aliviadero.	H-1, H-2
Control topográfico frecuente de asentamientos de los espaldones de la presa.	OP-5
Revisión de la capacidad estructural de los muros del aliviadero a fin de determinar la carga que produciría su rotura.	H-1, H-2, H-4
Auscultación frecuente del estado de saturación del núcleo impermeable.	H-0, Op-1, Op-2
Captación y aforo de posibles filtraciones a través del cuerpo de presa.	H-0, Op-1, Op-2, Op-4
Verificación de los acabados de construcción y calidad de compactación y selección adecuada de los materiales de construcción del núcleo impermeable especialmente en el contacto con el estribo izquierdo.	H-0, Op-1, Op-2
Vigilancia de la evolución de los procesos de erosión en el estanque disipador.	H-3

**Tabla 5.8.** Necesidades de Inspección vigilancia y auscultación

#### 5.10.5. Evaluación cualitativa de Modos de Fallo.

Definidos los modos de fallos, la sesión de trabajo con en grupo se orientó al análisis cualitativo de los mismos, para ello se procedió a la clasificación por grado de importancia y a la jerarquización de los modos de fallo.

##### 5.10.5.1. Clasificación de los Modos de Fallo

Como parte inicial del análisis cualitativo, se propone la siguiente clasificación para los modos de fallo según grados del I al IV (Membrillera et al, 2005 [2]) que se describe a continuación:

##### Grado I:

Modos de fallo que claramente se consideren factibles al existir alguna condición o estado sintomático detectado, resultar la serie de eventos probables e implicar consecuencias potenciales importantes.

##### Grado II:

Modos de rotura considerados igualmente factibles, aunque con menores posibilidades de ocurrir o consecuencias reducidas.

##### Grado III:

Modos de fallo para los que la información disponible resulta, a todas luces, insuficiente aunque se estiman factibles y con consecuencias potenciales de magnitud elevada. Requieren una campaña de investigación urgente.

##### Grado IV:

Modos de rotura descartados y cuya aparición no se considera razonable.

Para establecer esta clasificación por grados, de los modos de fallo antes formulados, se sometió a votación entre los integrantes del grupo de trabajo y posteriormente, el facilitador asignó el grado correspondiente a cada modo de fallo en función del criterio más generalizado.

La votación para la asignación del grado de cada modo de fallo por cada integrante del equipo evaluador se muestra en la tabla 5.8.

Modos de Fallo	José Rosales	Ana Vilaplana	Javier Fluixá Sanmartin	José María Carrillo	Luis Chaparro	Luis García
	Asignación del Grado					
H-0	II, III	II	III	III	I	III
H-1	II	III	III	II	I	III-II
H-2	I	I	III	I	I	I
H-3	III	I	III	I	III	II
H-4	III	III	III	II	III	III-II
Op-1	II, III	II	III	II	III	III-II
Op-2	II, III	I	III	III	III	III-IV
Op-3	III, IV	IV	IV	IV	III	IV
Op-4	III, IV	III	IV	III	III	III-IV
Op-5	III	III	III	III	III	IV
S-1	II, III	II	III	IV	IV	III
S-2	II, III	II	III	IV	IV	III-IV
S-3	IV	II	IV	IV	IV	IV
S-4	IV	II	III	II	IV	III

**Tabla 5.9.** *Votación para la asignación de modos de fallo.*

Del análisis de la votación, se definió la siguiente clasificación que se muestra a continuación en la tabla 5.9.

Modo de Fallo	Grado
H-0	III
H-1	III
H-2	I
H-3	III
H-4	III
Op-1	II
Op-2	III
Op-3	IV
Op-4	III
Op-5	III
S-1	III
S-2	III
S-3	IV
S-4	IV

**Tabla 5.10.** *Clasificación definitiva de los modos de fallo*

#### 5.10.5.2. Jerarquización de los Modos de Fallo

Finalmente se propuso una jerarquización de los modos de fallo en función de la importancia asociada a la factibilidad de presentarse y la magnitud de las consecuencias.

Cada uno de los integrantes del grupo de trabajo propuso un orden de prioridad para los modos de fallo, se llevó a cabo un análisis de esta votación obteniéndose como clasificación definitiva el orden de prioridad que se muestra en la tabla 5.10.

ORDEN DE PRIORIDAD	
1	H-2
2	H-3
3	H-1
4	H-0
5	H-4
6	Op-1
7	Op-2
8	S-1
9	Op-4
10	Op-5
11	S-2
12	S-4
13	Op-3
14	S-3

**Tabla 5.11.** Orden de prioridad definitivo.

#### 5.10.5. Conclusiones del análisis cualitativo de Modos de Fallo

Efectuado el análisis cualitativo de los Modos de Fallo de la Presa Tres ríos, se determinó que el Modo de Fallo identificado como H-2, resultó ser el único de Grado I, y el primero en prioridad a juicio de todo el equipo evaluador.

Por otra parte queda de manifiesto que el escenario hidráulico es el más perjudicial para la seguridad de la presa, siendo el caso que los primeros 5 modos de fallo en la lista de prioridad sean todos de este tipo.

Esto induce a pensar que las acciones prioritarias en materia de mejoramiento de las condiciones de seguridad deben ir enfocadas al estado de conservación de los órganos de desagüe, a la adquisición de datos hidrometeorológicos que permitan estimar establecer sistemas de alerta que apoyen las operaciones de seguridad ante la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, al mantenimiento de la operatividad de los elementos electromecánicos, la alimentación eléctrica y la constante actualización del estado del conocimiento en materia de explotación de presas para capacitar de la manera más adecuada al personal de los equipos de explotación.

