



Ciencia e Ingeniería Neogranadina

ISSN: 0124-8170

ISSN: 1909-7735

Universidad Militar Nueva Granada

Álvarez-Guerrero, Jesús; Sierra-Pérez, Julián; Amaya-Fernández,
Ferney; Herrera-Rubio, Jorge; Hidalgo-Monsalve, Dúmar
Validación experimental de un método analítico para el monitoreo de
movimientos de tierra en masa mediante sensores de fibra óptica*
Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 32, núm. 2, 2022, Julio-Diciembre, pp. 43-60
Universidad Militar Nueva Granada

DOI: <https://doi.org/10.18359/rcin.5673>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91174988004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

DOI: <https://doi.org/10.18359/rcin.5673>



Validación experimental de un método analítico para el monitoreo de movimientos de tierra en masa mediante sensores de fibra óptica*

Jesús Álvarez-Guerrero^a ■ Julián Sierra-Pérez^b ■ Ferney Amaya-Fernández^c ■ Jorge Herrera-Rubio^d ■ Dúmar Hidalgo-Monsalve^e

Resumen: En este trabajo se presenta la implementación de un sistema para el monitoreo de movimientos de tierra en masa conformado por un prototipo de perfil del suelo, una red de sensores fotónicos basados en rejillas de Bragg y un sistema de interrogación. El prototipo del suelo fue reproducido mediante materiales poliméricos que representan las capas del suelo, generalmente involucradas en eventos de deslizamientos de tierra. La red de sensores fue conformada por inclinómetros compuestos por barras cilíndricas de fibra de vidrio instrumentadas con sensores fotónicos basados en rejillas de Bragg, distribuidos de forma uniforme sobre el prototipo del suelo. El sistema de interrogación se compuso en sí mismo por un dispositivo interrogador empleado para capturar la información arrojada por los sensores en forma de desviaciones de la longitud de onda de Bragg, cuyos valores fueron relacionados posteriormente con las deformaciones de los inclinómetros mediante un algoritmo de procesamiento de señales, para arrojar resultados de la detección de movimientos. Los resultados experimentales muestran que el algoritmo analítico implementado puede generar un vector que indica la dirección de un eventual movimiento de tierra en masa a partir de la medida de deformaciones en los inclinómetros ópticos implementados con un error promedio de 3°. De acuerdo con los bajos niveles de error obtenidos, se demuestra que la propuesta de red de sensores fotónicos es una herramienta prometedora para el monitoreo de deslizamientos de tierra orientado a la disminución de los efectos socioeconómicos que causan los desastres naturales.

Palabras clave: sensores fotónicos; rejillas de Bragg; riesgo; movimientos en masa; monitoreo; deslizamiento

Recibido: 19/03/ 2021 **Aceptado:** 17/03/2022

Disponible en línea: 30/12/2022

Cómo citar: Hidalgo-Monsalve, D., Álvarez-Guerrero, J., Sierra-Pérez, J., Amaya-Fernández, F., & Herrera-Rubio, J. (2022). Validación experimental de un método analítico para el monitoreo de movimientos de tierra en masa mediante sensores de fibra óptica. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 32(2), 43-60. <https://doi.org/10.18359/rcin.5673>.

* Artículo de investigación

- a Candidato a doctor en ingeniería, magíster en ingeniería, magíster en TIC, ingeniero electrónico. Universidad Libre-Secional Cúcuta, San José de Cúcuta, Colombia.
Correo electrónico: jesus.alvarezg@unilibre.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-3258>
- b Doctor en ingeniería aeroespacial, magíster en ingeniería aeroespacial, magíster en materiales compuestos, magíster en ingeniería área de nuevos materiales, especialización en ingeniería aeronáutica, ingeniero mecánico. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.
Correo electrónico: julian.sierra@upb.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4359-1675>
- c Doctorado en ingeniería, magíster en ingeniería, ingeniero electrónico. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. Correo electrónico: ferney.amaya@upb.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7215-0196>
- d Doctor en gestión de la ciencia y la tecnología, magíster en electrónica, especialista en telecomunicaciones, especialización en interventoría de proyectos de telecomunicaciones, ingeniero electrónico. Universidad de Pamplona, San José de Cúcuta, Colombia. Correo electrónico: jherrera@unipamplona.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9661-5450>
- e Ingeniero electrónico. Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia.
Correo electrónico: dumarhnmhim@ufps.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8308-9714>

Experimental validation of an analytical method for mass ground motion monitoring using fiber-optic sensors

Abstract: In this article, we present the implementation of a system for mass ground motion monitoring consisting of a soil profile prototype, a photonic sensor network based on Bragg gratings, and an interrogation system. The soil prototype was reproduced using polymeric materials representing the soil layers generally involved in landslide events. The sensor network consisted of inclinometers composed of cylindrical fiberglass rods instrumented with photonic sensors based on Bragg gratings, evenly distributed over the soil prototype. The interrogation system itself was composed of an interrogator device used to capture the information yielded by the sensors in the form of Bragg wavelength deviations, whose values were subsequently related to the deformations of the inclinometers by means of a signal processing algorithm, to yield motion detection results. The experimental results show that the implemented analytical algorithm can generate a vector indicating the direction of an eventual mass ground motion from the measurement of deformations in the implemented optical inclinometers with an average error of 3°. According to the low error levels obtained, it is demonstrated that the proposed photonic sensor network is a promising tool for landslide monitoring oriented to the reduction of the socioeconomic effects caused by natural disasters.

Keywords: photonic sensors; Bragg grids; risk; mass movements; monitoring; landslide.

Introducción

Colombia ha sufrido grandes consecuencias socioeconómicas en las últimas décadas debido a la ocurrencia de eventos naturales peligrosos. Estos han sido determinantes para retardar el crecimiento económico de corto y largo plazo del país, pues han ocasionado destrucción de la infraestructura física, de los recursos naturales y del capital humano nacional [1], [2].

Para dimensionar la magnitud del problema, se estima que no adaptarse al cambio climático le puede generar pérdidas del 0.5 % del PIB, que corresponden a cerca de 3,8 billones anualmente [3]. La vulnerabilidad del país ante eventos climáticos es tal, que sucesos importantes como el fenómeno de La Niña le generaron pérdidas al Estado por 11,2 billones de pesos entre 2010 y 2011, mientras que El Niño 2015-2016 mermó la producción nacional en 3,1 billones [4].

De acuerdo con la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, el 88 % de los desastres naturales ocurridos en Colombia es de origen hidrometeorológico, distribuidos así: un 37 % debido a sequías e incendios, un 35 % a inundaciones, un 15 % a movimientos en masa y un 1 % a flujos torrenciales [2], [3].

Aunque no predominan en cantidad, los movimientos en masa o deslizamientos son el tipo de desastre natural que ha generado más pérdidas humanas en los últimos años, porque abarca el 66 % del total de muertes relacionadas con fenómenos hidrometeorológicos [2]. El censo del Departamento Administrativo Nacional de Estadística del 2018 soporta esta estimación, hallando que más del 82 % de la población en Colombia se encontraba expuesta a amenaza alta por movimientos en masa [5].

Paralelamente, la inadecuada gestión territorial en Colombia intensifica el potencial destructivo de los desastres naturales y, por consiguiente, la vulnerabilidad de las comunidades. Este es el caso de la avenida torrencial que afectó a Mocoa en 2017, que dejó más de trescientas personas muertas, cuyos efectos se clasifican como técnicamente previsibles y, por tanto, evitables [6], [7].

A pesar del riesgo natural latente, en el país existe poca alineación entre la inversión y el riesgo económico que suponen los desastres naturales. El *indicador de inversiones en función del riesgo departamental* demuestra que el 87.5 % de los departamentos presenta una inadecuada alineación de la inversión pública en adaptación para responder a sus niveles de riesgo [4], mientras que el Departamento Nacional de Planeación indica que Colombia debe aumentar la inversión en 2,3 billones de pesos anuales para cumplir con los objetivos de mitigación de desastres naturales [8].

Debido a la necesidad de reducir la vulnerabilidad de las comunidades, en este artículo se insiste en el uso de sistemas de monitoreo durante las etapas de planeación, construcción y mantenimiento de infraestructuras civiles, como herramientas de apoyo en los procesos de prevención y mitigación del riesgo, para disminuir los efectos de los desastres naturales.

