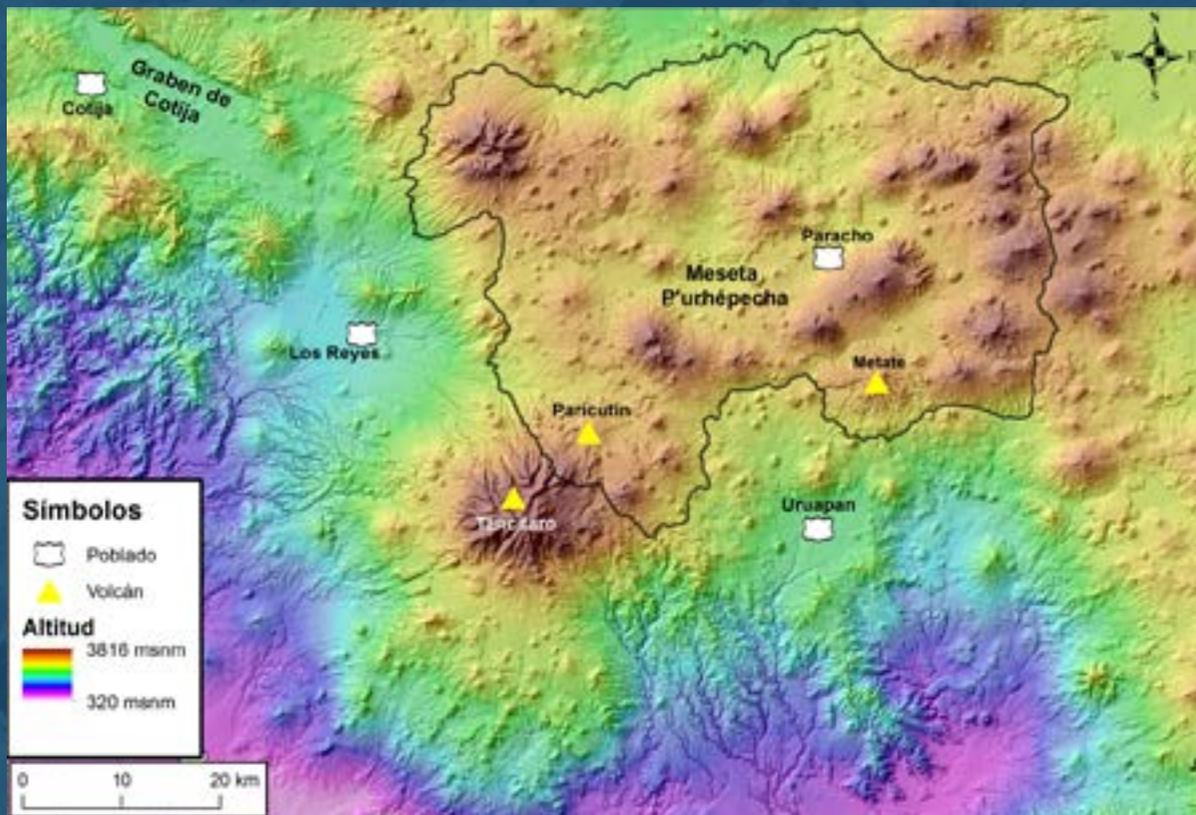


# Ciencia Nicolaita 82



## Contenido

### **Presentación**

Pedro Corona Chávez (editor) 4

**Volumen especial “Geofísica, peligros naturales y medio ambiente”  
Ana Teresa Mendoza Rosas y Ricardo Vázquez Rosas  
Editores invitados**

### **Exploración sísmica de refracción mediante ruido sísmico**

Mariana Guadalupe Heredia Martínez, Jorge Aguirre González, Iván Granados Chavarría 5

### **Tectónica y sismicidad en la Región Volcánica Parícutin-Tancítaro, Michoacán, México**

Daniel Alberto Gómez-Calderón, Diana Cinthia Soria-Caballero, Pedro Corona-Chávez 23

### **Aplicación de VolcFlow para simular Avalanchas de Escombros y CDP en los volcanes Popocatepetl, Volcán de Colima y Ceboruco**

Enrique Cárdenas-Sánchez, Luis Eduardo Frías Gómez, Elis Olivia Rangel Flores, Oscar Dionicio Reyes Mendoza y Francisco Valencia Alcaraz 39

### **La lógica de la gestión del riesgo volcánico**

Servando De la Cruz Reyna 59

### **Geodesia aplicada al monitoreo de desplazamientos de una ladera inestable y la influencia de la precipitación, durante el período 2008-2011, Teziutlán, Puebla**

Ángel Gómez-Vázquez y Ana Teresa Mendoza-Rosas 65

## Miscelánea

- Caracterización de un holograma mediante el dopaje de un PDLC con violeta de genciana**  
Mauricio Ortiz Gutiérrez, Mario Pérez Cortés, Juan Carlos Ibarra Torres,  
Jorge Lugo Jiménez, Otilio Santos Aguilar, Maritza De Coss Gómez 81
- Estudios de repetibilidad y reproducibilidad de métodos no destructivos en maderas angiospermas**  
Javier Ramón Sotomayor Castellanos, René Navarrete Padilla 89
- Transformadores de Potencia con Doble Núcleo: Análisis de respuesta a la frecuencia**  
Carlos Pérez Rojas, Sigridt García Martínez 105
- Análisis de las condiciones de iluminación en las aulas del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Guanajuato, de acuerdo con la NOM-025-STPS-2008 y NOM-007-ENER-2014**  
Luis Elías Chávez Valencia, César Leonardo Ruiz Jaime y Elia Mercedes Alonso Guzmán 119

## Presentación

En las ediciones anteriores, hasta marzo 2021, la revista **Ciencia Nicolaita** incluía las áreas de Ciencias Sociales y Humanidades. A partir del presente número de septiembre de 2021, **Ciencia Nicolaita** se restringe a difundir contribuciones en las áreas del conocimiento de Físico Matemáticas, Ciencias de la Vida, Ecología y Ambiente, Ciencias de la Tierra, Ciencias Agro y Químico Biológicas, Ciencias de la Salud, Ingeniería Química, Metalurgia y Materiales, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecánica y Arquitectura e Ingeniería Civil.

A partir de esta misma fecha las contribuciones de las áreas de Ciencias Sociales y Humanidades se publicarán en la revista de nueva creación **Dicere**, la cual también será editada en versión electrónica por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

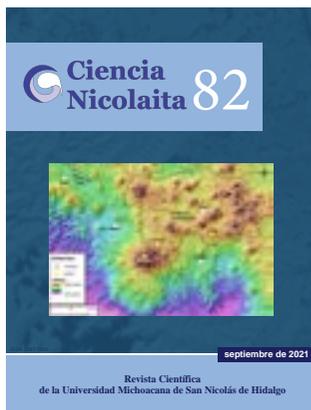
El número 82 de la revista **Ciencia Nicolaita** se propone iniciar una nueva época. Por un lado, se presenta una nueva imagen y enlaces que buscarán alcanzar una proyección con diferentes acreditaciones a nivel nacional e internacional; por otro lado, las ediciones futuras se basarán esencialmente en la publicación de **Volúmenes Monográficos** relacionados con las diversas áreas del conocimiento de ciencias, ingeniería y arquitectura, con énfasis en las investigaciones activas de la UMSNH como núcleo del contenido, pero mantiene la búsqueda permanente de lograr un alcance externo a nivel nacional e internacional.

El número 82 de la revista **Ciencia Nicolaita** representa el primer volumen monográfico: “**Geofísica, peligros naturales y medio ambiente**”. La emisión de la convocatoria, así como el cuidado de la revisión y edición de cinco valiosas contribuciones estuvieron a cargo de **Ana Teresa Mendoza Rosas y Ricardo Vázquez Rosas**, destacados jóvenes investigadores de cátedras de Conacyt y del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad Michoacana. De este modo, este volumen especial incluye diferentes tópicos de geofísica y geociencias que se han aplicado para tener un mejor conocimiento del interior de la tierra, mediante estudios experimentales y de casos naturales de estudio, así como investigaciones de modelado teórico, físicos y matemáticos.

El número 82 de la revista **Ciencia Nicolaita** mantiene su compromiso para difundir contribuciones de diversas áreas del conocimiento, incluyendo también, en la sección de miscelánea, cuatro contribuciones de las áreas de física e ingeniería eléctrica, de materiales e ingeniería civil.

Esperamos que el contenido de este número y en especial la propuesta de edición de volúmenes monográficos pueda ser un estímulo para la publicación de los avances de cada área del conocimiento, así como de esta manera poder capturar un mayor número de lectores a nivel nacional e internacional.

Pedro Corona Chávez  
Editor



## **Exploración sísmica de refracción mediante ruido sísmico**

**Mariana Guadalupe Heredia Martínez, Jorge Aguirre González, Iván Granados Chavarría**

Para citar este artículo: Heredia Martínez Mariana Guadalupe, Aguirre González Jorge, Chavarría Iván Granados. 2021. Exploración sísmica de refracción mediante ruido sísmico. Ciencia Nicolaita, número 82, 5-22. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi82.555>.

---

Ver material suplementario

---

Publicado en línea el 30 de septiembre de 2021

---

Envíe su artículo a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

---

# Exploración sísmica de refracción mediante ruido sísmico

Mariana Guadalupe Heredia Martínez<sup>1,2</sup>, Jorge Aguirre González<sup>1\*</sup>,  
Iván Granados Chavarría<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura - Ticomán,

<sup>3</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra

## HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 11 de enero de 2021

Aceptado: 22 de febrero de 2021

## RESUMEN

En este estudio se obtuvo un perfil de refracción sísmica usando registros de ruido sísmico. Las señales fueron registradas en un tendido de refracción ubicado al poniente de la ciudad de México. El tendido consistió en un arreglo horizontal lineal de 24 geófonos de componente vertical, separados cada 2 metros uno del otro y con una duración total de 175 minutos. El perfil de refracción virtual se construyó a partir de la correlación cruzada de los registros de ruido sísmico de los 24 geófonos. Cada traza de refracción virtual se obtuvo mediante el apilado de las correlaciones para todas las ventanas de tiempo entre pares de estaciones. En el procesamiento de señales se ensayaron diferentes aplicaciones de normalización, con el objetivo de recuperar el arribo de la onda P. Se calcularon tres perfiles de refracción sísmica que corresponden a fuentes virtuales situadas en el centro y extremos del tendido. Los perfiles virtuales obtenidos se compararon con los perfiles de refracción sísmica convencional, mostrando claramente la recuperación de los primeros arribos de la onda P de manera clara mejorando incluso la definición de las trazas de la refracción convencional. Para asegurar que las ondas recuperadas corresponden a ondas de cuerpo, y no a ondas superficiales, se realizó un análisis FK, donde claramente se aprecia la distinción entre ambos tipos de onda.

**PALABRAS CLAVE:** Refracción con ruido sísmico, interferometría, sísmica pasiva, correlación cruzada, zonas inestables.

## ABSTRACT

A seismic refraction profile was obtained using seismic noise records. The waveforms were recorded on a refraction line located west of Mexico City. Horizontal linear array consisted of 24 vertical component geophones spaced 2 meters apart and a record length of 175 minutes. The virtual refraction profile was constructed from the cross-correlation of the seismic noise records from the 24 geophones. Each virtual refraction trace was obtained by stacking the correlations for all time windows between pairs of stations. With the aim of recovering the arrival of the P wave signal processing and different normalization applications were tested. Three seismic refraction profiles were calculated corresponding to virtual sources located in the center and ends of the line. To evaluate the recovery of the P waves acquired a spectral analysis of the cross correlations was performed to rule out the use of surface waves in synthetic seismograms. The virtual profiles obtained were compared with the conventional seismic refraction profiles, showing clearly the recovery of the first arrivals of the P wave, even improving the definition of the traces of conventional refraction. In addition, an f-k analysis was performed to discriminate surface waves and obtain only body waves.

**KEYWORDS:** Refraction with seismic noise, interferometry, passive seismic, cross correlation, unstable zones.

## 1. Introducción

La sísmica de refracción ha sido ampliamente usada para obtener la velocidad de propagación de las ondas P en el subsuelo a partir del uso de una fuente activa, pero el uso de sísmica activa con fuentes de gran detonación en zonas geológicamente vulnerables no es recomendable. La aplicación de este método, con detonaciones de gran energía, puede generar un gran impacto en zonas inestables, por ende, tampoco resulta aplicable en áreas urbanas (Reynolds, 2011). Una alternativa es recurrir a técnicas de bajo impacto que usen ruido sísmico en lugar de fuentes activas. La aplicación de interferometría sísmica es una opción viable para la obtención de una respuesta sísmica del subsuelo. Esta técnica disminuye considerablemente cualquier impacto al medio circundante, debido al uso de ruido sísmico. El ruido sísmico es también conocido como microtremores o vibración ambiental y corresponde a todas las vibraciones que son generadas principalmente por ruido antropogénico y fenómenos atmosféricos.

Los microtremores están compuestos principalmente por ondas superficiales: Love y Rayleigh. Sin embargo, se ha demostrado que del ruido ambiental es posible extraer ondas refractadas y ondas reflejadas de cuerpo, a través de la función de Green (Roux *et al.*, 2005; Dragandov *et al.*, 2009).

En este artículo se muestra la viabilidad de poder recuperar ondas de cuerpo compresivas (ondas P) a partir de aplicar la metodología de Interferometría sísmica con ruido sísmico ambiental (Lobkis y Weaver, 2001; Campillo y Paul, 2003). Ésta se aplicó a los registros de microtremores de un arreglo lineal horizontal de 24 geófonos, colocados como en un arreglo de refracción sísmica convencional. Posteriormente los resultados de la interferometría sísmica se comparan con resultados de refracción sísmica

previamente obtenidos con el fin de validar la técnica para simular fuentes virtuales.

## 2. Función de Green y correlación cruzada

En esta sección, se describe el método de interferometría sísmica que fue aplicado a este estudio, la interferometría sísmica es un método de sísmica pasiva, que consiste en construir la función de Green a partir del registro de dos señales sísmicas, generadas por microtremores, donde se utilizan las fuentes del ruido ambiental para recuperar información del subsuelo y crear secciones sísmicas (Waepenaar *et al.*, 2010).

A partir del registro del campo de ondas en dos puntos distintos:  $X_A$  y  $X_B$ , se puede calcular una aproximación de la función de Green  $G(X_A, X_B, t)$  a partir de la correlación cruzada de ambos registros (Campillo y Paul, 2003; Sabra *et al.*, 2005). Con el propósito de adquirir el disparo virtual de ruido sísmico, se recurre a la relación mostrada en la ecuación (1) descrita por Waepenaar (2004).

$$\{G_{p,q}(X_A, X_B, t) + G_{p,q}(X_A, X_B, -t)\} * s(t) = \sum_i^N V_p^i(x_A, -t) * V_q^i(x_B, t) \quad (1)$$

Donde  $G_{p,q}(X_A, X_B, t)$  representa la parte causal y  $G_{p,q}(X_A, X_B, -t)$  la parte no causal de la función de Green, entre dos receptores en las posiciones  $X_A$  y  $X_B$ .

El asterisco indica la operación de convolución temporal. La inversión en tiempo de la función de Green convierte la convolución en una correlación.

Del lado derecho de la ecuación se tiene la sumatoria de los registros de ruido ambiental disponibles.  $V_{p(q)}^i$  representa la componente de la velocidad de la partícula registrada en la dirección  $X_{p(q)}$  ( $p, q = 1, 2, 3$ ) en el  $i$ -ésimo registro de ruido ambiental.

La ecuación (1) establece que la suma de los  $N$  registros de correlación cruzada entre los puntos  $x_A$  y  $x_B$  es igual a la suma de la parte causal y no causal de la función de Green entre receptores convolucionados con la autocorrelación del ruido.

La función de Green contiene todo el campo de ondas radiado por una fuente puntual. Para recuperar la respuesta de refracción para una posición de fuente virtual, se fija una traza a la vez (fija  $x_B$ ) y esta traza se correlaciona con todas las otras trazas de una línea receptora (variable  $x_A$ ). Las correlaciones resultantes permitirán estimar la función de Green en cada posición debidas a una fuente virtual en la posición de la traza fija con la que se obtiene una sección de correlación sísmica (Draganov *et al.*, 2009).

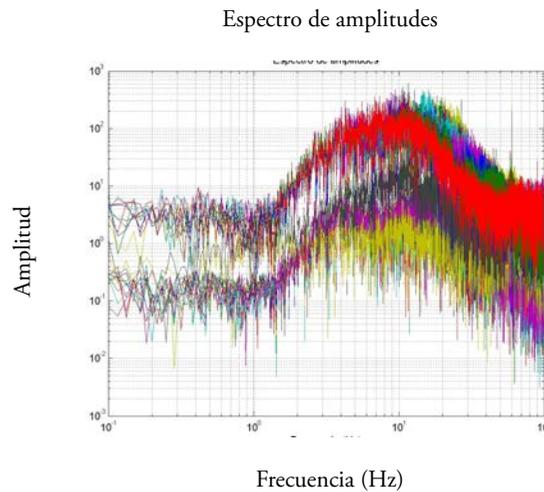
### 3. Metodología

Para recuperar la función de Green se recurrió a la grabación de ruido sísmico a través de la disposición de un arreglo lineal horizontal. Se utilizaron 24 geófonos terrestres componente vertical, con una base de punta, con una respuesta instrumental de 4.5 Hz y espaciados a cada 2 metros. Estos geófonos fueron conectados a un sismógrafo de exploración modelo

GEODE ES-300 de la marca Geometrics, de 24 bits, ancho de banda de 20 kHz de ultra alta resolución (con un muestreo de 8 a 0,02 ms) y baja distorsión (0,0005%).

Los registros fueron grabados con ventanas de 60 segundos con intervalos de muestreo de 2 milisegundos. En total se grabaron 175 minutos de ruido sísmico.

La primera etapa del procesamiento consistió en analizar las señales sísmicas de vibración ambiental, mediante el software de Matlab. En primera instancia se descartaron eventos de gran amplitud ya que afectaban el comportamiento local de la señal, debido a que se encontraban en una zona de tránsito vehicular. Además, cabe mencionar que el registro de la señal se realizó en un horario de trabajo habitual. Se calculó el espectro de amplitud de cada uno de los 24 canales con la finalidad de conocer la distribución de la energía en todos los registros, para después determinar la banda de frecuencias de interés. En la [figura 1](#) se muestran los promedios de los espectros de las 175 ventanas de un minuto para cada uno de los 24 geófonos en distintos colores. Se puede observar claramente que las frecuencias que dominan en los datos sísmicos, aquellas que tienen mayor amplitud, están en la banda de frecuencias entre 5 y 50 Hz aproximadamente.



**FIGURA 1.** Espectro de amplitud de Fourier de cada uno de los 24 canales.

Se aplicó un filtro pasa bandas a las 24 trazas, con una frecuencia mínima de 4.5 Hz y una frecuencia máxima de 50 Hz. Mediante este procedimiento nos enfocamos en el estudio de una banda de frecuencias que está dentro de la parte de la señal más energética, para posteriormente calcular la correlación cruzada entre los registros en todo el arreglo lineal horizontal.

Primero se calcularon las funciones de correlación cruzada en lapsos de 60 segundos de

registro simultáneo por cada par de estaciones. Luego, las funciones de Green se obtuvieron al apilar las 175 funciones de correlación cruzada resultantes. Por ejemplo, usando la traza del geófono 12, ésta se correlaciona con las 23 trazas de los geófonos restantes y consigo misma (auto correlación). Las 24 trazas sintéticas obtenidas (funciones de Green) se grafican formando la sección sísmica que emula un tiro en la posición del geófono 12 (Figura 2).

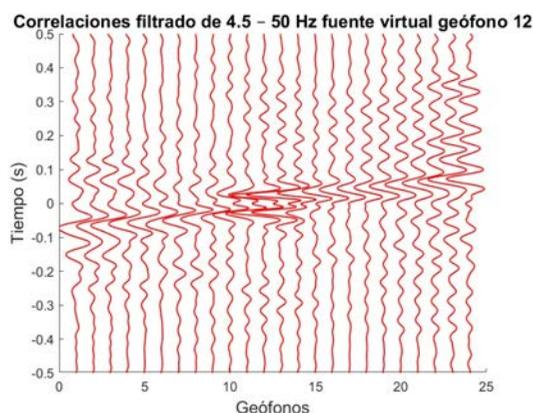


FIGURA 2. Sección sísmica creada a partir de las correlaciones del geófono 12.

La figura 2 se dividió en dos partes tomando el tiempo cero como referencia: la parte no causal (parte con el tiempo negativo) y la parte

causal (parte con el tiempo positivo). Ambas partes se muestran por separado en la figura 3.

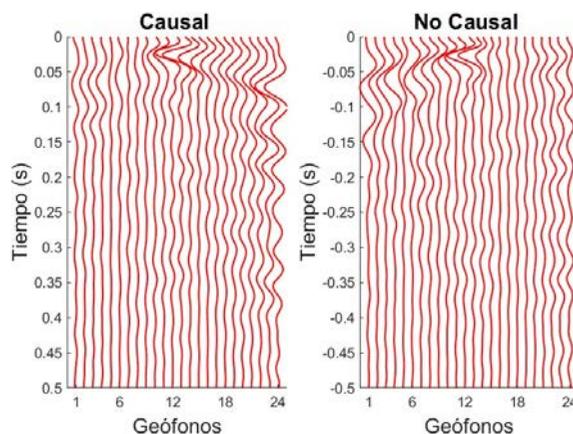
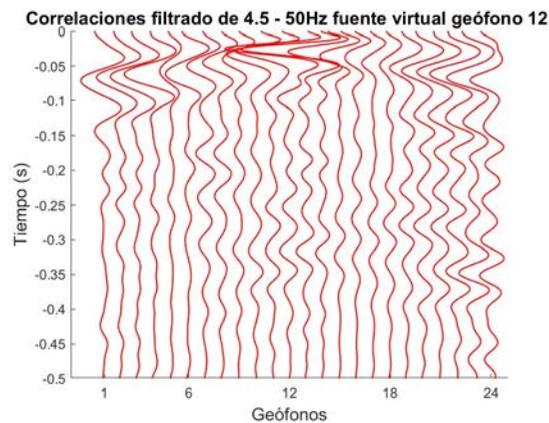


FIGURA 3. División de partes no causal y causal tomando como fuente virtual el geófono 12.

En la [figura 3](#) se observa que las funciones de Green no son simétricas, es decir, no es igual la amplitud de la parte causal y de la no causal. Esto puede deberse a una distribución no homogénea del flujo de energía de las ondas presentes en el ruido sísmico (Van Tiggelen, 2003; Paul *et al.*, 2005). Durante la adquisición de los datos, se identificaron algunas fuentes potenciales de ruido. De un lado se encuentra una presa con la presencia de un cuerpo de agua y tránsito vehicular constante en una avenida cercana. Estos representan un gran aporte de fuentes y concentran un mayor intervalo de frecuencias en el ruido sísmico.

Una práctica común en estudios de interferometría sísmica es la de sumar ambas partes (causal y no causal) para reforzar la relación señal a ruido (Sabra *et al.*, 2005; Spica *et al.*, 2016). Sin embargo, también se ha observado que al usar ambas partes de la función de Green aporta información más completa que al sumarlas (Granados *et al.*, 2019). En el presente estudio la suma de ambas partes ayuda a reforzar la relación señal a ruido. Esto es mostrado en la [Figura 4](#), donde podemos notar que se definen mejor los trenes de onda.



**FIGURA 4.** Suma de ambas partes de la función de Green parte causal y no causal.

La sección sísmica generada muestra un realce de las diversas fases en las señales debido a que la suma de ambas partes de la función de Green enfatiza la señal coherente. Se efectuaron diferentes pruebas para identificar aquellos procesos que resaltarán de mejor manera las fases de la señal. Estas pruebas consistieron en aplicar una serie de normalizaciones a las trazas.

La importancia de normalizar es proveer una ecualización de las señales para que contribuyan de manera equitativa a la mejoría de la relación señal-ruido sísmico.

Para mostrar el efecto de las diferentes normalizaciones probadas, usaremos las secciones sísmicas generadas a partir de las correlaciones

utilizando como fuente virtual el registro del canal número 12.

En la [Figura 5](#) se muestra la aplicación de normalización temporal del tipo *one-bit* la cual retiene sólo el signo de la señal sin procesar, reemplazando todas las amplitudes positivas con un valor de 1 y todas las amplitudes negativas con un -1 (Cupillard *et al.*, 2011; Bensen *et al.*, 2007). Esta normalización se aplicó a las trazas originales en el dominio del tiempo. Como podemos observar en la [Figura 5](#), la normalización incrementa la relación señal-ruido en comparación con las correlaciones mostradas en la [Figura 4](#), donde no se ha aplicado. Sin embargo, la definición de los trenes de onda es desvanecida, es decir, se pierde el seguimiento de los trenes de onda.

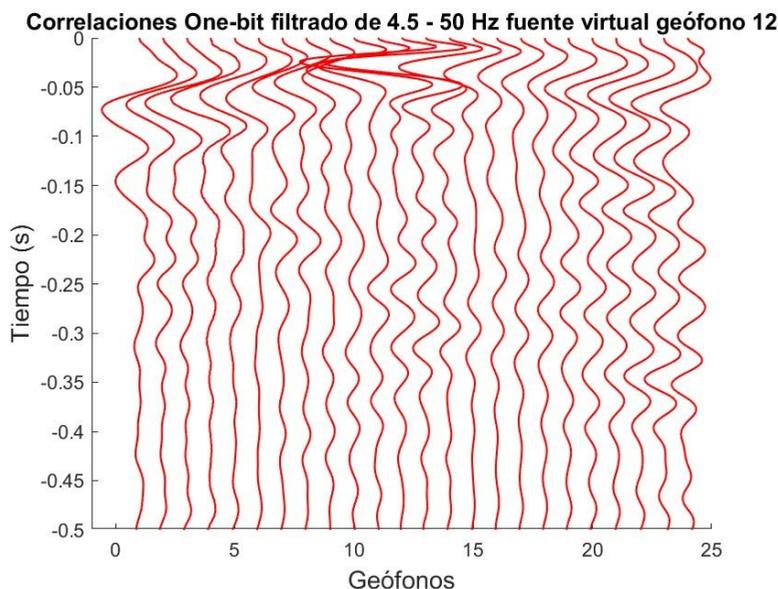


FIGURA 5. Aplicación de normalización one-bit, sobre la sección sísmica.

Posteriormente se aplicó una normalización llamada *whitening*. Esta normalización consiste en homogenizar la amplitud del espectro de amplitud de Fourier de cada traza en el intervalo de frecuencias de interés (Bensen *et al.*, 2007). Una vez aplicada la normalización el espectro

se anti-transforma para obtener la traza en el dominio del tiempo. Las correlaciones se realizan con ventanas de 1 segundo y un traslape del 50%. La sección resultante de esta normalización se muestra en la Figura 6.

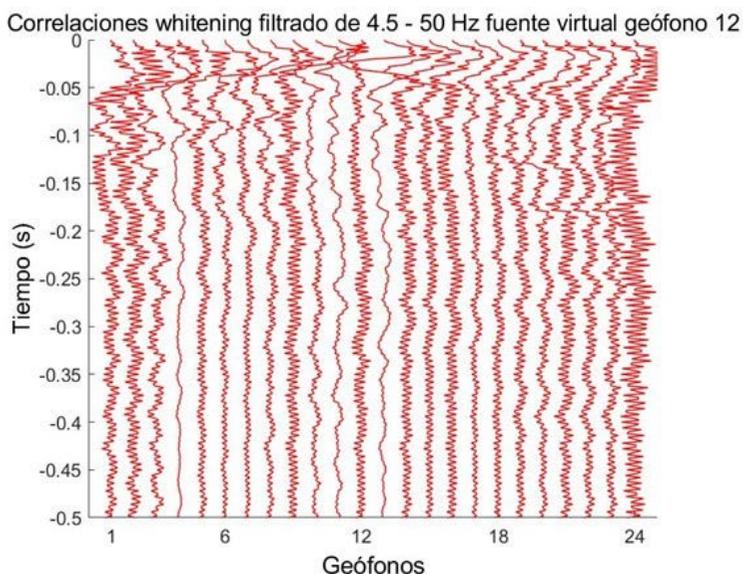


FIGURA 6. Secciones sísmicas con aplicación de whitening con un rango de frecuencia de 4.5 a 50 Hz.

Al aplicar la normalización espectral “*whitening*” en las señales de ruido sísmico, se observó una amplificación en las señales de alta frecuen-

cia y, con ello, una disminución de la coherencia de los trenes de onda.

Al analizar las señales después de los procesos de normalización (*one-bit* y *whitening*), se observó una disminución en la definición de los trenes de ondas resultantes (Figuras 5 y 6), en comparación con las señales al usar únicamente un filtrado pasa-bandas (Figura 4). Por esta razón se descartó el uso de estas normalizaciones durante la etapa de preprocesamiento, y se empleó únicamente el filtrado pasa-bandas de frecuencias entre 4.5 y 50 Hz.

#### 4. Resultados: comparación de fuente virtual y fuente real

Para demostrar la presencia de las ondas P en los registros de ruido sísmico, se compararon las sec-

ciones del arribo de la onda P obtenidas con refracción sísmica de fuente activa con las secciones de la onda P obtenidas a partir de ruido sísmico.

El estudio de refracción de fuente activa, se realizó utilizando la misma disposición del arreglo e instrumental sísmico empleado en la grabación de vibración ambiental. Se utilizó un marro como fuente generadora de ondas sísmicas y se realizaron cinco tiros, dos a un metro de separación de los extremos del arreglo, una al centro y dos más intermedias (Figura 7 y 8). Posteriormente las señales fueron procesadas con el programa pickwin© donde se identificaron los arribos de las ondas P en cada geófono. A partir de los primeros arribos se construyeron las dromocronas correspondientes y se obtuvo un modelo de velocidades (Heredia, 2017).

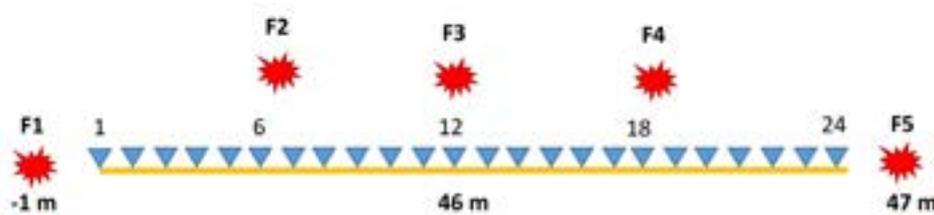


FIGURA 7. Diagrama de distribución de fuentes en refracción sísmica convencional.

