

Metodología de análisis de instrumentación a partir de correlaciones cruzadas desfasadas en el tiempo para presas de tierra



2011 Pan-Am CGS
Geotechnical Conference

Methodology for the analysis of geotechnical instrumentation of earth dams from out of phase cross-correlations in time.

Villarraga Herrera, Manuel Roberto
I.C., M. en I., Gerente Técnico INTEINSA
Profesor Asistente, Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín)
Linero Molina, Cinthya
I.C., Msc., Ing. Geotecnista Senior, INTEINSA
Medina V., Diego León
I.C., Ing. Geotecnista Junior, INTEINSA
Monsalve, Javier
I.C., Ing. Geotecnista Junior, INTEINSA

RESUMEN

Las centrales hidroeléctricas San Carlos (1240 MW) y Jaguas (170 MW) de propiedad de ISAGEN están ubicadas en el departamento de Antioquia-Colombia, y están operando desde 1982 y 1985. Para el cierre de los embalses de cada una de ellas se construyeron las presas de tierra Punchiná (45 m de altura) para San Carlos y Guillermo Cano (50 m de altura) en Jaguas, las cuales desde su construcción han tenido un monitoreo mediante instrumentación geotécnica.

El análisis de la instrumentación geotécnica en presas de tierra implica la necesidad de tener un procedimiento que permita hacer proyecciones confiables de los valores registrados con la instrumentación geotécnica. De esta manera se puede hacer un control en tiempo real de la instrumentación y detectar desde la toma de lectura cambios en las condiciones de seguridad de la presa. Para esto, se desarrolló una metodología basada en correlaciones cruzadas entre las variables ambientales, el nivel del embalse y los registros en el tiempo de la instrumentación. Como resultado de esta metodología se obtuvieron correlaciones entre variables como las presiones de poros con el nivel del embalse, y la magnitud y variación geométrica de los retrasos en el tiempo entre variables.

En este artículo se describe la metodología y los resultados obtenidos mediante su aplicación sobre las series de tiempo de la instrumentación geotécnica de las presas de las centrales hidroeléctricas San Carlos y Jaguas.

Palabras claves: presas de tierra, instrumentación geotécnica, correlaciones cruzadas, tiempo de retraso.

ABSTRACT

San Carlos (1240 MW) and Jaguas (170 MW) hydroelectric power plants owned by ISAGEN are located in the department of Antioquia, Colombia, and are operating since 1982 and 1985. To form the reservoirs of each were constructed earth dams, Punchina Dam (45 m) to San Carlos and Guillermo Cano dam (50 m) to Jaguas, which since their construction have been using geotechnical instrumentation monitoring.

The analysis of geotechnical instrumentation in earth dams involves the need for a procedure to make reliable projections of the values registered with the geotechnical instrumentation. In this way, can be make a real-time control of instrumentation and detect from the taking reading changes to the security of the dam. With this objective, was developed a methodology based on cross-correlations between environmental variables, the level of the reservoir and the records at the time of the instrumentation. As a result of this methodology were obtained correlations between variables such as pore pressure and the reservoir level, and the magnitude and geometric variations in time lags.

This article describes the methodology and the results obtained with time series of geotechnical instrumentation of dams of San Carlos and Jaguas hydroelectric power plants

Key words: earth dams, geotechnical instrumentation, cross-correlations, time lag

ISAGEN desde su construcción en 1982 y 1985, respectivamente, han sido monitoreadas. Durante este periodo de tiempo se han presentado cambios en la operación de la central y modificaciones en las condiciones ambientales que han alterado el comportamiento de las estructuras, el cual ha sido registrado por medio de instrumentación geotécnica, que permanentemente ha sido actualizada y mantenida en operación por parte de ISAGEN.

Con el objeto de contar con una herramienta que permita verificar la validez de los registros de la instrumentación y detectar desde la toma de las lecturas, cambios en el comportamiento de las estructuras y por ende, en la seguridad de las misma, ISAGEN solicitó a INTEINSA desarrollar esta herramienta. Como parte de este trabajo se propuso una metodología basada en correlaciones cruzadas que permite hacer pronósticos o proyecciones confiables de los valores esperados en cada uno de los equipos instalados en las presas, a partir de las variables ambientales y/o el nivel del embalse. Esta metodología permite además, detectar las variaciones del comportamiento de las estructuras que se presentan en el tiempo

La instrumentación sobre un proceso o un evento físico dado, tiene por objeto medir las características más relevantes de la acción que genera el fenómeno físico, la naturaleza del evento, y la reacción del fenómeno en estudio. La instrumentación sobre un fenómeno físico, genera una serie de datos, los cuales forman una base experimental del evento y conforman una expresión de dicho fenómeno en un periodo de tiempo que permite determinar el comportamiento de una variable o característica con la variable temporal.

El fenómeno físico expresado en una serie de datos, se puede analizar desde el punto de vista estadístico. Dentro del conjunto de herramientas estadísticas, se encuentra la caracterización de series temporales, la cual describe una serie que varía con el tiempo, y calcula una serie de funciones que componen la serie temporal.

Particularmente los fenómenos físicos que se tienen en consideración en este análisis son la presión de poros dentro del cuerpo y la fundación de las presas de tierra.

La consideración principal del análisis indica que los fenómenos físicos aquí analizados, están controlados por la variación del nivel del embalse y la precipitación que se presenta directamente sobre el embalse y la presa.

A partir de la anterior consideración se establece que existe una relación del tipo dependiente entre la acción del nivel del embalse y la precipitación con la presión de poros en las presas.

