

VENTAJAS DE LA INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL CON RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (DINSAR) PARA MEDICIONES TOPOGRÁFICAS EN EL TERRITORIO NACIONAL

Autores: Ernesto Romero Carmenate⁶⁷, Dariel Soto Portillo⁶⁸, Odalys de la Caridad Cabrera de Armas⁶⁹, Shakira Romero Cabrera⁷⁰

RESUMEN

Los asentamientos son fenómenos que afectan a las estructuras y causan múltiples daños que pueden ocasionar pérdidas cuantiosas. La forma de prevenirlos es cuantificarlos periódicamente para conocer su magnitud. En Cuba las mediciones son realizadas por topógrafos empleando equipos tradicionales, dígame niveles ópticos o estaciones totales, sin embargo, en la esfera internacional ganan cada día mayor éxito tecnologías alternativas por la simplicidad que de las operaciones a desarrollar para obtener los datos necesarios. Desde la década pasada se han monitoreado asentamientos en múltiples partes del mundo utilizando una técnica de medida de desplazamientos en la superficie del terreno, a partir de imágenes adquiridas desde satélite por sensores activos en la región de las microondas, denominada DInSAR (Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética), y se fundamenta en la detección de pequeñas variaciones de altitud a partir del cálculo de la diferencia de fase de pares de imágenes radar sobre un mismo área de estudio. En este trabajo se demuestran las ventajas de la Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética (DInSAR) para mediciones topográficas en el territorio nacional.

Palabras Clave: asentamientos, topógrafos, mediciones, DInSAR.

SUMMARY

Settlements are phenomena that affect structures and cause multiple damages that can cause large losses. The way to prevent them is to quantify them periodically to know their magnitude. In Cuba, measurements are made by surveyors using traditional equipment, say optical levels or total stations, however, in the international sphere, alternative technologies

⁶⁷ Profesor del Departamento Construcciones, Facultad Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas.
ernesto.romero@umcc.cu

⁶⁸ Profesor del Departamento Construcciones, Facultad Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas. Facultad Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas. Cuba. Correo: dariel.soto@umcc.cu

⁶⁹ Profesor del Departamento Construcciones, Facultad Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas.
odalis.cabrera@umcc.cu

⁷⁰ Estudiante de Ingeniería Civil, Facultad Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas.
shakiraromero2302@gmail.com

are gaining more success every day due to the simplicity of the operations to be carried out to obtain the necessary data. Since the past decade, settlements have been monitored in multiple parts of the world using a technique for measuring displacements on the ground surface, from images acquired from satellite by active sensors in the microwave region, called DInSAR (Differential Interferometry with Radar of Synthetic Aperture), and is based on the detection of small variations in altitude from the calculation of the phase difference of pairs of radar images on the same study area. This work demonstrates the advantages of Differential Interferometry with Synthetic Aperture Radar (DInSAR) for topographic measurements in the national territory.

Keywords: settlements, surveyors, measurements, DInSAR.

RÉSUMÉ

Les tassements sont des phénomènes qui affectent les structures et causent de multiples dommages pouvant entraîner des pertes importantes. Le moyen de les prévenir est de les quantifier périodiquement pour connaître leur ampleur. À Cuba, les mesures sont effectuées par des géomètres utilisant des équipements traditionnels, disons des niveaux optiques ou des stations totales, cependant, dans la sphère internationale, les technologies alternatives gagnent chaque jour plus de succès en raison de la simplicité des opérations à effectuer pour obtenir les données nécessaires. Depuis la dernière décennie, les établissements ont été surveillés dans plusieurs régions du monde à l'aide d'une technique de mesure des déplacements à la surface du sol, à partir d'images acquises à partir du satellite par des capteurs actifs dans la région des micro-ondes, appelée DInSAR (Differential Interferometry with Radar of Synthetic Aperture), et repose sur la détection de petites variations d'altitude à partir du calcul de la différence de phase de paires d'images radar sur la même zone d'étude. Ce travail démontre les avantages de l'interférométrie différentielle avec radar à synthèse d'ouverture (DInSAR) pour les mesures topographiques sur le territoire national.