Algunos sistemas emplean técnicas tradicionales de instrumentación y monitoreo de deslizamientos, como el control topográfico, GPS diferencial, extensómetros e inclinómetros, con los que se busca medir los desplazamientos de terrenos en puntos específicos dentro de masas inestables [9]-[11]. A día de hoy existen también otras técnicas para monitorear movimientos de tierra como el procesamiento de imágenes satelitales [12], [13] o las redes de sensores inalámbricos aprovechando la red de telefonía celular [14]. Sin embargo, actualmente los sensores de fibra óptica han ganado una amplia popularidad, debido a su facilidad de implementación y a su gran sensibilidad [15], [16].

Algunas de las técnicas de sensado fotónico usan la misma fibra óptica como sensor, como en el caso de la reflectometría óptica, en donde se envía un pulso a través de la fibra, el cual se refleja en el sitio donde ocurre una perturbación. Esta técnica puede ser en el dominio del tiempo (Optical Time Domain Reflectometry [OTDR]) [17] o en el dominio de la frecuencia (Optical Frequency Domain Reflectometry [OFDR]) [18]. Otra técnica de sensado fotónico se basa en la dispersión estimulada de Brillouin conocida como método Brillouin Optical Time Domain Analysis [BOTDA] [19].

Mediante este método se convierte la fibra óptica en un sensor que aprovecha el efecto no lineal de Brillouin [20], [21].

Una técnica final que ha emergido recientemente como alternativa para el monitoreo estructural en muchas aplicaciones es el uso de rejillas de Bragg en fibra óptica (Fiber Bragg Grating [FBG]), gracias a su bajo costo, facilidad de uso y alta sensibilidad [22], [23], las que fueron escogidas en este trabajo para la implementación del prototipo de monitoreo de movimientos de tierra. Por este motivo, se dedican los siguientes subtítulos a explicar las ventajas y el principio de funcionamiento de esta tecnología.

A partir de lo anterior, en este trabajo se propone y se presenta la implementación de un prototipo de sistema de monitoreo de movimientos de tierra en masa empleando sensores de fibra óptica FBG. El sistema consta de una maqueta para emular un terreno que se desea monitorear, más los elementos de sensado denominados inclinómetros fotónicos, que consisten en pequeñas barras de fibra de vidrio instrumentadas con dos sensores FBG, el sistema de interrogación y un algoritmo analítico basado en la teoría de mecánica de materiales, que tiene como propósito generar un vector con la dirección del movimiento de tierra en masa, a partir de la medida de deformación entregada por las FBG.

El documento está organizado de la siguiente manera: más adelante en este título se describen algunos conceptos teóricos sobre el comportamiento de los movimientos de tierra en masa, así como del principio de funcionamiento de los sensores FBG y la teoría de mecánica de materiales en la que se basa el algoritmo analítico de procesamiento. En la sección de materiales y métodos se describe la implementación o configuración realizada en cada una de las partes que conforman el sistema de monitoreo. Luego se presentan los resultados experimentales y, finalmente, las conclusiones del proyecto.

A continuación, se describen los conceptos y tecnologías que se deben tener claros para la comprensión del prototipo implementado para el monitoreo de movimientos de tierra en masa. Se parte

de un análisis de los principales tipos de movimientos de tierra en masa y de algunas de las técnicas actuales para el monitoreo de estos fenómenos; posteriormente se describe el principio de funcionamiento de los sensores fotónicos haciendo énfasis en las FBG. Finalmente se incluyen las ecuaciones de la mecánica de materiales utilizadas para el diseño de vigas, ya que estas fueron la base para la implementación de los inclinómetros fotónicos y del algoritmo analítico para la identificación de los movimientos.

Movimientos en masa

Para definir un movimiento de tierra en masa, se debe empezar por comprender el concepto de ladera o talud, es decir, una masa de tierra que posee pendiente o cambios de altura significativos. Técnicamente, se define como ladera cuando la conformación tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se formó artificialmente [1]. Partiendo de la definición de ladera, el término movimiento en masa se define como aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad, entendiéndose por detritos el material suelto de las rocas [24], [25].

Existen varios sistemas para clasificar los movimientos de tierra en masa; sin embargo, el más utilizado es el sistema propuesto por Varnes en 1978, que emplea como criterios de clasificación el tipo de movimiento y el tipo de material. Según el primero, se dividen en cinco tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos. Los materiales se dividen en rocas y suelos y, a la vez, los suelos se subdividen en detritos y tierra [24], [26], [27].

El principal interés de este trabajo consiste en lograr el monitoreo de movimientos de tierra que abarquen amplias extensiones de tierra como los deslizamientos, las propagaciones laterales y los flujos, ya que estos ocurren de forma lenta principalmente por efecto de acumulación de aguas lluvia en los poros del suelo [28]; sin embargo, estos eventos también se pueden presentar debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo,

meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad [29], [30].

Los movimientos en masa —conocidos como deslizamientos— consisten en movimientos de ladera debajo de una masa de roca o suelo y un desplazamiento que ocurre a lo largo de una o varias superficies, que se pueden detectar dentro de una zona relativamente delgada. Es un movimiento progresivo, que no se inicia al mismo tiempo en lo que sería la superficie de falla, por lo que puede comprender varias masas semiindependientes [1], [29]. En la figura 1 se presenta gráficamente un deslizamiento.

Los deslizamientos se clasifican en dos subtipos: 1) rotacionales, un movimiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de

falla curva o cóncava y 2) traslacionales, la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada [32].

A su vez, la propagación lateral es un tipo de movimiento en masa en el que el desplazamiento ocurre en gran parte por la deformación interna del material [32]. Las propagaciones laterales se pueden considerar como la fase final de una serie de movimientos en los que predomina la deformación interna, causando fragmentación del terreno en bloques grandes, como se muestra en la figura 2.

Finalmente, los movimientos en masa tipo flujo son aquellos que durante su desplazamiento exhiben un comportamiento semejante al de un fluido, que puede ser rápido o lento, saturado o seco y, en muchos casos, se originan a partir de otro tipo de movimiento, por ejemplo, un deslizamiento [32].

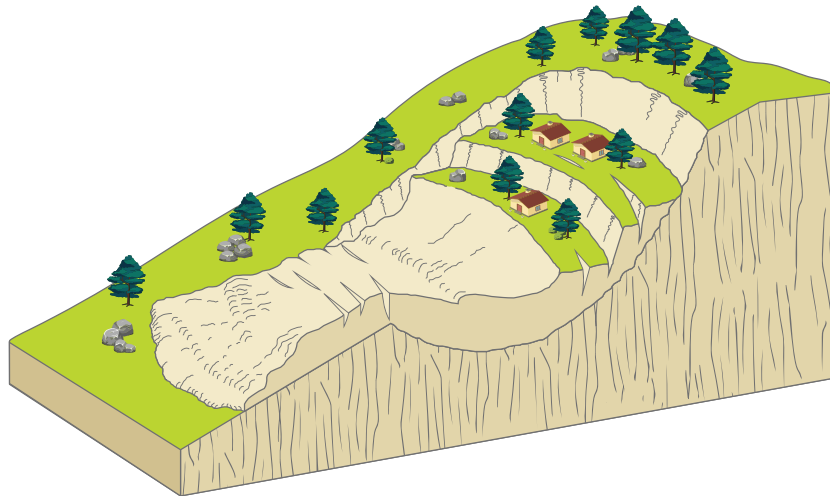


Figura 1. Movimiento de tierra tipo deslizamiento

Fuente: elaboración propia con aportes de [31], [32].

