

## Visualización científica de datos geodésicos en presas de tierra, caso Embalse Palmarito

Ing. Michael Álvarez González

Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC).

e-mail: [michael@vc.hidro.cu](mailto:michael@vc.hidro.cu) o [michaelg@uclv.edu.cu](mailto:michaelg@uclv.edu.cu)

Dr. C. Lamberto Álvarez Gil

Asistente, Investigador Titular. Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas.

e-mail: [lambertoag@uclv.edu.cu](mailto:lambertoag@uclv.edu.cu)

Dr. C. Romel Vázquez Rodríguez

Asistente, Fac. Matemática-Física y Computación, Univ. Central «Marta Abreu» Las Villas.

e-mail: [romel@uclv.edu.cu](mailto:romel@uclv.edu.cu)

### RESUMEN

Se realiza una propuesta de interpretación de las bases de datos geodésicas de los desplazamientos horizontales y verticales medidos de una presa de tierra mediante la utilización de varias herramientas y técnicas computacionales como la visualización científica, sistemas de información geográfica, geoestadística, métodos numéricos y algunos elementos de la lógica difusa. La interacción múltiple de estas herramientas y técnicas en el procesamiento y análisis de los datos facilitó abordar el fenómeno de estudio con un mínimo grado de simplificación durante un proceso de visualización de los resultados en el cubo espacio-temporal vinculado con una escala de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo asociado con la distribución geoespacial de los datos en la estructura.

**Palabras clave:** base de datos, cubo espacio-temporal, deformaciones, geodesia, geoestadística, lógica difusa, presas de tierra, sistemas de información geográfica.

## Scientific visualization of geodetic data bases in earth dams, case Palmarito Dam, Cuba

### ABSTRACT

The paper has an interpretation proposal of the horizontal and verticals measured geodetic data bases of the displacements of an earth dam, using several tools and computational techniques such as scientific visualization, GIS, geostatistics, numerical methods and some elements performed with fuzzy logic. The multiple interaction of these tools and techniques in the processing and analysis of data allowed addressing the study phenomenon with a minimum simplification degree through displaying of the results in the space-time cube linked with a scale Hazard, Vulnerability and Risk associated with geospatial data distribution in the structure.

**Keywords:** data base, space-time box, deformations, geodesy, geostatistics, fuzzy logic, earth rock dams, geographic information systems.

## INTRODUCCIÓN

El comportamiento de las deformaciones en las presas de tierra, es uno de los elementos objeto de monitoreo y control sistemático, tanto desde su proceso constructivo como durante el proceso de la puesta en explotación del embalse. Una interpretación adecuada en función del comportamiento histórico, asociado con las particularidades de los materiales utilizados en la construcción de la cortina mediante la utilización de herramientas de visualización científica, representa una herramienta necesaria a disponer tanto por los especialistas encargados legalmente de mantener operativo el complejo hidráulico, como para los proyectistas que evalúan oportunamente en estado de seguridad para mantener activo el uso del embalse.

La forma en la que se manifiestan los procesos de deformación como respuesta del material ante diversas condiciones bajo las cuales está sometida la obra, constituye actualmente el punto de partida para nuevas líneas de investigación con inferencia a mediano y corto plazo ante la incertidumbre de la naturaleza de los fenómenos naturales. No solo con la utilización de métodos clásicos pertenecientes a la geodesia, la hidráulica o a la ingeniería civil, sino en la unión de varias disciplinas para abordar el fenómeno de estudio desde sus propias características estocásticas con el auxilio de herramientas matemático-estadísticas aplicadas a la geomática para visualizar espacialmente el fenómeno y a su vez someterlo a un proceso de evaluación en términos de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo (AVR).

Las patologías asociadas con deformaciones estructurales en las cortinas de presas de tierra, dentro del marco de desarrollo científico técnico, y el surgimiento de nuevas propuestas a investigar en el campo de la hidráulica, constituye hoy uno de los principales objetivos de atención para la sociedad científica cubana, considerando las constantes afectaciones por el cambio climático de fuertes lluvias y prolongadas sequías que persisten en Cuba, donde la presente investigación se desarrolló.

En el proceso de diseño y construcción del embalse, así como durante su proceso de explotación, se procura la colocación de un sistema de monitoreo a partir de una vigilancia tecnológica al comportamiento de la respuesta tenso-deformacional del material de la cortina a partir de las deformaciones registradas en el proceso de compactación mediante un sistema de instrumentación técnica a lo largo de la estructura. La detección oportuna de asentamientos diferenciales en el cuerpo de la estructura, a consecuencia de las respuestas reológicas del material que compone el suelo, ante la acción de las cargas actuantes en una zona específica de la estructura, puede evitar, o no, la manifestación progresiva de grietas en la cortina en tiempos relativamente cortos bajo la acción de las fuerzas que intervienen en el proceso tenso-deformacional (Craig 1995), (Craig 1997).

El poder determinar cuándo un proceso de deformación progresivo o acelerado en el tiempo constituye un peligro potencial para la estructura, no está definido con certeza o en varias ocasiones presenta elementos técnicamente contradictorios a pesar de disponer una amplia variedad de criterios normativos en función de los materiales de la cortina, características del suelo existente en la base y categoría de complejidad del embalse según varios autores (Chrzanowski et al. 1985), (Chrzanowski et al. 1986), (Szostak-Chrnowski et al. 2003).

La necesidad de determinar un conjunto que contenga similares características por medio de herramientas matemáticas justificó el uso de la lógica difusa o borrosa para obtener una expresión que no es ni totalmente cierta ni completamente falsa, aplicada a conceptos que pueden tomar valores cualesquiera en el dominio del tiempo con un valor numérico de veracidad dentro del conjunto de datos registrados por el sistema de vigilancia implementado en el embalse.

Esta técnica permitió dar solución un problema clásico de la ingeniería; al identificar cuán grande o estable se hacen las manifestaciones de las deformaciones ante una serie de criterios vagos o imprecisos que demuestran la falta de definición dada por desconocer cuánto influye la deformación registrada en una marca superficial respecto a las más próximas, así como las principales zonas de deformaciones registradas solo con un criterio máximo de deformación admisible teórico según se propone en el diseño o proyecto constructivo de la presa.

Al combinar, por medio de la visualización científica, los datos monitoreados por largos periodos de tiempo en un mismo dominio espacio-temporal, se hace posible la identificación de patrones de comportamiento y tendencias con características intrínsecas del fenómeno que se estudia, tal y como exponen en sus resultados alcanzados varios autores que han desarrollado investigaciones en diferentes campos al implementar similares técnicas y análisis (Peuquet 2002), (Blok 2005), (Stojanovic et al. 2008).