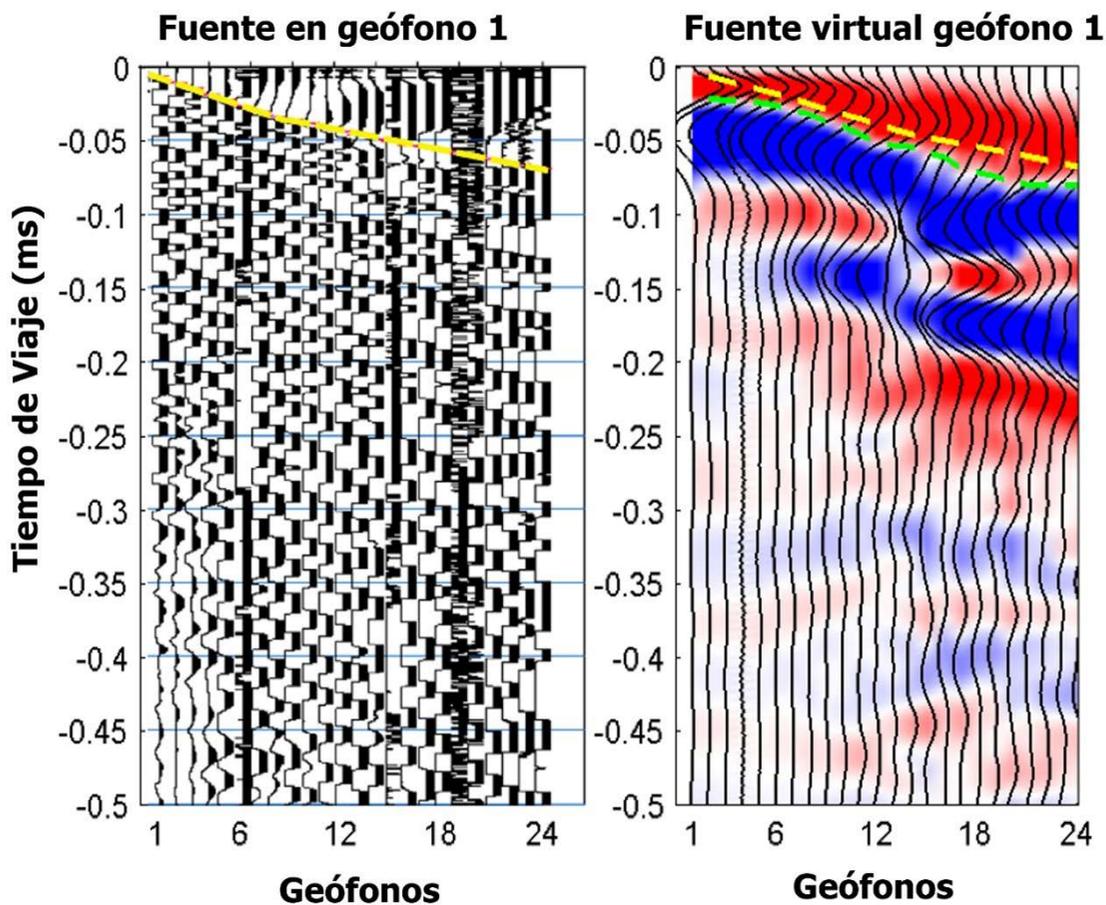


FIGURA 8. Utilización de marro como fuente de refracción sísmica convencional.

Una vez obtenidos los veinticuatro registros de ruido sísmico correspondientes al arreglo lineal, se tomó un registro sísmico de un canal y éste se correlacionó con cada uno de los veintitrés registros restantes y posteriormente fueron apilados en una sección, gracias a esto, se observó un comportamiento similar al de un arribo de ondas sísmicas P generado por un disparo real, es decir una fuente sísmica activa (detonación de golpe con marro). Es por ello que se consideró llamar fuente virtual a partir de la obtención de esta sección. Como ejemplo se muestra en la figura 9 la comparación de una sección apilada de fuente real ubicada al geófono uno y una de fuente virtual utilizando el registro del

geófono uno correlacionado y apilado contra los 23 restantes.

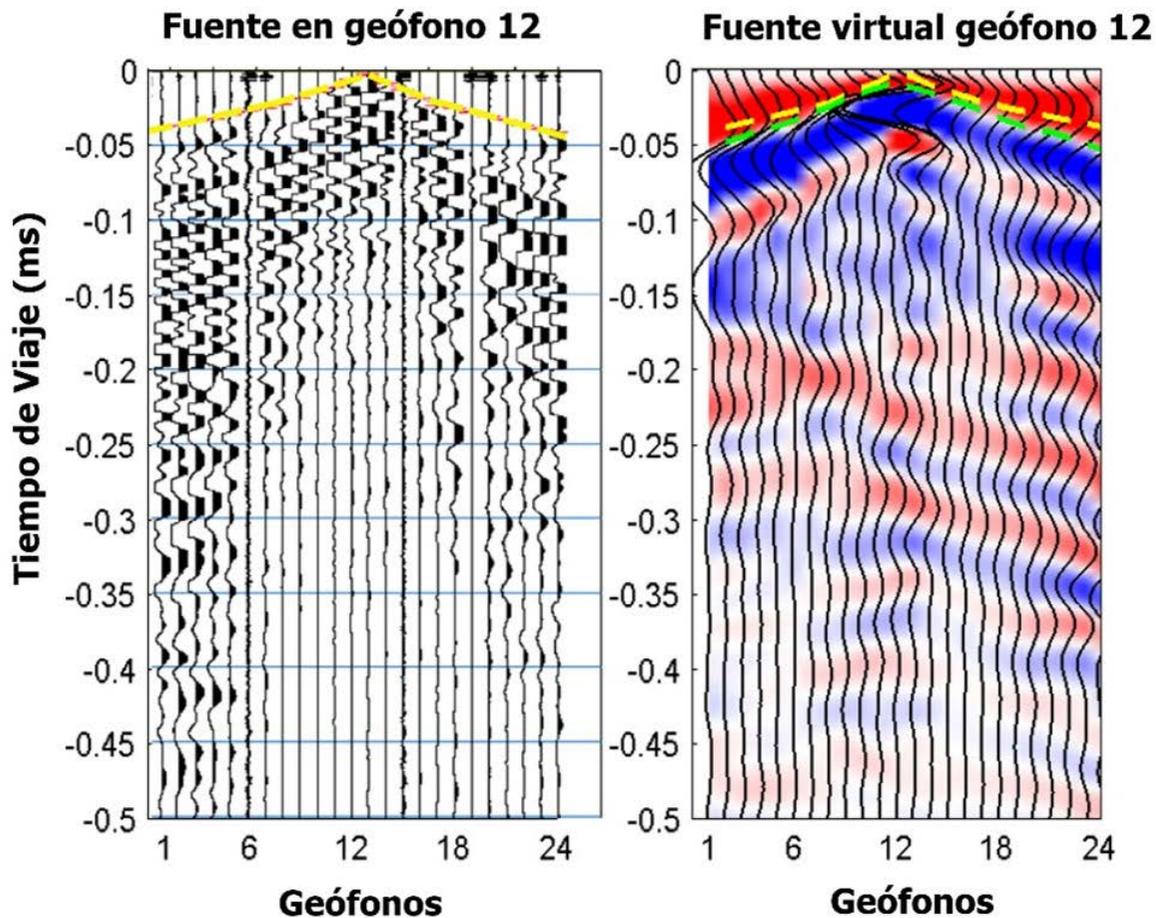
Los arribos de las ondas P en la sección de la fuente virtual están mejor definidos que en la de la fuente real. En la sección de la fuente real de la figura 9 no son claros los arribos de las ondas P en los geófonos 20 al 24, pero en la sección de fuente virtual sí aparecen bien definidos. Se realizó un picado del arribo de la onda P para la sección real usando una línea amarilla. Esta misma línea se sobrepone en la sección de fuente virtual junto con una línea verde que corresponde al picado de la onda P para la fuente virtual. Es claro observar que existe una diferencia de cambios de pendientes entre ambas líneas.



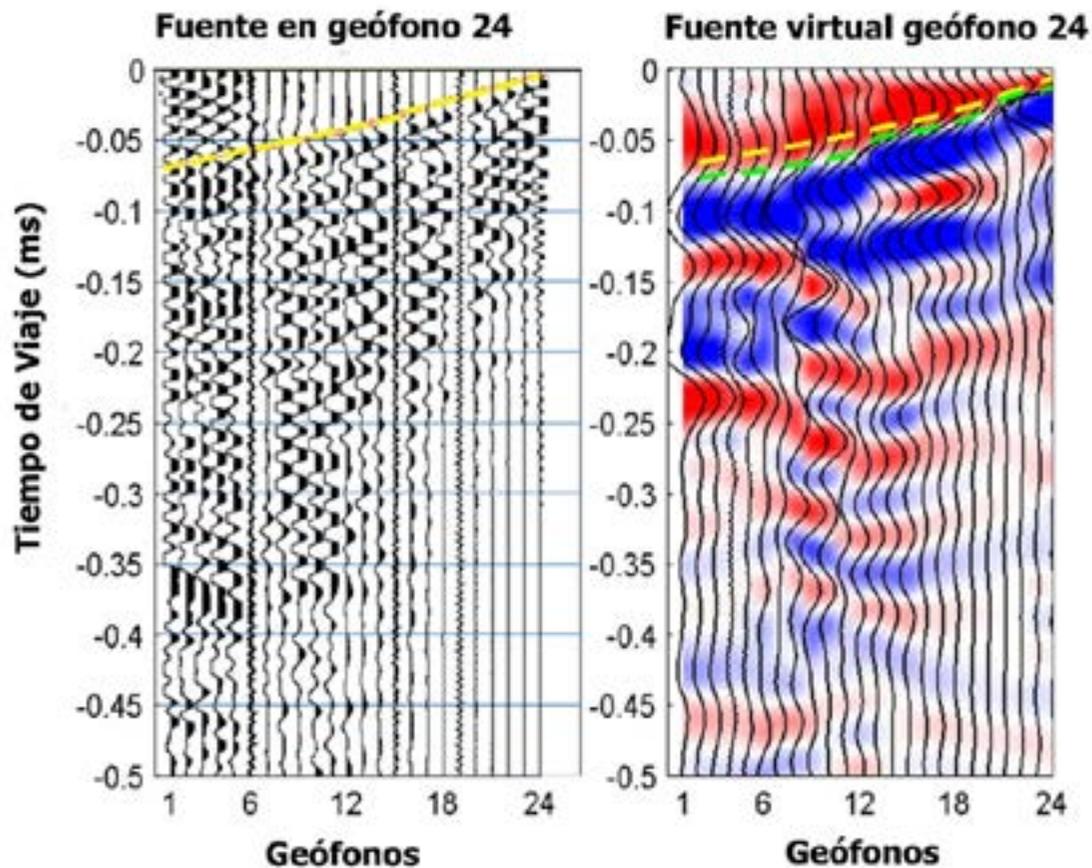
**FIGURA 9.** Comparación de secciones obtenidas con fuente real (izquierda) y con fuente virtual (derecha). En ambos casos la fuente está ubicada en el geófono 1.

En la [figura 10](#) se realiza el mismo procedimiento llamándola fuente dos, que utiliza los registros del geófono 12. Aquí vemos una clara diferencia entre el picado del arribo de la onda P en ambas secciones. Por otra parte, la fuente tres toma los registros del geófono 24 ([figura 11](#)), y observamos que las

trazas de los geófonos del 1 al 5 no son claras en la sección de fuente real, pero en la sección de fuente virtual los arribos son claros y congruentes con el resto de la sección, lo que permite al intérprete estimar apropiadamente la llegada de la onda P.



**FIGURA 10.** Comparación de imagen fuente real (izquierda) con la fuente virtual (derecha). En ambos casos la fuente está ubicada en el geófono 12.



**FIGURA 11.** Comparación de imagen fuente real (izquierda) con la fuente virtual (derecha). En ambos casos la fuente está ubicada en el geófono 24.

En las figuras 9, 10 y 11 se observó una relación similar en cuanto al arribo de las ondas P tanto para la fuente real como para la fuente virtual. Esto demuestra la posibilidad de generar perfiles de refracción sísmica a partir del uso de ruido sísmico ambiental. Bajo esa premisa se consideraron los nuevos picados del arribo de ondas P recabados en la sección de refracción con fuente virtual. Éstos fueron acondicionados al módulo plotrefra de pickwin© con el fin de

seguir un procesamiento de refracción sísmica convencional. A través de este ajuste, se crearon dromocronas, con las curvas de viaje distancia-tiempo del arribo de la onda P para cada una de las tres fuentes. De igual forma se construyeron las dromocronas a partir de las cinco fuentes reales. La comparación entre las dromocronas obtenidas a partir de la fuente real contra la fuente virtual aparecen en la Figura 12.

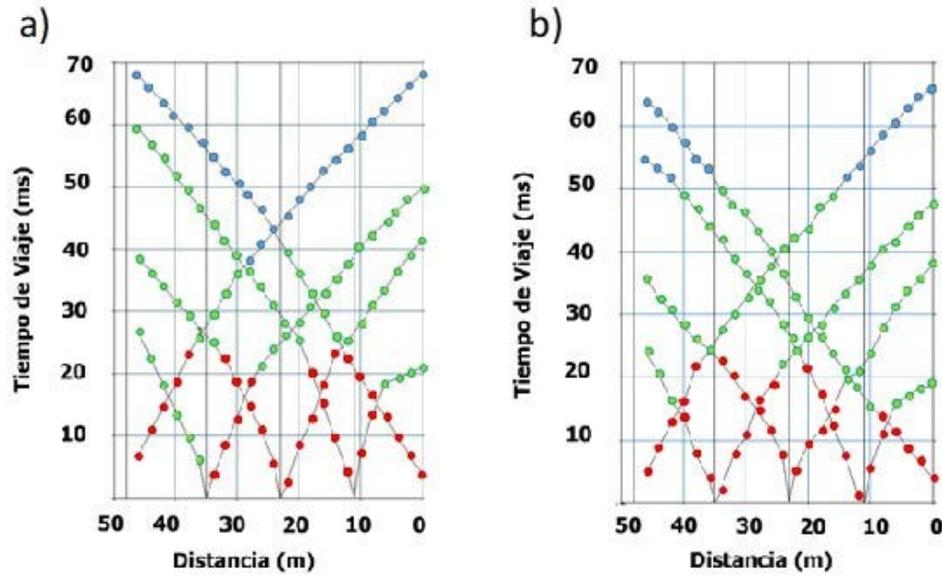


FIGURA 12. Comparación de dromocronas: a) fuente real y b) fuente virtual.

En la figura 12 se observa que las dromocronas de la fuente real tienen pendientes con mayor inclinación en comparación con las de la fuente virtual donde se presentan curvaturas más suaves. Por otro lado, en los tiros largos los arribos de la onda P no se apreciaron en los geófonos más alejados en las secciones de fuente real a diferencia de las de fuente virtual, donde los arribos de la onda P se observan con claridad incluso en los geófonos más distantes a la fuente. En las dromocronas de la Figura 12a y 12b se observan ligeros cambios en la inflexión de las curvas que corresponden a cambios de velocidad. De acuerdo a las inflexiones se asignaron 3 capas de

diferente velocidad. Tanto en la Figura 12a como en la Figura 12b se muestra la capa más somera con los puntos de color rojo. La segunda capa es representada en puntos de color verde y el semi-espacio con puntos de color azul.

Una vez seleccionadas las diferentes capas de la fuente real y fuente virtual, se aplicó un cálculo de inversión por el método Time Term Inversión (manual de seisimager/2D/SW), para generar un modelo bidimensional de variaciones de velocidad de onda P. En la figura 13 se muestran los perfiles de velocidad de onda P obtenidos a partir de la fuente real (fuente activa) y de la fuente virtual (con ruido sísmico).

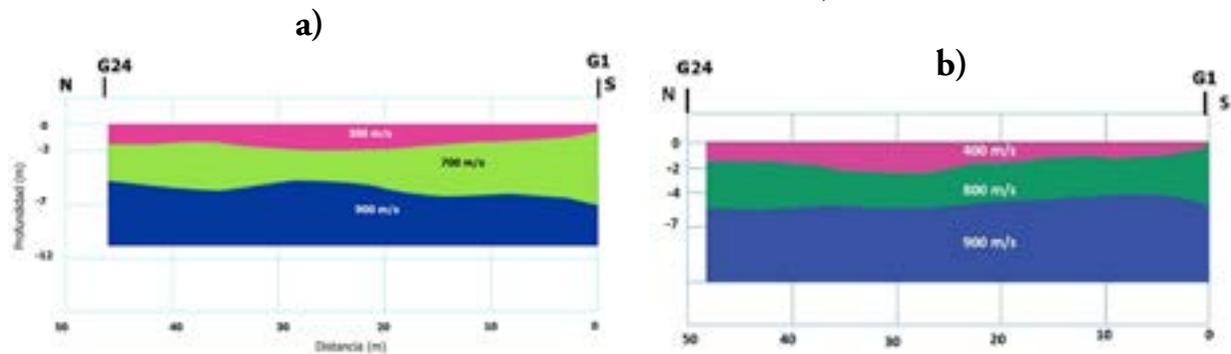


FIGURA 13. Comparación de perfiles de velocidad onda P a) fuente real y b) fuente virtual.

Los dos modelos constan de tres capas y coinciden en estimar la velocidad del semiespacio en 900 m/s. Pero los dos modelos discrepan en la forma y velocidad asignada a los dos estratos superficiales. El modelo generado con ruido sísmico presentó un incremento de 100 m/s para las dos capas superficiales en comparación con el modelo de fuente real. Dicha variación de velocidad se debe a dos cosas: por un lado, el aporte de distintas fuentes que están distribuidas aleatoriamente en el terreno (esto puede verse afectado por el tránsito vehicular y fuentes antropogénicas). Por otro lado, el ajuste de las nuevas dromocronas creadas a partir de las secciones virtuales, las cuales definen aún mejor el arribo de la onda P en comparación con la sección obtenida con refracción convencional. El modelo de refracción con interferometría permite seleccionar el picado del arribo de la onda P con más claridad y de ello se derivan cambios en las pendientes traduciéndolos como diferentes velocidades.

## 5. Discusión de resultados

La mayor parte de la energía que contiene el ruido sísmico son ondas superficiales. Esto no es raro por dos razones: 1) porque las fuentes que generan el ruido sísmico se encuentran en la superficie y 2) porque las ondas superficiales se atenúan menos que las ondas de cuerpo (Bard, 1999). Por ello muchos métodos de exploración que usan registros de ruido sísmico se basan en el análisis de la dispersión de ondas superficiales (SPAC, interferometría de ruido sísmico, f-k, etc.) (Okada, 2003; Campillo y Paul, 2003; Stehly *et al.*, 2006; etc). Resulta entonces más difícil identificar y resaltar las ondas de cuerpo a partir de registros de ruido sísmico. Para poder validar que las señales obtenidas en este trabajo corresponden a la reconstrucción

de ondas superficiales y ondas de cuerpo (útiles para estudios de refracción sísmica), se realizó un análisis de tiempo–frecuencia de la función de Green calculada entre los geófonos 12 y 24 (Figura 14). En esta gráfica se puede observar que hay una distinción de dos diferentes paquetes de ondas:

El primer paquete de ondas se ubica entre 6 y 10 Hz, y con tiempos de correlación variables y que llegan a tomar valores de hasta 0.025 s. Se puede observar que la energía de las ondas de diferente frecuencia llega a tiempos diferentes, una característica propia de las ondas superficiales (dispersión).

El segundo paquete de ondas, ubicado entre 12 y 25 Hz y con un tiempo de correlación aproximado de 0.035 s, no muestra un carácter dispersivo. Esto significa que las ondas que se propagan con este rango de frecuencias se mueven a la misma velocidad, tal como se comportan las ondas de cuerpo.

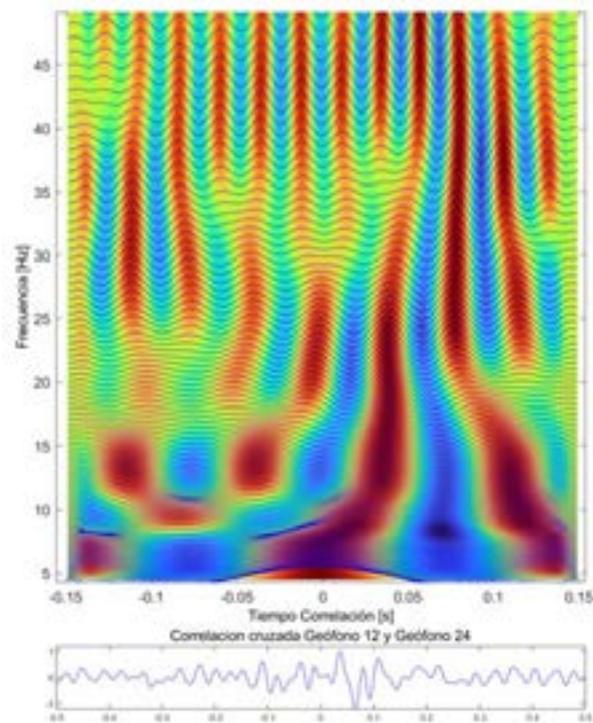
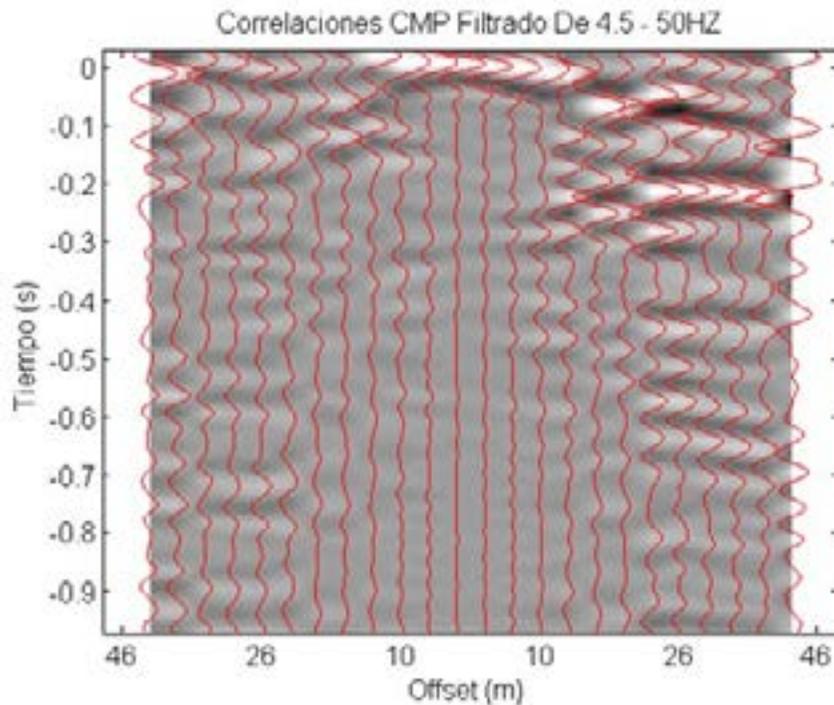


FIGURA 14. Análisis de filtrado de frecuencias.

Otra forma en que demostramos la presencia de ondas P en las secciones sísmicas es a través de una discriminación de ondas superficiales como se realiza en estudios de reflexión (Roux, 2005). Para realizar la discriminación de ondas superficiales, se creó una sección sísmica a partir de CMP (common midpoint) (Schuster *et al.*, 2004; Wapenaar, 2004; Shearer, 2009) virtual

por medio de correlaciones de ruido. Es decir, correlacionamos las trazas de los geófonos 1 y 24, las trazas de los geófonos 2 y 23, hasta las trazas de los geófonos 12 y 13. De esta forma las trazas de los geófonos 1 a 12 funcionaron como fuentes virtuales y los geófonos 13 a 24 como receptores (Figura 15).

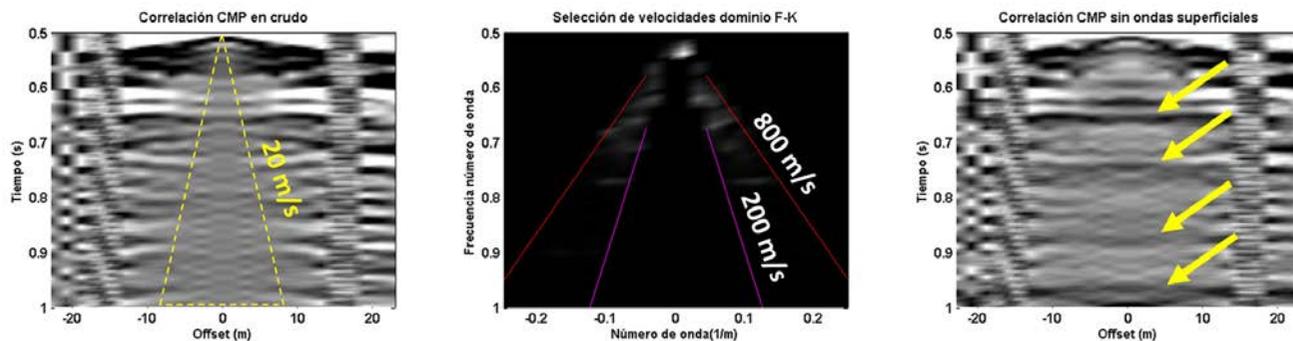


**FIGURA 15.** CMP de fuentes virtuales.

A fin de identificar las ondas de cuerpo, se realizó un análisis f-k (frecuencia - número de onda), lo cual es más fácil que en el dominio del tiempo (Stein y Wysession, 2003).

En la figura 16 se muestra en el primer recuadro el mapa de color del CMP de las trazas previamente adquiridas en el dominio del tiempo (Figura 15), en el segundo recuadro se muestra el mapa de color en dominio f-k, donde se apli-

có un filtro pasa bandas de velocidades sísmicas entre 200 y 800 m/s (líneas punteadas roja y magenta, respectivamente), con el fin de discriminar las ondas superficiales (frecuencia baja, número de onda alto). En el tercer recuadro se muestra el mapa de color del CMP filtrado, nuevamente en el dominio de tiempo-distancia, atenuando la presencia de las ondas superficiales y resaltando la presencia de ondas de cuerpo.



**FIGURA 16.** Análisis de filtrado de frecuencias, utilizando filtro f-k. En la primera imagen de izquierda a derecha tenemos las correlaciones cruzadas ordenadas como un CMP; el cuadro amarillo representa la región donde se encuentran ondas de baja velocidad (superficiales). En la segunda imagen se tiene el mismo CMP en el dominio f-k y los rangos de velocidades para preservar las ondas de cuerpo (200-800 m/s, líneas punteadas roja y magenta, respectivamente). El tercer recuadro corresponde al CMP filtrado, nuevamente en el dominio de tiempo–distancia y donde se pueden apreciar algunos reflectores (flechas amarillas) que no se apreciaban con los datos crudos.

La comparación de estas imágenes muestra una iluminación más clara de las ondas de cuerpo recuperadas con la correlación cruzada de ruido ambiental (flechas amarillas), al atenuar las ondas superficiales, las cuales se encuentran contenidas dentro de un rango de velocidades por debajo de 20 m/s (triángulo amarillo).

## 6. Conclusiones

En este estudio se obtuvo un perfil de usando registros de ruido sísmico. Este perfil se construyó a partir de la correlación cruzada de los registros de ruido sísmico de 24 geófonos. Las correlaciones apiladas permiten la obtención de la función de Green que contiene todo el campo de ondas incluyendo las ondas P. La variación de la respuesta en la función de Green es influenciada por la distribución espacial de las fuentes de ruido, la complejidad del medio y la longitud del registro. El perfil de refracción virtual estuvo en concordancia e incluso mejorando la definición de un perfil de refracción de fuente activa real.

Con la inversión de las dromocronas se obtuvo un perfil de velocidad de onda P con 2 capas y un semiespacio. Para la primera capa se asignó una velocidad de 400 m/s, para la segunda capa una velocidad de 800 m/s y 900 m/s para el semi-espacio.

Este trabajo ha mostrado que el proceso de correlación no sólo es útil para mostrar el viaje de las ondas Rayleigh, sino también el viaje de las ondas de cuerpo P.

La calidad de la recuperación de la respuesta depende de las características del tiempo y la frecuencia, así como la distribución de las fuentes de ruido, la complejidad del medio y la longitud del registro.

Este experimento ofreció una buena oportunidad para evaluar la interferometría sísmica y la obtención de refracción sísmica a partir de estas señales. Es recomendable el uso de un tiempo de registro largo, en este caso el registro total fue de 175 minutos.

Se observó que al utilizar ruido sísmico para la recuperación de la onda P, se muestra una buena iluminación y clara identificación del primer arribo de las ondas P, incluso para los geófonos

lejanos, cosa que no se logró con las fuentes activas usadas.

Al analizar un CMP construido con estos datos se pudo observar que dentro del rango de velocidades correspondientes a las ondas superficiales (<20 m/s, triángulo amarillo en Figura 16), las ondas de cuerpo se mantenían ocultas. Al filtrar el CMP en el dominio de la frecuencia–número de onda ( $f$ - $k$ ), en un rango de velocidades de 200 a 800 m/s, se pudo discriminar la parte correspondiente a las ondas de cuerpo, las cuales ahora muestran una mejor continuidad dentro del CMP (flechas amarillas, Figura 16).

A partir de los 24 registros de vibración ambiental, fueron construidas y analizadas 5 secciones virtuales al hacer la correlación de las 23 trazas con respecto a la traza donde se localiza la fuente virtual. Una de las ventajas de aplicar este método es que se podrían estudiar numerosas secciones virtuales con tantas fuentes virtuales como el número de estaciones que hayan registrado ruido ambiental.

## Agradecimientos

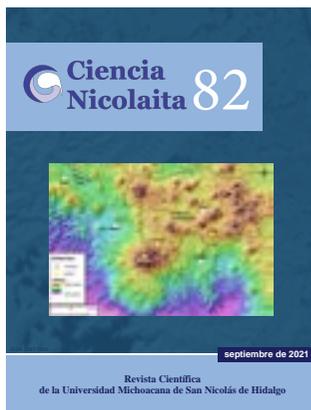
Se agradecen los atinados comentarios y sugerencias de dos árbitros anónimos que contribuyeron a mejorar el presente artículo. Los recursos utilizados para el desarrollo de este trabajo fueron proporcionados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y por los fondos personales de investigación del segundo autor.