## Capítulo 6

### Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo de este estudio, arrojó información importante sobre el estado del tratamiento de la seguridad de presas en Venezuela. Constituye un aporte importante en esta materia ya que el protocolo de evaluación aquí propuesto es potencialmente la base para que se desarrolle en el país un marco legislativo técnico en referencia a un asunto de importancia prioritaria.

Sobre la formulación del protocolo de evaluación se puede comentar lo siguiente:

- La realización de este trabajo queda plenamente justificada en el hecho que no existe en el país un marco legislativo, o normativo a este respecto y en que han ocurrido incidentes de importantes consecuencias en los últimos años.
- La aplicabilidad y utilidad de los principios descritos en el protocolo de evaluación de la seguridad dependerá de un cambio en la estructura organizacional en relación al manejo de la seguridad de presas. Debe formalizarse la figura del equipo encargado de la explotación de la presa con responsabilidades definidas ante el Titular de la presa y ante la comunidad en general.
- Es indispensable recuperar la infraestructura de recogida de datos proveniente de la auscultación de todas las presas existentes y promover campañas de instrumentación adecuadas a las necesidades de cada embalse, las cuales serán determinadas en sucesivos análisis de la seguridad.
- Se debe instituir como buena práctica de la ingeniería la obligatoriedad de la realización de inspecciones técnicas y evaluaciones completas de la seguridad a intervalos de tiempo adecuados con las características de cada presa.
- Se debe potenciar el sistema de comunicaciones con los equipos de operación y explotación de los embalses a fin de orientar la toma de decisiones oportunas y la capacidad de respuesta en el tiempo adecuado ante la ocurrencia de situaciones de contingencia.
- El análisis complementario de modos de fallo es una herramienta de reciente aplicación en el mundo y que esta siendo introducida en este trabajo como un aspecto de innovación para contribuir al desarrollo de un estado del conocimiento más avanzado en el futuro.

A continuación se recopila de manera pormenorizada las recomendaciones emitidas en los distintos apartes de la evaluación de la seguridad de la presa Tres Ríos.

Efectuada la evaluación de la seguridad hidrológica – hidráulica, se recomienda lo siguiente:

- I. Construir a la brevedad posible la protección con enrocado al pie del lanzador del aliviadero a fin de prevenir que un proceso de erosión regresiva comprometa la estabilidad de esta estructura.
- II. Proteger con enrocado las laderas del estanque dissipador para evitar otros procesos erosivos que puedan afectar las casetas de válvulas o el pie de la presa.
- III. Inspeccionar periódicamente el estado del concreto en el canal rápido del aliviadero con la finalidad de detectar eventuales indicios de daños por cavitación
- IV. Completar la construcción de la descarga de fondo como ha sido prevista en el proyecto original, removiendo de ser posible la válvula mariposa a fin de disminuir las pérdidas de energía localizadas.
- V. Eliminar la restricción de apertura de la descarga de emergencia mejorando la aireación del conducto o removiendo la tubería anexa, siempre y cuando se prevean acciones para protección contra la erosión en la zona de impacto del chorro.

Del análisis de la seguridad estructural enuncian las siguientes recomendaciones:

- I. Realizar un estudio detallado del estado de saturación del núcleo impermeable. Validar los resultados obtenidos con las lecturas de los piezómetros instalados en el núcleo.
- II. Ampliar los estudios sísmicos y realizar un análisis probabilístico que permita determinar las intensidades de los terremotos de proyecto y terremoto extremo, asociados a los períodos de retorno de 1000 y 5000 años respectivamente. Verificar que los resultados obtenidos para las aceleraciones de diseño son compatibles con los criterios de la norma COVENIN para el diseño de edificaciones sismorresistentes.
- III. La estabilidad al deslizamiento debe ser recalculada para cada una de las situaciones de carga (normales, accidentales y extremas), definidas en esta evaluación. Se obtendrán los factores de seguridad para cada una de estas situaciones y se deba razonar si el nivel de seguridad es aceptable dada la categoría del embalse.
- IV. Se debe realizar un estudio del estado tenso-deformacional utilizando un método de elementos finitos, para reproducir el campo de esfuerzos y deformaciones y verificar si son compatibles con la estabilidad de la presa o la generación de un modo de fallo.
- V. Se debe estudiar el potencialidad de ocurrencia de fenómenos de licuefacción en los materiales del cuerpo de la presa y de la cimentación.
- VI. Se debe estudiar si el resguardo en coronación es suficiente para absorber eventuales asentamientos generados por el sismo

De la evaluación de la seguridad de las instalaciones electromecánicas de la presa tres Ríos se tiene lo siguiente:

- I. Construir a la brevedad posible la caseta de válvulas para la descarga de fondo según las indicaciones del proyecto, con el fin de recuperar control sobre esta descarga.
- II. Restituir a la brevedad posible la alimentación eléctrica y custodiar esa instalación. Cuando se construya la caseta de válvulas de la descarga de fondo, la misma estará dotada de accionamientos oleodinámicos similares al de la válvula de regulación, con lo cual el problema de la alimentación eléctrica seguirá presente, el accionamiento manual de estas válvulas es posible pero impráctico desde el punto de vista operacional.
- III. Adquirir como mínimo un grupo electrógeno portátil con capacidad para alimentar los sistemas electromecánicos de accionamiento de la válvula de regulación y de las que están previstas a futuro.
- IV. Es aconsejable realizar pruebas periódicas de apertura y cierre de cada una de las válvulas de control sin distinguir aquellas que tienen accionamientos oleodinámicos de aquellas que no.