Además, las experiencias alcanzadas en el campo de los SIG vinculados con la ingeniería hidráulica, civil y la geomática, desde las técnicas de visualización científica aplicadas a un proceso progresivo espacio-temporal (Kraak et al. 2008) y su posterior evaluación en criterios de AVR según los parámetros de diseño del complejo hidráulico y su estado patológico actual constituye argumento de una viable aplicación en el fenómeno que aquí se aborda.

Acorde con los criterios previamente enunciados, se propone como problema científico, el cómo utilizar varias técnicas de la visualización científica para realizar una interpretación de la base de datos histórica de las deformaciones geodésicas medidas en la cortina de una presa de tierra por medio de las herramientas matemático-estadísticas para caracterizar el comportamiento histórico de las deformaciones en función de zonas de AVR.

Para ello se adopta como objeto de estudio en el presente marco investigativo la base de datos histórica de las deformaciones registradas en el embalse Palmarito como caso de estudio, con una dimensión y alcance establecido en los análisis espacio-temporales del proceso de las deformaciones registrado en la superficie de la cortina del embalse dentro del campo de la geomática, la visualización científica y minería de datos, integrando diferentes disciplinas de las ingenierías Civil, Hidráulica y la Geodesia.

Como solución al problema identificado, se acepta por hipótesis que, si se realiza una adecuada utilización de las técnicas de visualización científica y de las herramientas matemático-estadísticas en la que sean representados los resultados alcanzados en el dominio espacio-tiempo, que permita establecer criterios de AVR asociados a las deformaciones registradas en la cortina del embalse Palmarito, será posible realizar una correcta interpretación del comportamiento histórico de las deformaciones y de los riesgos asociados con zonas donde se concentran las mayores deformaciones en la estructura, además de demostrar la viabilidad de aplicación teórica, práctica y metodológica que pretende aportar el investigador en su trabajo investigativo con la utilización de variadas técnicas de análisis de datos.

Para ello, el objetivo general en el presente documento es proponer una interpretación de las bases de datos histórica de las deformaciones geodésicas medidas en la cortina del embalse Palmarito por medio de las herramientas matemático-estadísticas con elementos de la visualización científica que complementen y caractericen el comportamiento histórico de las deformaciones en función de posibles zonas de AVR en la cortina del embalse Palmarito.

En pos de cumplimentar los propósitos adoptados para la presente investigación, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Captar, pre-procesar y crear las bases de datos históricas de las deformaciones geodésicas registradas en el embalse Palmarito.

2. Desarrollar una caracterización detallada por medio de herramientas matemático-estadísticas en función de la base de datos histórica de la geodesia compilada en la base de datos.
3. Hacer una propuesta de interpretación basada en los resultados alcanzados y visualizados en el dominio espacio-tiempo con criterios de AVR a lo largo de la cortina de la presa de tierra.

## PRINCIPALES TÉCNICAS Y FUENTE DE LA BASE DE DATOS UTILIZADA

Para la realización del presente documento se utilizaron las informaciones contenidas en los informes técnicos de control a las deformaciones geodésicas realizados por el Grupo Empresarial GEOCUBA con fechas y nomenclaturas de ciclos definidas en la tabla 1.

**Tabla 1. Fechas de los ciclos geodésicos de mediciones realizados al embalse Palmarito**

| Fecha      | Ciclo |
|------------|-------|
| 23/02/1998 | 0     |
| 09/09/1998 | 1     |
| 22/01/1999 | 2     |
| 26/10/1999 | 3     |
| 15/03/2000 | 4     |
| 15/12/2000 | 5     |
| 20/05/2005 | 6     |
| 15/05/2008 | 7     |
| 14/05/2010 | 8     |

Los datos contenidos en estos informes fueron captados y preprocesados para validar la integridad de la información contenida en los informes a partir de filtros de datos para valores límites, interpolaciones numéricas en casos extremos indizados por el error probable asociado con cada una de las mediciones realizadas por las líneas geodésicas que son monitoreadas sistemáticamente. Además, se dispuso también de los registros de los niveles de agua históricos del embalse para establecer una correlación visual estimada sobre la línea base tiempo a fin de identificar por medio de las técnicas de visualización de datos científicos la dependencia de cada uno de los fenómenos y su interacción en el cubo espacio-temporal. Para la caracterización estadística de los datos se utilizaron métodos de la estadística clásica vinculados con el geoprocesamiento de datos y su estimación espacial de influencia más probables por medio de la lógica difusa en la visualización de valores de desplazamientos verticales y horizontales en una cortina de una presa de tierra.

## CARACTERIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS HISTÓRICA DE LA GEODESIA Y DEL EMBALSE

El embalse objeto de estudio está ubicado en la parte alta de la cuenca en el río Sagua la Grande en la provincia de Villa Clara (ver figura 1). Su objetivo inicial fue el riego de caña, siendo posteriormente modificado como una fuente potencial de entrega en el abasto a Santa Clara con vistas a la desvinculación futura del Sistema de Abasto desde el embalse Paso Bonito proveniente de la Provincia de Cienfuegos por estar deteriorado y poseer altos consumo

energético y baja eficiencia en el suministro de agua por las sistemáticas roturas en las conductoras.