## Referencias

- BARD, P. Y. 1999. Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?, The effects of surface geology on seismic motion, Yokohama, Japan, 1–3 December 1998, V. 3: 1251-1279.
- BENSEN, G. D., RITZWOLLER, M. H., BARMIN, M. P., LEVSHIN, A. L., MOSCHETTI, M. P., SHAPIRO, N. M., and YANG, Y. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophysical Journal International*: 1239-1260.
- CAMPILLO, M., PAUL, A. 2003. Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science* 299: 547–549.
- CLAERBOUT, J. F. 1968. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response, *Geophysics*, (33): 264-269.
- CUPILLARD, P., STEHLY, L., B. ROMANOWICZ, B. 2011. The one-bit correlation: a theory based on the concepts of coherent and incoherent noise, *Geophysical Journal International*, 184: 1397-1414.
- DRAGANOV, D., X. CAMPMAN, J. THORBECKE, A. VERDEL, y K. WAPENAR, 2009. Reflection imaging from ambient seismic noise, *Geophysics*, 74 (5): A63–A67.
- GEOMETRICS. 2009. Manual de SeisImager/2D, (versión 3.3 257).
- GRANADOS, I., CALÒ, M. y RAMOS, V. 2019. Noisy Dispersion Curve Picking (NDCP): A
- HEREDIA, M. 2017. Exploración sísmica mediante métodos pasivos y activos de una caverna al poniente de la ciudad de México. (Tesis de licenciatura), Instituto Politécnico Nacional, Ticomán.
- LOBKIS, I. O., WEAVER, R. L., 2001. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. *J. Acoustical Society of America*. 110 (6): 3011–3017.
- MATLAB package for group velocity dispersion picking of seismic surface waves. *Computers and Geosciences*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104315>
- OKADA H. 2003. The microtremor survey method: Society of Exploration Geophysicists of Japan. Translated by Koya Suto, *Geophysical monograph series*, no. 12, Society of Exploration Geophysical, Tulsa.
- PAUL, A., M. CAMPILLO, L. MARGERIN, E. LAROSE, y A. DERODE. 2005. Empirical Synthesis of time asymmetrical Green functions from the correlation of coda waves: *Journal of Geophysical Research*, 110: B08302.
- REYNOLDS, JOHN M. 2011. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. 2nd edition, Oxford, John Wiley and Sons.
- ROUX, P., K. SABRA, P. GERSTOFT, y W. KUPERMAN 2005. P-waves from cross-correlation of seismic noise, *Geophysical Research Letters*, 32: L19303.

- SABRA, K. G., Gerstoft, P., Roux, P., Kuperman, W. A., 2005. Surface wave tomography FROM microseisms in Southern California, *Geophysical Research Letters*, 32.
- SCHUSTER G. T., J. Yu J. Sheng and J. Rickett. 2004. Interferometric/daylight seismic imaging, *Geophysics Journal International*, 157: 838-852
- SHEARER, P. M. 2009. Introduction to seismology, 2<sup>nd</sup> edition. Cambridge, Cambridge University Press.
- SPICA, Z., Perton, M., Calò, M., Legrand, D., Córdoba-Montiel, F., Iglesias, A., 2016. 3-D shear wave velocity model of Mexico and South US: bridging seismic networks with AMBIENT noise cross-correlations (C1) and correlation of coda of correlations (C3), *Geophysical Journal International*, 206: 1795–1813.
- STEHLY, L., Campillo, M., Y Shapiro, N. M., 2006. A study of the seismic noise from its long-range correlation properties, *Journal of Geophysical Research*, 111.
- STEIN, Seth y Wysession, Michael, (2003). An introduction to seismology, earthquakes, and Earth structure, Blackwell Publishing.
- VAN Tiggelen, B.A. 2003. Green function retrieval and time reversal in a disordered world: *Physical Review Letters*, 91: 243904.
- WAPENAAR, K. (2004). Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation: *Physics Review Letter*, 93: 254301-1–254301-4
- WAPENAAR, K., D. Draganov, R. Snieder, X. Campman, y A. Verdel 2010. Tutorial on seismic interferometry: Part 1. Basic principles and applications, *Geophysics* 75 (5): 75A195–75A209.





## Tectónica y sismicidad en la Región Volcánica Parícutin-Tancítaro, Michoacán, México

Daniel Alberto Gómez-Calderón, Diana Cinthia Soria-Caballero, Pedro Corona-Chávez

Para citar este artículo: [Gómez-Calderón Daniel Alberto, Soria-Caballero Diana Cinthia, Corona-Chávez Pedro. 2021. Tectónica y sismicidad en la Región Volcánica Parícutin-Tancítaro, Michoacán, México. Ciencia Nicolaita, número 82, 23-38. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi82.556>.](#)

---

Ver material suplementario

---

Publicado en línea el 30 de septiembre de 2021

---

Envíe su artículo a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

---

# Tectónica y sismicidad en la Región Volcánica Parícutin-Tancítaro, Michoacán, México

Daniel Alberto Gómez-Calderón<sup>1\*</sup>, Diana Cinthia Soria-Caballero<sup>1</sup>, Pedro Corona-Chávez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores campus Morelia,

<sup>2</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra

## HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 6 de junio de 2021

Aceptado: 27 de julio de 2021

## RESUMEN

Las regiones tectonomagmáticas activas se caracterizan por presentar sistemas de fallamiento regionales, actividad sísmica y vulcanismo recurrente. En este contexto la Región Volcánica Parícutin-Tancítaro es una zona estructuralmente compleja con alta densidad volcánica que se localiza en la porción oeste del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato y dentro del sector central del Cinturón Volcánico Transmexicano.

En este trabajo se presenta una revisión morfotectónica y sísmica de la Región Volcánica Parícutin-Tancítaro. En esta región coexisten dos sistemas de fallamiento regionales: 1) el Sistema de Fallas Cotija-Nueva Italia, el cual agrupa estructuras con orientación NO-SE y actúa como límite entre el dominio de la Meseta P'urhépecha hacia el norte y los dominios del Graben de Peribán-Los Reyes y la Depresión del Bajo Balsas hacia el sur. 2) El Sistema de Fallas Tepalcatepec-Tangancícuaro, el cual agrupa estructuras con orientación NE-SO, incluyendo abundantes lineamientos volcánicos en la misma dirección y aparentemente condiciona el desarrollo del Graben de Peribán-Los Reyes.

La Región Volcánica Parícutin-Tancítaro presenta una intensa actividad sísmica y se ha caracterizado por haber registrado al menos 7 enjambres sísmicos en los últimos 80 años. Independientemente de la precisión de su ubicación y profundidad relativa de ocurrencia, los enjambres sísmicos coinciden con los dos sistemas de fallamiento descritos, así como con lineamientos volcánicos con edades del Pleistoceno Tardío, Holoceno e inclusive recientes (p.ej. los volcanes Parícutin (1943-1952), Pedregal (470-710), Astillero (620-680) y Metate (1000-1600)). La concurrencia y recurrencia de los tres elementos tectonomagmáticos sugiere fuertemente que las estructuras tectónicas facilitan el ascenso y emplazamiento de magmas, probablemente asociados con reservorios someros a 4-5 km, 9-10 km y 14-17 km. Dicho escenario conlleva la presencia de peligros geológicos inherentes ligados al vulcanismo y la sismicidad que pueden afectar a las comunidades asentadas en la región. Por lo tanto, es recomendable vigilar la evolución de los procesos volcánicos y sísmicos en la Región Volcánica Parícutin-Tancítaro por medio de instrumentación geofísica y un análisis permanente de todos los datos.

**PALABRAS CLAVE:** vulcanotectónica, fallas activas, sismicidad, Parícutin-Tancítaro, campo volcánico.

## ABSTRACT

Active tectonomagmatic regions are characterized for the presence of regional fault systems, as well as recurrent volcanism and seismicity. The Parícutin-Tancítaro Volcanic Region is located in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field on the central part of the Transmexican Volcanic Belt and represents a structurally complex zone with high volcanic density.

This work presents a morphotectonic and seismicity analysis in the Parícutin-Tancítaro Volcanic Region. Here, we observe the coexistence of two regional fault systems: 1) the Cotija-Nueva Italia Fault System, which groups NW-SE oriented faults and fractures, and represent the limit between the Meseta P'urhépecha area to the north and the Peribán-Los Reyes Graben and the Bajo Balsas Basin to the south. 2) The Tepalcatepec-Tangancícuaro Fault System, which groups NE-SW oriented faults, including frequent volcanic lineaments with the same direction; this system influences the formation of the Peribán-Los Reyes Graben.

The Parícutin-Tancítaro Region presents an intense seismic activity and is characterized by the record of at least 7 seismic swarms during the last 80 years.

Independently the precision on the location and relatively occurrence depth of the seismic swarms, those overlap with the regional faults systems (previously mentioned) and with late Pleistocene, Holocene and recent volcanic lineaments (e.g. Parícutin volcano (1943-1952), Pedregal volcano (470-710), Astillero volcano (620-680), and Metate volcano (1000-1600)).

The concurrence and recurrence of the three tectonomagmatic elements strongly suggest that the tectonic structures ease the ascension and emplacement of magmas, probably associated to shallow reservoirs to at depths of 4-5 km, 9-10 km and 14-17 km. This scenario carries inherent geological hazards related to volcanic and seismic activity, which could affect the communities settled in the region. Therefore, its necessary monitoring volcanic and seismic processes evolution in the Parícutin-Tancítaro Volcanic Region through geophysical techniques and permanent analysis of data.

**KEYWORDS:** vulcanotectonic, active fault, seismicity, Parícutin-Tancítaro, volcanic field.

**CORRESPONDENCIA DE AUTOR:** [dagcbeto@gmail.com](mailto:dagcbeto@gmail.com)

Ciencia Nicolaita Copyright, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

## 1. Introducción

Las regiones volcánicas en todo el mundo están estrechamente relacionadas con sistemas de fallas tanto regionales como locales, los cuales actúan como zonas de dilatación o debilidad cortical que condicionan el emplazamiento de los edificios volcánicos, controlan su distribución espacial, lineamientos e inclusive dislocan a los volcanes y sus productos. En particular, en el caso de los campos volcánicos monogenéticos, independientemente del escenario tectónico donde se encuentren asociados, ya sea a zonas de extensión, *rift* o ambientes intraplaca, o en ambientes de zonas de subducción (Cañón-Tapia, 2016), resultan evidentes las relaciones entre los sistemas de fallas activas y el vulcanismo, ya sea espacial y/o cortical, así como su relación con procesos de retroalimentación magmática que asisten y facilitan el ascenso de magmas y emplazamiento de los edificios volcánicos.

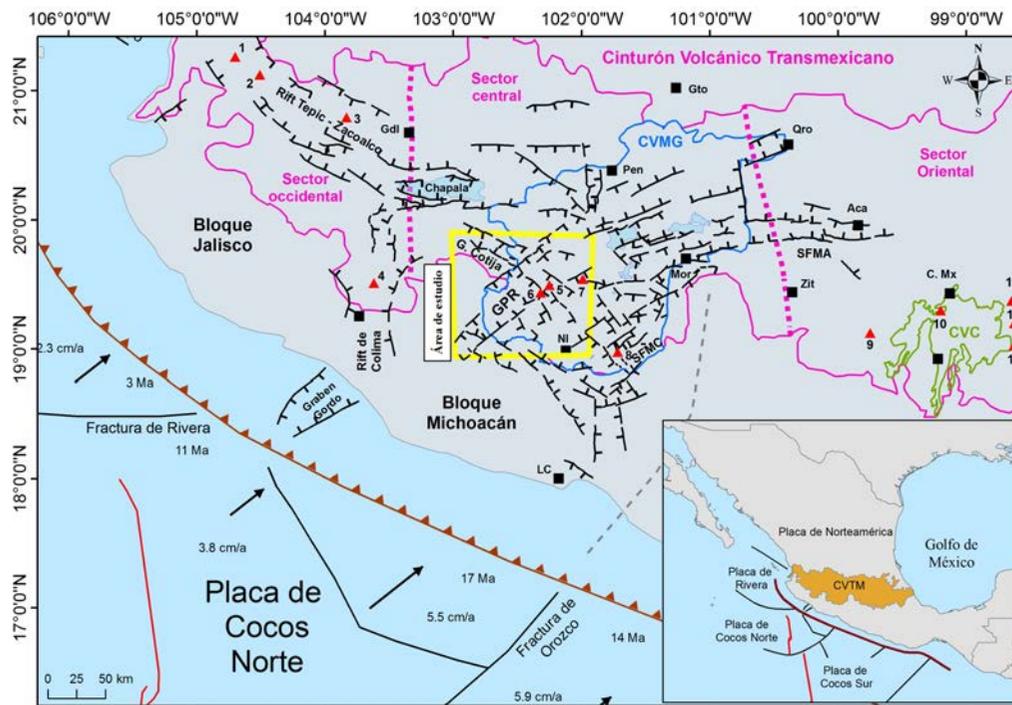
En lo que respecta a los campos volcánicos de tipo monogenético, en México se destaca la presencia del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) en el sector central del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM, Figura 1). El CVMG es uno de los campos volcánicos más grandes del mundo (Valentine y Connor, 2015), presenta un conjunto de sistemas estructurales complejos que han evolucionado en tiempo y espacio con el magmatismo (Kurokawa, 1995; Pérez-López *et al.*, 2011); además, alberga edificios volcánicos que han presentado actividad en tiempos históricos, tales como los volcanes Jorullo (1759-1774) y Parícutin (1943-1952), en donde se ha identificado la coexistencia del vulcanismo con la sismicidad y fallamiento activo.

Si bien dentro del CVMG se ha abordado el estudio de los sistemas de fallas considerando su distribución, agrupamiento volcánico (*clustering*; p.ej. Mazarinni *et al.* 2010) y evidencias

recientes de fallas tectónicas activas (Suter *et al.*, 2001; Garduño-Monroy *et al.*, 2009), existe una necesidad de estudios detallados acerca de su cinemática y su relación con los sistemas volcánicos. En el sector norte del CVMG, el paisaje volcánico se relaciona con sistemas de fallas extensionales tales como Morelia-Acamabay, Zacapu-Querétaro y Tzitzio-Valle de Santiago (Suter *et al.*, 2001; Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2020). Mientras que, en la porción sur, el vulcanismo ha sido asociado a la Fosa Tectónica del Bajo Balsas y el llamado Sistema San Juanico-Buenavista (Johnson y Harrison, 1990; Ownby *et al.*, 2011; Corona-Chávez *et al.*, 2019; Gómez-Calderón, 2021).

La Región Volcánica Parícutin-Tancítaro (RVPT) está localizada en el sector centro occidental del CVMG (Figura 1). Entre sus rasgos geomorfológicos resalta la coexistencia de sistemas de fallas regionales y vulcanismo muy activo durante el Cuaternario. Esta región además destaca de otras partes del CVMG porque en los últimos 80 años ha albergado la recurrencia de enjambres sísmicos, cuyas características se han registrado instrumentalmente y de los cuales al menos dos se han asociado a intrusiones ígneas y uno más culminó con la formación del volcán Parícutin (1943-1952).

En este trabajo se presenta una revisión geomorfológica y sismotectónica de la RVPT abordando la relación entre fallamiento activo, sismicidad y actividad volcánica. Con base en el análisis morfotectónico de la RVPT se revisa su relación espacial y temporal con la actividad sísmica y mecanismos focales reportados en la bibliografía consultada. Asimismo, se discuten las implicaciones para el peligro sísmico y volcánico que pueden derivar de dichas interacciones y su importancia de un monitoreo permanente e integral de los procesos volcánicos y sísmicos en Michoacán.



**FIGURA 1.** Configuración tectónica de la porción centro-occidental del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), donde se observa la ubicación de la Región Volcánica Parícutin-Tancitaro (recuadro amarillo) dentro del Campo Volcánico Michoacán Guanajuato (CVMG). Abreviaturas usadas: Gdl: Guadalajara; Pen: Pénjamo; LC: Lázaro Cárdenas; NI: Nueva Italia; Mor: Morelia; Qro: Querétaro; Gto: Guanajuato; Zit: Zitácuaro; Aca: Acambay; C.Mx: Ciudad de México; GPR: Graben Peribán-Los Reyes; SFMC: Sistema de fallas de Mil Cumbres; SFMA: Sistema de fallas Morelia-Acambay; CVC: Campo Volcánico Chichinautzin; G. Cotija: Graben de Cotija. Los triángulos rojos corresponden a los volcanes principales, identificados con los números, 1: Tepeltitlic; 2: Ceboruco; 3: Tequila; 4: Colima; 5: Parícutin; 6: Tancitaro; 7: Metate; 8: Jorullo; 9: Nevado de Toluca; 10: Xitle; 11: Tláloc; 12: Iztaccíhuatl; 13: Popocatepetl.

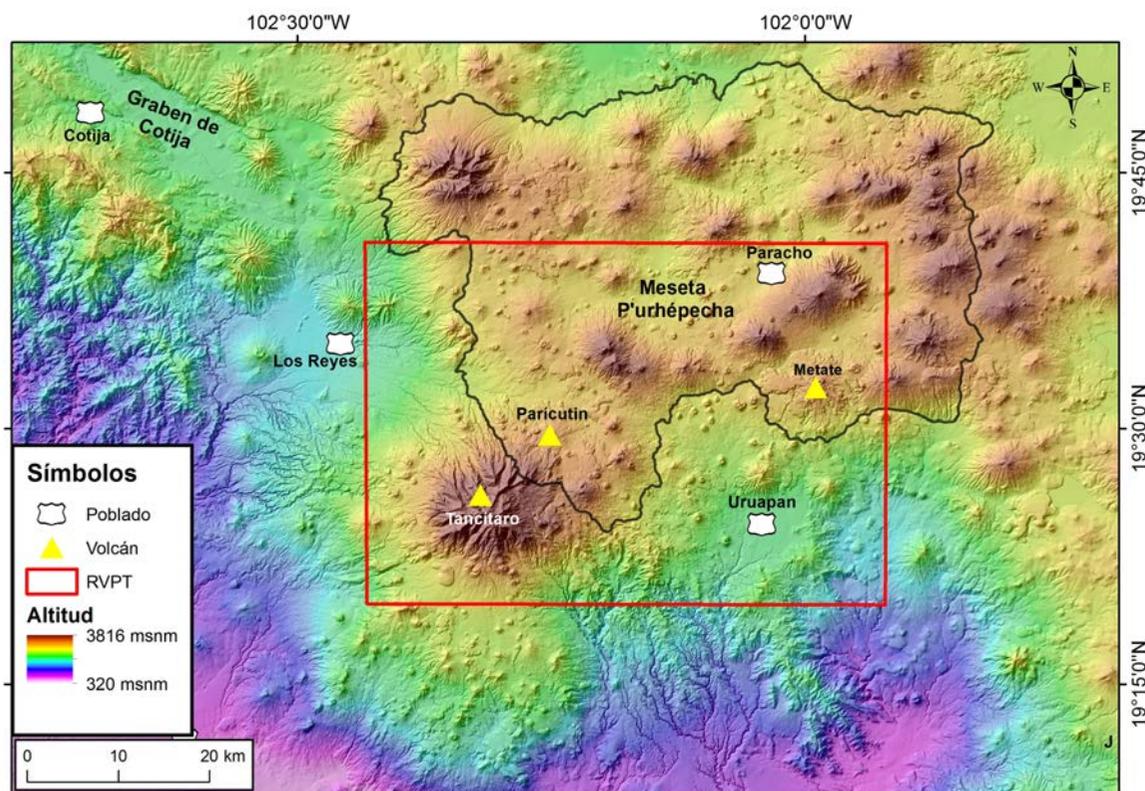
## 2. La Región Volcánica Parícutin-Tancitaro (RVPT)

La Región Volcánica Parícutin-Tancitaro (RVPT) se localiza en la porción noroeste del estado de Michoacán, en el sector central del arco magmático denominado Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) y a su vez en la porción suroccidental del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (Figura 1). La evolución tectónica del CVTM está relacionada con el proceso de subducción entre la placa de Cocos y la placa de Norteamérica, dando lugar a la formación de grandes sistemas de fallamiento regional, así como a campos o regiones volcánicas desarrollados particularmente durante el Plioceno y el Cuaternario (Ferrari *et al.*, 2012).

El Campo Volcánico Michoacán Guanajuato (CVMG) es una zona con más de 40,000 km<sup>2</sup> caracterizada por presentar una abundante concentración de centros volcánicos de tipo monogenético y en menor medida volcanes tipo escudo y volcanes compuestos (Hasenaka y Carmichael, 1985). El CVMG se desarrolló bajo un régimen de esfuerzos extensionales, donde el esfuerzo de compresión ( $\sigma_1$ ), tiende a comportarse de manera vertical para todo el campo, mientras que el esfuerzo de cizalla ( $\sigma_2$ ), varía dependiendo de la región; en la porción norte se orienta al E-O y en la región sur predomina la dirección NE-SO, lo cual se corrobora con el alineamiento de volcanes y la distribución de las fallas en los diferentes sectores (Connor, 1987; Kurokawa *et al.*, 1995; Figura 1).

El rasgo geomorfológico más sobresaliente de la RVPT es sin duda el volcán Tancítaro (3,840 m.s.n.m.), un estratovolcán de composición andesítica y con un volumen aproximado de 100 km<sup>3</sup> ubicado 10 km al suroeste del volcán Parícutin (Figura 2). Se estima que la acti-

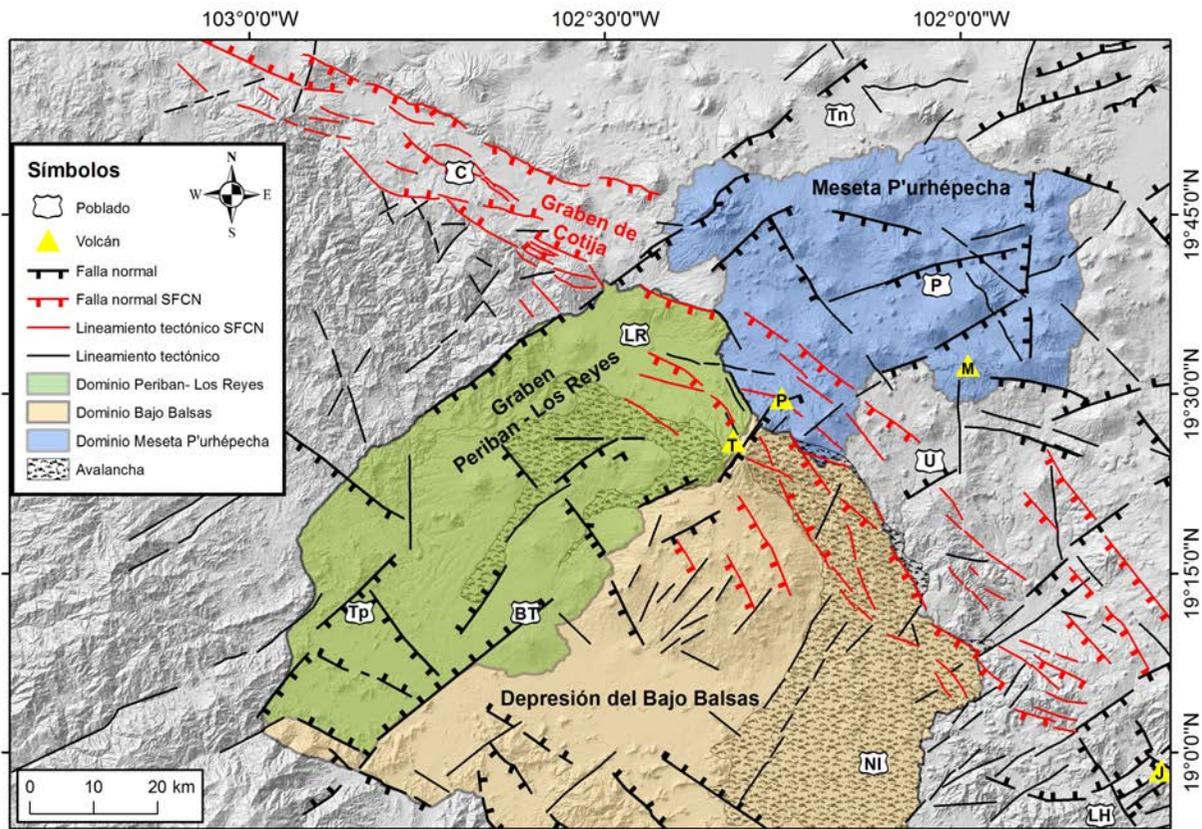
vidad magmática del volcán Tancítaro comenzó hace más de  $793 \pm 22$  ka (Ownby *et al.*, 2007). El último registro de su actividad se relaciona con el emplazamiento de algunos domos, conos cineríticos y *spatters* aislados con una temporalidad de  $237 \pm 4$  ka (Ownby *et al.*, 2007).



**FIGURA 2.** Modelo digital de elevación (MDE) donde se presenta la Región Volcánica Parícutin - Tancítaro (polígono rojo), se puede observar la localización de la Meseta P'urhépecha y se resalta la localización de los volcanes Tancítaro, Parícutin y el Metate.

Otra de las principales características de la RVPT, es la abundante presencia de edificios volcánicos de poco volumen (o monogenéticos) y en menor proporción de tipo escudo (Figura 2). En esta zona se presentan dos de los agrupamientos con mayor densidad volcánica reportados en el CVMG (Connor, 1987; Mazzarini *et al.*, 2010; Cañón-Tapia, 2016): el primero se ubica en la Meseta P'urhépecha y consiste de más de 250 volcanes alineados en dirección NE-SO, NO-SE y E-O (Corona-Chávez,

2018), incluyendo al volcán continental más joven de América: el volcán Parícutin, así como al volcán monogenético más volumétrico del CVMG durante el Holoceno: el Metate (Chevrel *et al.*, 2016; Pérez-Rodríguez *et al.*, 2020). El otro agrupamiento, se ubica en la porción sur del volcán Tancítaro, y consiste de aproximadamente 300 edificios volcánicos alineados en dirección NE-SO (Ownby *et al.*, 2011; Di Traglia *et al.*, 2014; Figura 2).



**FIGURA 3.** Mapa morfoestructural de la región volcánica Parícutin-Tancítaro, donde se aprecian los dominios morfoestructurales de la Depresión del Bajo Balsas, el Graben Peribán-Los Reyes y la altiplanicie que conforma la Meseta P'urhépecha. Las estructuras en rojo conforman el sistema de fallas Cotija - Nueva Italia (SFCN). Abreviaturas: C: Cotija; BT: Buenavista de Tomatlán; Tp: Tepalcatepec; LR: Los Reyes; Tn: Tangancicuaro; U: Uruapan; NI: Nueva Italia; LH: La Huacana. Volcanes: T: Tancítaro; P: Parícutin; M: Metate; J: Jorullo.

### 3. Análisis morfoestructivo de la Región Volcánica Parícutin-Tancítaro

La RVPT se localiza en una zona estructuralmente compleja donde convergen tres dominios morfoestructurales: i) la Depresión del Bajo Balsas, ii) el Graben de Peribán-Los Reyes y iii) la Meseta P'urhépecha (Figura 3).

La Depresión del Bajo Balsas representa una fosa tectónica extensional asimétrica con carácter de cuenca endorreica elongada en dirección ONO-ESE; se extiende por más de 100 km a lo largo y abarca un área de ~7,000 km<sup>2</sup> (Figura 3). La depresión presenta desniveles mayores a 3 km y tiene anchuras variables de 45 km en el sector sureste a más de 100 km en la porción noroeste. Sobre esta fosa se han identificado

más de 750 edificios volcánicos donde predominan los conos cineríticos y conos de lava o tipo *spatter* (Corona-Chávez et al., 2019).

El Graben de Peribán-Los Reyes se ubica al oeste de la RVPT y corta la Depresión del Bajo Balsas mediante estructuras extensionales con orientación NE-SO (Figura 3). Las fallas normales dieron origen a un graben NE-SO con un desnivel mayor a 2 km, longitudes mayores a 80 km y anchuras variables de 15 a 30 km en los extremos sur y norte respectivamente. Sobre el graben se emplazaron predominantemente volcanes tipo escudo (13 en total) que muestran una migración temporal de norte a sur entre 950 mil y 500 mil años, lo cual sugiere una apertura asimétrica del graben (Romero-Mosqueda, 2016).

La Meseta P'urhépecha se refiere a una región fisiográfica de altiplano (*plateau*), que se caracteriza por mostrar en sus zonas de menor altitud llanos con formas colinares de baja pendiente, con una altura basal media entre 2,200 y 2,400 m s.n.m. (Corona-Chávez, 2018, Figura 2 y 3). Como se mencionó anteriormente, la meseta es una de las regiones con mayor densidad volcánica dentro del CVMG (Connor, 1987; Mazzarini *et al.*, 2010; Cañón-Tapia, 2016).

La localización de la RVPT en la intersección de los dominios morfotectónicos anteriores refleja una importante influencia tectónica, que se manifiesta con la presencia de dos sistemas de deformación regionales: el sistema Cotija-Nueva Italia con dirección NO-SE y el sistema Tepalcatpec-Tangancícuaro con dirección NE-SO.

#### 4. Sistemas de deformación en la Región Volcánica Parícutin-Tancítaro

##### 4.1. Sistema de fallas Cotija-Nueva Italia (SFCN)

En este trabajo nos referimos como Sistema de fallas Cotija-Nueva Italia (SFCN) a la zona de deformación referida en trabajos previos como la Zona de Fallas San Juanico-Buenavista (Johnson y Harrison, 1990; Pacheco *et al.*, 1999; Larrea *et al.*, 2019). En los trabajos citados, esta zona es referida como la porción occidental más activa de la franja de deformación denominada “Zona de Fallas Chapala–Oaxaca”, la cual posee una orientación NO-SE y es fisiográficamente reconocible por los morfolineamientos que delimitan el curso del río Balsas en su trayecto por los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca (Johnson y Harrison, 1990). La necesidad de renombrar y redefinir esta zona de deformación surge de una evidente confusión que se genera, por un lado, debido a una sobredimensión propuesta por Johnson y Harrison (1990), en particular en la por-

ción suroriental, la cual ha sido extendida hasta el poblado de Buenavista de Cuéllar en Guerrero y por otro lado, debido a que estos autores unen estructuras que presentan una geometría y temporalidad inconsistentes con una sola cinemática y actividad tectónica.

En este estudio, el SFCN representa un sistema de fallas normales y morfolineamientos regionales, generalmente representados por alineamientos volcánicos con orientación ONO-ESE (Figura 3). En el sector occidental del SFCN destaca el Graben de Cotija, el cual tiene una longitud aproximada de 68 km en dirección N300, un ancho promedio de 12 km y un desnivel de 600-700 m en su porción centro-occidental y de 300 m en el sector oriental. El Graben de Cotija está delimitado por fallas normales NO-SE, con longitudes de 7 a 14 km, geometrías en échelon y escarpes acumulados entre 100 y 300 m. Además, muestra una cinemática adicional lateral izquierda que corta productos volcánicos del Pleistoceno y probablemente del Holoceno (Pacheco *et al.*, 1999; Rosas-Elguera *et al.*, 2003).

