



## SIMULACIÓN DE PATOLOGÍAS A OBRAS HIDRÁULICAS, CASO DE ESTUDIO PRESA ZAZA

**Michael Alvarez González <sup>(1)</sup>, José Ernesto Martínez Valdés <sup>(1)</sup> y Lamberto Álvarez Gil <sup>(2)</sup>**

1. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC) Libertadores 201 e/ Jesús Menéndez y Danielito. Santa Clara. VC. Cuba. Teléf.: + 53 (42) 202330 Fax: 202330, e-mail: [michael@vc.hidro.cu](mailto:michael@vc.hidro.cu) o [eiphvc@enet.cu](mailto:eiphvc@enet.cu)
2. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní, Km 5½, Santa Clara. VC. Cuba, e-mail: [lambertoag@uclv.edu.cu](mailto:lambertoag@uclv.edu.cu)

### RESUMEN

El servicio consiste en el análisis correlativo de patologías de filtraciones respecto al estado tenso-deformacional histórico apreciado en la cortina del embalse Zaza con la simulación del estado actual de la obra hidráulica, que permite obtener datos mediante la calibración de modelos, determinar las causas que lo originan y obtener el comportamiento bidimensional del estado tenso-deformacional del embalse durante el proceso de explotación en múltiples escenarios de riesgos para la toma de decisiones.

Además, se realiza un pronóstico del comportamiento de la patología objeto de estudio en el dominio del tiempo acorde a su comportamiento histórico para poder establecer futuras respuestas acorde a la naturaleza estocástica asociada a las causas que fundamentan el origen de las filtraciones en el cuerpo de la estructura y se evalúa el error asociado a la ocurrencia o no del suceso desde un enfoque de peligro, vulnerabilidad y riesgo asociado no solo a la patología sino a la estabilidad de la estructura en su área objeto de investigación.

### ABSTRAL

The service consists on the correlative analysis of seepage pathologies regarding the stress-strain state historical appreciated in the curtain of the Zaza dam with simulating the current state of the hydraulic work to obtain the calibration data of models, to determine the originate causes and the two-dimensional behaviour of the stress-strain state during the process of exploitation in multiple scenarios of risks for taking decisions.

Also, It's carried out a forecast of the pathology behaviours in the time domain from the their historical data collected to establish future answers chord to the stochastic nature phenomena associated to the causes that origin the seepage in the structure body and the error associated to the occurrence and the evaluation or not form the event in a focus of danger, vulnerability and associate risk not alone to the pathology but to the stability of the structure in its area investigation object.

### INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene por objetivo el análisis correlativo de patologías de filtraciones respecto al estado tenso-deformacional histórico apreciado en la cortina del embalse Zaza con la simulación del estado actual de la obra hidráulica, que permite obtener datos mediante la calibración de modelos físico-matemáticos, determinar las causas que lo originan y obtener el comportamiento bidimensional del estado tenso-deformacional del embalse durante el proceso de explotación en múltiples escenarios de riesgos para la toma de decisiones.

Para lograr este objetivo se propone la ejecución de los procesos investigativos acorde a la figura 1, en el que se realiza un primer análisis de correlación entre los niveles de agua del embalse y el comportamiento de las patologías de filtraciones, además de establecer comparaciones empíricas a partir de datos correlativos en lo referente al comportamiento de las deformaciones provenientes de las mediciones geodésicas en el dominio del tiempo.

En un segundo momento se desarrollan las simulaciones de los diferentes escenarios probables por medio de técnicas estocásticas (aleatorias), indizando el grado de incertidumbre asociado a la



posibilidad o no de ocurrencia del fenómeno en cuanto a su distribución geo-espacial en el dominio del tiempo, además de evaluar el comportamiento tenso-deformacional de la estructura asociado a los probables escenarios de ocurrencia bajo los criterios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo (PVR) y finalmente, en un último instante, se procede a realizar un pronóstico del comportamiento del material o respuesta tenso-deformacional de la estructura y de la patología objeto de estudio en la presente investigación.