A través del análisis estadístico y las correlaciones hechas entre las variables consideradas, se logró confirmar la relación de tipo dependiente entre la variación del nivel del embalse y la presión de poros en el cuerpo y la fundación de las presas de las centrales de Jaguas y San Carlos. Además, se logró demostrar que la ubicación espacial de los puntos de análisis dentro de las presas es un factor importante para establecer el tiempo de respuesta de estos puntos a la variación del nivel del embalse.

Las variaciones en los tiempos de retrasos pueden indicar trayectorias preferenciales del agua, las cuales pueden estar asociadas a zonas más permeables.

2 DESCRIPCIÓN DE LAS PRESAS PUNCHINÁ Y GUILLERMO CANO

2.1 Presa Punchiná – Central Hidroeléctrica San Carlos

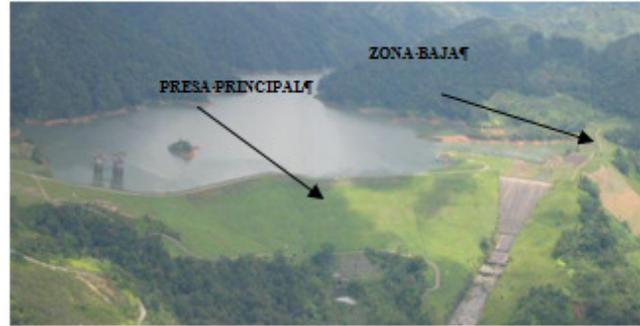


Figura 1. Panorámica Presa Punchiná

La presa Punchiná de la Central Hidroeléctrica San Carlos está conformada por una presa principal de 45 m de altura y una presa de Zona Baja de 35 m de altura. Son dos presas de tierra conformadas con suelos residuales de cuarzodioritas, granodioritas y rocas metamórficas que se caracterizaron por su alta humedad natural, superior a la humedad óptima de compactación.

Se trata de dos presas en tierra zonificadas, que cuentan con un filtro chimenea que intercepta las aguas del talud de aguas arriba. Hacia el talud de aguas abajo, las presas cuentan con amplios contrapesos que contribuyen a mejorar su estabilidad.

Estas presas cuentan con una instrumentación geotécnica compuesta por piezómetros neumáticos, piezómetros de tubo abierto y piezómetros eléctricos, algunos de ellos instalados para reemplazar neumáticos que salieron de servicio. Cuenta además con inclinómetros y puntos de control superficial.

2.2 Presa Guillermo Cano – Central Hidroeléctrica Jaguas



Figura 2. Presa principal y Zonas Bajas – Presa Guillermo Cano

La presa Guillermo Cano, está conformada por una presa principal de 45 m de altura, y dos presas de zona baja localizadas a lo largo del estribo derecho de la presa principal.

De forma similar a la Presa Punchiná, se trata de presas de tierra zonificadas, construidas con suelos residuales de cuarzdioritas caracterizados por su alto contenido natural de agua, superior a la humedad óptima de compactación. Estas presas cuentan con un filtro chimenea que intercepta las aguas provenientes del talud de aguas arriba.

Estas presas cuentan con una instrumentación geotécnica compuesta por piezómetros neumáticos, piezómetros de tubo abierto y piezómetros eléctricos, algunos de ellos instalados para reemplazar neumáticos que salieron de servicio. Cuenta además con inclinómetros y puntos de control superficial.

3 CONCEPTOS BÁSICOS

3.1 Tendencia

Es una componente de la serie temporal que refleja su evolución a largo plazo. Puede ser de naturaleza estacionaria o constante (se representa con una recta paralela al eje de abscisas), de naturaleza lineal, de naturaleza parabólica, de naturaleza exponencial, etc. (Tomado de, Ruiz D., “Manual de Estadística”,2004)

En general la formulación del método de los mínimos cuadrados está dada por la ecuación lineal.

$$Y(t) = a + bt \quad [1]$$

3.2 Variación Cíclica

Es una componente de la serie que recoge oscilaciones periódicas de amplitud superior a un año. (Tomado de, Ruiz D., “Manual de Estadística”,2004)

Para determinar la variación cíclica se estima primero la tendencia, posteriormente se calculan los índices de variación estacional, se desestacionaliza la serie observada y finalmente se elimina la tendencia dividiendo cada valor desestacionalizado por la serie de tendencia.

El proceso en forma de ecuación se representa así:

$$\frac{Y_t}{TxE} = \frac{TxE \cdot CxA}{TxE} \cdot CxA \quad [2]$$

Donde:

T: Serie de tendencia.

E: Serie de variación estacional.

C: Serie de variación cíclica.

A: Componente accidental de la serie de datos.

Finalmente se elimina la componente accidental “A”, y se establece el periodo de los ciclos en los cuales se repite o cambia sustancialmente el comportamiento de la serie temporal.

3.3 Variación Estacional

Es una componente de la serie que recoge oscilaciones que se producen alrededor de la tendencia, de forma repetitiva y en periodos iguales o inferiores a un año. Su nombre proviene de las estaciones climatológicas: primavera, verano, otoño e invierno. (Tomado de, Ruiz D., “Manual de Estadística”,2004)

Para la determinación de la variación estacional se puede utilizar el método de la razón a la media móvil, y el método de la tendencia por ajuste de mínimo cuadrático. Este último método se desarrolla de la siguiente manera:

Se calculan las media anuales de los datos observados $\hat{y}(t)$: y_1, y_2, y_3, \dots .

Se ajusta una recta de mínimos cuadrados a la serie de promedios $\hat{y}(t)=a+bt$.