El SFCN limita estructuralmente hacia el sur los dominios morfotectónicos de la Depresión del Bajo Balsas y Graben de Peribán-Los Reyes, mientras que hacia el norte limita el dominio de la Meseta P'urhépecha. En la RVPT el SFCN se compone principalmente por lineamientos de edificios volcánicos y por fallas normales con una orientación general N300-N330, con longitudes que van de 7 a 12 km y en menor proporción segmentos menores a 5 km. En este sector se observa la formación de semigraben delimitados por fallas normales con el bloque de techo cayendo hacia el suroeste y únicamente se aprecia un graben, el cual contiene la avalancha oriental del volcán Tancítaro que ocurrió aproximadamente hace 260 ka (Ownby *et al.*, 2011).

El SFCN se continúa hacia el sureste de Uruapan, con estructuras que tienen longitudes de 5

a 17 km, escarpes acumulados de 70 m y que cortan el Batolito de Matangarán. Entre Uruapan y La Huacana se observa el alineamiento de edificios tipo escudo (p.ej. C. La Barra, C. La Viga, C. Tipitarillo y C. El Cobrero) en la misma dirección del SFCN. El límite oriental del SFCN se localiza en la región de Nueva Italia y es desplazado por una zona de fallamiento normal con dirección NE-SO que pertenece al sistema de deformación de Mil Cumbres. Sin embargo, hacia la región del volcán Jorullo se observan estructuras con la misma orientación (NO-SE) y cinemática que el SFCN, las cuales podrían representar la continuidad del sistema, o bien podrían tratarse de estructuras miméticas reactivadas como sistemas conjugados asociados al sistema de Mil Cumbres, cuya influencia es muy importante en esta zona (Gómez-Calderón, 2021).

#### **4.2. Sistema de Fallas Tepalcatepec-Tangancícuaro (SFTT)**

En la RVPT el SFCN coexiste y es afectado por un sistema de fallas NE-SO, que en este trabajo lo denominaremos como Sistema de Fallas Tepalcatepec-Tangancícuaro (SFTT). El SFTT se trata de una franja de deformación con orientación NE-SO que va desde Tepalcatepec hasta Tangancícuaro con una longitud de 130 km y un ancho de 90 km entre Los Reyes y Nueva Italia (Figura 3). Las estructuras de este sistema se observan en el Graben de Peribán-Los Reyes, la Meseta P'urhépecha y la Depresión del Bajo Balsas. Aunque este sistema de fallas es un rasgo estructural de primer orden no había sido descrito anteriormente (Romero-Mosqueda, 2017).

El SFTT está formado por fallas normales y fracturas con una orientación general N40-N60. Hacia el occidente de la RVPT, este sistema genera el Graben de Peribán-Los Reyes, el cual es limitado por fallas normales con longitudes de

10 a 35 km y escarpes de 80 a 280 m. En la Meseta P'urephécha el SFTT se caracteriza por la presencia de algunas fallas normales con longitudes de 5 a 15 km y escarpes acumulados de 60 a 240 m. Además, se distingue por abundantes alineamientos de volcanes pequeños y de mayor volumen como lo es el lineamiento de Paracho sobre el cual se han emplazado volcanes tipo escudo de 60 ka. Las fallas y alineamientos presentan orientaciones de N50-N70 (Figura 3).

En la Depresión del Balsas, se observa la influencia de este sistema hacia el sur del volcán Tancítaro a través de los lineamientos de edificios volcánicos con una dirección N35-N50 y longitudes de hasta 15 km. Se considera que el colapso del sector oriental del volcán Tancítaro, el cual generó una corona somital en forma de herradura con apertura hacia el sureste, fue detonado por la actividad del SFTT y los depósitos de la avalancha fueron delimitados por estructuras con orientación N30-35 asociadas al mismo sistema en la región de Nueva Italia (Figura 3).

#### **5. Sismicidad y enjambres sísmicos de la RVPT**

Para la Región Volcánica Parícutin-Tancítaro la sismicidad instrumental suele ser de magnitud baja a moderada debido a la escasez de estaciones sísmicas cercanas, pero destaca el registro de 8 enjambres sísmicos ocurridos en los años de 1943, 1997, 1999, 2000, 2006, 2012, 2020 y 2021.

El primer enjambre sísmico que fue descrito se refiere al de 1943, el cual se registró por medio de estaciones sísmicas temporales cinco semanas previas a la erupción del volcán Parícutin. La actividad tuvo una frecuencia de 20 a 35 sismos al día y magnitudes superficiales de 3.2, con un máximo de 300 sismos el 19 de febrero de 1943 (Yokoyama y De la Cruz-Reyna, 1990). De todos los enjambres reportados en la

región, este fue el único cuya etapa final culminó con una erupción volcánica.

El enjambre sísmico de 1997 fue registrado por el Servicio Sismológico Nacional (SSN). Comenzó en febrero y culminó el 18 de marzo del mismo año (Figura 4). Durante esta crisis se contabilizaron 230 sismos con magnitudes entre 1.5 y 4.1. Estos eventos se produjeron a profundidades entre 10 y 18 km y se distribuyeron en dos alineaciones: NE-SO y NO-SE. El origen de esta secuencia sísmica se asoció al movimiento de fallas normales regionales y no se reconoció ningún componente de tipo magmático (Pacheco *et al.*, 1999; Gutiérrez Martínez y Valdés González, 2000).

El enjambre sísmico de 1999 fue registrado por el SSN entre mayo y junio. Las características de los sismos, así como el proceso que lo originó, son similares a los propuestos para el enjambre de 1997 (Gutiérrez Martínez y Valdés González, 2000). La mayor frecuencia de eventos se registró entre el 4 y 7 de junio, contabilizando 111 sismos con magnitudes entre 1.5 y 3.0.

El enjambre del año 2000 ocurrió entre abril y junio y fue reportado por el Departamento de Sismotectónica de la Comisión Federal de Electricidad (Gutiérrez Martínez y Valdés González, 2000). El registro comenzó con ~30 sismos al día y alcanzó su máximo el 16 de mayo con 280 registros. La magnitud máxima reportada para estos eventos fue de 3 y se localizaron a las mismas profundidades que las reportadas en los enjambres de 1997 y 1999. Su origen se asoció a la actividad de las fallas de la región.

El enjambre sísmico de 2006 ocurrió entre el 21 de mayo y el 2 de julio (Figura 4). Durante este periodo, se contabilizaron entre 700 y 1000 sismos (Gardine *et al.*, 2011 y Pinzón *et al.*, 2017, respectivamente), con un máximo de 40 registros el 31 de mayo y magnitudes locales entre 2.5 y 3.7. Los hipocentros se agruparon a 9-10 km y 3-4 km de profundidad y se distri-

buyeron con una orientación NE-SO (Figura 4); con base en la diversidad de los mecanismos focales y el cálculo del valor-*b* (de 2.45 y 1.47, Gardine *et al.*, 2011 y Pinzón *et al.*, 2017, respectivamente), esta distribución se asoció a un evento magmático relacionado al emplazamiento de un dique. Se estima que el volumen de magma emplazado fue de 0.001 km<sup>3</sup> e incrementó la deformación cortical debajo del volcán Tancítaro (Pinzón *et al.*, 2017).

El enjambre sísmico de 2012 fue reportado por el SSN en un informe de 2016, indicando una secuencia de 20 sismos con magnitudes entre 3.8 y 4.2, asociada a réplicas del sismo del 11 de abril de 2012 ocurrido en las costas de Michoacán y el cual tuvo una magnitud de 6.4 y una profundidad de 20 km.

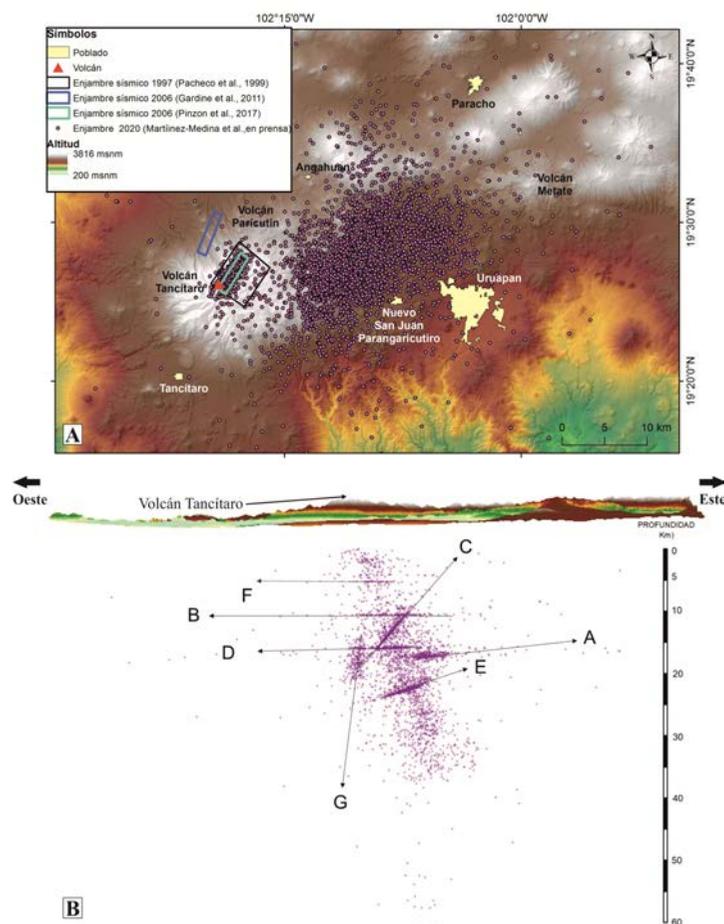
Finalmente, el enjambre de 2020 ocurrió entre el 5 de enero y el 23 de febrero, fue reportado por el SSN contabilizando 3384 sismos con magnitudes coda entre 2.3 y 4.1, siendo la máxima frecuencia el 4 de febrero con 298 sismos. La distribución de los epicentros se concentró en dos zonas: una entre el volcán Parícutin y Uruapan y la segunda entre los volcanes Tancítaro y Parícutin. En profundidad, los hipocentros se concentraron principalmente entre 14 y 17 km (zonas A, D en la Figura 4), 19 y 22 km (zona E), 9 y 10 km (zona B) y 4-5 km (zona F; Martínez-Medina *et al.*, en prensa). Cabe mencionar que los datos presentados en la Figura 4 no tuvieron ningún tratamiento adicional y se graficaron como se publicaron por el SSN.

Para este enjambre se sugiere que la actividad sísmica migró de mayor a menor profundidad y formó alineamientos superficiales en dirección NE-SO y NO-SE (Figura 4), los cuales se corresponden con fallas regionales. Adicionalmente, en la Figura 4 se observa que puede existir una conexión entre los agrupamientos localizados a 14-17 km (zona A y D) y 9-10 km (zona B) a través de la zona C. Las característi-

cas mencionadas previamente de este enjambre son similares a las reportadas para los enjambres de 1997 y 2006 y su origen se relacionó con el emplazamiento de diques (agrupamiento C y G) y sills (agrupamientos A, B, D, E y F, Figura 4), para el cual se estimó un volumen de  $0.0305 \text{ km}^3$  considerando la relación volumen de magma:momento sísmico total liberado (Martínez-Medina *et al.*, en prensa).

Recientemente, y al momento de escribir este documento, el 28 de mayo de 2021 comenzó

una nueva crisis de sismicidad en esta misma zona, registrada por el SSN y que ha reportado 1121 sismos hasta el 28 de julio, con magnitudes de duración entre 3 y 4.1. Los hipocentros se han concentrado principalmente entre 7 y 11 km (con 570 sismos) y una segunda agrupación se observa a los 14 km (con 97 sismos). La distribución espacial en superficie de este enjambre es similar a la de los anteriores con lineamientos NE-SO y NO-SE.



**FIGURA 4.** A. Modelo Digital de Elevación (MDE) donde se presentan los epicentros del enjambre sísmico ocurrido en 2020. Además, se resaltan con polígonos los enjambres reportados para los años 1997 (Pacheco *et al.*, 1999), 2006 (Gardine *et al.*, 2011; Pinzón *et al.*, 2017) y 2020 (Martínez-Medina *et al.*, 2021). B. MDE en 3D (generado con el software ArcView) con la proyección de los hipocentros del enjambre sísmico del 2020 donde se observan agrupaciones horizontales que sugieren la presencia de sills y que se focalizan entre 14 y 17 km (zona A y D), 19 y 22 km (zona E), 9 y 10 km (zona B) y 5 km (zona F). Adicionalmente, se observan dos agrupamientos subverticales que sugieren el emplazamiento de diques (zonas C y G). Cabe mencionar que el agrupamiento C presenta una orientación NE-SO en superficie. La escala horizontal del modelo 3D es la misma que en la figura 4A. (Modificado de Martínez-Medina *et al.*, 2021).

## 6. Recurrencia y relación entre la actividad sísmica y los sistemas de fallamiento de la RVPT

La presencia de los sistemas de deformación previamente mencionados en la RVPT facilita el ascenso de sistemas magmáticos y generalmente es en la intersección de dos estructuras de primer orden asociadas a ambos sistemas donde se concentra la actividad volcánica. Los volcanes históricos Parícutin y el Metate nos sirven como ejemplo para sustentar esta hipótesis (Figura 5). Estos lineamientos tectónicos y actividad volcánica reciente se asocian con el SFCN y el SFTT y reflejan un buen ejemplo de cómo el carácter y distribución del vulcanismo es controlado por la tectónica regional (Johnson y Harrison, 1990; Vélez-Calderón y Corona-Chávez, 2016).

Los enjambres sísmicos ocurridos en los últimos años permiten entender la relación entre las estructuras tectónicas y el emplazamiento de edificios volcánicos durante el Cuaternario en la RVPT. La distribución de la sismicidad y el alineamiento de los edificios volcánicos (Figura 5) refleja que los sistemas de fallas Cotija-Nueva Italia y Tepalcatepec-Tangancicuaro son activos y han facilitado el ascenso de magma. Esto es particularmente evidente en los patrones de los enjambres de 1997, 2006, 2020, los cuales mostraron migraciones verticales y horizontales de los hipocentros siguiendo una alineación NE-SO en las etapas iniciales y agrupándose debajo del volcán de Tancítaro en las etapas finales. Con base en los datos obtenidos de los diferentes enjambres sísmicos, se observa que la concentración y migración de hipocentros se relaciona directamente con el emplazamiento de intrusiones magmáticas que generan diques y sills a 15-16 km, 10 km y 5 km de profundidad (Gardine *et al.*, 2007; Pinzón *et al.*, 2011; Martínez-Medina *et al.*, *en prensa*; Figura 4).

El hecho de que los enjambres posteriores a 1943 no hayan culminado en una erupción volcánica, podría explicarse por una estrecha relación con la actividad y reactivación del fallamiento de los sistemas SFCN y SFTT, así como por una barrera geofísica que pudo impedir o limitar el movimiento y su ascenso. Esto último suele suceder con frecuencia en zonas con actividad volcánica monogenética como lo es el CVMG, donde los sistemas magmáticos se caracterizan por ser de poco volumen y por lo tanto pueden detener su ascenso al alcanzar el límite de flotación neutral, quedándose atrapados entre las fallas y fracturas de la corteza. Entonces, la actividad magmática se manifiesta como enjambres sísmicos locales e inclusive actividad freática anómala (De la Cruz-Reyna y Yokoyama, 2011; Gardine *et al.*, 2011).

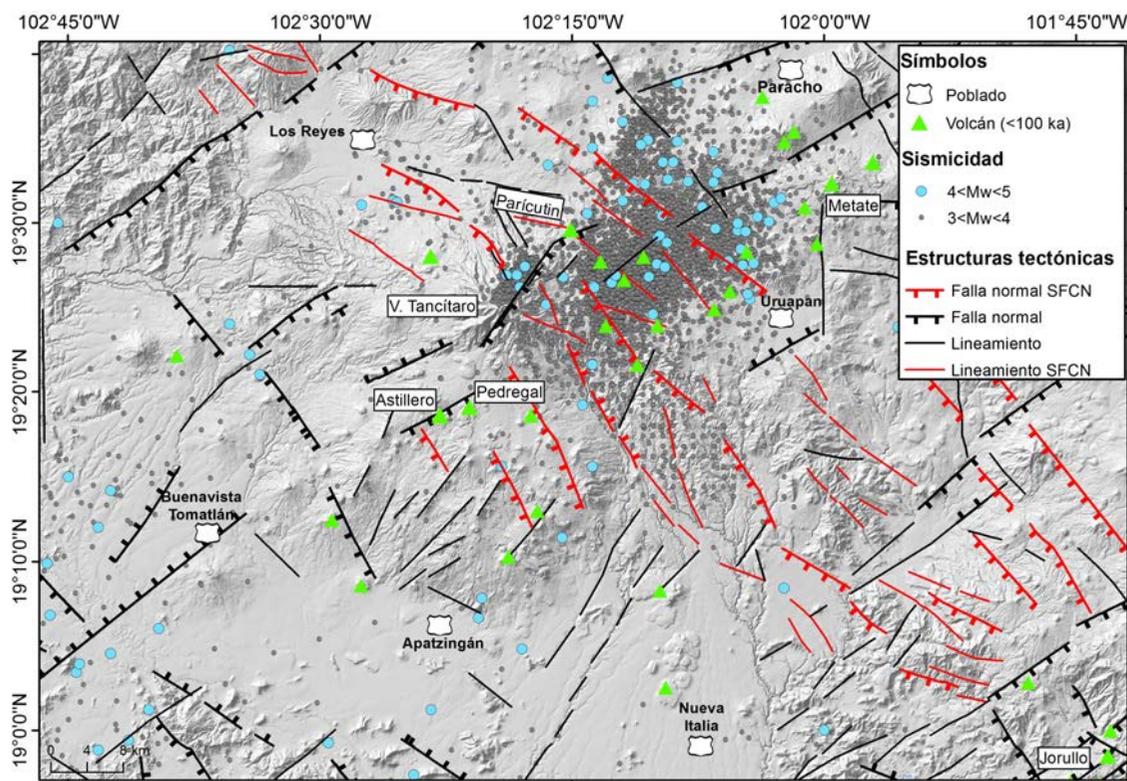
En otras zonas del mundo, enjambres sísmicos similares a los de la RVPT se asocian con un modelo donde una cámara magmática sobrepresurizada genera y alimenta a un dique que se propaga lateralmente, produciendo secuencias de sismos pequeños debido a un fracturamiento hidráulico y la formación de fallas normales que se mueven por transferencia de estrés estático. En las etapas iniciales el volumen del dique aumenta de forma exponencial alejándose del reservorio magmático, lo cual incrementa la frecuencia de la sismicidad. Si el reservorio no cuenta con la entrada adicional de fundidos más profundos, el crecimiento del dique se detiene y con esto la frecuencia de los sismos también disminuye hasta desaparecer (Pasarelli *et al.*, 2018). Este comportamiento resulta en una típica tendencia gaussiana en la curva de frecuencia sísmica como se observa en el enjambre del 2020 en la RVPT (Martínez-Medina *et al.*, *en prensa*).

Finalmente, para observar la relación entre sismicidad y vulcanismo en la RVPT, en la figura 5 se muestra la sismicidad instrumental

reportada por el SSN desde la década de los noventas hasta julio de 2021 asociados con la ubicación de los edificios volcánicos emplazados durante los últimos 100 ka.

El alineamiento volcánico más evidente y de mayor longitud consta de 15 edificios volcánicos alineados en dirección NE-SO a lo largo de 70 km. Se ubica entre Apatzingán y el volcán el Metate y se relaciona con una fractura cortical asociada al SFTT (Figura 5). Sobre este

alineamiento se han emplazado tres volcanes históricos que afectaron significativamente a las comunidades locales en su momento: El Metate (1000-1600 d.C), El Pedregal (470-710 d.C) y el Astillero (620-680 d.C; Chevrel *et al.*, 2015; Larrea *et al.*, 2019. Adicionalmente se observa el alineamiento en la misma dirección de sismos con magnitud mayor a 4 entre Tancitaro y el Metate (Figura 5).



**FIGURA 5.** Sismicidad instrumental obtenida del SSN para el periodo 1991-2021 (julio), también se observa las estructuras tectónicas y los volcanes del Pleistoceno Tardío - Holoceno presentes en la RVPT.

Hacia la porción noroeste de esta región se observa una estructura NE-SO de menor longitud que disloca el volcán Tancitaro y generó el colapso de su porción oriental hace 260 ka (Ownby *et al.*, 2011). El extremo noreste de esta estructura se asocia al emplazamiento de los volcanes Parícutin, Sapichu y Taqui a través de un dique con 1.5 km de longitud y 3 a 6 m de ancho (De la

Cruz-Reyna y Yokoyama, 2011), así como a la formación de un graben sin-volcánico al suroeste de Parícutin (Luhr y Simkin, 1993). Los epicentros de los enjambres sísmicos de 1997, 2006, 2020 y 2021 se traslapan ampliamente sobre esta estructura, donde los mecanismos focales del enjambre de 1997 sugieren una cinemática normal lateral izquierda (Pacheco *et al.*, 1999).

El SFCN también incluye alineamiento de volcanes y sismicidad. Su actividad se refleja en los alineamientos NO-SE de los volcanes Parícutin con el C. Cirahapán, el C. Juritzicuaro, el C. Cupicuaró, C. Ciricuti y el C. Colorado; del Metate con el C. Paracho; y de los sismos con magnitud mayor a 4 observados al noroeste de Uruapan (Figura 5). Para el enjambre sísmico de 1997 un alineamiento NO-SE sobre el volcán Tancítaro presentó mecanismos focales que sugieren una cinemática inversa lateral izquierda (Pacheco *et al.*, 1999).

## 7. Consideraciones acerca del peligro sísmico y volcánico de la RVPT

Aunque la mayoría de los fenómenos geológicos son poco predecibles, es posible obtener ciertos conocimientos entre los que destaca la aproximación estadística. Aumentar la cantidad de instrumentos de registro instalados y por lo tanto de datos sísmicos en una región, permitiría determinar y aproximar hipótesis del comportamiento y peligro de los eventos naturales, tales como sismos, erupciones volcánicas y deslizamientos, entre otros. Adicionalmente se debe resaltar que con un mayor número de datos se obtienen mejores estimaciones de riesgo geológico y en colaboración con las dependencias e instituciones responsables de protección civil, es factible desarrollar las acciones pertinentes en la gestión de riesgos, esto con el objetivo de mitigar la afectación a las poblaciones vulnerables ante la ocurrencia de un fenómeno natural que pueda derivar en un desastre.

En la RVPT, la coexistencia de sistemas de fallamiento regionales activos y el emplazamiento de edificios volcánicos geológicamente recientes, refleja que esta zona es tectonomagmáticamente activa y puede generar las condiciones adecuadas para la ocurrencia de eventos

sísmicos o volcánicos que sin duda afectarían a las comunidades aledañas.

La repetición y recurrencia de enjambres sísmicos en la región sugiere una estrecha relación con el emplazamiento de magmas en niveles corticales someros, donde si bien la mayoría parecen haber quedado atrapados en la corteza, existe la posibilidad de que los sistemas de fallas y fracturas permitan su ascenso hasta la superficie y se genere el “nacimiento” de un nuevo volcán, en un proceso similar al ocurrido para los volcanes de Parícutin (1943-1952), El Astillero, el Pedregal (500 - 700) o el Metate (1000-1600). Es importante mencionar que históricamente este tipo de fenómenos han ocasionado migraciones y grandes afectaciones sociales en los poblados p'urhépecha.

La elevada frecuencia de sismos en la RVPT, aunque estos posean magnitudes bajas a moderadas, puede afectar la infraestructura humana (p.ej. casas y vías de comunicación), debido a que la acumulación de esfuerzos de vibración durante tiempos prolongados aumenta el peligro sísmico local para las comunidades de la zona.

Otra consideración importante es la concentración de hipocentros en la zona debajo del estratovolcán Tancítaro, el cual, por su altitud y pendientes, es una geoforma relativamente inestable en sus laderas. La recurrencia del fenómeno de enjambre sísmico podría generar las condiciones propicias para desencadenar un nuevo colapso del volcán Tancítaro, como los observados en sus sectores oriental y occidental (Ownby *et al.*, 2007), los cuales produjeron avalanchas de escombros que alcanzaron decenas o cientos de kilómetros de longitud y decenas de metros de espesor.

En resumen, la Región Volcánica Parícutin-Tancítaro representa una zona con intensa actividad sísmica y volcánica, por lo tanto, se puede calificar como una región tectonomagmática cuyo estudio y entendimiento requiere de

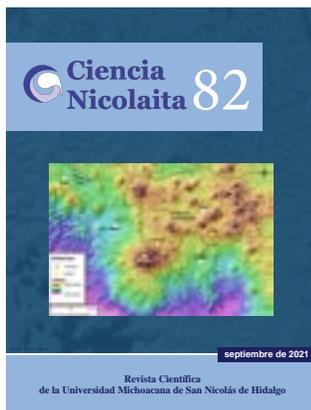
una amplia instalación de instrumentos geofísicos y un monitoreo permanente.

## Referencias

- CAÑÓN-TAPIA, E. 2016. Reappraisal of the significance of volcanic fields. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 310: 26-38.
- CHEVREL, M. O., Siebe, C., Guilbaud, M. N., & Salinas, S. 2016. The AD 1250 El Metate shield volcano (Michoacán): Mexico's most voluminous Holocene eruption and its significance for archaeology and hazards. *The Holocene*, 26 (3): 471-488.
- CONNOR, C. B. 1987. Structure of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33 (1-3): 191-200.
- CORONA-CHÁVEZ, P. 2018. Revisitando los volcanes de la Región del Parícutin: morfología, petrología y edad. *Ciencia Nicolaita*, 74: 31 - 58.
- CORONA-CHÁVEZ, P., Morales-Gámez, M., Gómez-Calderón, D. A., Macías-Vázquez J. L., y Molina J. F. 2019. Geocronología, petrología y termobarometría del vulcanismo de la Región Volcánica Los Reyes-Nueva Italia (RVRN), Michoacán: implicaciones tectónicas. *Actas INAGEQ* 25: 92 - 93.
- DE la Cruz-Reyna, S. D. L., y Yokoyama, I. 2011. A geophysical characterization of monogenetic volcanism. *Geofísica internacional*, 50 (4): 465-484.
- DI Traglia, F., Morelli, S., Casagli, N., & Monroy, V. H. G. (2014). Semi-automatic delimitation of volcanic edifice boundaries: Validation and application to the cinder cones of the Tancitaro–Nueva Italia region (Michoacán–Guanajuato Volcanic Field, Mexico). *Geomorphology*, 219: 152-160.
- FERRARI, L., Orozco-Esquível, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522, 122-149.
- GARDINE, M., West, M. E., y Cox, T. 2011. Dike emplacement near Parícutin volcano, Mexico in 2006. *Bulletin of Volcanology*, 73 (2): 123-132.
- GARDUÑO-MONROY, V. H., Pérez-López, R., Israde-Alcantara, I., Rodríguez-Pascua, M. A., Szyrkaruk, E., Hernández-Madrigal, V. M., García-Zepeda, M.L. Corona-Chávez, P., Ostroumov, M., Medina-Vega, V.H., García-Estrada, G., Carranza, O., López-Granados, E., Mora Chaparro, J. C. (2009). Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico. *Geofísica internacional*, 48 (3): 319-335.
- GÓMEZ-CALDERÓN D.A. 2021. Coexistencia de magmas shoshoníticos y calcialcalinos en la Región Volcánica Graben del Cahulote de Santa Ana-Pedernales, Michoacán México. *Petrografía, geoquímica e implicaciones tectónicas*. Universidad Nacional Autónoma de México, tesis maestría, Morelia, Michoacán, México, pp. 138.
- GÓMEZ-VASCONCELOS, M. G., Luis Macías, J., Avellán, D. R., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V. H., Cisneros-Máximo, G., Layer, P.W., Benowitz, J., López-Loera, H., Mendiola-López, F., Pertón, M. 2020. The control of preexisting faults on the distribution, morphology, and volume of monogenetic volcanism in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field. *Geological Society of America Bulletin*.
- GUTIÉRREZ Martínez C. y Valdés González, C. 2000. Actividad sísmica en la zona de Parícutín-Tancitaro, estado de Michoacán: Secuencias sísmicas en 1997, 1999 y 2000. Informe del Área de Riesgos Geológicos, Centro Nacional de Prevención de Desastres Sistema Nacional de Protección Civil, Secretaría de Gobernación, pp. 12.
- HASENAKA, T., & Carmichael, I. S. (1985). The cinder cones of Michoacán—Guanajuato, central Mexico: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25 (1-2): 105-124.
- JOHNSON, C. A., y Harrison, C. G. A. 1990. Neotectonics in central Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 64 (2): 187 – 210.
- JOHNSON, C. A., & Harrison, C. G. A. (1990). Neotectonics in central Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64 (2-4): 187-210.
- KUROKAWA, K., Otsuki, K. y Hasenaka, T. 1995. Tectonic stress field and fractal distribution of volcanoes in the Michoacán–Guanajuato region of the Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*. 34 (3): 309 – 320.
- LARREA, P., Widom, E., Siebe, C., Salinas, S., & Kuentz, D. 2019. A re-interpretation of the petrogenesis of Parícutin volcano: distinguishing crustal contamination from mantle heterogeneity. *Chemical Geology*, 504: 66-82.
- LUHR, J. F., Simkin, T., y Cuasay, M. 1993. Parícutin: the volcano born in a Mexican cornfield. *US Geoscience Press*.
- MARTÍNEZ-MEDINA, M., Soria-Caballero, D.C., Corona-Chávez, P., Gómez-Calderón D.A., Figueroa-Soto, A.G., González-Fabian, M.C. 2021. El enjambre

- sísmico de Michoacán 2021, región volcánica de Parícutin - Tancítaro. In: Parícutin, saberes y memoria, Morevallado editores, ISBN: 978-607-542-195-7, en prensa.
- MAZZARINI, F., Ferrari, L., & Isola, I. (2010). Self-similar clustering of cinder cones and crust thickness in the Michoacán–Guanajuato and Sierra de Chichinautzin volcanic fields, Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 486 (1-4): 55-64.
- OWNBY, S., Granados, H. D., Lange, R. A., y Hall, C. M. 2007. Volcán Tancítaro, Michoacán, México,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  constraints on its history of sector collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161 (1-2): 1-14.
- OWNBY, S. E., Lange, R. A., Hall, C. M., & Delgado-Granados, H. (2011). Origin of andesite in the deep crust and eruption rates in the Tancítaro–Nueva Italia region of the central Mexican arc. *Geological Society of America Bulletin*, 123 (1-2): 274-294.
- PACHECO, J. F., Valdés-González, C., Delgado, H., Singh, S. K., Zúñiga, F. R., Mortera-Gutiérrez, C. A., Santoyo, M. A., Domínguez, J. y Barrón, R. 1999. Tectonic implications of the earthquake swarm of 1997 in the Michoacan Triangle, México. *Journal of South American Earth Sciences*, 12 (6): 567-577.
- PASSARELLI, L., Heryandoko, N., Cesca, S., Rivalta, E., Rohadi, S., Dahm, T., y Milkereit, C. 2018. Magmatic or Not Magmatic? The 2015–2016 Seismic Swarm at the Long-Dormant Jailolo Volcano, West Halmahera, Indonesia. *Frontiers in Earth Science*, 6, art. 79.
- PÉREZ-LÓPEZ, R., Legrand, D., Garduño-Monroy, V. H., Rodríguez-Pascua, M. A., & Giner-Robles, J. L. (2011). Scaling laws of the size-distribution of monogenetic volcanoes within the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201 (1-4): 65-72.
- PÉREZ-RODRÍGUEZ, N., Morales, J., Guilbaud, M. N., Goguitchaichvili, A., Cejudo-Ruiz, R., & del Sol Hernández-Bernal, M. (2020). Reassessment of the eruptive chronology of El Metate shield volcano (central-western Mexico) based on a comprehensive rock-magnetic, paleomagnetic and multi-approach paleointensity survey. *Quaternary Geochronology*, 55: 101031.
- PINZÓN, J. I., Núñez-Cornú, F. J., y Rowe, C. A. 2017. Magma intrusion near Volcán Tancítaro: Evidence from seismic analysis. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 262: 66-79.
- ROMERO-MOSQUEDA, S. J. 2017. Análisis morfoestructural de las relaciones petrológicas del graben de Peribán, Michoacán. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología. Universidad de Guanajuato. Guanajuato, Guanajuato, México. Pp. 118.
- ROSAS-ELGUERA, J., Alva-Valdivia, L. M., Goguitchaichvili, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Ortega-Rivera, M. A., Prieto, J. C. S., & Lee, J. K. 2003. Counterclockwise rotation of the Michoacan Block: implications for the tectonics of western Mexico. *International Geology Review*, 45 (9): 814-826.
- SUTER, M., López-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O., Carrillo-Martínez, M., 2001, Quaternary intra-arc extension in the Central Trans-Mexican volcanic belt: *Geological Society of America Bulletin*, 113 (6): 693-703.
- VALENTINE, G. A., & Connor, C. B. (2015). Basaltic volcanic fields. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 423-439). Academic Press.
- VÉLEZ-CALDERÓN, A. E., y Corona-Chávez, P. 2016. Análisis estructural y morfológico de la evolución del Bajo Balsas en relación con el tectonismo y magmatismo del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. Programa de Verano Universidad Autónoma de Guerrero.
- YOKOYAMA, I. y De la Cruz-Reyna, S. (1990). Precursory earthquakes of the 1943 eruption of Parícutin volcano, Michoacan, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44 (3-4): 265-281.