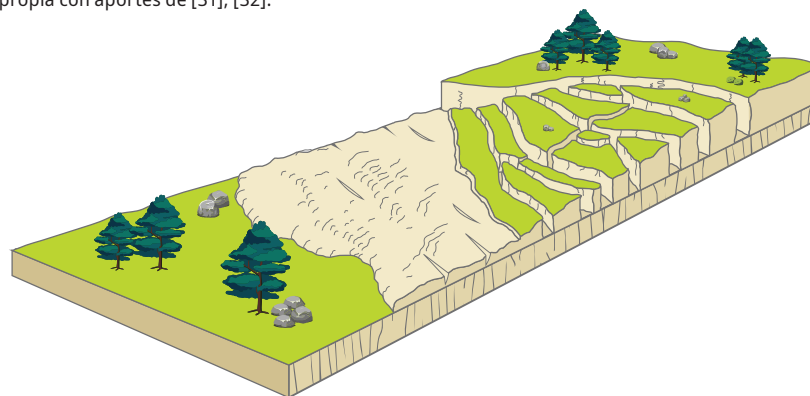


Figura 2. Movimiento de tierra tipo propagación lateral

Fuente: elaboración propia con aportes de [33].

Sensores fotónicos

En general, los sensores fotónicos modifican una característica de la luz guiada, en respuesta a una variable externa física, química o biológica [34]. Por ejemplo, si un componente fotónico como la fibra óptica es deformado, ocurren cambios en la atenuación, fase y polarización de la señal óptica, que pueden detectarse con los componentes adecuados.

Las ventajas que ofrecen los sensores fotónicos con respecto a los sensores mecánicos y eléctricos son: inmunidad a la interferencia electromagnética (las señales eléctricas afectan la medida de los sensores eléctricos), seguridad al no generar chispa (muy útil en ambientes como minas o en ambientes de desastre), alta confiabilidad y estabilidad (los sensores eléctricos y mecánicos requieren de calibración periódica y presentan histéresis), registran bajo consumo de potencia y no requieren alimentación eléctrica en el punto de sensado, haciéndolos aptos para el monitoreo remoto en tiempo real [34], [35].

Estas ventajas han permitido que se extienda el uso del sensado fotónico al monitoreo de la salud estructural en aeronaves y que sea comúnmente aplicado en las industrias médica, biomédica, petrolera, industrial, agropecuaria, en aplicaciones ambientales, de producción de energía eléctrica, así como en el sector militar y en la detección de sustancias químicas o biológicas [35].

Rejillas de Bragg en fibra óptica

Los sensores ópticos basados en rejillas de Bragg son probablemente los más utilizados por su bajo costo y facilidad de uso [22].

Una FBG consiste en una perturbación periódica del índice de refracción del núcleo de una fibra inducida por un láser acorde con el principio de fotosensibilidad [36], [37]. En la figura 3 se presenta un esquema del principio de funcionamiento de una FBG.

Cuando se introduce una fuente de luz de espectro ancho dentro de la fibra óptica que contiene la FBG, se refleja la parte del espectro de la fuente que corresponde a la longitud de onda de Bragg ($\lambda_B = 2n\Lambda$), condición de resonancia de la red, donde n es el índice de refracción efectivo y Λ el periodo de la modulación) y, por otra parte, el resto del espectro se transmite normalmente [38].

La longitud de onda reflejada también depende de perturbaciones externas de temperatura y tensión en la fibra óptica. De modo que la longitud de onda reflejada por la FBG cambia en una magnitud $\Delta\lambda_B$ con respecto a la deformación y la temperatura. Teniendo en cuenta esto, las FBG son a la vez sensores de deformación y temperatura. Los valores típicos de respuesta de una FBG ante ambas variables son $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ y $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, respectivamente [38].

Dada la practicidad de los sensores FBG, estos se utilizaron para instrumentar vigas cilíndricas de

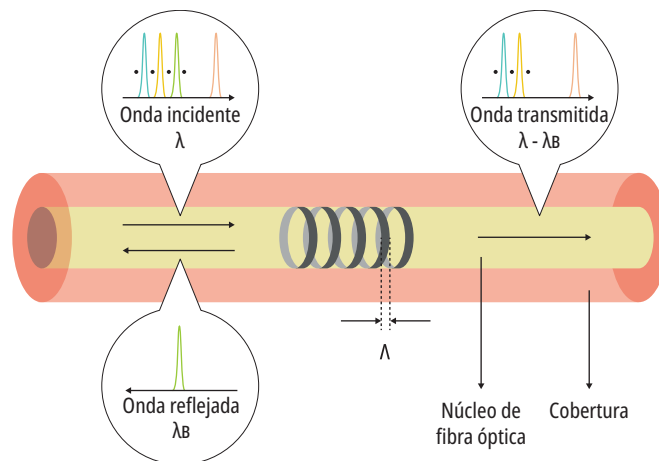


Figura 3. Principio de funcionamiento de una FBG

Fuente: elaboración propia con aportes de [39]-[41].

fibra de vidrio, de tal modo que se pueda medir el desplazamiento del suelo en un punto determinado, a partir de la medida de deformación que realizan las FBG sobre las vigas cuando estas se deflectan. Para comprender esto mejor, en la siguiente sección se describen detalladamente los criterios mecánicos utilizados para el desarrollo de este trabajo [36].

Mecánica de materiales para el diseño de los inclinómetros fotónicos

El principio de funcionamiento de los inclinómetros fotónicos implementados en este trabajo se basa en el análisis de la deflexión de una viga empotrada en uno de sus extremos, como la que se presenta en la figura 4.

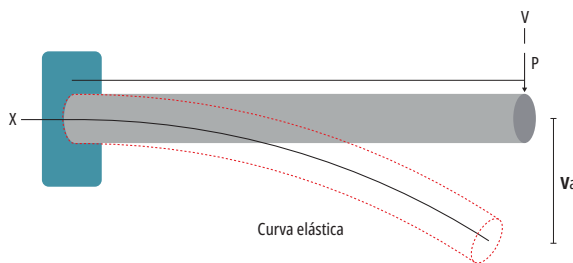


Figura 4. Deflexión de una viga empotrada en un extremo

Fuente: elaboración propia con aportes de [42].

En la figura 4 también se advierte la representación gráfica de la deflexión que, de acuerdo con el análisis de estructuras, hace referencia a la deformación que se presenta en un elemento estructural (en este caso una viga de longitud L desde el empotramiento) cuando se le aplica una fuerza P . La representación gráfica de la deflexión en el eje longitudinal, que pasa por el centroide de cada área transversal de la viga, se llama curva elástica. El desplazamiento v_A que se presenta cuando la viga se deflecta se puede calcular mediante la ecuación (1):

$$v_A = \frac{PL^3}{3EI} \quad (1)$$

Donde P es la fuerza aplicada, E es el módulo de elasticidad del material e I es el momento de

inercia del área transversal de la viga respecto al eje neutro. Dado que el área transversal es circular, el momento de inercia está dado por $I = (\pi/4)r^4$, donde r es el radio del área transversal de la viga.

De la ecuación (1), el único parámetro desconocido es la fuerza P . No obstante, esta se puede deducir a partir del cálculo del momento flector M , debido a la carga puntual P en el extremo de la viga que está dado por la ecuación (2):

$$M = Px \quad (2)$$

En la ecuación (2), la x representa la longitud del vector posición, que se extiende desde el punto de aplicación de la fuerza al punto al cual se toma el momento (en este trabajo el momento se toma en la ubicación del sensor).

El momento M se puede obtener a partir de las ecuaciones de esfuerzo máximo y de la ley de Hooke [43], dadas por las ecuaciones (3) y (4), respectivamente.

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (3)$$

$$\sigma = E\epsilon \quad (4)$$

La ecuación (3) describe el esfuerzo máximo en la viga, que ocurre en el punto de la sección transversal más alejado del eje neutro, justo donde se van a ubicar los sensores. La ley de Hooke, representada en la ecuación (4), muestra que el esfuerzo y la deformación registran una relación lineal en la zona elástica, entendiendo que esta zona elástica se presenta cuando las deformaciones son proporcionales al esfuerzo unitario y el material no se deforma permanentemente. Si se igualan las ecuaciones (3) y (4) y se despeja el momento de fuerza M , se obtiene la ecuación (5):

$$M = \frac{EI\epsilon}{c} \quad (5)$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material, I es el momento de inercia, c es la distancia perpendicular del eje neutro al punto más alejado de este eje, o en otras palabras, es el mismo radio de la viga. La variable M es la deformación de la viga medida en la ubicación del sensor. Como cada sensor mide la variación de la longitud de

onda central, entonces la deformación se obtiene mediante la ecuación (6).

$$\varepsilon = (\lambda_f - \lambda_c) \times k \quad (6)$$

Donde λ_c es la longitud de onda central de cada sensor y se usa como medida de referencia (sin deformación), λ_f es la longitud de onda desplazada por efecto de la deformación y k es la constante de deformación que está dada en $\mu\text{ε}/\text{nm}$, por tanto, la deformación se mide en $\mu\text{ε}$.