Mots clés: établissements, géomètres, mesures, DInSAR.

INTRODUCCIÓN

La superficie de la Tierra presenta todo tipo de formas y todas ellas deben trasladarse adecuadamente a un formato, por ejemplo, un plano o un mapa. En la actualidad la topografía se sirve de avanzados instrumentos tecnológicos para medir los distintos parámetros de un terreno, tales como escáneres digitales 3D o la tecnología GPS. Con estas

herramientas los topógrafos obtienen datos sobre las características del suelo. Sin estos datos, las casas y los puentes no podrían mantenerse en pie y la vida urbana tal y como la conocemos no sería posible.

Uno de los fenómenos a los que esta ciencia da constante seguimiento son las deformaciones que suceden en el tiempo en el plano vertical que según su sentido puede ser hacia arriba o hacia abajo, de ahí que se defina como un vector con dirección y sentido, expresado en un valor numérico antecedido por un signo negativo (-) si el asentamiento es hacia abajo o positivo (+) si es hacia arriba (levantamiento).

La medición de los asentamientos está siendo en las últimas décadas sumamente estudiado, pues pueden causar daños y perjuicios severos a las obras o lesiones a las personas y en el peor de los casos las pérdidas de vidas humanas a causa de derrumbes. Estas deformaciones son atribuibles a varias causas, como un estudio deficiente de las características ingeniero geológico del terreno, las soluciones constructivas incorrectas, así como poco dominio de los efectos sobre el área de eventos naturales como ciclones y sismos.

En todos los casos la supervisión continua o espaciada del comportamiento de la estructura, permite detectar los desplazamientos, que pueden ser utilizados en la verificación de las hipótesis y teorías de la construcción relacionadas con la mecánica de los suelos y en la seguridad operacional de la obra. Por lo que, las observaciones y registro de las deformaciones no solo presentan interés científico para el diseño geotécnico, sino también son indicadores del comportamiento a largo plazo de las construcciones (Acosta, 2011).

Para la medición de estos movimientos los topógrafos cubanos se auxilian de niveles ópticos y estaciones totales. Los primeros son fáciles de utilizar, con su empleo se puede alcanzar gran precisión, automatización en la captura de datos, rapidez, manejo de la información en formatos digitales y la obtención del producto final: el plano topográfico con características impecables impensables en los levantamientos que se realizaban hace 20 años. Pero demandan de una red de monumentos de referencia Plano-Altimétricos para comenzar las mediciones, que significa trabajos previos algo engorrosos. Asimismo, es un trabajo que se realiza directamente sobre el terreno y el relieve puede complejizar las tareas. Con las estaciones totales ocurren errores instrumentales por desajuste en el limbo vertical; es difícil establecer una línea de referencia fija situada fuera de la influencia de los movimientos a la que puedan referirse todos los puntos controlados cuando el área de estudio es muy limitada.

Existen otras técnicas que pueden ser más eficiente, pero son menos estudiadas en nuestro país, tal es el caso de la Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética (DInSAR). Es por ello que el presente trabajo plantea como objetivo demostrar las ventajas de la Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética (DInSAR) para mediciones topográficas.

DESARROLLO

La historia del primer satélite espacial artificial girando a cientos de kilómetros de la superficie terrestre nació en pleno periodo de Guerra Fría, en los países donde la ciencia y la tecnología fueron cruciales para sostenerse en pie de guerra, y aunque en un principio lo único que justificaba la invención de estos artefactos era evidenciar una superioridad armamentística, es imposible negar que la humanidad entera se vio beneficiada con estas creaciones, las cuales no solo significaron un gran avance tecnológico en la historia humana, sino también la conquista de un lugar en el espacio exterior sin precedentes. Gran parte de esta maquinaria fue desarrollada en una frenética competencia bajo el alero de las llamadas Inteligencias de Combate, el cual dio inicio al mundo de los Sensores Remotos. (Hermosilla Días, 2016)

