

OBJETIVOS

GENERALES

Analizar e interpretar para un caso concreto, la información disponible del registro instrumental geotécnico, como medio de validación del diseño de la estructura construida.

ESPECÍFICOS

- A) Definir las variables geotécnicas que son viables de instrumentar y de uso común.
 - B) Describir la tipología básica de instrumentos para medición de variables en aplicaciones geotécnicas.
 - C) Comparar alternativas de dispositivos para la medición de una misma variable.
 - D) Explorar metodologías para tratamiento y depuración de datos correspondientes a registros instrumentales.
 - E) Ordenar, clasificar y procesar la información instrumental disponible del proyecto hidroeléctrico MIEL I.
 - F) Explorar los conceptos y modelos que rigen el comportamiento de las variables disponibles en el registro instrumental del proyecto hidroeléctrico MIEL I
-

G) Evaluar el comportamiento de los registros instrumentales disponibles del proyecto hidroeléctrico MIEL I.

METODOLOGÍA

La *Figura 0-1* muestra las actividades básicas que se realizaron para el desarrollo de este trabajo.

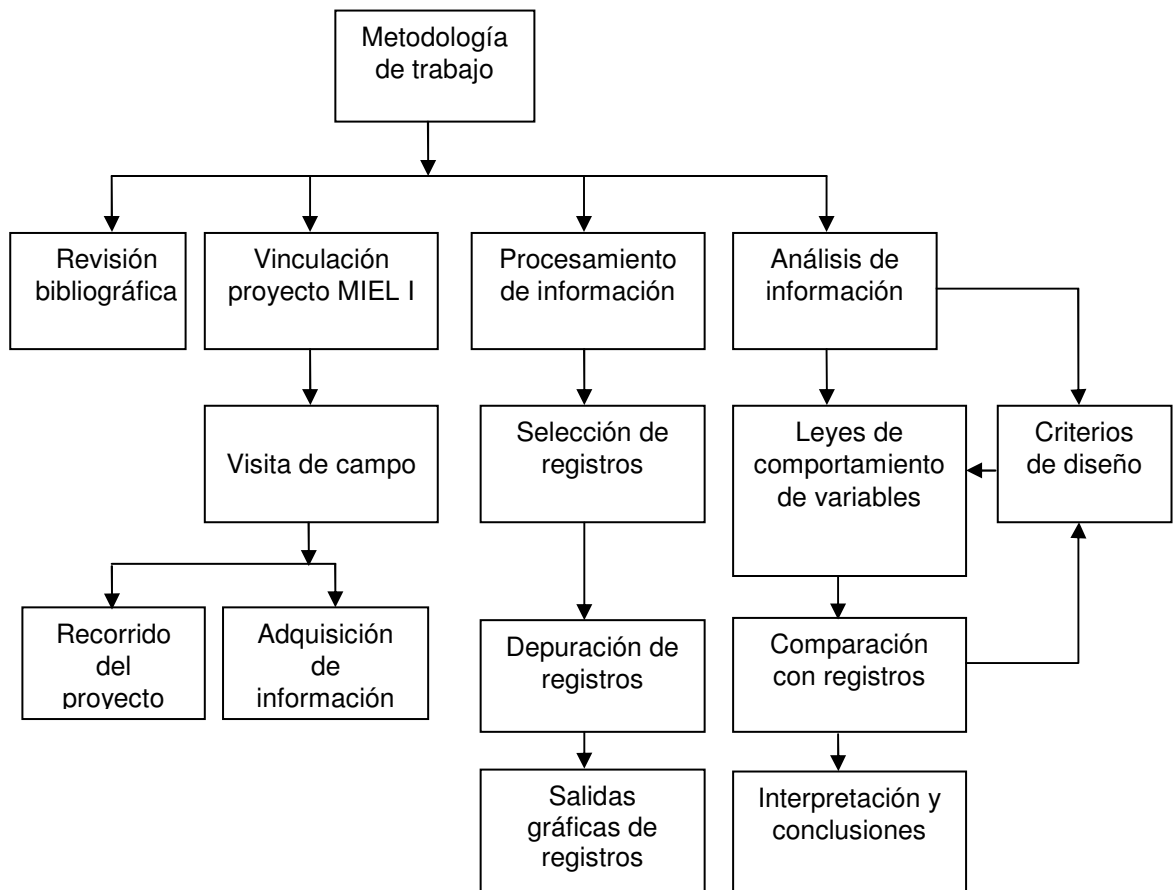


Figura 0-1: Metodología de trabajo

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Como primer paso y durante gran parte del desarrollo del proyecto se realizó la revisión bibliográfica, para desarrollo teórico del proyecto. Incluyendo los siguientes tópicos en la investigación:

- a) Tipología de instrumentación
- b) Características de los instrumentos
- c) Aplicaciones de instrumentos
- d) Metodologías probabilísticas y/o estadísticas utilizadas en ingeniería
- e) Método para depuración de datos
- f) Teoría de infiltración en medios porosos
- g) Comportamiento deformacional de diaclasas

VINCULACIÓN PROYECTO MIEL I

Se propició el vínculo con el proyecto hidroeléctrico MIEL I para obtener acceso a las instalaciones y conocer las obras que componen el proyecto y el detalle sobre el sistema de instrumentación empleado. Así mismo, se adquirió información del registro instrumental, haciendo especial atención en los dispositivos ubicados en el cuerpo de la presa.

PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

Se seleccionaron los registros de monitoreo de la presa representativos y solamente aquellos que son utilizables en este momento o procesables dentro del tiempo de ejecución de este trabajo.

Cada registro instrumental utilizado ha sido depurado estadísticamente, para descartar los valores atípicos que enmascaraban el comportamiento de las variables.

Al final de la etapa de depuración se han generado salidas gráficas, para realizar las interpretaciones del modelo.

ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

La información de las fases previas se ha reunido, añadiendo el marco teórico de comportamiento esperado para los registros disponibles y considerando los criterios de diseño correspondientes.

En la comparación con los registros se ha efectuado un proceso iterativo para definir el comportamiento de la presa en torno al registro instrumental disponible.

ALCANCE

El estudio sobre la tipología y la caracterización de los instrumentos que es abordada en la primera parte de este documento se orienta únicamente a los dispositivos de uso común en el medio, sin embargo se hace una mención sobre las tecnologías que se están empleando mundialmente en la actualidad, en la sección del estado del arte.

La evaluación de los registros instrumentales de la presa Pantágoras se ha realizado de forma parcial, limitados por la información disponible en este momento. Es importante considerar que una buena parte del registro se encuentra inutilizable por: la presencia generalizada de valores anómalos dentro de las series, atribuibles a los dispositivos y lapsos de tiempo sin información por dificultades en el proceso de adquisición de datos.

En congruencia con la evaluación parcial de los registros, el marco teórico para la interpretación se desarrolla en las áreas que se necesitan para el razonamiento particular con los registros disponibles.

El aporte particular que se ha logrado con este documento es la comprensión cualitativa de la evolución de registros piezométricos en los últimos años de operación de la presa Pantágoras y la presentación de herramientas estadísticas que pueden ser utilizadas para la depuración y tratamiento del resto de registros una vez que sean rescatadas sus historias.

1. GENERALIDADES DE LA INSTRUMENTACIÓN

1.1. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

El nacimiento de la instrumentación puede quizás asociarse al monitoreo de estructuras de retención de agua, que data de las primeras décadas del siglo XIX, cuando en Europa los ingenieros de aquella época realizaban labores artesanales para observar los niveles de los embalses y los desplazamientos en la cresta de las estructuras. A partir de entonces los avances en instrumentación por lo general fueron de la mano precisamente con el desarrollo de la ingeniería de presas.

Todo ese tramo inicial de la historia que comprende la aparición de los dispositivos de tipo mecánico, electromecánico y electrónico en su orden, datado aproximadamente hasta la década de los 90 (siglo pasado) puede ser consultada en (ASCE, 2000). Es muy relevante en esta reseña el hecho de señalar que a partir de un período de tiempo entre 1930 y 1970 fue desarrollada mucha de la instrumentación de la forma en la cual se conoció por lo menos hasta el fin del siglo pasado; es decir, que las novedades posteriores a dicho período se centraron en la forma de adquisición de los datos más que en el desarrollo de nuevos dispositivos.

Actualmente resulta demasiado ambicioso tratar de describir en términos globales donde nos encontramos exactamente en el tema de instrumentación y su aplicación en la geotecnia, por las amplias particularidades en aplicación que han surgido con el paso de los años; sin embargo de una forma prudente, es posible expresar en términos de actualidad, lo siguiente:

Si bien fue desde la década de los 40 del siglo pasado cuando se reconoció la relación entre las características dieléctricas de los materiales del subsuelo y el contenido de humedad de éstos y fue en la década de los 60 que se logró probar la tecnología que se basa en este concepto bajo el nombre de TDR (Time Domain Reflectometry por sus siglas en inglés). Recientemente su aplicación inicial para la determinación del contenido de humedad en el subsuelo, se ha ampliado al estudio de superficies de falla en laderas (Dowding, y otros, 1988; Dowding, y otros, 1994), a la determinación de cargas piezométricas (Dowding, y otros, 1996) y a la medición de cantidades de precipitación (Young, 2003).

De igual forma la tecnología de emisión acústica (AE) fue abordada desde el siglo pasado, sin embargo los avances más contundentes para la aplicación en el monitoreo de laderas se han expuesto recientemente según Dunnicliff (2005) en las publicaciones de (Koerner, y otros, 1981; Dixon, y otros, 2003).

En 1997 se introdujo la tecnología SMART (medición de elongaciones para determinar tensión de elementos de refuerzo) para monitorear el comportamiento de anclajes utilizados en la estabilización tanto de cortes superficiales como en subterráneos (Hyett, y otros, 1997).

Para el monitoreo de desplazamientos se está experimentando actualmente con éxito la tecnología de Escaneo Láser Terrestre (TLS) y generación de superficies basada en Interferometría SAR (GBInSAR), puede verse su aplicación en (Van, y otros, 2006; Monserrat, y otros, 2008; Bernardini, y otros, 2007).

En el tema de medición de presiones intersticiales, desde finales de la década anterior ha emergido una nueva generación de piezómetros capaces de medir presiones de poro en succión (Dunnicliff, 2003 (a)), esto ha resultado muy atrayente para el estudio del comportamiento de suelos parcialmente saturados.

Recientemente se ha desarrollado un medidor de deformaciones llamado MESHG (medidor de deformaciones electrolítico modificado), que se muestra como una opción económica, de facilidad en instalación y lectura, para la medición de deformaciones en refuerzos geosintéticos embebidos en el suelo y la determinación indirecta de los esfuerzos de tensión a los que se somete el refuerzo (Aasen, y otros, 2004).

Grandes ciudades con topografías irregulares y alta vulnerabilidad ante las inestabilidades de sus laderas han implementado desde hace varios años sistemas automatizados de alerta temprana, los cuales en tiempo real informan cuantitativamente sobre las condiciones de las zonas de inestabilidad. La novedad de estos sistemas además del uso de medidores de precipitación automáticos, son los software de manejo de datos, los cuales se asocian a modelos de riesgo basados en elementos finitos. Las zonas en estudios son divididas espacialmente en celdas unitarias, para las cuales se realizan en tiempo real predicciones de potenciales deslizamientos conforme las variables en medición cambian de magnitud. Ejemplos de estas aplicaciones pueden consultarse en (Ortigao, y otros, 2004; Chan, y otros, 2004).

En el pasado se han utilizado dispositivos de medición de presiones piezométricas durante eventos dinámicos, sobre todo para zonas con potencial riesgo de licuación. Actualmente se ha retomado esta temática y ha resultado de interés evaluar los aspectos de montaje de instrumentos que pueden mejorar la respuesta de los dispositivos para tal fin (Farrell, y otros, 2004).

Retomando el monitoreo de la variable desplazamiento, al presente se está haciendo uso de sistemas de posicionamiento global diferencial (DGPS) para el monitoreo de grandes estructuras como el caso de presas, incluso como reemplazo de dispositivos contemporáneos pero de mayor sofisticación. Un

ejemplo de esta tendencia es el caso de la red instalada en la presa Libby en Montana donde se sustituyó un sistema láser (Rutledge, y otros, 2005).

Sin embargo a pesar de todo el avance que se ha logrado en el tema de la instrumentación el cual fue ligeramente mostrado en las líneas anteriores, un punto de vista común en la mayoría de artículos que abordan el tema de la instrumentación es el hecho de tener una disparidad entre los avances tecnológicos y la capacidad o conocimiento para hacer uso de los mismos. De esta forma, el estado del arte es diferente dependiendo de la perspectiva de donde se observe el problema: del lado del avance tecnológico o de la capacidad de uso de estas herramientas.

1.2. NECESIDADES DE INSTRUMENTACIÓN

El doctor Ralph Peck resumía la necesidad de instrumentación en estas líneas: “cada instrumento en un proyecto debe de ser seleccionado y colocado para auxiliar a responder una pregunta específica; si la pregunta no existe, la instrumentación tampoco debe existir” (Dunnicliff, 1988). La necesidad de incluir un monitoreo instrumental, la cantidad y ubicación de los dispositivos, depende de las incertidumbres que se tienen en relación a las condiciones de carga reales, los parámetros resistentes de los materiales, las condiciones de sitio y el comportamiento de las estructuras en operación normal del proyecto o ante eventos de tipo extremo.

Salvada la etapa de decisión sobre el uso de la instrumentación, el proceso de monitoreo debe seguir las fases que son ilustradas en la *Figura 1-1*.

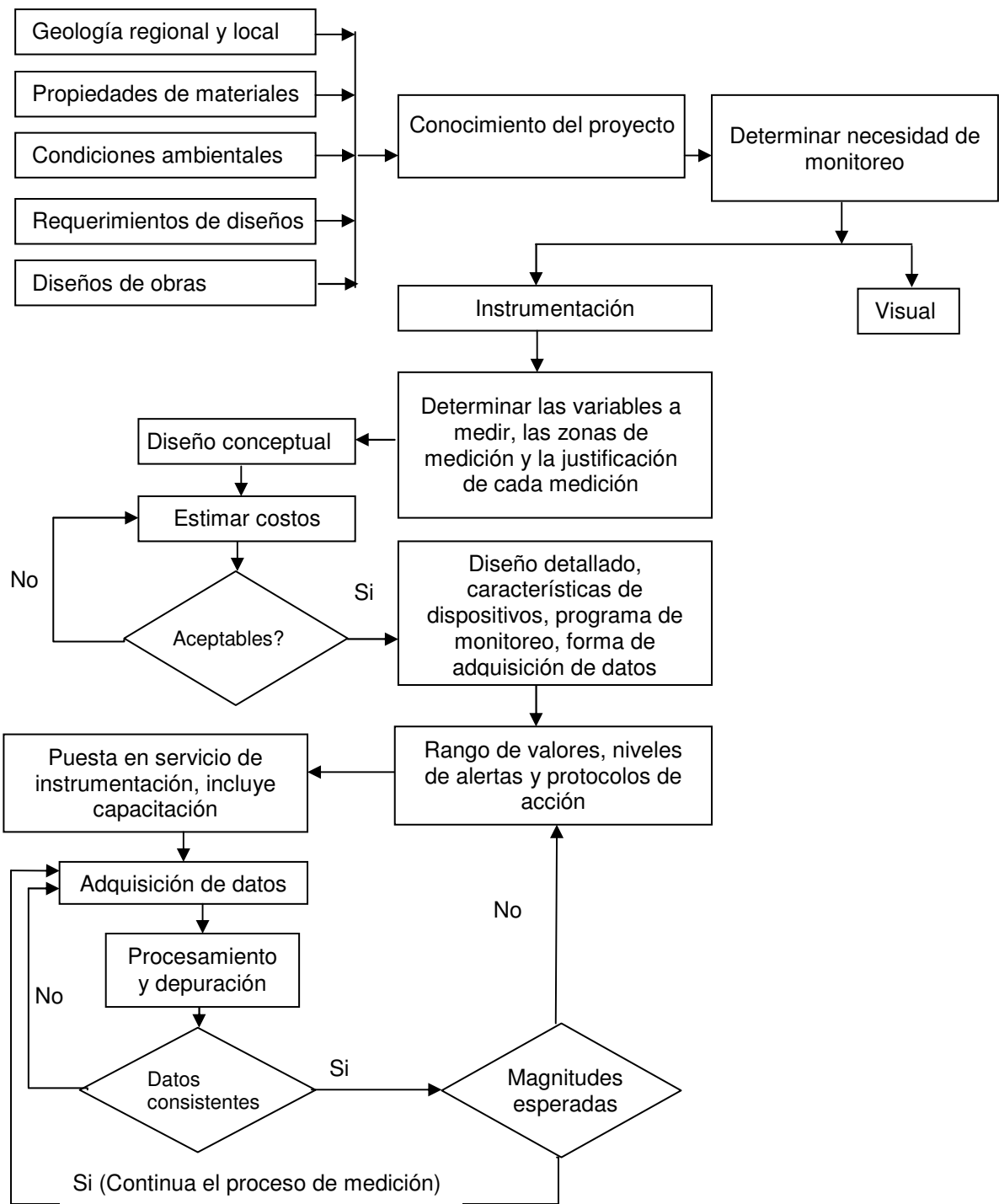


Figura 1-1: Diagrama de flujo para monitoreo de proyectos
 Basado en la metodología de monitoreo de presas propuesta en (ASCE, 2000).

2. OBJETIVOS DE LA INSTRUMENTACIÓN

Una red de instrumentación geotécnica, indistinta a la cantidad de dispositivos que la componen busca uno o varios de los siguientes propósitos:

- 1) Validación de diseños
- 2) Monitoreo para seguridad durante construcción
- 3) Evidencia de uso legal
- 4) Correlacionar información entre instrumentos

2.1. VALIDACIÓN DE DISEÑOS

La validación se logra comparando: las solicitaciones de carga sobre una estructura o el subsuelo mismo; las respuestas esperadas según los modelos teóricos en términos de generación de esfuerzos, filtraciones, desplazamientos y deformaciones; y cualquier hipótesis de diseño contra las mediciones de los instrumentos en el modelo real. Se busca de esta forma definir el comportamiento que presenta la estructura geotécnica y establecer una relación con el modelo teórico (Kong, 2003; Slope Indicator, 1994).

En ciertos proyectos donde es posible retroalimentarse con los registros de instrumentación en etapas tempranas de la construcción, se puede orientar el alcance de este objetivo a la realización de rediseños que adapten el modelo a las respuestas observadas.

2.2. MONITOREO PARA SEGURIDAD DURANTE CONSTRUCCIÓN

Los dispositivos con lecturas durante la etapa de construcción constituyen un sistema de alerta temprana. Para cumplir este fin el proyectista debe establecer

previamente los valores máximos en las lecturas, que corresponderán a diferentes niveles de alerta (Sossenkina, y otros, 2004).

2.3. EVIDENCIA DE USO LEGAL

Este objetivo se aplica a proyectos desarrollados en la vecindad de estructuras existentes, donde los cambios generados durante la ejecución de un nuevo proyecto pueden tener efectos adversos en el resto de estructuras.

2.4. CORRELACIONAR INFORMACIÓN CON OTROS INSTRUMENTOS

Cuando se poseen varios instrumentos midiendo una misma variable o se conoce el determinismo de una en función de otra(s), es posible revisar la congruencia entre las lecturas. Esto facilita el descubrimiento de errores en la medición o comportamientos atípicos que deban considerarse antes de la interpretación de los registros.

En una correlación se busca evaluar el comportamiento de una estructura en un contexto más amplio, incorporando muchas variables antes de interpretar los registros de la instrumentación. Este propósito se logra con la agrupación de diferentes tipos de instrumentos que permitan entrelazar datos de las mediciones.

3. VARIABLES QUE PUEDEN MEDIRSE

Para evaluar el comportamiento del subsuelo y las estructuras específicas que involucre un proyecto, es posible utilizar dispositivos que permiten estimar variables físicas en los materiales del subsuelo y/o la estructura en estudio. A continuación se mencionan estas variables en un contexto general.

3.1. INFILTRACIÓN

El agua es una de las fuerzas más poderosas de la naturaleza. Desde la antigüedad las civilizaciones han tenido que comprender este hecho y buscar formas efectivas de controlar las infiltraciones para evitar el deterioro de las obras de ingeniería o la afectación de zonas de asentamientos humanos.

El concepto actual que se tiene sobre la utilización de drenajes y medidas de control de infiltraciones, es ver estos como métodos para incrementar la seguridad, reducir el mantenimiento y costos a largo plazo de las obras civiles (Cedergren, 1989).

Según Cedergren (1989) las fallas más comunes asociadas a la falta de control de aguas subterráneas e infiltraciones son causadas por: la migración de partículas hacia las superficies libres (fallas erosivas), saturaciones incontroladas y fuerzas de infiltración. Algunos ejemplos clásicos de estos tipos de fallas los constituyen el colapso de la presa Malpaset en Francia (1961) causada por excesiva presión de poros en el basamento, la presa St. Francis en California (1928) colapsada por la erosión de la roca sedimentaria de su basamento (IBID) o las fallas generalizadas de los pavimentos del sur de Nigeria por causas erosivas (Chukweze, 1988).

3.1.1. Flujo. Los principios que rigen el flujo de agua asocian la conservación de energía como responsable de su ocurrencia. La diferencia de energía total de una masa de agua entre dos puntos del espacio define el movimiento del agua en el medio (*ecuación 3.1.1*).

$$h = Z + \frac{P}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (3.1.1)$$

donde:

Z : posición respecto a un nivel de referencia

P : presión

γ_w : peso específico del agua

v : velocidad

g : gravedad

3.1.2. Gradiente Hidráulico. El cumplimiento del principio de conservación de energía indica que debe existir una pérdida de energía entre los puntos entre los que se desarrolla el flujo. La razón de esta pérdida en el recorrido de la masa de agua se denomina gradiente hidráulico (*ecuación 3.1.2*).

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (3.1.2)$$

donde:

Δh : pérdida de energía entre los puntos donde se desarrolla el flujo

L : longitud de recorrido de la masa de agua entre los puntos donde se desarrolla el flujo

3.1.3. Caudales Infiltrados. Las cantidades de fluido (Q) provenientes de un régimen de flujo establecido o intermitente originado por un diferencial de energía, están ligadas a la magnitud de dicho diferencial y a las propiedades del medio donde se desarrolla el flujo. Las *Secciones 9.2 y 9.3* abordan justamente los casos de infiltración en medios porosos y macizos rocosos respectivamente.

3.2. DESPLAZAMIENTO

La detección de movimientos a través de la variable desplazamiento se aplica en geotecnia al monitoreo de estructuras en superficie, deslizamiento de la laderas e inestabilidades en sistemas de retención o soporte (Jiménez, y otros, 1981).

Para el estudio teórico de esta variable las estructuras y el subsuelo son generalmente modelados como un conjunto de sub-elementos de menor tamaño ensamblados entre sí por nodos.

En cada elemento se incluyen las leyes constitutivas de los materiales y se asocia el desplazamiento de tipo traslacional (U), a las fuerzas (F) que actúan sobre cada nodo y el de tipo rotacional (Θ), a los momentos respectivos (M). Los vectores que describen estos sistemas son los siguientes:

$$F_j = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad V_j = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \\ \Theta_x \\ \Theta_y \\ \Theta_z \end{bmatrix} \quad (3.2.1)$$

donde:

F_j : vector de fuerzas y momentos en el nodo j -enésimo

V_j : vector de desplazamiento en el nodo j -enésimo

x, y, z : orientaciones en un espacio tridimensional

La relación entre las fuerzas aplicadas y los desplazamientos resultantes surge de incluir la matriz de rigidez $[K]$ en el sistema matricial, como lo muestra la ecuación (3.2.2).

$$[F_i] = [K_i][V_i] \quad (3.2.2)$$

donde:

i : índice que señala el elemento i -enésimo

En la *Sección 1.1* se citaron algunas referencias de proyectos donde actualmente se realiza un monitoreo de esta variable con tecnologías actuales.

3.3. ESFUERZOS

Para garantizar el equilibrio en un cuerpo que está sometido a fuerzas externas, surge una contribución de fuerzas internas (ΔF) que actúa sobre un área unitaria (ΔA) ubicada en un plano perpendicular a la fuerza resultante de las contribuciones (F). Por tanto la magnitud denominada esfuerzo viene dada por la expresión siguiente (*ecuación 3.3.1*).

$$\sigma_i = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_i}{\Delta A} \quad (3.3.1)$$

donde:

i : índice que señala la dirección de la fuerza resultante: x, y, z.

En términos de la dirección, los esfuerzos se definen como normales y cortantes (σ_i, τ_{ij} *respectivamente*), según actúe la resultante de fuerzas (F) de forma perpendicular o paralela al plano de interés (Pilkey, 1994). El estado de esfuerzos de un elemento es definido por su tensor de esfuerzos (*ecuación 3.3.2*).

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3.3.2)$$

donde:

x, y, z : señalan la dirección de los esfuerzos

3.4. DEFORMACIONES

Las deformaciones son cambios geométricos debido a variaciones en el estado de esfuerzos de un elemento. Al igual que los esfuerzos pueden definirse según su dirección en normales (ε_i) y cortantes (γ_{ij}).

Las deformaciones de tipo normal explican los cambios de longitud (por unidad de longitud) del elemento, para la dirección en consideración (ecuación 3.4.1).

$$\varepsilon_i = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad (3.4.1)$$

donde:

L_i : longitud inicial del elemento

L_f : longitud final del elemento después del cambio en el estado de esfuerzos

Las deformaciones cortantes miden los cambios angulares en el elemento que está en proceso de deformación normal (Pilkey, Op. Cit., pp. 103-106).

El estado de deformaciones de un elemento es definido por su tensor de deformación (ecuación 3.4.2).

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (3.4.2)$$

donde:

x, y, z : señalan la dirección de los esfuerzos

Quizás esta es la variable con más seguimiento en los proyectos geotécnicos, principalmente porque en algunos casos permite conocer el estado de esfuerzos de forma indirecta. Algunas aplicaciones actuales son los dispositivos SMART mencionados en la *Sección 1.1* para el monitoreo de anclajes a tensión dentro del subsuelo o macizo rocoso, los sistemas hidráulicos y neumáticos para control de

asentamientos en terraplenes y los medidores de deformación tipo cuerda vibrante dentro del cuerpo de las presas, entre otros.

3.5. PRESIÓN

Se entiende por presión (P) un efecto local causado por un estado de esfuerzo normal plano, en el contacto entre dos cuerpos sólidos.

El esfuerzo de contacto indica que todas las componentes asociadas a dos dirección del espacio tridimensional son nulas (*ecuación 3.5.1*).

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ ó } \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y \end{bmatrix} \text{ ó } \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3.5.1)$$

donde:

x, y, z : señalan la dirección de los esfuerzos normales

4. CARACTERÍSTICAS DE LOS INSTRUMENTOS

En el proceso de selección de los dispositivos que conforman la instrumentación de un proyecto geotécnico, no sólo es necesario definir las variables a cuantificar, también se requiere especificar aspectos adicionales para describir los dispositivos y asegurar que la adquisición de los mismos sea congruente con las necesidades de la obra. Se abordan a continuación los tópicos básicos a considerar para dicha selección.

4.1. CONVERSIÓN DE LA VARIABLE

Un factor que no es intrínseco de la variable a medir pero que genera diferencias entre dispositivos, es la forma de convertir el evento físico que se pretende evaluar en una señal capaz de ser visualizada e interpretada (ASCE, 2000). Bajo este criterio, se pueden citar tres medios de conversión que son válidos en la actualidad:

- 1) Mecánicos
- 2) Electromecánicos y
- 3) Electrónicos

Los medios mecánicos y electromecánicos involucran movimientos en mecanismos del instrumento para la medición de la variable. En los medios mecánicos la lectura es realizada directamente por el individuo que hace el monitoreo y en los medios electromecánicos el movimiento se transforma en una señal que es leída por otro dispositivo especial. Los vertedores dentro de las galerías de infiltración de una presa y los extensómetros de posición múltiple en perforaciones, son ejemplos de estos medios (ver *Figura 4-1* y *Figura 4-2*).

Figura 4-1: Vertedor medidor de infiltraciones en galerías de presa Pantágoras

Fotografía de galería de infiltración en presa *Pantágoras* (Colombia). Es visible un arreglo de láminas de acero dentro de la cuneta para medición de infiltraciones. Las lecturas se efectúan con visualización directa de los caudales que transitan por el canal, utilizando una escala graduada. Cortesía de ISAGEN.

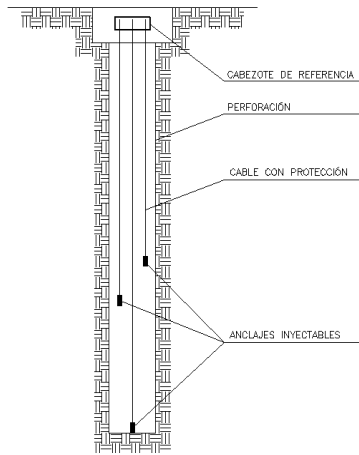


Figura 4-2: Detalle de extensómetro de posición múltiple

Detalle típico de arreglo de extensómetro de posición múltiple o multipunto en perforación. Se considera un dispositivo electromecánico porque el movimiento de cada anclaje dentro de la perforación activa un transductor electrónico (FHWA, 2009).

La opción de tipo electrónica omite el movimiento de mecanismos, al menos en forma macroscópica y la variable que se mide genera directamente la señal; un ejemplo son los dispositivos para medición de temperaturas como el mostrado en la *Figura 4-3*.

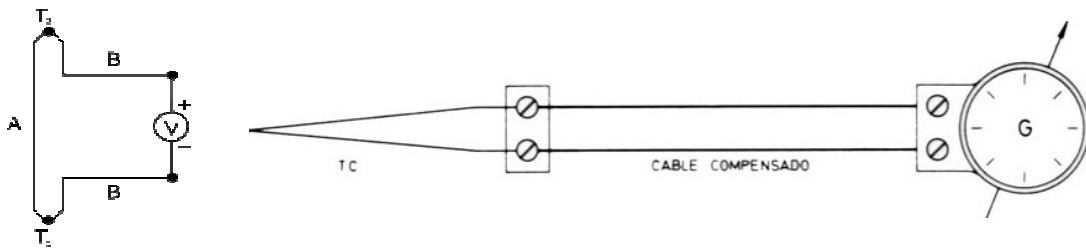


Figura 4-3: Diagrama y esquema de termocupla

Izquierda: diagrama de funcionamiento de una termocupla (dispositivo para medir cambios de temperatura, con medio de conversión totalmente electrónico). La base del funcionamiento es el efecto Seebeck, que consiste en la conversión de un gradiente de temperatura en electricidad (WIKIPEDIA, 2010). Derecha: un esquema del dispositivo.