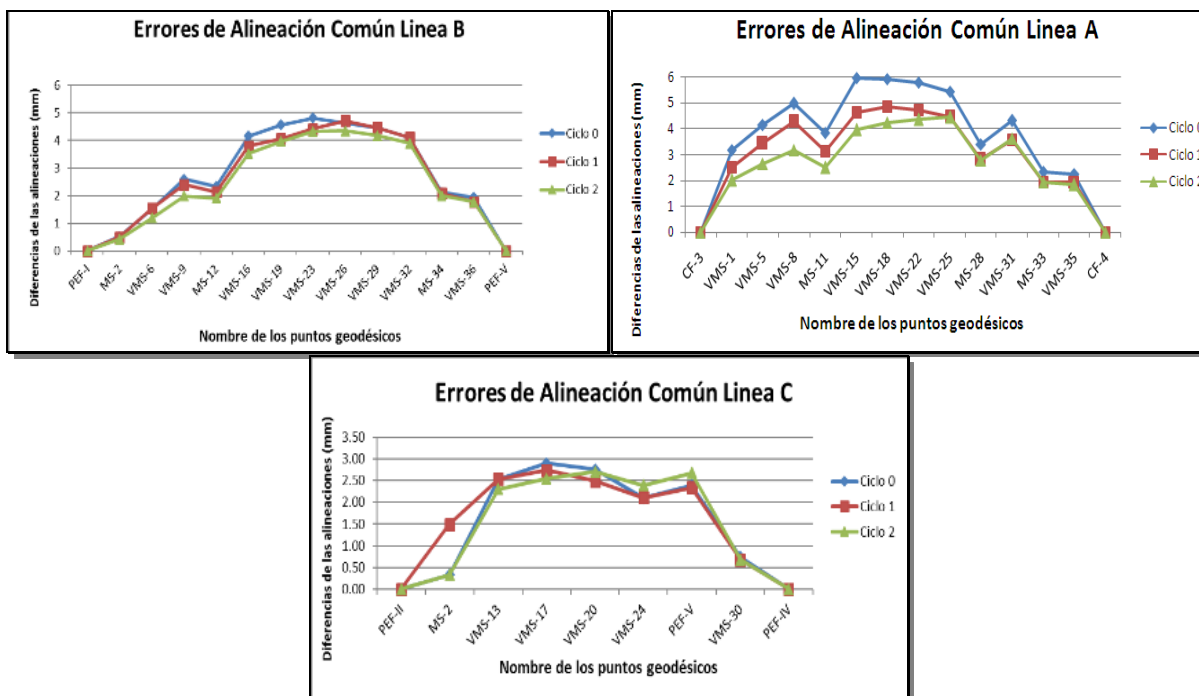
El embalse posee una cortina de núcleo con 2426 m de longitud y altura máxima de 29,0 m, con una Estación de Bombeo ubicada en la cola del embalse con un volumen muerto para esta actividad de 25 hm<sup>3</sup>.



**Figura 1. Imagen aérea tomada de Google Earth del embalse Palmarito**

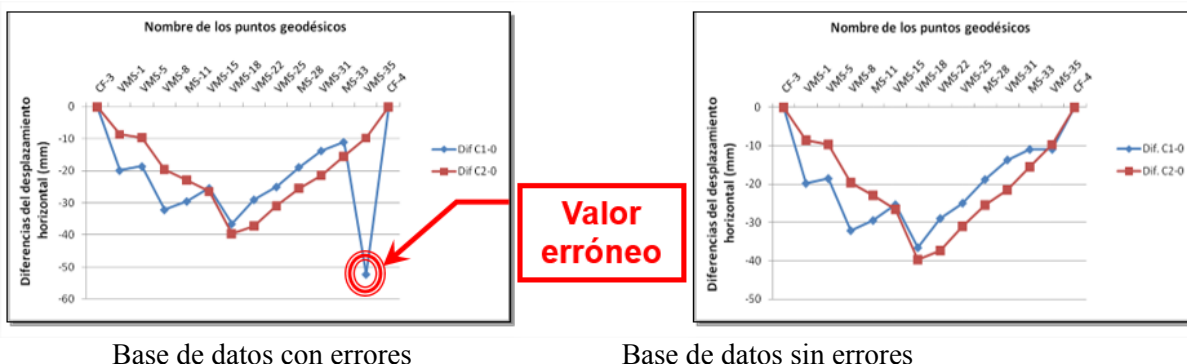
Inicialmente se representaron las desalineaciones medidas en la cortina del embalse para los tres primeros ciclos en los cuales se esperaba visualizar las mayores deformaciones registradas del embalse desde su puesta en explotación.

Al realizar una valoración del comportamiento de cada una de las marcas según sea la línea de control geodésico representada se evidencian valores diferenciales de desplazamientos horizontales en las marcas MS-11, MS-28, MS-12y MS-2 (ver figura 2) registrados desde la terminación de la cortina en el Primer Ciclo de medición geodésica (Ciclo 0).



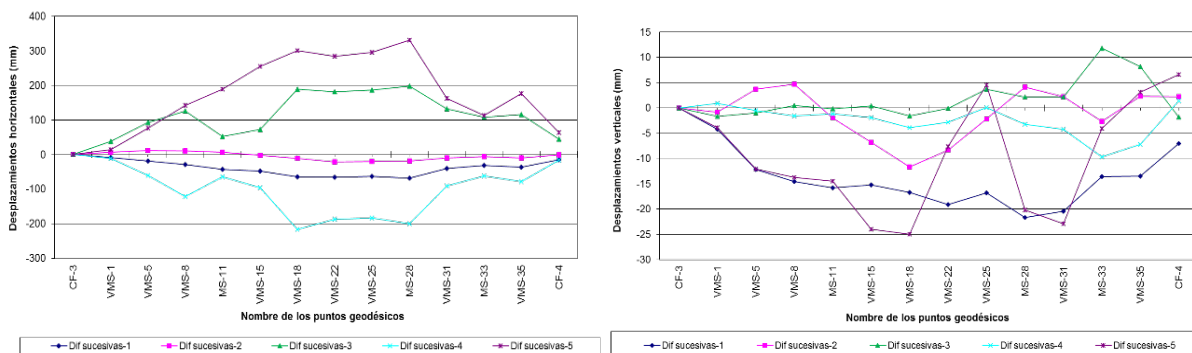
**Figura 2. Errores de alineación en la línea geodésica A, B y C en la cortina del embalse Palmarito**

Para verificar la integridad de la base de datos, se calcula una diferencia sucesiva para los tres primeros ciclos de los desplazamientos horizontales a modo de control primario (ver figura 3) de la cual se identifican valores incoherentes a las precisiones técnicas vigentes para los trabajos realizados por lo que se aplica un proceso de interpolación del dato a partir del error estimado de cada punto de la línea geodésica como un índice de peso con la condición de ser igual o menor que el valor máximo admisible calculado en el cierre de las mediciones de la línea.



**Figura 3. Diferencias sucesivas de las desalineaciones de los Ciclos 0, 1 y 2 de la Línea A**

Al identificar un error contenido en la base de datos se consideró extender el mismo principio al resto de la base de datos, pero en esta variante con una diferencia sucesiva según se representa en la figura 4. Al realizar un análisis de los desplazamientos horizontales se verifica que no existen otros errores dispersos en el interior de la base de datos. En el caso de los desplazamientos verticales también se confirma la hipótesis anterior además de identificar que las marcas próximas al final de la línea geodésica poseen una mayor dispersión después del cruce del eje del río hacia la Cota Fija número cuatro (CF-4).