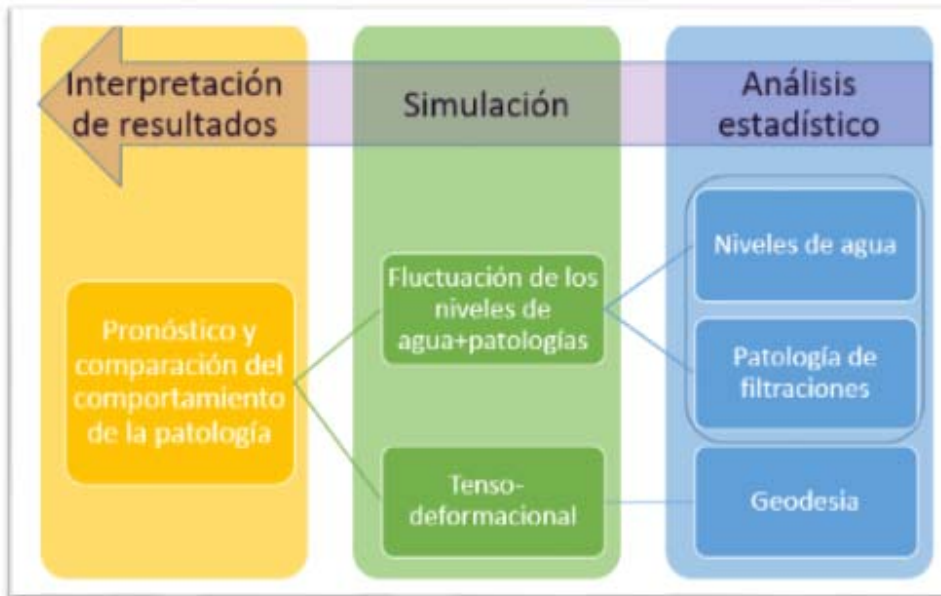


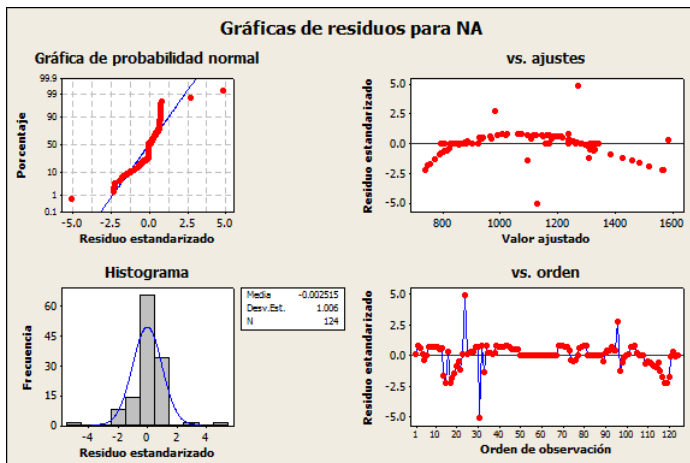
Figura 1. Esquema general de trabajo para los análisis y simulación de las patologías.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la presente investigación se dispuso de las fluctuaciones históricas de los niveles de agua del embalse desde 1972 hasta la fecha actual con los correspondientes valores de volumen asociado a fin de poder obtener una ecuación que permita relacionar empíricamente ambas mediciones por medio de técnicas de regresión no lineal (ver ecuación 1).

$$\text{Nivel de Agua}^2 = 605.811 + 0.967351 * \text{Volumen del embalse} \quad (1)$$

Luego se procede a realizar un análisis de los errores obtenidos para un intervalo de confianza límite para el 95% del total de las mediciones, siendo representado el comportamiento de los errores en la figura 2.



**Figura 2. Representación del comportamiento estadístico de los errores obtenidos de la ecuación 1 en el proceso de transformación de los volúmenes en niveles de agua**

Es de notar que los errores se concentran alrededor de valores nulos o insignificantes para el proceso de transformación acorde a una distribución normal, a diferencia de escasos datos que presentan valores anómalos (picos) que clasifican como datos poco probables según se identifica en la gráfica de frecuencias acumuladas y en los residuos estandarizados con una sensibilidad de error asociada a  $\pm 2.5$  unidades de error residual en referencia al cambio de la cota de nivel de agua para casos extremos.

En este caso se decidió reevaluar los parámetros de transformación directa e inversa de similares datos de niveles de agua y de volumen obteniendo resultados que no superan las diferencias de 0.0003 unidades entre cada dato, lo cual implica que

los parámetros de transformación asumidos en la ecuación son correctos y no inducen grados de incertidumbre en el proceso de transformación.

Desde 1972 el embalse ha mantenido un nivel de agua que condiciona el funcionamiento casi ininterrumpido de los mantos filtrantes o drenes colocados en el cuerpo de la obra, salvo escasos periodos de sequía en los cuales al chequear su frecuencia de registro sobre una línea base de tiempo común a los niveles de agua se identifica un acortamiento del tiempo de ocurrencia entre uno y otro; elemento este que por condiciones físico – mecánicas del material se pudiese valorar hipotéticamente la aparición de grietas internas en el cuerpo de la cortina como resultado de la retracción y expansión del material ante los seguidos cambios del contenido de agua en los poros del material asociados a la variación de la Línea de Corriente Superior de agua y el empuje que ejerce la constante fluctuación del agua en el talud húmedo.

Además, es de notar que la fluctuación de los niveles del embalse registrados para el periodo de explotación objeto de estudio, presenta un total de 51 registros con valores por encima de la cota de límite de filtración asumida hipotéticamente para la presente investigación (37.50 m) de los 287 registros disponibles desde enero de 1989 hasta noviembre de 2012, lo cual representa aproximadamente de un 18% del total de los datos con valores de niveles de agua en cotas que implican las apariciones de las patologías de filtraciones. Identificándose como los meses de octubre, enero, noviembre y diciembre con valores de máximos y junio, julio, agosto y mayo con valores mínimos históricos (ver figura 3 y tabla 1).

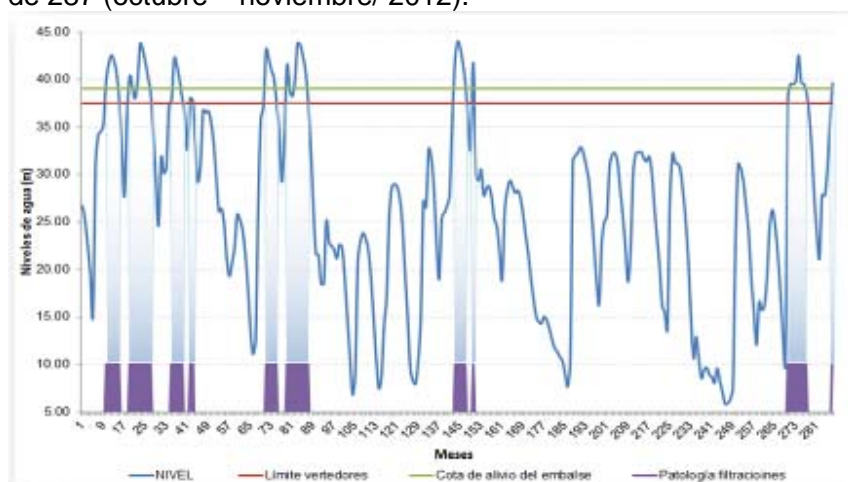
En el caso específico de la aparición de las patologías de filtraciones se parecía un valor diferencial límite que condiciona su aparición al estar el nivel de agua en una cota de 0.39 m por encima de la cota límite (37.50 m) para el cual comienzan a verter aguas abajo los vertedores equivalente al volumen de 870 hm<sup>3</sup>.