Por definición, se puede decir que los Sensores Remotos encierran un conjunto de técnicas, que elaboradas por los científicos y llevadas a cabo por instrumentos, son utilizadas para la adquisición de datos e informaciones del mundo físico a partir de la detección y medición de señales en forma de radiación, partículas y campos emanados de objetos localizados en el rango de visión de un sensor (Short, 2009)

Estos sensores se pueden dividir en dos clases: pasivos y activos. Los primeros son aquellos que reciben su energía irradiada proveniente de una fuente externa, como el Sol, mientras que los activos son aquellos que son capaces de generar su propia energía irradiándola hacia el exterior, captando y midiendo posteriormente una fracción de esta señal; capacidad que les permite trabajar aun en la oscuridad de la noche. Estos últimos pertenecen a la familia de los sensores Radar (Radio Detection and Ranging), desarrollada a tal grado en las últimas tres décadas, que se desprendió toda una nueva línea de Radares, conocida bajo el nombre de “Radares de Apertura Sintética” (SAR - Synthetic Aperture Radar), la cual, gracias a su configuración particular, permite la creación de imágenes tridimensionales que detallan la superficie terrestre con un alto nivel de resolución, prescindiendo de antenas de gran tamaño. Esta tecnología también se destaca por la gran capacidad que posee para

atravesar nubes y toda clase de condiciones meteorológicas, haciéndola inmune a las lluvias, nevadas, cenizas y vientos, al trabajar con radiaciones pertenecientes al espectro electromagnético de las microondas. (Hermosilla Días, 2016)

Actualmente, la interferometría SAR es una de las aplicaciones de las imágenes radar que presenta más perspectivas de futuro en cuanto a su aplicación a la extracción de topografía. Por ello, existe en la literatura un gran número de trabajos que describen con detalle y desde el punto de vista teórico cada uno de los procesos necesarios para generar modelos numéricos de elevaciones del terreno con esta técnica. Como trabajos relevantes en este ámbito a nivel institucional podemos citar a (Podest, 2017) (Hermosilla Días, 2016), (Sánchez, Monells, Manso, & Farías, 2016) (Sillerico, Marchamalo, Rejas, & Martínez, 2010).

La exposición de las aplicaciones de la tecnología SAR comenzó sobre plataformas aerotransportadas hace ya varias décadas. Las prestaciones cartográficas han demorado más en desarrollarse, probablemente a causa de los inconvenientes existentes en la orientación y el posicionamiento preciso de los sensores. En el día de hoy coexiste una serie de instrumentos experimentales y más tres sensores de aplicación comercial. La superioridad obvia de los sensores aerotransportados es una resolución superior y una mayor calidad de los datos recopilados. La mayoría suelen ser equipos que funcionan con dos antenas y, por ende, captan la doble imagen a la par.

A partir de interferometría, los datos obtenidos son las distancias entre el satélite y la superficie del terreno, calculados mediante la medición de tiempos y desfases. Así pues, InSAR consiste en medir las diferencias de fase entre el satélite y la tierra en dos pasos del satélite por la misma zona. (Crosetto, 2005)

Estas diferencias de fase están en función de la distancia y pueden ser debidas básicamente a dos motivos: en primer lugar, a la diferencia de posición entre las dos trayectorias del satélite, hecho que permite medir la topografía del terreno; en segundo lugar, a un desplazamiento de la zona observada entre las dos adquisiciones, que puede ser causado por varios fenómenos, como, por ejemplo, un terremoto o el asentamiento del terreno. De esta forma, “la interferometría SAR (InSAR) es una técnica que permite la detección de movimientos y deformaciones de la superficie terrestre”. (Martínez, 2005)

La interferometría SAR diferencial (de siglas D-InSAR), es una variante de la anterior. Se trata de una técnica de proceso de imagen que permite la generación de mapas de des-

plazamiento del terreno y el cálculo de la coherencia relativa, a partir de n pasos del sensor SAR por una misma zona de estudio. (Zhilin, 2004)