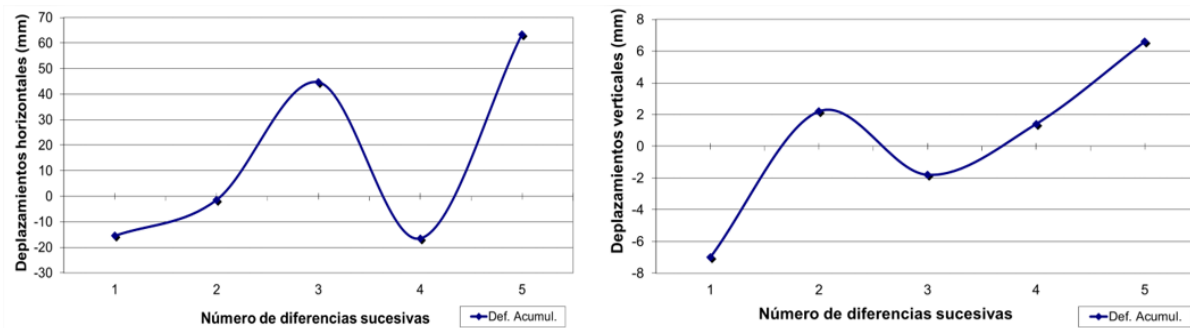


**Figura 4. Diferencias sucesivas de las desalineaciones para todos los Ciclos de la Línea A**

Además, se obtiene como resultado del proceso de cálculo un valor residual al final de cada modelo diferencial que hipotéticamente debería poseer una tendencia a cero, por lo que el supuesto implica valores mínimos de los desplazamientos verticales y horizontales para un medio continuo; no siendo así en los extremos próximos a la CF-4 en los que se manifiesta un aumento residual progresivo del comportamiento de las deformaciones en sus componentes principales (ver figura 5).

Al realizar una comparación del Comportamiento de Índice de Deformación Histórica Acumulada (IDHA) con los valores límites admisibles del proyecto ejecutivo de la obra (400

mm) se afirma que no existe peligro de que algún comportamiento de los desplazamientos diferenciales, por cada uno de los principales componentes (horizontal y vertical) en la cortina del embalse, implique la falla de la obra.



**Figura 5. Índice de deformación histórica acumulada de la Línea A en la cortina del embalse**

### **Análisis de de los datos de deformación y su correlación con los niveles de agua**

La ocurrencia de estos procesos de dispersión en la base de datos generalmente son asociados con eventos extremos y para caracterizar su correlación, se hacen necesarias bases de datos que permitan una identificación confiable de este fenómeno, a partir de confeccionar un registro estadístico descriptivo en el que se involucren todas las variables que intervienen en este problema, y que sus resultados posibiliten estimar la influencia que pudiera tener la deformación geodésica ocurrida en un punto medido en sus componentes vertical y horizontal, respecto a otro cualquiera en una misma sección de análisis o línea geodésica de control.

Esto permite dar una idea de cómo pueden comportarse los desplazamientos en una sección transversal cualquiera del terraplén de la cortina de presa, e inclusive predecir de forma confiable el comportamiento de los desplazamientos futuros en correspondencia con su respuesta tenso-deformacional de la estructura por medio de una modelación físico-numérica.

Al realizar un análisis estadístico clásico para describir la relación de los valores promedios y su desviación estándar histórica de las marcas superficiales correspondientes con la sección central de la cortina se alcanzaron los resultados mostrados en la tabla 2.

En el conjunto de tablas se puede apreciar el grado de correlación de los desplazamientos por las componentes principales (verticales y horizontales) respecto a las fluctuaciones del nivel de agua registrado en el embalse, basado en el método de correlación parcial por el método de correlación bivariada definidas en el cálculo de los coeficientes de Pearson y Kendall'stau<sub>b</sub> (Chrzanowski et al. 1985); teniendo como condición que para cada por ciento del coeficiente de correlación, tiene que existir un valor significativo menor que 0,01, de lo contrario no existe correlación entre las deformaciones que se analizan.

Partiendo de la condición anterior, se pudo realizar una caracterización correlativa del proceso tenso-deformacional que ocurre en la sección objeto de análisis con una dependencia no lineal entre los valores registrados en las principales componentes (horizontales y verticales) de las marcas superficiales.

**Tabla 2. Caracterización estadística de las marcas superficiales en la sección central**  
**Estadística descriptiva**

| Nombre   | Promedio   | Desviación Estándar | No. Casos |
|----------|------------|---------------------|-----------|
| VMS_25Hz | -0,085357  | 0,2353575           | 149       |
| VMS_26Hz | 0,032185   | 0,1883040           | 149       |
| VMS_24Hz | 0,032185   | 0,1883040           | 149       |
| NA       | 105,500940 | 3,1988043           | 149       |

**Correlación**

| Variables de control |          |                        | VMS_25 Hz | VMS_26 Hz | VMS_24 Hz |
|----------------------|----------|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| NA                   | VMS_25Hz | Correlación            | 1,000     | 0,841     | 0,841     |
|                      |          | Significancia (2-cola) |           | 0,000     | 0,000     |
|                      |          | df                     | 0         | 146       | 146       |
|                      | VMS_26Hz | Correlación            |           | 1,000     | 1,000     |
|                      |          | Significancia (2-cola) |           |           | 0,000     |
|                      |          | df                     |           | 0         | 146       |
|                      | VMS_24Hz | Correlación            |           |           | 1,000     |
|                      |          | Significancia (2-cola) |           |           |           |
|                      |          | df                     |           |           | 0         |

**Estadística descriptiva**

| Nombre  | Promedio   | Desviación Estándar | No. Casos |
|---------|------------|---------------------|-----------|
| VMS_25V | -0,005739  | 0,0225018           | 149       |
| VMS_26V | 0,016012   | 0,0206515           | 149       |
| VMS_24V | 0,016012   | 0,0206515           | 149       |
| NA      | 105,500940 | 3,1988043           | 149       |