Al realizar una comparación en cuanto a los valores de cota del nivel de agua con los datos de la aparición de la patología de filtración en el documento Solución filtración margen izquierda presa Zaza (2000) con los datos actualizado por los que se opera el embalse actualmente, se identifica una cota límite del nivel de agua en 34.63 m y después de haber realizado la reparación del margen izquierdo en asciende este límite a 37.50 m, 2.87 m por encima de la condición de aparición en el cuerpo de la obra, lo cual denota una correcta solución en un primer momento que garantizó la continuidad operativa del proceso de explotación del embalse.

El comportamiento de la frecuencia de aparición de las patologías de filtraciones se identifica como irregular con una tendencia de disminución en un primer momento (hasta los primeros 89 meses) con un pico de aparición desde el mes 143 hasta el 150 (noviembre/2000 – marzo/), reapareciendo



nuevamente en el mes 150 (junio/2001) en donde se hace cero aflorando otra vez en el mes 270 hasta el 270 (junio/2011 – enero/2012) hasta desaparecer y ser detectada seguidamente en el mes de 287 (octubre – noviembre/ 2012).



**Figura 3. Representación gráfica de los niveles de agua históricos registrados en el embalse por meses en numeración consecutiva desde enero/1989 hasta noviembre/2012 contrastado a la cota límite donde comienzan a ser preciadadas las filtraciones en los vertedores (línea color rojo y barra color magenta) y cota donde comienza a aliviar el embalse (Línea color verde).**

Este análisis permite suponer que esta patología no es de nueva aparición sino que ha estado presente en estado un estado latente en la obra desde septiembre de 1989 según permite evidenciar el alcance de la base de datos que se dispone para la presente documentación acorde a los datos explorados inicialmente.

**Tabla 1. Datos estadísticos elementales correspondientes a los Niveles de Agua agrupados por meses.**

Meses	Media	Desviación Estándar	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Enero	30.77	9.26	8.67	25.39	30.69	40.42	43.36
Febrero	29.2	9.13	8.07	23.72	28.28	39.07	41.77
Marzo	26.98	8.51	9.59	22.05	25.41	36.5	39.57
Mayo	19.63	7.42	7.1	14.91	18.83	26.58	32.67
Abril	23.51	8.03	8.28	19.02	22.33	32.18	36.51
Junio	21.4	10.88	5.86	11.33	21.43	29.88	41.72
Julio	23.01	11.25	5.91	12.59	23.85	31.37	41.47
Agosto	23.87	10.61	6.36	14.16	26.58	32.05	39.48
Septiembre	25.16	10.17	7.58	16.44	28.3	32.24	39.83
Octubre	28.98	9.03	9.44	21.38	30.95	36.76	42.54
Noviembre	31.5	9.25	9.67	25.16	31.47	39.71	43.84
Diciembre	31.44	9.53	8.95	26.29	31.16	42.2	43.97

Al realizar un análisis de la agrupación de los datos acorde a la probable distribución en los primeros (Q1) y terceros (Q3) cuartiles se muestra una mayor concentración de los valores próximos al Q3 acorde a la mayor dispersión de datos según la desviación estándar que tipifica la base de datos, garantizando que más del 75% de los datos al realizarle una caracterización estadística son representativos para la muestra total y son válidos a considerar como valores más probables de su ocurrencia en el momento de generar de forma aleatoria por técnicas estocásticas diferentes niveles de agua para múltiples escenarios de análisis en los modelos matemáticos.

## RESULTADOS



Luego de haber establecido una ecuación general para una correlación a priori, se procede a determinar la independencia de la ocurrencia o no de los registros obtenidos en las variaciones de los niveles de agua del embalse asumiendo la posibilidad de ser tratadas como series cronológicas durante el proceso de confección de un modelo de pronóstico ARIMA que se ajuste a las particularidades de la función tiempo-dependiente de los niveles de agua y su correlación con la patología de filtraciones del embalse.

Es por ello que se decide aplicar la prueba de las rachas se utiliza generalmente para determinar si una muestra de observaciones es aleatoria o no, basado en la hipótesis nula de que las observaciones de una determinada secuencia son independientes entre sí. Obteniendo el resultado de negación en la prueba (ver figura 3) para la variable de la serie temporal Nivel\_Agua, las observaciones no son aleatorias (son tiempo dependientes): acorde a lo que ocurre con una

**Tabla 2. Resultados de la aplicación de la Prueba de Hipótesis de las Rachas**

Resumen de prueba de hipótesis				
	Hipótesis nula	Test	Sig.	Decisión
1	La secuencia de valores definida por Nivel_Agua ≤ 34.63 y >34.63 es aleatoria.	Prueba de ejecuciones de una muestra	.000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La secuencia de valores definida por Filtraciones ≤ 9.62 y >9.62 es aleatoria.	Prueba de ejecuciones de una muestra	.000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran las significancias asintóticas. El nivel de significancia es .05.

observación cualquiera que depende, generalmente, de las características de alguna observación anterior.