Se calculan, con los datos observados, las medias estacionales, (M_1, M_2, M_3, \dots), las cuales están referidas a la estación considerada, en trimestres o cuatrimestres, etc.

Se calculan las medias estacionales corregidas, teniendo en cuenta la pendiente de la recta de mínimos cuadrados de las medias anuales, con la siguiente relación.

$$M'_r = M_r - \frac{(r-1)b}{n^{\circ} \text{ de estaciones}} \quad [3]$$

Se calculan los índices de variación estacional con la medias anuales corregidas, y la media aritmética anual, $M'A$, con la siguiente relación.

$$I_r = \frac{M'_r}{M'A} 100 \quad [4]$$

Una vez obtenidos los índices de variación, se desestacionaliza la serie, dividiendo cada valor de la correspondiente estación por su correspondiente índice.

3.4 Variación Accidental

Es una componente de la serie que recoge movimientos provocados por factores imprevisibles. También reciben el nombre de variaciones irregulares, residuales o erráticas. (Tomado de, Ruiz D., "Manual de Estadística", 2004)

3.5 CORRELACIÓN

La correlación es una operación matemática que permite cuantificar el grado de similitud entre dos señales, aunque aparentemente no haya evidencias de coincidencia temporal entre ellas. Su aspecto recuerda la forma de la convolución: formalmente, la diferencia entre ambas esta en el signo (reflexión temporal) de uno de los operandos. Sin embargo, las propiedades y aplicaciones de las operaciones de convolución y correlación son distintas.

3.6 CORRELACIÓN CRUZADA

La correlación cruzada expresa o muestra el grado de similitud entre dos señales de tiempo aleatorias y estacionarias diferentes, cuando estas se analizan en los instantes de tiempo t y $t+\tau$ para cada una de esas series, es decir en $x(t)$ y $y(t+\tau)$.

La función de correlación cruzada se puede expresar así:

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t+\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau)p(t)dt \quad [5]$$

Donde:

$E[f(x,y)]$: Valor medio de la función f .

$x(t)$, $y(t)$: Función aleatoria de t .

$p(t)$: Función de distribución de probabilidad conjunta de $x(t)$ y de $y(t)$.

3.7 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

Es el índice que mide el grado de relación entre las dos series de tiempo. Cuando se supone que la relación entre las dos variables es de naturaleza lineal, el coeficiente de correlación mide que también la recta de mínimos cuadrados se ajusta a los datos muestrales. El coeficiente de correlación esta dado por la siguiente expresión.

$$\rho_{xy} = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad [6]$$

3.8 TIEMPO DE RETRASO (LAG)

Es el tiempo que se tarda una señal en reaccionar a un estímulo causado por otra señal con la cual se supone que

existe una relación de tipo dependiente. Para este caso en particular, es el tiempo que transcurre entre el momento cuando hay una variación en el nivel del embalse y el momento cuando se registra una variación en la presión de poros en un punto el cuerpo o la fundación de la presa correspondiente al cambio del nivel del embalse.

4 METODOLOGÍA

Inicialmente se implementó un sistema de recolección de la información que registra los datos de una manera estructurada por medio de un proceso simple y claro. La información generada se recopila y se organiza de acuerdo a la estructura de la base de datos actual, de forma que cada uno de los datos se discrimina de acuerdo al equipo o tipo de instrumento que lo genero.

El análisis se centro primero en describir las series de tiempo por medio de las herramientas de caracterización estadísticas de series temporales. De esta manera se calcula para la serie de tiempo de cada piezómetro o equipo instrumental seleccionado, su tendencia, y se calcularan las dos series de tiempo que se descomponen al calcular las variaciones cíclicas y estacionales. A partir de estas series de tiempo se puede determinar el tipo de comportamiento de cada serie en cuanto a su desarrollo en el tiempo y de manera ha ido cambiando con el pasar del tiempo.

Finalmente se hacen una serie de correlaciones entre las series de tiempo que se considera existe una relación de tipo dependiente. En principio se tomara como serie base la variación del nivel del embalse, ya que como se explico anteriormente, esta serie es la que controla principalmente la variación en la presión de poros dentro del cuerpo y a fundación de la presa. La manera de hacer la comparación entre las dos series, es confrontándolas en instante de tiempo, que inicialmente será el día cuando se hizo la lectura del instrumento en cuestión, en ese momento se calcula el coeficiente de correlación, luego se tomara nuevamente la serie de tiempo del instrumento en los días de su lectura y se confrontara con la serie de tiempo del nivel del embalse pero un día anterior a la lectura del instrumento, y así sucesivamente hasta cuando se haya recorrido un desfase de 360 días o aproximadamente un año entre estas dos series.

La serie de coeficientes de correlación y los desfases se grafican formando un correlograma, donde se puede observar un máximo de correlación con un tiempo de desfase asociado. Tomando la serie de tiempo del instrumento y el nivel del embalse en el instante de tiempo donde de determinó el mayor grado de correlación asociado al tiempo de retraso calcula anteriormente, se hace una regresión lineal entre estas dos series y se conforma la ecuación de inferencia.