4.2. CARACTERÍSTICAS RELACIONADAS CON LA INCERTIDUMBRE Y ERROR EN LA MEDICIÓN

Esta caracterización generalmente es la que se plasma en las especificaciones técnicas de los proyectos para indicar de forma general los requerimientos mínimos con que debe contar un dispositivo específico.

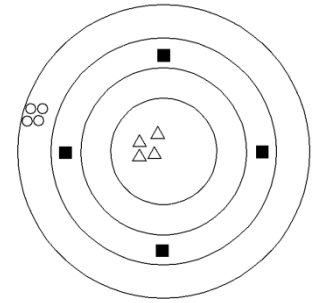
Estos requerimientos pueden definirse como:

- 1) Rango de medición: define las magnitudes mínimas y máximas que puede tolerar el dispositivo.
- 2) Resolución o sensibilidad: es la magnitud del menor cambio que puede detectar el aparato.
- 3) Repetitividad y precisión: es la mínima lectura que puede ser reproducida en diferentes mediciones con condiciones similares.
- 4) Error total: es la máxima diferencia entre la variable medida y su verdadero valor considerando varias fuentes de error sistemático. Usualmente expresado como un porcentaje de la escala total del instrumento (Dunnicliff, 2005 (b)).

Los conceptos de rango de medición y sensibilidad del instrumento resultan de fácil comprensión a partir de los conceptos citados; sin embargo la precisión y el error son comúnmente confundidos. Para aclarar la diferencia y relación entre ambos conceptos se muestra la *Figura 4-4*.

Figura 4-4: Relación entre precisión y error total

Error total y precisión. Dentro del arreglo de círculos concéntricos las figuras redondas representan un error grande con una alta precisión. Los cuadros ejemplifican el caso donde no hay precisión y el error es medio. Los triángulos poseen buena precisión y poco error total. Basado en ASCE, Task Committee.



Es vital establecer hasta qué punto es tolerable limitar las características de los dispositivos que se proyecta utilizar en la instrumentación, por su impacto directo en el costo del proyecto. En (Dunnicliff, 2005 (b)) se señala para el caso de los medidores de presión que los dispositivos con error total de $\pm 5\%$ tienen un precio promedio de 4 dólares y los que poseen errores de $\pm 0.1\%$ aumentan dramáticamente su precio a 400 dólares.

4.3. CAPACIDAD DE AUTOMATIZACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

Cuando en un proyecto se dispone de toda una red de instrumentación, el volumen de información que debe ser recolectada se vuelve sorprendentemente grande y la toma de datos manual deja de ser una opción práctica. Proyectos que conjuntan los registros de instrumentación con sistemas de alerta temprana, no pueden tampoco considerar el uso de lecturas manuales por la necesidad de información en tiempo real.

Las ideas señaladas, son algunas de las que pueden obligar a un diseñador a concebir la instrumentación con un sistema automatizado. En este caso se debe requerir instrumentos de medición con capacidad de funcionar bajo esta modalidad y asegurar la compatibilidad con todos los elementos que componen el sistema de automatización.

En la *Tabla 4-1*, se describe la facilidad de automatización para dispositivos de uso común en presas.

Tabla 4-1: Métodos y facilidades de automatización de instrumentación en presas
Adaptado de (USACE, 1995).

Instrumento	Categoría				Método de Automatización
	1	2	3	4	
Piezómetros					
De Tubo Abierto		■			Con un transductor de presión en el fondo
Doble Tubo		■			Transductores de presión conectados a las líneas
Neumático			■		Sistema de medición de la presión actuante
De Cuerda Vibrante		■			Contador de la frecuencia de vibración
Con Transductor de presión	■	■			Está incluido
Sónicos		■			Lector de tiempos
Medidores de Deformación					
Clinómetros	■	■			
Sondeo de Extensómetro para Medición Mecánica				■	No Aplica
Extensómetros para Terraplén y en Perforación	■	■			<i>Depende del tipo de transductor.</i>
Inclinómetro de acelerómetro portátil				■	No Aplica
Inclinómetro estacionario		■			<i>Depende del tipo de transductor.</i>
Sistemas de Péndulo			■	■	Transductores de posición, con sensor de luz
Medidores por Registro de nivel de líquido	■	■			Transductores de presión
Celdas de Carga y de Carga Total					
Neumáticas			■		Sistema de medición de la presión actuante
Dispositivos de Resistencia Eléctrica		■			Circuito medidor de deformación
De Cuerda Vibrante		■			Contador de la frecuencia de vibración
Medidores de Temperatura					
Termoresistores	■	■			Lector de resistencia
Termocuplas		■			Lector de voltaje
RTD (Dispositivo de Temperatura-Resistencia)	■	■			Lector de resistencia
Movimiento Sísmico					
Acelerógrafo Análogo				■	No Aplica
Acelerógrafo Digital		■			No Aplica
Medidores de Infiltraciones					
Rebosaderos de lectura remota	■	■			<i>Depende del tipo de transductor.</i>
Vertedores y/o canales abiertos				■	No Aplica
<p>Categorías empleadas en la tabla: <u>Categoría 1</u>: automatización directa. Factible para la mayoría de proveedores. <u>Categoría 2</u>: requisitos especializados. No hay condiciones ambientales desfavorables, energía inaccesible, rango de voltaje común. <u>Categoría 3</u>: la mayoría de los requisitos son especializados. El ambiente es hostil, comunicación inasequible. <u>Categoría 4</u>: generalmente no es práctico automatizarlos, por complejidad o costos. Requerimientos particulares para automatización.</p>					

4.4. REQUERIMIENTOS ADICIONALES

En adición a las características señaladas para los dispositivos, es necesario considerar antes de la selección los siguientes puntos:

- a) Condiciones ambientales de trabajo del dispositivo: incluye la definición de las temperaturas de trabajo, la humedad y exposición ante las actividades de construcción del proyecto.

- b) Comportamiento a largo plazo: los dispositivos deben de asegurar que su vida útil concuerda como mínimo con el programa de instrumentación proyectado.

- c) Capacidad de operación y lectura por parte de personal: se debe de establecer si será posible contar con personal capacitado, para integrar el equipo de monitoreo de la instrumentación o sí existe la necesidad de capacitación. En la medida que se dificulte la adquisición de personal especializado, se justificará aun más, el uso de sistemas automatizados para reducir el personal.

5. TIPOS DE INSTRUMENTOS

Los tipos de instrumentos se definen por la variable de medición y la conversión de la misma en una señal; ambos aspectos fueron señalados en los capítulos anteriores. La *Tabla 5-1* al final de esta sección resume los instrumentos de uso común en proyectos geotécnicos con esta consideración.

5.1. CONVERSIÓN DE SEÑAL Y VARIABLES EN MEDICIÓN

Para las conversiones electromecánicas y electrónicas, han surgido en el desarrollo tecnológico de la instrumentación geotécnica, los siguientes sub-grupos:

- a) Dispositivos hidráulicos
- b) Dispositivos neumáticos
- c) Dispositivos de cuerda vibrante
- d) Dispositivos de resistencia eléctrica
- e) Dispositivos con transductores eléctricos
- f) Otros tipos de dispositivos eléctricos

5.1.1. Dispositivos hidráulicos. Incorporan condiciones de flujo de líquido en la medición de la variable. El flujo es una función de los cambios de nivel o presión que se presentan en el punto de medición. Estas variaciones son leídas por unidades manométricas o dispositivos eléctricos y relacionadas con magnitudes para la variable medida.

5.1.2. Dispositivos neumáticos. Involucran condiciones de restricción al paso de gas por sistemas de conducción. Dicha restricción es una función de los cambios de presión que se presentan en el punto de medición.

5.1.3. Dispositivos de cuerda vibrante. Un cable de acero o fibra de vidrio de corta longitud es dispuesto dentro del cuerpo del sensor y tensionado por sus extremos. Las variaciones en la variable geotécnica que se mide generan desplazamientos relativos entre los extremos que fijan el cable, alterando la tensión del mismo.

Para la toma de lecturas del instrumento, el cable es obligado a vibrar por una excitación eléctrica y se registra la frecuencia de resonancia. Esta frecuencia es diferente a la original del dispositivo, producto del cambio de tensión que ha experimentado el cable.

El proveedor de estos dispositivos, proporciona para sus instrumentos, la relación entre los cambios en la frecuencia de resonancia y la magnitud de la medición.

5.1.4. Dispositivos de resistencia eléctrica. Son conductores que registran cambios de resistencia eléctrica en proporción a las variaciones de la variable medida (generalmente deformación).

5.1.5. Dispositivos con transductores eléctricos

- **Transformador Lineal de Variaciones Diferenciales (LVDT).** Es utilizado para medir desplazamientos lineales. Se conoce como LVDT, por sus siglas del inglés: Linear Variable Differential Transformer (USACE, 1995).

Consiste en un núcleo magnético que se traslada a través de un arreglo de tres bobinas (una primaria y dos secundarias) cuando realiza la medición del desplazamiento.

Durante la lectura de estos dispositivos se induce el paso de corriente alterna en la bobina primaria y se registra la magnitud de voltaje que llega a cada bobina secundaria. El voltaje medido varía en función de la posición que tome el núcleo magnético dentro de las bobinas (desplazamiento).

- **Transformador Lineal de Variaciones Diferenciales de Corriente Directa (DCDT).** Consiste en un modelo alterno del dispositivo LVDT, con la diferencia de inducir corriente directa a la bobina primaria en lugar de corriente alterna. Su nombre corresponde a las siglas del inglés: *Direct Current Differential Transformer*.
- **Potenciómetros Lineales (PL).** En este dispositivo un elemento deslizante modifica la magnitud del voltaje que pasa a través de una resistencia. Esto sucede si existen cambios en la variable geotécnica que obliguen al elemento deslizante a entrar en contacto con la resistencia.
- **Transductores de Desplazamiento de Cuerda Vibrante (TDCV).** Consiste en la adición de una bobina de resorte al dispositivo típico de un LVDT. La finalidad de este arreglo es cambiar la señal de salida típica de un LVDT, la cual es voltaje, por una señal de frecuencia. Evitándose así, la degradación de la lectura que ocurre cuando la señal de un LVDT es llevada por grandes distancias (la resistencia del cable eléctrico distorsiona el voltaje en la lectura final).

5.1.6. Otros tipos de dispositivos eléctricos. A continuación se mencionan algunos de los dispositivos con tecnologías eléctricas que difieren de los sensores expuestos antes (Howard, 1989).

- **Servo-Acelerómetros (Acelerómetros de Balance de Fuerza, ABF).** Son dispositivos sensibles al movimiento de una masa en el interior del sensor. Son usados generalmente en la medición de desplazamientos que involucran rotación.

Cuando ocurre el desplazamiento y es tomada una lectura con el dispositivo (portátil o fijo) la masa dentro del sensor tiende a desplazarse por gravedad hasta alinearse con el elemento deformado que se está midiendo. El movimiento de la masa se realiza entre un detector de posición y una bobina encargada de restituir la posición original de la masa (la masa nunca se desplaza realmente).

La relación que permite medir la variable geotécnica surge al definir la magnitud de voltaje que debió inducirse a la bobina, para impedir el movimiento de la masa.

- **Interruptor Magnético de Lectura (IML).** Es básicamente una alarma que indica el momento justo cuando un detector de posición es obligado a pasar por el campo magnético de un anillo, de cuya posición se tiene una referencia previa.

Se relaciona la posición original del anillo con la señalada por el sistema de alarma y es posible determinar si existe desplazamiento y la magnitud del mismo.

- **Transductores con Bobina de Inducción (TBI).** Es un sistema similar al interruptor magnético de lectura (IML), pero en este caso el detector es reemplazado por una bobina energizada que cambia de inductancia cuando entra al campo magnético del anillo. La medición de la variable geotécnica se relaciona con el cambio de inductancia registrado.

- **Transductores Sónicos (TS).** En este dispositivo se hacen viajar pulsos sónicos, generalmente a través de agua y se mide el tiempo de vuelta del pulso al transductor, para relacionarlo con distancias.

- **Detectores de Emisión Acústica (AE).** Se trata de una tecnología usada desde hace ya varios años, sobretodo en países europeos para detectar movimientos en laderas. Cuentan con la ventaja de poseer alta sensibilidad que permite el monitoreo a razones de movimiento bajas.

El principio general del sistema es colocar una barra de referencia generalmente metálica, dentro de una perforación que atraviesa la ladera en estudio. Los movimientos que se presenten en el subsuelo inducirán esfuerzos en la guía, que se evidencian con ondas sonoras o actividad microsísmica. Esta actividad se detecta por un transductor y es relacionada con la variable física de desplazamiento (Dunnicliff, 2005 (a)).

- **Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR).** Es una técnica remota que permite la medición de niveles piezométricos, contenidos de humedad y fallas localizadas en laderas. Su uso ha tenido más desarrollo en el tema de laderas para identificar planos de falla profundos en suelo o desplazamientos a través de discontinuidades en macizos rocosos.

El principio de operación es similar al de un radar. Se envía un pulso de voltaje a través de dos conductores coaxiales embebidos dentro de una perforación y una porción del pulso es reflejada por la deformación o cambio súbito de características que posea la línea del conductor. Es posible con el uso de la ley de propagación de ondas estimar la distancia donde se presenta el cambio abrupto (con referencia en al punto de envío del pulso) y con el registro de la amplitud de la onda reflejada se puede estimar el desplazamiento (Dunnicliff, 2003 (b)).

Para interpretar la información de un TDR es importante tener presente que el gráfico de voltaje reflejado registra todo tipo de cambios presentes en el conductor (cambios de impedancia). Es necesario poseer la descripción y geometría de la

instalación para descartar cambios que no son debidos a variaciones en la variable geotécnica en medición (cambios de dirección, empalmes, etc.).

5.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE INSTRUMENTOS

La *Tabla 5-2* a *Tabla 5-6* detallan algunas de las características más relevantes para instrumentos de uso geotécnico. Se hace mención en las tablas a los aspectos favorables y negativos del desempeño de los instrumentos.

La *Tabla 5-7* complementa el panorama de trabajo de los instrumentos, con un resumen de los rangos de operación para los instrumentos más representativos, con referencia en algunos de los proveedores actuales de instrumentación geotécnica. La información de esta tabla ha sido obtenida de las hojas técnicas disponibles en la web de cada una de las siguiente empresas: Slope Indicator Company, Geotechnical Instrumentation Manufacturing Company (SIGGEO), Soil Instrument Ltd., Geokon Incorporated, RST Instrument y RocTest Ltd. / Telemac.

Tabla 5-1: Instrumentos de uso común en proyectos geotécnicos

Variable	Instrumentos	TIPOS DE DISPOSITIVOS						
		Hidráulicos	Neumáticos	Cuerda Vibrátil	Resistencia Eléctrica	Transductores Eléctricos	Otros Eléctricos	Dispositivos Mecánicos
Presión Piezométrica	Piezómetro	Doble tubo			(-)		Tipo síónico	Sonda en pozos de observación Piezómetro de diafragma en pozos de observación
Desplazamiento	Inclinómetros Clinómetros Puntos de control topográfico Péndulos	(-)	(-)	Medidores de grietas Medidores desplazamiento juntas	(-)	Medidores de grietas con PL o LVDT Medidores desplazamiento de juntas PL o LVDT	Inclinómetros portátil o estacionarios Clinómetros Péndulo de lectura digital Detectores de emisión acústica	Monumentos superficiales y sub-superficiales Péndulos
Deformación	Extensómetros Medidores de asentamiento Medidores de deformación axial	Medidores asentamiento (simple y de perfil completo)	Celdas de asentamiento	Celdas de asentamiento Medidores de deformación axial		Extensómetros verticales para terraplenes con medidores LVDT o PL Extensómetros inclinados de simple posición y multipunto con medidores LVDT o PL Extensómetros simples o multipunto de barra con PL en cabeza	Medidores con bobina de inducción para terraplenes (utiliza sonda) Medidores con interruptor de magneto para terraplenes (utiliza sonda)	Sondeo de extensómetro para medición mecánica Sondeo combinado de extensómetro e inclinómetro Plataforma de asentamiento Medidores de brazo cruzado para terraplenes
Esfuerzo Total	Celdas de Presión Embebidas	Hidráulico con transductor neumático				(-)	(-)	(-)
	Celdas de Presión de Contacto	(-)	(-)		(-)	(-)	(-)	(-)
Temperatura	Termoresistores Termocuplas RTD	(-)	(-)	(-)	RTD	(-)	Termo-resistores Termocuplas	(-)
Movimiento Sísmico (desplazamiento)	Acelerógrafos	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)		(-)
Infiltración	Velocímetros Vertedores Recipientes Calibrados	(-)	(-)	Rebosadero de lectura remota	(-)	(-)	Velocímetros	Vertedor tipo Marshall Recipientes calibrados

Tabla 5-2: Comparación entre tipos de piezómetros

Fuentes: (DURHAM, 2004; Slope Indicator, 1994; USACE, 1995).

No.	Característica	Tipo de Piezómetro				
		Pozo de observación	Cuerda vibrante	Neumático	Hidráulico	Con transductor eléctrico
1	Rango	Límite de perforación	5 a 20 MPa	1 a 3.5 MPa	hasta 75 mca	1.75 MPa
2	Tiempo de respuesta	Lenta	Rápida	Rápida	buena incluso en algunos suelos poco permeables	Rápida
3	Tiempo de lectura	Minutos	Segundos	5 minutos / 60m de tubería	Minutos	12 veces / seg
4	Forma de adquisición datos	Indicadores de nivel	Portátil (ligero)	Portátil (pesado)	visual	Portátil (ligero)
5	Adquisición remota de datos	Sólo la utilización de piezómetro de diafragma lo permite	Si. El cable de señal es llevado hasta la estación remota	Si. La tubería es llevada hasta la estación remota	Si. La tubería es llevada hasta la estación remota	Aplica
6	Uso de Data Logger para captura de datos	No Aplica	Aplica	No Aplica	No Aplica	Aplica
7	Componentes Principales del Costo	Perforación, accesorios económicos	Perforación, accesorios más onerosos de las opciones	Perforación, costo de accesorios intermedio	Perforación, costo de accesorios intermedio	Accesorios
Ventajas Generales		Simplicidad, bajo costo	Fácil lectura, acceso remoto	Acceso remoto, no es afectado por elementos eléctricos	Registro de presiones negativas	Acceso remoto, rapidez en lectura, fácil de automatizar
Limitaciones Generales		No es posible acceso remoto y registrar presiones negativas, la boca del sondeo entorpece las labores de construcción	Tendidos de cables horizontales de gran longitud deben protegerse de elementos eléctricos	Lectura lenta en función de la longitud de tubería, requiere suministro de gas	Requiere mantenimiento especial, diferencia de elevación entre piezómetro y unidad de lectura es limitada	Costoso, posibles errores por polvo y corrosión

Tabla 5-3: Comparación entre tipos de inclinómetros

Fuente: (DURHAM, 2004)

No.	Característica	Tipo de Inclinómetro	
		Portátil	Posición Fija
1	Datos para perfil completo	Aplica	No Aplica
2	Tiempo de lectura	45min / 30m	Segundos
3	Acceso remoto	No Aplica	Aplica
4	Uso de Data Logger para captura de datos	No Aplica	Aplica
Ventajas Generales		Monitoreo económico	La única opción lecturas en tiempo real
Limitaciones Generales		Equipo de medición grande y pesado hace demorada la lectura	Tendidos de cables horizontales de gran longitud deben protegerse de elementos eléctricos

Tabla 5-4: Comparación entre tipos de medidores de deformación simples

Fuente: (DURHAM, 2004).

No.	Característica	Tipo de Medidor			
		Celdas de Asentamiento	Puntos de Asentamiento	Extensómetro de Asentamientos	Extensómetros de Barra
1	Rango aproximado	Mayor a 1.00m	30-60cm	5-10cm	25 a 100mm
2	Vida útil	Corto plazo	No existe restricción	No existe restricción	No existe restricción
3	Adquisición remota de datos	Aplica	No Aplica	Depende de la terminal de lectura en cabeza (mecánica, no ; eléctrica, si)	Aplica
4	Uso de Data Logger para captura de datos	Celdas neumáticas, no. Dispositivos con cuerda vibrante, si.	No Aplica	Depende de la terminal de lectura en cabeza (mecánica, no ; eléctrica, si)	Aplica
5	Componentes Principal del Costo	Los accesorios que no están dentro de la perforación	Perforación si es a través de un relleno	Perforación	Perforación
Ventajas Generales		No interfiere la construcción	Simplicidad	Alta resolución en mediciones	No interfiere la construcción
Limitaciones Generales		Elevación de la celda en grandes embalses	Obstrucción de construcción	Rango de medición pequeño	La opción más onerosa

Tabla 5-5: Comparación entre tipos de medidores de deformación multipunto

Fuente: (DURHAM, 2004).

No.	Característica	Tipo de Medidor				
		Sondeos con referencias (magnetos, bobinas, etc.)	Extensómetros Magnéticos	Extensómetro de Barra	Inclinómetro Horizontal Portátil	Inclinómetro Horizontal Posición Fija
1	Rango aproximado	Grandes deformaciones	Grandes deformaciones	25 a 100mm	60cm o más	60cm o más
2	Adquisición remota de datos	No Aplica	No Aplica	Depende de la terminal de lectura en cabeza	No Aplica	Aplica
3	Uso de Data Logger para captura de datos	No Aplica	No Aplica	Depende de la terminal de lectura en cabeza	No Aplica	Aplica
4	Componentes Principal del Costo	Perforación	Perforación	Perforación	Trinchera o perforación	Trinchera o perforación. Componentes
Ventajas Generales		Opera con inclinómetros	Opera con tubería de diámetro pequeño o incluso de inclinómetro	Alta resolución en mediciones	Cobertura de zonas amplias	Monitoreo en zonas pre-establecidas
Limitaciones Generales		No es posible acceso remoto	No es posible acceso remoto	Rango de medición pequeño	La fricción puede afectar en longitudes mayores a 100m	Oneroso

Tabla 5-6: Comparación entre tipos de medidores de temperatura

Fuente: (USACE, 1995)

No.	Característica	Tipo de Medidor		
		Termocupla	Termoresistor	RTD
1	Rango aproximado	- 60 a + 400 °C	-50 a + 150 °C	-50 a +100 °C
	Sensitividad	Baja	Muy Alta	Media
2	Error total	Medio	Alto	Alto
3	Adquisición de datos	Lector especial	ohmímetro o multímetro	Medidor de resistencias tipo puente con escala de milivoltios
4	Tipo de cable conductor	Especial (bi-metal)	Doble-conductor	Triple-conductor
5	Posibilidad de automatización	Excelente	Pobre	Buena
Ventajas Generales		Bajo costo, respuesta rápida	Permite grandes longitudes, cableado resistente	Cableado resistente, alta resolución
Limitaciones Generales		Longitudes recomendadas hasta 100m, no es compatible con materiales muy deformables	Deben protegerse de elementos eléctricos	Rango de medición limitado

Tabla 5-7: Resumen de rangos de operación de instrumentación geotécnica

(Datos cortesía de: Slope Indicator Company, Geotechnical Instrumentation Manufacturing Company (SISGEO), Soil Instrument Ltd., Geokon Incorporated, RST Instrument y RocTest Ltd. / Telemac)

No.	Instrumento	Tipo de Medidor		
		Unidad	Rango de Operación Usual	Rango Especial a Pedido
1	Celdas de presión total embebida	MPa	0.2 a 20	hasta 34.5
2	Clinómetro superficial	grados	+/- 30	+/- 50
3	Desplazamiento de Juntas (C.V.)	mm	15 a 150	300
4	Extensómetro con cables de acero o fibra de vidrio	mm	hasta 150	-
5	Extensómetro de barras	mm	25 - 100	-
6	Extensómetro de cinta	mm	15 a 50	-
7	Extensómetro magnético	m (profundidad)	30 a 200	-
8	Inclinómetro fijo	grados	+/- 30	+/- 90
9	Inclinómetro horizontal	grados	+/- 30	+/- 53
10	Inclinómetro portátil	grados	+/- 30	+/- 53
11	Medidor de grietas (C.V.)	mm	10 a 200	-
12	Medidor de grietas (P.L.)	mm	10 a 150	-
13	Medidor deformación embebido (cuerda vibrante)	$\mu\epsilon$	3,000	-
14	Péndulo	mm	100	400
15	Piezómetro (C.V.)	MPa	0.07 a 20	extremos bajos y altos
16	Piezómetro hidráulico doble tubo (asentamientos)	mca	17	75
17	Piezómetro neumático	MPa	1 a 3.5	-
18	Piezómetro tubo abierto	mca	75	-
19	Registro de nivel de agua en medidores de infiltración	mm	1000	-
20	RTD	grados °C	-20 a +80	+100
21	Sistema hidráulico, medición asentamientos	mm	hasta 2500	-
22	Termocupla	grados °C	-10 a +100	-60 a +400
23	Termoresistores	grados °C	-50 a +150	-

6. LECTURA Y ACOPIO DE DATOS

6.1. FRECUENCIA ENTRE LECTURAS

El plan de toma de lecturas, no es una metodología rígida y aplicable de forma genérica. Para cada proyecto se debe elaborar un plan a la medida de las necesidades.

Las bases para definir la periodicidad entre las lecturas son: el conocimiento de la metodología constructiva que se utilizará en el proyecto, la variable en medición, las características de los instrumentos, condiciones geotécnicas, coordinación entre dispositivos y la consideración de eventos no usuales o extremos.

6.1.1. Metodología Constructiva. El proceso físico que justifica la medición se desarrolla como función de la intervención que se realiza sobre las condiciones naturales del entorno geotécnico. La forma en la que se afecta el estado de esfuerzos y las condiciones de flujo de agua afectan directamente el comportamiento del subsuelo y de las nuevas estructuras emplazadas en él.

El proceso constructivo es el responsable de la velocidad y localización de los eventos físicos que se desean medir, por esta razón definir sus etapas contribuye a elaborar un plan de instrumentación que se ajuste al proyecto.

La frecuencia de monitoreo debe de basarse en la secuencia constructiva del proyecto. Se debe de aumentar durante las fases para las que se estime mayor sensibilidad sobre la variable y debe de ajustarse de acuerdo a la respuesta observada en los instrumentos.

Como ejemplo típico en proyectos que involucran estabilizaciones de cortes subterráneos, las lecturas se intensifican durante cada nueva etapa de excavación y se reduce la frecuencia cada vez que la etapa alcanza una cuasi-estabilización, en la referencias se encuentra el monitoreo para un proyecto de este tipo (Kong, 2003).

6.1.2. Tipos y Características de los Instrumentos. Los términos que definen las características de un instrumento fueron abordados en el *Capítulo 4*.

La relación entre el instrumento y la frecuencia de lecturas se basa en el proceso físico que mide el dispositivo y las limitaciones que posee para realizar la medición. El uso del instrumento estará limitado por el tiempo de respuesta, la sensibilidad y el error total.

- a) Tiempo de respuesta: es una característica limitante para medición en fases de construcción que avanzan rápidamente o para registros durante la ocurrencia de eventos inusuales o extremos (para represas se consideran: sismos, crecidas en el embalse y vaciados rápidos).
- b) Sensibilidad: la periodicidad entre lecturas se puede aumentar en la medida que los cambios en la variable medida correspondientes al lapso de tiempo entre las lecturas sean de magnitudes viables para el registro. Los cambios deben por lo menos superar los valores de sensibilidad y error total del dispositivo.

6.1.3. Condiciones Geotécnicas. Los materiales presentes en el subsuelo condicionan el tiempo de respuesta ante sollicitaciones.

El ejemplo más claro de la respuesta del subsuelo es el proceso de asentamiento bajo un cimiento o un terraplén. Si se poseen estratos con características granulares el proceso de asentamiento por deformación elástica y consolidación, será inmediato. Pero en el caso de paquetes estratigráficos arcillosos la componente principal de asentamiento puede provenir de la consolidación, la cual debido a la baja permeabilidad de las arcillas puede ocurrir a una razón que se vuelva asintótica después de un gran período de tiempo.

Si se basa el plan de lecturas en las condiciones del subsuelo, para el caso de los asentamientos y presiones de poro resulta innecesario para condiciones a largo plazo (arcillas) un programa muy frecuente, tampoco es útil incrementar lecturas en casos extremos. Contrario es un escenario con materiales granulares, donde las respuestas pueden presentarse en tiempo real y sí se combina esta condición con dispositivos de rápida respuesta y alta sensibilidad, es posible aumentar la frecuencia de lectura incluso durante eventos extremos.

En (Youd, y otros, 1987) se expone el seguimiento de un área de prueba desarrollada por la Universidad de California, donde se demostró la posibilidad de obtener registros piezométricos durante eventos sísmicos en paquetes estratigráficos con características arenosas utilizando piezómetros de transductor eléctrico (considerados dispositivos de respuesta rápida, ver *Tabla 5-2 en Sección 5.2*).

6.1.4. Coordinación entre dispositivos. Generalmente se diseña una red de instrumentación con más de un tipo de instrumentos y se hace de tal forma que sea posible correlacionar los registros de los mismos e interpretar de una forma panorámica los procesos que se desarrollan en el medio en estudio.

En la interpretación de los registros se preparan salidas gráficas para subgrupos de instrumentos. Cada subgrupo se puede definir por la correspondencia en la

variable de medición o por relación intrínseca de variables distintas con el comportamiento general del medio.

Para realizar las correlaciones es necesario que el plan de lecturas contemple para los subgrupos de instrumentos frecuencias iguales o múltiplos para facilitar la interpretación.

6.1.5. Consideración de eventos no usuales o extremos. El plan de lecturas debe estar diseñado para brindar alerta en casos de peligro inminente para el proyecto. Esto es posible monitoreando con mayor frecuencia aquellas condiciones adversas que se crea pueden causar daños importantes en las estructuras. Sin embargo, de acuerdo a los puntos señalados en secciones anteriores, no es posible incluir todas las variables o dispositivos en la fase de lectura intensa, esto por las limitaciones de los dispositivos o las condiciones del medio. Razón por la que es importante definir las variables y dispositivos que serán utilizados durante un evento crítico.