Una vez aplicada la prueba estadística se obtiene un total de 7 rachas con un valor de  $Z = -13.476$  para que satisfaga la condición de encontrarse en la región crítica de la prueba de hipótesis ( $Z < -1.64$ ), por tanto, se desecha entonces la hipótesis nula de que el comportamiento de los niveles de agua y de las filtraciones es aleatoria, por lo que se corrobora que el comportamiento de los niveles de agua del embalse poseen una dependencia del tiempo al igual que la patologías de la filtraciones asociadas a la fluctuación de los niveles de agua, aspecto que se verifica

nuevamente al presentar un valor tan pequeño (*menor que 0.05*), en su nivel crítico de significación de los resultados (*Significación asintótica bilateral = 0.000*), comprobada por dos métodos diferentes tal como se muestra en el resumen de la tabla 1.

El hecho de considerar las fluctuaciones de los niveles de agua como una serie de registros continuos de una variable cronológica, permite aplicar la teoría de series cronológicas propuestas por Box y Jenking (1970) para poder establecer una función no lineal, en la que se considera el comportamiento histórico para poder realizar un pronóstico del comportamiento futuro de la misma.

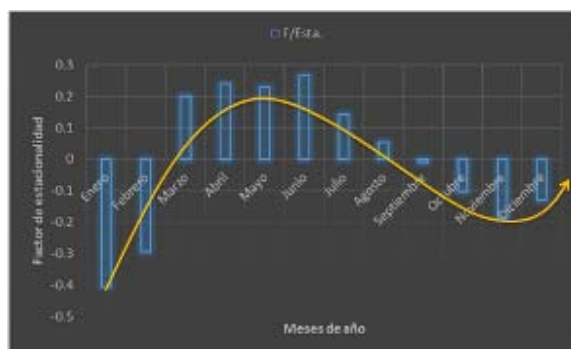
**Tabla 3. Autocorrelaciones parciales de la serie Niveles de Agua y su representación gráfica.**



### Factores estacionales

Nombre de la serie: Nivel Agua

Período	Factor estacional
1	-.40678
2	-.29247
3	.20020
4	.24006
5	.22900
6	.26571
7	.14059
8	.05406
9	-.00945
10	-.10230
11	-.18900
12	-.12962



En un primer momento, se decide realizar un análisis del comportamiento de la función del Nivel de Agua para determinar la tendencia y la estacionalidad por cada uno de los doce meses que son objeto de estudio en la presente investigación, acorde al principio y esquema de desarrollo de la investigación.

Considerando que en ocasiones la tendencia (comportamiento creciente o decreciente de la función en el tiempo) y la estacionalidad (comportamiento de la función en iguales periodos de tiempo en diferentes momentos de la cronología, por ejemplo los registros de un mismo meses durante varios años) se enmascaran entre sí, con una tendencia marcada puede no permite identificar la estacionalidad, y viceversa.

Es por ello que los métodos de descomposición estacional separan tendencia, estacionalidad y ruido, pero no predicen. Para predecir es necesario combinarlos con métodos de ajuste de tendencia posteriormente en el empleo

de otra técnicas estadísticas de avanzadas.

Como resultado de la descomposición de factores estacionales del comportamiento del Nivel de Agua registrado en el embalse (ver tabla 3), se identifica qué es lo que ocurre con los valores registrado de la serie Nivel Agua en cada uno de los meses del año, pudiendo determinar que en el mes de enero (1) se aprecia una reducción del nivel de agua en 0.41 aproximadamente y en el mes de junio (6) se registra un aumento del nivel del agua en 0.27 en su forma genérica acorde a los registros históricos consultados con una tendencia general de la función representada en una curva color anaranjada como una tendencia histórica del comportamiento anual del nivel de agua acorde a los factores de estacionalidad estimados a partir de la muestra empleada para el estudio que se presente en este informe.

En un segundo momento se decide determinar la función de mejor ajuste para la estimación de una ecuación general que represente el comportamiento de la obteniéndose los siguientes resultados mediante el empleo de modelo ARIMA:

1. Representación en gráficos de la variación de los niveles de agua, segmentando la base de datos a una primera sección de generación del modelo cronológico (línea color verde), continuada de una segunda sección (línea color azul) de control, reservada para comparar los errores del pronóstico de los diferentes niveles da agua que componen los escenarios a evaluar estadísticamente en comparación con los datos reales medidos en el embalse (ver figura 4).

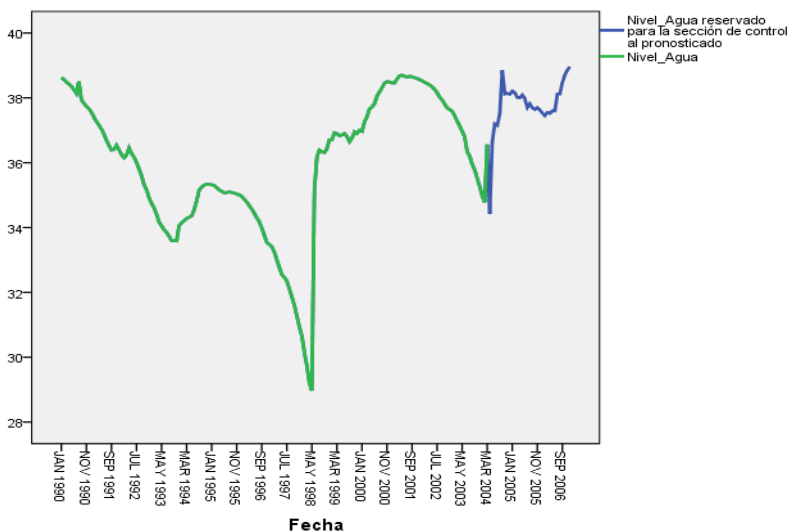


Figura 4. Representación gráfica de los niveles de agua registrados desde el mes de enero/1997 hasta septiembre/2007.