De la evaluación de la seguridad de accesos y comunicaciones se enunciaron estas recomendaciones:

- I. Debe proyectarse y construirse un puente que haga practicable el acceso a ambos márgenes del río Palmar como mínimo durante el desagüe de la creciente de proyecto.
- II. Debe construirse el puente sobre el aliviadero tal y como está previsto en las especificaciones del proyecto a fin de hacer posible el acceso a la ladera izquierda del mismo.
- III. Construir una pasarela que de acceso desde la caseta de control de la válvula de regulación hacia las descargas de emergencia y descarga de fondo.
- IV. Debe mejorarse el sistema de comunicaciones entre el equipo de explotación y el titular por medio de telefonía y de ser posible conexión a Internet par poder transferir y recibir información relacionada con la gestión de la seguridad.

De la evaluación de la seguridad funcional se emitieron las siguientes recomendaciones:

- I. Debe designarse un equipo encargado de la explotación de la presa con funciones y responsabilidades bien definidas.
- II. Debe redactarse las normas de explotación y manuales de procedimientos a seguir por el equipo designado para la explotación.
- III. El equipo designado para la explotación debe contar con todos los recursos necesarios y poseer la reparación técnica suficiente para llevar a cabo las maniobras de los sistemas de desagüe tanto en condiciones de operación normal como en casos de contingencia.

De la formulación de los modos de fallo se identificaron las principales carencias de inspección, vigilancia y auscultación:

- I. Revisión de la geología y potencial de deslizamiento de la ladera izquierda del aliviadero.
- II. Control topográfico frecuente de asentamientos de los espaldones de la presa.
- III. Revisión de la capacidad estructural de los muros del aliviadero a fin de determinar la carga que produciría su rotura.
- IV. Auscultación frecuente del estado de saturación del núcleo impermeable.
- V. Captación y aforo de posibles filtraciones a través del cuerpo de presa.
- VI. Verificación de los acabados de construcción y calidad de compactación y selección adecuada de los materiales de construcción del núcleo impermeable especialmente en el contacto con el estribo izquierdo.
- VII. Vigilancia de la evolución de los procesos de erosión en el estanque disipador.

Como comentario final, la seguridad de presas es un tema de interés prioritario para todos los sectores de la sociedad, la seguridad no solo está ligada al concepto de los daños potenciales que pueda generar la rotura de un embalse. Particularmente Venezuela tiene una alta dependencia del sistema de embalses para sustentar la mayoría de los abastecimientos urbanos, generación de energía y regadíos. La propuesta técnica para la evaluación de la seguridad aquí enunciada, deberá acompañarse de un proceso de discusión con diferentes sectores de la sociedad para lograr un consenso sobre los factores de seguridad "aceptables" para cada tipo de presa. La implantación y seguimiento de una nueva política de gestión de la seguridad de embalses igualmente deberá ser una materia de interés general y de dominio público.

## Referencias

- [1] SORIANO, A., ESCUDER, I. El comportamiento de las presas y la gestión integral de su seguridad. Revista de Obras Públicas N°3.493, 2008
- [2] MEMBRILLERA, M., ESCUDER, I., GONZALEZ, J., ALTAREJOS, L. Aplicación del Análisis de Riesgos a la Seguridad de Presas. Editorial UPV, 2005.
- [3] BOWLES, D.S., ANDERSON, L.R. ANDGLOVER, T.F. A Role for Risk Assessment in Dam Safety Management, Proceedings of the Third International Conference HYDROPOWER 97, Trondheim, Norway, June, 1997.
- [5] MEMBRILLERA, M. Contribución a la Aplicación del Análisis y Declaración de Riesgos en Presas Españolas, Incluyendo Priorización de Inversiones. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia, 2007.
- [6] SUAREZ, L. Incidentes en presas de Venezuela. Editorial Arte, 2002.
- [7] DELLIOU P., Dam legislation in some European countries. Berga Editor DAM SAFETY Vol. 2. A.A Balkema. 1998.
- [8] HUGHES A., KITE P. Reservoir legislation in the U.K. past, present and future. Berga Editor DAM SAFETY Vol. 1. A.A Balkema. 1998.
- [9] LJΦGDT T. The new Norwegian regulations an guidelines on dams: Dam safety and uncertain habitat. Berga Editor DAM SAFETY Vol. 1. A.A Balkema. 1998.
- [10] LI.QIU Y. Legislation on dam safety In China. Berga Editor DAM SAFETY Vol. 1. A.A Balkema. 1998.
- [11] MELBINGER R. The Austrian approach to dam safety: A symbiosis of rules and engineering judgement. Berga Editor DAM SAFETY Vol. 1. A.A Balkema. 1998.
- [12] COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES (COVENIN), Norma Venezolana para Edificaciones Sismorresistentes 1756-1, 2001.
- [13] COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS (CNEGP). Guías Técnicas de Seguridad de Presas. N°1, Seguridad de Presas. 2005
- [14] COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS (CNEGP). Guías Técnicas de Seguridad de Presas. N°2, Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas. 2003.
- [15] VALLARINO E. Tratado Básico de Presas. Tomos I y II. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. 2001.

[16] COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS (CNEGP). Guías Técnicas de Seguridad de Presas. N°5, Aliviaderos y Desagües. 2003.