## Aplicación de VolcFlow para simular Avalanchas de Escombros y CDP en los volcanes Popocatepetl, Volcán de Colima y Ceboruco

Enrique Cárdenas-Sánchez, Luis Eduardo Frías Gómez, Elis Olivia Rangel Flores, Oscar Dionicio Reyes Mendoza y Francisco Valencia Alcaraz

Para citar este artículo: [Cárdenas-Sánchez Enrique, Frías Gómez Luis Eduardo, Rangel Flores Elis Olivia, Reyes Mendoza Oscar Dionicio, Valencia Alcaraz Francisco. 2021. Aplicación de VolcFlow para simular Avalanchas de Escombros y CDP en los volcanes Popocatepetl, Volcán de Colima y Ceboruco. Ciencia Nicolaita, número 82, 39-58. DOI:<https://doi.org/10.35830/cn.vi82.557>.](#)

---

Ver material suplementario

---

Publicado en línea el 30 de septiembre de 2021

---

Envíe su artículo a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

---

# Aplicación de VolcFlow para simular Avalanchas de Escombros y CDP en los volcanes Popocatepetl, Volcán de Colima y Ceboruco

Enrique Cárdenas-Sánchez<sup>1\*</sup>, Luis Eduardo Frías Gómez<sup>2</sup>, Elis Olivia Rangel Flores<sup>2</sup>, Oscar Dionicio Reyes Mendoza<sup>2</sup> y Francisco Valencia Alcaraz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Guadalajara, Departamento de Ciencias de la Naturaleza, Centro Universitario del Sur

<sup>2</sup> Universidad de Guadalajara, Ingeniería en Geofísica

## HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 7 de junio de 2021

Aceptado: 28 de julio de 2021

## RESUMEN

El análisis de los peligros volcánicos es un elemento para cuantificar el potencial de amenaza con enfoque a la mitigación del riesgo. Por su ubicación geográfica, México cuenta con al menos 37 volcanes que han presentado actividad explosiva en los últimos 10,000 años. Entre los más relevantes se encuentra el volcán Popocatepetl, Volcán de Colima y Ceboruco que mantienen diversas similitudes entre sí. Por ejemplo, presentar actividad explosiva reciente y ubicarse sobre una región altamente poblada y, por tanto, son vulnerables. Por otra parte, existen diversos modelos numéricos que permiten simular de forma efectiva amenazas volcánicas como los lahars, Corrientes de Densidad Piroclástica (CDP), avalanchas de escombros, caída de ceniza, entre otras. En este contexto, hemos utilizado el software VolcFlow que resuelve las ecuaciones de conservación de masa y momento para simular el alcance de diversos flujos. El objetivo es identificar zonas vulnerables por amenazas volcánicas, como son las CDP y avalanchas volcánicas, sobre escenarios simulados de eventos históricos del Volcán de Colima, Popocatepetl y Ceboruco. La comparativa de nuestros resultados con datos publicados, permitieron realizar modificaciones sobre los parámetros reológicos, la densidad de flujo y/o el volumen total emitido en los escenarios simulados. En consecuencia, se estimó el alcance y dispersión ilustrando las zonas de mayor riesgo para los habitantes que radican en los alrededores de los volcanes señalados.

**PALABRAS CLAVE:** Peligro volcánico, Mitigación del riesgo, Amenazas volcánicas, Avalanchas de escombros, Corrientes de Densidad Piroclástica.

## ABSTRACT

Volcanic hazards analysis is an element for quantifying threat potential aimed at mitigating risk. Due to its geographical location, Mexico has at least 37 volcanoes that have shown explosive activity in the last 10,000 years. The most relevant is the Popocatepetl volcano, Colima volcano and Ceboruco. There are various similarities between them, such as presenting recent explosive activity and being located in a region with a high population density and, therefore, high degree of vulnerability. On the other hand, several numerical models allow simulating effectively volcanic threats such as lahars, Pyroclastic Density Currents (PCD), avalanche debris and ashfall, among others. In this context, we have used VolcFlow software which solves mass and momentum conservative equations to simulate the range of diverse kinds of flows. Considering the above, the goal of this work is to identify areas vulnerable by volcanic threats such as CDP and volcanic avalanches on simulated scenarios of historical events belonging to the Volcán de Colima, Popocatepetl and Ceboruco. Considering the above said, this article shows the result of hazard analysis of various events such as pyroclastic flows, and avalanche debris with a mitigating risk approach from volcanic hazards. Comparing our results with the reported data, allowed us to make changes in the rheological parameters, the flux density and/or the total volume in the simulated scenarios. Consequently, the range and scattering were estimated illustrating the areas of greatest risk to the inhabitants established around the volcanoes.

**KEYWORDS:** Volcanic Hazards, Risk Mitigation, Avalanche Debris, Pyroclastic Density Currents.

## 1. Introducción

El análisis de los peligros volcánicos es uno de los pilares fundamentales para la gestión y mitigación de riesgo principalmente en zonas de vulcanismo activo. En el mundo existen actualmente más de 1,398 volcanes que han mostrado actividad explosiva o efusiva desde el holoceno. En México se contabilizan al menos 37 volcanes que han presentado actividad eruptiva en los últimos 11,650 años (Global Volcanism Program, 2013). Por otra parte, en Varley *et al.*, (2017), se reportan 27 volcanes activos incluyendo campos monogenéticos. El autor destaca la región de la Franja Volcánica Transmexicana (FVT) donde se localizan los principales estratovolcanes activos como el Volcán de Colima, Popocatepetl, Citlaltépetl y campos volcánicos relevantes como Michoacán-Guanajuato y Chichinautzin. La FVT tiene una distribución longitudinal de 920 km desde Nayarit hasta el estado de Veracruz. En dicha región se establece más del 40% de la población del país, incluyendo las ciudades más pobladas, como la zona conurbada de Guadalajara, Ciudad de México y Puebla, entre otras.

Las Corrientes de Densidad Piroclástica (CDP) son definidas como el fenómeno volcánico más peligroso para poblaciones cercanas al edificio. Se caracterizan como mezclas no homogéneas y de movimiento rápido de partículas y gas que se propagan por la superficie bajo la influencia de la gravedad (Cole *et al.*, 2015). Las CDP están compuestas por magma recién fragmentado, clastos líticos derivados del conducto volcánico, así como de gases magmáticos que generan depósitos de gran volumen que pueden desplazarse a distancias de hasta 20 km (Cole *et al.*, 2015). Estas CDP se producen por diversos mecanismos como son, el colapso total o parcial del domo de lava, desbordamiento de la columna eruptiva por efecto gravitacional o

una explosión lateral, también conocida como *blast* (Kelfoun, 2011; Dufek *et al.*, 2015). Para nuestro análisis, nos enfocaremos únicamente en los flujos piroclásticos como CDP.

La avalancha de escombros, por su parte, es un término que se usa para describir flujos de fragmentos de roca asociado con deslizamientos del edificio (De Vries y Davies, 2015). Se trata de grandes deslizamientos que pueden ocurrir sobre un sector del volcán, producto de la inestabilidad de los flancos. Se generan ya sea por el ascenso de magma en el edificio volcánico, un sismo de gran magnitud cercano al edificio o por efecto de la gravedad. El efecto de *mesobrecia* ocurre en la mayoría de las calderas, son avalanchas en las paredes de la caldera que colapsan por el efecto de gravedad. Se trata de bloques de tamaño que van desde 1m hasta cientos de metros. Algunos mega bloques se pueden llegar a confundir con el suelo de la caldera (De Vries y Davies, 2015).

Las avalanchas de escombros producidas por colapso son eventos destructivos, los cuales involucran volúmenes grandes. En el trabajo de Sosio *et al.* (2012) se analizaron siete casos dentro de los que se encuentra Mount Saint Helens comparándose con observaciones documentadas. En dicho trabajo se replicaron los movimientos de algunos eventos por medio de un software llamado “Quasi-3D numerical code”. El software se rige por el parámetro del ángulo de fricción interna. Para ello utilizaron modelos digitales de elevación (MED), datos topográficos, desplazamiento, volumen, ángulos de fricción basal los cuales oscilan entre 3° - 31°. Algunos de estos parámetros fueron ajustados por medio de ensayo y error.

En cuanto a las simulaciones de amenazas por las CDP, ha habido un campo de estudio bastante amplio, en los cuales se han estimado los alcances de las CDP con el uso de diferentes softwares de modelación. En Saucedo *et al.*

(2005), por ejemplo, se generó un mapa de alcances y velocidades de la CDP, durante la crisis de 1913 en el Volcán de Colima, usando el programa FLOW3D. Sheridan *et al.* (2001) utilizó FLOW3D para estimar la trayectoria de las amenazas por CDP y lahares en el Volcán Popocatepetl. Además, otros autores como Capra *et al.* (2011), Kelfoun (2011) y Kelfoun y Vargas (2015), hicieron alusión sobre los efectos de la resolución del MED durante las simulaciones para las CDP.

La simulación de flujos dinámicos de las principales amenazas en volcanes activos es fundamental en la mitigación de riesgo. Si bien el código de VolcFlow ha sido ampliamente utilizado para simular las CPD en diversos volcanes (Kelfoun, 2009; Cárdenas-Quiroga *et al.*, 2013; Kelfoun y Vargas, 2015; Kelfoun y Vargas, 2016; Vásconez *et al.*, 2016; Charbonnier *et al.*, 2013; Dietterich *et al.*, 2017; Manzella *et al.*, 2021), en estos trabajos se realizan simulaciones de avalanchas de escombros además de CDP, dos principales amenazas por vulcanismo explosivo. Para esto, utilizamos datos de algunos principales volcanes activos de México como Popocatepetl, Volcán de Colima y Ceboruco. Para el Volcán de Colima se realizaron simulaciones de 4 eventos volcánicos, el evento de 1913 y 2015 para CDP y los eventos de Tonila (mínima de  $12,460 \pm 70$  y máxima  $135,585 \pm 135$  BP) y San Marcos ( $23,890 + 1075/-950$  BP) para las avalanchas de escombros. Mientras que para el Popocatepetl y Ceboruco se realizó sólo la simulación de CDP.

En el presente artículo se reporta el proceso de simulación de dos tipos de amenazas volcánicas por flujos, como son las avalanchas volcánicas y las CDP, por medio de modificaciones en los coeficientes reológicos, principalmente sobre la densidad del flujo, además de otras variables relevantes es el volumen de material aproximado. Dichas modificaciones permitirán estimar el alcance y dispersión de diversos es-

cenarios simulados para 3 de los volcanes más activos de México como son Volcán de Colima, Popocatepetl y Ceboruco. Con ello se pretende identificar aquellas zonas expuestas ante las amenazas mencionadas con referencia a eventos históricos relevantes para los tres volcanes.

Considerando lo anterior, parte de nuestros objetivos es mostrar los alcances y limitaciones de las simulaciones del algoritmo *Volcflow*. Asimismo, se utilizará un MED actualizado con resolución de 15m para todas las simulaciones de todos los volcanes analizados en el presente documento. Los resultados son comparados con trabajos de diversos autores, lo cual nos permite calcular el grado de incertidumbre de nuestro análisis realizando modificaciones pertinentes en los parámetros reológicos.

## 2. Antecedentes del vulcanismo activo en México

### 2.1. Volcán de Colima

En los últimos 500 años el Volcán de Colima ha presentado 5 explosiones catalogadas con el Índice de Explosividad Volcánica (I.E.V.) mayor e igual a 4 (De la Cruz-Reyna, 1991; Macías, 2006; Mendoza-Rosas y De la Cruz-Reyna, 2008; 2009; De la Cruz-Reyna y Mendoza-Rosas, 2015; Varley, 2017 y 2019; Varley *et al.*, 2017). La última erupción de este tipo ocurrió en 1913 donde se emitió un volumen aproximado de  $1.1 \text{ km}^3$  de material de acuerdo con Saucedo *et al.* (2005).

Por otra parte, el 10-11 julio de 2015, el colapso parcial del domo produjo que un flujo de CDP descendió sobre las laderas del volcán explícitamente hacia el sur en dirección a la comunidad de Quesería, sobre la barranca conocida como Montegrande (Reyes-Dávila *et al.*, 2016; Capra *et al.*, 2016). De acuerdo con Capra *et al.* (2016) la erupción emitió un volumen

aproximado de  $4.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Este evento, a pesar de que no produjo daños significativos en la infraestructura y/o economía de la región, es parte fundamental para el análisis de peligro que será considerado en la presente investigación.

La intensa actividad explosiva del Volcán de Colima se comprende de diversas fases que culminan con erupciones potentes de destrucción de domos de lava, como ocurrió en la erupción pliniana de 1913. De forma similar ocurrió en otros episodios de menor magnitud, en términos de energía total liberada, durante los años de 1998, 2005 y finalmente, en julio de 2015 que precedió al cese de la actividad efusiva y explosiva en 2017. Actualmente el volcán continúa en reposo de actividad explosiva desde el 2017. No obstante, es importante el monitoreo para detectar cualquier cambio como probable precursor de la actividad explosiva o efusiva.

## 2.2. Volcán Popocatepetl

La geología evolutiva del Popocatepetl ha sido sintetizada por diversos autores en las que destaca el artículo de Macías (2006) entre otros (Robin, 1984, Carrasco-Nuñez, 1985; Mendoza-Rosas y De la Cruz-Reyna, 2008, 2009, 2017, 2019a y 2019b; Siebe *et al.*, 2017; Macías *et al.*, 2020). Diversos autores consideran tres etapas principales: en la primera etapa el edificio del volcán primitivo, también conocido como volcán Nexpayantla (Muñoz-Salinas *et al.*, 2020), donde se identifica el colapso parcial por la región lateral que produjo la formación de una caldera hace 200,000 años A.P. Similar a los observados en Mount Saint Helens en 1980 y a la del Volcán de Colima hace 4500 años, de acuerdo con Luhr y Prestegard (1988) y Hoblitt *et al.* (1981).

En el interior de esta caldera se inició la construcción de un segundo volcán conocido

como El Fraile, se estima que éste último colapso entre 50,000 y 30,000 años antes del presente. La erupción destruyó la parte meridional del volcán produciendo una enorme caldera de de amplitud dispersando un volumen de 28 a 30  $\text{km}^3$ . El segundo edificio creció dentro del colapso del edificio Nexpayantla, y recibe el nombre de su resto más destacable, el Cerro Ventorrill destruido aproximadamente hace 23,000 años, en una erupción lateral de magnitud superior a la ocurrida el 18 de mayo de 1980 en el volcán Mount Saint Helens (Hoblitt *et al.*, 1981), donde se produjo el colapso hacia el sur del antiguo cono del Popocatepetl. La explosión generó una avalancha de escombros que alcanzó distancias hasta de 70 km desde la cima. El colapso parcial generó la formación de cúmulos de material denominados *Hummoks* y la formación de una caldera. Posterior a este evento comenzó la formación del cono actual del Popocatepetl construido aproximadamente desde hace 23,000 años. Actualmente el Popocatepetl tiene una elevación sobre el nivel del mar de 5,472 m y una elevación relativa respecto a sus faldas de 3,000 m. Está edificado por una serie de depósitos de CDP y coladas de lava de composición andesítica-dacítica. El volcán Popocatepetl ha tenido una secuencia de emplazamientos y destrucción de domos en la etapa eruptiva actual, la cual comenzó en 1994, emplazándose el primer domo de esta etapa en 1996, contándose al menos 36 emplazamientos hasta el 2016 (Gómez-Vázquez *et al.*, 2016; Mendoza-Rosas *et al.*, 2019a y 2019b). La historia eruptiva y geológica de eventos explosivos en este volcán ha sido analizada por Mendoza-Rosas y De la Cruz-Reyna (2008; 2009; 2019) para la evaluación estadística del peligro volcánico.

Otra erupción nominada “Pómez Ocre”, ocurrió hace aproximadamente 5,000 años. Se trata de una erupción tipo pliniana de gran magnitud, la cual se desarrolló en cuatro fases y

cada una se distingue por una actividad eruptiva diferente. La primera fase también conocida como pre-pliniana, que consistió en erupciones de tipo vulcaniana generó CDP por colapso de columna, así como flujos de bloques y ceniza, producto de posibles colapsos de domo.

La fase pliniana inicial, consistió en explosiones freatomagmáticas que desarrollaron CDP de forma radial hasta 7 km del cráter. En esta fase ocurrió una alta fragmentación de materiales densos que obstruyeron el conducto del cráter antes de la siguiente fase de la erupción. La fase pliniana principal generó una columna eruptiva que alcanzó los 30 km de altura, además de que los depósitos expulsados de ceniza cubrieron una distancia de alrededor de 493 Km<sup>2</sup> con espesores de ceniza de hasta 10 cm, sin contar los CDP que se generaron en un radio de 5-10 km (Arana-Salinas *et al.*, 2010).

### 2.3. El volcán Ceboruco

El volcán Ceboruco ubicado en el estado de Nayarit, tiene una altura de 2,200 m sobre el nivel del mar. Se trata de un estratovolcán andesítico-dacítico del cuaternario tardío, localizado sobre Graben Tepic-Zacoalco por el oeste de la FTV (Nelson, 1986, Frey *et al.*, 2004; Sánchez *et al.*, 2009; Espinasa-Pereña, 2018). El volcán está conformado por dos calderas concéntricas, el domo exterior y la más antigua que tiene aproximadamente 3.7 km de diámetro, resultado de una erupción pliniana. El caso de la caldera interna fue producto del colapso del domo de acuerdo con Frey *et al.* (2004).

El Ceboruco ha estado activo desde el Pleistoceno tardío teniendo importante actividad volcánica. La más significativa y la que se analizará en este artículo es la erupción tipo pliniana de Jala en el año 1060 ± 55 años A.P. En Espinasa-Pereña (2018) se menciona la presencia de

pobladores en la zona que fueron testigos de la erupción, por lo que es una parte esencial de la historia volcánica regional, pues al menos un área de 560 km<sup>2</sup> fue devastada.

En promedio, cada 143 años se han observado muestras de actividad eruptiva en los últimos 1000 años (Sieron *et al.*, 2019). La erupción volcánica de Jala no está ampliamente documentada, sin embargo, se estima un Índice de Explosividad Volcánica igual a 6 (Sieron *et al.*, 2019). En general los flujos son mayoritariamente de origen lítico por lo que se probarán valores similares en la densidad y viscosidad, a los utilizados en la modelación de CDP en el Volcán de Colima.

Su actividad eruptiva geológica y la amplia gama de estilos de erupción que presenta el Volcán Ceboruco, nos indica que es de gran importancia su estudio y análisis por dos factores importantes: el primero es la escasa referencia bibliográfica sobre la actividad histórica del volcán, considerado uno de los más activos en México, a pesar de su inactividad explosiva y efusiva desde 1870. Segundo, es considerado dentro de los volcanes más peligrosos en México, según el Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED. No obstante, actualmente presenta escaso equipo de monitoreo por parte de las autoridades regionales y nacionales. De ahí la importancia de nuestra investigación sobre dicho volcán.

### 3. Metodología

A continuación, se presenta la metodología desarrollada para el presente artículo. En la primera sección se discute el funcionamiento básico del modelo Volcflow. Posteriormente, en la sección 3.2 se describen las variables utilizadas para su aplicación a las CDP en el Volcán de Colima, Popocatepetl y Ceboruco. Finalmente, la sección 3.3 describe, de igual manera, los da-

tos de entrada necesarios para la simulación de avalanchas de escombros en eventos del Volcán de Colima.

### 3.1. Modelo de VolcFlow en MATLAB

Existen diversos modelos numéricos para la simulación de fluidos como son las avalanchas volcánicas, CDP, entre otros, que facilitan estimar el riesgo por medio de análisis de eventos históricos (Carey y Sigurdsson, 1986; Schilling 1998; Kelfoun y Druitt, 2005; Saucedo *et al.*, 2005; Huggel *et al.*, 2008; Sieron *et al.*, 2019). No obstante, dichas herramientas se encuentran limitadas en las variables dinámicas y reológicas complejas de determinar directamente como son la densidad, la viscosidad, el volumen del material expulsado, coeficiente de fricción, etc. En este sentido, el código desarrollado en Matlab por Kelfoun y Druitt, (2005) permite simular diversos flujos de densidad controlada utilizando ecuaciones de equilibrio de masa y momento:

$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0$	(1)
$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gbsin\alpha_x - \frac{1}{2}K_{actpass} \frac{\partial}{\partial x}(gh^2cos\alpha) + \frac{T_x}{\rho}$	(2)
$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(hvu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) = gbsin\alpha_y - \frac{1}{2}K_{actpass} \frac{\partial}{\partial y}(gh^2cos\alpha) + \frac{T_y}{\rho}$	(3)

donde  $h$  es el espesor del flujo,  $(x, y)$  son las coordenadas del plano horizontal,  $t$  es el grid del tiempo,  $\mathbf{u}(u, v)$  la velocidad del flujo,  $\alpha$  el ángulo de la pendiente,  $g$  es la gravedad,  $\rho$  es la densidad volumétrica que controla el fluido a determinar; para CDP y avalanchas de escombros tomará valores distintos. Asimismo, la tensión (T) sobre la base del flujo varía de acuerdo con la reología. El término  $K_{actpass}$  es el coeficiente de presión que está en función de los ángulos interno y basal (Kelfoun y Druitt, 2005; Kelfoun, 2009).

Las ecuaciones de conservación de momento y masa, consideran el sistema cerrado. Es decir, no se introduce material por fuente externa durante el proceso de simulación. Las ecuaciones son similares a las utilizadas por Costa y Macedonio (2005) sin la dependencia de temperatura en el fluido homogéneo e incompresible. El algoritmo, además, ha mostrado su capacidad óptima de reconstruir estados de eventos históricos de forma eficiente (Kelfoun y Druitt, 2005; Cárdenas-Quiroga *et al.*, 2013; Kelfoun y Vargas; 2015; Vásquez *et al.*, 2016). Usando la herramienta de simulación es posible definir y delimitar probables zonas de riesgo expuesta sobre volcanes activos.

### 3.2. Modelación de Corrientes de Densidad Piroclástica

Para las simulaciones en las CDP se requiere establecer diversos parámetros que controlan el comportamiento del fluido (coeficientes reológicos), alcance y espesores de masa o volumen. Para el caso del Volcán de Colima se tomaron eventos relativamente contemporáneos donde se produjeron CDP como fue durante la crisis del 20 enero de 1913 así como el evento de 10 y 11 de julio de 2015. Para ambos eventos se obtuvieron los coeficientes de fricción basal (Delta\_Bed), calculado con la altura del depósito H entre la longitud del depósito L (H/L) y coeficientes de fricción interna (Delta\_Int) o ángulo de reposo para 1913 (Saucedo *et al.*, 2019; 2015; Macorps *et al.*, 2018).

Una de las variables más importantes es la densidad, la cual es fundamental en el movimiento de los flujos. En este caso se utilizó la misma densidad,  $\rho$ , para los dos modelos siendo de  $1580 \text{ kg/m}^3$  (Varley *et al.*, 2019; Macorps *et al.*, 2018). También se tomó en cuenta la viscosidad,  $\mu$ , para ambos casos, además de la rapidez

y alcance de los flujos simulados. El tiempo de simulación ( $T_{max}$ ) se tomó de 2600s para 1913 y 1600s para 2015 ajustándolo con base en ensayo y error, con el fin de observar la distancia máxima de las CDP. Además de que se fijó un tiempo de muestreo ( $Dt$ ) con el cual evitar errores en el software que resultaran en volúmenes negativos. La [tabla 1](#) ilustra los datos de entrada en la simulación para cada evento.

Por último, se obtuvo el valor del volumen total de las CDP generados por los dos eventos. En el caso del evento de 1913 se encontró que el volumen total fue de  $0.239 \text{ Km}/\text{m}^3$  (DRE) resultado de la erupción pliniana que con la suma de sus tres fases eruptivas se obtuvo el valor del volumen total (Varley *et al.*, 2019). Considerando el caso del evento del colapso de 2015 los volúmenes encontrados fueron menores de  $0.0024 \text{ Km}/\text{m}^3$ . Este último es un valor relevante pero inferior considerando las magnitudes y alcances de ambos eventos.

Para la simulación del Popocatepetl se necesitaron parámetros reológicos que complementan el código de simulación con los cuales se generará el comportamiento y movimiento de las CDP en el software. Los datos que se utilizaron fueron recopilados de investigaciones previas enfocadas a la erupción Ocre Pómez (Arana-Salinas *et al.*, 2010; Del Pozzo *et al.*, 2017), en los cuales los parámetros reológicos fueron los siguientes: Ángulos de fricción Interno y Externo fueron obtenidos en Del Pozzo *et al.*, (2017). De igual manera se calculó la densidad, la cual, a diferencia de este parámetro en el Volcán de Colima, es más baja, ya que los depósitos de este evento fueron mayoritariamente de pómez en relación con líticos.

La densidad fue estimada por medio del promedio ponderado de la relación de roca pómez y líticos usando la siguiente ecuación, siendo y corresponde al peso ponderado del 90% de roca pómez y al 0.1 o 10% del porcentaje de líticos,

de acuerdo con Robin y Boudal, (1987). Por lo cual dio como resultado una densidad de  $809 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Por otro lado, los tiempos de simulación y muestreo para el Popocatepetl, fueron igualmente los utilizados en el evento de 1913. La [tabla 1](#) muestra los parámetros de entrada para CDP para cada uno de los eventos.

El volumen total de la erupción de flujo de Pómez Ocre fue de  $5 \text{ km}/\text{m}^3$  de acuerdo con Arana-Salinas *et al.* (2010). Este volumen abarca todos los demás depósitos además de las CDP, como el de caída,  $4.9 \text{ kg}/\text{m}^3$ , de las oleadas,  $0.0015 \text{ kg}/\text{m}^3$  y el volumen de los flujos  $0.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Nuestros resultados fueron comparados con el análisis de Del Pozzo *et al.* (2017), con la finalidad de observar diferencias y similitudes de ambos modelos.

Para el volcán Ceboruco, se han reportado valores muy diferentes para este dato, por ello se optó por realizar un modelo inverso para la estimación del volumen de los parámetros. Hemos estimado el volumen total emitido en dicho evento, considerando un método de prueba y error. Para ello se utilizaron diversos valores para el volumen total de la CDP observando su alcance, orientación y espesor reportado por otros autores (Nelson, 1986; Sieron *et al.*, 2019). Por ejemplo, Sieron *et al.*, (2019) utilizaron un valor desde 0.5 hasta  $1 \text{ km}^3$ . Nelson (1986) reportó un volumen fue de  $3\text{-}4 \text{ km}^3$ . Este último indica que las zonas de alcance fueron Jala, Marquezado, Ahuacatlán. Para la simulación del evento pliniano “Jala” del año  $1060 \pm 55$  años A.P de Ceboruco, utilizamos un MED del con resolución de 15 m obtenido del INEGI.

### 3.3. Modelación de avalanchas volcánicas

Los parámetros utilizados para la modelación de avalanchas volcánicas en Colima fueron los

**TABLA 1.** Datos de entrada para la simulación de las CDPs con Software VolcFlow para Volcán de Colima de 1913 (a) y 2015(b), Ceboruco (Jala) y Popocatépetl (Pomez Ocre). Referencias indicadas entre paréntesis en la tabla correspondientes a: 1. Saucedo *et al.* (2019); 2. Marcorps *et al.* (2018); 3. Arana-Salinas *et al.* (2010); 4. Del Pozzo *et al.* (2017); 5. Sieron *et al.* (2019). Algunos datos son considerados con valor estándar como la aceleración de la gravedad de  $9.81\text{m/s}^2$ .