Una vez establecido los periodos de control y pronóstico de la función a estimar para el comportamiento de los parámetros de los niveles de agua se procede a general por técnicas estocásticas una serie de mediciones aleatorias de las cotas de la función Nivel\_Agua con una distribución normal que garantiza un 95% de datos aleatorios que se concentran en el área de probable ocurrencia con respecto a la media aritmética de la base de datos analizada y quedando solo un 5% para casos extremos en los que se controla solamente el cumplimiento

de la condición de que en ningún momento los niveles de agua rebasen la cota de la corona acorde

a los estudios realizados por Silva (1969) en el campo de conjuntos ordenados, teorías combinatorias y probabilidades.

El proceso de generación de datos estocásticos fue realizado por técnicas de Monte-Carlos acorde a varias experiencias alcanzadas en esta temática (Fellow, et al., 1993; Recarey 1999; Barrera, et al., 2006; Faulín, et al., 2006), asumiendo como fecha de inicio de la data el mes de febrero del 2007 hasta enero del 2020, con la ocurrencia de tres fenómenos atmosféricos extremos que rebasan la cota de los Niveles de Aguas Máximas del Embalse (NAM) sin superar la cota de corona y una serie de eventos regulares que son precedidas por periodos de sequía para poder establecer los escenarios pesimistas en todos los casos que la fluctuación de los niveles de agua rebasan el NAM, escenarios de consideración para los valores de nivel de agua comprendido entre el Nivel de Aguas Normales (NAN) y el NAM y como escenarios optimistas la fluctuación de los niveles de agua comprendidos entre la cota de los Niveles de Agua Muertas y el NAN del embalse (ver figura 5)

2. Determinación de la ecuación dependiente del tiempo relacionada con el comportamiento de la variable Nivel de Agua y la patología de filtraciones.

En este paso se valoran todas las funciones estimadas por las diferentes técnicas de regresión empleadas para Modelos ARIMA, prestando especial atención a las tablas ANOVA, donde los ajustes son significativos para la condición ( $\text{Sig} < 0.05$ ) y el valor más próximo a 1 del Residuo al cuadrado corregido representa una mejor correlación con los parámetros de la función estimada, por cuanto se decide que al verificar el doble condicionamiento impuesto al paquete de funciones resultante como parte del proceso de estimación, asumir el modelo (ver ecuación 2) por cumplir la condición de significación y poseer un residuo corregido con valor de máximo.

$$Y_c(t) = -0.289 * (Nivel\_Agua_t - Nivel\_Agua_{t-1}) + 0.08e^{-7} * Nivel\_Agua_t + \epsilon_t \quad (2)$$

Donde:

$Y_c(t)$  → Representa el comportamiento vertical de la Línea de Corriente Superior en la berma del embalse en términos de cotas absolutas.

$Nivel\_Agua_t$  → Es la cota del nivel de agua en el embalse registrada en el tiempo (t) durante la sucesión cronológica.

$\epsilon_t$  → Es el error residual asociado a la función de estimación el cual siempre se procura que sea menor que cero (0) para garantizar que sea un error blanco o despreciable en el



proceso de conformación de los coeficientes de la ecuación y la diferencia con los datos reales.

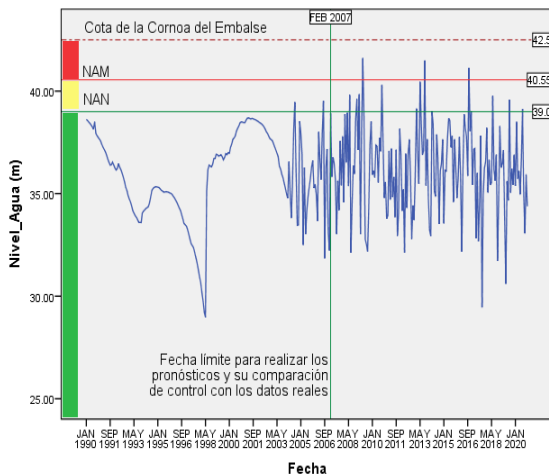


Figura 5. Representación gráfica de la generación de datos estocásticos de los niveles de agua hasta enero/2020 y las consideraciones de los escenarios de análisis secuenciales.

un total de 35 veces un valor muy próximo a la cota 36.00 m, sino que por la influencia de eventos extremos y la incertidumbre de los factores naturales y antrópicos que condicionan la fluctuación del Nivel de Agua y a decisión del equipo multidisciplinario, se asume como variable independiente (como elemento que contiene implícita la respuesta a los factores antes mencionados) y única el Nivel de Aguas del embalse; para poder garantizar eventos posiblemente válidos en los extremos de la Campana de Gauss que por tener una probabilidad de ocurrencia tan baja se deciden evaluar al final de la investigación, siempre que los resultados intermedios para los valores más probables evaluados en escenarios resultantes de criterio Riesgo o al menos de Vulnerabilidad derivan a un resultado superior (Peligro) se decide anular en lo adelante los siguientes pasos de análisis.