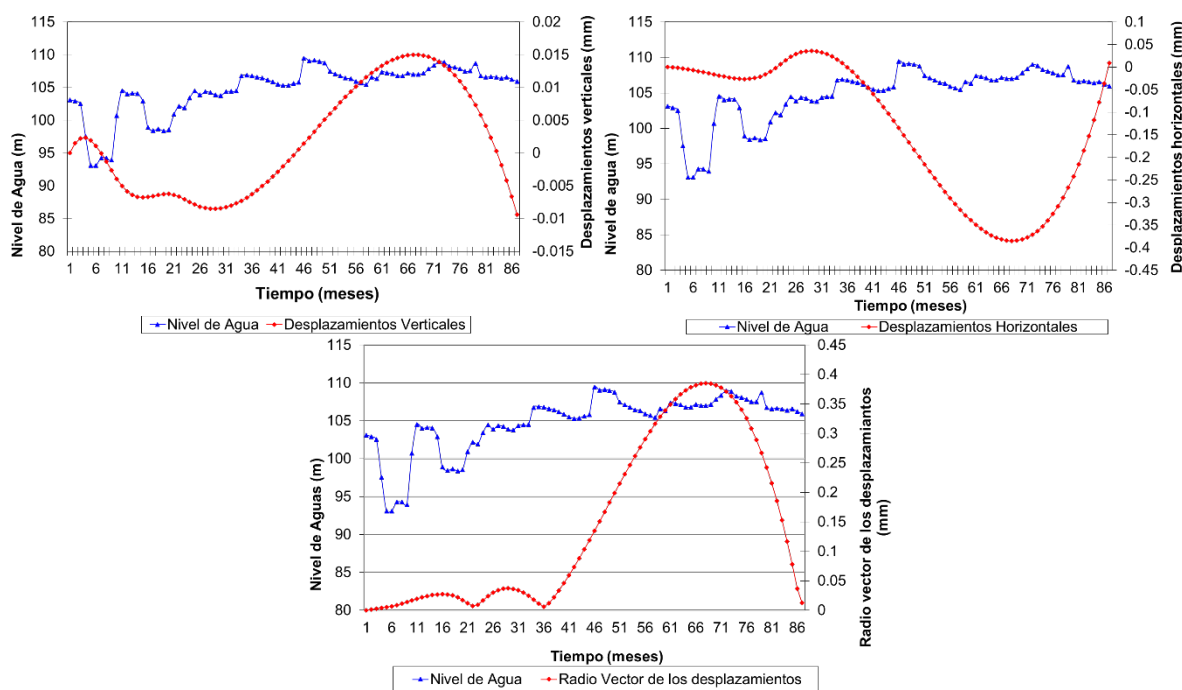
**Correlación**

| Variables de control |         |                        | VMS_25 V | VMS_26 V | VMS_24 V |
|----------------------|---------|------------------------|----------|----------|----------|
| NA                   | VMS_25V | Correlación            | 1,000    | 0,335    | 0,335    |
|                      |         | Significancia (2-cola) |          | 0,000    | 0,000    |
|                      |         | df                     | 0        | 146      | 146      |
|                      | VMS_26V | Correlación            |          | 1,000    | 1,000    |
|                      |         | Significancia (2-cola) |          |          | 0,000    |
|                      |         | df                     |          | 0        | 146      |
|                      | VMS_24V | Correlación            |          |          | 1,000    |
|                      |         | Significancia (2-cola) |          |          |          |
|                      |         | df                     |          |          | 0        |

Es de notar que al aplicar ambos métodos o técnicas correlativas se alcanzaron porcentajes elevados del coeficiente de correlación entre las deformaciones existentes en cada uno de los puntos de análisis, cumpliéndose la condición antes mencionada, por cuanto quedó demostrado la influencia no lineal que tiene un proceso de deformación que ocurre en un punto en sus componentes principales, sobre otro que se encuentra cercano a éste y no se comporta de forma lineal ni simétrica sino que es una función compleja que depende de las propiedades físico-mecánicas del material y del régimen de cargas y descargas al cual está sometida la estructura.

Además, solo en muy pocos casos se aprecia la no ocurrencia de este fenómeno, a pesar de que los datos muestran una relativa independencia entre los valores de las marcas superficiales relativas a todas las secciones del embalse, lo cual sugiere una falsa concepción para especialistas no versados en la materia, en el caso de apreciar asentamientos diferenciales aislados o múltiples a lo largo de una sección transversal o longitudinal de la cortina del embalse.

Al representar los desplazamientos horizontales y verticales (valores  $+$ ) para desplazamientos aguas abajo y elevación de la superficie y  $-$  para desplazamientos aguas arriba y hundimientos en la superficie) contrastados con los niveles de agua registrados en el embalse (ver figura 6), se identificó un valor máximo de los niveles de agua correspondiente con un evento meteorológico extremo que afectó parcialmente la cortina del embalse.



**Figura 6. Desplazamientos horizontales, verticales y radio vector vs nivel de agua del embalse**

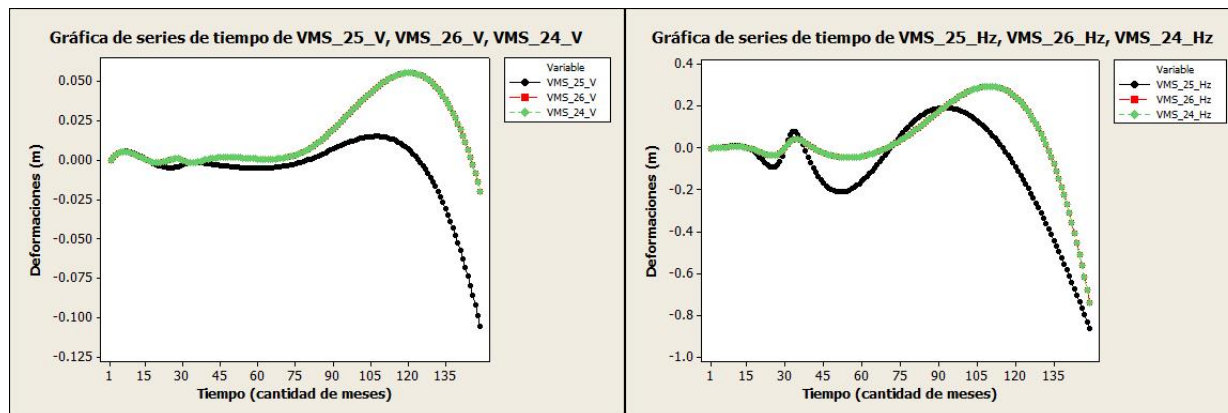
Esta situación se refleja posteriormente en el comportamiento tenso-deformacional de la estructura al ser registrados los valores de máximo y mínimo en los desplazamientos de la cortina de la presa de tierra.

## VISUALIZACIÓN ESPACIO-TEMPORAL Y ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL TIEMPO

### Representación de los desplazamientos en el cubo espacio-temporal

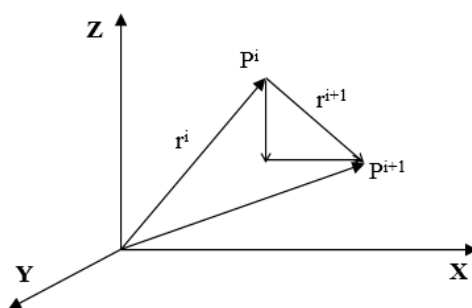
El proceso de representación gráfica de las deformaciones geodésicas generalmente se realiza acorde con la figura 7, en la que se puede identificar el comportamiento similar para la marca de la corona (VMS\_25) que es donde se espera que sean identificadas las máximas deformaciones para con el resto de la línea geodésica.