## **Anexo I**

### **Archivo Técnico, información catalogada.**

Contenido del Disco

1 – Archivo Técnico del Proyecto

1961 [Ingeniería de Suelos S.A]

#### A – Memoria (*ficheros .pdf*)

1. Índice
2. Memoria Técnica
3. Condiciones
4. Especificaciones I al V
5. Especificaciones VI al XI
6. Especificaciones XII al XIV
7. Especificaciones XV
8. Especificaciones XVI al XVIII
9. Especificaciones XIX al XX
10. Especificaciones XX al XXI
11. Especificaciones XXII al XXIV
12. Especificaciones C1 y C2
13. Especificaciones C3 y C4
14. Especificaciones C5 al C8
15. Cantidades de Obra

#### B – Planos (*ficheros .pdf*)

0. Índice
1. Situación
2. Planta General

3. Hidrológico
4. Plano de la Zona
5. Exploración
6. Trincheras
7. Préstamos
8. Caracterización de los Préstamos
9. 10. 11. Columnas de Perforación
12. Columnas de Taladros
13. Replanteos
14. Excavaciones Área Presa
15. Plan de cementación
16. Planta de la Presa
17. Secciones de la Presa
18. 19. 20. Túnel de desviación Entrada, Salida, Secciones
21. 22. Salida para Riego I y II
23. al 29. Toma, Planta, Secciones, Estructura, Detalles, Rejas, Compuertas y Equipos.
30. al 36. Aliviadero, Geometría, Excavaciones, Detalles Puente
37. Túnel Acueducto
38. 39 Cámara de Disipación
40. Tanquilla de conexión
41. al 45. Tubería de Salida
46. Mediciones de Asentamiento.

1982 [Proyecta S.A]

A – Memoria (*ficheros .pdf*)

Volumen 1:

Memoria Técnica (Dividida en 9 ficheros)

Volumen 2:

Revisión y Actualización Geológica y Geotécnica (Dividida en 4 ficheros)

Volumen 3:

Especificaciones de Construcción y Cantidades de Obra (Dividida en 8 ficheros)

1991 [Ing. Luis Miguel Suárez Villar]

A – Memoria (*ficheros .pdf*)

Memoria Técnica del Proyecto de la Presa (Dividida en 5 Ficheros)

B – Planos (ficheros .tif)

1. Sección Típica
2. Planta General
3. Curva Granulométrica
4. Instrumentación
5. Sección Longitudinal
6. Plano Estribo Derecho
7. Detalles Instrumentación e Inyecciones

2 – Archivo Técnico de la Construcción

2004 – 2006 [INGEOTEC]

A – Informes de Actividades (ficheros .pdf)

Informes mensuales desde Septiembre de 2004 hasta Abril de 2005  
(8 ficheros en total)

B – Geología del Estribo Derecho (ficheros .pdf)

Informe de Levantamiento Geológico del estribo Derecho

C – Ensayos de Laboratorio (ficheros .pdf)

Ensayos Granulométricos realizados

2006 [Ing. Luis Miguel Suárez]

Informe referente a la puesta en carga programada realizada en  
Noviembre de 2006. (1 fichero formato .pdf)

2007 [Ing. Arturo Marcano]

Informe referente a la inspección visual a la culminación de las obras en  
Octubre de 2007 (6 ficheros formatos .pdf .doc y .ppt)

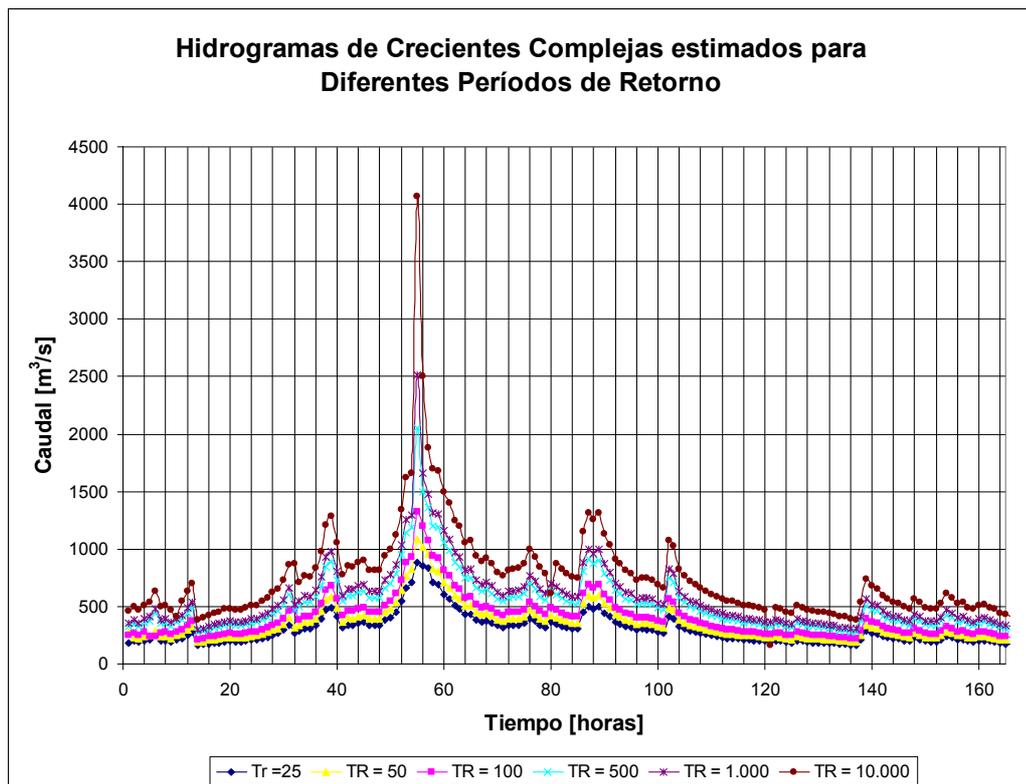
## Anexo I

### Hidrogramas de Diseño

Contenido del Disco

1 – Hidrograma de Crecientes Complejas Aisladas:

A continuación se presentan los hidrogramas de las crecientes aisladas para cada período de retorno considerado.