En proyectos de represas las variables que suelen disparar los protocolos de alarma son los desplazamientos, caudales de infiltración anormales y aumentos en las presiones de poro.

Después de un registro de evento inusual la toma de lecturas normal debe retornarse hasta que se considere que la operación es normal y las lecturas se encuentren estabilizadas.

6.2. CONSIDERACIONES GENERALES

El plan de monitoreo debe de contemplar cada uno de los tópicos anteriores y cubrir las particularidades del proyecto.

En el tema de presas, el incremento de frecuencias debe incluirse en las fases de llenado inicial, aumentos rápidos en el nivel del embalse y en la fase posterior a tormentas o sismos.

Para la aplicación en presas, se muestran la *Tabla 6-1* y *Tabla 6-2* con recomendaciones para la frecuencia en toma de lecturas, como una guía de partida para el diseño del programa de instrumentación.

Tabla 6-1: Programa de monitoreo para presas importantes y de alto riesgo
Adaptado de: (FERC, 2008).

Tipo de medición	Frecuencia de medición				
	Construcción	Primer llenado	Primer año después de llenado	Segundo y tercer año	Largo plazo
Visuales	diaria	diaria	semanal	mensual	mensual
Nivel del embalse	(-)	diaria a semanal	quincenal y algunas eventuales	mensual y algunas eventuales	mensual a trimestral y algunas eventuales
Nivel aguas abajo	(-)	semanal	quincenal y algunas eventuales	mensual y algunas eventuales	mensual a trimestral y algunas eventuales
Caudal salida	(-)	diaria a semanal	de semanal a mensual	mensual	mensual a trimestral
Infiltraciones	mensual	diaria a semanal	de semanal a mensual	mensual	mensual a trimestral
Presión piezométrica	de diaria a semanal	diaria a semanal	mensual	mensual	mensual a trimestral
Asentamientos en superficie	(-)	mensual	trimestral	semestral a anual	semestral a anual
Puntos de control topográfico	(-)	diaria a semanal	trimestral	semestral a anual	semestral a anual
Medidores de movimientos internos	(-)	de semanal a mensual	de mensual a trimestral	de mensual a semestral	de mensual a anual
Medidores de juntas y de grietas	(-)	de semanal a mensual	de mensual a trimestral	de mensual a semestral	de mensual a anual
Medidores de movimientos en fundación	semanalmente	de semanal a mensual	trimestral	semestral	semestral a anual
Temperatura	desde horaria a semanal	semanal	quincenal	mensual	usualmente no se requiere
Carga en elementos post-tensionados como anclajes	usualmente no se requiere	usualmente no se requiere	anual	usualmente no se requiere	cada 5 años

Tabla 6-2: Programa de monitoreo para presas de concreto
Adaptado de: (FERC, 2008).

Tipo de medición	Frecuencia
Instrumentos embebidos	Cada 7 ó 10 días durante construcción; quincenal o mensual en etapas posteriores. Más frecuentemente en etapas de llenado o vaciado rápido.
Medidores de deflexión	Semanal y con más frecuencia en períodos de especial interés.
Piezómetros	Cada 7 ó 10 días durante llenado inicial; mensual en etapas posteriores.
Referencias topográficas	Semestral y adicionales en etapa de llenado inicial.
Niveles de presa y referencias vecinas	Depende de condiciones encontradas, pero más frecuentemente en etapas de construcción y menor frecuencia en operación.

7. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

La geotecnia es un campo de conocimiento de la ingeniería que recurre frecuentemente a la estadística de tipo inductiva. Ésta se ve reflejada en las hipótesis de diseño que se establecen a partir de un moderado número de observaciones del espacio muestral (Ω) de un proyecto en particular. El conocimiento limitado de Ω conlleva a incertidumbres tanto del lado de las condiciones de carga reales, como del lado de los parámetros resistentes del subsuelo, condiciones de sitio y comportamiento de las estructuras.

La incertidumbre a la que se hace referencia es sinónimo del grado de aleatoriedad (α) de los procesos o variables. El tratamiento probabilístico de la información busca precisamente contabilizar de alguna forma este grado de aleatoriedad y estimar propiedades de Ω con un grado de certeza sujeto a los niveles de confianza ($1 - \alpha$) y a partir de información muestral.

7.1. ESTADÍSTICA UNIDIMENSIONAL

Se utiliza para aplicaciones de una variable aleatoria numérica (x), que pertenece a Ω y está asociada a resultados de un experimento simple que podemos llevar a un espacio probabilístico (Ω, α, p) . Para nuestro interés con función de densidad definida por la *ecuación 7.1.1*:

$$f_x(x) = \frac{d}{dx} F_x(x) \quad (7.1.1)$$

donde:

f_x : función de densidad de x

F_x : función de distribución de x

La variable x es además completamente explicada por sus medidas de posición, dispersión y forma.

7.2. ESTADÍSTICA MULTIDIMENSIONAL

Se amplía el interés a “ n ” variables aleatorias (X_1, X_2, \dots, X_n) , pertenecientes a Ω y asociadas a “ n ” resultados de un experimento que podemos llevar a un espacio probabilístico (Ω, α, p) . En esta caso, cada aplicación (X_1, X_2, \dots, X_n) , tiene un resultado numérico en Ω y una representación en \mathbb{R}^n .

Las funciones de distribución para el caso “ n ” dimensional son de mayor complejidad, para su detalle referirse a *Literatura Estadística Multivariable*, introductoriamente puede consultarse: (Fernández, 1994; Herrera, 2004; Abad, 2002).

La finalidad de los análisis multidimensionales es estudiar variables conjuntamente, en busca de relaciones que permitan realizar predicciones para ciertas variables a partir de otras contenidas en el mismo sub-conjunto.

La forma más simple de presentar la relación al menos de tipo lineal entre variables n -dimensionales, es a través de las medidas de dispersión contenidas en una matriz de varianzas-covarianzas (ecuación 7.2.1), donde los elementos de la diagonal corresponden a las varianzas individuales de cada variable y el resto de elementos a covarianzas entre parejas de variables (i, j) , definidas por la ecuación (7.2.2).

$$V(X) = \begin{bmatrix} \sigma_{1,1} & \cdots & \sigma_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n,1} & \cdots & \sigma_{n,n} \end{bmatrix} \quad (7.2.1)$$

$$COV(X, Y) = E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)] \quad (7.2.2)$$

donde:

μ_x y μ_y son las esperanzas matemáticas de las variables X y Y respectivamente.

7.2.1. Técnicas de Predicción o Regresiones. Para establecer la relación entre variables dos a dos, sin afectación por los cambios de unidad de medida se utiliza el coeficiente de correlación lineal de Pearson (*ecuación 7.2.3*), el cual varía en magnitud de -1 a 1.

$$r = \frac{COV(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (7.2.3)$$

donde:

r : coeficiente de correlación lineal de Pearson

σ_x y σ_y son las desviaciones típicas de las variables X y Y respectivamente.

$COV(X, Y)$: covarianza entre las variables X e Y .

Cuando existe una marcada relación entre variables (coeficiente de Pearson cercano a 1 ó -1), es justificable la realización de predicciones sobre los valores de cierta variable dependiente (Y) a partir de un conjunto “ k ” de variables consideradas independientes o exógenas (*ecuación 7.2.4*).

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) \quad (7.2.3)$$

donde:

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$: variables exógenas que explican la variable Y

Las técnicas de regresión intentan generar una relación funcional $G(X) = \hat{Y}$ que prediga lo mejor posible la variable Y a partir de las variables independientes y minimice el error entre la predicción y el valor real de la variable.

Los desarrollos matemáticos para definir regresiones de tipo lineal, polinómica, exponencial y logarítmica pueden consultarse en (Evans, y otros, 2004).

7.3. SERIES DE TIEMPO

Las variables unidimensionales y n-dimensionales se presentan gráficamente como dispersiones de puntos en el plano \mathbb{R}^n o como superficies de regresión. Otra forma de presentar variables es a través de series de tiempo $Y(t)$, las cuales se pueden definir de forma sencilla como un conjunto de datos que representan igual número de observaciones de una variable a través del tiempo, cumpliéndose un orden cronológico en la presentación de dichos datos. Esta dispersión de puntos puede modelarse de forma análoga a las regresiones construidas para variables n-dimensionales, pero en este caso se trata de explicar la variable con base en las características propias de la serie (no en relación con otra variable).

7.3.1. Representación de las Series de Tiempo. Se suele presentar a $Y(t)$ como una dispersión de puntos, cuyas abscisas representan la escala del tiempo y las ordenadas los valores que toma la variable (ver como ejemplo *Figura 7-1*).

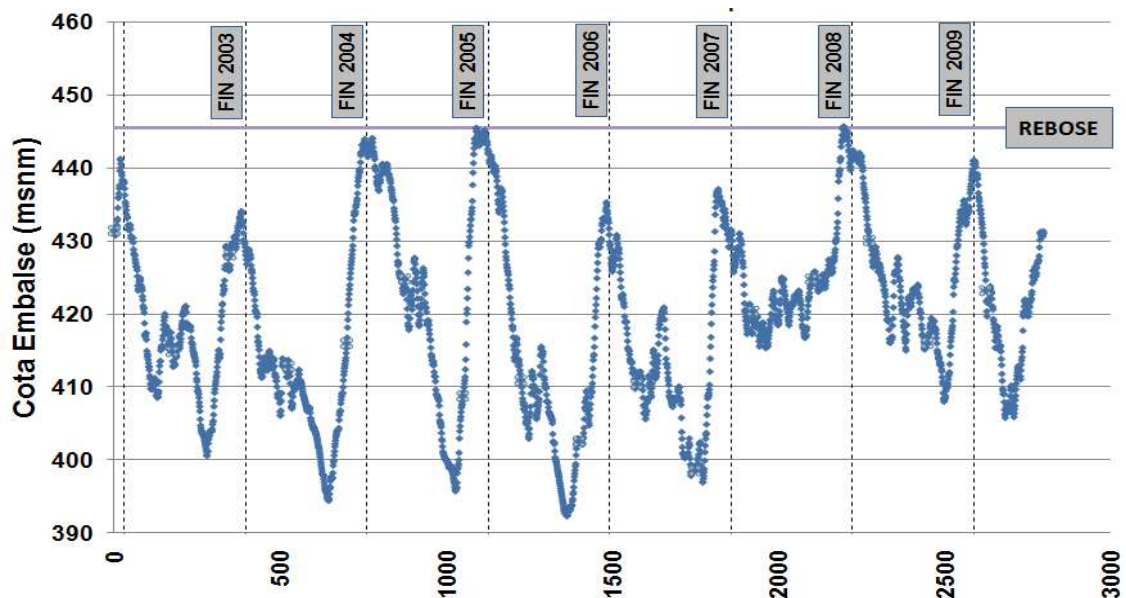


Figura 7-1: Serie de tiempo para niveles de embalse, presa Pantágoras. Se muestran historias de los niveles para el período comprendido entre el 1 de diciembre de 2002 hasta el 19 de julio de 2010 (elaborado a partir de datos proporcionados por ISAGEN).

7.3.2. Descomposición de Series de Tiempo. Las modelaciones de series de tiempo requieren identificar los tipos de variaciones que explican los valores de $Y(t)$, para confirmar que el comportamiento posee algún patrón y no es completamente aleatorio. Las variaciones $Y(t)$ pueden ser una o varias de las siguientes tipologías:

- a) Tendencia: es el cambio a largo plazo de la media (μ) para los valores de la variable en $Y(t)$.
- b) Estacionarias: fluctuaciones alrededor de la media (μ), a lo largo del tiempo. Con dispersión y varianza constante (comportamiento homocedástico).
- c) Estacionales: fluctuaciones relacionadas con épocas o períodos particulares.
- d) Residuales: los valores restantes de la serie, que contienen parcial o totalmente el aporte aleatorio

Agrupar las variaciones anteriores, dentro de un modelo equivale a decir:

$$Y(t) = PS_t + a_t \quad (7.3.1)$$

donde:

PS_t : parte sistemática que posee un patrón de comportamiento

a_t : es el componente aleatorio

7.3.3. Modelos para Series. A continuación se mencionan algunos de los modelos de uso en series de tiempo, que serán citados en los análisis realizados en este documento. Con especial atención en el uso de las metodologías *ARIMA*, popularmente conocidas por el desarrollo de Box y Jenkins en 1970 con la

publicación “Time Series Analysis: Forecasting and Control” y los amplios trabajos posteriores que abarcan su aplicación en la predicción de variables económicas.

- **Estructuras Autorregresivas (AR)**

Son modelos donde el valor de la variable trata de explicarse como dependiente de los valores anteriores de $Y(t)$ y con una participación aleatoria a_t . La siguiente expresión es utilizada para describir una estructura AR.

$$Y(t) = C + \emptyset_1 Y_{t-1} + \emptyset_2 Y_{t-2} + \dots + \emptyset_p Y_{t-p} + a_t \quad (7.3.2)$$

donde:

C : constante (opcional)

\emptyset_1 : parámetro de ajuste (calculado)

Y_{t-n} : valores anteriores de la variable

a_t : componente aleatoria

Utilizando operadores de retardo, la expresión anterior puede utilizarse de la siguiente forma (Fernández, 2003):

$$\phi_p(L) Y(t) = C + a t \quad (7.3.3)$$

donde:

$\phi_p(L)$: polinomio autorregresivo que admite un número “ p ” de raíces para su definición

Las raíces del polinomio de autorregresión definen el orden del modelo $AR(p)$ y la estimación de estas raíces se puede realizar por varios métodos, partiendo de los coeficientes de autocorrelación FAS y FAP ¹ entre parejas de valores distantes “ k ” períodos de tiempo, para detalle referirse a (Peña, 2005; Fernández, 2003).

¹ FAS : función de autocorrelación simple y FAP : función de autocorrelación parcial.

- **Estructuras de Medias Móviles (MA)**

Son modelos donde el valor de la variable tiene dependencia con una sucesión de la componente aleatoria, correspondiente a períodos anteriores (a_{t-1}, a_{t-2} , etc.) y al error actual (a_t). La siguiente expresión es utilizada para describir una estructura *MA*.

$$Y(t) = \mu + at - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \theta_3 a_{t-3} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (7.3.4)$$

donde:

θ_n : Coeficientes ponderadores de la componente aleatoria

μ : valor medio de los valores de la serie

De nuevo utilizando operadores de retardo, la expresión anterior puede utilizarse de la siguiente forma:

$$Y(t) = \mu + \theta_q(L) at \quad (7.3.5)$$

donde:

$\theta_q(L)$: polinomio de medias móviles de orden "q", correspondiente a un modelo *MA*(q).

En esta ocasión la estimación de los coeficientes ponderadores no es necesaria de forma directa, el modelo *MA* puede obtenerse de un modelo *AR* utilizando descomposiciones como la de Wold (Arce, 2003).

- **Modelos ARMA**

Son modelos donde los valores de la variable son fijados como una combinación de estructuras *AR* y *MA*¹. La siguiente expresión es utilizada para describir una estructura *ARMA* (p, q).

$$Y(t) = C + \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (7.3.5)$$

¹ Los modelos simples *AR* y *MA* pueden representarse también como un *ARMA* indicando el índice cero para la estructura sin uso (ejem. *ARMA* (0,1) = *MA*(1)).

- **Modelos *ARIMA***

Los modelos descritos hasta ahora son aplicables a series con comportamiento estacionario, denominadas $Z(t)$, cualquier modelo de este tipo se nombra como de tipo lineal. Los modelos lineales no limitan su aplicabilidad porque si no se dispone de la condición estacionaria es posible transformar la serie original $Y(t)$ con operadores¹ hasta conseguirla.

Es común la aplicación de los modelos de series temporales para predecir valores de la variable. En los casos cuando se ha utilizado un modelo *ARMA*, sobre una serie que sufrió una transformación para lograr su estacionariedad ($Z(t)$) es necesario interpretar las predicciones para la serie real $Y(t)$, y dado que la transformación más típica surge de operadores de retardo o diferenciación, el proceso inverso que sería una *Integración* es quien brinda el nombre al modelo *ARIMA* y el grado de integración define el índice “ d ” de la estructura *ARIMA* (p, d, q).

Dentro de las estructuras autorregresivas y de medias móviles expuestas existen gran variedad de sub-estructuras para casos especiales, algunas de ellas son denominadas: *SARIMA* si la estructura *ARIMA* posee variación estacional, *SAR* ó *SMA* igual al caso anterior despreciando una de las estructuras, *ARFIMA* cuando el índice de la integración toma un valor fraccional, además de las aplicaciones multivariable, todas ellas altamente referenciadas en la bibliografía econométrica.

- **Modelos no Lineales**

(Fan, y otros, 2003), describen el *Efecto de Régimen* en las series temporales, en el cual los residuos de los modelos de tipo Gaussiano (incluye todas las estructuras autorregresivas y de medias móviles expuestas) son menores para valores que sobrepasan los valores medios. Este efecto se debe a

¹ La mayoría de literatura de Econometría brinda recomendaciones para el uso de operadores en función de las características de la serie tiempo original.

comportamiento no lineal de algunas series, a falta de normalidad, ciclos asimétricos, bimodalidades, sensibilidad a condiciones iniciales, etc. Para salvar este inconveniente en series con comportamientos no lineales existe otro inmenso grupo de estructuras, que parte del modelo original *ARCH* (autorregresivo de heterocedasticidad condicional) de *Robert Engle* (IBID, cap. 2 y 4) aplicables a series con datos heterocedásticos, leptocúrticos, y entre otras características con alta volatilidad, la cual puede advertirse con la poca correlación entre los valores de la serie $Y(t)$ pero con dependencia en sus momentos de mayor orden (Butragueño, 2008).

- **Identificación de Modelos Lineales**

La identificación del modelo es la definición de los índices p, d y q de la estructura autorregresiva y/o de medias móviles que mejor y más sencillamente represente a $Y(t)$.

La identificación de los modelos se apoya en la realización de gráficos para los coeficientes de autocorrelación *FAS* y *FAP*, transformaciones de series $Y(t)$ en series estacionarias $Z(t)$ y comprobaciones analíticas de los modelos. Los procedimientos detallados que utilizan estas herramientas son expuestos en: (Peña, 2005; Casado, 2006).

- **Revisión de Modelos**

Una vez definida la estructura de modelación de la serie, resta aun probar la bondad del modelo construido e interpretar el comportamiento de la variable en el caso que el ajuste del modelo sea satisfactorio. Para esto se realiza un análisis de residuos similar al efectuado para regresiones, comparando los valores del modelo con los de la serie observada.

- **Etapas del Análisis de las Series**

La secuencia de pasos para análisis de series temporales, sigue básicamente el siguiente orden:

- a) En primer lugar se analizan las series originales $Y(t)$ y se definen sus estadísticos descriptivos.
- b) Se analiza gráficamente el comportamiento de la serie: la presencia de tendencias, variabilidad de la media y/o la varianza en el tiempo.
- c) Los posibles valores atípicos son identificados estadísticamente.
- d) Cuando es necesario se llevan las series hasta una condición estacionaria que se denominará $Z(t)$, aplicando transformaciones a la serie original.
- e) Identificación preliminar del modelo.
- f) Estimación de parámetros de modelo.
- g) Pruebas de ajuste.
- h) Selección definitiva de los modelos

7.4. VALORES ATÍPICOS

En un registro de observaciones para variables aleatorias es común que surjan datos que se alejan del comportamiento de la mayoría de la población muestral, generalmente debidos a errores en la adquisición de los datos, pero a veces atribuibles a características volátiles de la variable, en cuyo caso no existe el error y los valores anormales deberán formar parte del modelo.

De acuerdo a la forma de afectación de las observaciones se definen los siguientes tipos de valores atípicos (*VA*) para series temporales y son extensibles a variables n-dimensionales:

- a) Impulso (*OA*): afectando una observación en un instante t_0 .
- b) Escalón (*LS*): las observaciones se desplazan con un valor constante a partir de un instante t_0 .
- c) De cambio temporal (*TC*): las observaciones se desplazan a partir del instante t_0 pero vuelven a su nivel previo.
- d) De efecto rampa (*RP*): las observaciones se desplazan dentro de un rango t_0 a t_1 pero vuelven a su nivel previo.

En (Cabrer, y otros, 2007) se indican las variables utilizadas para remoción de los valores señalados y alguna de la bibliografía básica para detección de los *VA* dentro de series temporales. Estas variables de remoción son modelos de intervención que se incluyen dentro de los modelos de series de tiempo de forma aditiva cuando el objetivo es retirar los *VA*. Para el caso de la estructura *ARMA* mostrada en la ecuación (7.3.5) la estructura intervenida sería:

$$Y(t) = v(L)I_t^{t_0} + \{C + \emptyset_1 Y_{t-1} + \emptyset_2 Y_{t-2} + \dots + \emptyset_p Y_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q}\} \quad (7.4.1)$$

donde:

$v(L)I_t^{t_0}$ = es el modelo que incluye todos los tipos de *VA* en una intervención única¹.

¹ (Llinás, y otros, 2000) muestra la inclusión de las intervenciones en modelos de series de tiempo para múltiples intervenciones.

En la estadística tradicional (sin considerar las series de tiempo) se advierten los mismos tipos de anomalías, sin embargo las intervenciones son realizadas fuera de los modelos de ajuste (regresiones en este caso) y la detección suele hacerse por medidas de distancia o similaridad (Acuña, y otros, 2004) que se comparan con estimadores robustos, para datos univariantes o n-dimensionales.

Para los casos univariantes el concepto de distancia es la diferencia entre cada observación y su media muestral (ecuación 7.4.2).

$$d = X - \bar{X} \quad (7.4.2)$$

La distancia *Euclídea* es el estimador más simple de la distancia entre variables múltiples o puntos contenidos en un espacio que puede ser llevado a la aplicación multivariable (ecuación 7.4.3).

$$d_e(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = \sqrt{(x_{11} - x_{12})^2 + (x_{21} - x_{22})^2} \quad (7.4.3)$$

donde:

\vec{x}_1, \vec{x}_2 = variables aleatorias con la misma distribución de probabilidad (notación vectorial)

x_{1n} y x_{2n} = variables X_1 y X_2 tomadas de la observación "n"

d_e = distancia Euclídea

Las metodologías multivariante deben de considerar además de la magnitud de la distancia en los datos (ecuación 7.4.3), la correlación entre variables. Es usual la utilización de la distancia de Mahalanobis para tal fin (ecuación 7.4.4).

$$d_m(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = \sqrt{(\vec{x}_1 - \vec{x}_2)^T \Sigma^{-1} (\vec{x}_1 - \vec{x}_2)} \quad (7.4.4)$$

donde:

Σ = matriz de covarianzas

d_m = distancia de Mahalanobis

Para los casos donde el número de variables es extenso, es conveniente utilizar métodos alternos basados en la reducción de las dimensiones de estudio; los más comunes en este tipo son los métodos de *Componentes Principales* y la *Búsqueda de Proyecciones*, (López, 2009).

7.5. PRUEBAS PARA REVISIÓN DE AJUSTE

Cada vez que una variable estadística trata de expresarse por medio de un modelo de ajuste (serie temporal o regresión simple), se incurre en un error entre el valor observado de la variable y el valor ajustado (*ecuación 7.5.1*). Es precisamente la búsqueda de la menor diferencia entre ambos valores (valores residuales) un punto de partida para seleccionar el modelo de ajuste más indicado¹.

$$e = Y(t) - \hat{Y}(t) \quad (7.5.1)$$

Básicamente las pruebas de ajuste se basan en el estudio estadístico de los residuos (e). En los modelos de series de tiempo se busca demostrar además de la baja magnitud de los residuos, si la hipótesis inicial sobre el componente aleatorio (a_t) de la serie es correcto (no existe relación alguna entre los valores residuales, poseer una media de valor cero, varianza constante y distribución de probabilidades similar a $N(0,1)$).

Las magnitudes de los residuos se describen usualmente con los siguientes estadísticos, (Wei, 2006):

$$MPE \text{ (porcentaje medio del error)} = \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{e_i}{Y(t_i)} \right) 100\% \quad (7.5.2)$$

¹ Este criterio no debe ser rígido para la selección de un modelo, se prefiere siempre un modelo matemático sencillo y fácil de interpretar, aunque signifique sacrificar el ajuste de los datos.

$$MSE \text{ (cuadrado del error promedio)} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M e_i^2 \quad (7.5.3)$$

$$MAE \text{ (error absoluto medio)} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |e_i| \quad (7.5.4)$$

$$MAPE \text{ (porcentaje de error absoluto medio)} = \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left| \frac{e_i}{Y(t_i)} \right| \right) 100\% \quad (7.5.5)$$

7.5.1. Relación entre residuales. Para advertir la relación entre los residuos se utilizan las funciones de correlación simples o parciales **FAS** y **FAP**. La correlación nula se puede advertir con la magnitud de significancia o con la hipótesis nula del valor Q -estadístico (7.5.6) modificado de *Box and Pierce* (Jara, y otros, 2002). Para la Hipótesis nula de tener correlación cero se puede comparar con la aproximación de Ljung and Box (7.5.7; consultar Wei, 2006).

$$Q = n(n + 2) \sum_{k=1}^K (n - k)^{-1} \widehat{\rho}_k^2 \quad (7.5.6)$$

$$\chi^2(K - m) \quad (7.5.7)$$

donde

$m = p + q$ (índices de modelos autorregresivos, de medias móviles o ambos)

$\widehat{\rho}$ = coeficiente de autocorrelación

7.5.2. Normalidad del Error. Puede advertirse con la comparación de la función de distribución de a_t tipificada y $N(0,1)$.

8. PROYECTO HIDROELÉCTRICO MIEL I

8.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

La Central Hidroeléctrica Miel I¹ propiedad de ISAGEN S.A. E.S.P., está localizada en Colombia, en el Municipio de Norcasia al oriente del Departamento de Caldas, aproximadamente a 45 kilómetros del Municipio de La Dorada. Construida entre los años 1997 y 2002, fue concebida para aprovechar un caudal promedio de 84.3 m³/s de los ríos Miel y Moro, y generar un promedio anual de 1,460 GWh con una capacidad instalada de 396 MW.

El área de inundación del embalse es de 1,260 ha, su volumen de 565 millones de metros cúbicos, y su longitud de 22 km sobre la cuenca del río Miel y de 12 km sobre la cuenca del río Moro.

La obra principal de esta central es la presa *Pantágoras* de concreto compactado con rodillo (CCR) con una altura de 188 m desde la cota de fundación en su eje hasta la cresta² (ver *Figura 8-1*).

La cresta de la presa se encuentra en la cota 450 msnm y posee una longitud de 338 m y ancho de 6.50 m. La cara aguas arriba es completamente vertical y aguas abajo se manejaron pendientes entre 1H: 1V en la base y 0.4H:1V al término de la cresta.

¹ La descripción del proyecto es proporcionada por ISAGEN.

² Reconocida como la segunda de este tipo con más altura en el mundo, en el quinto Simposio Internacional de Construcción de Presas en Concreto Compactado con Rodillo celebrado en China, en noviembre del 2007 (organizado por ICOLD, CHINCOLD y SPANCOLD).

La presa ha sido construida con 18 juntas transversales de contracción y se incluyó también una junta longitudinal paralela a la cara aguas abajo de la presa, ubicada en el tercio inferior de la presa para inducir a través de ella, fisuras de origen térmico.

El cuerpo de la presa posee varias mezclas de CCR con contenidos de cemento entre 85 y 160 kg por metro cúbico de concreto ($f'c$ entre 9 y 25 MPa a los 365 días).

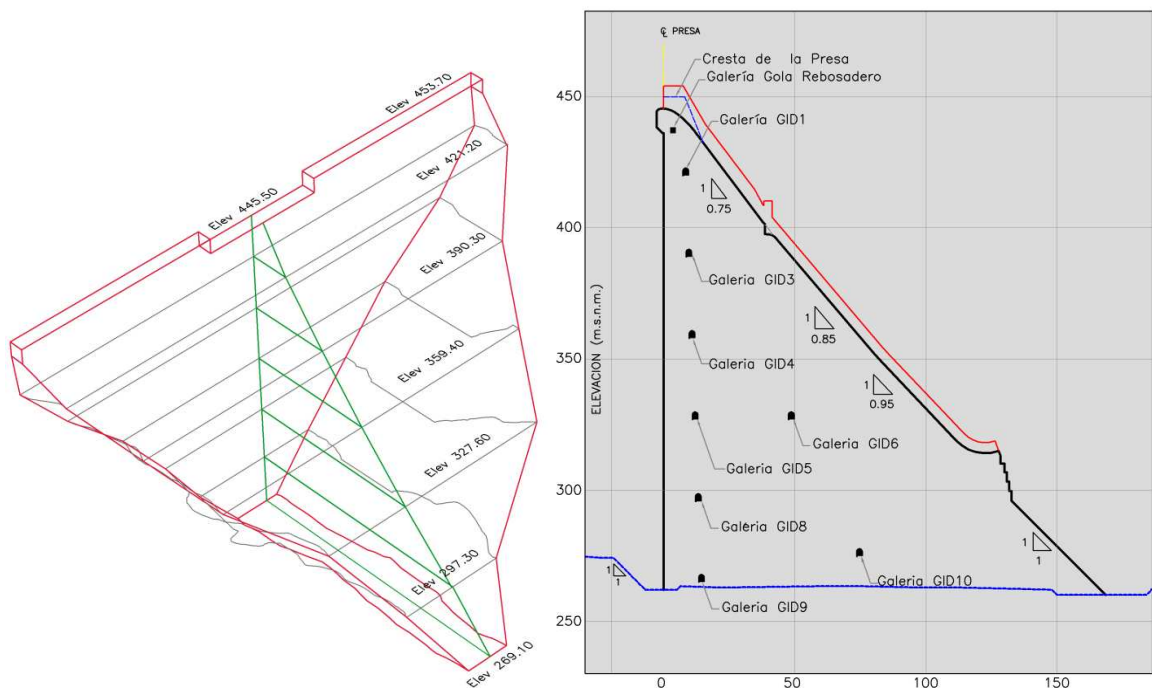


Figura 8-1: Esquema isométrico y sección transversal presa Pantágoras

La sección mostrada corresponde al eje del vertedor y es visible en el esquema isométrico en el centro del cuerpo de la presa (color verde).