Variable	VDEC (a)	VdeC (b)	Ceboruco	POPOCATÉPETL	Descripción
Delta_Int	0	0	35° (5)	30° (4)	Ángulo interno
Delta_Bed	24° (1)	11° (2)	8°-12° (5)	7° (4)	Ángulo de lecho
Cohesión	0	0	0	0	Fuerza por unidad de superficie (Pa)
	0.01	0.01	0.01	0.01	Viscosidad (Pa/s)
	0.01	0.01	0.01	0.01	Fuerza de turbulencia (N)
	1580(1)	1580(2)	1500	simulado	Densidad ( $\text{Kg/m}^3$ )
Dt	0.1	0.1	0.1	0.1	Tiempo de muestreo (s)
Dtplot	1	1	1	1	Tiempo de ploteo del DEM
Tmax	2600	1600	2600	2600	Duración de la simulación (seg)
Volumen	0.239 (1)	0.0077(2)	Simulado	0.007(3)	Volumen de la Erupción ( $\text{km}^3$ )

siguientes: el parámetro de volumen es de  $2.3\text{ km}^3$  (Roverato y Capra, 2013), el parámetro de densidad utilizado es de  $2,747.19\text{ kg/m}^3$  (Cárdenas-Sánchez *et al.*, 2021) para la densidad masiva (también conocida como *bulk density*) se usaron datos densidad y porosidad publicados por Farquharson *et al.* (2015).

El parámetro de Fuerza de turbulencia (Ft) el cual incluye la velocidad del flujo, densidad, viscosidad y las posibles fuentes de resistencia (Benjamin, 2014), se obtuvo de (Kelfoun, 2009). El parámetro Basal Fricción (Delta\_Int) es un promedio del ángulo de limo y arcilla, que se calculó manualmente (Roverato y Capra, 2013), ángulo de fricción (Delta\_Bed) =  $H/L$ , donde H es la altura vertical del depósito y L la longitud del depósito y la cohesión proviene del libro de Cortes *et al.* (2019). El tiempo de modelación (Tmax) fue de 9,000 segundos. El muestreo (Dt) se fijó en una muestra por cada 2 segundos (tabla 2).

## 4. Resultados y Discusión

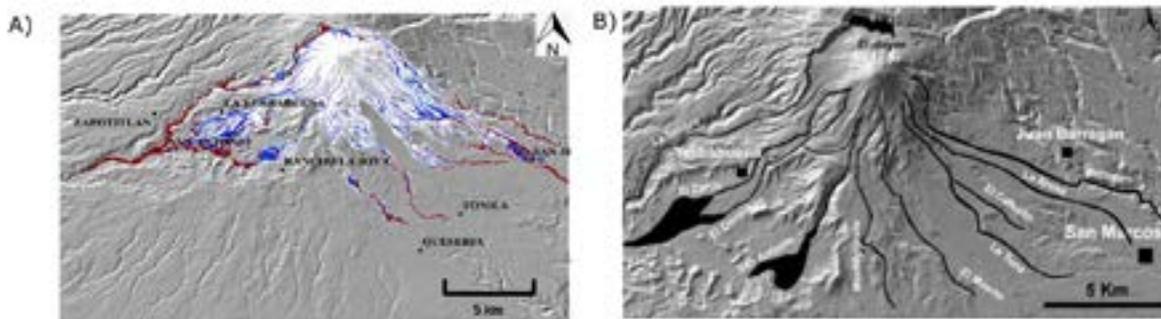
### 4.1. Volcán de Colima

#### 4.1.1. Modelación de CDP del evento Plinianico de 1913 y del colapso de domo del 10-11 de julio de 2015

El modelo del evento de 1913 generó gran cantidad de material expulsado sobre las barrancas principales como: La lumbre, Córdoba, San Antonio, Montegrande, Muerto, Santa Ana y la Arena. Nuestra simulación representó adecuadamente diversos depósitos de flujo que alcanzaron hasta 10 km de distancia sobre las poblaciones próximas como son la comunidad de La Joya, Quesería, Rancho el Jabalí y Yerbabuena, asemejándose a los resultados de Saucedo *et al.* (2005), con diferencias en la distribución de las CDP (figura 1). Además de que las velocidades obtenidas eran más grandes de 160-90 m/s en algunas zonas a diferencia de los 100-50 m/s reportados por Saucedo *et al.* (2005), pero mos-

**TABLA 2.** Datos para simulación de avalanchas de escombro para el Volcán de Colima (Tonila: y San Marcos). Referencias indicadas entre paréntesis en la tabla correspondiente a: 1. D Cárdenas-Sánchez *et al.* (en prep.); 2. Cortes *et al.* (2019); 3. Roverato y Capra (2013); 4. Kelfoun (2009).

	Tonila	San Marcos	Descripción de parámetros
Parámetro:	<b>Valor:</b>	<b>Valor:</b>	<b>Descripción:</b>
$\rho$	2747.19(1)	2747.19(1)	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )
$\mu$	500	500	Viscosidad (Pa/s)
Cohesión	0.03(2)	0.03(2)	Fuerza por unidad de superficie (Pa)
Delta_Int	22° (3)	22° (3)	Ángulo interno
Delta_bed	28° (3)	28° (3)	Ángulo de lecho
$F_t$	0.01 (4)	0.01 (4)	Fuerza de Turbulencia ( $N$ )
Volumen	2.3(3)	2.3(3)	Volumen ( $\text{km}^3$ )
Tmax	9,000	9,000	Duración de Simulación (s)
Dt	2	2	Tiempo de muestreo (s)
Dtplot	A los 2 segundos	A los 2 segundos	Tiempo de ploteo del DEM

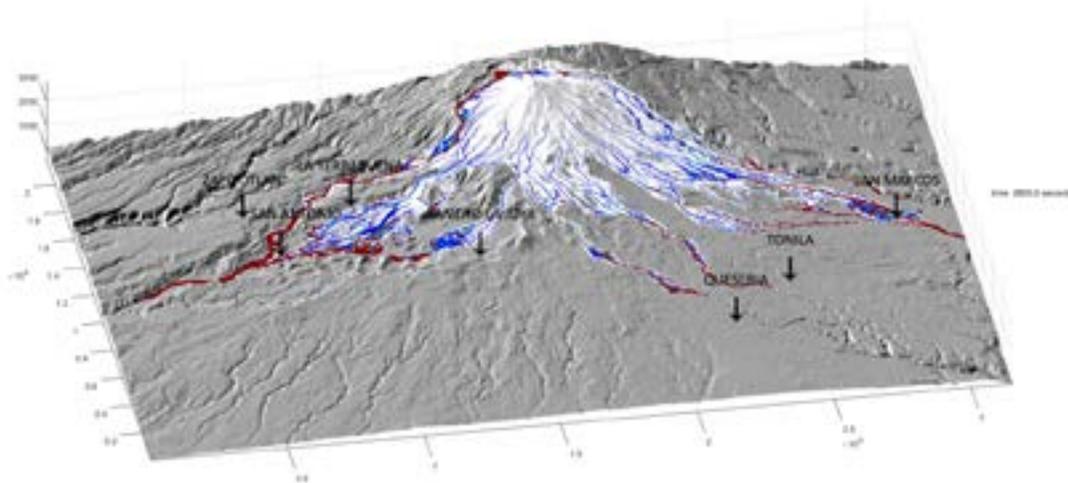


**FIGURA 1.** Comparación de los flujos simulados en el evento de 1913. A) Corresponde a la simulación con los parámetros indicados en tabla 1, B) Corresponde a la distribución estimada por Saucedo *et al.* 2005 y 2010.

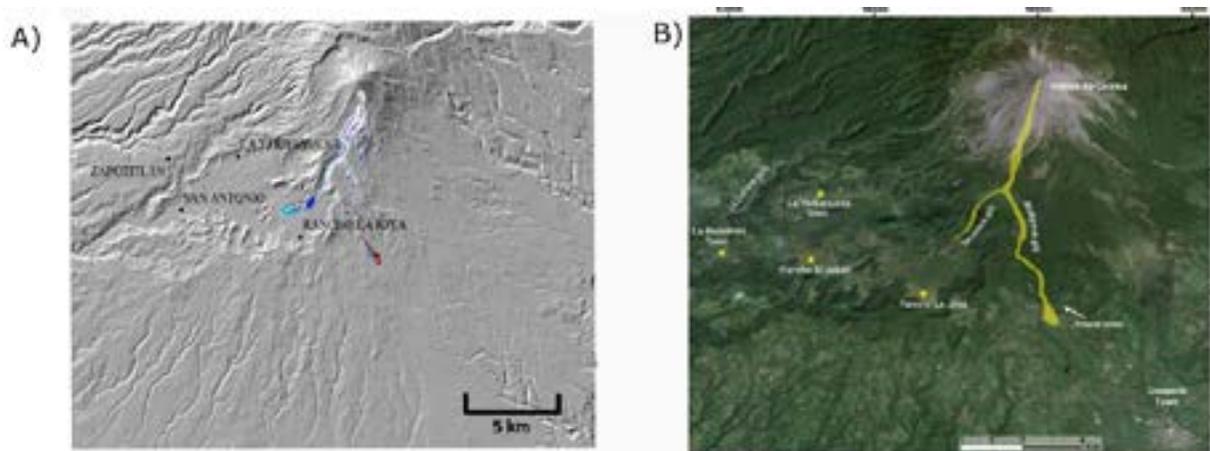
trando la misma zona de riesgo para estos poblados, incluso llegando a dispersarse a mayor distancia, como se observa en la [figura 2](#). Los resultados son de gran utilidad para observar el comportamiento del modelo, el alcance y daño de los flujos a consecuencia de una erupción pliniana similar a la de 1913.

Del resultado de la modelación de 2015 se observó que las CDP se desplazaron por el lado sureste del Volcán de Colima. En la simulación

se observó que los flujos se concentraban en dos barrancas principales con distancias de 10 km en el caso de la barranca de Montegrande y de 8 km en la barranca del muerto. Su comportamiento, deposición y alcance fue muy similar a lo descrito por Capra *et al.* (2016), Reyes-Avila *et al.* (2016) y Macorps *et al.* (2018), [figura 3](#). Se observó además un avance mayor de los flujos sobre la Barranca del muerto a diferencia de los depósitos observados, [figura 3](#). Estos flujos



**FIGURA 2.** Distribución de los depósitos de CDP's del evento eruptivo de 1913 vista 3D. En la imagen se aprecian las principales comunidades que son vulnerables por un evento similar.



**FIGURA 3.** Comparación de la distribución de los depósitos del evento de 2015. A) corresponde a los flujos simulados por colapso de domo en el programa VolcFlow, B) corresponde a la localización de los depósitos de CDP de los colapsos de domo (Tomado de Reyes-Dávila *et al.*, 2016).

alcanzaron gran distancia aproximándose a las poblaciones cercanas de Quisería y al Rancho la joya, que cuentan con un número de 9,931 habitantes en conjunto.

Las amenazas de CDP en Colima radican principalmente en las comunidades que se encuentran en un radio de 15-20 km de la cumbre del volcán. Estas comunidades son La Yerba buena, El Jabalí, Rancho la Joya, San Antonio, Quisería, Tonila, San Marcos y la Cofradía. El número de pobladores aproximado es de 17,014 de acuerdo con INEGI (2020). Actualmente, en la zona predomina la actividad agrícola de maíz y caña aprovechando 14,000 hectáreas de terreno que se encuentran a una distancia menor a los 10 km, además, estas mismas fueron parcial o totalmente destruidas durante la crisis de 1913 (Saucedo *et al.*, 2010).

#### **4.1.2. Modelación de la avalancha de escombros de Tonila (mínima de 12,460 ± 70 y máxima 135,585 ± 135 A.P) y San Marcos (23,890 + 1075/-950 A.P)**

En la [figura 4](#) se muestra una comparativa con datos obtenidos de Roverato y Capra (2013), correspondiente a la distribución de los depósitos de avalancha de escombros de San Marcos (línea punteada azul) y el depósito de Tonila (la línea punteada Roja) y el resultado de nuestro análisis. La simulación fue similar a los datos observados y modelos con alcance de hasta 43km, con dirección suroeste, sur y sureste, alcanzando las localidades de Tonila, San Marcos y Quisería, con espesores de entre 20 hasta 100 m en algunas partes del evento, [figura 5b](#) y [5c](#). Estas son las localidades más cercanas al volcán.

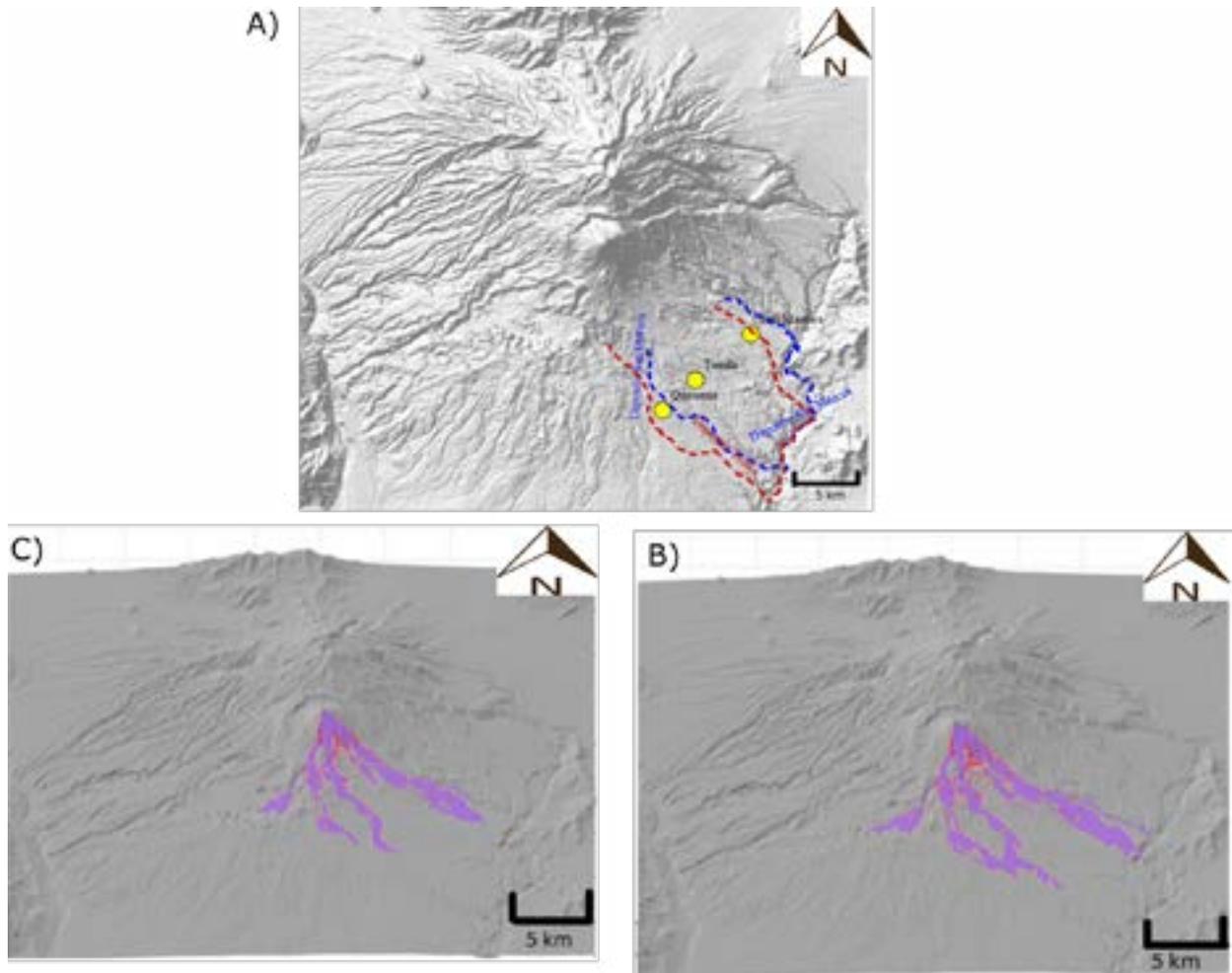
En las [figuras 5b](#) y [5c](#) se puede observar el paso del evento por las tuberías principales del volcán, las cuales son Montegrande, Los Lobos, la barranca de Beltrán, Platanar y Rosarito, en

dirección al río Naranjo en ambos casos. En la imagen inferior derecha se aprecia el alcance hasta el río Naranjo. Por lo tanto, podemos observar en la comparativa, que el desplazamiento del evento es muy similar. De hecho, nuestra simulación muestra desplazamiento de hasta 15 kilómetros como lo marcan los antecedentes del depósito de San Marcos.

En relación con los datos del depósito de Tonila, se observó un desplazamiento mayor a los 15 kilómetros, similar al de San Marcos. Ambos siguen el desplazamiento hasta el río Naranjo. Existe una ligera diferencia con los datos observados debido a la sensibilidad del modelo relacionado por la diferencia topográfica de la época con el MED utilizado.

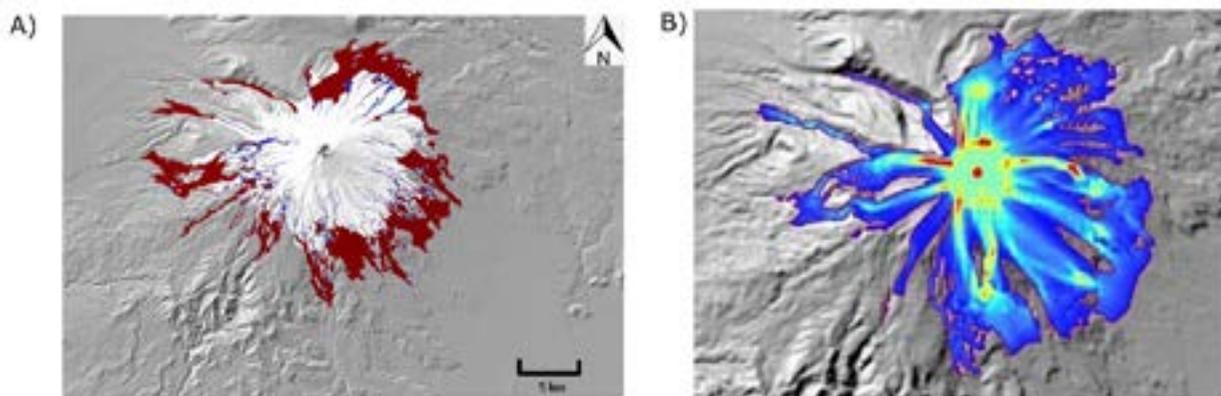
En la actualidad un evento similar al de San Marcos y Tonila es una amenaza latente sobre diversas localidades en un radio de 10km a 25km del edificio. En términos de zonas que podrían ser afectadas por un evento similar, se contabilizan 7 municipios de los estados de Jalisco y Colima. En el Estado de Jalisco se encuentran los municipios de Tonila, Zapotiltic, Tuxpan, Zapotitlán de Vadillo, San Gabriel. Para el Estado de Colima tenemos a los municipios de Cuauhtémoc y Comala. En total en estos municipios habitan 145,554 personas según datos de INEGI (2020). Las más relevantes, se encuentran a una distancia aproximada de 14 km del edificio como son Tonila, San Marcos y Quisería, con un total de 24,164 habitantes de acuerdo con INEGI (2020).

Este evento puede cortar la circulación de las vías principales que son la carretera libre Cuauhtémoc-Tonila (54) y la autopista Guadalajara-Colima (54D) por las cuales existe gran paso vehicular y con ello paso de economía. Así como las únicas dos estaciones de combustible ubicadas en el poblado de Quisería, además de clínicas hospitalarias de las localidades correspondientes.

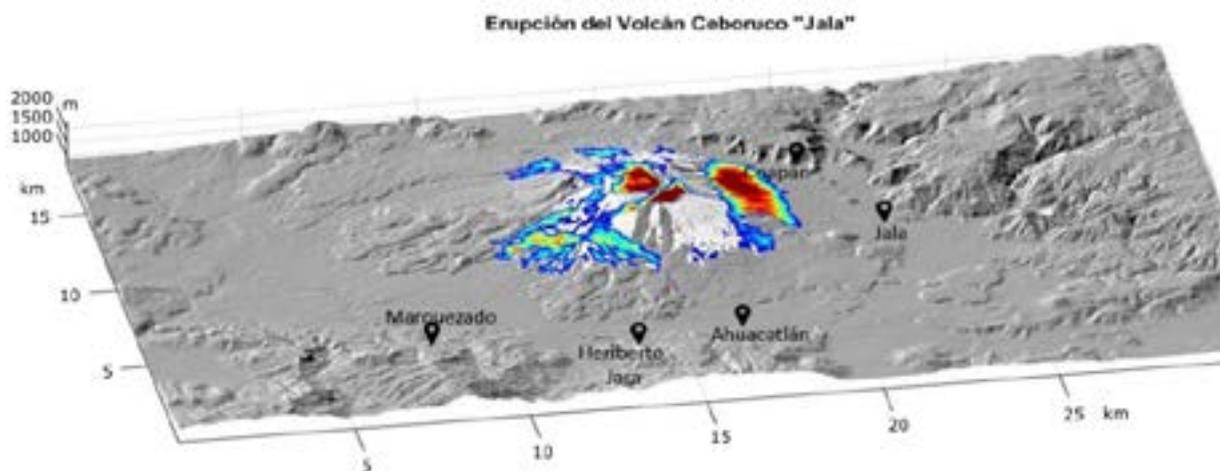


**FIGURA 4.** Comparación de resultados obtenidos Vs. resultados de (Roverato y Capra, 2013); A) Modelo de Roverato y Capra, (2013) con distribución de población, ajustado a la escala utilizada en el MED utilizado en la simulación; B) Modelación con 9,000 segundos, alcanzado los poblados de Tonila, Quesería y San Marcos, llegando al Río Naranjo; C) Modelación con 6,000 segundos, con su desplazamiento y orientación hacia los poblados de Tonila, San Marcos y Quesería, bajando por las principales barrancas del edificio volcánico.





**FIGURA 6.** Comparación de los dos modelos de la erupción Pómez Ocre. A) corresponde a la simulación propia hecha en el software Volcflow. B) corresponde a la creada en TITAN2D por Del Pozzo *et al.* (2017).



**FIGURA 7.** Simulación 3D del evento eruptivo Jala del año  $1060 \pm 55$  años A.P, realizada a los 2600 segundos con el programa VolcFlow.

Además, dos importantes autopistas que pasan por la zona la carretera 438D rumbo a Puebla y la 115D rumbo a la Ciudad de México que poseen gran afluencia de vehículos y proveen actividad económica relevante.

### 4.3. Volcán el Ceboruco

Usando un método de prueba y error sobre el alcance, distribución de espesores y dispersión del área, se obtuvo un volumen de  $0.7 \text{ km}^3$  para la erupción de Jala. Utilizamos principalmente

los datos Sieron *et al.* (2019). Los autores utilizaron un rango de valores con volumen de hasta  $1 \text{ km}^3$  para el CDP.

La erupción de  $1060 \pm 55$  años A.P. no está ampliamente documentada sobre los coeficientes reológicos, por tanto, se optó por utilizar una densidad de flujo de  $1500 \text{ kg/m}^3$ . Lo anterior debido a que el Ceboruco cuenta con una petrología similar al Volcán de Colima (Nelson, 1980 y 1986; Savov *et al.*, 2008). Con ello obtuvimos resultados similares a otros autores en términos de desplazamiento y área de afectación (Sieron *et al.*, 2019) (figura 7). Los CDP pro-

venientes del colapso de la columna eruptiva, se orientaron con una tendencia preponderante hacia el suroeste-noreste. En el área simulada se puede observar cómo el emplazamiento es controlado por la topografía local.

De acuerdo con los resultados de la simulación el área de afectación, de este escenario, sería de 245.24 KM<sup>2</sup> (figura 7). Dentro de esta área se encuentran las localidades de Ixtlán del Río, San Pedro Lagunillas, Jala, Ahuacatlán, Compostela, Tepic, Santa María del Oro, Coapan y Marquezado. En total estas localidades representan a más de 600,000 habitantes, aproximadamente.

Además, se contabilizó 15,455 hectáreas destinadas a los cultivos de maíz, chile, tabaco y tomate. Otra actividad económica de la zona es la ganadería, en donde hay aproximadamente 151 cabezas de ganado. Además, parte de la infraestructura que podría estar comprometida por un evento similar sería la Autopista Guadalajara-Tepic, la Vía Férrea ubicada al sur del volcán, dos centrales hidroeléctricas, así como 4 hoteles, 25 escuelas, 6 establecimientos de salud, 1 gasolinera, 4 supermercados. Finalmente 3942 viviendas que son las más próximas a el volcán, según el Atlas Nacional de Riesgos del Gobierno de México para el estado de Nayarit.

El tamaño de la topografía del edificio de los volcanes analizados fue proporcional al tiempo de procesamiento donde destaca el Popocatepetl con un tamaño de MED superior al resto. La diferencia de volumen y área de dispersión fue apreciable, inclusive en el procesamiento, potencializando el número de horas de cómputo entre la simulación de cada volcán. Por ejemplo, las simulaciones de CDP para Ceboruco fueron de 8hrs, mientras que para el Volcán de Colima tomaron aproximadamente 24 horas. No obstante, para el Popocatepetl, tomó aproximadamente 5 días continuos.

Debemos mencionar que el procesamiento fue por CPU en paralelo. En este sentido, nuestra meta en un futuro próximo es implementar el código de VolcFlow en vía GPU (Graphic Processing Unit, por sus siglas en inglés), para mejorar la eficiencia en el tiempo de procesamiento. Aunado a lo anterior, se requiere continuar investigando para mejorar la estimación sobre otros coeficientes reológicos como son el coeficiente de viscosidad dinámica y estática para esta clase de flujos, debido a la escasa referencia en la literatura actual.

## 5. Conclusión

Las simulaciones realizadas en el presente trabajo permitieron identificar el alcance y la dispersión de las avalanchas de escombros y CDP. Parte de nuestra contribución fue implementar el software de VolcFlow en las Avalanchas de Escombros, además de CDP, con resultados equivalentes a los reportados por otros autores. En este contexto, el modelo de ponderación de densidad se ajusta adecuadamente a las simulaciones de los diversos escenarios tanto para las avalanchas volcánicas como las CDP (tabla 1).

Para las CDP en las simulaciones del Volcán de Colima y Ceboruco se utilizó un valor de 1580 y 1500 kg/m<sup>3</sup> respectivamente, mientras que para el Popocatepetl fue de 809kg/m<sup>3</sup> considerando los 90% de roca pómez y el resto sobre líticos. En el caso de las Avalanchas de Escombros, la densidad utilizada de 2,747.19 kg/m<sup>3</sup> y corresponde únicamente la densidad de los líticos del edificio volcánico. Además, nuestra simulación para el volcán Ceboruco mostró que el volumen estimado para la erupción similar a la Jala, fue 0.7km<sup>3</sup> con orientación y alcance similares a los reportados por otros autores. En todas las simulaciones, para ambos tipos de

amenazas, los alcances y espesores son parecidos a los reportados por los otros autores.

Al igual que otros autores que han trabajado con VolcFlow, encontramos la problemática del MDE sobre simulaciones de eventos históricos antiguos, tanto para la simulación de CDP como las avalanchas de escombros. Es evidente que la topografía actual es muy diferente a los eventos pasados como los analizados en el presente artículo. A pesar de lo anterior y de la facilidad del VolcFlow sobre modelación en 3D, el software permite identificar las zonas de vulnerabilidad como zonas habitacionales, granjas, cultivos e infraestructura vital como son carreteras, puentes u hospitales civiles que pudieran estar comprometidos por estas amenazas.