**Figura A2.1.** Hidrogramas de crecientes complejas aisladas.

A continuación la Tabla A2.1 se contiene los valores de gasto horario para cada período de retorno:

<b>Hidrogramas de Crecientes Complejas para Distintos Períodos de Retorno</b>						
<b>Tiempo Horas</b>	<b>Periodo de Retorno Años</b>					
	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>10000</b>
1	186	281	250	324	356	461
2	198	233	268	348	383	497
3	188	221	253	327	360	466
4	205	241	277	359	395	513
5	214	252	240	377	415	540
6	246	291	235	438	483	630
7	202	237	272	351	386	499
8	205	240	275	355	391	506
9	193	225	257	330	362	467
10	209	245	280	361	397	413
11	220	258	296	382	420	544
12	251	296	340	443	488	635
13	274	324	373	487	536	698
14	163	189	215	274	300	384
15	170	196	223	285	312	399
16	177	206	235	301	331	425
17	183	213	244	314	345	445
18	186	218	249	321	352	455
19	194	227	260	335	368	476
20	198	231	265	341	374	484
21	194	227	259	332	364	469
22	196	228	260	333	365	470
23	200	233	267	343	377	486
24	209	244	278	358	393	506
25	211	246	281	362	397	512
26	225	263	300	387	425	549
27	234	274	314	404	445	575
28	252	296	338	437	480	621
29	265	311	356	461	506	656
30	293	344	394	510	561	727
31	338	400	460	601	662	863
32	273	320	466	472	518	870
33	288	337	385	498	546	707
34	310	364	417	540	593	769
35	309	361	414	534	586	758
36	337	395	454	588	646	837
37	390	459	528	686	755	981
38	467	554	641	840	927	1212
39	492	585	677	890	983	1287
40	413	488	562	734	809	1055
41	312	366	420	545	599	777
42	341	401	460	597	657	853
43	338	397	456	591	650	843
44	353	415	477	619	681	883
45	360	423	486	631	694	901
46	334	391	447	576	632	816

47	337	392	448	575	630	811
48	339	395	450	579	635	818
49	381	446	511	661	725	939
50	405	475	544	704	773	1002
51	456	534	611	790	867	1122
52	545	639	732	946	1039	1346
53	659	772	885	1144	1256	1626
54	711	823	933	1189	1299	1663
55	881	1083	1324	2054	2516	4065
56	858	1020	1202	1500	1658	2500
57	835	957	1079	1360	1482	1883
58	707	823	938	1204	1319	1699
59	689	806	921	1187	1303	1683
60	609	713	817	1055	1159	1500
61	569	667	764	987	1084	1404
62	506	593	680	879	965	1250
63	484	568	651	843	926	1201
64	432	505	578	747	820	1060
65	432	506	581	751	826	1070
66	384	449	514	663	727	940
67	367	429	490	631	692	893
68	376	440	503	650	713	923
69	357	418	478	617	677	875
70	333	388	442	567	622	801
71	321	373	425	544	596	767
72	339	395	451	580	636	820
73	338	395	451	581	637	822
74	340	398	456	589	646	836
75	351	412	473	613	674	874
76	396	466	536	698	768	999
77	370	436	501	650	715	929
78	339	398	456	590	649	841
79	320	375	430	556	610	790
80	362	426	490	638	702	813
81	346	407	468	609	670	871
82	329	387	444	576	634	823
83	315	370	425	551	605	785
84	306	360	412	533	586	760
85	305	357	409	529	581	753
86	448	531	613	802	884	1154
87	501	596	690	907	1001	1311
88	481	572	662	871	961	1259
89	500	595	689	906	1000	1311
90	443	524	604	789	869	1133
91	412	485	558	727	800	1040
92	366	430	494	641	705	915
93	349	410	470	610	671	870
94	327	384	440	570	626	811
95	320	375	430	556	611	791
96	299	350	400	516	566	731
97	303	355	407	526	577	747
98	302	353	406	526	578	749