8.1.1. Marco Geológico. El sitio de presa se encuentra localizado 200 m aguas abajo de la confluencia entre los ríos Miel y Moro, sobre afloramientos de rocas metamórficas constituidas por *Neis* micáceo con intercalaciones delgadas de *Cuarcita* (unidad geológica del Precámbrico, *P€nm*). Ambos tipos de roca son atravesados por diques andesíticos (unidad geológica del Terciario, *Tdan*) y diques pegmatíticos (unidad geológica del Paleozoico, *Pdp*).

Las familias de discontinuidades presentes en el macizo donde se funda la presa corresponden a eventos de tectónica y de relajación. Son precisamente las debidas a relajaciones las que se presentan abiertas en la proximidad de la superficie de las laderas.

El principal evento tectónico local es una zona de cizalla que compromete en superficie un espesor de cerca de 2 m de roca triturada en el estribo derecho y en la fundación¹. Otras zonas de cizalla de menor escala están presentes en ambos estribos, pero desaparecen o pierden significancia con la profundidad.

En lo concerniente a fallas geológicas regionales, se tienen la *Falla Mulato* y la *Falla de Palestina* a distancias aproximadas de 6 y 10 km respectivamente, ambas consideradas como generadoras potenciales de sismos para la zona.

8.1.2. Sistema de Impermeabilización. Para garantizar la estanqueidad del embalse en la zona de presa, se desarrolló un sistema consistente en sellos de PVC para cada junta de contracción transversal a la presa; inyecciones en la fundación para consolidación superficial y profunda, mezcla de CCR enriquecida en las proximidades de la cara aguas arriba y la instalación de una geomembrana de PVC en dicha cara .

- **Inyecciones de Consolidación**

La inyección superficial compromete una zona equidistante a la superficie de los estribos y fundación de 15 m. Las perforaciones para su ejecución se realizaron en forma de abanicos alternos hacia arriba y abajo (cada 3 m) desde las galerías y desde el plinto perpendiculares a la superficie, como lo muestra la *Figura 8-2*.

¹ Esta zona fue limpiada y/o rellenada con concreto, previo a la construcción del cuerpo de la presa.

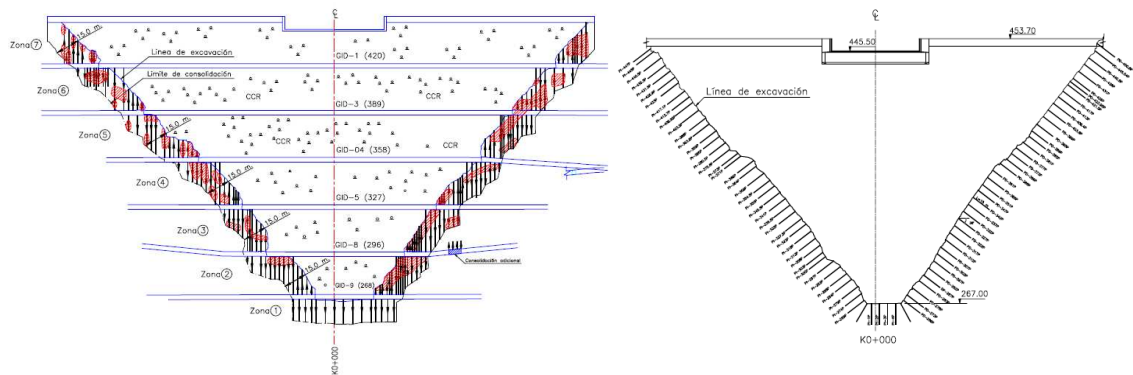


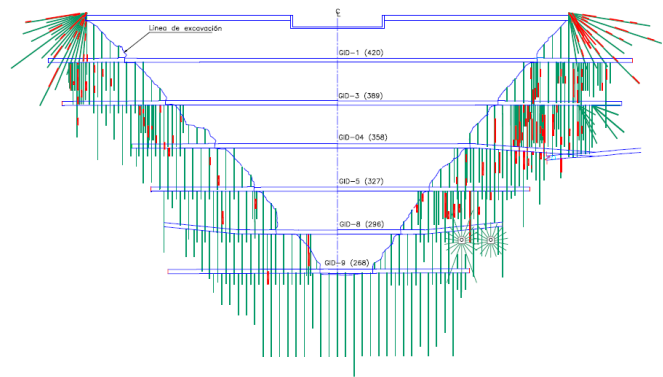
Figura 8-2: Esquemas de consolidación superficial

A la izquierda se muestra el tratamiento ejecutado desde las galerías (zonas en color rojo presentaron tomas altas de lechada) y a la derecha el realizado desde el plinto; ambos definen una zona de influencia hasta 15.00 de la superficie. Fuente: (INGETEC S.A., 2003).

Para la inyección profunda se ejecutaron las perforaciones desde las galerías. Siendo necesario únicamente un tratamiento primario de 80 y 60 m en la fundación con el cauce del río por bajas tomas de lechada. La zona abarcada con este tratamiento se extiende aproximadamente hasta 60 m de la superficie en los estribos (ver *Figura 8-3*).

Figura 8-3: Esquema de consolidación profunda

Todas las perforaciones son ejecutadas desde las galerías; las zonas con color rojo presentaron tomas altas de lechada. Fuente: (INGETEC S.A., 2003).

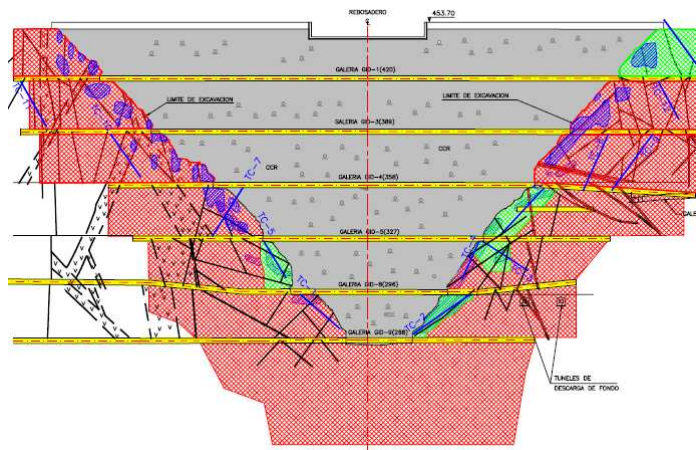


Las unidades Lugeon al término de las actividades de consolidación, son resumidas esquemáticamente en la *Figura 8-4*.

Figura 8-4: Esquema de unidades Lugeon residuales

Se han determinado las U.L. por ensayos de agua ejecutados posterior a la realización de las inyecciones de consolidación. El color rosa indica zonas con menos de 2 U.L.; el verde entre 2 y 3 U.L. y las azules reiteran las zonas que tuvieron las mayores tomas en la inyección.

Fuente: (INGETEC S.A., 2003).



8.1.3. Sistema de Drenaje. La red de drenaje sigue básicamente el mismo patrón de la cortina de inyección profunda con la diferencia de adentrarse en el cuerpo de la presa y comprometer una profundidad menor en el basamento, de aproximadamente 40 m desde la superficie.

8.1.4. Instrumentación. Todo el proyecto hidroeléctrico cuenta con una amplia gama de dispositivos que monitorean el comportamiento geotécnico de las cavernas, túneles, taludes exteriores, la presa y sus alrededores.

Particularmente para auscultación del comportamiento de la presa y su fundación se han instalado internamente: termocuplas para control térmico durante la etapa de construcción¹; celdas de presión, medidores de deformación, medidores de desplazamiento de juntas, piezómetros de hilo vibrátil, extensómetros de posición múltiple, vertederos para medición de infiltraciones y externamente un red de puntos de control topográfico.

¹ Los registros de temperatura en el cuerpo de la presa se siguen tomando en la actualidad.

- **Estado de la Instrumentación**

Durante el periodo de construcción y los primeros años de operación de la central, se han presentado averías en algunos dispositivos de medición e inconvenientes en la toma de lecturas, la cual todavía no ha podido automatizarse completamente.

Las dificultades en la toma de lecturas han resultado en series con espacios significativos entre lecturas y los problemas atribuibles a los dispositivos radican en valores extremadamente grandes en las lecturas.

Por las razones anteriores se utilizan en este documento solamente algunas de las series instrumentales. Se presta atención a los registros piezométricos en la fundación de la presa con más continuidad.

8.2. SERIES DE TIEMPO, INSTRUMENTACIÓN PRESA

Se dispone de algunos registros que muestran la evolución de las variables: desplazamiento, presión de poro, carga total aplicada, nivel de embalse, infiltración, aceleraciones sísmicas, temperatura y deformación; tomados en diferentes zonas dentro del cuerpo de la presa y su fundación.

En esta sección se enfoca el análisis hacia los datos de presiones piezométricas en fundación, en los contactos presa-basamento y la serie de tiempo de los niveles de embalse.

Cada historia de registros disponible, se considera una serie de tiempo $Y(t)$ porque agrupa un conjunto de observaciones a través del tiempo y se procura para ellas un orden cronológico, aun en los casos donde existen lapsos sin lecturas.

8.2.1. Análisis de Serie de Niveles de Embalse. Los niveles del embalse constituyen sin lugar a dudas la más importante de las variables medidas y de las series disponibles, pues la mayoría de las solicitudes generadas en el cuerpo de la presa y el comportamiento de todo el medio que contiene el vaso es afectado por la fluctuación de los niveles del espejo de agua retenida (obviando las solicitudes de tipo dinámicas). Otra característica especial de esta serie es su estocasticidad porque no es predecible de forma determinística; caso contrario del resto de variables que obedecen a leyes de causa y efecto y en teoría¹ son explicables por los registros de la primera.

Se dispone para esta variable de una secuencia completa de registros diarios que van desde el día 01 de Diciembre del año 2002 hasta la actualidad (29 de Julio del 2010), tal como se mostró en la *Figura 7-1*.

En la *Figura 8-5* se muestra la descomposición variacional para la variable *Niveles de Embalse*. Ya en la *Figura 7-1*, era posible advertir la estacionalidad de esta serie cada 12 meses con la aparición de valores pico, máximos y mínimos influenciado por los períodos climáticos anuales.

La *Figura 8-5a* describe el comportamiento estacional anual, comenzando en el mes de diciembre donde se suelen presentar los registros máximos; contrario ocurre en los meses de agosto y septiembre (meses 9 y 10) donde los niveles llegan a sus mínimos. La *Figura 8-5b* contiene las sub-series de cada año.

La *Figura 8-5c* muestra la componente aleatoria. La *Figura 8-5d* muestra la tendencia de la serie, sin describir una tasa de crecimiento o decaimiento para toda la serie; es posible imaginar sobre esta figura una línea horizontal en la cota

¹ El componente no determinista de las demás series obedece a errores en lecturas, dispositivos de medición, restricciones artificiales impuestas y desconocimiento de la ley de causa efecto o parámetros dentro de la ley que gobiernan la variable.

420msnm (media aproximada) en torno a la cual los valores fluctúan mensualmente sin tendencias a largo plazo.

Para la modelación de la serie de niveles de embalse de la presa Pantágoras, no se considera necesario el uso de modelos no-lineales; los cambios en media y varianza que se presentan en la serie se deben a la variación estacional y no a efectos de volatilidad, esto es fácil de predecir si se considera que la variable que se encuentra en medición no es capaz de experimentar cambios abruptos y volver a valores normales entre períodos cortos de tiempo. Ante rápidas crecidas por lluvias o el vaciado controlado por la apertura de la descarga de fondo, se seguirían niveles igualmente bajos o altos por varios períodos antes de volver a la normalidad.

**La *Figura 8-6* y *Figura 8-7* tratan de explicar la linealidad de la serie.
La *Figura 8-6***

Figura 8-6 muestra la dispersión para Y_t versus Y_{t-1} para los datos diarios y mensuales, es claramente visible el comportamiento lineal de esta dependencia.

La *Figura 8-7* contiene los valores de autocorrelación para retardos de la serie mensual; los mayores valores se encuentran con periodicidad anual, indicando que es posible un modelo lineal. En los modelos no lineales las autocorrelaciones dejan de ser significativas hasta retardos muy grandes sugiriendo índices (p, d, q) demasiado grandes para tratarse como modelos lineales o no poseen correlación significativa sino para momentos de mayor orden como ya se mencionó antes.

Figura 8-5: Componentes de serie de tiempo Niveles de Embalse presa Pantágoras

Se muestra un esquema de las variaciones en la serie temporal, para ello se han tomado períodos de tiempo mensuales. En "A" se muestra el índice de estacionalidad para cada mes estacional, normalizado con media 100%; en "B" cada estación como una sub-serie (años 2003 a 2010); en "C" la distribución de la componente aleatoria normalizada con media 100% y en "D" la tendencia de los valores de los niveles en msnm. (Elaborado a partir de datos proporcionados por ISAGEN).

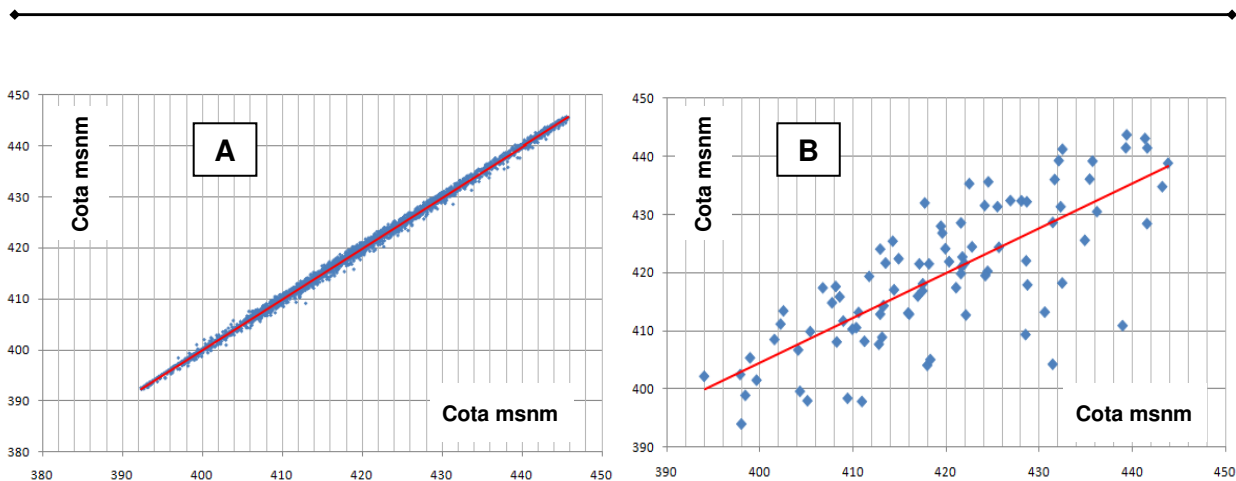
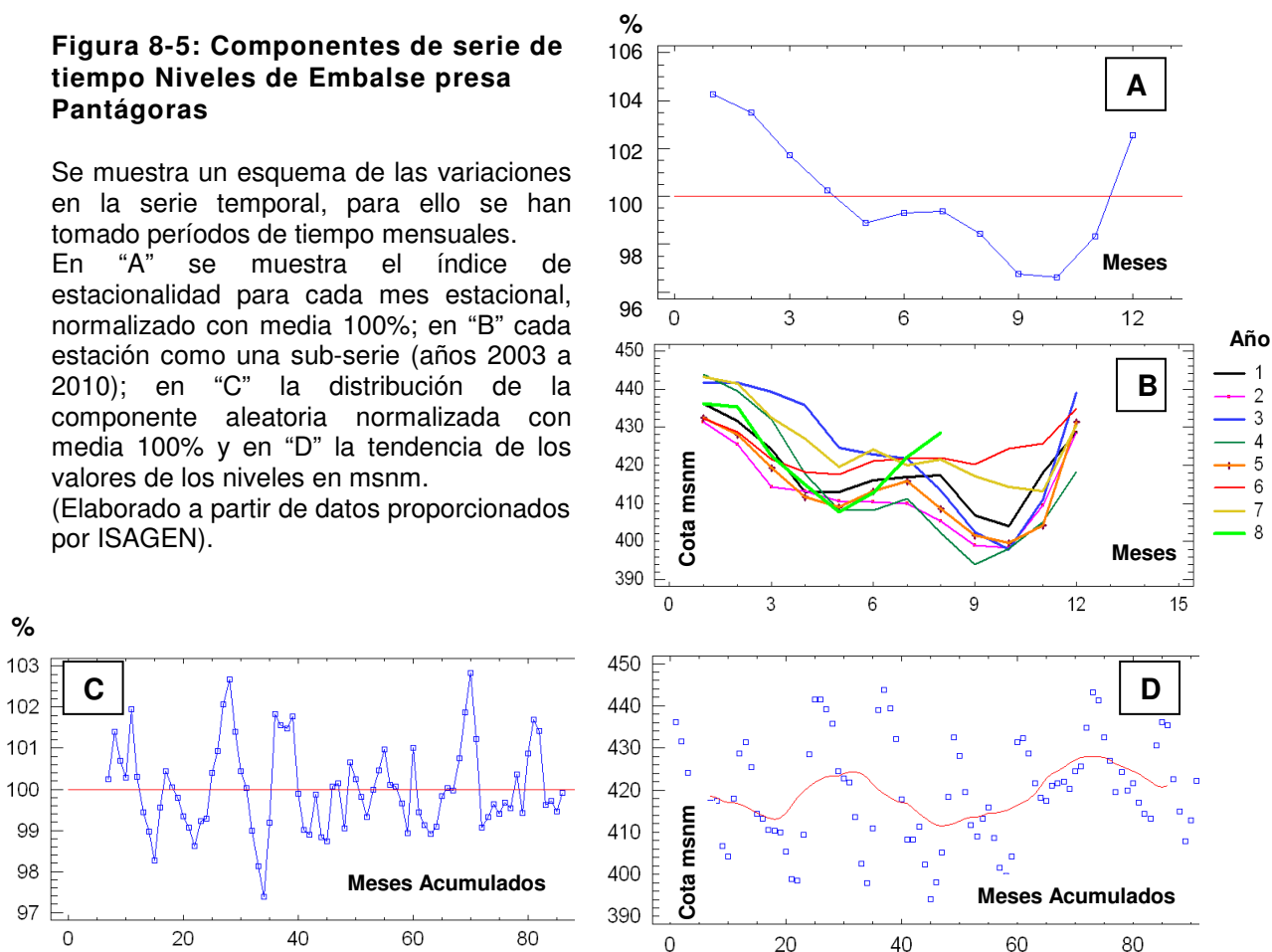
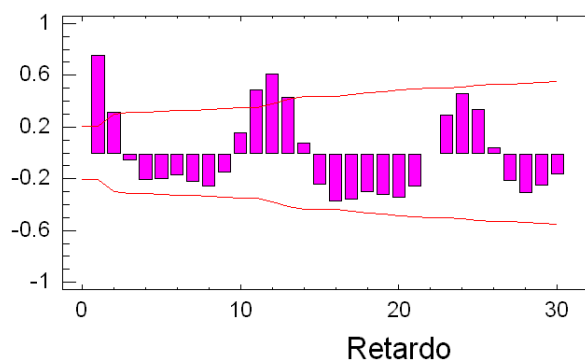


Figura 8-6: $Y(t)$ vs. $Y(t-1)$ en msnm, niveles de embalse, presa Pantágoras

En "A" los intervalos de tiempo son diarios y la tendencia es claramente lineal. En "B" los intervalos de tiempo son mensuales y la tendencia sigue siendo lineal, aunque los datos son más dispersos.

Figura 8-7: Autocorrelaciones, serie de tiempo mensual para niveles de embalse, presa Pantágoras

La serie exhibe significancia estacional anualmente, sugiriendo que es posible utilizar un modelo lineal de bajo índice (p, d, q) si se considera la estacionalidad.



Para evidenciar de forma analítica el comportamiento estacional de la serie mostrada en la *Figura 7-1*, e identificar el modelo lineal aplicable se debe llevar la serie a intervalos de tiempo más grandes. Si se obtienen los valores de autocorrelación (*FAS* o *FAP*) la periodicidad estacional aparece con valores significativos para retardos de orden “*k*” igual al periodo estacional (ver *Figura 8-7*). Si la serie se mantiene a intervalos diarios no es posible percibir el comportamiento por la cantidad de datos entre cada período estacional. Para salvar este inconveniente se redefine la serie con los valores promedio mensuales; la *Figura 8-8* muestra ambas series con los datos diarios y mensuales, y la *Tabla 8-1* contiene los estadísticos básicos de la serie mensual.

Tabla 8-1: Estadísticos serie $Y(t)$ = niveles de embalse mensuales (msnm)

Datos	92	Desviación típica	12.10	Primer cuartil	410.79	Curtosis	-0.702
Media	419.566	Error estándar	1.26	Segundo cuartil	428.62	Curtosis tipificada	-1.374
Mediana	418.88	Mínimo	394.05	Rango intercuar.	17.84	Coef. de variación	2.88%
Media geométrica	419.393	Máximo	443.8	Asimetría	0.0882	Suma	1.17387E6
Varianza	146.52	Rango	49.75	Asimetría tipi.	0.345		

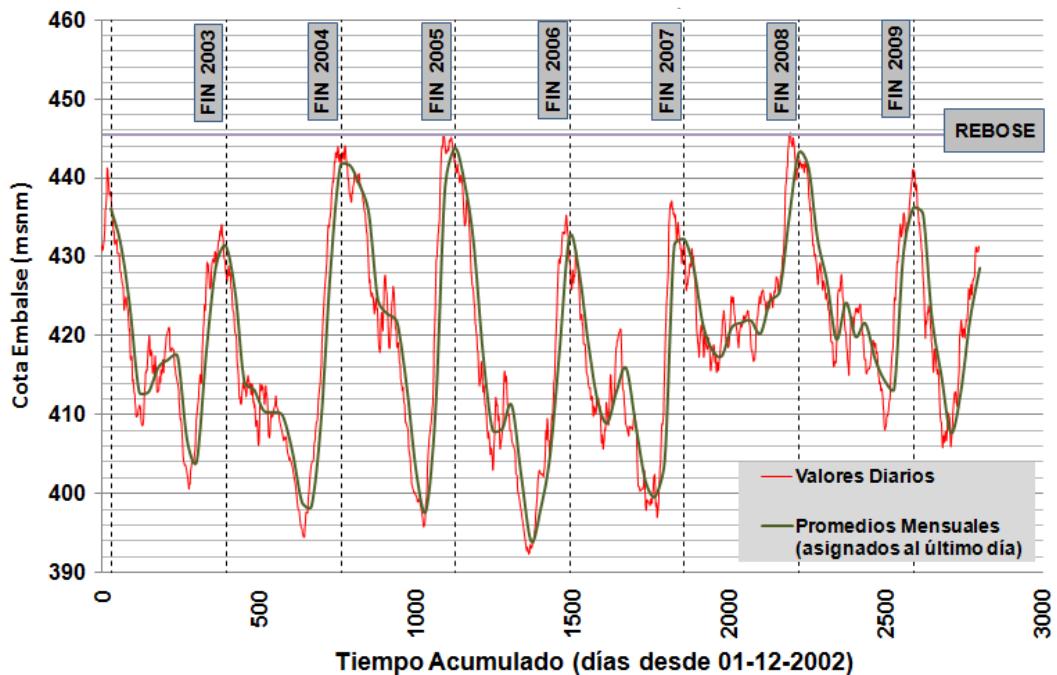


Figura 8-8: Comparación series de tiempo: $Y(t)$ = niveles del embalse AMANI

La curva en color rojo representa la historia de datos diarios y la curva en color verde se construye a partir de los promedios mensuales asignados al último día de cada mes.

En iteraciones entre posibles modelos *ARIMA* para la serie de los niveles de embalse se encontró que los mejores ajustes resultan de estructuras con índices no mayores a 1; sobresalen por la baja magnitud de los residuales las siguientes estructuras:

Modelo 1: $ARIMA(1, 0, 1) \times (1, 0, 1)_{12}$

Modelo 2: $ARIMA(1, 1, 1) \times (1, 1, 1)_{12}$

Modelo 3: $ARIMA(1, 1, 0) \times (1, 1, 1)_{12}$

Modelo 4: $ARIMA(1, 1, 0) \times (0, 1, 1)_{12}$

Modelo 5: $ARIMA(0, 1, 0) \times (0, 1, 1)_{12}$

donde:

Los números en paréntesis corresponden a los índices (p, d, q) : el primer arreglo aplicable a la serie original y el segundo considerando estacionalidad de 12 períodos (meses en este caso).

En la *Tabla 8-2* se muestra el resumen de la magnitud de los errores calculados para cada modelo.

Tabla 8-2: Magnitud de residuos en modelos *ARIMA* de mejor ajuste a Niveles de Embalse

Las magnitudes han sido calculadas con las ecuaciones citadas en la sección 7.5.

Modelo	MAE	MAPE	ME	MPE
(1)	3.70	0.88	0.42	0.09
(2)	3.62	0.86	0.05	0.006
(3)	3.68	0.87	0.05	0.006
(4)	3.69	0.88	0.17	0.034
(5)	3.69	0.88	0.15	0.029

Como se puede ver en la *Tabla 8-2*, para estos modelos preseleccionados las magnitudes de los residuos son muy similares. La selección se basa por tanto en el modelo más simple, de menos índices y ese es el modelo 5. Para el cual se muestra el resumen de parámetros en la *Tabla 8-3*.

Tabla 8-3: Resumen de modelo *ARIMA* seleccionado

Parámetro	Estimación	Error Estd.	t	P-Valor
SMA(1)	0.699	0.168	4.157	0.00

La estructura de tal modelo es mostrada con operadores de retardo en la ecuación 8.2.1 y en la ecuación 8.2.2 de forma expandida.

$$(1 - L)(1 - L^{12})Z(t) = (1 - 0.699L^{12}) a_t \quad (8.2.1)$$

$$Z(t) = Zt_{(t-1)} + Zt_{(t-12)} - Zt_{(t-13)} + a_t - 0.699a_{(t-12)} \quad (8.2.2)$$

El significado de la estructura escogida es: cada valor de la serie $Z(t)$ puede explicarse como dependiente de su valor anterior Z_{t-1} y de los valores análogos a esta pareja presentados en la estación anterior (anualidad en este caso).

Adicionalmente existe la componente aleatoria, como era de esperarse en un proceso no determinista y la misma es influenciada también por la estacionalidad.

La *Figura 8-9* muestra los datos observados y las estimaciones por el modelo $ARIMA(0, 1, 0) \times (0, 1, 1)_{12}$. La normalidad y aleatoriedad de los residuos es demostrada gráficamente en la *Figura 8-10*.

Figura 8-9: series de tiempo observada y ajustada para los niveles del embalse AMANI

Se incluyen los límites inferior y superior de las predicciones considerando 95% de confianza.

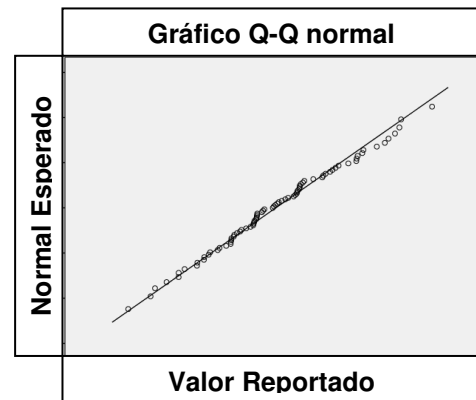
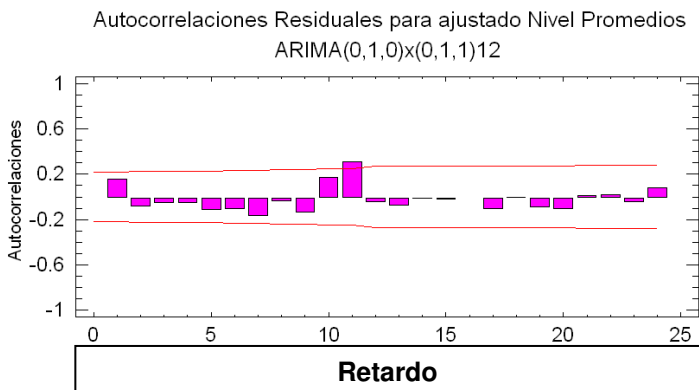
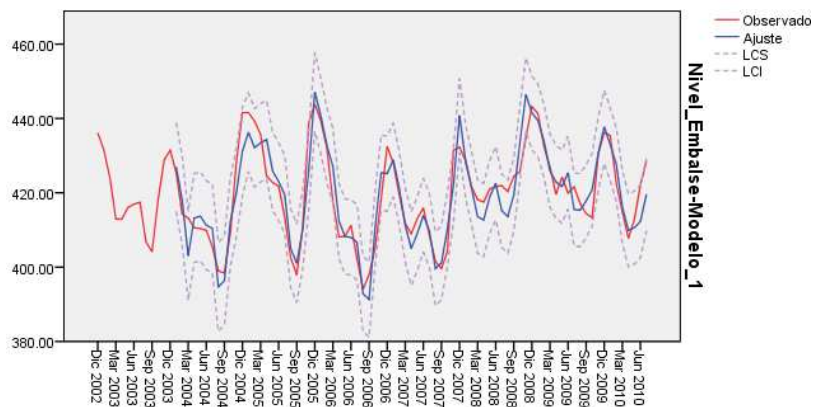


Figura 8-10: Autocorrelaciones y normalidad de los residuos del modelo $ARIMA(0, 1, 0) \times (0, 1, 1)_{12}$

Lo límites de significancia señalan sólo un valor significativo para los residuos y es casi coincidente con la estacionalidad.

8.2.2. Análisis de Series de Presiones Piezométricas. Para el resto de variables instrumentadas en el proyecto, los registros pueden llevarse a un caso bidimensional, donde cada variable se relacione de forma directa con el nivel del embalse. No se considera necesario realizar agrupaciones en dimensión de mayor orden, pues todas las variables son particularmente dependientes del nivel del embalse. De este modo es posible realizar como primer paso, depuraciones para todas las variables con medidas de distancia y estimadores de robustez considerando dicha relación.

En la *Tabla 8-4* se citan las series de registros piezométricos que se utilizan y la *Figura 8-11* esquematiza la ubicación de los dispositivos. La totalidad de los registros de esta y las demás variables no puede utilizarse aún porque se encuentran en fase de depuración por anomalías atribuibles a los dispositivos de medición, como se comentó antes.