La identificación visual de posibles patrones de tendencia a valores máximos se hace compleja, al trazar una línea imaginaria de máxima o mínima correspondiente a los desplazamientos registrados en el tiempo cuando la tendencia de las curvas no es asintótica a un valor determinado. Acorde con los métodos tradicionales que en su forma genérica son empleados en los informes actuales, que contienen estudios de deformaciones en el campo de la geodesia y de la ingeniería hidráulica al referirse a los registros del control de las deformaciones en presas de tierra, se simplifica la respuesta del comportamiento en una gráfica bidimensional.



**Figura 7. Desplazamientos de la sección principal en sus componentes vertical y horizontal**

Basado en los aportes realizados por Kraak et al. (2008) al representar los cambios espaciales con una relación tiempo dependiente directa en una función que registra gráficamente el progreso del fenómeno, se aplicó en la presente investigación al considerar las componentes verticales y horizontales de las mediciones como un radio vector (ver figura 8 y la ecuación 1) que interactúa con el factor tiempo acorde con el progreso histórico de las deformaciones (ver figura 9).



**Figura 8. Representación espacial del radio vector [fuente: Olivera (1996)]**

$$r^{i+1} = \sqrt{[X(t_{i+1}) - X(t_0)]^2 + [Y(t_{i+1}) - Y(t_0)]^2 + [Z(t_{i+1}) - Z(t_0)]^2} \quad (1)$$

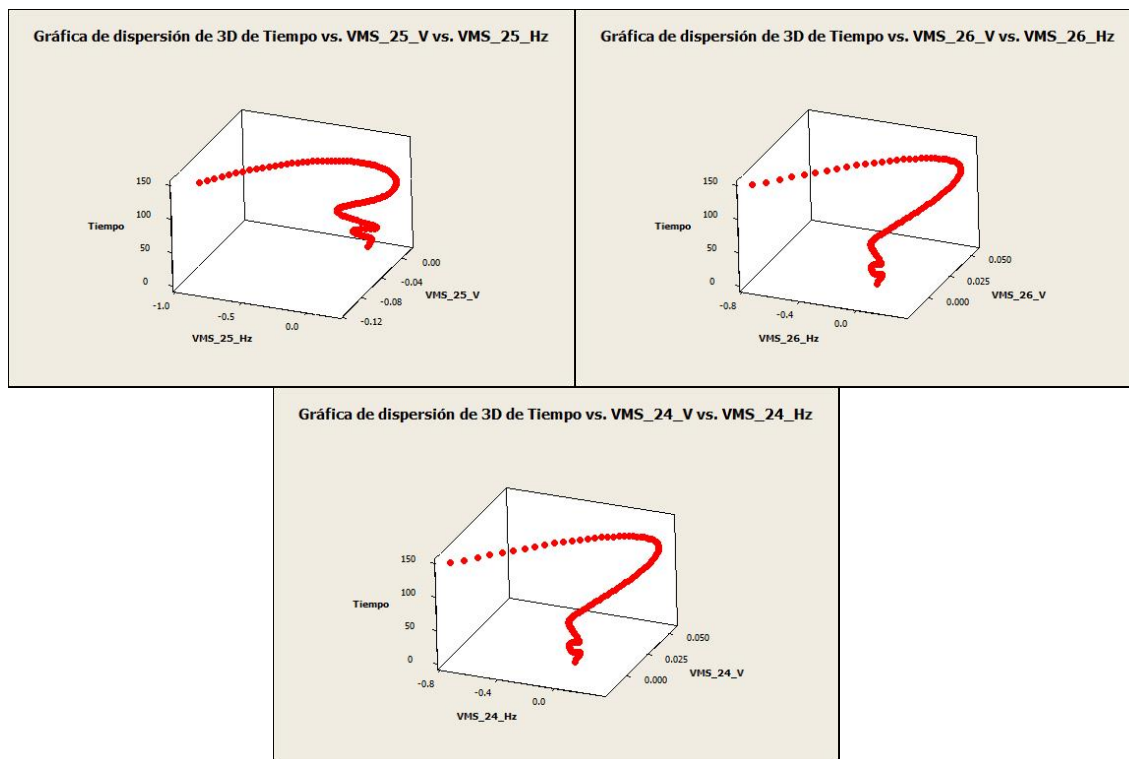
donde:

$r^{i+1}$  → vector deformación en el ciclo o tiempo en  $i+1$ .

$t_{i+1}$  → tiempo en  $i+1$ .

$t_0$  → ciclo o tiempo inicial o cero.

$X, Y, Z$  → componentes espaciales de las coordenadas.



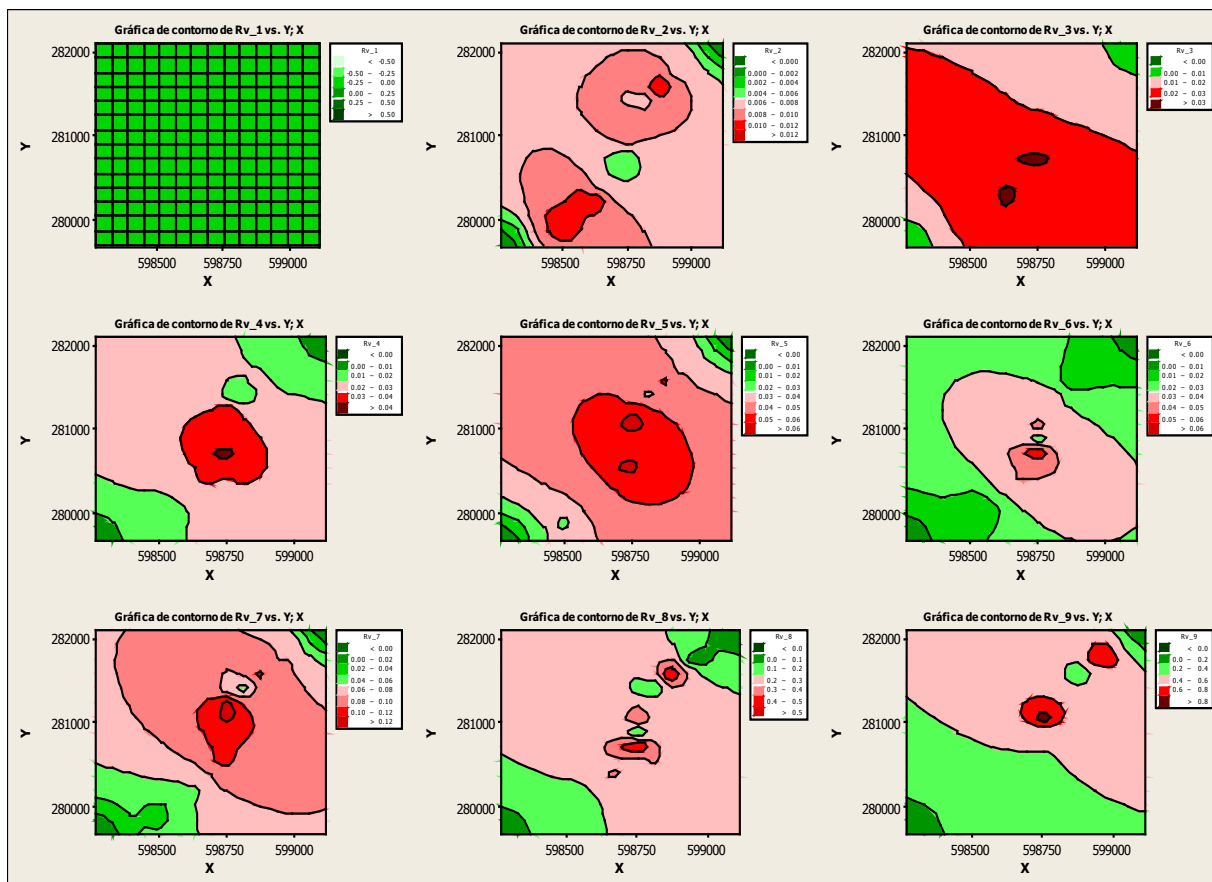
**Figura 9. Representación de los desplazamientos en el cubo espacio-temporal**