Una vez calculada la deformación en cada punto de sensado, entonces es posible estimar el momento de fuerza M y por consiguiente la fuerza P y el desplazamiento debido a la deflexión de la viga v_A [42].

Materiales y métodos

En este título se describe la implementación de la red de sensores fotónicos propuesta como prototipo para el monitoreo de movimientos de tierra en masa. Se parte de la descripción del escenario en el que se instala la red de sensado, luego se presenta la implementación de los inclinómetros fotónicos y el sistema de interrogación usado para la captura de los datos provenientes de los sensores, y finalmente se describe la implementación de la topología de sensado conformada por un total de nueve inclinómetros.

Montaje del prototipo de perfil del suelo

El paso inicial para la implementación del prototipo de monitoreo de movimientos de tierra

consistió en montar un escenario que representara la masa de tierra que se desea monitorear. A grandes rasgos, se buscó mostrar dos capas del suelo: una compacta y la otra porosa y quebradiza. Esto, debido a que, en un evento de movimiento de tierra, lo que se desplaza es el suelo superficial, que es poroso y quebradizo, sobre las capas de arcillas compactas. En la figura 5 se observa el prototipo por capas del escenario implementado.

Como se observa en la figura 5, se usaron dos placas de materiales: una de poliestireno que asemeja el suelo compacto sobre el que se empotran los inclinómetros y otra de poliuretano blando, que representa el suelo poroso superficial. Sobre esta última capa se aplicarán fuerzas que deformen el material en diferentes puntos con el fin de simular un movimiento de tierra.

Las dimensiones de cada placa son de $100 \times 100 \times 10$ cm y las dos están colocadas sobre una base de madera que les da estabilidad a ambas y facilita el transporte del sistema.

Implementación de los inclinómetros fotónicos

Un inclinómetro fotónico consiste en una barra cilíndrica instrumentada con un par de sensores FBG ubicados a la misma altura, pero separados angularmente 90° , con el fin de medir deformaciones en los ejes cartesianos X y Y. En la figura 6 se muestra la representación gráfica de los inclinómetros fotónicos implementados.

Se utilizó una barra de fibra de vidrio de 3 mm de diámetro y 30 cm de longitud. Este material es

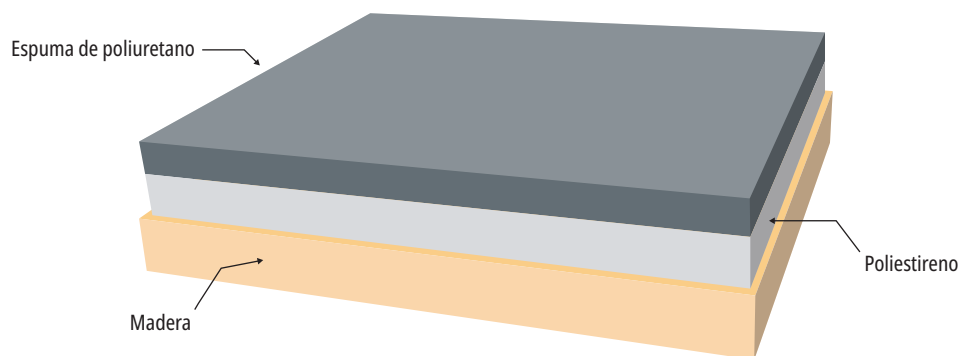


Figura 5. Perfil del suelo mediante una capa compacta y una capa porosa

Fuente: elaboración propia.

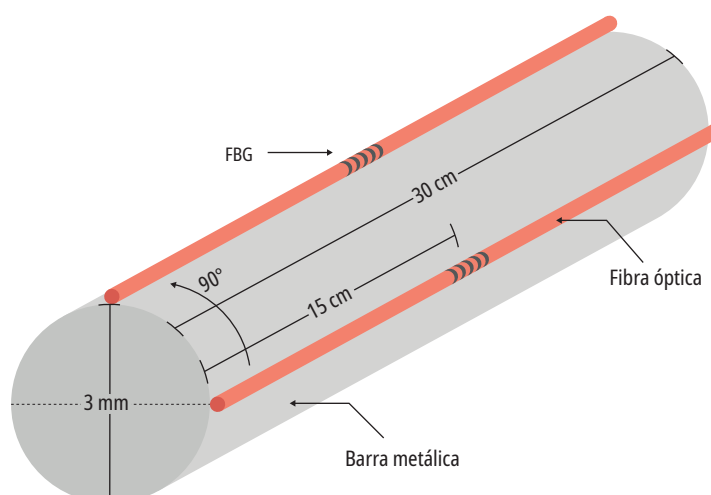


Figura 6. Diseño del inclinómetro fotónico

Fuente: elaboración propia con aportes de [44]-[47].

flexible y resistente, y se puede flexionar ampliamente, sin deformarse.

Los sensores FBG se instalaron a lo largo del eje longitudinal de las barras a una distancia de 15 cm desde la base y separados angularmente 90°, de

modo que se pudieran medir deformaciones tanto en el eje X como en el eje Y. Los sensores utilizados son de fibra óptica monomodo estándar (Standard Single-Mode Fiber [SSMF]) solo recubierta por acrilato y con conectores FC-APC instalados en el laboratorio. Las longitudes de onda de los sensores varían entre 1515 y 1585 nm, con separación entre sensores de 5 nm.

Para fijar la fibra óptica a lo largo de la barra se utilizó un adhesivo de cianoacrilato y resina epóxica para proteger los puntos donde se empieza el pigtail del conector. En la figura 7 se observa un inclinómetro fotónico totalmente ensamblado.



Figura 7. Inclinómetro fotónico implementado

Fuente: autores.

Topología de la red de sensores fotónicos

Por lo general, las áreas en las que ocurren los movimientos de tierra en masa pueden variar desde algunos metros hasta varias hectáreas de terreno. En este sentido, en el prototipo implementado se seleccionó una topología en malla en la que se utilizan varios inclinómetros fotónicos para cubrir un área determinada. En total se instrumentaron e instalaron nueve inclinómetros, marcados con una letra en orden alfabético, tal como se aprecia en la figura 8. Sin embargo, el número de inclinómetros por utilizar en una aplicación real puede variar de acuerdo con el área de estudio.

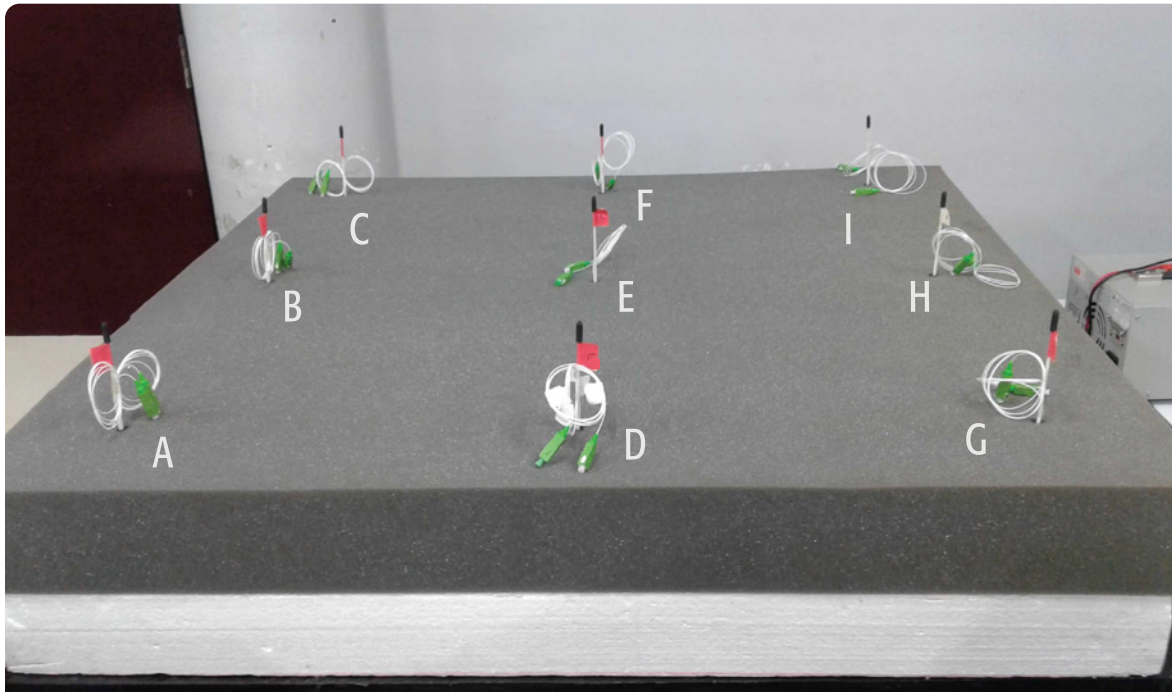


Figura 8. Topología de sensado en malla

Fuente: autores.