El estudio DInSAR suele ser multitemporal, en pocas palabras, se obtienen los pares de imágenes en un lapso de tiempo, con el objetivo de estudiar movimientos durante meses o años. Al día de hoy se emplean distintos métodos para el procesado DInSAR; por ejemplo, la medición de los desplazamientos se efectúa a partir de las áreas distantes del fenómeno (volcán, falla, deslizamiento), áreas que se presumen libres de variaciones y con relieve constante, lo que facilita filtrar determinadas disconformidades “no reales”, originadas por variaciones atmosféricas. Comenzando en de las áreas alejadas se va “integrando” en dirección al centro del área en monitoreo, consiguiendo los desplazamientos totales. Con la técnica de interferometría diferencial DInSAR se consigue suprimir dificultades propias de InSAR a causa de que la deformación se halla mezclada con la señal topográfica, ya que se limpia ésta del interferograma, consiguiéndose el interferograma diferencial SAR.

De los beneficios más trascendentales de la técnica DInSAR y que la concibe técnicamente viable es que, en oposición de las técnicas que estamos acostumbrados a utilizar en Cuba, puede cubrir grandes zonas (hasta 10.000 km^2), proporcionando la recolección y procesamiento de gran cantidad de datos con un bajo coste.

La posibilidad de detectar asentamientos de orden subcentimétrico hace que la técnica sea viable en la monitorización de casi cualquier estructura de tierra que esté sujeta a desplazamientos. No obstante, la técnica se basa en la extracción de la información de un par de imágenes adquiridas en distintos lapsos de tiempo (espacio de tiempo suficiente para notar una deformación del suelo), por lo que puede ocurrir que la frecuencia de muestreo de una auscultación corriente sea superior a la frecuencia de adquisición de imágenes. Además, permite monitorizar obras entre 5 y 15 años después de finalizadas para ver cómo se comportan los asentamientos.

Con el fin de demostrar lo sencillo que es realizar las mediciones a continuación los autores exponen una metodología que compone de continuas operaciones a seguir. Gran parte de la totalidad de las operaciones son del tipo informáticas y por ello es necesario el empleo de un software que se especializa en el trabajo con imágenes satelitales con el nivel de complejidad que involucra. Seguidamente, el esquema de flujo a seguir, que comienza con la adquisición de las imágenes SAR, y concluye con la generación y visualización de un interferograma.

1. Localización del área de estudio:

Para inicial, se localiza el área en estudio dentro del mapa. Este emplazamiento se puede llevar a cabo en la misma plataforma desarrollada por la Agencia Europea Espacial (ESA) bajo el nombre de Sentinel Scientific Data Hub, donde se encuentran gratuitamente disponibles los productos Sentinel-1, Sentinel-2 y Sentinel-3. A la plataforma se accede directamente desde <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>

2. Descarga de par Interferométrico SAR

Para la descarga de imágenes, es preciso registrarse y adquirir un perfil con usuario y contraseña, que es totalmente gratuito. Para localizar las imágenes de trabajo, se requiere ingresar los criterios de búsqueda y delimitar la región de interés. Se encierra la región que rodea al área de estudio, se marca la opción para Sentinel-1 y se define el período de captura e ingestión de imágenes. Se detallan el tipo de producto Single Look Complex, el modo de adquisición Interferometric Wide swath y la polarización deseada (VV o VV+VH).

Automáticamente el buscador extiende todas las imágenes capturadas por el sensor y disponibles en la plataforma bajo las especificaciones ya ingresadas. Para seleccionar un par de imágenes SAR compatibles, se debe tener especial atención tanto en la polarización como en la captura ascendente o descendente de las imágenes. Para la descarga, se debe considerar que cada imagen Sentinel-1 pesa aproximadamente entre 2 a 3 Gb si posee un solo sentido de polarización (VV o HH) y entre 5 a 7 Gb si posee doble polarización (VV+VH o HH+HV).