Al utilizar esta técnica de visualización se logran identificar en su totalidad las variaciones en el espacio que fueron registradas en el embalse acorde con el sistema de referencia establecido en el embalse para el monitoreo de las marcas superficiales. Además, se logran definir visualmente los períodos de evaluación de las deformaciones propuestos por Herndon (1990) como resultado de su investigación en el campo del análisis de las deformaciones en estructuras de suelo.

### **Análisis geoestadístico de los desplazamientos**

Conocer cuánto influye el desplazamiento registrado en una marca superficial respecto a la más cercana, fue logrado al visualizar en el cubo espacio-temporal el progreso de los desplazamientos en el tiempo. Con esta técnica se logró identificar que los valores de progresión históricos registrados responden a una función no lineal relacionada con su posición cartográfica en la cortina del embalse y la época en la que fue registrado cada uno de los datos.

Para corroborar los criterios previamente comentados, se creó un gráfico estadístico de interpolación con la superficie de respuesta resultante del radio vector de los desplazamientos, donde se manifiestan las variaciones espaciales en el tiempo de cada uno de los datos históricos (ver figura 10).



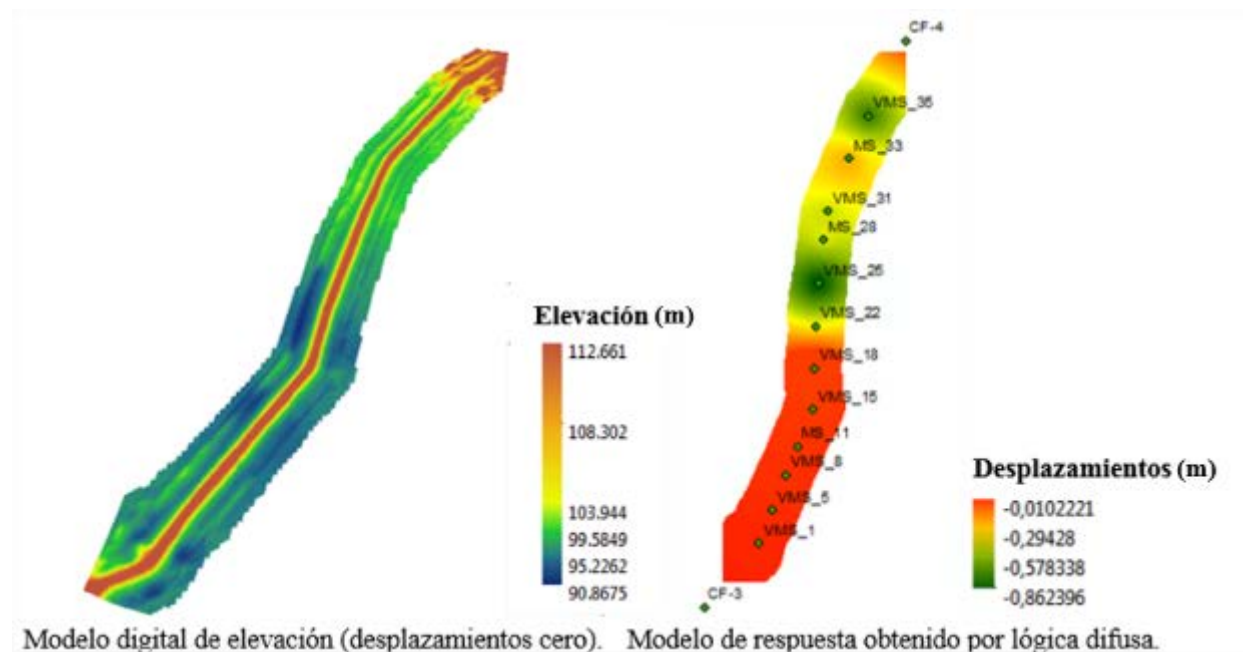
**Figura 10. Superficie respuesta de las variaciones espacio-temporales de los desplazamientos**

Al realizar una detallada revisión del gráfico anterior, se pudo establecer cronológicamente cuándo fueron registrados los mayores desplazamientos en la cortina del embalse y la influencia espacio-temporal entre cada una de las marcas geodésicas a partir de los gráficos resultantes en la sucesión de cada uno de los eventos contenidos en la base de datos histórica de las mediciones geodésicas y de los niveles de agua.

Fueron registrados los mayores valores de desplazamientos de color rojo y los menos significativos de color verde. Bajo este criterio fue identificado en el Ciclo 2, el momento histórico dónde se registran los eventos de mayores desplazamientos en la estructura a 333 días de haber sido concluida la obra y puesta en explotación en su nivel de aguas normales según el proyecto de diseño de la obra.

Para poder identificar la zona de mayor deformación en la que se han registrado los mayores desplazamientos en la cortina de tierra se creó inicialmente un modelo digital de elevación en el cual se incluyó la posición de cada uno de los monumentos geodésicos de la corona (ver figura 11).

Luego se realizó una interpolación por cada ciclo de medición geodésico registrado en el que se logró una superficie de respuesta espacial similar a la obtenida en la figura 10.