El análisis de los datos se hace observando las series de tiempo en toda su extensión, y luego en tres tramos establecidos con base en los cambios en el comportamiento de los embalses, entre los cuales se observa una diferencia significativa, y esto tiene que ver con el cambio en el comportamiento de la operación de la central, así las series se analizaran en toda su extensión, es decir, desde la puesta a punto de la instrumentación en el año de 1987, hasta el año 2010, y luego se tomaron tres tramos: el primer

tramo desde el año de 1987 hasta 1992, otro desde 1992 hasta el año 2000, y finalmente, desde el año 2000 hasta la fecha actual en el año 2010. Durante la caracterización de las series temporales de los embalse se observó una diferencia entre los periodos anteriormente descritos. Estas diferencias se expresan en la componente de variación estacional y cíclica entre estos periodos para los embalses de San Carlos y Jaguas. En las series de variación estacional se observa un cambio en el modo de variación de un periodo a otro, en la series de variación cíclica se observa un cambio que se ajusta a la longitud de los periodos ya discriminados.

5 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PRESA GUILLERMO CANO

La metodología se aplicó sobre los registros de instrumentación de la presa Guillermo Cano, en la Figura 3 se muestra la localización de los piezómetros Neumáticos instalados sobre una sección de la presa principal, y en la Figura 5 los de la zona Baja II. Se tomaron los piezómetros neumáticos porque son los que han operado durante un mayor periodo de tiempo.

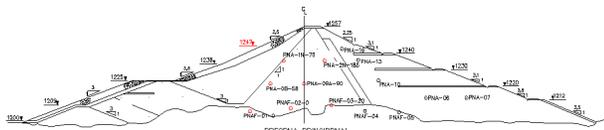


Figura 3. Localización piezómetros Presa Principal Guillermo Cano – Central Jaguas.

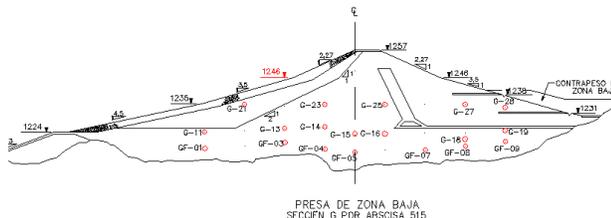


Figura 4. Localización piezómetros Presa Zona Baja II – Central Jaguas.

La **Error! Reference source not found.** muestra la variación del nivel del embalse, tomados a una misma hora, en la Central de Jaguas.

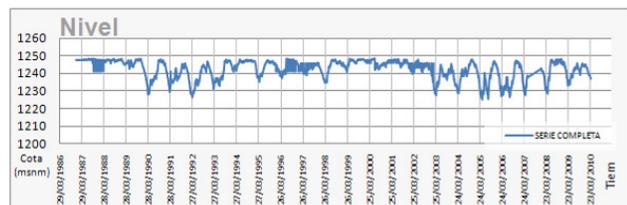


Figura 5. Serie de tiempo del nivel del embalse Central Jaguas.

La serie de tiempo muestra una diferencia marcada en el comportamiento del embalse que se puede discriminar en tres etapas. La primera etapa se refiere a los años comprendidos entre la fecha de inicio de operación de la central y el año de 1996, la segunda etapa está comprendida entre los años de 1996 y 2003, y la tercera etapa comprende los años desde 2003 hasta el año actual 2010.

La Figura 6 muestra la variación estacional de los registros del nivel del embalse de la central Jaguas. La escala de tiempo está expresada en trimestres. En esta figura se observa muy poca variación en ciclos menores de un año en los primeros años de instrumentación hasta finales de 1989 donde se ve una variación similar entre 1990 y finales de 1996 donde se estima que el embalse tuvo una operación similar. A partir de 1996 hasta finales del año 2003 se observa otro comportamiento con muy pocas variaciones del nivel del embalse excepto en los años de 1995 y 1998. Finalmente en el periodo de 2003 hasta 2010 se observa una gran variación lo que indicaría otro cambio en la operación de la central hidroeléctrica. La Figura muestra la variación cíclica en periodos mayores de un año.

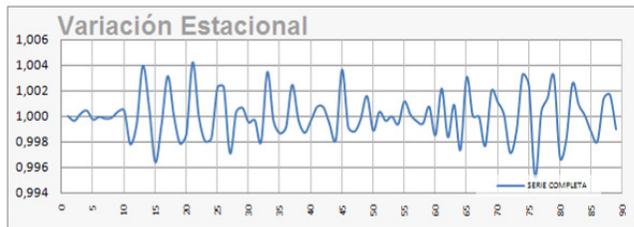


Figura 6. Serie de variación estacional del nivel del embalse, Central Jaguas.

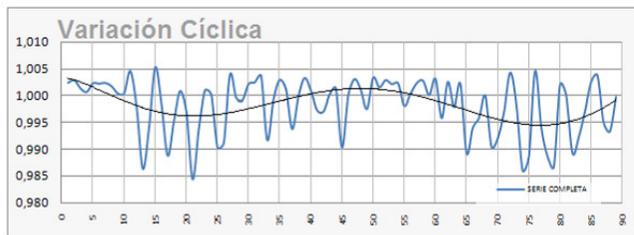


Figura 7. Serie de variación cíclica del nivel del embalse, Central Jaguas. (Variación cíclica unitaria vs. Tiempo)

Teniendo en cuenta las diferencias establecidas en el comportamiento del nivel del embalse en el tiempo, se realizaron correlaciones cruzadas para la serie completa de tiempo y para los periodos de tiempo de comportamientos disímiles.

En las figuras siguientes se observan las correlogramas de algunos piezómetros típicos de la presa principal y de la Zona Baja II de la central de Jaguas.