Tabla 8-4: Piezómetros con series depuradas disponibles, presa Pantágoras

Las presiones límites se refieren al 34% de la cabeza hidráulica con el embalse lleno hasta la cota 445.50msnm. Fuente: (INGETEC S.A.(b), 2002).

Piezómetros: PEC-contactos PEF-fundación PECH-chequeo	Cota Instalación (msnm)	Presión Límite (kg/cm²)	Distancia Aproximada a Paramento Vertical (m)	Distancia a Eje de Vertedor (m) (-) Izquierda (+) Derecha
PE-C2	290.10	5.3	3	42
PE-C3	308.30	4.7	3	51
PE-C4	320.50	4.2	3	63
PE-CH3	311.40	4.6	10	64
PE-CH4	317.80	4.3	12	64
PE-CH5	310.10	4.6	10	66
PE-CH6	317.90	4.3	12	66
PE-CH7	313.50	4.5	10	-60
PE-F17	324.00	4.1	13.3	-57
PE-F18	315.00	4.5	15.8	-57
PE-F19	305.00	4.5	18.5	-57
PE-F20	324.00	4.1	9.3	69
PE-F21	315.00	4.4	6.9	69
PE-F22	305.00	4.8	4.2	69
PE-F23	324.00	4.1	15.0	69
PE-F24	315.00	4.4	15.8	69
PE-F25	305.00	4.8	18.5	69

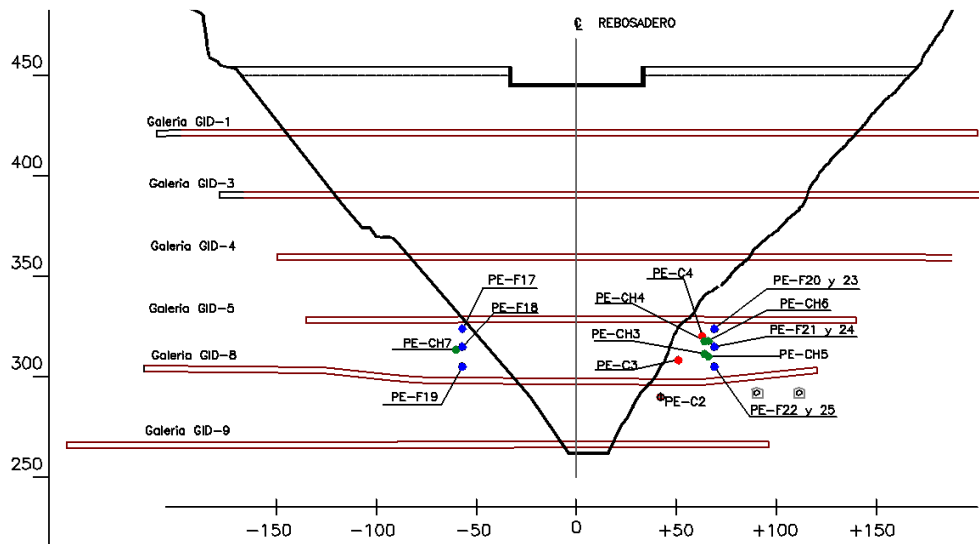


Figura 8-11: Vista posterior de presa, indicando ubicación de piezómetros

Se indica la ubicación de los piezómetros citados en la *Tabla 8-4*. Elaborado a partir de información contenida en (INGETEC S.A.(b), 2002).

En la revisión de los registros de esta variable, se ha encontrado que en la mayoría de los casos no se cumple la normalidad de los datos y las curvas densidad de probabilidad se encuentran marcadamente sesgadas o con comportamientos bimodales. Este comportamiento es de esperarse, en la *Figura 8-12*, se muestran de forma genérica las probabilidades estimadas para los niveles de embalse en presas de generación hidroeléctrica, estos tienden a ser mayores para los extremos (mínimo y máximo) del rango de operación normal de embalse y en consecuencia las subpresiones se aglomeran de igual forma para periodos de operación bajos y altos.

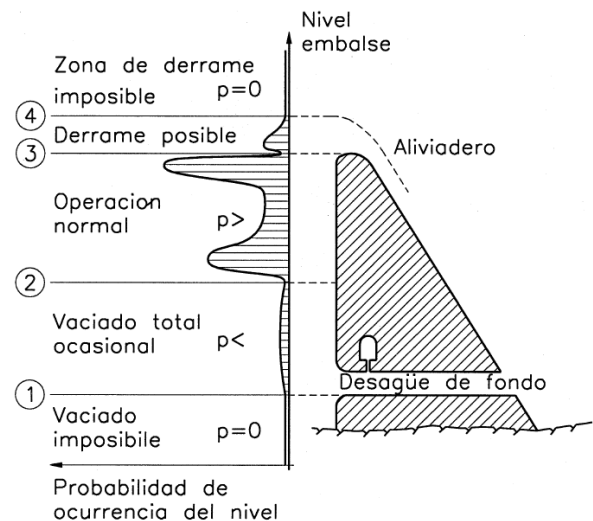
La bimodalidad descrita es un inconveniente para realizar medidas de distancia (fase de depuración de datos), las cuales se basan en hipótesis de normalidad, sin embargo es posible buscar la normalidad de los registros si se tratan como subconjuntos de menor tamaño y con características más uniformes. Este procedimiento se basa en la metodología de análisis de Clúster con utilización de estimadores de robustez (Pereira, y otros, 2005), sigue los siguientes pasos para su aplicación:

- a) Subdividir el grupo muestral en “ k ” subconjuntos, con una metodología de agrupación tipo clúster, con la intención de obtener grupos con distribuciones de probabilidad más similares a $N(0,1)$.
- b) Aplicar detección de VA basada en las distancias de las observaciones dentro de cada subconjunto.
- c) Remover los valores identificados como candidatos a ser VA y repetir iterativamente los pasos anteriores hasta no identificar más anomalías o reducirlas significativamente.

Figura 8-12: Distribución acotada de la probabilidad de ocurrencia del nivel de embalse de una presa hidroeléctrica en operación.

Se indican los siguientes niveles: 1) embalse vacío; 2) mínimo de operación normal; 3) máximo de operación normal; 4) crecida máxima.

Reproducido de (Lombardi, 1999).



Cada serie de datos referente al proyecto que es incluida en este documento se refiere a la serie depurada, basada en la metodología citada. Los clúster se han definido por las asociación de observaciones pertenecientes a rangos específicos de la variable nivel de embalse y el registro correspondiente de la otra variable en estudio. Se han definido subgrupos para rangos de 5 m de nivel de embalse, según la *Tabla 8-5*.

El cálculo de las distancias para detectar valores atípicos se ha realizado por la definición Euclídea y alternamente por la de Mahalanobis, sin embargo los resultados para estos casos simples de orden bidimensional han sido muy similares.

Tabla 8-5: Subgrupos para la serie Niveles de Embalse
En base a estos rangos se agrupan el resto de variables del proyecto

Subgrupo	Rango de Nivel de Embalse	Subgrupo	Rango de Nivel de Embalse
1	390-395	7	420-425
2	395-400	8	425-430
3	400-405	9	430-435
4	405-410	10	435-440
5	410-415	11	440-445
6	415-420	12	>450

Las distancias normalizadas con la desviación de cada grupo se han comparado contra un valor límite “ k ”, que en el caso unidimensional se ha tomado igual a 2, considerando el 95% de los datos centrados a su valor medio y el resto como posibles candidatos de VA (ecuación 8.2.3).

$$\frac{|X-\bar{X}|}{s} > k \quad (8.2.3)$$

Para el caso bidimensional las distancias se comparan con el Mahalanobis correspondiente para datos dispersos “ k ” desviaciones S_1 y S_2 para las variables respectivas; donde “ k ” es tomado como 2, igual que en el caso unidimensional. Alternamente se pudieron comparar las distancias cuadradas con $k = \chi^2_{(p,1-\alpha)} = 5.99$ que es la distribución de Chi-cuadrado para $p = 2$ (bidimensional) y $\alpha = 0.05$ (Acuña, y otros, 2004).

En la *Figura 8-13* y *Figura 8-14* se muestran los gráficos de dispersión bivariable para los piezómetros de hilo vibrátil citados en la *Tabla 8-4*, antes y después de la

depuración de los datos. En las Figuras 8-15 a 8-18 se muestran los gráficos para estas series de tiempo depuradas, sin la descripción de los estadísticos básicos porque con la división en subgrupos cada clúster posee sus propios estadísticos.

Las figuras citadas muestran la existencia de una relación entre las variables presión y nivel de embalse; además en todos los casos la relación es directamente proporcional al comportamiento de los niveles del embalse (variable independiente).

Una característica interesante del comportamiento bi-variable de la *Figura 8-13* y *Figura 8-14* es que a mayores cotas de embalse la relación se vuelve más difusa, la dispersión de los datos es mayor y se puede observar en la mayoría de los registros comportamiento de tipo multimodal, es decir para un mismo rango de cotas de embalse las presiones se tienden a agruparse en subgrupos. Esta agrupación evita que la depuración concentre los datos, pues todos los subgrupos tienen peso estadístico. El razonamiento de este comportamiento es abordado en la siguiente sección.

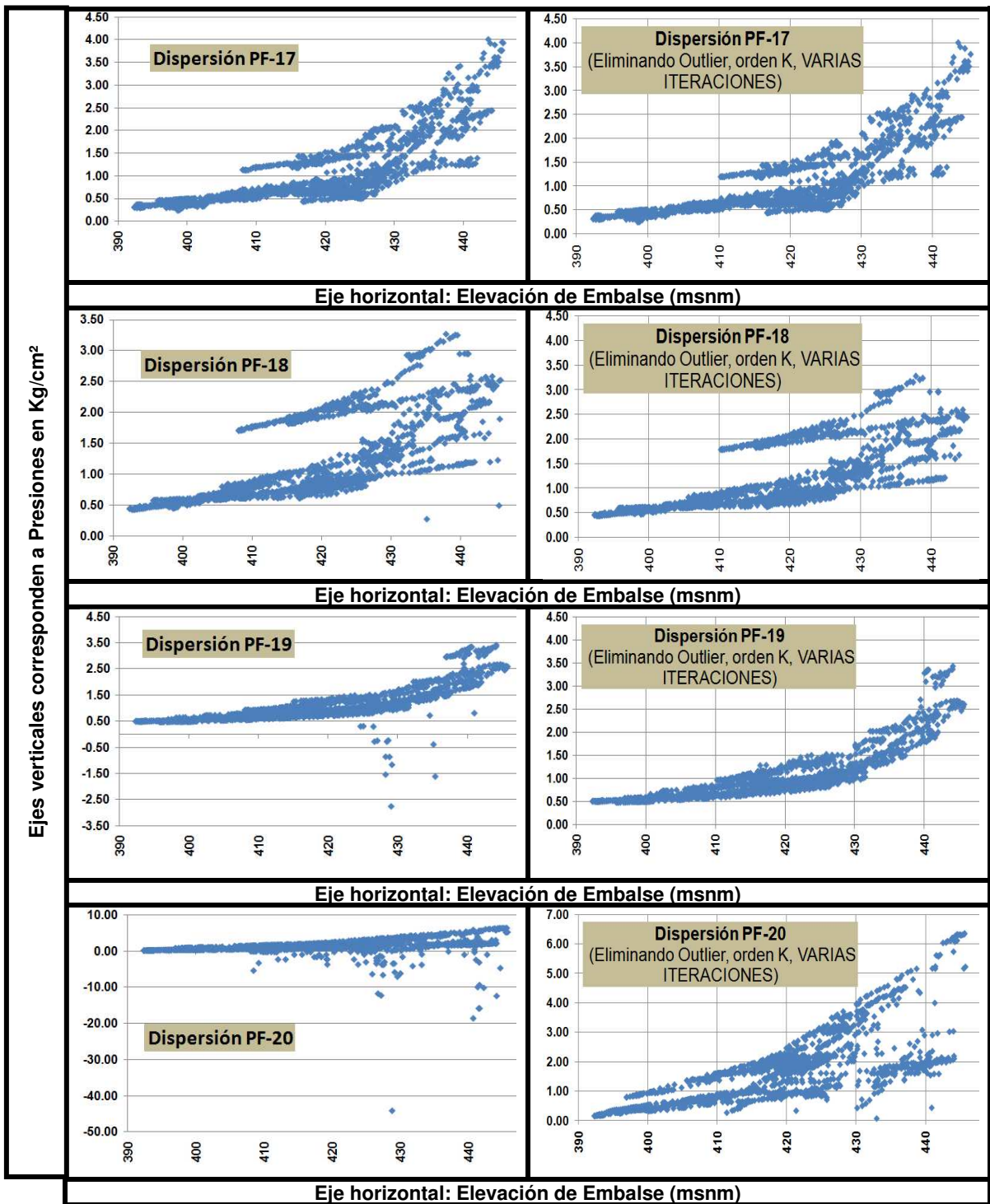


Figura 8-13: Dispersiones bivariable para niveles de embalse y presiones piezométricas

El eje "X" corresponde a los niveles del embalse en msnm; en "Y" se encuentran las presiones registradas en kg/cm². PF es la codificación utilizada por ISAGEN para identificar los piezómetros de hilo vibrátil ubicados en la fundación.

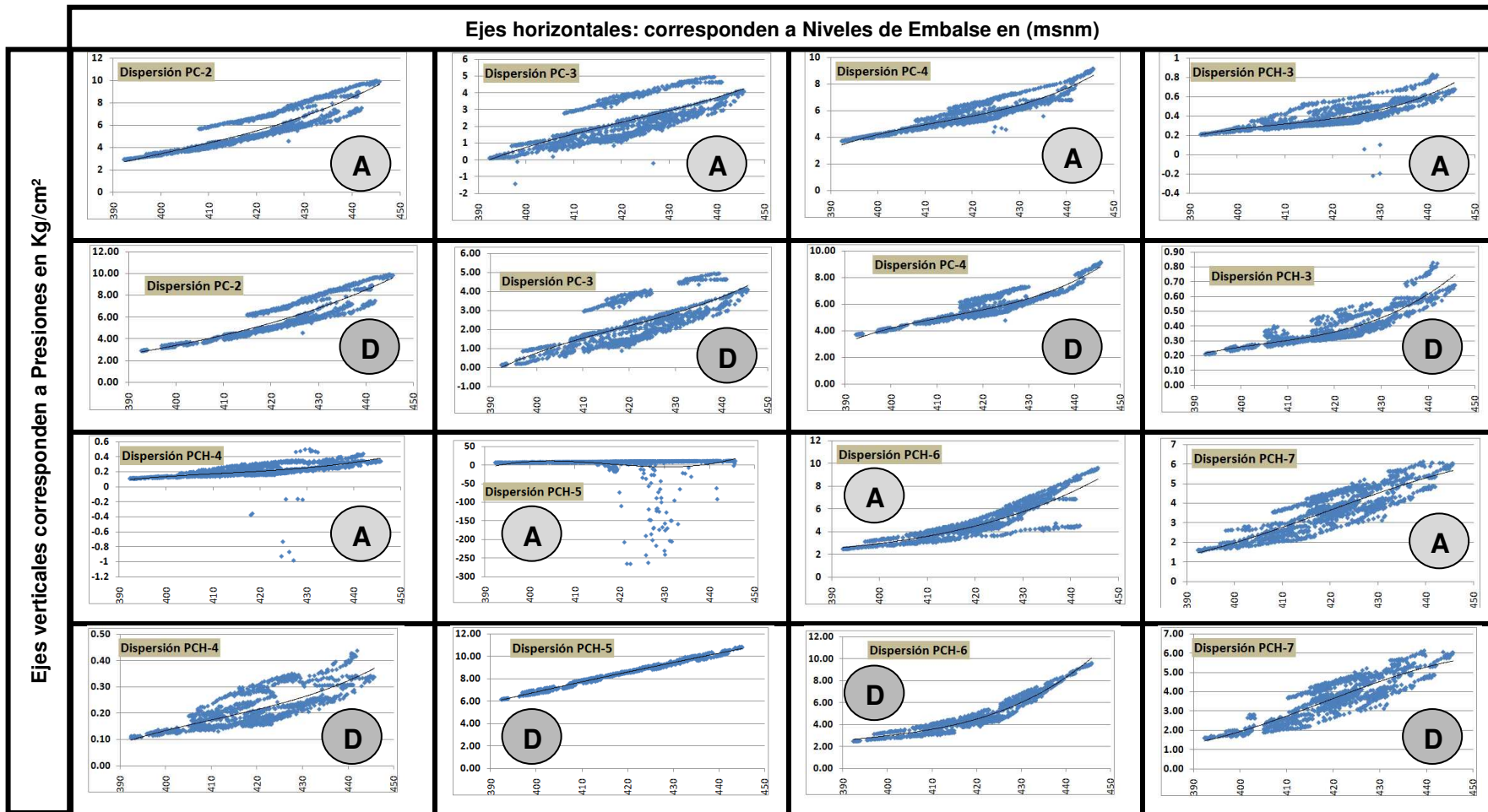


Figura 8-14: Dispersiones bivariable para niveles de embalse y presiones piezométricas (2)

Antes (A) y después (D) de la depuración. El eje "X" corresponde a los niveles del embalse en msnm; en "Y" se encuentran las presiones registradas en kg/cm². PC es la codificación utilizada por ISAGEN para identificar los piezómetros de hilo vibrátil ubicados en contactos presa-basamento y PCH son piezómetros en zonas de control que presentaron permeabilidades mayores al resto de la fundación (ver Figura 8-4).

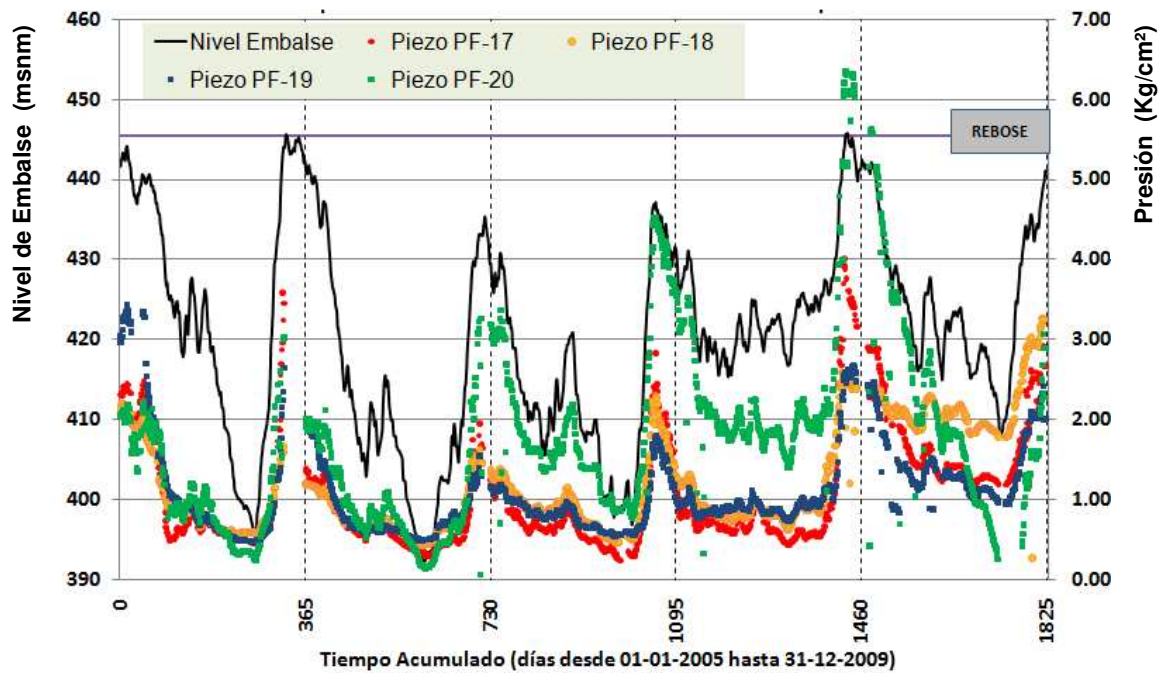


Figura 8-15: Series de tiempo depuradas años 2005-2009, para piezómetros PF-17 a PF-20 en fundación de presa Pantágoras

En el eje “y” se señalan los niveles del embalse en msnm y las presiones registradas en kg/cm^2 .

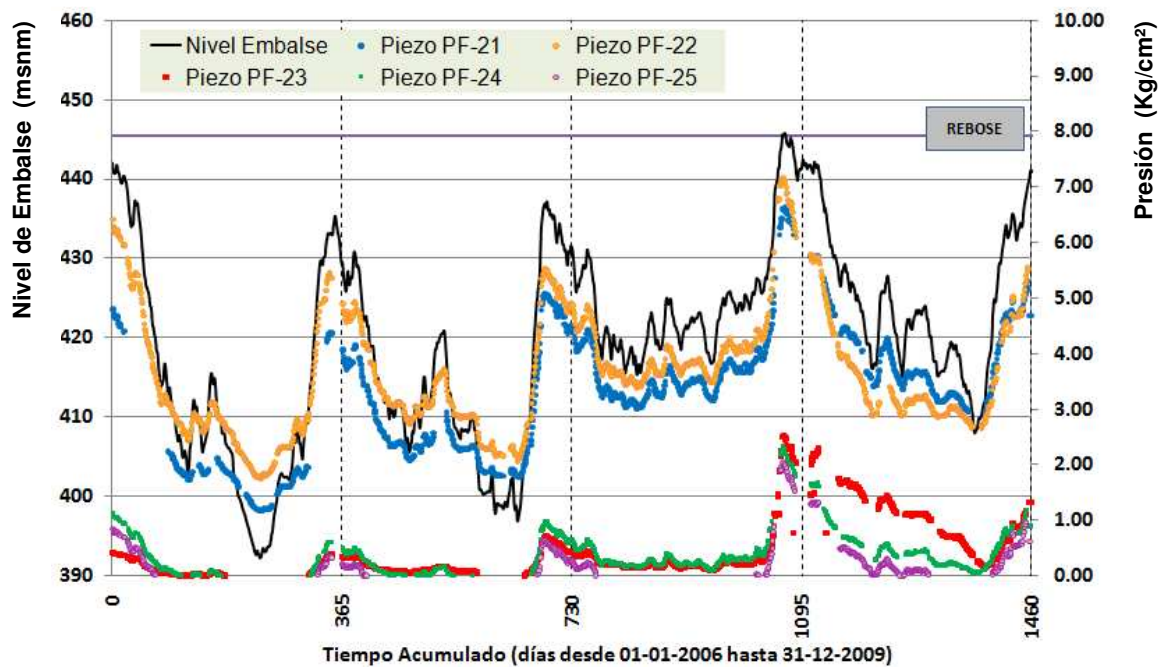


Figura 8-16: Series de tiempo depuradas años 2006-2009, para piezómetros PF-21 a PF-25 en fundación de presa Pantágoras

En el eje “y” se señalan los niveles del embalse en msnm y las presiones registradas en kg/cm^2 .

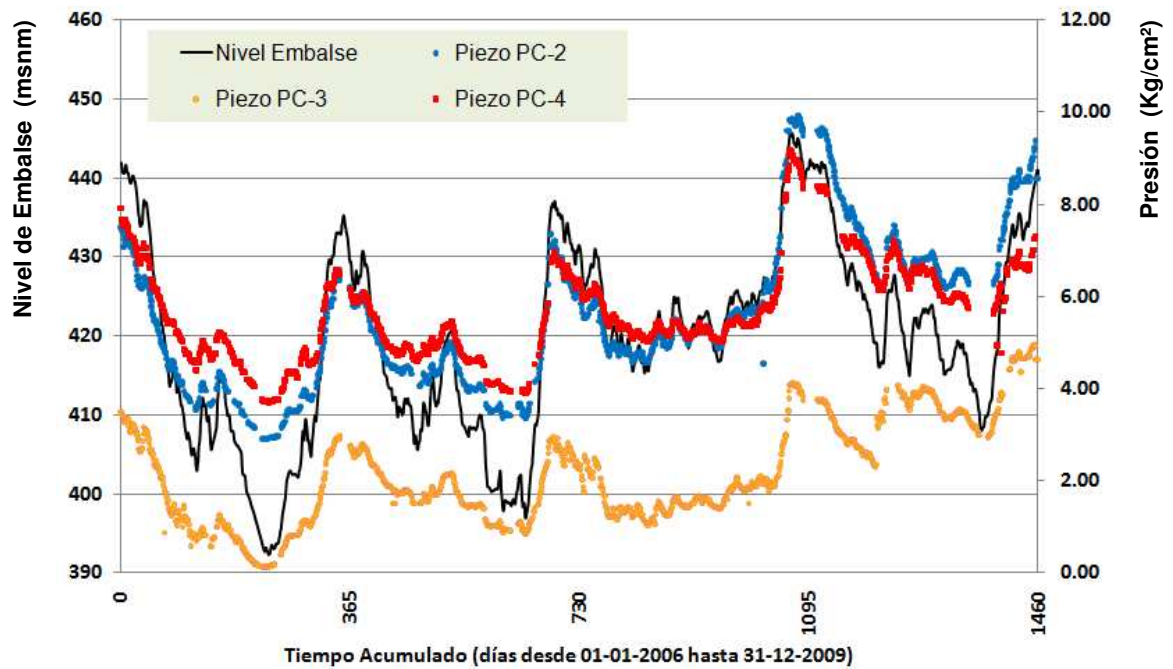


Figura 8-17: Series de tiempo depuradas años 2005-2009, para piezómetros PC-1 a PC-4 en contactos presa-basamento; presa Pantágoras
 En el eje “y” se señalan los niveles del embalse en msnm y las presiones registradas en kg/cm².

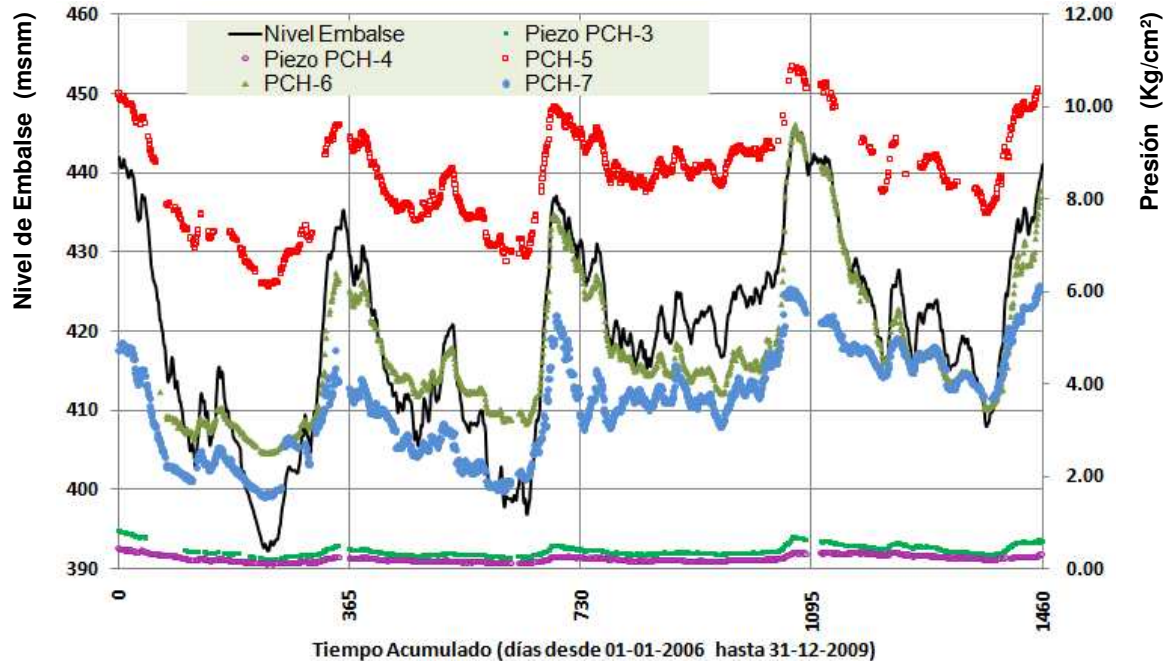


Figura 8-18: Series de tiempo depuradas años 2005-2009, para piezómetros PCH-3 a PCH-7 en contactos presa-basamento; presa Pantágoras
 En el eje “y” se señalan los niveles del embalse en msnm y las presiones registradas en kg/cm².

9. INTERPRETACIÓN DE LOS REGISTROS

9.1. CRITERIOS DE DISEÑO

Son de especial atención en este documento los criterios adoptados en el tema de subpresiones, ya que se dispone justamente de registros que muestran la evolución de esta variable en los últimos años de operación de la central (ver *Sección 8.2.2*).

El diseño del cuerpo de la presa ha contemplado que las subpresiones en todos los contactos presa-basamento no superen el 34% de las presiones teóricas, que corresponden a la diferencia entre los niveles máximo de operación (445.50 msnm) y la cota del contacto.

9.2. INFILTRACIÓN EN MEDIOS POROSOS

Previo a la interpretación de los registros piezométricos es necesario abordar por lo menos de un modo somero la temática de análisis de flujo de agua a través de un medio. Recordando que estos análisis tienen por objetivo la determinación de cantidades estimadas de gasto, presiones de poro y establecer la magnitud de los gradientes de hidráulicos (Lakshmi, 2003).

El estudio del fenómeno físico que rige el flujo de agua a través de un medio poroso tiene sus inicios en los principios propuestos por H. Darcy, quién en 1855 y 1856 realizó experimentos para estudiar los principios que regían el flujo de agua a través de columnas de suelo y definió la relación entre la carga hidráulica aplicada, la permeabilidad del material y el flujo en régimen establecido (*ecuación 9.2.1*).

$$Q = KiA \quad (9.2.1)$$

Posteriormente en 1880 Forchheimer estableció que la carga hidráulica que origina el flujo es además una función que satisface la ecuación de Laplace (ecuación 9.2.2) y Casagrande A. en 1937 planteó la resolución de esta ecuación por el método gráfico de trazado de redes de flujo (familias de curvas ψ y \emptyset).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \nabla^2 h = 0 \quad (9.2.2)$$

Los desarrollos posteriores han permitido extender la aplicación de la ecuación (9.2.1) a situaciones que difieren de las condiciones iniciales supuestas por Darcy y a desarrollar métodos para la solución de la ecuación del flujo (9.2.2) por nuevas técnicas analógicas, analíticas y numéricas aplicables a proyectos de ingeniería.