Toda vez que se hayan establecido los valores de pronóstico se realiza un primer acercamiento a la obtención de la ecuación del comportamiento de la fluctuación de los Niveles de Agua registrados en el embalse por medio de modelos ARIMA en los que se parte del concepto del modelo aditivo acorde a la ecuación 6 para obtener finalmente un sistema de ecuaciones en la que consideran los comportamientos estacionales característicos para el embalse objeto de estudio (ver sistema de ecuaciones 5).

$$Y_t = T_t + S_t + s_t$$

$$= \begin{bmatrix} 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2t^2} - 5.875e^{-6t^3} - 0.40678 \text{ st } s_t = \text{Enero} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2t^2} - 5.875e^{-6t^3} - 0.29247 \text{ st } s_t = \text{Febrero} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2t^2} - 5.875e^{-6t^3} + 0.20020 \text{ st } s_t = \text{Marzo} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2t^2} - 5.875e^{-6t^3} + 0.24006 \text{ st } s_t = \text{Abril} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2t^2} - 5.875e^{-6t^3} + 0.22900 \text{ st } s_t = \text{Mayo} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2t^2} - 5.875e^{-6t^3} + 0.26571 \text{ st } s_t = \text{Junio} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2t^2} - 5.875e^{-6t^3} + 0.14059 \text{ st } s_t = \text{Julio} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2t^2} - 5.875e^{-6t^3} + 0.05406 \text{ st } s_t = \text{Agosto} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2t^2} - 5.875e^{-6t^3} - 0.00945 \text{ st } s_t = \text{Septiembre} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2t^2} - 5.875e^{-6t^3} - 0.10730 \text{ st } s_t = \text{Octubre} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2t^2} - 5.875e^{-6t^3} - 0.18900 \text{ st } s_t = \text{Noviembre} \\ 39.658 - 0.198t + 0.2e^{-2t^2} - 5.875e^{-6t^3} - 0.12962 \text{ st } s_t = \text{Diciembre} \end{bmatrix} \quad (5)$$





Donde:

$Y_t \rightarrow$  Representa el comportamiento vertical de la Línea de Corriente Superior en la berma del embalse en dependencia de la estacionalidad y del tiempo.

$T_t \rightarrow$  Representa la componente de «tendencia» de la función.

$S_t \rightarrow$  Representa la componente de «estacional» de la función.

$\epsilon_t \rightarrow$  Representa una serie de tiempo estacionaria (factor de estacionalidad).

Luego de haber establecido las ecuaciones de pronóstico para la función Nivel de Agua se realiza un pronóstico del modelo ARIMA para desde la fecha actual hasta el mes de enero del 2020 según se representa en la figura 6, al representar los datos observados (línea de color rojo), la adecuación del modelo (línea de color azul fina), el pronóstico realizado por el modelo (línea de color azul gruesa) y los límites de los intervalos de confianza superior e inferior para un 95% de fiabilidad. Además de evaluar los residuos de modelo para chequear que sean valores despreciables que se consideran como un ruido blanco.

3. Evaluación de los posibles escenarios a partir del pronóstico realizado por el modelo ARIMA para la LCS en la berma.

En este paso, para poder comparar la coincidencia o no del modelo de predicción asumido para la presente investigación; al realizar un control de los datos recolectados en las mediciones realizadas de las cotas piezométricas desde el mes de julio hasta septiembre a las calas en la cortina del embalse por el grupo de hidrogeología se realiza una comparación gráfica (ver figura 6).

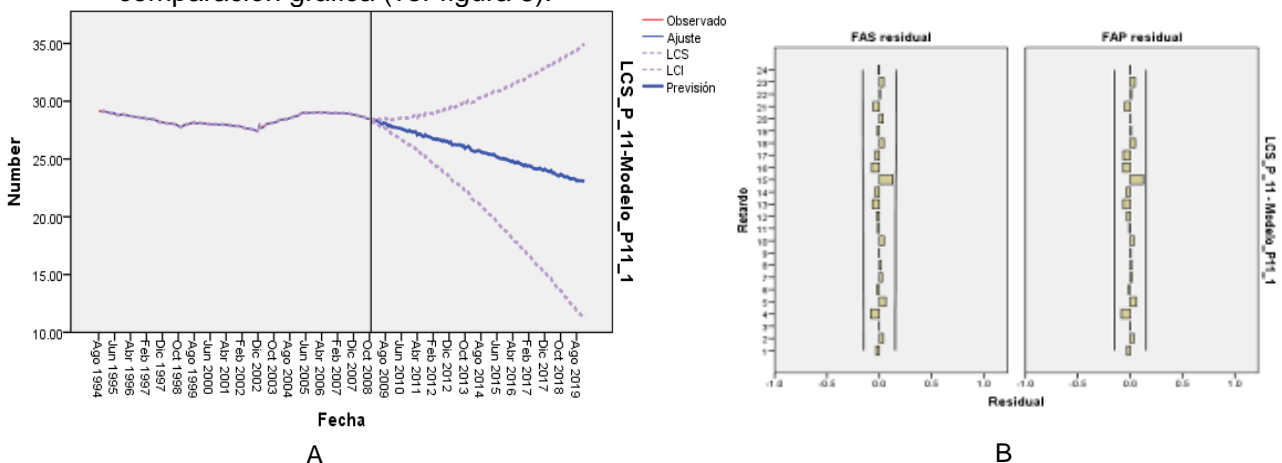


Figura 6. Representación gráfica del pronóstico de la LCS en la Berma (P\_11\_1) [A] en contraste con los datos reales del Piezómetro 11 (P\_11) en su análisis residual [B].

En todos los meses de comparación se verifica inicialmente para un escenario Riesgo (los niveles de agua del embalse están por debajo del nivel de agua en el que aparecen as patologías de filtraciones) acorde a los datos reales que intencionalmente fueron sustituidos por los correspondientes valores de estimación de Nivel de Agua en el modelo en su correspondiente fecha a fin de evaluar la respuesta de la LCS en la berma.