Los nueve inclinómetros usados fueron instrumentados con dos sensores ópticos que entregan información de la deformación del inclinómetro en las direcciones X y Y. Estos sensores se identifican con la letra que representa al inclinómetro junto con un subíndice X o Y, de acuerdo con la dirección en la que se instaló. De esta manera, los sensores del inclinómetro ‘A’ se identifican como A_x y A_y . En la tabla 1 se presentan las longitudes de onda (λ) de los 18 sensores utilizados en la topología de sensado fotónico.

En la tabla 1 se advierte que varios sensores tienen la misma λ , incluso los de un mismo inclinómetro, como se observa en el inclinómetro ‘A’. Por tanto, se debe garantizar que los sensores con la misma λ no se mezclen por un mismo canal óptico. Este problema se resolvió fácilmente, dado que el sistema de interrogación utilizado proporciona cuatro canales independientes.

Por otro lado, se debe conocer la relación entre la deformación y el desplazamiento de la λ de los sensores, conocida como constante de deformación

Tabla 1. Longitudes de onda (λ) de los sensores utilizados

Sensor	$\lambda(\text{nm})$	Sensor	$\lambda(\text{nm})$
A_x	1515.087	E_y	1519.992
A_y	1515.173	F_x	1515.545
B_x	1520.067	F_y	1575.221
B_y	1524.822	G_x	1520.040
C_x	1515.659	G_y	1525.073
C_y	1575.468	H_x	1555.057
D_x	1519.872	H_y	1575.044
D_y	1525.094	I_x	1549.785
E_x	1525.272	I_y	1539.994

Fuente: elaboración propia.

(k), que para el caso de las FBG utilizadas es de $804 \mu\epsilon/\text{nm}$. Esto indica que por cada nanómetro que se desplace la λ central del sensor, la barra se deforma 804 microdeformaciones, justo en la ubicación del sensor.

Sistema de interrogación de los sensores fotónicos

El sistema de sensado fotónico implementado como prototipo para el monitoreo de movimientos de tierra en masa está conformado por la red de sensores descrita en la sección anterior, una caja de *splitters* ópticos, un interrogador de sensores ópticos de cuatro canales y un computador para el procesamiento de los datos, como se puede apreciar en la figura 9.

Los sensores FBG pueden medir la deformación en cada inclinómetro fotónico a partir de la variación en la longitud de onda de Bragg en la que están diseñados. Estas variaciones se pueden medir con un equipo conocido como interrogador óptico, que tiene la capacidad de interrogar cientos de sensores ópticos en tiempo real.

El mecanismo de interrogación consiste en utilizar un láser sintonizable, que realiza un escaneo en un determinado ancho de banda, a cierta frecuencia de barrido. Esta fuente de luz incide sobre la red de sensores ópticos en la que cada FBG refleja la longitud de onda de Bragg en la que fue diseñada. Luego, el interrogador óptico identifica las longitudes de onda reflejadas y proporciona información de cualquier variación que ocurra sobre estas. Adicionalmente, el interrogador cuenta con un *software* de adquisición y visualización, que

permite exportar los datos capturados de los sensores para su posterior procesamiento.

En el prototipo implementado se utilizó un interrogador óptico sm130-700. El equipo cuenta con cuatro fuentes láser, que realizan un escaneo entre 1510 y 1590 nm a una frecuencia de 1 kHz. La resolución del equipo es de 1 pm, lo que le otorga la posibilidad de realizar medidas de 1 μe aproximadamente.

Cada salida del interrogador se conecta a una caja de *splitters*, formada internamente por cuatro *splitters* 1x8. Estos dispositivos permiten dividir las señales ópticas provenientes de los láseres para entregarlas a los 18 sensores. Las señales reflejadas por los sensores FBG se juntan nuevamente en los *splitters*, ya que en la dirección opuesta funcionan como combinadores ópticos. El interrogador recibe y procesa estas señales, generando un archivo de texto en el que guarda la información de las variaciones en longitud de onda de los 18 sensores. Finalmente, el archivo de texto generado es la base para el algoritmo que se describe en la siguiente sección.

Algoritmo de monitoreo de movimientos de tierra en masa

El algoritmo empleado se basa en el modelo analítico expresado en la sección introductoria, que

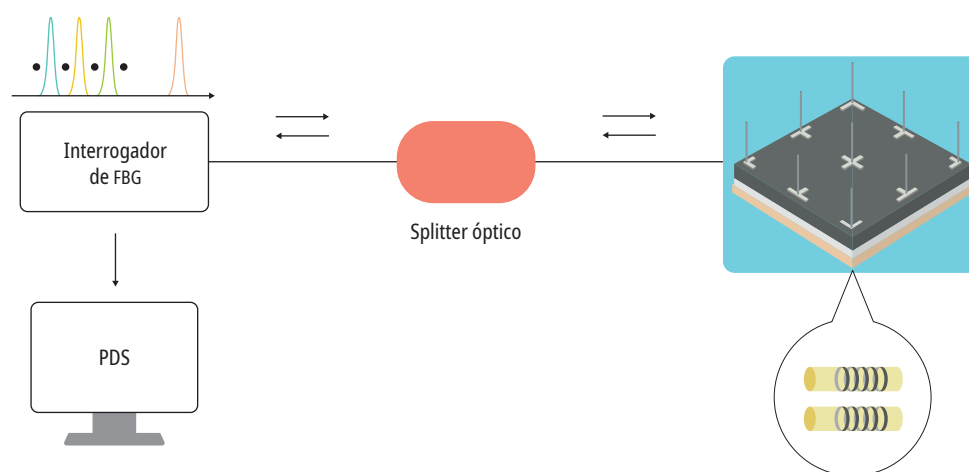


Figura 9. Sistema de sensado fotónico

Fuente: elaboración propia con aportes de [48].

consiste en la implementación de las ecuaciones de mecánica de materiales, para determinar los desplazamientos en los ejes X y Y de cada inclinómetro fotónico a partir de la medida de deformación, que realiza cada sensor, en su respectivo eje.

En la figura 10 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo analítico implementado. Una vez iniciado el programa, el primer paso es cargar los archivos (.txt o .csv) que genera el interrogador óptico en donde se guardan las variaciones en longitud de onda de cada sensor. Se generan dos archivos: uno sin ninguna alteración, para fijar las longitudes de onda de referencia (S_{10}), y otro con las longitudes de onda de los sensores, luego de aplicar una carga en punto del prototipo (S_{11}).

El tamaño de las matrices cargadas S_{10} y S_{11} es de 5000 filas por 18 columnas. Cada una registra la información de cada sensor, ordenado desde A_x a I_y . Cada fila es el valor de la longitud de onda muestreado en un instante de tiempo. Con el fin de simplificar el procesamiento se trabajó con el valor promedio de cada sensor, de tal modo que cada matriz se convirtió en un vector de longitudes de onda de una fila y 18 columnas.

Posteriormente se definen y calculan los parámetros conocidos como el radio de la viga r , el módulo de elasticidad de las vigas de fibra de vidrio E (este fue calculado en el laboratorio con la curva esfuerzo-deformación de una viga), la constante de deformación de los sensores k , el momento de inercia del área transversal I , la longitud de la viga desde el empotramiento L y la longitud desde el empotramiento al sensor L_s .