Todas estas técnicas desarrolladas hacen la diferencia entre dos escenarios posibles: flujo confinado y no confinado. En el análisis de flujo para presas esto equivale a decir que cuerpos de presa relativamente impermeables presentan flujo de tipo confinado a través del material de basamento; esta condición es caracterizada por el conocimiento o la posibilidad de establecer todas las fronteras del modelo (condiciones de borde).

El caso de flujo no confinado corresponde a diques, bordos y presas de enrocado, estructuras donde la permeabilidad de la presa es tal, que no puede despreciarse y se considera un medio donde pueden ocurrir filtraciones importantes además del basamento.

En esta última condición el flujo establece una frontera dentro del cuerpo mismo de la presa, definiendo una zona de saturación y una zona seca. Esta frontera es siempre desconocida (ver *Figura 9-1*) y su definición es un objetivo primario de la técnica de resolución que se aplique.

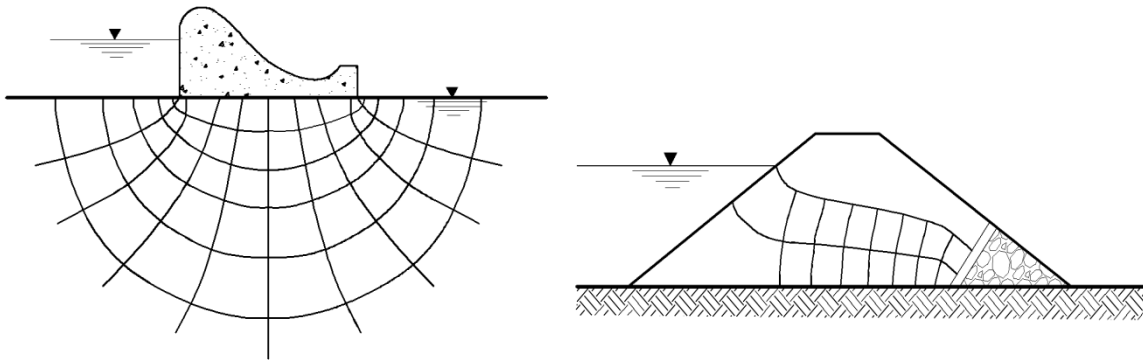


Figura 9-1: Tipos de flujo en presas

Izquierda, esquema de flujo confinado en presa de concreto con basamento infinito. Derecha, esquema de flujo no confinado en presa de enrocado con basamento impermeable. Digitalizado a partir de USACE (1993).

9.3. INFILTRACIÓN EN MACIZOS ROCOSOS

Debido a la baja permeabilidad de las rocas, el tránsito de agua a través de macizos rocosos está principalmente influenciado por las características hidráulicas de las familias de discontinuidades presentes, que son evaluadas por el parámetro de permeabilidad secundaria.

No obstante a lo anterior, la teoría de flujo de agua en medios porosos es comúnmente aplicada como un estimativo para las presiones piezométricas en macizos rocosos, considerando el medio a un nivel macroscópico.

Las metodologías con estudio detallado de las discontinuidades y su afectación al flujo de agua, están orientadas hacia la estimación de caudales de infiltración y la definición de rutas preferenciales para los mismos; considerando fracturas individuales donde el flujo puede ser turbulento (Wyllie, y otros, 2004) y la hipótesis de flujo laminar que es base para la teoría de flujo en medios porosos, pierde su aplicabilidad.

Con esta idea en mente se desarrolló la interpretación de los registros piezométricos en función de la teoría de flujo en medios porosos.

9.4. METODOLOGÍAS DE RESOLUCIÓN FLUJO EN MEDIOS POROSOS

9.4.1. Método Gráfico (redes de flujo). Es aplicable a regiones de flujo unidimensional y bidimensional. Se trata de establecer en base al cumplimiento de condiciones geométricas o de frontera, la ubicación y forma de dos familias de curvas (ψ y \emptyset) que satisfacen la ecuación de flujo de Laplace.

9.4.2. Métodos Analógicos. Parten de la aplicabilidad que posee la ecuación de Laplace a otros fenómenos físicos como transferencia de calor, flujo eléctrico y magnetismo. Se busca para el problema de flujo un modelo equivalente que sea más fácilmente comprensible bajo otra concepción analógica (Juárez Badillo, y otros, 1995).

9.4.3. Métodos Analíticos. Persiguen la transformación de modelos complejos en dominios bidimensionales a formas básicas de fácil o conocida solución. Algunas de estas técnicas incluyen: la metodología de los fragmentos para flujo confinado y no confinado (Pavlovsky, 1956); la hipótesis de Dupuit-Forchheimer para flujo confinado y no confinado (LAKSHMI, 2003); las técnicas de Casagrande para flujo inconfinado en presas de enrocado (Casagrande, 1937); la solución de Kozeny para flujo inconfinado en presas de enrocado; la transformación de Schwarz-Cristoffel para flujo confinado (Juárez Badillo, y otros, 1995), la función de transformación de Polubarinova-Kochina para flujo confinado en estratos de espesor finito (Feng, y otros, 2006), entre otros.

9.4.4. Métodos Numéricos. Buscan resolver la ecuación de Laplace con aproximaciones numéricas acordes a las condiciones particulares de flujo del modelo. Sobresalen los métodos de diferencias finitas, elementos finitos y más

recientemente el de redes neuronales (se recomienda ver (Ersayin, 2006)), todos con aplicación en una, dos y tres dimensiones.

En el desarrollo del conocimiento de estos métodos han sido desarrolladas diferentes técnicas para aplicaciones específicas o sencillamente con planteamientos matemáticos que satisfacen con mayor o menor complejidad la ecuación de flujo. Incluso existen aportes que evalúan situaciones donde no se cumplen todas las hipótesis tradicionales para el estudio del flujo en medios porosos (flujo establecido, medio isótropo y homogéneo, material y agua incompresibles), como ejemplo se encuentran la teoría de suelos saturados / no saturados con flujo transitorio de (Chen, y otros, 2005) y el método de diferencias finitas y elementos finitos considerando la variabilidad de la permeabilidad de (Bazrafshan, y otros, 2008).

9.4.5. Ventajas y Desventajas de los Métodos. Cada técnica desarrollada pretende ampliar la aplicabilidad de la teoría general de flujo e incluir en los análisis un mayor número de variables o consideraciones con la idea de asemejar más fielmente el modelo físico real. Así que una vez escogido el método de análisis, la técnica seleccionada se define no por las ventajas explícitas que contenga, sino por la pericia con que el Ingeniero maneje la temática, la disposición de recursos y la importancia o nivel de complejidad del proyecto que justifique análisis de igual forma complejos.

Los métodos gráficos poseen sencillez de comprensión, existen muchos trazados pre-elaborados de redes para problemas de ingeniería que constituyen una guía para el trazado de una red para un proyecto en particular (Casagrande, 1937; Juárez Badillo, y otros, 1995). Sin embargo las soluciones de este tipo son estimativas e implican la realización de muchas simplificaciones que podrían subestimar la respuesta real de modelos complejos. Además de ser aplicables solamente a análisis bidimensionales.

Los métodos analógicos son difíciles de construir y se han presentado problemas para fijar las condiciones de borde en modelos analógicos con transferencia de calor, modelos viscosos y de tipo magnético. El mayor éxito se logra con modelos de flujo eléctrico y modelos a escala en tanques de arena (USACE,, 1993).

Los métodos analíticos son de fácil ejecución, pero resulta a veces muy complicado establecer funciones de transferencia de los modelos básicos a los reales, en geometrías que no encajan con planteamientos preestablecidos para casos genéricos; en otras palabras son de fácil solución sólo en los casos con regiones de flujo sencillas. Sin embargo es una herramienta potente para diseños preliminares que no requieren mayor detalle.

Los métodos numéricos permiten modelar geometrías más complejas, variar el tamaño de los elementos analizados y de esta forma brindar más detalle sobre zonas de especial interés. Por otro lado sus soluciones son enteramente particulares, no pueden reutilizarse en modelos similares y otro punto débil es la necesidad de programar la técnica en un computador porque no resulta práctica su realización manual.

9.5. MODELO DE FLUJO BASADO EN METODOLOGÍA DE DIFERENCIAS FINITAS

Los planteamientos básicos de la teoría de diferencias finitas consideran la resolución de la ecuación (9.2.2) por la transformación en sistemas de ecuaciones algebraicas, obtenidas por aproximaciones con las *Series de Taylor* y se asegura la unicidad de la solución por la imposición de condiciones iniciales Neumann y condiciones de frontera Dirichlet. El sistema de ecuaciones surge por las incógnitas de las cabezas de presión ($p_{i,j}$) correspondientes a “n” nodos que resultan de particionar el modelo de estudio en rectángulos con dimensiones

finitas en las direcciones “x” y “y” (Δx , Δy), ver *Figura 9-2* y (Rosas, 2008) para la definición de las ecuaciones.

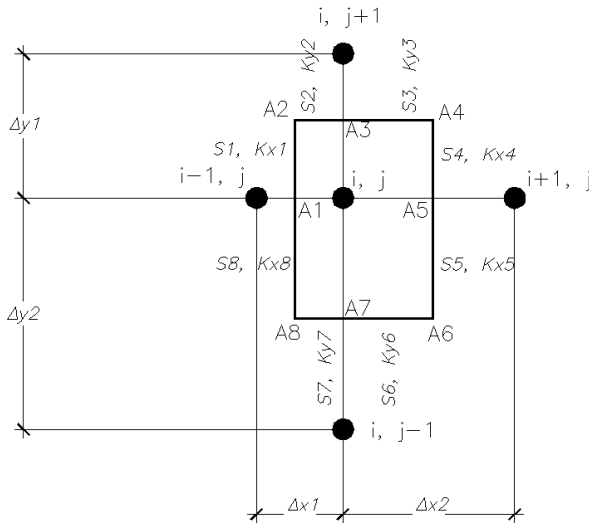


Figura 9-2: Elemento básico (i, j) del análisis por diferencias finitas

En este caso el elemento es un rectángulo con dimensiones “ Δx ” y “ Δy ”. Las letras “S” definen segmentos de la periferia del rectángulo y las letras K_x y K_y representan las permeabilidades en las direcciones “x” y “y” respectivamente. Adaptado de JEAN y TETSUO, (2003).

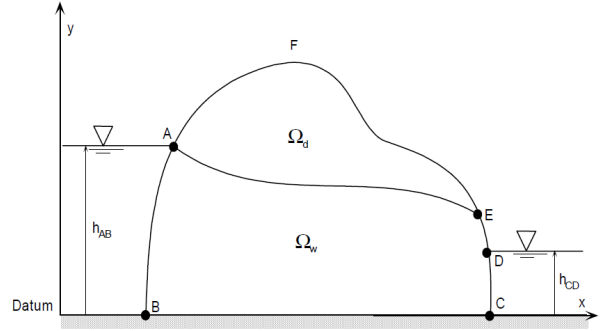
9.5.1. Flujo no Confinado en la Presa. Se ha realizado una modelación preliminar basada en la teoría de flujo no confinado, para visualizar que efecto tendría la falla generalizada en la geomembrana que impermeabiliza la cara vertical de la presa. Se ha utilizado el método de *Presión Extendida* (EP) propuesto por Brezis en 1978 y detallado en (Jean, y otros, 2003). La solución obtenida para este modelo es aproximada ya que el método no ha sido completamente desarrollado para el flujo a través de presas, pero se utiliza por la posibilidad de manipularse con un algoritmo de programación básico o una hoja de cálculo. Además la distribución de este tipo de flujo sólo desea interpretarse, no se considera una situación deseable y completamente posible si se tiene en cuenta la baja permeabilidad del cuerpo de la presa.

Según el método EP, para el dominio del modelo donde se desarrolla el flujo (Ω) se requiere tener una aproximación de la superficie libre que separa el dominio saturado (Ω_w) del seco (Ω_d) y la estimación de las cabezas de presión en el dominio saturado (ver *Figura 9-3*).

Figura 9-3: Esquema genérico del dominio de un problema de flujo no confinado

La superficie Ω_w simboliza el área saturada y Ω_d el dominio seco, los dominios son separados por la superficie libre A-E.

Reproducido de (Jean, y otros, 2003).



La metodología de *EP* modifica el planteamiento tradicional de velocidad de infiltración por la ecuación (9.5.1), que luego de ser convenientemente derivada y transformada brinda la expresión (9.5.2) para aproximar las cabezas de presión en cada nodo incógnita del modelo.

$$v' = -K \llbracket grad(p) + H(p)grad(y) \rrbracket \quad (9.5.1)$$

donde:

K : es la matriz de coeficientes de permeabilidad

p : cabeza de presión

y : posición respecto a un datum

$H(p)$: función escalón unitario

$p_{i,j} =$

$$\frac{1}{D} \left(p_{i-1,j} \frac{k_{x1}S_1 + k_{x8}S_8}{\Delta x_1} + p_{i+1,j} \frac{k_{x4}S_4 + k_{x5}S_5}{\Delta x_2} + p_{i,j-1} \frac{k_{y2}S_2 + k_{y3}S_3}{\Delta y_1} + p_{i,j+1} \frac{k_{y6}S_6 + k_{y7}S_7}{\Delta y_2} \right) + \frac{1}{D} \left((k_{y2}S_2 + k_{y3}S_3)H_e \left[\frac{p_{i,j} + p_{i,j-1}}{2} \right] - (k_{y6}S_6 + k_{y7}S_7)H_e \left[\frac{p_{i,j} + p_{i,j+1}}{2} \right] \right) \quad (9.5.2)$$

donde:

H_e : adaptación de la función escalón unitario con suavizamiento

k_{xn} , S_n , Δx_n , Δy_n : están definidos en la *Figura 9-2* y:

$$D = \frac{k_{x1}S_1 + k_{x8}S_8}{\Delta x_1} + \frac{k_{x4}S_4 + k_{x5}S_5}{\Delta x_2} + \frac{k_{y2}S_2 + k_{y3}S_3}{\Delta y_1} + \frac{k_{y6}S_6 + k_{y7}S_7}{\Delta y_2} \quad (9.5.3)$$

Las deducciones de las ecuaciones 9.5.2 y 9.5.3, al igual que la forma simplificada para medios con permeabilidades iguales en las direcciones “x”-“y” y fragmentación en elementos cuadrados presentada en la ecuación 9.5.4 pueden consultarse en (Jean, y otros, 2003).

$$p_{i,j} = \frac{1}{4} \left(p_{i+1,j} + p_{i-1,j} + p_{i,j-1} + p_{i,j+1} + \Delta_y \left[H_e \left[\frac{p_{i,j} + p_{i,j-1}}{2} \right] - H_e \left[\frac{p_{i,j} + p_{i,j+1}}{2} \right] \right] \right) \quad (9.5.4)$$

9.5.2. Flujo Confinado en el Basamento. En este caso los planteamientos matemáticos son muy similares al caso anterior, con la diferencia de partir de la ecuación de velocidad en su forma tradicional (ecuación 9.5.5), la cual al derivarse y transformarse brinda las ecuaciones (9.5.6) y (9.5.7) análogas a (9.5.2) y (9.5.4) respectivamente.

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} k_x & k_{xy} \\ k_{xy} & k_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \end{pmatrix} \quad \text{ó} \quad v = -K \text{grad}(h) \quad (9.5.5)$$

$$h_{i,j} = \frac{1}{D} \left(h_{i-1,j} \frac{k_{x1}S_1 + k_{x8}S_8}{\Delta x_1} + h_{i+1,j} \frac{k_{x4}S_4 + k_{x5}S_5}{\Delta x_2} + h_{i,j-1} \frac{k_{y2}S_2 + k_{y3}S_3}{\Delta y_1} + h_{i,j+1} \frac{k_{y6}S_6 + k_{y7}S_7}{\Delta y_2} \right) \quad (9.5.6)$$

$$h_{i,j} = \frac{1}{2(1 + \beta)} (h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + \beta(h_{i,j+1} + h_{i,j-1})) \quad (9.5.7)$$

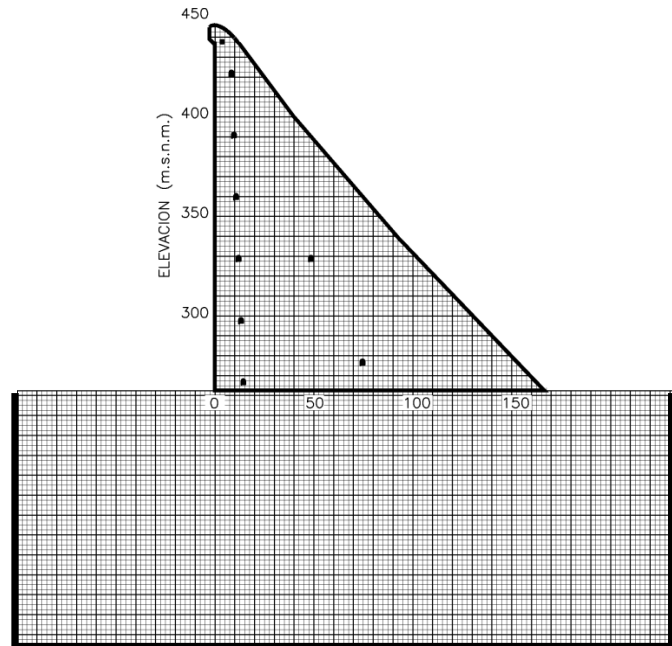
donde:

$$\beta = \frac{k_y}{k_x} \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right)^2 \quad (9.5.8)$$

9.5.3. Retícula del Modelo. Para el análisis por diferencias finitas se han dividido la presa y el basamento en elementos cuadrados de dimensión =1 m; con un total de 280 filas de elementos y 200 columnas, simulando un modelo de 280x200 m, tal como lo muestra la *Figura 9-4*.

Figura 9-4: Esquema de segmentación de cuerpo de presa y fundación

Los elementos cuadrados se han fijado con dimensión = 1 m; con un total de 280 filas de elementos y 200 columnas, simulando un modelo de 280x200 m. Las fronteras del basamento se han supuesto impermeables.



9.5.4. Resultados del Modelo. En las *Figuras 9-5* y *9-6* se muestran de forma gráfica los resultados de cuatro modelaciones para el flujo en el medio en estudio, indicando la distribución de líneas equipotenciales de la siguiente forma:

a) En 9-5a se muestra el caso de flujo no confinado. Como se mencionó antes corresponde a una idealización de una situación de falla del sistema de impermeabilización de la presa y el establecimiento de flujo a través del cuerpo de la presa y basamento. En esta condición las sub-presiones se abaten rápidamente en la fundación, pero en el cuerpo de la presa las presiones cercanas al paramento vertical son de gran magnitud y muestran gradientes hidráulicos considerables, direccionando el flujo de forma horizontal hacia las galerías. Esta condición resultaría por tanto en infiltraciones importantes en las galerías y la

probable apertura de monolitos de la presa por las elevadas presiones que podrían generar hidrofracturamiento en las juntas.

b) En 9-5b se representa la condición de estanqueidad completa dentro del cuerpo de la presa, por tanto el flujo es forzado a ocurrir en el basamento de la presa. No se ha considerado en este caso tratamientos en la fundación, de forma que la subpresión tiene su valor máximo en la pata aguas arriba con una presión igual a la columna hidrostática y el abatimiento hasta la pata aguas abajo es de tipo parabólico.

c) En 9-5c se ha conservado la condición de flujo confinado pero se ha incluido una barrera de 60 m que simula el tratamiento de cortina de inyección profunda. En este caso la subpresión detrás de la cortina baja abruptamente a 70 mca para el caso de embalse lleno hasta la cota 445.50 msnm y considerando la zona más baja de la presa.

d) En 9-5d se repite la condición anterior prolongando la cortina hasta 80 m por debajo de la superficie del cauce del río. Ahora se han reducido aun más las subpresiones y la máxima presión detrás del tratamiento de inyección llega a 60 mca.

e) En 9-6 se incluye además del tratamiento de cortina de inyecciones profunda, el superficial que describe en teoría un abanico de 27 m de diámetro y 15 m de profundidad en la pata aguas arriba de la presa. Las presiones en este caso se señalan de forma porcentual, indicando que con el tratamiento propuesto se está en capacidad teórica de reducir las presiones en la pata aguas arriba a valores entre 30 y 40% del valor de carga hidrostática que correspondería a dicha zona. Además la presión máxima probablemente no actuaría directamente en el contacto presa-basamento, sino que se desplazaría a la periferia del abanico de la inyección superficial.

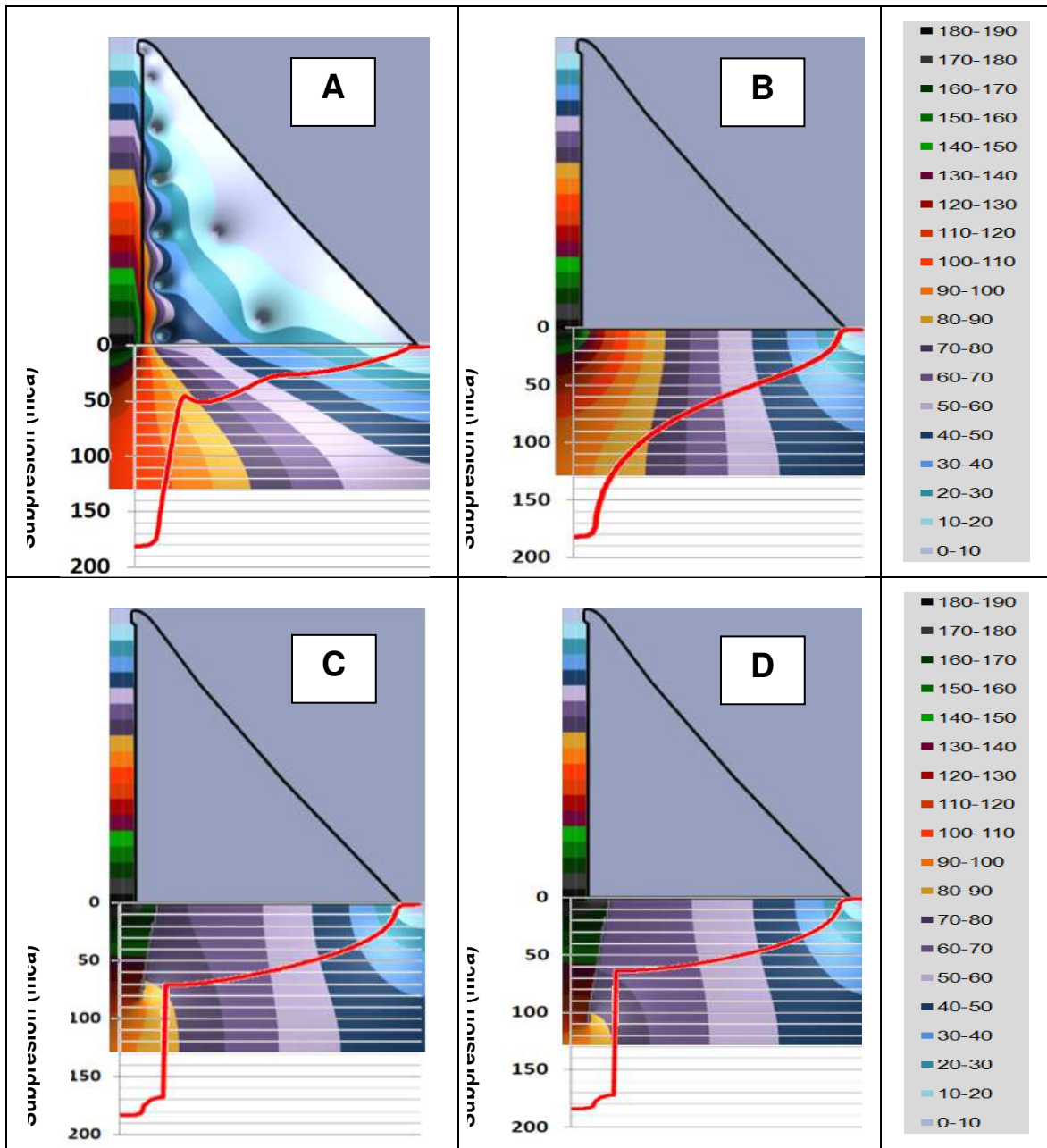


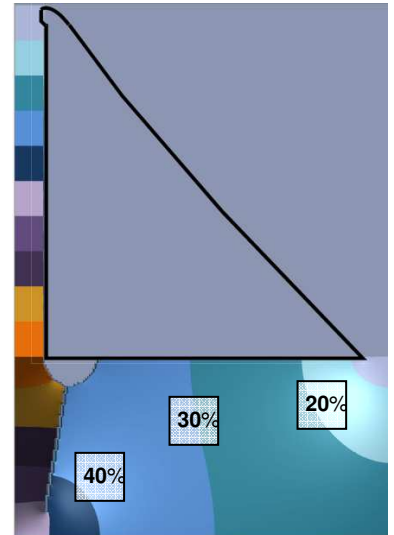
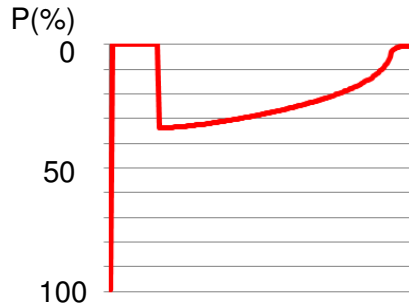
Figura 9-5: Esquemas de líneas equipotenciales, diferentes condiciones de borde

El rango entre líneas (caída equipotencial) es de 10 m. Al lado derecho se incluye carta de colores para cada rango de carga. Cada esquema incluye en la parte inferior el gráfico de subpresión correspondiente en unidades *mca* (metro columna de agua).

El esquema "A" corresponde a una condición de flujo establecido dentro del cuerpo de la presa y obviando la cortina de inyección. En "B" no hay flujo dentro de la presa y tampoco se incluye la cortina de inyección. En "C" no hay flujo dentro de la presa, pero se incluye la cortina de inyección hasta una profundidad de 60m desde la superficie. En "D" no hay flujo dentro de la presa, pero se incluye la cortina de inyección hasta una profundidad de 80m desde la superficie.

Figura 9-6: Esquemas de líneas equipotenciales porcentuales, flujo confinado considerando consolidación superficial y profunda.

El rango entre líneas (caída equipotencial) es de 10 % (10 en total). Se incluye además el gráfico de subpresión correspondiente, en porcentaje de la presión total.



9.6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON REGISTROS

Algunos de los piezómetros citados en la *Tabla 8-4* son indicados en los *Informes del Proyecto* como ubicados aguas arriba de la cortina de impermeabilización de la fundación, cuando en realidad se encuentran por lo menos en la zona de influencia del tratamiento superficial y en consecuencia el registro de estos instrumentos debe mostrar el abatimiento de las presiones teóricas.

Retomando las gráficas de dispersión bivariable de la *Figura 8-13* y *Figura 8-14*, se advirtió sobre la relación directa entre las variables nivel de embalse y presiones piezométricas. Sin embargo con miras a establecer regresiones que de forma determinista permitan explicar las presiones generadas a partir de las cotas del embalse, se advierte un comportamiento diferente por lo menos para dos rangos de registros divididos entre las cotas 420 y 425 msnm aproximadamente (ver la *Figura 8-13* y *Figura 8-14*). Este comportamiento requiere una especial atención, para lo cual se ejemplifica a través de los registros del piezómetro PF-17 el razonamiento explicativo.

9.6.1. Regresión Segmentada. Las funciones de ajuste ($G(X)$) de tipo lineal poseen la forma de la ecuación (9.6.1) y son ajustadas con el criterio del error cuadrado (ver Sección 7.5).

$$\hat{Y}(x) = \alpha X + \beta \quad (9.6.1)$$

La función con error minimizado, genera soluciones para los factores α y β (el desarrollo matemático es mostrado en (Fernández, 1994)), según las ecuaciones (9.6.2) y (9.6.3).

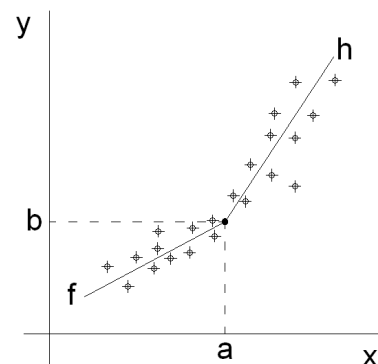
$$\alpha = \frac{\text{Cov}(X,Y)}{\text{Var}(X)} \quad (9.6.2)$$

$$\beta = E(Y) - \frac{\text{Cov}(X,Y)}{\text{Var}(X)} E(X) \quad (9.6.3)$$

Para llevar la regresión de la ecuación (9.6.1) al comportamiento por lo menos bilineal que se observa en los registros bivariable analizados en el proyecto, basta con establecer un punto de quiebre que es común para dos regresiones distintas (Figura 9-7).

Figura 9-7: Modelo de regresión lineal segmentada.

Se muestra el caso de dos segmentos, cada recta ("f" y "h") es una regresión distinta, pero ambas comparten un punto en común (punto de quiebre, (a, b)).



Para el caso del piezómetro PF-17 y casi como un común para los registros, este punto de quiebre se encuentra en la cota 425.00 msnm aproximadamente.

El valor correspondiente para la presión en el punto de quiebre se puede establecer como la esperanza matemática de la presión dentro del rango de valores de 424-426 msnm ($E(Y): 424 < X < 426$), se obtiene así una relación adicional que deben cumplir los factores de la regresión (ecuación 9.6.4).

$$\alpha = \left(\frac{b - \beta}{a} \right) \quad (9.6.4)$$

El resultado de aplicar la regresión en partes para los registros bivariantes de PF-17, se muestra en la Figura 9-8 y la Tabla 9-1 resume el valor de los factores.