## Referencias

- ARANA-SALINAS L., Siebe, C. y Macías, J., 2010. Dynamics of the ca. 4965 yr 14C BP “Ochre Pumice” Plinian eruption of Popocatepetl volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 192(3-4), 212-231.
- ATLAS Nacional de Riesgos. (2016). Gob.mx. Recuperado el 18 de agosto de 2021, de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/mapa-peligros-po-po.html>
- BENJAMIN, J. (2014). Dynamic analysis of long run-out rock avalanches: A view from the Vaigat Strait, West Greenland. Doctoral dissertation, Durham University. pp. 18-21.
- BRANNEY, M. y Acocella, V. 2015. Calderas. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 299-315). Academic Press.
- CAPRA, L., Manea, V.C., Manea, M. Norini, G. 2011. The importance of digital elevation model resolution on granular flow simulations: a test case for Colima volcano using TITAN2D computational routine. *Natural Hazards*, 59: 665-680.
- CAPRA, L., Macías, J. L., Cortés, A., Dávila, N., Saucedo, R., Osorio-Ocampo, S. y Vázquez, R. 2016. Preliminary report on the July 10–11, 2015 eruption at Volcán de Colima: Pyroclastic density currents with exceptional runouts and volume. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 310: 39-49.
- CÁRDENAS Quiroga, E. A., Porras Rodríguez, P. y Morales Martín, L. Y. 2013. Using Volcflow Software to Simulate Pyroclastic Flows from The Cerro Machín Volcano, Tolima, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 2 3(2): 157-172.
- CÁRDENAS-SÁNCHEZ, E. De la Cruz-Reyna, S., Varley, N. 2021. Measurement of thermal conductivity, heat capacity and surface heat transfer: A new cooling model for andesite clast. Manuscrito en preparación.
- CAREY, S. y Sigurdsson, H. 1986. The 1982 eruptions of El Chichón volcano, Mexico (2): Observations and numerical modelling of tephra-fall distribution. *Bulletin of Volcanology*, 48 (2): 127-141.
- CARRASCO-NÚÑEZ, G. 1985. Estudio geológico del volcán Popocatepetl: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería (Doctoral dissertation, tesis profesional, pp. 41. (inédita)).
- CHARBONNIER, S., Germa, A., Connor, C., Gertisser, R., Preece, K., Komorowski, J.-C., ... Connor, L. 2013. Evaluation of the impact of the 2010 pyroclastic density currents at Merapi volcano from high-resolution satellite imagery, field investigations and numerical simulations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261: 295–315.
- COLE, P. D., Neri, A. y Baxter, P. J. 2015. Hazards from pyroclastic density currents. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 943-956). Academic Press.
- COSTA, A. y Macedonio, G. 2005. Numerical simulation of lava flows based on depth-averaged equations. *Geophysical Research Letters*, 32 (5).
- CORTÉS, A., Komorowski, J. C., Macías, J. L., Capra, L., Layer, P. W. 2019. Late Pleistocene-Holocene debris avalanche deposits from Volcán de Colima, Mexico. In *Volcán de Colima* (pp. 55-79). Springer, Berlin, Heidelberg.
- CHERTKOFF, D. G. y Gardner, J. E. 2004. Nature and timing of magma interactions before, during, and after the caldera-forming eruption of Volcán Ceberuco, Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146 (6): 715-735.
- DE la Cruz-Reyna, S. 1991. Poisson-distributed patterns of explosive eruptive activity. *Bulletin of Volcanology*, 54 (1): 57-67.
- DE la Cruz-Reyna, S. y Mendoza-Rosas, A. T. 2015. An extreme event approach to volcanic hazard assessment. *Extreme Events: Observations, Modeling, and Economics*, 214, 195.
- DE la Cruz-Reyna, S. y Mendoza-Rosas, A. T. 2016. An Extreme Event Approach to Volcanic Hazard Assessment. Book Editor(s): Mario Chavez, Michael Ghil,

- Jaime Urrutia-Fucugauchi. Book Series: Geophysical Monograph Series Chapter 15 <https://doi.org/10.1002/9781119157052.ch15>
- DEL POZZO, A. M., Ibarguengoitia, M. A., Salinas, L. A., Bonasia, R., Pedol, L. C., Cassata, W., y Ugalde, E. T. 2017. Estudios geológicos y actualización del mapa de peligros del volcán Popocatepetl. Monografías del instituto de Geofísica, (22).
- DE VRIES, B. V. W., y Davies, T. 2015. Landslides, debris avalanches, and volcanic gravitational deformation. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 665-685). Academic Press.
- DIETTERICH, H. R., Lev, E., Chen, J., Richardson, J. A., y Cashman, K. V. 2017. Benchmarking computational fluid dynamics models of lava flow simulation for hazard assessment, forecasting, and risk management. *Journal of Applied Volcanology*, 6 (1): 1-14.
- DUFEK, J., Ongaro, T. E. y Roche, O. 2015. Pyroclastic density currents: processes and models. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 617-629). Academic Press.
- ESPINASA-PEREÑA, R. 2018. Evaluación del riesgo relativo de los volcanes en México. Abstract in VIII Foro Internacional: Los volcanes y su impacto, Arequipa (Perú). <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/1441>. Último acceso enero de 2018.
- FARQUHARSON, J., Heap, M. J., Varley, N. R., Baud, P., y Reuschlé, T. 2015. Permeability and porosity relationships of edifice-forming andesites: a combined field and laboratory study. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 297: 52-68.
- FREY, H. M., Lange, R. A., Hall, C. M. y Delgado-Granados, H. 2004. Magma eruption rates constrained by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronology and GIS for the Ceberuco-San Pedro volcanic field, western Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 116 (3-4): 259-276.
- GLOBAL Volcanism Program, 2013. *Volcanoes of the World*, v. 4.10.1. Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution. Downloaded 20 Aug 2021. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>.
- GÓMEZ-VÁZQUEZ A., De la Cruz-Reyna S., Mendoza-Rosas A. T. 2016. The ongoing dome emplacement and destruction cyclic process at Popocatepetl volcano, central Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 78:58.
- HOBLITT, R. P., Miller, C. D. y Vallance, J. W. 1981. Origin and stratigraphy of the deposit produced by the May 18 directed blast. In *The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington* (Vol. 1250, pp. 401-419). US Government Printing Office Washington, DC.
- HUGGEL, C., Schneider, D., Miranda, P. J., Granados, H. D. y Kääb, A. 2008. Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: a case study on lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170 (1-2): 99-110.
- INEGI. Censo de Población y Vivienda. 2020. Descargado el 3 de mayo del 2021, Nayarit.
- INSTITUTO Nacional de Estadística y Geografía. 2020. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx>
- KELFOUN, K. 2009. VolcFlow simulation of Volcanic Flows. Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Fd (OPGC), Université Blaise Pascal. Francia.
- KELFOUN, K. 2011. Suitability of simple rheological laws for the numerical simulation of dense pyroclastic flows and long-runout volcanic avalanches. *Journal of Geophysical Research*, 116: 1-14
- KELFOUN, K. y Druitt, T. H. 2005. Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B12).
- KELFOUN, K. y Vargas, S. V. 2015. VolcFlow capabilities and perspectives of development for the simulation of lava flows. Harris, AJL, De Groeve, T., Garel, F. y Carn, SA (eds) *Detecting, Modelling and Responding to Effusive Eruptions*. Geological Society, London, Special Publications, 426.
- KELFOUN, K. y Vargas, S. V. 2016. VolcFlow capabilities and potential development for the simulation of lava flows. Geological Society, London, Special Publications, 426 (1): 337-343.
- LUHR, J. F. y Prestegard, K. L. 1988. Caldera formation at Volcán Colima, Mexico, by a large large holocene volcanic debris avalanche. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 35 (4): 335-348.
- MACÍAS, J. L. 2006. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57 (3): 379-424.
- MACÍAS, J. L., Arce, J. L., García-Tenorio, F., Sosa-Ceballos, G. y Gardner, J. E. 2020. Source and behavior of pyroclastic density currents generated by Vulcanian-style explosions of Popocatepetl volcano (Mexico) on 22 January 2001. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 406, 107071.
- MACORPS, E., Charbonnier, S. J., Varley, N. R., Capra, L., Atlas, Z., y Cabré, J. 2018. Stratigraphy, sedimentology and inferred flow dynamics from the July 2015 block-and-ash flow deposits at Volcán de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 349: 99-116.

- MANZELLA, I., Makris, S., Di Traglia, F., Kelfoun, K., Cole, P., Casalbone, D. y Chiocci, F. L. 2021. Numerical modelling of tsunamis generated by mass flows at Stromboli Volcano. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU21-11042).
- MENDOZA-ROSAS, A.T. y De la Cruz-Reyna, S. 2008. A Statistical Method Linking Geological and Historical Eruption Time Series for Volcanic Hazard Estimations: Applications to Active Polygenetic Volcanoes. *Journal of Volcanological and Geothermal Research*, 176 (2): 277–290.
- MENDOZA-ROSAS, A. T., y Cruz-Reyna, S. (2009). A mixture of exponentials distribution for a simple and precise assessment of the volcanic hazard. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 425–431.
- MENDOZA-ROSAS, A. T., Gómez-Vázquez, Á. y De la Cruz-Reyna, S. 2017. Statistical analysis of the sustained lava dome emplacement and destruction processes at Popocatepetl volcano, Central México. *Bulletin of Volcanology*, 79 (6): 43.
- MENDOZA-ROSAS, A. T. y De la Cruz-Reyna, S. 2019a. A mixture of exponentials distribution for a simple and precise assessment of the volcanic hazard, *Natural Hazards Earth System Sciences*, 9: 425–431, <https://nhess.copernicus.org/articles/9/425/2009/>.
- MENDOZA-ROSAS, A. T. y De la Cruz-Reyna, S. 2019b. Hazard assessment of the ongoing lava dome eruption at Popocatepetl volcano from the statistical analysis of significant explosive events in the period of 1997 to 2016. *Geofísica Internacional* 58-1: 33-48.
- MUÑOZ-SALINAS, E., Castillo, M., Franco-Ramos, O., Arce, J. L., Sanderson, D. C. W., y Cresswell, A. C. 2020. Assessing paraglacial processes at Nexpayantla Gorge (Popocatepetl volcano, Central Mexico) using OSL and <sup>14</sup>C. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45 (11): 2450-2462.
- NELSON S. A. 1980. Geology and petrology of Volcán Ceboruco, Nayarit, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 91: 2290–2431.
- NELSON, S. A. 1986. Geología del Volcán Ceboruco, Nayarit, con una estimación de riesgos de erupciones futuras. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 6 (2): 243-258.
- REYES-DÁVILA, G. A., Arámbula-Mendoza, R., Espinasa-Pereña, R., Pankhurst, M. J., Navarro-Ochoa, C., Savov, I. y Domínguez-Reyes, T. 2016. Volcán de Colima dome collapse of July, 2015 and associated pyroclastic density currents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 320: 100-106.
- ROBIN, C. 1984. Le Volcan Popocatepetl (Mexique): structure, evolution pétrologique et risques. *Bulletin Volcanologique*, 47 (1): 1-23.
- ROBIN, C. y Boudal, C. 1987. A gigantic Bezymian-type event at the beginning of modern volcan Popocatepetl. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31 (1-2): 115-130.
- ROVERATO M. y Capra L. 2013. Roverato, M., y Capra, L. Indicadores micro-texturales de dos depósitos de avalancha de escombros del Volcán de Colima (México): mecanismos de transporte y emplazamiento. Resumen de Unión de Geofísica Mexicana. Disponible en: (5) (PDF) Indicadores micro-texturales de dos depósitos de avalancha de escombros del Volcán de Colima (México): mecanismos de transporte y emplazamiento (researchgate.net)
- SÁNCHEZ J. J., Núñez-Cornú F. J., Suárez-Plascencia C., Trejo-Gómez E. 2009. Seismicity at Ceboruco Volcano, México. *Seismic Research Letters*, 80: 823–830
- SAUCEDO, R., Macías, J. L., Gavilanes-Ruiz, J. C., Bursik, M. I., y Vargas-Gutiérrez, V. 2019. Pyroclastic density currents at volcán de Colima. In *Volcán de Colima* (pp. 111-139). Springer, Berlin, Heidelberg.
- SAUCEDO, R., Macías, J. L., Gavilanes, J. C., Arce, J. L., Komorowski, J. C., Gardner, J. E. y Valdez-Moreno, G. 2010. Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 Plinian eruption of Volcán de Colima, México. *Journal of volcanology and geothermal research*, 191 (3-4): 149-166.
- SAUCEDO, R., Macías, J. L., Gavilanes, J. C., Arce, J. L., Komorowski, J. C., Gardner, J. E., y Valdez-Moreno, G. 2010. Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 Plinian eruption of Volcán de Colima, México. *Journal of volcanology and geothermal research*, 191 (3-4): 149-166.
- SAUCEDO, R., Macías, J. L., Sheridan, M. F., Bursik, M. I. y Komorowski, J. C. 2005. Modeling of pyroclastic flows of Colima Volcano, Mexico: implications for hazard assessment. *Journal of volcanology and geothermal research*, 139 (1-2): 103-115.
- SAVOV, I. P., Luhr, J. F. y Navarro-Ochoa, C. 2008. Petrology and geochemistry of lava and ash erupted from Volcán Colima, Mexico, during 1998–2005. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 174 (4): 241-256.
- SCHILLING, S. P. 1998. LAHARZ: GIS programs for automatic delineation of lahar hazard zones. US Geological Survey Open-File Report, 98-638.
- SHERIDAN, M., Hubbard, B., Bursik, M., Abrams, M., Siebe, C., Granados, H. 2001. Gauging Short-Term

- Volcanic Hazards at Popocatepetl. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 82 (16):185-189.
- SHIEH, C. L., Jan, C. D. y Tsai, Y. F. 1996. A numerical simulation of debris flow and its application. *Natural Hazards*, 13 (1): 39-54.
- SIEBE, C., Salinas, S., Arana-Salinas, L., Macías, J. L., Gardner, J., y Bonasia, R. 2017. The ~ 23,500 y 14C BP White Pumice Plinian eruption and associated debris avalanche and Tochimilco lava flow of Popocatepetl volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 333: 66-95.
- SIERON, K., Ferrer, D., Siebe, C., Capra, L., Constantinescu, R., Agustín-Flores, J., Groppelli, G. 2019a. Ceboruco hazard map: part I-definition of hazard scenarios based on the eruptive history. *Journal of Applied Volcanology*, 8(1): 1-22.
- SIERON, K., Ferrés, D., Siebe, C., Constantinescu, R., Capra, L., Connor, C., Zuccolotto, K. G. 2019b. Ceboruco hazard map: part II—modeling volcanic phenomena and construction of the general hazard map. *Natural Hazards*, 96 (2): 893-933.
- SIGURDSSON, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., y Stix, J. (Eds.). 2015. *The encyclopedia of volcanoes*. Elsevier.
- SOSIO, R., Crosta, G. B. y Hungr, O. 2012. Numerical modeling of debris avalanche propagation from collapse of volcanic edifices. *Landslides*, 9 (3): 315-334.
- VARLEY N. 2017. Volcanoes of Mexico. In: Meyers RA (ed) *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer, New York, NY, ISBN 978-1-4419-0852-0.
- VARLEY N. R., Cernas J. A., García A., López Z., Meza M.I. 2017. Identificación de amenazas, peligros, vulnerabilidad y riesgos ante fenómenos geológicos - Vulcanismo. In: *Atlas de Riesgos Estatal de Colima*. Universidad de Colima, Protección Civil del Estado de Colima, Colima.
- VARLEY N.R. 2019. Monitoring the Recent Activity: Understanding a Complex System. In: Varley N., Connor C., Komorowski J.C. (eds) *Volcán de Colima. Active Volcanoes of the World*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-25911-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-25911-1_12)
- VARLEY, N.R, Connor, C. B., y Komorowski, J. C. (Eds.). 2019b. *Volcán de Colima: Portrait of a Persistently Hazardous Volcano*. Springer.
- VÁSCONEZ, F., Vásconez, R., y Mothes, P. 2016. Reconstrucción de los flujos de lodo del volcán Carihuirazo originados por el terremoto de 1698 utilizando el código VolcFlow. *Tectonics*, 35 (5): 1249-1279.
- YOKOYAMA, I. y De la Cruz-Reyna, S. 1990. Precursory earthquakes of the 1943 eruption of Parícutin volcano, Michoacan, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44 (3-4): 265-281.



## La lógica de la gestión del riesgo volcánico

Servando De la Cruz Reyna

Para citar este artículo: De la Cruz Reyna Servando. 2021. La lógica de la gestión del riesgo volcánico. Ciencia Nicolaita, número 82, 59-64. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi82.558>.

---

Ver material suplementario

---

Publicado en línea el 30 de septiembre de 2021

---

Envíe su artículo a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

---

# La lógica de la gestión del riesgo volcánico

Servando De la Cruz Reyna

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica

## HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 7 de junio 2021

Aceptado: 20 de julio de 2021

### RESUMEN

La gestión del riesgo volcánico presenta dificultades que son inherentes a la naturaleza de la actividad eruptiva, a la inaccesibilidad de los sistemas magmáticos y a las múltiples interpretaciones que se pueden dar a las señales registradas en la superficie. Los responsables de la protección a la población requieren de los factores de decisión que pueda proporcionar la comunidad científica, la que, con tales incertidumbres epistémicas, debe buscar formas de identificar y comunicar los elementos básicos del proceso volcánico que sustenten decisiones acertadas, que de no serlo pueden comprometer la seguridad de amplios sectores de la población en regiones vulnerables.

**PALABRAS CLAVE:** Gestión del riesgo volcánico, actividad volcánica, incertidumbre epistémica.

### ABSTRACT

Volcanic risk management presents difficulties that are inherent to the nature of the eruptive activity, namely the inaccessibility of the magmatic systems and the multiple interpretations attributable to the signals recorded on the surface. Authorities responsible for the protection of the population require the decision factors that the scientific community may provide, which, with such epistemic uncertainties, must seek ways to identify and communicate the basic elements of the volcanic process that support correct decisions, which otherwise may compromise the safety of large sectors of the population in vulnerable regions.

**KEYWORDS:** Volcanic risk management, volcanic activity, epistemic uncertainty.

## Introducción

En comparación con otros desastres causados por fenómenos naturales a sociedades vulnerables, los que resultan de algún tipo de actividad volcánica son menos frecuentes pero no necesariamente de menor magnitud. Esto puede generar una falsa percepción del riesgo asociado a los fenómenos volcánicos, por lo que, cuando ocurre una erupción, el costo en vidas y daños materiales asociado a la falta de preparación ante este tipo de fenómenos puede ser muy alto. Esto es debido a dos causas principales: una, que los suelos volcánicos de formación geológicamente reciente son por lo general fértiles y fomentan el crecimiento poblacional, agrícola y de infraestructura en su entorno, y con ello el número de asentamientos vulnerables de volcanes aparentemente inactivos. La otra, se deriva de la diversidad de manifestaciones volcánicas con un amplio espectro de potenciales impactos, que varía desde eventos menores que sólo afectan el entorno inmediato del centro eruptivo, hasta otros capaces de dañar seriamente amplias regiones y extenderse a distancias considerables afectando comunidades relativamente lejanas, sin una percepción del riesgo. Dos lamentables ejemplos recientes de esto lo representan la erupción del volcán El Chichón en 1982, el peor desastre volcánico de la historia de México, causante de cerca de 2000 víctimas y los flujos de lodo originados por la erupción del volcán Nevado del Ruiz, en Colombia, que inundaron la población de Armero en 1985, matando a 23,000 de sus habitantes.

En ese contexto, en diciembre de 1994, y a 9 años de otro desastre producido por el sismo de magnitud 8.1 de 1985, causante de un número aún no determinado de víctimas, probablemente cercano a 10,000 y a muy pocos años de la puesta en marcha del Sistema Nacional de Protección Civil y del Centro Nacional de Prevención de

Desastres, CENAPRED, el volcán Popocatepetl inicia una fase de actividad, después de casi 70 años de calma.

Se sabía ya que el Popocatepetl, ubicado en el centro de la región más densamente poblada del país, tiene un historial eruptivo que comprende un amplio rango de posibles modalidades de erupción, que incluyen desde la actividad fumarólica moderada, hasta erupciones de gran magnitud que han llegado a destruir edificios volcánicos anteriores, afectando áreas de miles de kilómetros cuadrados. Una erupción mayor en la actualidad, aunque de baja probabilidad, podría afectar la región circundante al volcán en diversas formas; por lluvias importantes de ceniza a la población que radica en un radio de más de 100 km alrededor del volcán, la cual se acerca a 20 millones y por efectos más directos, tales como flujos piroclásticos y flujos de lodo o lahares, a una población cercana a 500,000 personas en algunas de las zonas circundantes, señaladas en el Mapa de Peligros del Volcán Popocatepetl, disponible en varios formatos: (<https://acortar.link/zsGKSJ>); (<https://cutt.ly/1OH7pST>).

Esos mapas han sido elaborados por numerosos especialistas, estudiando en detalle la distribución y las edades relativas de los depósitos de productos de erupciones pasadas y bajo la premisa de que un volcán es capaz de repetir en algún momento escenarios similares a los que ha presentado en el pasado. Por ello representan un marco de referencia de las situaciones de riesgo que el volcán potencialmente podría presentar.

Estos antecedentes, sumados a algunas manifestaciones observadas desde 1986, tales como un incremento en las fumarolas y el calentamiento y eventual desaparición del pequeño lago cratérico, motivaron que la UNAM colocara una primera estación telemétrica de monitoreo sísmico a 4.8

km al norte del cráter, en Tlamacas, cerca de unas estaciones repetidoras de microondas, en septiembre de 1989 (De la Cruz-Reyna *et al.*, 2008a).

El posterior incremento de la actividad interna, principalmente sísmica y sólo instrumentalmente detectable, motivó la creación, en febrero de 1994, de un “Comité de Planeación Popocatepetl”, integrado por autoridades estatales y federales de Protección Civil y por científicos de la UNAM, el CENAPRED y otras instituciones, con el fin de desarrollar planes de contingencia.

En octubre 14 de ese año se instaló sobre el flanco suroeste del volcán otra estación sísmica telemétrica “Chipiquixtle” por parte del CENAPRED y un posterior incremento de la actividad microsísmica motivó la instalación de otra más, “Colibrí”, buscando rodear al volcán, las que conforman la red que eventualmente creció hasta su configuración actual.

El 21 de diciembre de 1994, a la 01:31 de la madrugada, esa red de monitoreo registró una creciente sismicidad constituida por señales de diferentes tipos, marcando el inicio de una nueva etapa de actividad en el volcán. A la 01:54, un evento mayor probablemente relacionado con la apertura del conducto volcánico, marcó un manifiesto incremento en las emisiones de gas y ceniza. Al amanecer se detectó lluvia de ceniza sobre la ciudad de Puebla y otras localidades cercanas, que aumentó en los días subsiguientes.

Ante esta situación el Comité de Planeación se separó en dos partes: un “Comité Científico Asesor” y un Comité Operativo. El 22 de diciembre de 1994, se reunió con carácter permanente ese nuevo Comité Científico Asesor de la Secretaría de Gobernación, integrado por expertos de la UNAM, del CENAPRED y de otras instituciones académicas. En una sesión encabezada por el entonces Subsecretario de Protección Civil y de Prevención y Readaptación Social, se determinó realizar un vuelo de reconocimiento en helicóptero que se repitió a las 14:00 horas.

El Comité Científico Asesor se enfocó a evaluar los resultados de las observaciones (Meli, 1995).

Con la información disponible se planteó, a partir de ese momento, un problema crucial: el uso de la ciencia para apoyar la gestión del riesgo volcánico y para manejar una situación de crisis (De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008b, De la Cruz-Reyna *et al.*, 2017).

Este problema, que no se limita a la actividad volcánica y es común denominador de otras condiciones de gestión de riesgos asociados a fenómenos naturales, particularmente fenómenos de origen geológico, requiere tomar en consideración ciertos factores críticos:

1. Comunicar una percepción “realista” de la ciencia y sus limitaciones: En un sistema como la Tierra, o como un volcán en particular, la única información sobre los procesos internos con la que se cuenta es la que se recibe en la superficie, en forma de señales sísmicas, deformaciones, gases y fragmentos que emite el volcán. En esa configuración existe una dificultad inherente y matemáticamente demostrable que se conoce como “la no-unicidad de las soluciones al problema inverso”. ¿Qué significa esto? Que las señales recibidas en la superficie pueden ser causadas por una multitud de posibles configuraciones del inaccesible sistema interno. En los problemas directos que admiten soluciones únicas, como por ejemplo, dada la potencia de un foco de luz, ¿cuál será la iluminación sobre una superficie ubicada a una distancia determinada? La pregunta puede ser contestada en forma única, precisa y directa. En contraste, el problema inverso planteado como: dada la iluminación en una superficie, ¿cuál es la potencia y distancia de una fuente de luz a la que no podemos ver ni acceder? admite un número virtualmente infinito de respuestas que producen el mismo resultado.
2. El segundo factor es la complejidad de los sis-

temas terrestres y en particular de los volcánicos. El número de parámetros de diferente naturaleza involucrados en el proceso es mayor que el número de datos que llegan a la superficie, por lo que en general no es factible conocer todos los detalles del proceso interno. Aun si se pudiera representar a un proceso volcánico que se desarrolla en la profundidad por medio de un sistema completo de ecuaciones que describieran su evolución dinámica y termodinámica, los datos que se pueden adquirir no son suficientes para resolverlas. Este es el problema de la incertidumbre epistémica.

¿Cómo generar entonces un diagnóstico y elaborar un pronóstico de la actividad volcánica que sea lo suficientemente confiable para ser de utilidad en la toma de decisiones para la gestión del riesgo?

Desde sus primeras sesiones el Comité Científico Asesor del Popocatepetl asumió de forma natural estas consideraciones, sin existir un protocolo formal para ello y procedió en forma un tanto intuitiva con una de las metodologías que se ha planteado en la ciencia moderna desde la primera mitad del Siglo XX y que utiliza algunos de los conceptos descritos por Karl Popper en su *Lógica de la Investigación Científica: Ante una incertidumbre epistémica* (en la que se desconoce por su inaccesibilidad gran parte del proceso), o ante una problema inverso con un alto grado de no-unicidad (en la que muchas explicaciones diferentes describen el mismo proceso) el proceder con los métodos inductivos tradicionales de la ciencia, que consisten en la generalización de resultados parciales y que son de gran valor en los problemas directos, puede llevar a conclusiones incorrectas en problemas inversos.

Una solución consiste en abordar el problema siguiendo un criterio de demarcación. Esto significa que, en lugar de intentar describir o tratar de explicar o confirmar la naturaleza del proceso interno del volcán, o de desarrollar modelos que

los describan a partir de los (generalmente insuficientes) datos disponibles, una opción es aplicar un procedimiento que descarte aquellos procesos, configuraciones o modelos que no satisfacen la experiencia combinada de los miembros del Comité Científico (CC) en cada una de sus áreas de experiencia.

Al analizar ordenadamente cada uno de los grupos de datos disponibles, sísmicos, geodésicos, geoquímicos, térmicos, visuales y otros, se proponen diferentes causas que expliquen las observables y cada miembro del Comité apoya o descarta la propuesta desde la perspectiva de su especialidad y experiencia. Cuando una posible causa es descartada se procede a discutir la siguiente. De esta forma, la multiplicidad de los posibles procesos y de sus consecuencias se reduce. Asimismo, permite desarrollar la discusión en un tiempo razonable, ya que un CC concentra sus discusiones únicamente sobre los puntos de acuerdo y descarta discutir aquellos en los que hay desacuerdo, dejándolos para otros foros.

Este método guarda algunas similitudes con el diagnóstico diferencial utilizado en ciencia médica y aunque no existe un protocolo formal que lo regule, en forma empírica el CC lo ha utilizado por más de 20 años. Así, para el Popocatepetl, se busca un acuerdo sobre los procesos que con mayor probabilidad se pueden demarcar y descartar y de allí comunicar una información que sea de utilidad para la toma de decisiones de Protección Civil en términos de los escenarios resultantes de los procesos no descartables.

Con esta metodología ha sido posible evaluar el estado de actividad del volcán y los riesgos que representa y comunicarlos por medio de reportes a las autoridades de Protección Civil expresados como los escenarios de riesgo resultantes de haber descartado los menos probables. Así se han logrado criterios correctos de gestión del riesgo que han permitido tomar decisiones cruciales, como por ejemplo la evacuación preventiva antes de la

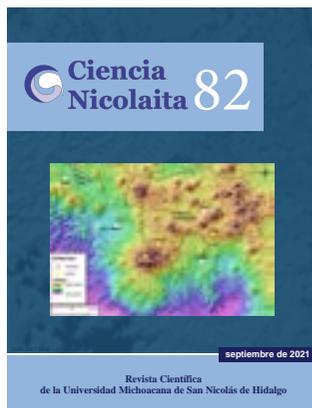
erupción de diciembre de 2000. También han ayudado a evitar sobrerreacciones, especialmente en los tiempos más recientes en los que con frecuencia surge información indiscriminada e interpretaciones infundadas que se propagan con gran rapidez por medio de las redes sociales.

Si bien estos criterios de demarcación implican un proceso de elicitación, dado que busca un consenso entre los miembros del CC para demarcar los escenarios de riesgo menos probables y sintetizar los restantes como “más probables”, tiene importantes diferencias con la “elicitación experta estructurada”, utilizada en otros países, especialmente de habla inglesa, en la que previamente se examina a los expertos participantes y se califican sus respuestas y opiniones sobre problemas “semilla”, asignándoles una “calibración”, según los resultados de ese examen, con las que posteriormente se pesan sus opiniones acerca de lo que consideran los procesos volcánicos en desarrollo más probables (Aspinall, 2006). Esta metodología ha sido criticada por Donovan *et al.* (2012a, 2012b), argumentando que la metodología de calificar y pesar las opiniones de los expertos no elimina la incertidumbre epistémica e introduce un elemento subjetivo en la evaluación por medio del diseño de las preguntas “semilla”.

En conclusión, los Comités Científicos Asesores que logran evaluaciones consensuadas de los escenarios de riesgo son en el presente una componente esencial de la gestión del riesgo en México, ya que proporcionan a las autoridades responsables los factores necesarios para la toma de decisiones. Ante la presencia de un problema o una amenaza para la sociedad, es una herramienta que la ciencia ofrece para contribuir a evaluar y reducir el riesgo, siempre y cuando sea la autoridad responsable la que reaccione y responda a los problemas de riesgo que requieran ser abordados.

## Referencias

- ASPINALL W. P. 2006. Structured Elicitation of Expert Judgment for Probabilistic Hazard and Risk Assessment in Volcanic Eruptions. In “Statistics in Volcanology” (Eds H.M Mader, S. G. Coles, C. B. Connor, and L. J. Connor). London, Special Publications of IAVCEI No 1. The Geological Society for IAVCEI: 15-30.
- DE la Cruz-Reyna S. 1995. Un código de alerta para el manejo de emergencias antes y durante potenciales erupciones del Volcán Popocatepetl. En: “Volcán Popocatepetl Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995”. Coedición del Sistema Nacional de Protección Civil, el Centro Nacional de Prevención de Desastres y la UNAM (ISBN: 970-628-127-4): 327-333.
- DE la Cruz-Reyna S., Yokoyama I., Martínez-Bringas A., Ramos E. 2008a. Precursory Seismicity of the 1994 Eruption of Popocatepetl Volcano, Central Mexico. *Bulletin of Volcanology* 70(6): 753-767 (doi:10.1007/s00445-008-0195-0)
- DE la Cruz-Reyna S., Tilling R. I. 2008b. Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatepetl Volcano, Mexico: importance of an effective hazards-warning system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 170 (1-2): 121-134, (doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.09.002)
- DE la Cruz-Reyna S., Tilling R. I., Valdés-González C. 2017. Challenges in responding to a sustained and continuing volcanic crisis: The case of Popocatepetl volcano, Mexico, 1994-present. In: *Observing the Volcano World: Volcano Crisis Communication*. (Eds. C.J. Fearnley, B. McGuire, G. Jolly, D. Bird and K. Haynes). *Advances in Volcanology*, Springer-Verlag. Doi:org/10.1007/11157\_2016\_37. e-book ISBN 978-3-319-44097-2, versión impresa: 235-252, ISBN 978-3-319-44095-8 (2018)
- DONOVAN A., Oppenheimer C., Bravo M. 2012a. Social studies of volcanology: knowledge generation and expert advice on active volcanoes. *Bulletin of Volcanology* 74: 677-689, doi 10.1007/s00445-011-0547-z
- DONOVAN A, Oppenheimer C., Bravo M. 2012b. Reply to comment from W.P. Aspinall on “Social studies of volcanology: knowledge generation and expert advice on active volcanoes”. *Bulletin of Volcanology* 74: 1571-1574, doi 10.1007/s00445-012-0626-9
- MELI R. P. 1995. Interacción del grupo científico con las autoridades de Protección Civil. En: “Volcán Popocatepetl Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995”. Coedición del Sistema Nacional de Protección Civil, el Centro Nacional de Prevención de Desastres y la UNAM (ISBN: 970-628-127-4): 335-336.
- POPPER K. R. 2008. *La Lógica de la Investigación Científica*. Editorial Tecnos, Madrid, 2ª Ed, 570 pp. Madrid, ISBN: 978-84-309-4607-5.