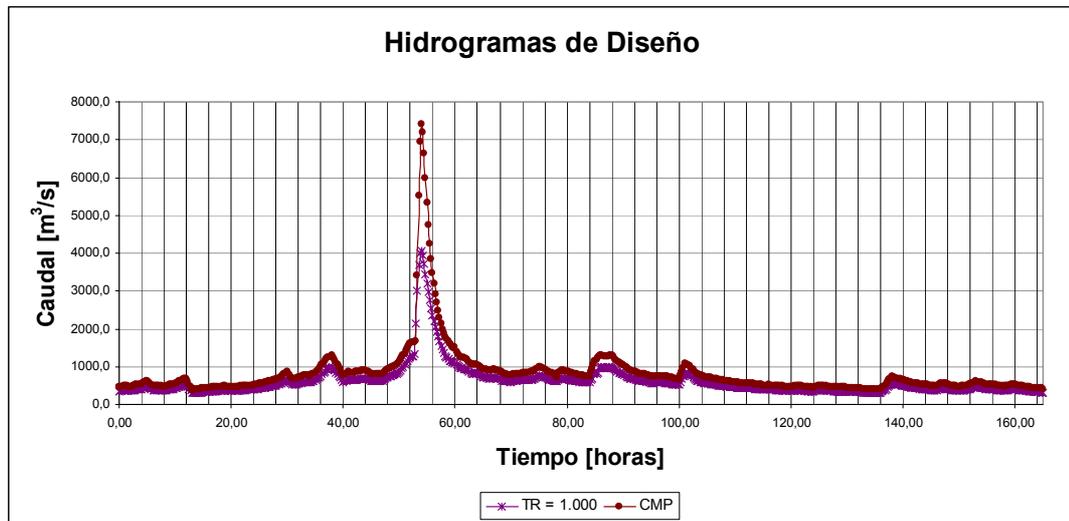
99	296	347	398	514	565	732
100	281	328	376	485	532	688
101	271	317	363	468	514	665
102	413	491	569	747	825	1079
103	394	468	541	709	783	1024
104	326	385	443	578	636	828
105	305	359	412	535	589	765
106	287	337	387	502	551	715
107	279	327	376	487	535	695
108	266	312	358	462	508	658
109	257	301	345	446	490	634
110	246	288	330	426	468	606
111	237	278	318	410	450	582
112	230	270	309	398	438	566
113	224	262	300	387	425	549
114	225	263	301	388	426	550
115	217	254	290	374	411	530
116	211	245	280	359	393	507
117	212	247	282	363	398	513
118	206	249	275	354	388	501
119	201	235	269	346	380	494
120	198	230	262	335	368	473
121	195	227	259	331	363	466
122	203	237	271	349	383	494
123	200	233	266	342	375	484
124	189	220	251	322	353	454
125	185	216	246	315	346	445
126	205	240	275	356	391	506
127	199	233	266	344	378	489
128	190	222	254	328	360	466
129	187	219	250	322	354	457
130	186	217	249	320	352	455
131	184	215	246	317	348	449
132	181	211	241	309	340	438
133	180	209	239	306	336	432
134	174	202	229	292	320	410
135	172	200	227	290	318	408
136	167	194	220	280	307	393
137	165	191	217	277	303	388
138	216	253	290	376	413	536
139	285	338	390	511	563	736
140	267	315	363	473	521	679
141	259	305	352	458	504	656
142	239	280	322	417	459	595
143	228	268	307	397	436	565
144	219	256	294	379	417	539
145	216	253	290	374	410	531
146	204	238	272	351	385	498
147	198	231	264	340	374	482
148	226	266	306	397	437	567
149	215	253	290	375	413	535
150	197	231	264	341	375	485

151	195	228	261	337	370	478
152	195	229	263	340	373	484
153	211	248	285	370	407	529
154	239	283	326	425	468	611
155	227	268	309	403	444	578
156	209	246	283	367	404	524
157	214	251	290	376	414	538
158	198	232	266	345	379	491
159	193	226	259	335	369	478
160	203	239	275	357	393	510
161	206	242	279	362	399	518
162	197	232	266	345	380	493
163	192	225	258	334	368	476
164	180	211	242	312	343	444
165	176	206	236	305	334	432
166	171	200	228	294	323	417

**Tabla A2.1.** *Gasto horario de los hidrogramas de crecientes aisladas para cada período de retorno.*

## 2 – Hidrogramas de Diseño:

Hidrogramas de diseño para la Creciente Extrema y la Creciente de Proyecto:



**Figura A2.2.** Hidrogramas de las crecientes de diseño.

A continuación en la tabla A2.2, se presentan los gastos a intervalo de 15 minutos para la Creciente de Proyecto y la Creciente Extrema (CMP)

<b>Hidrogramas de Diseño</b>		
<b>Tiempo Horas</b>	<b>TR</b>	
	<b>1000</b>	<b>CMP</b>
0.00	355.9	462
0.25	362.6	470
0.50	369.0	479
0.75	375.0	488
1.00	382.0	497
1.25	376.0	489
1.50	371.0	481
1.75	365.0	474
2.00	359.7	466
2.25	368.0	478
2.50	377.0	489
2.75	386.0	501
3.00	395.0	513
3.25	400.0	520
3.50	405.0	526
3.75	410.0	533
4.00	415.0	540
4.25	432.0	562
4.50	449	585
4.75	465	607
5.00	482	630

5.25	458	597
5.50	434	564
5.75	409	532
6.00	385	499
6.25	386	501
6.50	388	502
6.75	389	504
7.00	390	506
7.25	383	496
7.50	376	486
7.75	369	477
8.00	362	467
8.25	370	479
8.50	379	490
8.75	388	501
9.00	396	513
9.25	402	520
9.50	408	528
9.75	414	536
10.00	420	544
10.25	437	566
10.50	453	589
10.75	470	612
11.00	488	635
11.25	500	651
11.50	512	667
11.75	524	682
12.00	536	697
12.25	477	620
12.50	418	541
12.75	358	462
13.00	299	384
13.25	302	387
13.50	305	391
13.75	308	395
14.00	311	399
14.25	316	406
14.50	321	412
14.75	325	419
15.00	331	425
15.25	334	430
15.50	337	435
15.75	341	440
16.00	344	444
16.25	346	447
16.50	348	450
16.75	350	453
17.00	352	455
17.25	356	460
17.50	360	466
17.75	364	471
18.00	368	476

18.25	369	478
18.50	371	480
18.75	372	482
19.00	374	484
19.25	371	480
19.50	369	477
19.75	366	473
20.00	364	469
20.25	364	467
20.50	365	470
20.75	365	470
21.00	365	470
21.25	368	474
21.50	370	478
21.75	373	482
22.00	376	486
22.25	380	491
22.50	384	496
22.75	388	501
23.00	392	506
23.25	393	507
23.50	394	509
23.75	395	510
24.00	396	511
24.25	403	521
24.50	410	530
24.75	417	540
25.00	425	549
25.25	429	555
25.50	434	562
25.75	439	568
26.00	444	575
26.25	453	586
26.50	462	598
26.75	471	610
27.00	480	621
27.25	486	630
27.50	493	638
27.75	499	647
28.00	506	656
28.25	520	674
28.50	533	691
28.75	547	709
29.00	561	727
29.25	586	761
29.50	611	795
29.75	636	829
30.00	661	863
30.25	625	814
30.50	590	766
30.75	554	718
31.00	518	670