3. Sentinel-1 Toolbox (S1TBX) y apertura de imágenes SAR

Las operaciones que continúan estarán realizadas en el software Sentinel-1 Toolbox, que se desarrolló y distribuyó por la Agencia Europea Espacial (ESA). Este programa incluye una compilación de herramientas de procesamiento y análisis capaz de tolerar los formatos de misiones SAR de la ESA. Estas misiones incluyen Sentinel-1, ERS-1&2 y ENVISAT. S1TBX admite la realización simultánea de múltiples procesos de forma independiente; incluye herramientas de calibración, filtros de speckle, corrección, ortorectificación, mosaiqueado, polarimetría e interferometría (ESA).

Tras la descarga de las imágenes SAR, éstas se abren directamente desde S1TBX. La visualización de la imagen se obtiene tras desplegar las bandas y seleccionar la de Intensidad (físicamente hablando, componente de Amplitud).

Las imágenes adquiridas en modo IW se componen de 3 escenas o subswath, llamadas IW1 (Interferometric Wide swath 1), IW2 e IW3, que abarcan desde la escena más cercana al sensor hasta la más lejana respectivamente. A su vez, cada subswath se subdivide en franjas llamadas Burst.

4. Corregistro

Este paso es esencial antes de comenzar con el proceso interferométrico. Para comenzar, se asigna una imagen como la principal (master image) y otra como secundaria (slave image), y se selecciona el subswath IW1 para comenzar. Este proceso permite que los píxeles de la imagen secundaria se “remueban” con el fin de se alinien con la imagen maestra. Conceptualmente, este procedimiento asegura que cada punto en tierra se corresponda con la misma coordenada (rango, azimuth) de pixel tanto en la imagen maestra como en la secundaria, representando cada punto de la superficie en el mismo pixel. Para tal efecto es imprescindible contar con un DEM de la zona Modelo Digital de Elevación (SRTM 3sec) y los datos orbitales para cada imagen (estos datos contienen información acerca de la posición y velocidad del satélite durante la adquisición de cada imagen), ambos automáticamente se descargan por el software.

5. Deburst y Merge

La operación Deburst se utiliza para juntar cada franja Burst de cada subswath que ya se corregistró en una sola imagen. La diferencia es clara y permite trabajar el producto de forma más compacta.

Posteriormente la operación Merge se utiliza para ensamblar dos subswaths distintos siempre que éstos se encuentren uno al lado del otro.

6. Subset y fase interferométrica

La función Subset que se incluye en S1TBX resulta de gran utilidad cuando se trata de pequeñas regiones de interés en medio de grandes regiones que se abordan por la imagen SAR. Esta función permite limitar el área de estudio por medio del recorte de la imagen y de paso acortar así los tiempos de procesamiento en las siguientes operaciones.

Una vez que se recorta la imagen SAR, los pasos a seguir son netamente interferométricos. Para comenzar con la generación de la fase interferométrica, ésta se forma mediante la multiplicación cruzada de la imagen maestra con el conjugado complejo de la secundaria. La amplitud de ambas imágenes se multiplicad mientras que la fase queda representada por la diferencia de fase entre las dos imágenes. Este complejo procedimiento matemático se

realiza automáticamente por SITBX mediante la función “Interferogram Formation”, en esta función también se extrae la fase de tierra plana ϕ_{flat} .

7. Remoción de fase topográfica

La fase interferométrica se conforma de cinco distintos componentes, el primero de ellos se removió en el paso anterior y corresponde a la fase que contribuye por la curvatura de la tierra ϕ_{flat} . De esta manera, despreciando la contribución de la fase atmosférica y anulando el ruido (suponiendo la conservación de las propiedades retrodispersoras de la superficie), solo queda remover la fase generada por la topografía del terreno para aislar el movimiento que se induce entre ambas imágenes SAR. Esta fase topográfica puede ser calculada y modelada mediante un Modelo Digital de Elevación (SRTM 3sec), el cual se descarga automáticamente por SITBX. Bajo esta operación, la fase interferométrica queda reducida a la fase inducida por el movimiento del terreno, obteniendo el primer interferograma en el estudio.