**Figura 11. Superficie de respuesta de las variaciones espacio-temporales de los desplazamientos**

Una vez concluida la obtención de las diferentes superficies de respuesta en el tiempo se realiza una superposición de cada uno de los modelos utilizando los principios de la lógica difusa para identificar las zonas donde se concentran las deformaciones en la estructura, concentrándose estas, después del cruce con el eje del río rumbo hacia el aliviadero del embalse, con valores discretos en la sección central representada para el VMS\_25 ubicado en el antiguo eje del río represado.

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS

La aplicación de las técnicas de visualización científica vinculadas al pre-procesamiento de datos hizo posible identificar valores anómalos contenidos en las bases de datos que por medio de los métodos tradicionales no son detectados.

Además, al ser representada la base de datos histórica de las deformaciones en contraste con los niveles de agua, se logra establecer con certeza el momento o evento extremo por las correlaciones estadísticas y visuales en el gráfico momento de tiempo más el retardo que corresponde con los valores extremos de deformación en la cortina del embalse.

Con la utilización del cubo espacio-tiempo se demuestra la complejidad de la función de deformación y su progresión en el tiempo como una herramienta para poder identificar patrones tendenciales en el tiempo como una respuesta propia de los materiales de la estructura a las cargas que está sometida constantemente.

Al conocer la posición espacial de cada una de las marcas geodésicas en el cuerpo de la cortina del embalse y los datos históricos de sus desplazamientos, se logran establecer, con las

herramientas de la lógica difusa, las zonas donde se han registrados los mayores registros de desplazamientos. A pesar de que numéricamente estos valores son mínimos y no representan amenaza significativa alguna según los datos de asentamientos máximos admisibles contenidos en el proyecto de la obra. Por lo que los mayores valores de peligro son asociados con las zonas de donde fueron registrados los valores máximos de desplazamientos.

## CONCLUSIONES

Luego de haber fundamentado la propuesta de interpretación de las bases de datos históricas de las deformaciones geodésicas en la cortina del embalse Palmarito con la utilización de las herramientas matemático-estadísticas vinculadas con la visualización científica que permitan representar el comportamiento histórico de las deformaciones en función de posibles zonas de AVR a lo largo de toda la estructura de tierra se proponen como conclusiones los siguientes señalamientos:

- La utilización de filtros de datos para la detección de valores de errores, combinados con la interpolación numérica de datos anómalos desde el error probable asociado con la medición, permite obtener una magnitud lógicamente aceptable que cumple con las condiciones técnicas requeridas por la geodesia según los errores calculados en las mediciones realizadas.
- La creación de gráficos de doble entrada para establecer la correlación entre los niveles de agua y los desplazamientos registrados en la cortina del embalse permiten visualizar el proceso de progresión y reducción de los desplazamientos en el tiempo, así como el momento exacto con su respectivo retardo en el que ocurren estos fenómenos
- La visualización en el cubo espacio-temporal del comportamiento de las deformaciones permite reconocer patrones tendenciales en una función compleja, además de poder definir tres de los cuatro momentos o estadios de consolidación de la estructura.
- La geoestadística vinculada con la representación espacial de datos con técnicas de la lógica difusa hace posible visualizar las zonas de mayores vulnerabilidades acorde con los desplazamientos registrados históricamente en la cortina del embalse.

## REFERENCIAS

- Blok C. A.** (2005). "Dynamic visualization variables in animation to support monitoring of spatial phenomena", Conference at Utrecht University. Proceedings 22<sup>nd</sup> International Cartographic Conference, ISSN: 0169-4839, A Coruña, España. Extraído de: <https://space.library.uu.nl/handle/1874/2895> en marzo 2015.
- Craig J.** (1995). "Instrument of embankment dams and levees engineering and design" Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, CECW-EG Engineer Manual 1110-2-1908, Washington, DC, USA.

**Craig R.** (1997). “Soil Mechanics”, Department of Civil Engineering, University of Dundee, Sixth ed. E & FN SPON, ISBN: 0-203-49410-5. New York, USA, extraído de: [www4.hcmut.edu.vn/~cnan/ Soilmech/SOIL%20CRAIG.PDF](http://www4.hcmut.edu.vn/~cnan/Soilmech/SOIL%20CRAIG.PDF) en marzo 2016.

**Chrzanowski A., Chen Y., Secord J. and Romero P.** (1985). “Integration of geodetic and geotechnical deformation surveys in the geosciences”. Tectonophysics, ISSN: 0040-1951, vol. 130, pp. 369-383, Heidelberglaan 2, 3584 CS Utrecht, The Netherlands.

**Chrzanowski A., Chen Y., Romero P. y Secord J.** (1986). “Integration of geodetic and geotechnical deformation survey in the geosciences”. Tectonophysics, Elsevier. ISSN: 0040-1951, vol. 130, extraído de: <http://www.cucuc.com> en febrero 2014, Heidelberglaan 2, 3584 CS, Utrecht, The Netherlands.

**Herndon R.** (1990). “Engineering and design settlement analysis engineer manual”. Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, DC 20314-1000. Engineer Manual. No. 1110-1-1904. 30 September 1990, Washington, DC, USA.

**Kraak M. J., Dodge M., McDerby M., Turner M., Goodchild M., Roberts J., Harrower, M., Fabrikant, S., Barford, A., Dorling, D., Cartwright, W., Orford, S., Shepherd, I., Southall, H., Deitrick, S., Edsall, R.** (2008). “Geographic visualization concepts, tools and applications”. The University of Manchester, Ed. JohnWiley & Sons Ltd. ISBN: 978-0-470-51511-2, The Atrium, Southern Gate, Chichester, England.

**Olivera R.** (1996). “Investigación de los índices característicos de las deformaciones de las cortinas de las presas a partir de métodos geodésicos”. Tesis de doctorado, Instituto Técnico Militar José Martí, La Habana, Cuba.

**Peuquet D.** (2002). “Representations of space and time”, Ed. the Guilford press, ISBN: 9781572307735, New York, USA.

**Stojanovic R., Conti G. and Amicis R. D.** (2008). “Geospatial visual analytics geographical information processing and visual analytics for environmental security”. Springer in cooperation with NATO, Public Diplomacy Division, Dordrecht, DOI: 10.1186/1476-072X-10-19, The Netherlands, extraído de: <https://books.google.com/books?isbn=1443861928> en marzo 2016.

**Szostak-Chrnowski A., Chrzanowski A. and Massiera M.** (2003). “Use of geodetic monitoring measurements in solving geomechanical problem in structural and mining engineering proceedings”, 11<sup>th</sup> FIG Symposium on Deformation Measurements. Canadian Centre for Geodetic Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, N.B., E3B 5A3, Canada, Faculté d’ Ingénierie (Génie Civil), Université de Moncton, Moncton, E1A 3E9, Santorini, Greece.