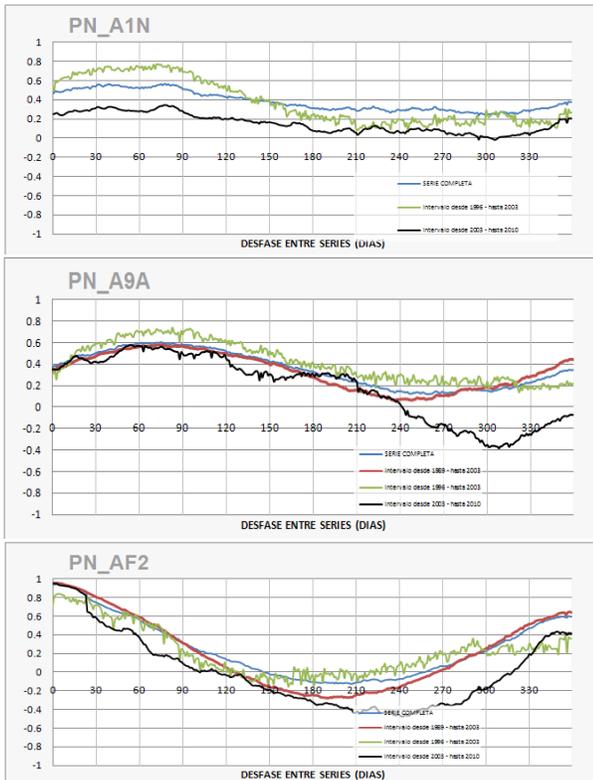


Figura 8. Correlogramas PN_A1N, PN_A9A Y PN_AF2

El piezómetro PN_A1N se localiza en el centro de la presa en la parte alta pero por debajo del nivel del embalse, el PN_A9A hacia el centro en la parte inferior y el PN_AF2 se localiza en la fundación. En general los tres alcanzan coeficientes de correlación altos y los tiempos de retardo con el cual se obtiene el mayor coeficiente de correlación, es mayor en los piezómetros localizados dentro del cuerpo de la presa, mientras que los de la fundación son muy cortos.

En la Figura 9 se presenta la variación del tiempo de retardo (lag) en la presa principal, para cuando se considera la serie de tiempo entre 1987 y 1992, en la parte superior, y para la serie entre 2000 y 2010. Se observa que los tiempos en la fundación son muy cortos y que en general hay una pequeña reducción en los tiempos de retardo.

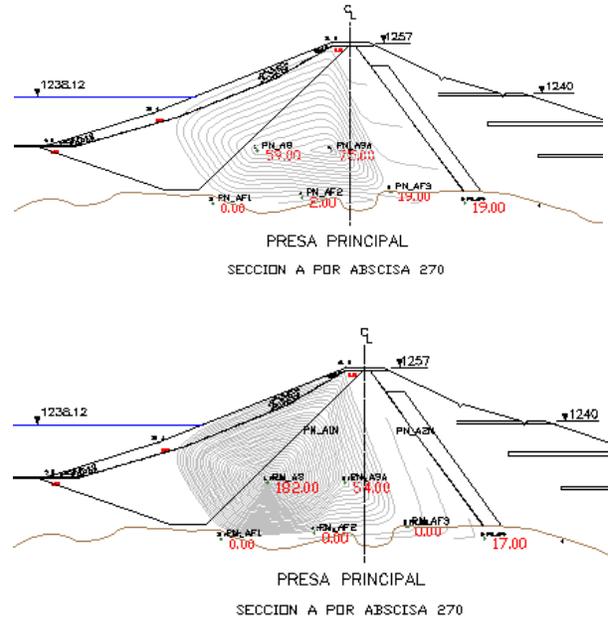


Figura 9. Variación del tiempo de retardo (Lag) Presa principal Guillermo Cano.

En la Figura 10 se presentan los correlogramas para piezómetros localizados en la Sección G de la Zona Baja II, el piezómetro PN_G21 está localizado cerca del talud de aguas arriba y alcanza muy buenas correlaciones, el PN_G25 está localizado cerca del filtro chimenea y no es tan clara su correlación, el PN_G16 se ubica hacia la parte central baja de la presa y finalmente el PN_GF9 en la fundación aguas abajo, a pesar de lo cual muestra correlaciones importantes con el nivel del embalse.

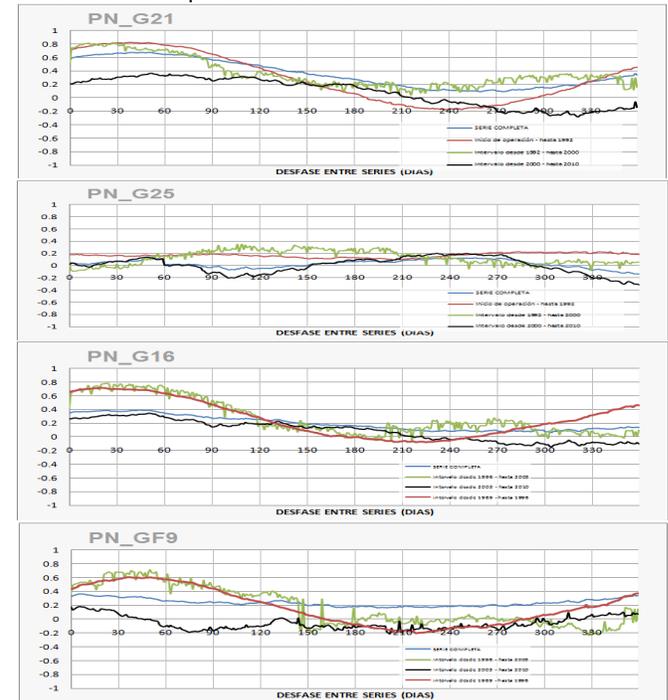


Figura 10. Correlogramas Zona Baja II

En la Figura 11 se presenta la variación de los tiempos de retardo en la zona baja, para los periodos entre 1996 y 2003 y entre 2003 y 2010. En el año 2003 se terminaron algunas obras para repotenciar y controlar flujos de agua por la fundación de esta presa. Se observa un cambio importante en los tiempos de retardo.