En el casos del mes de julio se aprecia que los valores de cota estimados para la LCS en comparación con los datos reales medidos presentan un 85.71% de coincidencia dentro de los intervalos de confianza para un 95% esperado del comportamiento probable de la función estimada, no siendo así para el valor anómalo que se registra en la cala número 11 (C11) en el que los datos presentan un patrón de surgencia hacia la cala número 18 (C18) quedando fuera de los valores admisibles registrados históricamente (Intervalo Confianza Inferior [línea verde] y Superior [línea roja]) en la berma por el Piezómetro número 11 que es el que más cercano está al área de estudio, cambiando el resultado esperado de la evaluación de un escenario Optimista a uno De Consideración.



En el proceso de evaluación gráfica de los resultados esperados en los meses de agosto y septiembre, se identifica el mismo comportamiento que en el mes de julio con una tendencia de aumento discreto de la cota de la LCS de 0.02 m y 0.32 m respectivamente en cada mes referente al mes de julio y con una variación de los niveles de agua de -0.95 m en agosto y de 0.33 m en septiembre con igual parámetro de referencia relativa. Elemento este que provoca incertidumbre desde el criterio hipotético de evaluar dos escenarios de criterio Optimista independientes entre sí con respecto a un tercero y obtener en todos los casos elementos de exclusión de datos por valores anómalos que derivan en escenarios De consideración.

Ante esta problemática se decide aplicar técnicas de la geo-estadística para poder estimar la distribución espacial en dimensión y alcance del fenómeno dado que se conoce el tiempo de ocurrencia y respuesta del mismo mediante plataformas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), siendo mostrados los datos empleados en el anexo 4 con la posición y magnitud de cada uno de los datos.

En consecuencia se emplea un modelo de interpolación general que considera la distancia y magnitud del valor a estimar mediante el peso estimado por medio de una función no lineal (Método Kriging Universal) con un valor de coincidencia para el mes de julio del 94.85%, para agosto del 97.52% y para septiembre del 96.69%.

El uso de estas técnicas permite obtener la ecuación de interpolación característica para cada juego de datos empleado por mes, en el que se la presta particular interés al valor que posee el término correlativo que expresa el crecimiento dependiente del tiempo y de la variación espacial que poseen los datos registrados a diferencia del término independiente que disminuye gradualmente a medida que aumenta al función de gradiente entre los puntos más cercanos a interpolar (ver ecuaciones 6, 7 y 8).

$$Y_t^t = 0.121533390817309 * x + 23.4710573746122 \quad st \quad t = \text{Julio} \quad (6)$$

$$Y_t^t = 0.250025602136543 * x + 20.1529480842194 \quad st \quad t = \text{Agosto} \quad (7)$$

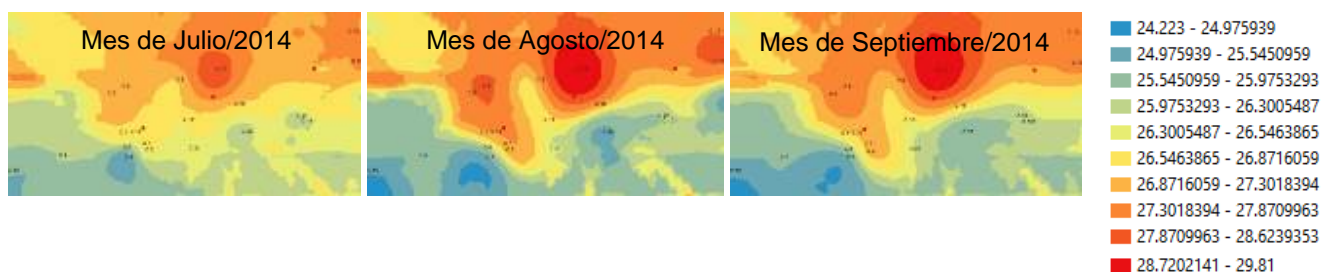
$$Y_t^t = 0.316659731395554 * x + 18.4128075708704 \quad st \quad t = \text{Septiembre} \quad (8)$$

Donde

$Y_t^t$  → Representa el valor probable de la LCS en la berma del embalse en dependencia de la distribución espacial y del tiempo.

$x$  → Representa la variable que se pronostica por su distribución espacial probable.

Como resultado preliminar del uso de esta técnica se obtienen las distribuciones espaciales del comportamiento de la LCS (ver figura 7) para cada mes, en el que se aprecian las áreas de interés en términos de anomalías asociados al comportamiento de la retención del agua en el cuerpo de la cortina del embalse, basado en similares experiencias internacionales en el estudio de otros fenómenos de naturaleza aleatoria (Matthies, et al., 1997; Christian, et al., 2004; Farin, et al., 2006).