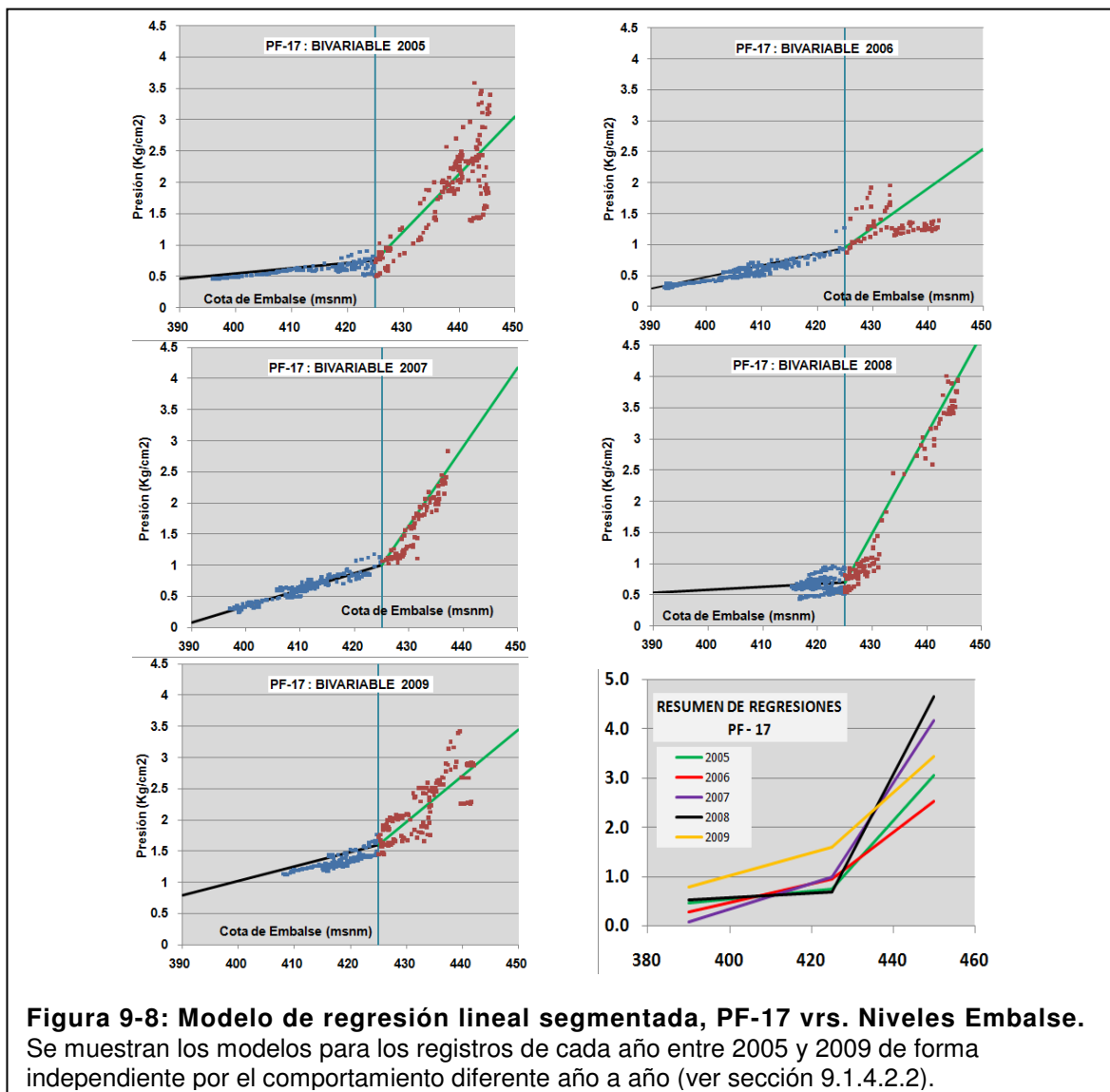


Tabla 9-1: Resumen de regresiones segmentadas piezómetro PF-17 vrs. Nivel Embalse

	Estadísticos Recta f		Estadísticos Recta h		Punto de Quiebre		Recta f		Recta h	
	COV (X,Y)	VAR (X)	COV (X,Y)	VAR (X)	(X)	(Y)	α	β	α	β
AÑO 2005	0.728	90.73	3.647	39.56	425	0.75	0.008	-2.659	0.092	-38.435
AÑO 2006	1.160	61.84	0.312	4.90	425	0.95	0.019	-7.023	0.064	-26.109
AÑO 2007	1.274	48.34	1.511	11.90	425	1.00	0.026	-10.20	0.127	-52.989
AÑO 2008	0.033	6.72	8.407	52.98	425	0.70	0.005	-1.374	0.159	-66.738
AÑO 2009	0.433	18.68	2.006	27.13	425	1.60	0.023	-8.244	0.074	-29.825

9.6.2. Comportamiento de Diaclasas. En 1983 *Bandis*, expuso la posibilidad de modelar el comportamiento deformacional de diaclasas relativamente cerradas y sin relleno, con funciones hiperbólicas (ecuación 9.6.5), basado en datos experimentales (*Bandis*, y otros, 1983), ver *Figura 9-9* para detalle.

$$\sigma_n = \left[\frac{\Delta v}{a - b\Delta v} \right] \quad (9.6.5)$$

donde:

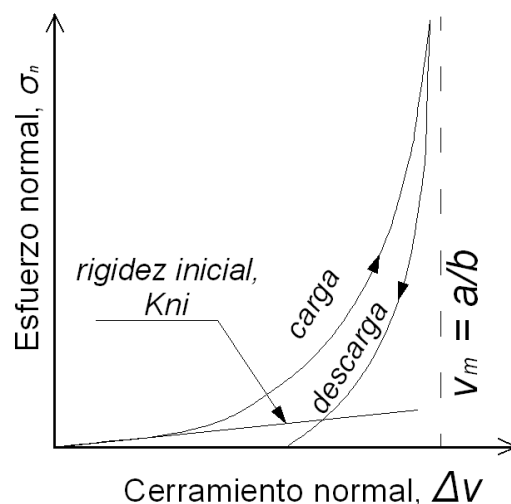
σ_n : esfuerzo normal a la junta

Δv : cerramiento de la junta (mm)

a y b : constantes empíricas

Figura 9-9: Función hiperbólica, relación esfuerzo normal-cerramiento de diaclasa

Se muestra un ciclo de carga y descarga, K_{ni} representa la rigidez normal inicial de la grieta, siendo el factor que define la curvatura inicial de la función. $V_m = v_{m\acute{a}x}$, valor máximo de cerramiento para cualquier esfuerzo de alta magnitud. Basado en (*Brady*, y otros, 1993).



De forma aproximada la totalidad de parámetros que definen la función anterior también fueron estimados por el mismo *Bandis* de la siguiente forma:

$$\Delta v_{\text{máx}} \approx A + B(JRC) + C\left(\frac{JCS}{ei}\right)^D \quad (9.6.6)$$

$$ei = JRC\left(\frac{0.04JCS}{\sigma_d} - 0.02\right) \quad (9.6.7)$$

$$a = \frac{1}{Kn_{\text{inicial}}} \quad (9.6.8)$$

$$Kn_{\text{inicial}} = -7.15 + 1.75JRC + 0.02\left(\frac{JCS}{ei}\right) \quad (9.6.9)$$

$$b = \frac{a}{\Delta v_{\text{máx}}} \quad (9.6.10)$$

donde:

ei: apertura inicial de la discontinuidad

JRC: índice representación de la rugosidad de la discontinuidad

JCS: resistencia a la compresión inconfiada

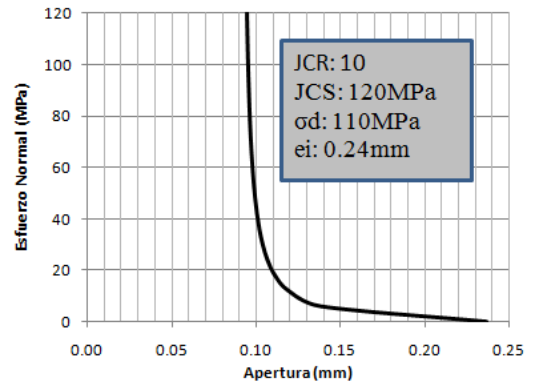
σ_d : resistencia a la compresión medida en la diaclasa

A, *B*, *C* y *D*: constantes estimadas como -0.2960, -0.0056, 2.2410 y -0.2450 respectivamente suponiendo un ciclo de carga.

Con el planteamiento anterior se desea conocer de forma aproximada como puede ser el comportamiento de las diaclasas presentes en el basamento de la presa.

Estimando los siguientes parámetros: *JCR*=10, *JCS*=120MPa y σ_d =110MPa, es posible generar la función de la *Figura 9-10*. La característica significativa del modelo es la sensibilidad de la apertura en un bajo rango de carga en comparación con la resistencia de la roca, alcanzando rápidamente el comportamiento asintótico hacia el valor $\Delta v_{\text{máx}}$.

Figura 9-10: Función hiperbólica hipotética utilizada para el basamento de la presa
 Los parámetros de la función calculados son:
 $\Delta v_{\text{máx}}$ =0.15mm, Kn_i =19.66MPa/mm,
 a =0.05mm/MPa y b =0.25MPa.

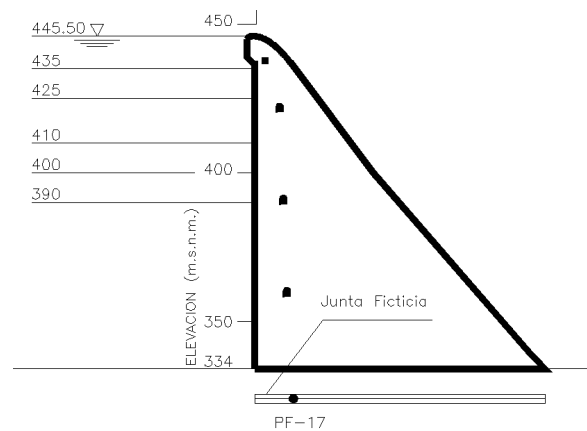


- **Comportamiento por Llenado de Embalse**

Se ha expresado que el comportamiento de las diaclasas está influenciado por el esfuerzo normal que actúa sobre la grieta. Para el basamento de la presa es posible comprender el mecanismo esfuerzo-deformacional y sus efectos si se estudia una grieta individual, la cual se supondrá como una simple discontinuidad horizontal, ubicada 10.00 m bajo el contacto de la presa-basamento (coincidente con la ubicación del piezómetro PF-17), tal como muestra la *Figura 9-11*; a la cual se le asigna el modelo hiperbólico de la *Figura 9-10*.

Figura 9-11: Sección transversal simplificada de presa, Est. 57m izquierda eje de vertedor

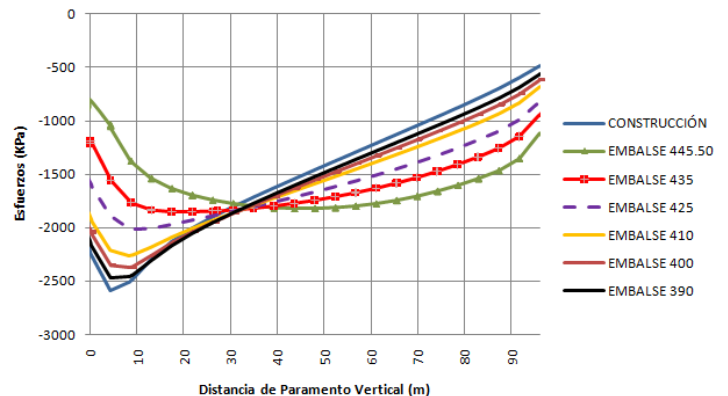
Se indica la ubicación de una grieta ficticia (escala aumentada) bajo la presa y la ubicación aproximada del piezómetro PF-17.



Justo en la ubicación de la diaclasa ficticia se han calculado los esfuerzos generados teóricamente en las etapas de construcción y llenado del embalse a distintas cotas (señaladas en la *Figura 9-11*), basados en los parámetros indicados en (INGETEC S.A.(a), 2002) y con el uso del Software PLAXIS. Los resultados llevados a una hoja de cálculo se muestran en la *Figura 9-12*.

Figura 9-12: Distribución de esfuerzos en diaclasa ficticia

Se incluyen las distribuciones para la etapa de construcción y varias cotas de embalse. No se muestran comportamientos para niveles inferiores a 390msnm, no se tienen registros de cotas tan bajas para la historia del embalse después del llenado inicial.



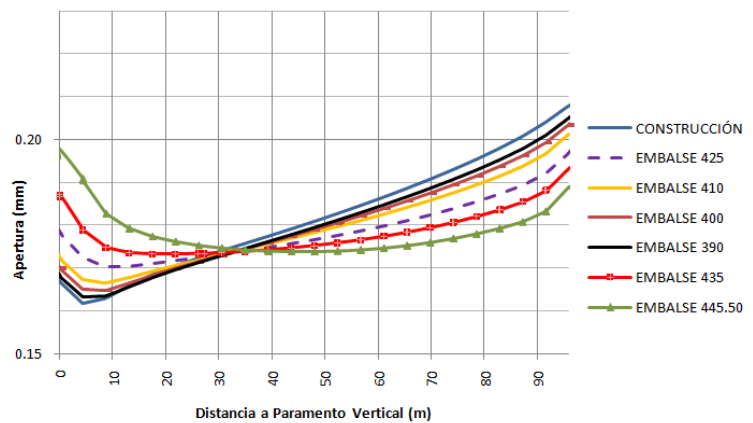
Las distribuciones de esfuerzos son triangulares con decaimiento lineal para la etapa de construcción y para llenado en cotas inferiores a los 425 msnm, reportando los valores mayores en la cercanía de la cara vertical aguas arriba.

Para cotas superiores de llenado la distribución se acerca a un comportamiento parabólico con mayor simetría respecto al centro del basamento.

Conociendo las distribuciones de presión es de esperarse que el comportamiento de las aberturas de las grietas tenga una analogía, tal como se muestra en la *Figura 9-13* donde se han utilizado los esfuerzos calculados para definir las deformaciones en la diaclasa.

Figura 9-13: Aperturas residuales a lo largo de la diaclasa ficticia por efecto de cambio de esfuerzos

Se incluyen las distribuciones para la etapa de construcción y ante varias cotas de embalse.



Del análisis es posible deducir que la construcción del embalse genera un estrangulamiento en la entrada de la diaclasa y el cierre aguas abajo (salida) es despreciable. Las etapas de llenado incluso hasta la cota 425.00 msnm muestran cambios no significativos en la geometría de la grieta, sin embargo para cotas superiores la zona de estrangulamiento se encuentra en la zona central de la presa y el conducto en general trata de homogenizar su apertura.

Bajo estas nuevas geometrías hipotéticas de la diaclasa, que aunque no pudieran coincidir en magnitud con la realidad si lo hacen probablemente en proporción geométrica (análisis cualitativo); es imaginable que el flujo de agua a través de esta diaclasa encargado de generar las subpresiones sobre el cuerpo de la presa, tenga algún tipo de repercusión en su comportamiento teórico inicial.

- **Flujo a través de la Diaclasa**

Para el caso de la diaclasa ficticia en estudio y de hecho como es de común práctica para el análisis de flujo en una red de diaclasas más compleja, se utiliza la teoría de flujo laminar a través de placas paralelas fijas (Fernández, 2010), resumida en la ley cúbica (ecuación 9.6.11).

$$Q = \frac{e^3}{12\eta} (i) \quad (9.6.11)$$

donde:

e : abertura de diaclasa

i : gradiente de presión

η : viscosidad cinemática del fluido

La diaclasa en estudio sin embargo posee una sección variable, debido a esto en la ecuación (9.6.11) se utiliza considerando que las variaciones en sección repercuten en el gradiente hidráulico y la correspondiente cabeza de presión, pero la continuidad de flujo se conserva a la entrada y salida de la diaclasa. El caso simple de variación lineal es abordado por (REMR, 1996), donde se brinda la siguiente ecuación para cálculo de las cabezas de presión sobre la coordenada "X".

$$h(x) = he - \left[\frac{(he-hs)}{L} \left(\frac{e_s^2}{e_s+e_e} \right) \left(\frac{mx^2+2xe_e}{(mx+e_e)^2} \right) \right] \quad (9.6.12)$$

donde:

he : cabeza de presión en la entrada

hs : cabeza de presión en la salida

e_e : apertura en la entrada

e_s : apertura en la salida
 L : longitud de pérdida de carga y:

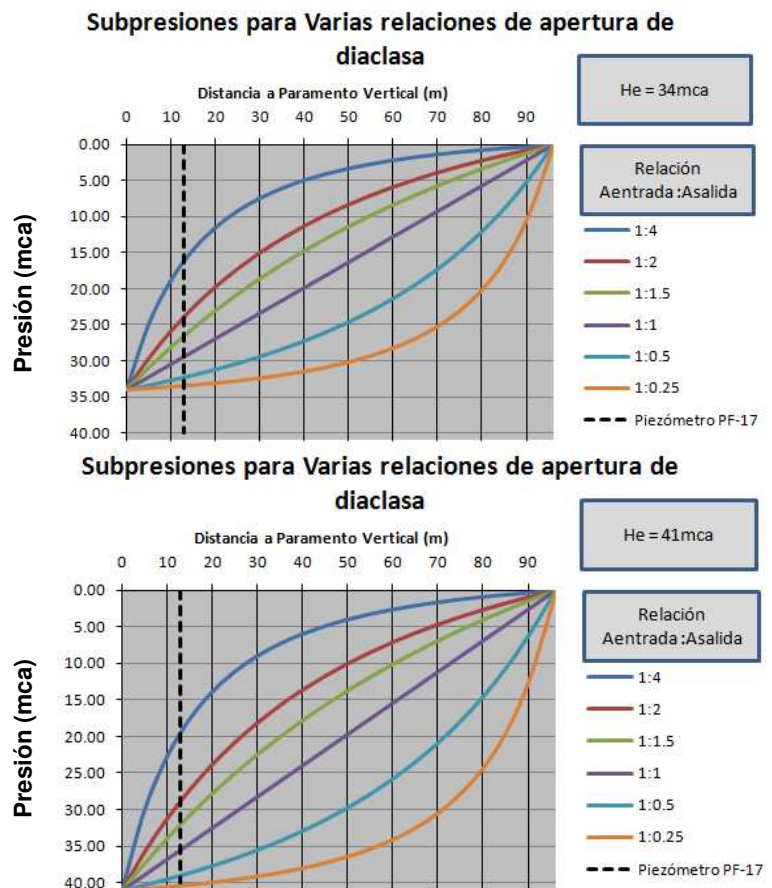
$$m = \frac{e_s - e_e}{L} \quad (9.6.13)$$

Sin entrar en detalles diferenciales sobre la evolución de la apertura de la diaclasa ficticia (la variación no es exactamente lineal), es posible generar una gráfica teórica de subpresiones para diferentes relaciones geométricas de apertura de diaclasa para el caso lineal (no interesa la magnitud, sólo la proporción), ver *Figura 9-14*. Para esto se han definido las presiones de entrada considerando que luego del tratamiento de consolidación, las subpresiones pudieron reducirse a cerca del 34% del valor de la carga hidrostática (se demostró en la *Sección 9.5.4*, que esta hipótesis de diseño es válida), esto equivale a contar con una subpresión de 41 mca aguas arriba (sección transversal donde se monitorea la diaclasa) y una salida de 0.00 mca (no se dispone de contraembalse).

Figura 9-14: Distribución de subpresiones teóricas por variabilidad en apertura de diaclasa

Arriba se muestra la distribución correspondiente al embalse en la cota 425 msnm. Abajo: distribución correspondiente al embalse en la cota 445.50 msnm. La relación supuesta para la apertura de la diaclasa tiene una evolución lineal.

Se indica la ubicación del piezómetro PF-17, para visualizar como se afectan las presiones en este punto para diferentes aperturas de diaclasa.



9.6.3. Comportamiento Referido a los Registros del Piezómetro PF-17. El desarrollo teórico anterior buscaba demostrar que las variaciones en el nivel del embalse, afectan la distribución de las subpresiones. Si se considera la regresión “f” calculada para PF-17 en el año 2009 (*Tabla 9-1*), los valores esperados para las cotas de embalse 425.00 y 445.50 msnm son de 1.53 y 2.00 kg/cm², respectivamente. Si se recuerda la *Figura 9-8*, resulta obvio que con esta regresión se tiene un buen estimado de la presión registrada en el umbral de la cota 425 msnm y se está en congruencia con la *Figura 9-14* que señala que para que esto sea posible el estrangulamiento a la entrada de la diaclasa debe ser significativo en comparación con la salida, quizás del orden de 1:4. Esta geometría de diaclasa es esperada de acuerdo al análisis aperturas por esfuerzos de la *Figura 9-13*.

Si la diaclasa no sufriera ningún cambio geométrico durante el proceso de carga para las cotas de embalse mayores a 425 msnm (se conserva la relación apertura entrada: apertura salida) la presión seguiría su comportamiento y llegaría a los 2 kg/cm² (*Figura 9-14*).

Al incluir la regresión en segmentos, la recta “h” genera una mejor predicción de la presión con niveles de embalse superiores a los 425.00 msnm. Para el nivel de rebose la presión teórica llega a 3.14 mca. Esto corresponde según el análisis de diaclasas a una relación de aperturas próxima a 1:2; acorde al análisis de aperturas por esfuerzos donde se espera en efecto que la salida de la diaclasa continúe estrangulada pero en una magnitud muy por debajo de los casos por debajo del umbral de la cota 425.00 msnm.

Ahora dado el determinismo encontrado para PF-17 y que es extensible por lo menos a las series citadas en la *Tabla 8-4* (series de presiones), se desea contabilizar ¿qué reducción de presiones teóricas ha sido obtenida? Para esto se ha utilizado la función que representa la serie de tiempo niveles de embalse (8.2.2)

y las regresiones segmentadas de la *Tabla 9-1*, para cálculo de presiones teóricas y comparación con las presiones hidrostáticas. En la *Figura 9-15* se muestra con base a este planteamiento el porcentaje estimado de reducción de presiones teóricas para el año 2009 en PF-17.

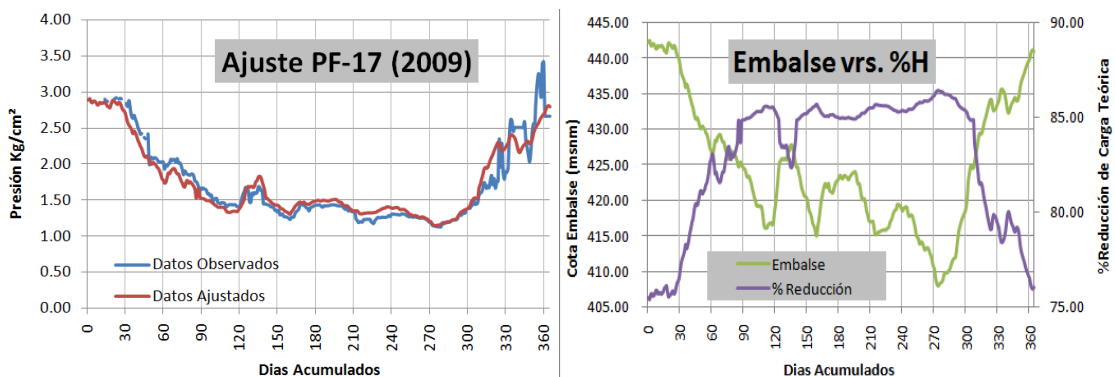


Figura 9-15: Subpresiones PF-17 en el año 2009, y porcentajes de reducción de carga hidrostática

Izquierda: la historia de registros observados junto con los datos ajustados por la regresión segmentada. Derecha: Se muestra la historia de niveles de embalse en el 2009 y los correspondientes porcentajes de reducción de presiones hidrostáticas.

Antes del análisis de comportamiento de las diaclasas, era claro que en el punto de medición de PF-17 no se ha sobrepasado el teórico máximo de presión de diseño, sin embargo ahora se puede afirmar que cuando las cotas del embalse superan el umbral 425 msnm la estanqueidad del embalse conseguida por el tratamiento de consolidación y por la naturaleza misma del basamento pierde hasta un 10% de efectividad, en otras palabras el umbral define dos comportamientos diferentes en tema de subpresiones por la deformación inducida al basamento.

Es explicable además el hecho de contar con registros que difieren año a año, incluso para los mismos niveles de embalse (ver resumen de regresiones en *Figura 9-8*), por el comportamiento deformacional histerético que sugiere *Bandis* para las diaclasas (*Figura 9-9*), explicando porque actualmente algunos de los registros han alcanzado valores mayores (presión retenida); resultado del cambio

geométrico irreversible de las diaclasas que afectó la distribución de subpresiones (el cierre paulatino aguas abajo generó aumento de subpresión).

En la *Figura 9-16* a *Figura 9-19* se muestra el resumen gráfico de los análisis para el resto de piezómetros citados en *Tabla 8-4*.

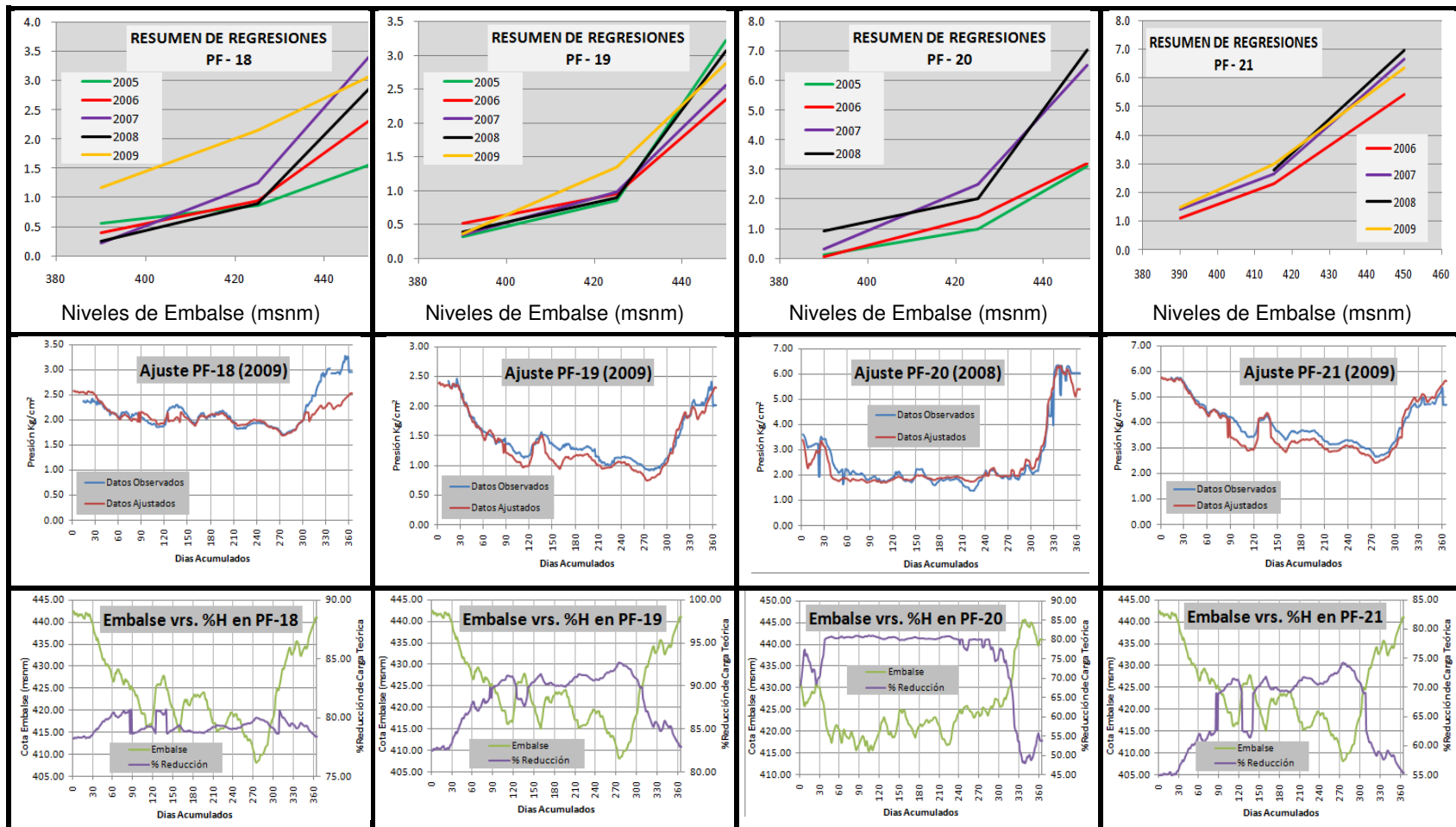


Figura 9-16: Resúmenes de regresiones y reducciones de subpresiones para piezómetros PF18 a PF21

Para cada dispositivo se muestra el conjunto de regresiones para cada año de registros; la historia de registros observados junto con los datos ajustados por la regresión segmentada. Al final se muestra la última historia de niveles de embalse y los correspondientes porcentajes de reducción de presiones hidrostáticas.