Luego de definir los parámetros conocidos, y teniendo los vectores de las longitudes de onda de referencia y desplazadas, se calcula el vector de deformaciones mediante la ecuación (6). Los siguientes pasos son calcular los vectores de momentos M , de fuerzas P y de desplazamientos v_A mediante las ecuaciones (5), (2) y (1), respectivamente.

Hasta este punto se tiene un vector con la información de los desplazamientos en X y Y de cada inclinómetro fotónico. Estos valores se convierten en las coordenadas de un punto con el cual se traza un vector, que va desde la base de cada inclinómetro al respectivo punto encontrado. De modo que

los vectores generados van a apuntar hacia el lugar donde se aplicó la carga, lo que equivale a identificar la dirección hacia donde está ocurriendo el movimiento de tierra.

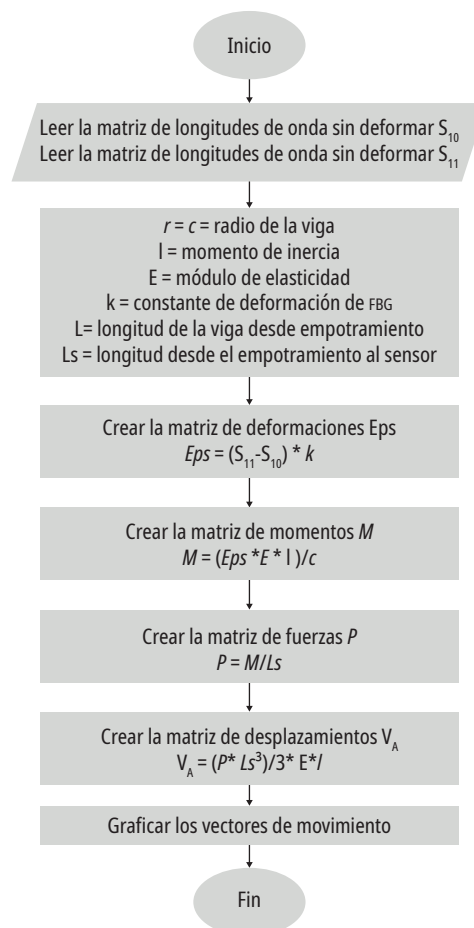


Figura 10. Diagrama de flujo del algoritmo utilizado

Fuente: elaboración propia.

Resultados y discusión

En este título del documento se presentan los resultados más relevantes obtenidos luego de la implementación de la red de sensores.

Conflictos en la alineación de los sensores

El primer paso en la implementación del prototipo de monitoreo de deslizamientos fue la instrumentación de los inclinómetros ya descrita. En este proceso se observó un problema en la alineación de cada sensor respecto al eje longitudinal

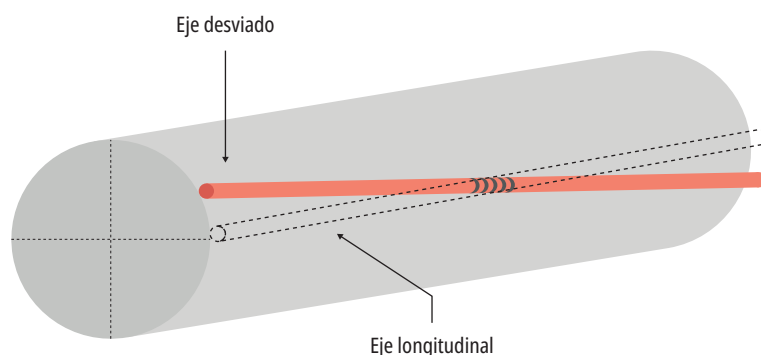


Figura 11. Problema de alineación respecto al eje

Fuente: elaboración propia.

correspondiente. Esto significa que, por ejemplo, un sensor en el eje X de un inclinómetro debe estar alineado exactamente sobre el eje; sin embargo, por las dimensiones de la barra utilizada y las del sensor resulta muy complejo garantizar una alineación exacta. Este fenómeno se aprecia en la figura 11.

De esta forma, el desempeño de la red de sensores se ve limitado por un factor de precisión en la ubicación de los inclinómetros. El problema ilustrado en la figura 11 se logró soportar a partir de las curvas de fuerza contra deformación mostradas en las figuras 12 y 13. Las curvas de la figura 12 corresponden a las respuestas de los sensores tanto en el eje X (línea roja) como en Y (línea negra), cuando se aplican fuerzas en la dirección de X y asegurando que el sensor en esa dirección esté lo más alineado posible con el eje longitudinal. Por mecánica de materiales se esperaría que, si el sensor en el eje Y está perfectamente alineado con el eje, no haya deformación. Sin embargo, se observa que mientras el sensor en el eje X mide una deformación de $779.15 \mu\epsilon/nm$, el sensor en el eje Y mide $120.57 \mu\epsilon/nm$.

Por otro lado, las curvas mostradas en la figura 13 representan la respuesta de los sensores cuando se alinea el sensor del eje Y, con las fuerzas aplicadas en la dirección Y. Los resultados registran una pendiente de deformación de $1001.4 \mu\epsilon/nm$ en el eje Y, contra $90 \mu\epsilon/nm$ en el eje X. Esto revela que el sensor instalado en el eje Y tiene una mayor desviación respecto a su eje que el sensor en la dirección X.

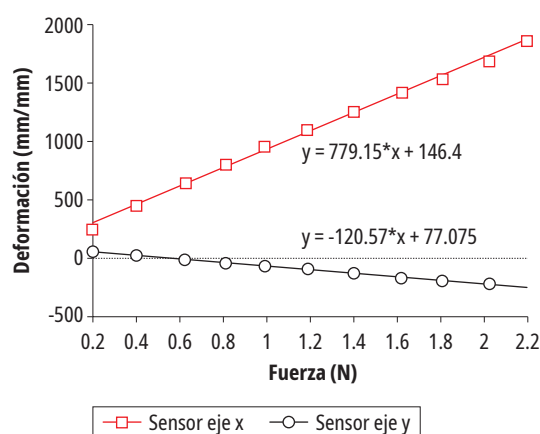


Figura 12. Gráfica de fuerza contra deformación con el sensor del eje X alineado y la fuerza aplicada en la dirección X

Fuente: elaboración propia.

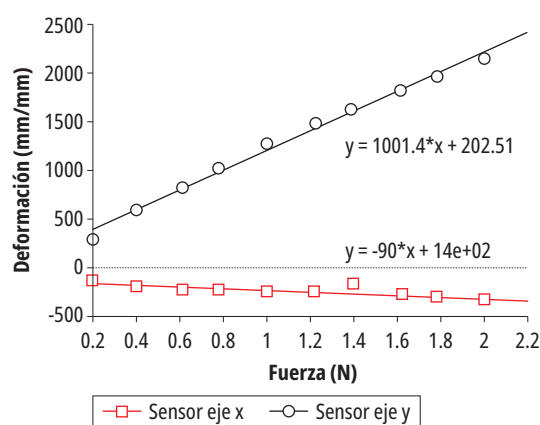


Figura 13. Gráfica de fuerza contra deformación con el sensor del eje Y alineado y la fuerza aplicada en la dirección Y

Fuente: elaboración propia.

Prueba de funcionamiento de la red de sensores

Una vez caracterizados los inclinómetros y teniendo clara la desviación de cada sensor con respecto al eje longitudinal, se realizó una prueba del funcionamiento del inclinómetro, consistente en la aplicación de fuerzas de una magnitud tal que pudiera deformar el inclinómetro en una dirección conocida. Posteriormente se recopiló la información de los sensores, mediante el sistema de interrogación, y se procesó con el algoritmo descrito.

Como se observa en la figura 14, se aplicaron fuerzas en los ángulos de 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 y 315 grados. Las flechas negras representan los vectores obtenidos experimentalmente con un inclinómetro fotónico, mientras que las flechas rojas representan los vectores teóricos.

El error obtenido para los ángulos definidos previamente fue relativamente bajo —cerca del 5 %— considerando que la implementación se realizó de forma manual, lo que representó un reto al manipular la red de sensores compuesta por inclinómetros de 2 mm.