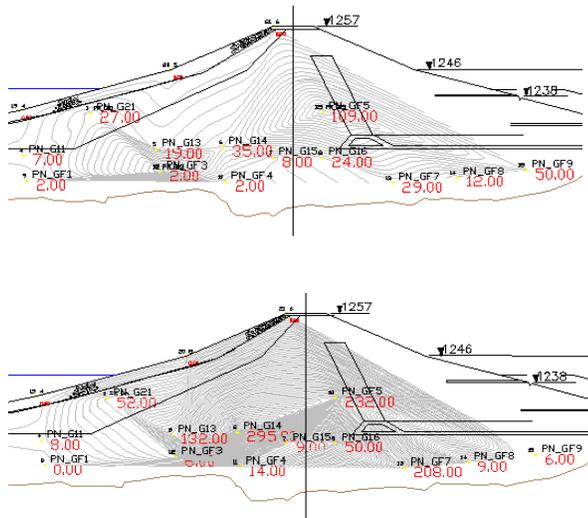


Figura 11. Variación del tiempo de retraso (Lag) Presa Zona Baja II

6 RESULTADOS DE LOS ANALISIS PRESA PUNCHINÁ

Para la presa de Punchina se tomaron dos secciones, una por la presa principal recostada sobre uno de sus estribos (Sección D) y otra por la zona baja (Sección G). En la Figura 12 se presentan las secciones consideradas.

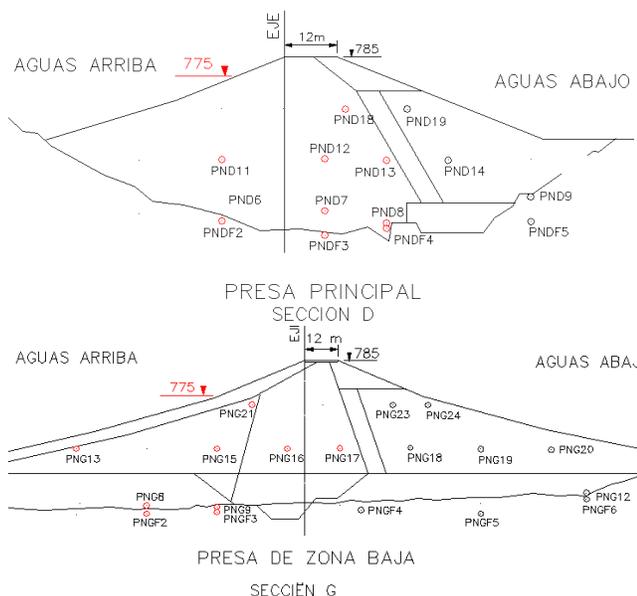


Figura 12. Secciones Presa Punchiná

En la Figura 13 se presenta la variación del nivel del embalse en la Central San Carlos. De forma similar como ocurre en La C. H. de Jagua, a partir del año 2002 hay un cambio importante en la operación del embalse.

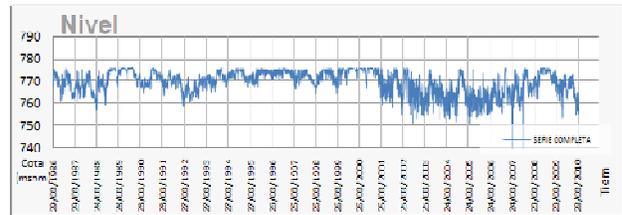


Figura 2. Nivel del embalse Central San Carlos.

En las Figuras 14 y 15 se muestra la variación estacional y la Variación Cíclica de los niveles del embalse. La escala del tiempo está expresada en trimestres.

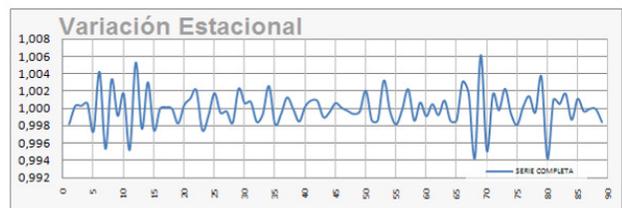


Figura 3. Variación estacional del nivel del embalse, Central San Carlos.

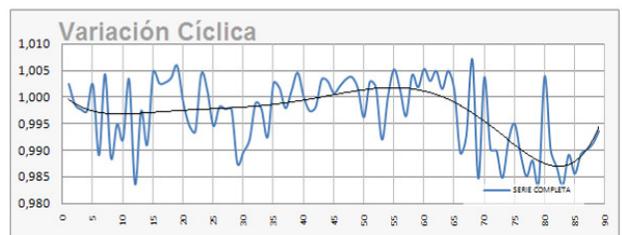


Figura 45. Variación estacional del nivel del embalse, Central San Carlos

La serie de variación estacional observada en la Figura 3, muestra un fuerte variación en los primeros años de operación del embalse hasta el año de 1990, a partir de allí se observa una menor variación hasta finales del año de 1992, a partir de 1993 la variación es menor correspondiendo este momento con un cambio en la manera de operar el embalse, a partir de finales del año 2000 y principios de 2001, se observa un incremento significativo en la variación del nivel del embalse, presentándose en el año de 2005 una fuerte variación referida a un ciclo menor a un año.