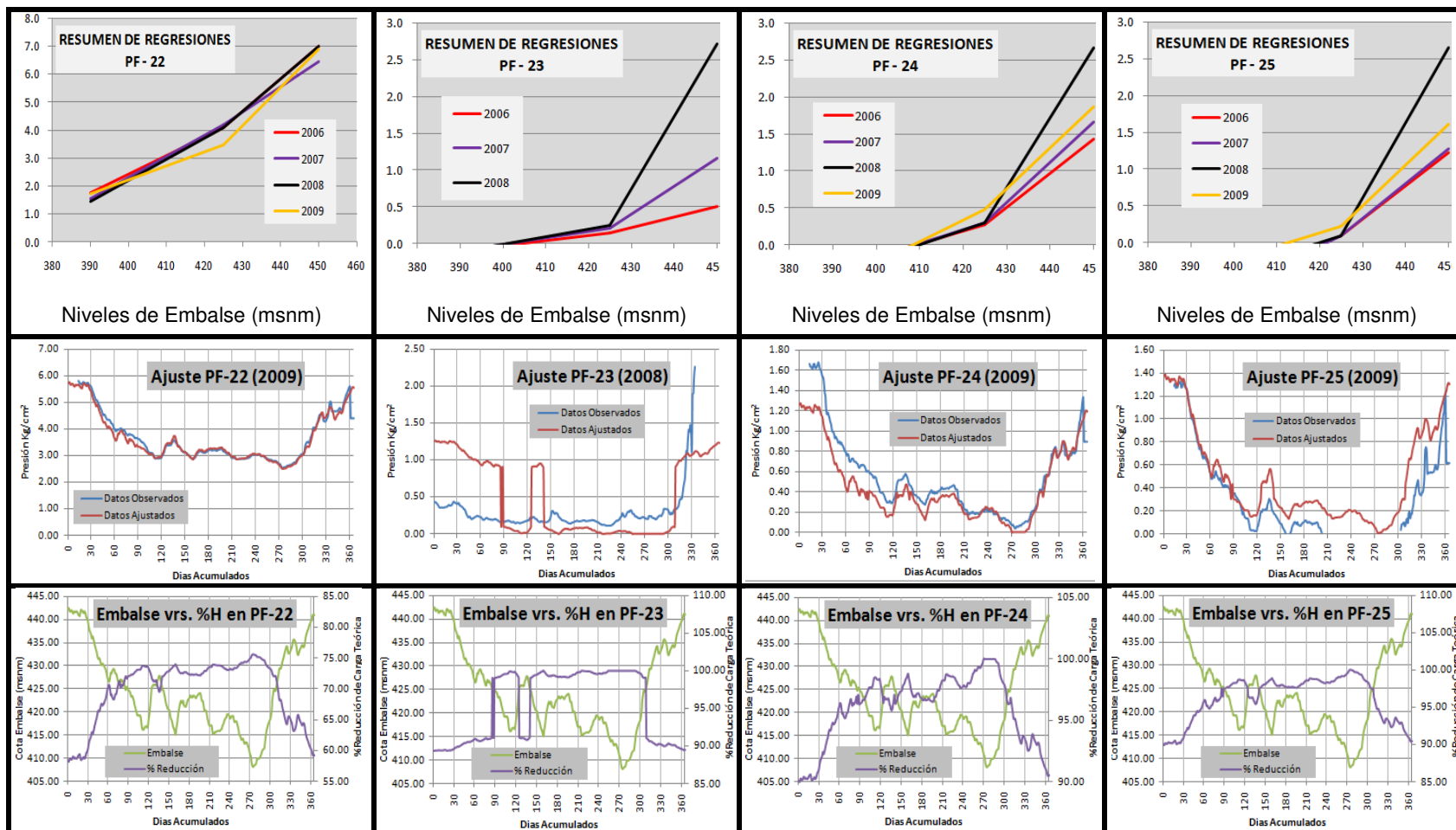


Figura 9-17: Resúmenes de regresiones y reducciones de subpresiones para piezómetros PF22 a PF25

Para cada dispositivo se muestra el conjunto de regresiones para cada año de registros; la historia de registros observados junto con los datos ajustados por la regresión segmentada. Al final se muestra la última historia de niveles de embalse y los correspondientes porcentajes de reducción de presiones hidrostáticas.

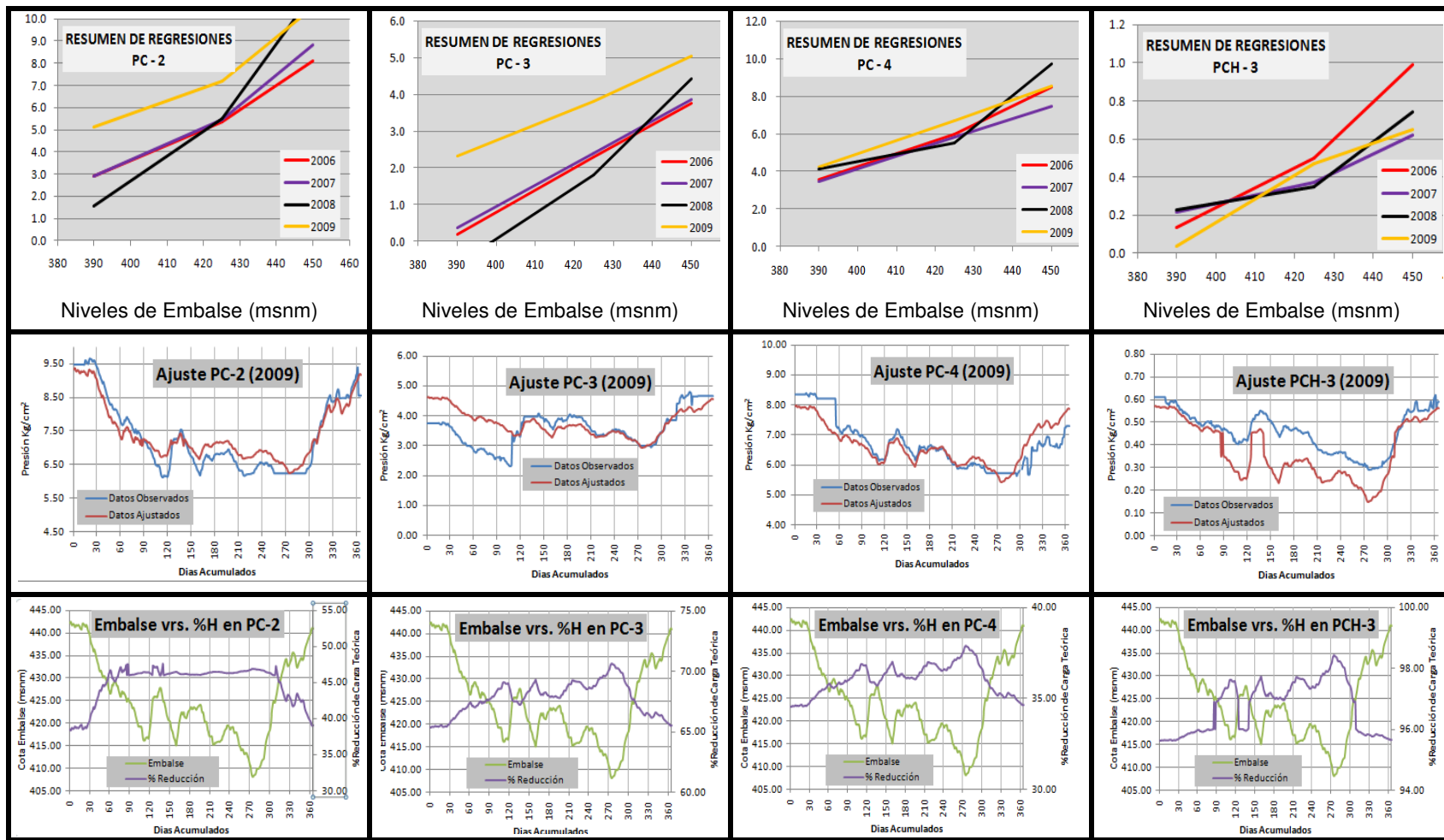


Figura 9-18: Resúmenes de regresiones y reducciones de subpresiones para piezómetros PC-2 a PC-4 y PCH-3

Para cada dispositivo se muestra el conjunto de regresiones para cada año de registros; la historia de registros observados junto con los datos ajustados por la regresión segmentada. Al final se muestra la última historia de niveles de embalse y los correspondientes porcentajes de reducción de presiones hidrostáticas.

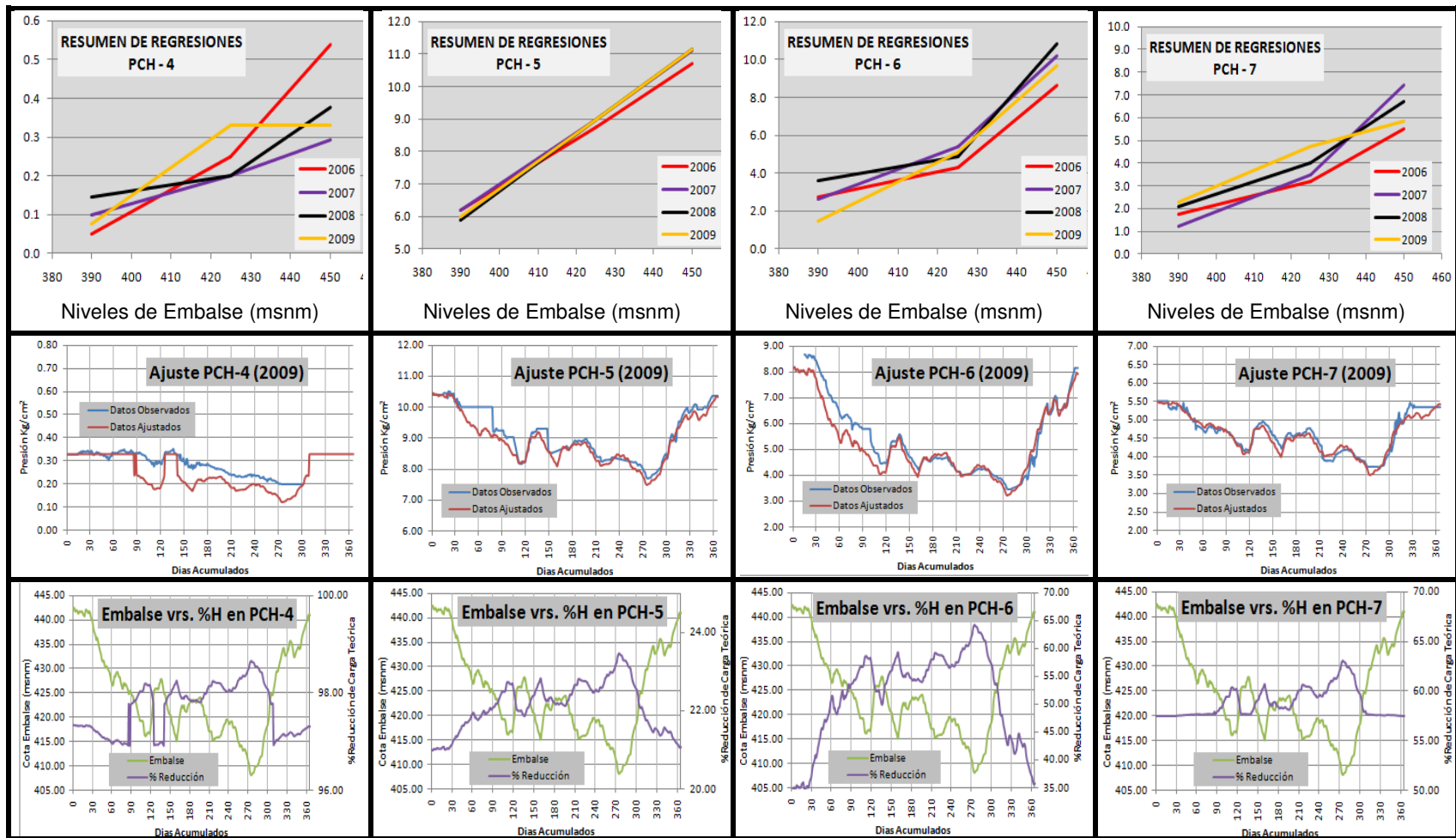


Figura 9-19: Resúmenes de regresiones y reducciones de subpresiones para piezómetros PCH - 4 a PCH - 7

Para cada dispositivo se muestra el conjunto de regresiones para cada año de registros; la historia de registros observados junto con los datos ajustados por la regresión segmentada. Al final se muestra la última historia de niveles de embalse y los correspondientes porcentajes de reducción de presiones hidrostáticas.

Los gráficos presentados en *Figura 9-16* a *Figura 9-19* indican lo siguiente:

- a) Los piezómetros en contactos PC-2, PC-3 y PC-4 al encontrarse en ubicaciones geométricas similares (ver la *Tabla 8-4* y la *Figura 8-11*), poseen comportamientos semejantes, conteniendo la bilinealidad discutida en la sección anterior prácticamente sólo para la estacionalidad del 2008, que es un año donde las cotas del embalse se mantuvieron altas. Además la estacionalidad del 2009, que fue en alguna medida comparable a la del 2008 (no hubieron niveles extremadamente bajos) afecto bilinealmente al piezómetro con cota más baja de este grupo, el PC-2. En otras palabras este grupo de piezómetros es sensitivo a cambiar su comportamiento cuando la aplicación de carga es mantenida por largo tiempo. Es de esperarse en estos casos que las presiones sean mayores a situaciones de aplicaciones más efímeras.

Similar al análisis de PF-17 de la sección anterior, es evidente que con el comportamiento bilineal de este grupo de piezómetros, la estanqueidad del embalse pierde efectividad, en esta oportunidad alrededor de un 5% (el umbral define dos comportamientos diferentes en tema de subpresiones).

Llama la atención que sólo PC-3 ha logrado conseguir una reducción de presión hidrostática significativa, el resto de dispositivos de este grupo reportan presiones mayores a los supuestos de diseño.

- b) El siguiente grupo de piezómetros con similitudes de ubicación lo constituyen los dispositivos PCH-3 a PCH-7. De estos PCH-3 y PCH-4 al parecer se ubican en zonas con alta impermeabilidad y los registros son demasiado bajos para interpretarlos sin embargo el umbral de comportamiento para las subpresiones existe igualmente.

PCH-5 es un dispositivo que ha presentado un comportamiento muy constante a lo largo de su historia y su relación con el nivel del embalse es unilineal, preocupa que las presiones registradas no tengan reducción significativa de las presiones hidrostáticas ni siquiera en cotas de embalse bajas.

Los demás dispositivos exhiben en el 2009 una menor relación con el embalse cuando se encuentra en cotas altas, en comparación con años anteriores. Tampoco son satisfactorias las reducciones de presión en estos casos.

- c) Los piezómetros en fundación PF-20, PF-21 y PF-22, exhiben comportamientos normales; la bilinealidad es mayor en años donde el embalse se mantuvo mayor tiempo con cotas altas. Las reducciones de presiones hidrostáticas en estas zonas son aceptables.
- d) Los piezómetros PF-18, PF-19, PF-23, PF-24 y PF-25, con distancias similares al paramento vertical de la presa (15 m en promedio), representan zonas con altas reducciones de presiones teóricas, presiones de magnitudes similares y comportamiento bilineales con tendencia a reducir su sensibilidad ante cotas altas de embalse en el último año de registros.

9.6.4. Estabilidad de la Presa. En la sección anterior se mostró que en ciertas zonas del basamento representadas por los dispositivos de medición ubicados en las mismas, se presentan altas subpresiones que no logran reducir hasta el 34% el valor neto de carga hidrostática. Sin embargo, la estabilidad de la presa no depende de los valores puntuales de las subpresiones sino de la envolvente que cubre toda la base de la estructura.

Para analizar la envolvente de subpresiones, se han agrupado los piezómetros por su ubicación. Los grupos se definen por dos secciones transversales a la presa del siguiente modo: PCH-7, PF-17, PF-18 y PF-19 próximos a la Est. - 57.00; PC-2, PC-3, PC-4, PE-CH3 a PE-CH6 y PF-20 a PF-25 cercanos a la Est. + 65.00 (estacionamiento referido a la *Figura 8-11*).

Ambas secciones de forma aproximada presentan un perfil de presa similar al mostrado en la *Figura 9-11*, con una columna de agua máxima de 111.50m.

Para el año 2009 (último periodo de análisis de las series) se puede obtener la distribución de las subpresiones para cada sección, utilizando las magnitudes correspondientes de las regresiones de las *Figuras 9-16 a 9-19*.

Las *Figuras 9-20 y 9-21* ilustran las envolventes y se incluye además las correspondientes teóricas, que contemplan una reducción de la carga hidrostática hasta un 34% de su valor original (a partir de la zona donde se proyectó el tratamiento de consolidación profundo) y la envolvente estimada a partir del análisis de flujo en medios porosos citado en secciones anteriores. En ambas figuras (9-20 y 9-21) los valores observados no muestran un comportamiento sustancialmente diferente a la envolvente teórica; pero se advierte sobre los piezómetros PCH-5 y PCH-6 presiones que no corresponden a la tendencia de la envolvente por su alta magnitud (señalamiento expuesto también en la sección anterior).

La interpretación analítica de estas distribuciones se realiza con una revisión de estabilidad por volteo en condición estática. Al final de este documento se incluye el Anexo-A1 con dicho análisis, incluyendo las fuerzas básicas que generan momento entorno a la pata aguas abajo de la presa.

DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES (Est. -57.00)

X(m)	P(mca)	Instrumento	X(m)	P(teórica)
0	111.50	N/A	0	111.50
10	56.54	PCH-7	10	37.91
13.3	31.16	PF-17	97.72	0
15.8	28.98	PF-18		
18.5	26.01	PF-19		
97.72	0	N/A		

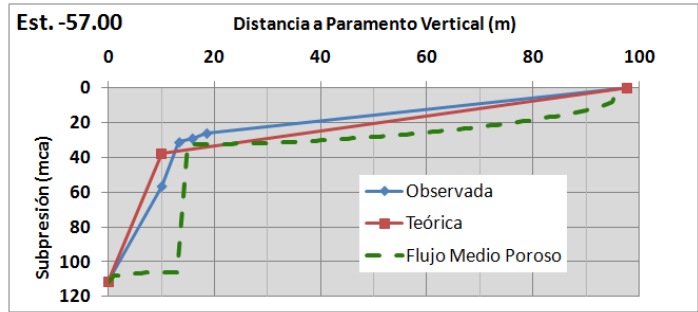


Figura 9-20: Distribución de Subpresiones en la Estación - 57.00

A la izquierda se presentan los valores observados asociados a los dispositivos piezométricos. En la derecha se incluyen las envolventes teórica y observada para esta sección; además de la envolvente estimada con el análisis de flujo en medios porosos citado en la sección 9.5.4.

DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES (Est. +65.00)

X(m)	P(mca)	Instrumento	X(m)	P(teórica)
0	111.50	N/A	0	111.5
3	99.33	PC-2	10	37.91
4.2	62.84	PF-22	97.72	0
6.9	59.18	PF-21		
9.3	61.34	PF-20		
10	107.65	PCH-5		
12	88.57	PCH-6		
15	22.71	PF-23		
15.8	16.15	PF-24		
18.5	13.59	PF-25		
97.72	0	N/A		

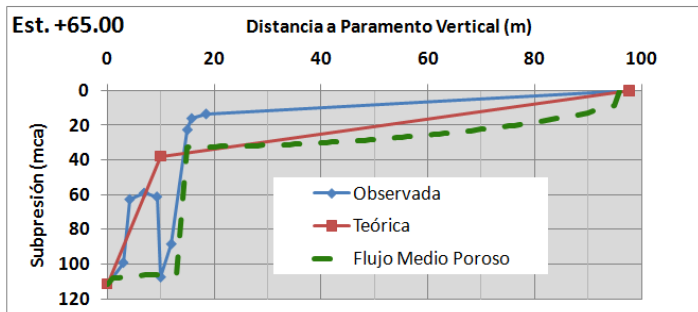


Figura 9-21: Distribución de Subpresiones en la Estación + 65.00

A la izquierda se presentan los valores observados asociados a los dispositivos piezométricos. En la derecha se incluyen las envolventes teórica y observada para esta sección; además de la envolvente estimada con el análisis de flujo en medios porosos citado en la sección 9.5.4.

Del análisis del Anexo A-1, se advierte que las subpresiones generadas en el 2009 para ambas secciones de la presa, resultan en factores de seguridad similares al análisis con las presiones teóricas, con magnitudes próximas a 2.

Además la situación de inoperancia del tratamiento de la fundación, que implica una envolvente lineal con la presión hidrostática plena, produce un factor de seguridad de 1.5.

- **Valores Frecuentes**

En la *Sección 8.2.2*, se señaló la falta de normalidad de los registros piezométricos, este hecho se retoma gráficamente en las *Figuras 9-22 y 9-23* mostrando las curvas de densidad de los registros correspondientes al año 2009.

La intención de estas figuras es mostrar además del comportamiento sesgado de las series, que la condición crítica registrada con los valores máximos de cada serie (el acumulado de cada serie resulta en una mayor fuerza de subpresión total) posee poca probabilidad de ocurrencia. En la mayor parte de la operación de la estructura la envolvente de subpresión está dada por el efecto acumulado de las series en sus valores modales, no en sus valores máximos.

El análisis de estabilidad realizado con los valores modales de las series brinda una idea de la estabilidad de la estructuras en sus condiciones más frecuentes. Este análisis se incluye también en el Anexo A-1 y se resume en las envolventes presentadas en las *Figuras 9-24 y 9-25*.

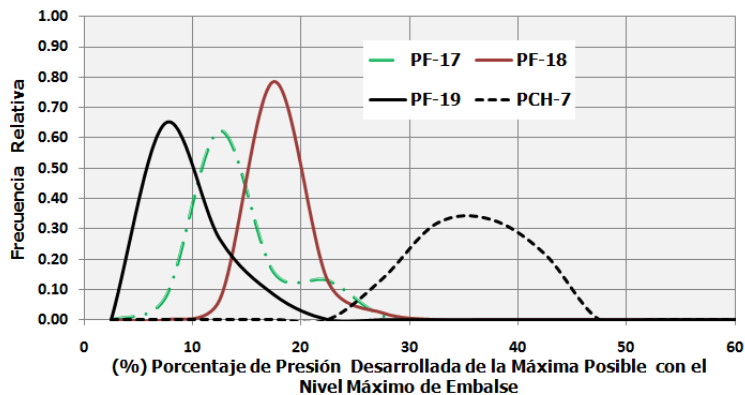


Figura 9-22: Distribuciones de densidad, registros de piezómetros asociados a la Est. - 57.00 Se muestran las curvas de densidad para los piezómetros utilizados en el cálculo de subpresiones en la estación -57.00. La curva con mayor porcentaje de presión corresponde al dispositivo ubicado más cerca del paramento vertical (ver Tabla 8-4 y Figura 8-11 para referencia de la ubicación).

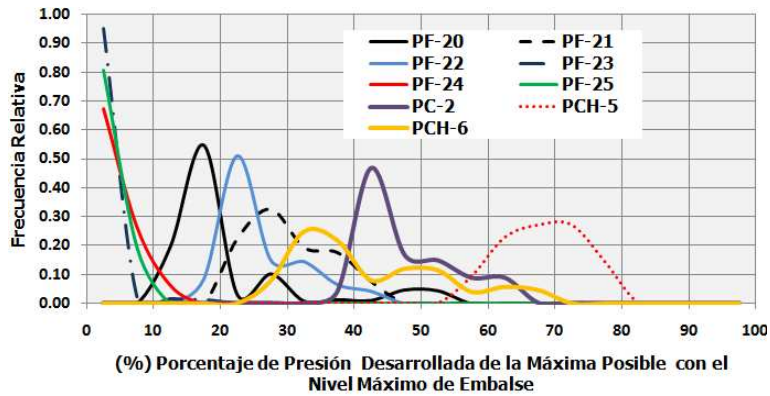


Figura 9-23: Distribuciones de densidad, registros piezómetros asociados a la Est. + 65.00
 Se muestran las curvas de densidad para los piezómetros utilizados en el cálculo de subpresiones en la estación +65.00. Las curvas con mayor porcentaje de presión corresponden a dispositivos ubicados más cerca del paramento vertical (ver Tabla 8-4 y Figura 8-11 para referencia de la ubicación).

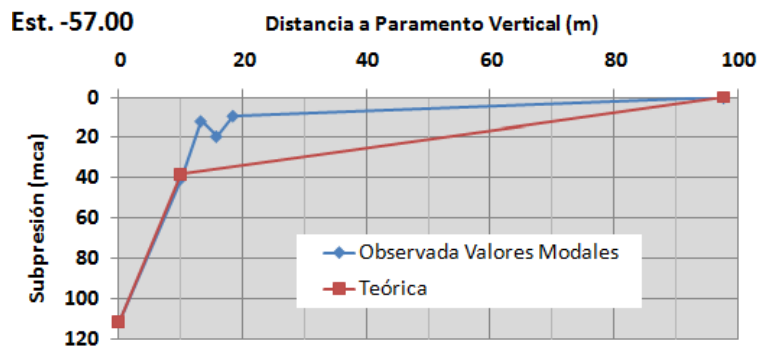


Figura 9-24: Distribución de Subpresiones en la Estación - 57.00, Valores Modales

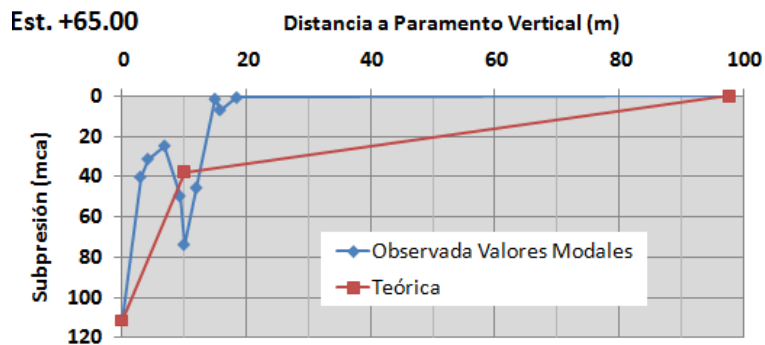


Figura 9-25: Distribución de Subpresiones en la Estación + 65.00, Valores Modales

Las *Figuras 9-24 y 9-25* revelan que normalmente la estructura de la presa, presenta envolventes de subpresión menores a la subpresión teórica porque las condiciones de embalse lleno son poco probables. Con estas envolventes se puede estimar que el factor de seguridad estático por volteo es mayor a 2.5 (ver Anexo A-1 para detalle).

Como un resumen de esta sección, se puede expresar que la estabilidad de la presa, representada en una condición estática de volcamiento por el factor de seguridad, no es una razón puntual entre una magnitud de diseño y un valor observado en campo, es la comparación de dos variables aleatorias. De una lado la variable diseño involucrando las incertidumbres de parámetros y comportamiento. En el otro extremo el comportamiento real de la estructura, caracterizado por ahora solamente con la variable sub-presión.

La Figura 9-26 se ilustra esquemáticamente la variación esperada del factor de seguridad para la presa, en una condición estática y en la zona donde se ubican las secciones analizadas. Se tiene que la condición normal donde se presenta el menor factor de seguridad es aquella donde la subpresión no logra abatirse y la operación más frecuente de la estructura se encuentra en una zona de seguridad que supera las estimaciones de diseño.

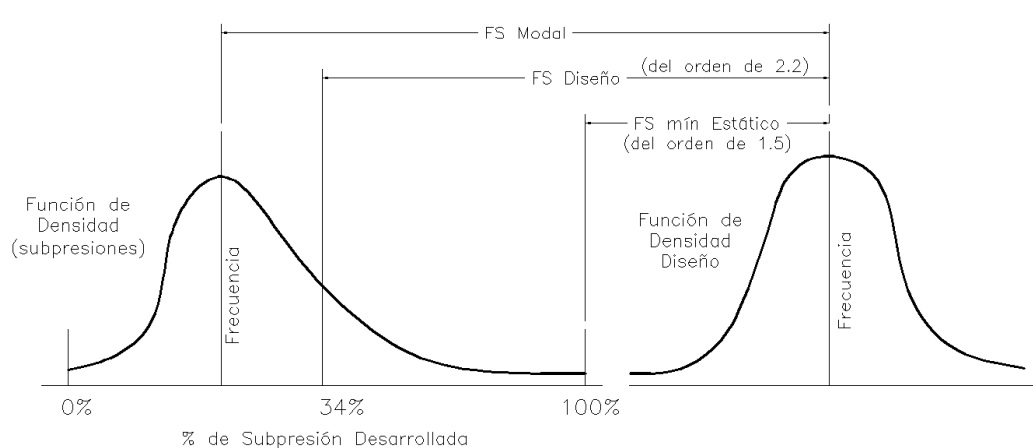


Figura 9-26: Esquema de variación esperada en el factor de seguridad

Se esquematiza la evolución del factor de seguridad por volteo estático. La curva de subpresiones es esquematizada en función de los registros piezométricos disponibles. El FS mín. considera que la subpresión se desarrolla completamente y la envolvente es una línea recta; un caso más desfavorable es una falla degenerativa en el contacto presa-basamento capaz de generar una grieta estrangulada en las zonas aguas abajo, en la cual se generan subpresiones de mayor magnitud (ver Figura 9-14).

9.6.5. Limitaciones de la interpretación. El análisis realizado en estas secciones para interpretar los registros piezométricos se ha centrado en comprender cualitativamente el comportamiento del basamento donde se emplaza la presa en estudio. Un análisis de más detalle debe incluirse en un trabajo complementario que comprenda la distribución espacial real de las discontinuidades y la topografía en detalle de la fundación.

Como ejemplo se incluye en la *Figura 9-27* la sección transversal de la presa en la estación 0+070, la cual es cercana a la ubicación de los piezómetros de contacto denominados PCH; en este caso la grieta que se utilizó en la *Sección 9.6.3* para comprender el comportamiento del basamento, tomaría la geometría presentada en la *Figura 9-27*, si no se desprecia el detalle de la topografía y la distribución de esfuerzos cambia en razón a la mostrada en la *Figura 9-12*, por consiguiente el patrón de flujo debería de presentar cambios igualmente.

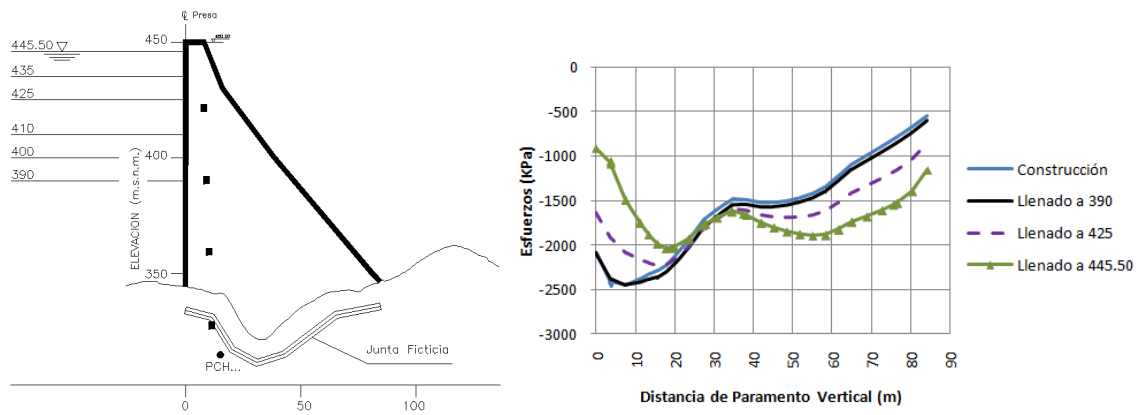


Figura 9-27: Distribución de esfuerzos para una geometría compleja del basamento

Se muestra en el grafico izquierdo un la sección transversal a la presa en la estación 0+070 (sin simplificar la topografía), se señala la ubicación de una grieta ficticia ubicada a 10 m de la superficie. Al lado derecho se muestra la distribución de esfuerzos en el recorrido de la grieta ficticia, para diferentes etapas del proyecto.