Este error se midió en cada uno de los casos y se presentó en la tabla 2, donde se muestra que el error medido en los ángulos que concuerdan con la dirección de alguno de los ejes X y Y (0°, 90°, 180° y 270°) es menor que el error medido en las direcciones que no concuerdan con los ejes (45°, 135°, 225° y 315°). Esto se debe a que las fuerzas aplicadas en las direcciones de los ejes coinciden

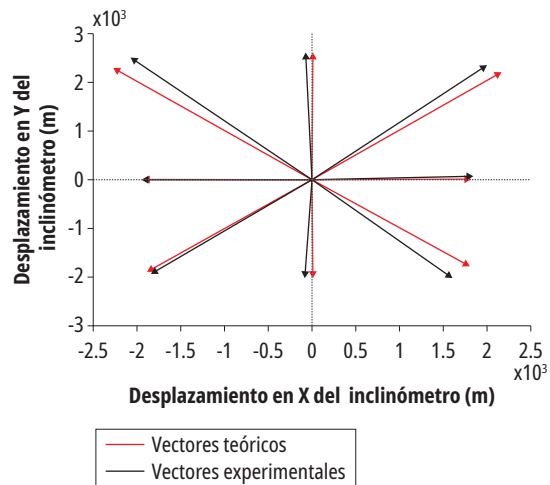


Figura 14. Vectores de movimiento medidos experimentalmente por los inclinómetros fotónicos (negros) y teóricos (rojos)

Fuente: elaboración propia.

con la pequeña desviación en ese eje, de modo que solo se aprecia el efecto de la desviación del sensor en la otra dirección, mientras que en las direcciones que no concuerdan con los ejes se evidencia la sumatoria de desviaciones en ambas direcciones.

Adicionalmente, en la tabla 2 también se muestran los desplazamientos en X y Y medidos para cada uno de los ángulos estudiados, así como la magnitud de los vectores encontrados, los cuales se obtienen a partir de la medida de deformaciones realizada por cada sensor. Además, la magnitud de los vectores puede aportar información de la magnitud de la fuerza aplicada o del movimiento.

Tabla 2. Desplazamientos y ángulos medidos mediante un inclinómetro fotónico

Ángulo teórico (°)	Ángulo experimental (°)	Error (°)	Desplazamiento eje X (mm)	Desplazamiento eje Y (mm)	Magnitud del vector (mm)
0	2.140	2.140	1.872	0.069	1.874
45	49.742	4.742	2.027	2.394	3.137
90	91.468	1.468	-0.067	2.635	2.636
135	129.702	5.297	-2.090	2.517	3.271
180	180.420	0.420	-1.974	-0.014	1.974
225	226.339	1.339	-1.865	-1.955	2.702
270	267.698	2.301	-0.082	-2.041	2.043
315	308.651	6.348	1.619	-2.025	2.593

Fuente: elaboración propia.

A pesar de la complejidad en la instrumentación de los inclinómetros fotónicos, dadas las dimensiones de la barra utilizada y las dimensiones de los sensores, en la tabla 2 se nota que el mayor error en los ángulos medidos es de 6.35° y el menor es de 0.42° . Estos resultados son alentadores, dado que al momento de implementar un inclinómetro a escala real, las dimensiones de la barra a utilizar son mayores (varios metros de longitud y varios centímetros de calibre), de tal modo que se puede garantizar una mayor precisión desde la instrumentación de los dispositivos.

Conclusiones

Se implementó un prototipo funcional de un sistema de monitoreo de movimientos de tierra en masa, mediante el uso de inclinómetros fotónicos que se basan en el empleo de sensores ópticos FBG, y de un algoritmo analítico de procesamiento con sustento en la teoría de mecánica de materiales.

El prototipo implementado tiene la capacidad de generar un vector en la dirección que ocurre el movimiento a partir de la información de la deformación que entregan los sensores FBG en cada eje de coordenadas X y Y de los inclinómetros.

Los resultados experimentales reflejan errores en la instrumentación de los sensores como se ilustra en la figura 11, debido a las dimensiones reducidas de cada inclinómetro y a que la instrumentación se realizó de forma manual. Sin embargo, a pesar de esto se lograron medidas en los ángulos de los vectores de movimiento con un error mínimo de 0.42° , máximo de 6.35° y un error medio de 3° sobre el total de medidas realizadas.

Los resultados son alentadores, pues en un inclinómetro a escala real, las dimensiones de la barra que se va a utilizar son mayores (varios metros de longitud y varios centímetros de calibre) permitiendo una mejor colocación de los inclinómetros. Además, apoyar la instrumentación con dispositivos o herramientas de precisión garantizaría una mejora significativa adicional en el desempeño del sistema de monitoreo, al lograrse un correcto posicionamiento de los sensores.

Aun así, con los bajos niveles de error obtenidos se demuestra que la red de sensores fotónicos

propuesta es una herramienta prometedora para el monitoreo de deslizamientos de tierra orientado a la disminución de los efectos socioeconómicos que causan los desastres naturales.

Para trabajos futuros, en términos de *software* se recomienda el uso de técnicas de reconocimiento de patrones para optimizar el funcionamiento del sistema de monitoreo que emplea un método analítico. A su vez, se propone diseñar un algoritmo orientado a detectar no solo deformaciones puntuales en los inclinómetros, sino deformaciones distribuidas, como sucedería en un escenario de deslizamiento real.

Por último, se propone evaluar el desempeño de la red de sensores en un simulador físico de deslizamientos de suelo, para reforzar las pruebas con datos más contundentes. Para una etapa final, se plantea poner en marcha el sistema de monitoreo en un terreno real propenso a movimientos de tierra, lo cual permitiría evaluar el desempeño y la viabilidad de la red de sensores en una eventual incorporación a los procesos de prevención del riesgo, para disminuir los efectos de los desastres naturales.

Referencias

- [1] M. Marulanda, *Atlas de Riesgo de Colombia: Revelando los desastres latentes*, Bogotá: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2018.
- [2] L. Mejía, *Índice municipal de riesgo de desastres de Colombia*, Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, 2018.
- [3] R. Puyana, *La agenda de cambio climático en Colombia y el rol del financiamiento*, Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, 2018.
- [4] R. Suárez, *Análisis del gasto público y privado e institucionalidad para el cambio climático-Caso de Colombia*, Bogotá: Comité de Gestión Financiera del Sisclima, 2018.
- [5] UNGRD, *Colombia, un país con múltiples amenazas geológicas, pero ¿por qué sucede esto?, en la UNGRD se lo explicamos*, Bogotá: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2020.
- [6] R. Luis *et al.*, "Comparación de metodologías para la estimación de riesgos de movimientos en masa", *Revista Técnica de Maquinaria y Obra Pública*, vol. 71, 2018. [Internet]. Disponible en <https://www.obrasurbanas.es/metodologias-riesgos-movimientos-masas/>