31.25	525	679
31.50	532	688
31.75	539	697
32.00	546	706
32.25	558	722
32.50	569	738
32.75	581	753
33.00	593	769
33.25	591	766
33.50	589	763
33.75	587	761
34.00	586	758
34.25	601	778
34.50	616	798
34.75	630	817
35.00	645	837
35.25	673	873
35.50	700	909
35.75	727	945
36.00	754	981
36.25	797	1039
36.50	840	1096
36.75	883	1154
37.00	926	1212
37.25	940	1231
37.50	954	1249
37.75	968	1268
38.00	982	1287
38.25	939	1229
38.50	895	1171
38.75	852	1113
39.00	808	1054
39.25	756	985
39.50	703	915
39.75	651	846
40.00	598	777
40.25	613	796
40.50	627	815
40.75	642	834
41.00	656	853
41.25	655	850
41.50	653	848
41.75	651	845
42.00	649	843
42.25	657	853
42.50	665	863
42.75	672	873
43.00	680	883
43.25	683	888
43.50	687	892
43.75	690	896
44.00	693	901

44.25	678	880
44.50	662	858
44.75	647	837
45.00	631	816
45.25	631	815
45.50	630	814
45.75	630	812
46.00	629	811
46.25	631	813
46.50	632	815
46.75	633	816
47.00	634	818
47.25	657	848
47.50	680	878
47.75	702	908
48.00	725	939
48.25	737	954
48.50	749	970
48.75	761	986
49.00	773	1001
49.25	796	1032
49.50	820	1062
49.75	843	1092
50.00	867	1122
50.25	910	1178
50.50	953	1234
50.75	996	1290
51.00	1039	1346
51.25	1093	1416
51.50	1147	1486
51.75	1201	1556
52.00	1255	1626
52.25	1266	1635
52.50	1277	1644
52.75	1345	1654
53.00	2148	1663
53.25	3023	3396
53.50	3677	5513
53.75	4003	6946
54.00	4051	7422
54.25	3924	7208
54.50	3706	6647
54.75	3457	5978
55.00	3206	5322
55.25	2968	4735
55.50	2748	4243
55.75	2548	3834
56.00	2367	3487
56.25	2204	3188
56.50	2054	2925
56.75	1915	2690
57.00	1785	2479

57.25	1666	2293
57.50	1555	2133
57.75	1453	1997
58.00	1361	1884
58.25	1277	1792
58.50	1230	1721
58.75	1194	1663
59.00	1158	1612
59.25	1139	1566
59.50	1121	1521
59.75	1102	1476
60.00	1084	1530
60.25	1054	1382
60.50	1024	1331
60.75	994	1288
61.00	965	1250
61.25	955	1238
61.50	945	1225
61.75	936	1213
62.00	926	1201
62.25	899	1165
62.50	873	1130
62.75	846	1095
63.00	819	1060
63.25	821	1062
63.50	822	1065
63.75	824	1067
64.00	825	1069
64.25	800	1037
64.50	776	1005
64.75	751	972
65.00	727	940
65.25	718	928
65.50	709	916
65.75	700	905
66.00	691	893
66.25	697	900
66.50	702	908
66.75	707	915
67.00	713	922
67.25	704	911
67.50	695	899
67.75	685	887
68.00	676	875
68.25	633	856
68.50	649	838
68.75	635	819
69.00	622	801
69.25	615	792
69.50	609	784
69.75	602	775
70.00	596	767

70.25	606	780
70.50	615	793
70.75	625	806
71.00	635	819
71.25	636	820
71.50	636	821
71.75	636	821
72.00	636	822
72.25	639	825
72.50	641	829
72.75	643	833
73.00	646	836
73.25	653	846
73.50	659	855
73.75	666	864
74.00	673	873
74.25	697	905
74.50	720	936
74.75	744	967
75.00	768	999
75.25	754	981
75.50	741	964
75.75	728	946
76.00	715	929
76.25	698	907
76.50	681	880
76.75	665	863
77.00	648	841
77.25	639	828
77.50	629	815
77.75	619	802
78.00	610	790
78.25	633	720
78.50	655	851
78.75	678	882
79.00	701	913
79.25	693	902
79.50	685	892
79.75	677	881
80.00	669	871
80.25	660	859
80.50	651	847
80.75	642	835
81.00	633	823
81.25	626	813
81.50	619	804
81.75	612	795
82.00	605	785
82.25	600	779
82.50	595	772
82.75	590	766
83.00	586	759

83.25	584	758
83.50	583	756
83.75	582	754
84.00	581	753
84.25	656	853
84.50	673	953
84.75	807	1053
85.00	883	1154
85.25	812	1193
85.50	842	1232
85.75	971	1272
86.00	1001	1311
86.25	991	1298
86.50	961	1285
86.75	971	1272
87.00	961	1259
87.25	970	1272
87.50	980	1285
87.75	990	1298
88.00	1000	1311
88.25	967	1266
88.50	934	1222
88.75	901	1177
89.00	868	1133
89.25	851	1110
89.50	834	1086
89.75	816	1063
90.00	799	1040
90.25	775	1009
90.50	752	978
90.75	728	946
91.00	704	915
91.25	696	904
91.50	687	892
91.75	679	881
92.00	670	870
92.25	659	855
92.50	648	840
92.75	636	826
93.00	625	811
93.25	622	806
93.50	618	801
93.75	614	796
94.00	611	791
94.25	599	776
94.50	588	761
94.75	577	746
95.00	565	731
95.25	568	735
95.50	571	739
95.75	574	743
96.00	577	747