En la Figura 4 se observa la variación cíclica para periodos mayores a un año, sobre la serie se muestra una línea de tendencia. En la figura se observa una fuerte variación a

partir del año 2001, momento en el cual se cambio la operación de la central hidroeléctrica. En la figura 15 se observan los correlogramas obtenidos en algunos piezómetros de la presa principal. Se observa que en general los coeficientes de correlación que se obtienen son bajos, y que los mejores se obtienen en el periodo entre 2003 y la fecha, en donde se tienen variaciones más fuertes en los niveles del embalse.

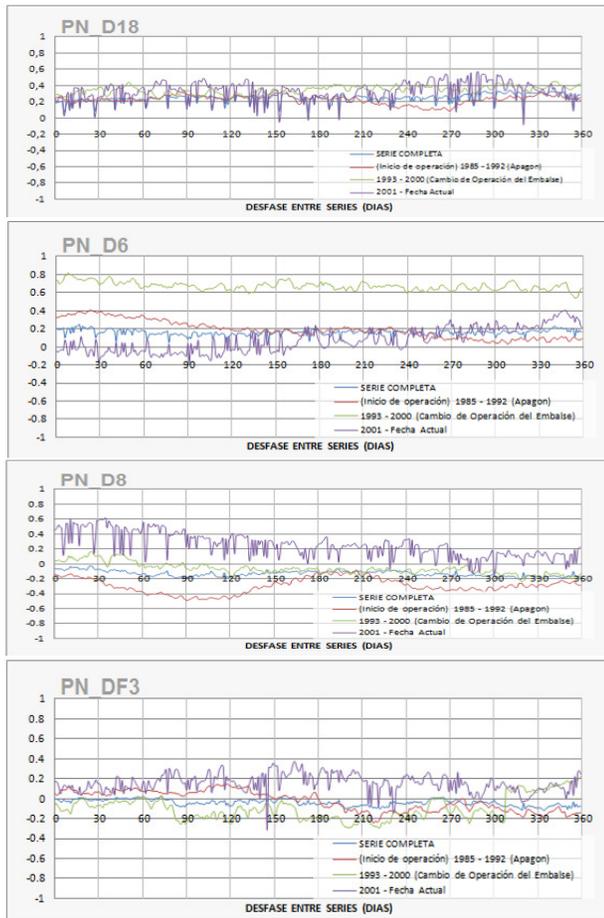


Figura 15. Correlogramas Piezómetros presa Principal – San Carlos

El piezómetro PN-D18 está en la parte superior, cerca del filtro y su comportamiento no está afectado por el embalse. Los PN-D6 y PN-D8, localizados hacia el talud de aguas arriba y cerca de la fundación, respectivamente, si alcanzar a verse afectados por el embalse. Finalmente, el piezómetro localizado en la fundación y aguas debajo de la presa no muestra ninguna correlación con el nivel del embalse.

En la Figura 16 se muestra la variación de los tiempos de atraso para los periodos entre 1987-1992 y 2000-2010. Se observa que para el caso de la presa principal son periodos muy largos y que no hay modificaciones palpables a pesar de las variaciones que se han registrado, especialmente en la operación de la central.

En la Figura 17 se muestran los correlogramas obtenidos para un piezómetro localizado sobre el talud de aguas arriba (PNG_13), otro hacia el centro (PNG_17) y uno en la fundación. Se observa que el localizado hacia el centro tiene mayores retrasos que los otros dos equipos.

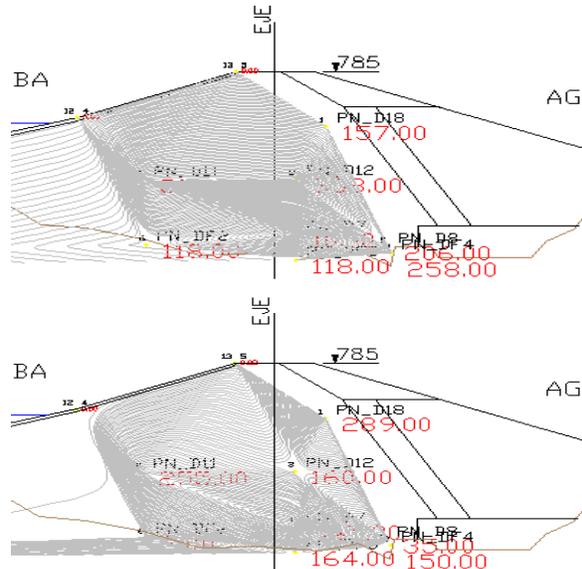


Figura 16. Variación del tiempo de retraso (Lag) Presa Principal

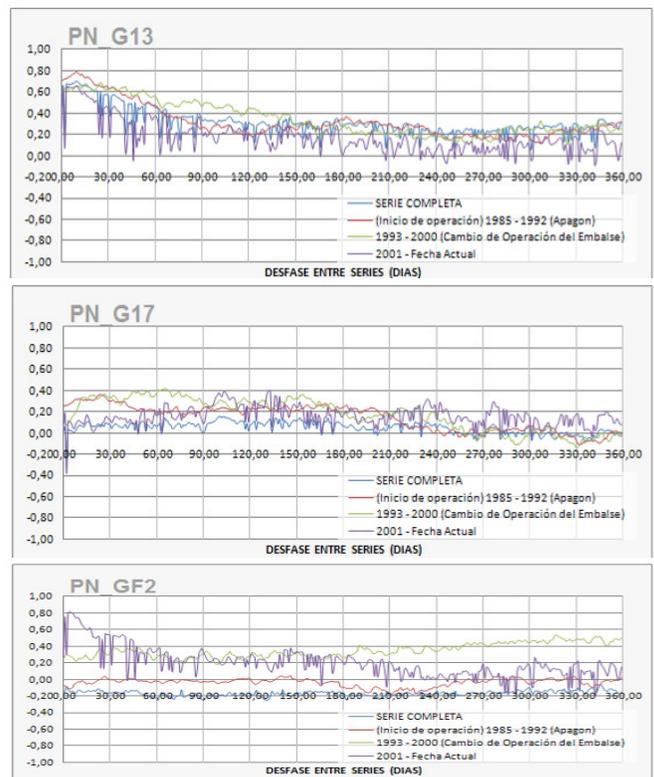


Figura 17. Correlogramas Presa Zona Baja.