- [7] J. Vázquez *et al.*, “La avenida torrencial de Mocoa, Putumayo ¿ejemplo de una retrospectiva sin punto final en la gestión del riesgo de desastres detonados por eventos naturales?”, *Revista de Derecho*, vol. 50, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.14482/dere.50.0007>
- [8] DNP, *Sistema de monitoreo, reporte y verificación de financiamiento climático*, Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, 2018.
- [9] C.-Y. Tsou *et al.*, “Topographic and Geologic Controls on Landslides Induced by the 2015 Gorkha Earthquake and its Aftershocks: an Example from the Trishuli Valley, central Nepal”, *Landslides*, vol. 15, n.º 5, 2018, pp. 953-965. doi: [10.1007/s10346-017-0913-9](https://doi.org/10.1007/s10346-017-0913-9)
- [10] R. Kenner *et al.*, “Monitoring Mass Movements using Georeferenced Time-Lapse Photography: Ritigraben Rock Glacier, Western Swiss Alps”, *Cold Regions Science and Technology*, vol. 145, 2018, pp. 127-134, doi: [10.1016/j.coldregions.2017.10.018](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.10.018)
- [11] B. Andò *et al.*, “A Magnetic Fluid-Based Inclinometer Embedding an Optical Readout Strategy: Modeling and Characterization”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, n.º 8, 2020, pp. 5922–5929, doi: [10.1109/TIM.2020.2964937](https://doi.org/10.1109/TIM.2020.2964937)
- [12] P. Confuorto *et al.*, “Monitoring of Remedial works Performance on Landslide-Affected Areas through Ground- And Satellite-Based Techniques”, *Catena*, vol. 178, February, 2019, pp. 77-89, doi: [10.1016/j.catena.2019.03.005](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.005)
- [13] N. Casagli *et al.*, “Landslide Mapping and Monitoring by Using Radar and Optical Remote Sensing: Examples from the EC-FP7 Project SAFER”, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 4, n.º July, 2016, pp. 92-108. doi: [10.1016/j.rsase.2016.07.001](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2016.07.001)
- [14] S. R. Suryawanshi and U. L. Deshpande, “Review of Risk Management for Landslide Forecasting, Monitoring and Prediction using Wireless Sensors Network”, *2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, 2017, pp. 1-6, doi: [10.1109/ICIIECS.2017.8276113](https://doi.org/10.1109/ICIIECS.2017.8276113)
- [15] A. A. Kelam *et al.*, “Utilization of Optical Fiber System for Mass Movement Monitoring”, *Disaster Science and Engineering*, vol. 2, n.º 1, 2016, pp. 19-24. Disponible en: <http://www.disasterengineering.com/article/view/5000185072>
- [16] M. Stähli *et al.*, “Monitoring and Prediction in Early Warning Systems for Rapid Mass Movements”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 15, n.º 4, 2015 pp. 905-917, doi: [10.5194/nhess-15-905-2015](https://doi.org/10.5194/nhess-15-905-2015)
- [17] Y. Zheng *et al.*, “Experimental Research on a Novel Optic Fiber Sensor based on OTDR for Landslide Monitoring”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 148, 2019, p. 106926, doi: [10.1016/j.measurement.2019.106926](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106926)
- [18] L. Schenato *et al.*, “Distributed Optical Fibre Sensing for Early Detection of Shallow Landslides Triggering”, *Scientific Reports*, vol. 7, n.º 14686, 2017, pp. 1-7, doi: [10.1038/s41598-017-12610-1](https://doi.org/10.1038/s41598-017-12610-1)
- [19] C. Y. Hong *et al.*, “Recent Progress of using Brillouin Distributed Fiber Optic Sensors for Geotechnical Health Monitoring”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 258, 2017, pp. 131-145, doi: [10.1016/j.sna.2017.03.017](https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.03.017)
- [20] D. Sheng Xu *et al.*, “A New Measurement Approach for Deflection Monitoring of Large-Scale Bored Piles using Distributed Fiber Sensing Technology”, *Measurement*, vol. 117, 2018, pp. 444-454, doi: [10.1016/j.measurement.2017.12.032](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.12.032)
- [21] C. Carmona-Rodríguez *et al.*, “Red de sensores de fibra óptica para la prevención de desastres”, *Revista investigaciones aplicadas*, vol. 9, n.º 1, 2015, pp. 30-36, doi: [10.18566/ria.v09n01.a06](https://doi.org/10.18566/ria.v09n01.a06)
- [22] T. Li *et al.*, “A Diaphragm Type Fiber Bragg Grating Vibration Sensor Based on Transverse Property of Optical Fiber with Temperature Compensation”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, n.º 4, 2017, pp. 1021-1029, doi: [10.1109/JSEN.2016.2641931](https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2641931)
- [23] G. Allwood *et al.*, “Fiber Bragg Grating Sensors for Mainstream Industrial Processes”, *Electronics*, vol. 6, no. 4, pp. 1–19. doi: [10.3390/electronics6040092](https://doi.org/10.3390/electronics6040092)
- [24] O. Hungr *et al.*, “The Varnes classification of landslide types, an update”, *Landslides*, vol. 11, n.º 2, 2014, 2017, pp. 167-194, doi: [10.1007/s10346-013-0436-y](https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y)
- [25] A. J. Teixeira Guerra *et al.*, “Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review”, *Pedosphere*, vol. 27, n.º. 1, 2017, pp. 27-41, doi: [10.1016/S1002-0160\(17\)60294-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60294-7)
- [26] W. Guo *et al.*, “Experimental Study of Shallow Mass Movements on Gully Slopes and Associated Sediment under Rainfall on the Chinese Loess Plateau”, *Geomorphology*, vol. 350, n.º 106919, 2020, pp. 1-9. doi: [10.1016/j.geomorph.2019.106919](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106919)
- [27] D. N. Pane *et al.*, *Movimientos en masa en la Región Andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Buenos Aires, Proyecto multinacional andino: geociencias para las comunidades andinas, 2007.
- [28] W. Guo *et al.*, “Rainfall-triggered Mass Movements on Steep Loess Slopes and their Entrainment and Distribution”, *Catena*, vol. 183, n.º 104238, 2019, pp. 1-11, doi: [10.1016/j.catena.2019.104238](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104238)

- [29] A. Maltman, *The Geological Deformation of Sediments*. United Kingdom: Springer Science+Business Media Dordrecht, 1994.
- [30] G. Shanmugam, *Deep-Water Processes and Deposits*. Arlington, TX, USA: Elsevier, 2020.
- [31] P. Bobrowsky, B. Marker, *Encyclopedia of Engineering Geology*. Switzerland: Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018, 2018.
- [32] J. Jiménez. “Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de Rules, Granada”, Universidad de Granada, España, 2005.
- [33] V. Meyer *et al.*, *Costs of Natural Hazards - A Synthesis*. Alemania: Conhaz Consortium, 2012.
- [34] M. Hameed y S. Obayya, *Computational Photonic Sensors*. Switzerland: Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019, 2018.
- [35] N. Kumar y B. Suthar. *Advances in Photonic Crystals and Devices*. London: CRC Press, 2020.
- [36] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*. Burlington, MA, USA: Elsevier Inc., 2010.
- [37] E. Udd y W. Spillman. *Field Guide to Fiber Optic Sensors*. Washington, USA: SPIE Press, 2014.
- [38] C. E. Campanella *et al.*, “Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications”, *Sensors*, vol. 18, n.º 9, 2018, pp. 1-27, doi: 10.3390/s18093115.
- [39] T. Kori *et al.*, “A Study on Fiber Bragg Gratings and Its Recent Applications”, *Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing. IMIS 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 994, 2020, pp. 880-889, doi: 10.1007/978-3-030-22263-5_84
- [40] D. Meena y M. L. Meena, “Design and Analysis Dispersion Compensating Model with Chirp Fiber Bragg Grating for Long-haul transmission system”, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 546, 2020, pp. 29-36, doi: 10.1007/978-981-13-6159-3_4
- [41] Y. Kuang *et al.*, “Packaging and Temperature Compensation of Fiber Bragg Grating for Strain Sensing: A Survey”, *Photonic Sensors*, vol. 8, 2018, pp. 320-331. doi: 10.1007/s13320-018-0504-y
- [42] L. Bucciarelli, *Engineering Mechanics for Structures*. Mineola, NY, USA: Courier Dover Publications, 2009.
- [43] R. Serway y J. Jewett, *Physics for Scientists and Engineers*. Boston, MA, USA: Cengage, 2019.
- [44] K. Yuksel *et al.*, “Implementation of a Mobile Platform based on Fiber Bragg Grating Sensors for Automotive Traffic Monitoring”, *Sensors*, vol. 20, n.º 6, 2020, pp. 1-10, doi: 10.3390/s20061567
- [45] T. Li *et al.*, “A Fiber Bragg Grating Sensing-Based Micro-Vibration Sensor and its Application”, *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, n.º 4, 2016, pp. 1-14, doi: 10.3390/s16040547
- [46] C. Waltermann *et al.*, “Multiple Off-Axis Fiber Bragg Gratings for 3D Shape Sensing”, *Applied Optics*, vol. 57, n.º 28, 2018, pp. 8125-8133, doi: 10.1364/ao.57.008125
- [47] Z. F. Wang *et al.*, “Development and Application of Smart Geogrid Embedded with Fiber Bragg Grating Sensors”, *Journal of Sensors*, vol. 2015, n.º 108209, 2018, pp. 1-10, doi: 10.1155/2015/108209
- [48] G. Álvarez-Botero *et al.*, “Optical Sensing using fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications”, *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 20, n.º 2, 2018, pp. 33-38, doi: 10.1109/MIM.2017.7919131