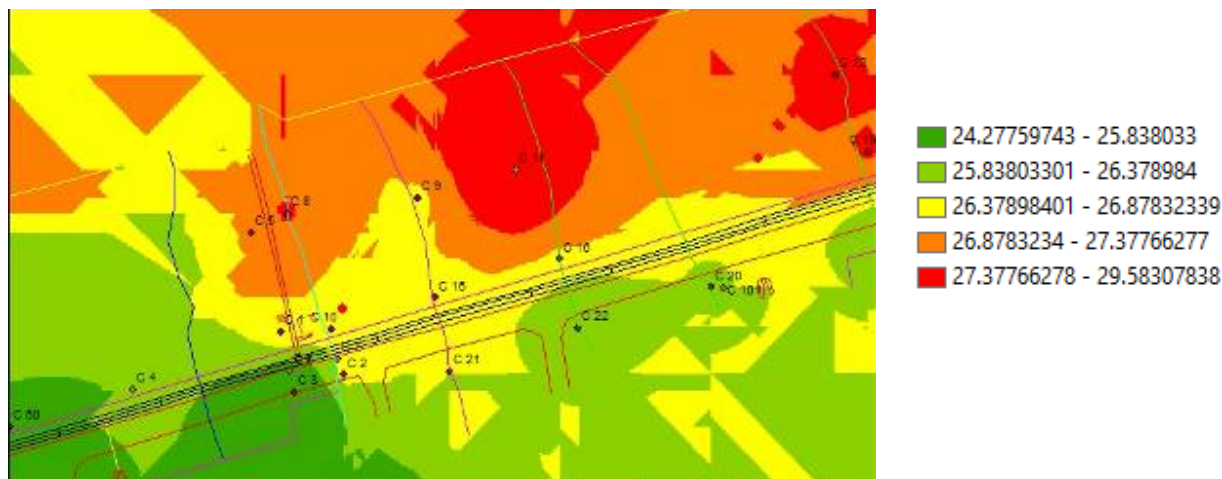


**Figura 7. Representación gráfica de las distribuciones espaciales del comportamiento de la LCS para los meses de julio, agosto y septiembre.**

Basado en los resultados previamente visualizados se decide estimar el comportamiento más probable asociado a la variabilidad espacial en el tiempo del fenómeno objeto de estudio en esta sección (surgencia de la LCS) empleando técnicas de la Lógica Difusa para el indizado del valor más



probable que presenta menor variabilidad en el tiempo y distribución espacial, considerando fijo su ubicación en el espacio para poder comprender su comportamiento en el dominio del tiempo (ver figura 8).



**Figura 7. Representación gráfica de las distribuciones espaciales indizadas del valor más probable que presenta menor variabilidad en el dominio del tiempo del comportamiento de la LCS para los meses de julio, agosto y septiembre.**

Al evaluar el criterio de indizado espacial en el dominio del tiempo estandarizado a la respuesta esperada por los posibles escenarios (según los colores asumidos desde un primer momento) se aprecia que existe más de un 40% de cubrimiento del área de interés que presenta una patología del surgencia de la LCS evaluado como un escenario Peligro a pesar de que los parámetros inicialmente asumido en el proceso de cálculo y estimación tienen su base en criterios esperados de Riesgo.

## CONCLUSIONES

Luego de haber desarrollado el estudio de forma multidisciplinaria a las patologías de filtraciones se proponen las siguientes conclusiones:

1. Se logra demostrar una dependencia directa entre la fluctuación de los Niveles de Agua y la LCS en el dominio del tiempo, por lo que se hace una propuesta de ecuación de correlación general para la determinación rápida de la posible cota de posición en el P-11 para un momento dado en el tiempo o por su descomposición estacional relacionado a los meses del año.
2. Los casos o posibles escenarios a evaluados son considerado como los más probables de ocurrencia, acorde a la distribución normal probable a pesar de que esta condicionante no garantiza de que realmente ocurran o no en ese orden; basado en el alto grado de probabilidad asociado respecto al comportamiento medio histórico en el dominio de tiempo de a variable Nivel de Agua.
3. La evaluación del escenario Riesgo a partir de la comparación de los datos obtenidos en las mediciones recientes a las calas en el cuerpo de la cortina modifican los resultados esperados, al demostrar el comportamiento de una surgencia de la LCS en el cuerpo de la presa por encima del comportamiento histórico del embalse derivando en criterios resultantes de Peligro.
4. La evaluación por medio de un indizado espacial del comportamiento más probable del resultado obtenido al evaluar un posible escenario Riesgo permite identificar las zonas donde se concentran los problemas de surgencia en el cuerpo de la cortina de tierra para representar más de un 60% del área de interés para la presente y futuras investigaciones.



## BIBLOGRAFÍA

- Barrera, M., Trejos, A. y Carvajal, P. (2006). Integración MONTECARLO. *Scientia Et Technica*, Vol. XII (No. 32), pp. 331-334.
- Box, G. y Jenkins, G. (1970). *Time Series Analysis forecasting and control*. Disponible en: <http://www.garfield.library.upenn.edu/classics1989/A1989AV48600001.pdf>
- Christian, J. y Hon, M. (2004). *Geotechnical Engineering Reliability: How Well Do We Know What We Are Doing?* *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (Vol. 130).
- Farin, G., Hege, H.-C., Hoffman, D., Johnson, C., Polthier, K. y Rumpf, M. (2006). *Mathematics and Visualization* G.-P. Bonneau, T. Ertl y G. Nielson (Eds.), *Scientific Visualization: The Visual Extraction of Knowledge from Data*. Disponible en: [www.springer.com](http://www.springer.com)
- Faulín, J. y Juan, Á. A. (2006). *Simulación de Monte Carlo con Excel Simulation and the Monte Carlo Method*
- Fellow, M., Guštar, M. y Tikalsky, P. (1993). *Monte Carlo Simulation-Tool for better understanding of LRFD* *Journal of Structural Engineering* (Vol. 119).
- Matthies, H., Brenner, C., Bucher, C. y Soares, G. (1997). *Uncertainties in probabilistic numerical analysis of structures and solids Stochastic finite elements*. *Structural Safety*, Vol. 19 (No. 3), pp. 283-336.
- Recarey, C. (1999). *Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo*. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Facultad de Construcciones, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
- Silva R., C. (1969). *Nociones sobre conjuntos ordenados, teoría combinatorias y probabilidades Rudimentos de Matemática Moderna*. Ciudad de La Habana, Cuba: Ciencia y Técnica.