7 CONCLUSIONES

A través de los resultados obtenidos del análisis de correlación sobre los piezómetros neumáticos en la sección A de la presa Guillermo cano, en la Central Hidroeléctrica de Jaguas, se pudo confirmar la hipótesis inicial del análisis, la cual expresa una dependencia de la presión dentro de la masa de suelo y que esta presión responde un cada punto en un instante de tiempo diferente, de a cuerdo a su posición relativa al frente de agua sobre la presa su la altura.

La influencia del embalse en la masa de suelo de la presa depende de la ubicación tanto horizontal como vertical de los puntos dentro de la presa, ya que la ubicación vertical determina la cabeza de presión ejercida sobre el punto, y la ubicación horizontal determina la resistencia del medio a la propagación de la honda, y la interconexión de la red de poros.

La merma en la dependencia de la presión de poros con la variación del nivel del embalse de los puntos instrumentados PN_A1N, PN_A8, ubicados en la sección A, a una profundidad de 22.61m y de 38.0m, respectivamente, desde la cabeza de la presa en la central hidroeléctrica de Jaguas en la presa principal Guillermo Cano, puede estar expresando el fenómeno de la deposición de partículas finas arrastradas por el flujo de agua a través de la red de poros del suelo desde otros puntos. Haciendo que la red de poros se obstruya alrededor de estos puntos disminuyendo su permeabilidad.

El cambio en la permeabilidad en la masa de suelo se puede producir por la migración de finos de estratos superiores a otros inferiores o zonas próximas a estas, esta migración puede ser más intensa en periodos donde se registre una variación más fuerte en el nivel del embalse. El cambio en la permeabilidad del suelo puede generar en las presas zonas de mayor o menor infiltración.

El comportamiento hidráulico de la masa de suelo de una presa puede variar conforme el suelo se ajusta a los cambios en la variación del nivel del embalse, es decir que hay un cambio en el comportamiento hidráulico de la masa de suelo mientras Esta busca un punto de equilibrio para una nueva condición en la variación del nivel del embalse. Sin embargo en general, durante la vida de servicio de la presa, se presentara en la masa de suelo un deterioro constante de sus propiedades hidráulicas y mecánicas, que esta expresado en el cambio de la permeabilidad de la masa de suelo y la pérdida de resistencia al esfuerzo cortante.

El medio en el cual se transmite la onda de cambio de presión, en este caso el concreto que constituye el cuerpo de la presa de la central hidroeléctrica de La Miel, influye de manera significativa sobre la relación entre la variación del nivel del embalse y la presión de poros dentro del cuerpo de la presa.

La ubicación de los puntos en cuanto a su profundidad dentro del cuerpo de la presa, traducida en una mayor

presión hidrostática aumenta la relación entre la variación del nivel del embalse y la presión de poros dentro de la presa a estas profundidades. Lo anterior indica que bajo una misma intensidad de la onda, la magnitud de la energía de la onda expresada en este caso por la presión hidrostática, hace que la onda pueda propagarse más fácilmente a través del medio con forme esta magnitud sea mayor, es decir conforme se aumente en profundidad.

Los resultados mostrados en el análisis estadístico y de correlación sobre el perfil central de la presa Patángoras, muestran que hay una zona de alta infiltración debajo de la presa, a través de la zona de fundación de esta. Se observo que esta zona de alta infiltración se localiza a más de 7 metros de profundidad desde el nivel de fundación de la presa y que se extiende a través de toda la fundación.

De manera general se puede concluir que las zonas de mayor infiltración a través de los perfiles en las presas analizados, se establecen en la zona de fundación debajo del núcleo de la presa, presentándose en algunos casos una conexión de esta zona con el vértice del filtro principal de la presa. Dentro del perfil A, esta zona de infiltración se extiende a través de la fundación de la presa a una profundidad de entre los 52 a 57 metros desde la corona de la presa, desde el frente de agua del embalse hasta el piezómetro PN_AF4 ubicado a unos 223 metros horizontales del frente de agua del embalse. En el perfil G (zona baja) en la central hidroeléctrica de Jaguas, la zona de infiltración se extiende a través de toda la fundación hasta el piezómetro PN_GF9, alrededor de uno 47m de profundidad desde la corona de la presa.

AGRADECIMIENTOS

A ISAGEN por permitir el desarrollo de este trabajo y permitir su publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- RUIZ M. DAVID, Manual de Estadística, eumen.net, 2004.
- WALPOLE E. R., Probabilidad y Estadística Para Ingenieros 6ª ed., PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA S.A., México, 1999.
- NEWLAND E.D., Vibraciones Aleatorias y Análisis Espectral, Editorial AC, Madrid, 1983.
- SPIEGEL M. R., Teoría y Problemas de Probabilidad y Estadística, McGraw Hill, México, 1976.