96.25	577	747
96.50	577	748
96.75	577	748
97.00	577	749
97.25	574	744
97.50	571	740
97.75	568	736
98.00	565	732
98.25	556	721
98.50	548	710
98.75	540	699
99.00	532	688
99.25	527	682
99.50	523	676
99.75	518	671
100.00	514	665
100.25	591	768
100.50	669	872
100.75	746	976
101.00	824	1079
101.25	814	1065
101.50	803	1051
101.75	793	1037
102.00	782	1024
102.25	745	975
102.50	709	926
102.75	672	877
103.00	636	828
103.25	624	812
103.50	612	797
103.75	600	781
104.00	589	765
104.25	579	753
104.50	570	740
104.75	560	728
105.00	551	715
105.25	547	710
105.50	543	705
105.75	539	700
106.00	535	695
106.25	528	685
106.50	521	676
106.75	514	667
107.00	508	658
107.25	503	652
107.50	498	646
107.75	494	640
108.00	489	633
108.25	484	627
108.50	479	620
108.75	473	613
109.00	468	606

109.25	462	600
109.50	459	594
109.75	454	588
110.00	450	582
110.25	446	578
110.50	443	574
110.75	440	570
111.00	437	566
111.25	434	562
111.50	431	557
111.75	428	553
112.00	425	549
112.25	425	549
112.50	425	550
112.75	425	550
113.00	425	550
113.25	421	545
113.50	418	540
113.75	414	535
114.00	410	530
114.25	406	524
114.50	402	518
114.75	397	512
115.00	393	506
115.25	394	508
115.50	395	510
115.75	396	511
116.00	397	513
116.25	395	510
116.50	393	507
116.75	390	504
117.00	388	501
117.25	386	499
117.50	384	496
117.75	382	493
118.00	380	491
118.25	376	486
118.50	373	482
118.75	370	477
119.00	367	473
119.25	366	471
119.50	365	469
119.75	363	467
120.00	362	466
120.25	367	463
120.50	372	480
120.75	377	487
121.00	382	494
121.25	380	491
121.50	378	489
121.75	376	486
122.00	375	484

122.25	369	476
122.50	363	469
122.75	358	461
123.00	352	454
123.25	351	452
123.50	349	450
123.75	347	448
124.00	345	445
124.25	357	460
124.50	368	475
124.75	379	491
125.00	390	506
125.25	387	501
125.50	384	487
125.75	380	493
126.00	377	489
126.25	373	483
126.50	368	477
126.75	364	471
127.00	360	456
127.25	358	463
127.50	356	461
127.75	355	459
128.00	353	457
128.25	353	456
128.50	352	456
128.75	352	455
129.00	352	455
129.25	350	453
129.50	349	452
129.75	348	450
130.00	347	449
130.25	345	446
130.50	343	443
130.75	341	440
131.00	339	438
131.25	338	436
131.50	337	435
131.75	336	433
132.00	335	432
132.25	331	426
132.50	327	421
132.75	323	416
133.00	319	410
133.25	319	410
133.50	318	409
133.75	318	409
134.00	318	406
134.25	315	404
134.50	312	400
134.75	309	397
135.00	306	393

135.25	305	391
135.50	304	390
135.75	303	389
136.00	302	388
136.25	330	425
136.50	358	462
136.75	385	499
137.00	413	536
137.25	450	586
137.50	488	636
137.75	525	686
138.00	563	736
138.25	552	722
138.50	542	707
138.75	531	693
139.00	521	679
139.25	517	673
139.50	512	669
139.75	508	662
140.00	504	656
140.25	491	641
140.50	481	626
140.75	470	610
141.00	458	595
141.25	453	587
141.50	447	580
141.75	441	572
142.00	436	565
142.25	431	558
142.50	426	552
142.75	421	545
143.00	416	539
143.25	415	537
143.50	413	535
143.75	411	533
144.00	410	531
144.25	404	522
144.50	397	514
144.75	391	506
145.00	385	498
145.25	382	494
145.50	379	490
145.75	376	486
146.00	373	482
146.25	389	503
146.50	405	524
146.75	420	545
147.00	436	567
147.25	430	559
147.50	424	551
147.75	418	543
148.00	412	535

148.25	403	523
148.50	393	510
148.75	384	498
149.00	375	485
149.25	373	483
149.50	372	482
149.75	371	480
150.00	369	478
150.25	370	479
150.50	371	481
150.75	372	482
151.00	373	484
151.25	381	495
151.50	390	506
151.75	398	517
152.00	407	528
152.25	422	549
152.50	437	570
152.75	453	590
153.00	468	611
153.25	462	603
153.50	456	595
153.75	450	586
154.00	444	578
154.25	433	565
154.50	423	551
154.75	413	538
155.00	403	524
155.25	406	527
155.50	408	531
155.75	411	534
156.00	413	537
156.25	405	526
156.50	396	514
156.75	387	503
157.00	379	491
157.25	376	488
157.50	373	484
157.75	371	481
158.00	368	477
158.25	374	486
158.50	380	494
158.75	386	502
159.00	392	510
159.25	394	512
159.50	395	514
159.75	397	516
160.00	398	518
160.25	393	512
160.50	389	505
160.75	384	499
161.00	379	493

161.25	376	489
161.50	373	485
161.75	370	480
162.00	367	476
162.25	361	468
162.50	355	460
162.75	349	452
163.00	343	444
163.25	340	441
163.50	338	438
163.75	336	435
164.00	334	432
164.25	331	428
164.50	328	424
164.75	325	421
165.00	322	417

**Figura A2.3.** Gastos de los hidrogramas de diseño a un intervalo de 15 minutos