8. Filtro de Goldstein

La fase interferométrica que se obtiene del paso anterior continúa visualmente distorsionada. Los principales factores que contribuyen en esta distorsión son provenientes de ruidos termales, cambios temporales, o errores aleatorios en los procesos previos. El algoritmo de filtración que ideó Goldstein y Werner el año 1998, mejora significativamente la visibilidad de los asientos en un interferograma y reduce el ruido que se induce por factores externos decorrelacionados (Goldstein & Werner, 1998). Este filtro alcanza sus mejores resultados al suavizar la fase en regiones con altas correlaciones, mientras que resulta inútil en zonas donde la correlación es nula.

9. Corrección geométrica

Para poder visualizar correctamente el interferograma que se obtiene, éste debe encontrarse debidamente en posición en una localización geográfica única y bien definida en un sistema de coordenadas con un Datum específico, este posicionamiento se llama georreferenciación de la imagen. En este caso, el Datum a utilizar corresponde al WGS84 (World Geodetic System 84), estos parámetros se ajustan nuevamente en el SITBX.

En la nueva imagen que se obtiene ya es posible discriminar la ubicación de lugares cercanos al área de estudio, pero aún no se logra localizar a ciencia cierta la ubicación precisa dentro del mismo interferograma. Para ello resulta ventajoso contar con el software

de visualización gráfica del globo completo provisto de mapas tridimensionales, Google Earth.

10. Visualización en Google Earth

Para montar una imagen externa en Google Earth se requiere una georreferenciación en el sistema de coordenadas Lat/Lon WGS84, el cual también se encuentra disponible en las herramientas de SITBX.

Al observar detenidamente el interferograma que se obtiene mediante el proceso de interferometría diferencial, la escala de Fase desplegada automáticamente al costado izquierdo de Google Earth permite analizar la magnitud del asentamiento.

La secuencia con que se mueven los colores dentro de un interferograma resulta un factor clave al intentar discriminar entre un movimiento ascendente o descendente del terreno en cuestión. Según la regla interpretativa si al observar el valor de la fase se dirige desde los valores positivos hacia los negativos, entonces el orden sugiere un acercamiento de la superficie al sensor, es decir, esta superficie describe un levantamiento; en cambio, si se dirige desde los negativos a los positivos, entonces el orden sugiere un alejamiento relativo de la superficie al sensor, y por lo tanto un movimiento de subsidencia o asentamiento; esto se debe a que la fase interferométrica representa una medida de distancia entre el Sensor que captura la imagen y la superficie observada, la cual puede verse disminuida (se acorta distancia) como amplificada (se incrementa la distancia). Considerando que por cada ciclo que se completa se tiene la mitad de la longitud de onda con que trabaja el satélite radar.

CONCLUSIONES

Las disímiles publicaciones científicas estudiadas y los múltiples usos que se le ha dado a la técnica DInSAR en la esfera internacional demuestran que es factible y confiable para el monitoreo de asentamientos en terrenos o estructuras por su precisión subcentimétrica a causa de sus fundamentos físicos y matemáticos.

Es económicamente accesible al solo necesitar un ordenador con acceso a internet y disminuir los tiempos de cálculo de asentamientos con relación a los métodos tradicionales empleados hoy en día en Cuba.

En la actualidad se dispone de manera gratuita un historial de más de 20 años de capturas de la superficie terrestre obtenidas por sensores SAR de la Agencia Europea Espacial, las cuales están a espera de ser analizadas y por ende calcular asentamientos en terrenos u obras constructivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudo, M., Biescas, E., Monserrat, O., Martínez, J., Crosetto, M., & Herrera, G. (2003). *¿Cómo medir las deformaciones del terreno con teledetección radar?* Barcelona-España: 6ª Semana de Geomática.
- Acosta, L. E. (2011). Monitoreo del nivel de vulnerabilidad geotécnica en estructuras por métodos geodésicos. *VII Congreso Internacional Geomática. Memorias. ISBN 978-959-723-01-7*. La Habana.
- Ahrens, J. P. (1990). *Design and Performance of Reef Breakwaters*. Journal of Coastal Research, SI Vol. 7, pp. 61-75.
- Anantrasirichai, N. B. (2019). A deep learning approach to detecting volcano deformation from satellite imagery using synthetic datasets. *Remote Sens. Environ.* 230, 111179.
- Crosetto, M. C. (2005). Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. *Engineering Geology* 79, 81-91.
- Funning, G. J. (2018). A systematic study of earthquake detectability using Sentinel-1 Interferometric Wide-Swath data. *Geophys. J. Int.* 216, 332–349.
- Goldstein, R., & Werner, C. (1998). *Radar interferogram filtering for geophysical applications*. California: California Institute of Technology.
- Hermosilla, D. (2016). *Interferometría a Radar de Apertura Sintética (INSAR) aplicada al estudio del movimiento de ladera aledaña al Volcan Calbuco con ayuda de imágenes SENTINEL 1A*. Recuperado el 04 de septiembre de 2020, de Peumo Repositorio Digital USM: <https://repositorio.usm.cl>
- Hussain, E. (2018). Constant strain accumulation rate between major earthquakes on the North Anatolian Fault. *Nat. Commun.* 9, 1392 .
- Khoshmanesh, M. &. (2018). Episodic creep events on the San Andreas Fault caused by pore pressure variations. *Nat. Geosci*, <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0160-2>.
- Martínez, J. (2005). *Elaboración y Análisis de Imágenes Radar desde satélite: Monitorización de deformaciones del Terreno*. Castelldefels, España: Instituto de Geomática.
- Podest, E. (2017). *Synthetic Aperture Radar*. Texas.
- Pros, F., González López, S., & Martínez Benjamín, J. (2013). Control del asentamiento de los diques este y sur del puerto de Barcelona mediante datos DInSAR. *XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Torrejón de Ardoz (Madrid).

- Sánchez, C., Monells, D., Manso, A., & Farías, E. (2016). Aplicación de metodología InSAR en la detección de deformaciones en el cráter de subsidencia y entorno minero. Caso de Estudio: Codelco Mina Andina. *1st International Conference of Underground Mining*. Santiago de Chile.
- Sillerico, E., Marchamalo, M., Rejas, J. G., & Martínez, R. (2010). La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la. *Informes de la Construcción*.
- Weiss, J. R. (2020). High-resolution surface velocities and strain for Anatolia om Sentinel-1 InSAR and GNSS data. *Geophys. Res. Lett.* e2020GL087376.
- Zhilin, L. Z. (2004). A Quantitative Measure for the Quality of INSAR terferograms Based on Phase Differences. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol.70, No. 10, 1131-1137.

DESARROLLO ACADÉMICO Y PROFESIONAL MEDIANTE PROGRAMACIÓN EN MATLAB PARA COLUMNAS SOMETIDAS A FLEXOCOMPRESIÓN BIAXIAL

Autores: Annarelys Salas Navarro⁷¹, Reynaldo Giráldez Toledo⁷², Boris Luis Gayoso Quintana⁷³

RESUMEN

La era digital ha exasperado cada aspecto de nuestra vida habitual y en la educación no fue desigual por lo que se esperan nuevos retos y necesidades en el ambiente educativo. La tecnología cambia el modelo de enseñanza y ofrece la posibilidad de autoaprendizaje donde los estudiantes dejan de cumplir un rol pasivo y pasan a uno activo. La asignatura Hormigón Estructural aborda el tema de flexocompresión en columnas, pero debido a la complejidad que presenta la biaxial se limita el contenido a la uniaxial. El estudio de la flexocompresión biaxial exige análisis iterativos complejos debido a que intervienen una amplia cantidad de variables de cálculo. Durante muchos años esta problemática se ha eludido, pues eran predominantes los análisis planos de las estructuras en pos de agilizar el

⁷¹ Profesora departamento docente de Ingeniería Civil Universidad de Matanzas, Cuba. annarelys.salas@umcc.cu

⁷² Profesor departamento docente de Ingeniería Civil Universidad de Matanzas, Cuba. reynaldo.giraldez@umcc.cu

⁷³ Profesor departamento docente de Ingeniería Civil Universidad de Matanzas, Cuba. boris.gayoso@umcc.cu