## Geodesia aplicada al monitoreo de desplazamientos de una ladera inestable y la influencia de la precipitación, durante el período 2008-2011, Teziutlán, Puebla

Ángel Gómez-Vázquez y Ana Teresa Mendoza-Rosas

Para citar este artículo: [Gómez-Vázquez Angel y Mendoza-Rosas Ana Teresa. 2021. Geodesia aplicada al monitoreo de desplazamientos de una ladera inestable y la influencia de la precipitación, durante el período 2008-2011, Teziutlán, Puebla. Ciencia Nicolaita, número 82, 65-80. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi82.559>.](#)

---

Ver material suplementario

---

Publicado en línea el 30 de septiembre de 2021

---

Envíe su artículo a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

---

# Geodesia aplicada al monitoreo de desplazamientos de una ladera inestable y la influencia de la precipitación, durante el período 2008-2011, Teziutlán, Puebla

Ángel Gómez-Vázquez<sup>1\*</sup> y Ana Teresa Mendoza-Rosas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, México. Dirección General de Protección Civil, Comisionado al CEN-APRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres)

<sup>2</sup> CONACYT- Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra

## HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 12 de junio de 2021

Aceptado: 22 de julio de 2021

## RESUMEN

En octubre de 1999 ocurrió un deslizamiento en la colonia La Aurora de Teziutlán, Puebla que provocó el deceso de 130 personas. Durante el periodo de 2008-2011, se construyó una red geodésica en esa ladera para detectar desplazamientos, la que está constituida por 10 puntos sobre la misma y dos estaciones remotas de control. En este lapso de tiempo se realizaron 11 campañas de mediciones de distancia con estación total. El rango de desplazamientos detectados fue de entre -5 mm y -19 mm, los principales desplazamientos estuvieron medidos cerca de la corona del deslizamiento del año 1999, en el resto de los puntos los cambios no fueron significativos. El rango máximo de velocidades de desplazamiento fue de -7 mm a -9mm por año, por lo que de acuerdo con la clasificación de Cruden-Varnes para desplazamientos de ladera estaría situado en el nivel 1, como un movimiento extremadamente lento. El análisis de correlación aplicado a la precipitación máxima y a los desplazamientos observados, permiten determinar la influencia de este parámetro meteorológico en las mediciones geodésicas. De esta manera, los resultados aportados en este trabajo constituyen la base para una evaluación del movimiento de esta ladera con fines preventivos.

**PALABRAS CLAVE:** monitoreo, ladera inestable, estación total, desplazamiento, precipitación, correlaciones.

## ABSTRACT

In October 1999, a landslide occurred in the neighborhood of La Aurora, Teziutlán, state of Puebla, which resulted in the death of 130 people. During the period 2008-2011, a geodetic network was built on that slope to detect its movements, which is made up of 10 points on it and two remote control stations. In this period of time, we carried out 11 distance measurement campaigns with a total station. Negative displacements between -5 and -19 mm were detected in some points near the 1999 landslide crown, in the rest of the points, the displacement was very small. The displacement velocities are less than 7.3mm per year, which according to the classification of Cruden- Varnes would place them in level 1, as extremely slow. We calculate correlation coefficients between displacements and precipitation variable from a database of the National Water Commission (CONAGUA), the meteorological station is located near the landslide area, our results show a weak correlation.

**KEYWORDS:** monitoring, landslide, total station, displacement, precipitation, correlations.

## 1. Introducción

En la República Mexicana han ocurrido numerosos procesos de remoción de masa y el fallamiento de laderas inestables. Muchos de esos procesos han ocasionado decesos y pérdidas económicas (Bitrán, 2000). Asimismo, un número importante de comunidades se encuentran en riesgo expuestas a este fenómeno geológico (CENAPRED, 2008). En particular en la zona norte del estado de Puebla, este fenómeno es recurrente (Mendoza *et al.*, 2002; Téllez de la Cruz *et al.*, 2021), como en la colonia La Aurora, en Teziutlán, situada al oriente de la ciudad y municipio de Teziutlán, Puebla (figura 1), lugar donde un proceso de remoción de masa provocó varias pérdidas humanas y económicas en el año de 1999.

El monitoreo e investigaciones geodésicas para detectar desplazamientos en laderas inestables es utilizado ampliamente a nivel internacional (Artese y Perrelli, 2018; Afeni y Cawood 2013; SafeLand 2012; Maček *et al.*, 2014). Estos métodos basados en la medición de testigos o referencias geodésicas que se colocan o construyen sobre las laderas o masas de suelo o roca, permiten conocer la velocidad y en ocasiones el tamaño o magnitud de la masa en movimiento (Mendoza *et al.*, 2002). Si se identifica una zona que haya mostrado algunos indicios de inestabilidad, con estas metodologías es posible monitorearla (Mendoza *et al.*, 2002). Para conseguir este objetivo se construyen hitos o marcas fijas sobre la ladera, así como contar con puntos fijos de referencia ubicados fuera del área inestable, de tal manera que estos puntos y marcas constituyen una red geodésica, sobre la cual se realizan mediciones rutinarias. Las técnicas de vigilancia o monitoreo geodésico se adaptan al lugar y condiciones geológicas y morfológicas de la ladera sobre la cual se vaya a realizar el estudio (Maček *et al.*, 2014). Con base en la

disponibilidad de equipo y recursos para realizar las observaciones, las medidas pueden ser manuales o automáticas.

En este trabajo se determinará la velocidad del desplazamiento de la ladera en La Aurora, en Teziutlán, así como contar con un nivel base de referencia de monitoreo geodésico de la misma. Con este fin se describen las diversas fases de este monitoreo, consistentes en construcción de la red geodésica, metodología empleada y análisis de las mediciones manuales de distancias con estación total, realizadas en el período entre septiembre de 2008 y abril de 2011. Un objetivo central fue analizar la influencia de la precipitación en los desplazamientos, debido a que se conoce por estudios previos que esta variable meteorológica es uno de los factores desencadenantes de inestabilidad de laderas (Song *et al.*, 2021; Gariano y Guzzetti 2016). Los datos de precipitación fueron obtenidos de la estación meteorológica regional denominada “Teziutlán” No. 21091 (19.529°,96.976°) de la CONAGUA (<https://smn.conagua.gob.mx>), situada al noreste a 1 km, aproximadamente, de la zona de estudio, dentro de la Cd. de Teziutlán. Dado que en esta ladera ocurrió un desastre en el año 1999 y que la condición de riesgo probablemente no ha disminuido, los resultados de este estudio deberían tomarse en cuenta al momento de proponer planes y programas con fines preventivos y de alertamiento.

## 2. Antecedentes

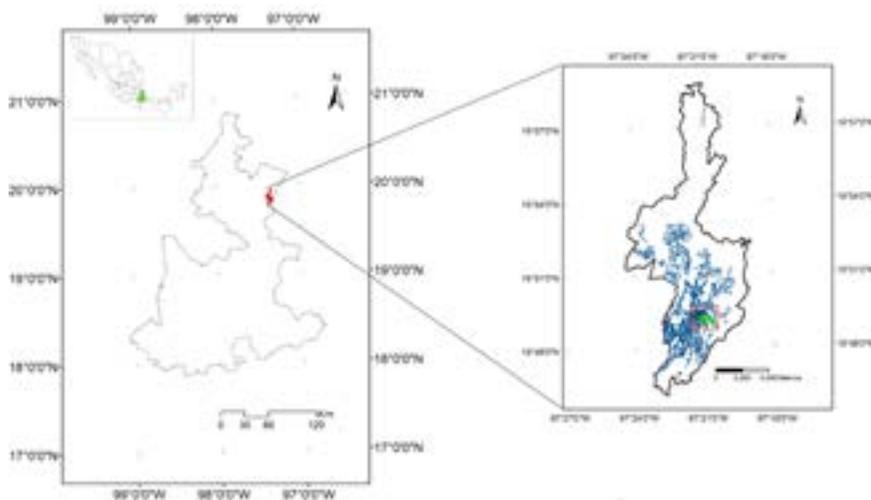
### 2.1. Factores de riesgo y aspectos generales fisiográficos y geológicos de la zona de Teziutlán

Uno de los factores que ha aumentado el nivel de riesgo de la población en esta región es la migración rural-urbana, reflejada en el aumento de la población de Teziutlán, incrementándose de 63,000 habitantes en el año 1990, a 97,590 habitantes en el año 2021, provocando

un rápido crecimiento de asentamientos humanos sobre las laderas en suelos inestables. Este factor combinado con la carencia de procesos constructivos adecuados y con factores desencadenantes como lluvias extraordinarias o sismos, facilitan los deslizamientos de ladera (Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Teziutlán, 2014; Ordenamiento Territorial de Teziutlán, Puebla, 2021; Flores y Alcántara, 2002).

La ciudad de Teziutlán es la cabecera municipal del municipio del mismo nombre (figura 1). Pertenece a la Sierra Norte del estado de Puebla. Esta zona es limítrofe con dos grandes provincias geológico-geomorfológicas: el Eje Neovolcánico y la Planicie Costera del Golfo de México (Lugo *et al.*, 2005), la zona central de la ciudad se encuentra asentada en una meseta,

pero cuenta con una zona de lomeríos de pendientes variables (CENAPRED, 2008). La altitud promedio de la zona de estudio se encuentra entre 1700 a 1900 m.s.n.m., el clima en la región es cálido húmedo, subhúmedo y semicálido húmedo con lluvias todo el año; temperatura media anual que oscila entre 12 a 20°C y el suelo predominante es el andosol (Anuario Estadístico y Geográfico de Puebla, 2017). La zona de Teziutlán está compuesta por rocas sedimentarias mesozoicas, que pueden ser calizas, areniscas y lutitas y que se encuentran por debajo de rocas volcánicas cuaternarias más jóvenes provenientes de la caldera de los Humeros, pudiendo estar constituidas por basaltos, andesitas, riolitas y tobas ignimbríticas (Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Teziutlán, 2014).



**FIGURA 1.** En el recuadro de arriba a la izquierda se muestra la República Mexicana y el Estado de Puebla (en verde), en seguida, localización dentro del estado del municipio de Teziutlán (en rojo). A la derecha se indica en el cuadro en rojo la zona de estudio y su ubicación dentro del municipio, en azul la traza urbana de la Cd. de Teziutlán. El sistema de coordenadas se basa en la proyección Cónica Conforme de Lambert, que es la oficial para México.

Las áreas planas de la región y que morfológicamente son flujos de lava basáltica, están cubiertas por una secuencia de hasta 5 m de espesor constituidos por paleosuelos ricos en arcilla (paleo-andosoles) y que se desarrollaron en depósitos de flujo de cenizas, intercalados con varios depósitos de caída de pómez (Capra *et al.*,

2003). La descomposición de estos materiales rocosos de origen volcánico, poco consolidados, han originado la formación de suelos residuales. Este tipo de suelos (andosoles) es muy ligero y con alta capacidad de retención de agua, debido a esto la zona está expuesta a procesos de remoción de masa (Flores y Alcántara, 2002).

## 2.2. El deslizamiento en la colonia La Aurora, Teziutlán, Puebla en 1999

En la zona del Golfo de México, así como en los estados de Puebla e Hidalgo, diversos fenómenos atmosféricos interactuaron para producir lluvias intensas que ocurrieron durante los primeros días de octubre de 1999, registrándose una precipitación de 1200 mm de lluvia (Vázquez-Conde *et al.*, 2001). De ellos, 800 mm ocurrieron entre los días 4 y 5 de octubre (Capra *et al.*, 2003). El total acumulado de estos dos días alcanzó el 42% de media anual de la precipitación en Teziutlán (Flores y Alcántara, 2002). Derivado de esos eventos de intensa lluvia, en la zona urbana de Teziutlán se produjeron varios deslizamientos que en total ocasionaron 263 decesos y de ellos 130 en la colonia La Aurora. En general los procesos de

remoción de masa se debieron a la presencia de paleosuelos ricos en arcillas cubiertos por depósitos de caída de pómez altamente permeables y en el caso de la Aurora, el fallamiento de la ladera fue favorecido por la presencia de una barda de concreto que permitió la infiltración y acumulación del agua (Mendoza *et al.*, 2002). El movimiento tuvo un mecanismo de iniciación con componente rotacional en la corona y traslacional en el cuerpo principal, evolucionando posteriormente a flujo (figura 2) (Flores y Alcántara, 2002). De acuerdo con la longitud máxima del proceso de remoción de masa fue de 100.5 m (Mendoza *et al.*, 2002) (figura 2) con una profundidad media de la superficie de deslizamiento de 4.4 m y un volumen de 7,350 m<sup>3</sup> (Lugo *et al.*, 2005; Capra *et al.*, 2003; Flores y Alcántara, 2002).



**FIGURA 2.** Zona del deslizamiento en la colonia La Aurora, Teziutlán, Pue. Imagen de fondo, Mendoza *et al.* (2002).

### 3. Metodología aplicada en la ladera de La Aurora, Teziutlán

#### 3.1. Construcción de la red geodésica

El área que cubre la zona de este estudio es de 150 m x 75 m, aproximadamente y abarca donde ocurrió el deslizamiento en el año 1999 (figura 3), se sitúa entre las cotas de 1880 m.s.n.m. y 1905 m.s.n.m. Sobre esta pendiente se construyó una red de 10 vértices geodésicos (figura 3, tabla 1) con el fin de obtener una adecuada resolución espacial de los posibles desplazamientos en esta ladera. Los puntos o vértices geodésicos se distribuyeron de una cota mayor a menor. A estos

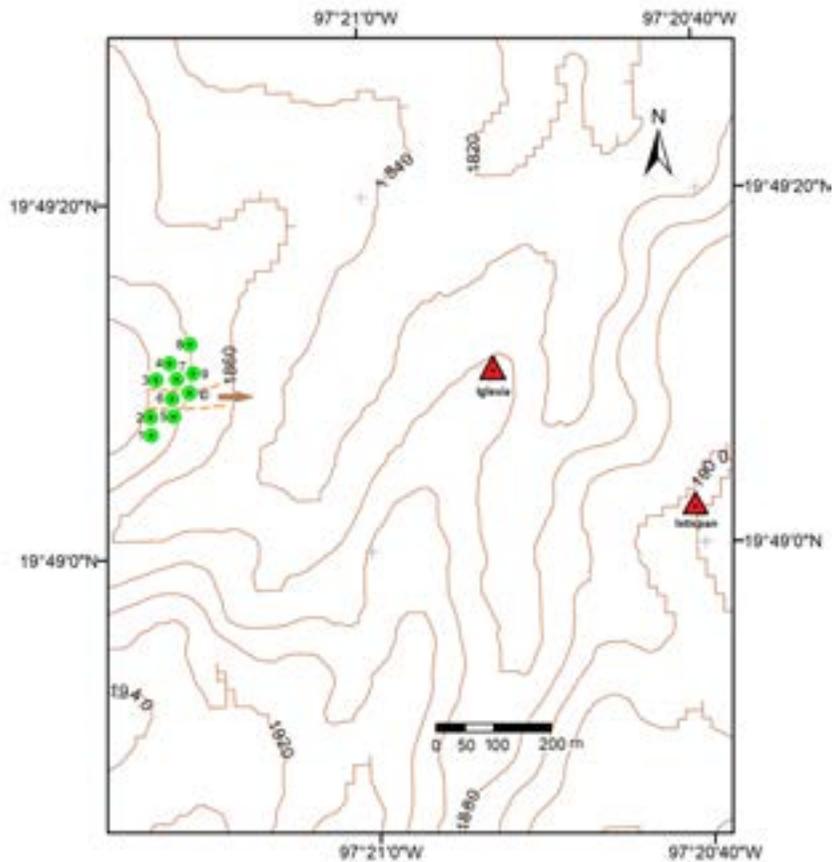
vértices se les conoce como puntos para prisma (figuras 4, 5; tabla 1). La red geodésica se complementa con dos marcas (hitos) permanentes situadas al oeste de la zona de la ladera: “Iglesia” (19.819451°, 97.3478911°, 1858 m.s.n.m) e “Ixticpan” (19.817225°, 97.3446018°, 1905 m.s.n.m), se les considera estaciones o puntos de control porque son estables y fuera del área del deslizamiento, constituidos por monumentos de concreto de 40 cm x 40 cm y 1.5 m de profundidad. Se ubican aproximadamente a 500 m y 900 m (Figura 5) respectivamente. Desde estas dos marcas se realizan las mediciones electrónicas de distancia (EDM) con la estación total.



**FIGURA 3.** Puntos para prisma colocados en la ladera en la colonia La Aurora, Teziutlán. El cuadro en negro muestra el área de estudio y la línea punteada en amarillo indica el deslizamiento de octubre de 1999.



**FIGURA 4.** A la izquierda se muestra el Prisma reflector para realizar mediciones de distancia en el vértice T-8. A la derecha la estación total, T1610 con EDM (DI300S), colocado en el punto de referencia Iglesia, al fondo el cuadro indica el área de la ladera monitoreada en la colonia La Aurora, Teziutlán, Pue.



**FIGURA 5.** Red geodésica para observar desplazamientos en la ladera de la colonia La Aurora en Teziutlán, Pue. Las curvas de nivel son a cada 20m. Los círculos verdes son los puntos para prisma y los triángulos son las estaciones remotas de control. La flecha en café y la línea punteada muestran la dirección y el área del deslizamiento de 1999. Sistema coordinado basado en la proyección Cónica Conforme de Lambert, oficial para México. El datum de referencia es el WGS84.

### 3.2 Mediciones de distancia con estación total

Para conocer la distancia entre dos puntos existe la técnica de la medición electrónica de distancias (EDM), la cual se basa en la emisión de un pulso de láser, desde un dispositivo denominado “estación total” colocado en uno de los puntos (en este estudio, Ixtipán e Iglesia), que incide hacia un reflector situado en el otro punto (sobre la ladera). El reflector está constituido por un arreglo de espejos (punto o vértice para prisma) el cual permite que ese haz láser regrese en forma paralela, posteriormente con el tiempo de viaje de ida y regreso del láser entre los dos puntos ( $\Delta t$ ), multiplicándolo por la ve-

locidad de la luz ( $C$ ) y dividiéndolo entre 2, es como se obtiene la distancia ( $d$ ) (Ec.1) con precisión milimétrica (Lemmens, 2016; Dioptra, 2000; Ghilani *et al.*, 2012). En la actualidad las estaciones totales realizan este proceso de forma automática y con la activación de una aplicación, calculan la distancia.

$$d = \frac{C\Delta t}{2} \dots\dots\dots(1)$$

Entre septiembre de 2008 y abril del 2011 se efectuaron 11 campañas de trabajo. En cada campaña de medición se coloca un prisma reflector (figura 4) sobre cada vértice en la ladera, al mismo tiempo desde cada punto de control (Ixtipán e Iglesia) se midieron las distancias a

**Tabla 1.** Descripción y ubicación de los vértices o puntos para prisma en ladera de la colonia La Aurora, Teziutlán, Pue. Las coordenadas están referidas al datum WGS84.

Descripción y ubicación de los vértices para prisma	
<p><b>T-1</b> (19.818609°,97.3536082°, 1901 m.s.n.m) Está situado en la corona del muro de contención de mampostería que limita el cementerio y la corona de la ladera.</p>	<p><b>T-6</b> (19.819164°,97.3530584°,1890 m.s.n.m) Punto situado en la parte media de la ladera, es un tornillo empotrado 15cm en la corona, de una de las paredes de concreto del canal de desagüe y que fue construido casi al centro del deslizamiento del año 1999</p>
<p><b>T-2</b> (19.818889°,97.3536149°,1900 m.s.n.m) Se ubica al pie del muro de contención de mampostería y que limita el cementerio y la corona de la ladera, es una mojonera de concreto de sección 30x30x90cm</p>	<p><b>T-7</b> (19.819442°,97.3527978°,1886 m.s.n.m) Punto situado ligeramente al norte en la parte media de la ladera, es una mojonera de concreto de sección 30x30x90cm construida en terreno natural</p>
<p><b>T-3</b> (19.819447°,97.3533323°,1899 m.s.n.m) Punto situado cercano a la corona de la ladera, es una mojonera de concreto de sección 30x30x90cm en terreno natural</p>	<p><b>T-8</b> (19.820002°,97.3528016°,1885 m.s.n.m) Punto situado al extremo norte y en la porción media de la ladera, es una mojonera de concreto de sección 30x30x90cm construida en terreno natural</p>
<p><b>T-4</b> (19.819724°, 97.3530526, 1895 m.s.n.m) Este vértice se ubica hacia el extremo norte del deslizamiento, es una mojonera de concreto de sección 30x30x90cm en terreno natural</p>	<p><b>T-9</b> (19.819496°,97.3528354°,1880 m.s.n.m) Punto situado en la parte baja y al norte de la ladera, es una mojonera de concreto de sección 30x30x90cm construida en terreno natural</p>
<p><b>T-5</b> (19.818884°,97.3530517°,1894 m.s.n.m) Punto situado al sur de la ladera, es un tornillo empotrado 50cm en los restos del piso de cimentación de una casa que fue afectada por el deslizamiento del año 1999</p>	<p><b>T-10</b> (19.818873°,97.3527846°,1881 m.s.n.m) Punto situado en la parte media baja de la ladera, es una mojonera de concreto de sección 30x30x90cm construida en terreno natural</p>

cada prisma con una estación total Leica T1610 (precisión en la medición 3 mm±1 ppm) (figura 4) y una estación total Sokkia SET5X (precisión en la medición de 2 mm±2 ppm), se tomaron series de 30 mediciones de distancia. Para contar con mediciones de distancia precisas, es necesario considerar que existe una dependencia de las condiciones atmosféricas al momento de la medición (Bertacchini *et al.*, 2011; Dvořáček, 2012). Para aminorar el efecto atmosférico, no debe haber una diferencia de elevación considerable entre la estación o punto de control y vértice para prisma, esto permitirá asumir que en los dos extremos de la línea las condiciones atmosféricas son semejantes. Por lo tanto, la red geodésica se ubicó en sitios con cotas o elevaciones semejantes (Tabla 1). Una práctica usual para el cálculo de la corrección atmosférica es tomar datos de temperatura, presión y humedad relativa al momento de las mediciones de distancia en cada punto de control remoto (Bertacchini *et al.*, 2011; Dvořáček, 2012). Para corregir las distancias por los efectos atmosféricos, se utilizó la siguiente fórmula basada en modelo propuesto por Barrel y Sears (1939):

$$\Delta d_1 = 281.5 - \frac{0.29035p}{1+0.00366t} + \frac{11.27h}{100(273.16+t)} * 10^x \dots\dots\dots(2)$$

donde,

$$\Delta d_1 = \text{corrección atmosférica en ppt}$$

- p=presión en milibares
- t=temperatura en °C
- h=humedad relativa en %

$$x = \frac{7.5t}{237.3 + t} + 0.7857$$

Cada medición fue corregida aplicando la ecuación (2) (Leica, 1992), posteriormente se calculó el promedio de las 30 mediciones realizadas, tomando este como valor final. Es importante considerar que los cambios en las dis-

tancias medidas se traducen en el movimiento de la ladera de la siguiente forma: si aumentan, el desplazamiento es positivo y si disminuyen, es negativo.

### 3.3. Análisis de correlación entre los desplazamientos y la precipitación

El análisis de correlación es un procedimiento estadístico para determinar si dos variables están relacionadas o no linealmente. El resultado del análisis es un coeficiente de correlación que toma valores en el rango de . El signo indica el tipo de correlación entre las dos variables. Un signo positivo indica que existe una relación positiva, es decir, cuando la magnitud de una variable incrementa, la otra también. Un signo negativo indica que existe una relación negativa entre las dos variables, es decir, que si los valores de una incrementan, los de la segunda variable disminuyen. Si dos variables son independientes, el coeficiente de correlación es cero. La correlación lineal incrementa a medida que el coeficiente de correlación se aproxima a -1 ó a +1. La ecuación que define el coeficiente de correlación entre dos variables X y Y es:

$$\text{Correl}(X,Y) = \frac{\Sigma(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x - \bar{x})^2(y - \bar{y})^2}} \dots\dots(3)$$

donde  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son las medias.

Para establecer la correlación (Ec. 3) entre las mediciones (Tabla 2) y la precipitación (Figura 7), se buscan valores representativos en la serie temporal, que se puedan comparar y relacionar con los desplazamientos observados. Esto debido a que las mediciones de distancias no se realizaron con la misma frecuencia, además que tampoco fue posible medir en todos los puntos en cada fecha de campaña (Tabla 2). Para esto, se tomó el valor máximo de la precipitación, durante el intervalo de tiempo en el que ocurrió el desplazamiento medido, es decir, el tiempo entre las cam-

**Tabla 2.** Distancias normalizadas desde estaciones denominadas “Iglesia” e “Ixticpan”, hacia los vértices T-1 a T-10. Las mediciones se realizaron en 11 campañas

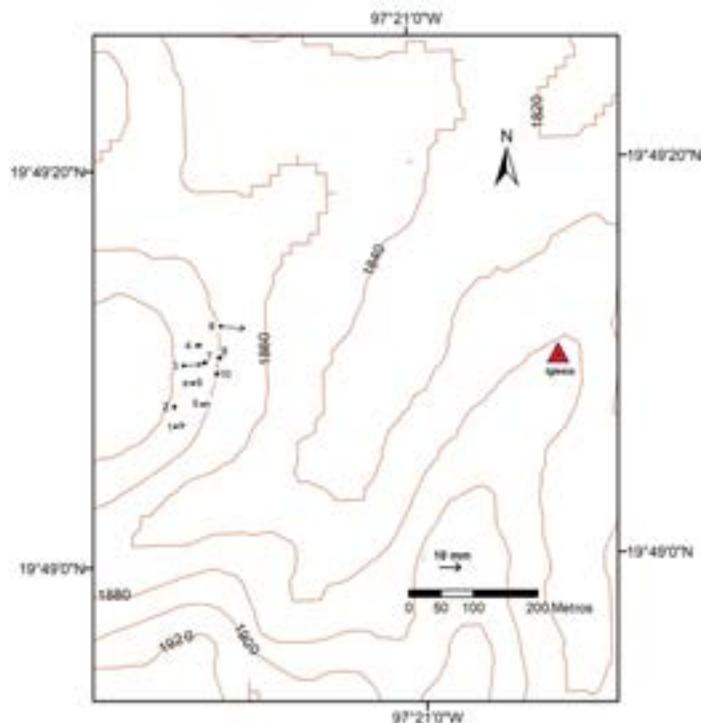
Fecha	Iglesia T-10	Iglesia T-9	Iglesia T-8	Iglesia T-7	Iglesia T-6	Iglesia T-5	Iglesia T-4	Iglesia T-3	Iglesia T-2	Iglesia T-1
04/09/2008	0.948	0.879	0.797	0.721	0.677	0.632	0.570	0.526	0.449	0.400
30/10/2008	0.950	0.879	0.800	0.720	s/n	s/n	0.575	0.530	0.453	0.409
11/12/2008	0.953	0.880	0.801	0.722	0.683	0.634	0.576	0.532	0.457	0.410
17/03/2009	0.946	0.855	0.791	0.713	0.675	0.624	0.569	0.526	0.452	0.401
17/06/2009	s/n	s/n	s/n	0.715	0.674	0.625	0.569	0.523	0.440	0.401
21/09/2009	0.953	0.876	s/n	0.718	0.677	s/n	0.566	0.529	0.454	0.401
14/12/2009	0.936	0.861	0.775	s/n	0.666	0.618	0.553	0.511	0.438	0.388
25/02/2010	0.945	0.876	0.787	0.718	0.675	0.625	0.571	0.523	0.450	0.396
03/05/2010	s/n	0.876	s/n	0.718	0.682	0.623	0.570	0.525	0.445	0.400
13/09/2010	0.949	0.876	s/n	0.715	0.680	0.629	0.565	0.516	0.453	0.403
13/04/2011	s/n	s/n	s/n	0.719	0.678	0.625	0.568	0.516	0.446	0.395
Número de mediciones	8	9	6	10	10	9	11	11	11	11
Fecha	Ixticpan T-10	Ixticpan T-9	Ixticpan T-8	Ixticpan T-7	Ixticpan T-6	Ixticpan T-5	Ixticpan T-4	Ixticpan T-3	Ixticpan T-2	Ixticpan T-1
04/09/2008	0.942	s/n	0.862	0.788	0.685	0.336	0.307	0.265	0.220	0.155
30/10/2008	s/n	s/n	s/n	s/n	s/n	s/n	s/n	0.264	0.222	0.163
11/12/2008	s/n	s/n	0.862	0.785	0.691	0.342	0.309	0.264	0.224	0.156
17/03/2009	0.933	s/n	s/n	0.775	0.681	0.342	s/n	0.254	0.219	0.157
17/06/2009	s/n	s/n	s/n	0.782	0.680	0.358	0.307	0.261	0.210	0.153
21/09/2009	s/n	s/n	s/n	0.778	0.686	0.336	0.308	0.259	0.216	0.145
14/12/2009	0.941	s/n	0.852	s/n	0.693	0.340	0.308	0.264	0.229	0.162
25/02/2010	0.950	0.908	0.855	0.783	0.692	0.341	0.307	0.263	0.223	0.160
03/05/2010	s/n	s/n	0.846	0.781	0.684	0.330	0.300	0.257	0.212	0.149
13/09/2010	0.941	s/n	0.846	0.776	0.685	0.332	0.299	0.249	0.216	0.148
13/04/2011	s/n	0.907	0.842	0.785	0.690	0.339	0.304	0.252	0.220	0.149
Número de mediciones	5	2	7	9	10	10	9	11	11	11

pañás que se muestran en la [tabla 2](#). Por ejemplo, para las mediciones desde la estación de control Iglesia a T-4, Iglesia a T-3, Iglesia a T-2, Iglesia a T-1, Ixticpan a T-3, Ixticpan a T-2 e Ixticpan a T-1, que tienen los registros en todas las fechas, los intervalos de tiempo entre mediciones corresponden a 56, 42, 96, 92, 96, 84, 73, 67, 133 y 212 días, mostrando otro ejemplo sería el caso de Iglesia a T-10 en el cual el intervalo de tiempo entre las mediciones corresponderían a 56, 42, 96, 188, 84, 73 y 200 días, y así con todos las demás mediciones desde las estaciones de control hacia los 10 puntos para prisma (vértices T). Teniendo los intervalos de tiempo, es posible identificar en ellos los valores máximos de la precipitación y así calcular la correlación entre estos valores y las mediciones de desplazamiento (diferencia de las distancias entre campañas). Es necesario hacer énfasis que el número de mediciones está mencionado en el último renglón de la [Tabla 2](#), donde los puntos Ixticpan T-9 e Ixticpan T-10, con sólo 2 y 5 mediciones respectivamente, no serán tomados

en cuenta debido a la poca información registrada en ellos y los resultados no serían confiables.

#### 4. Resultados

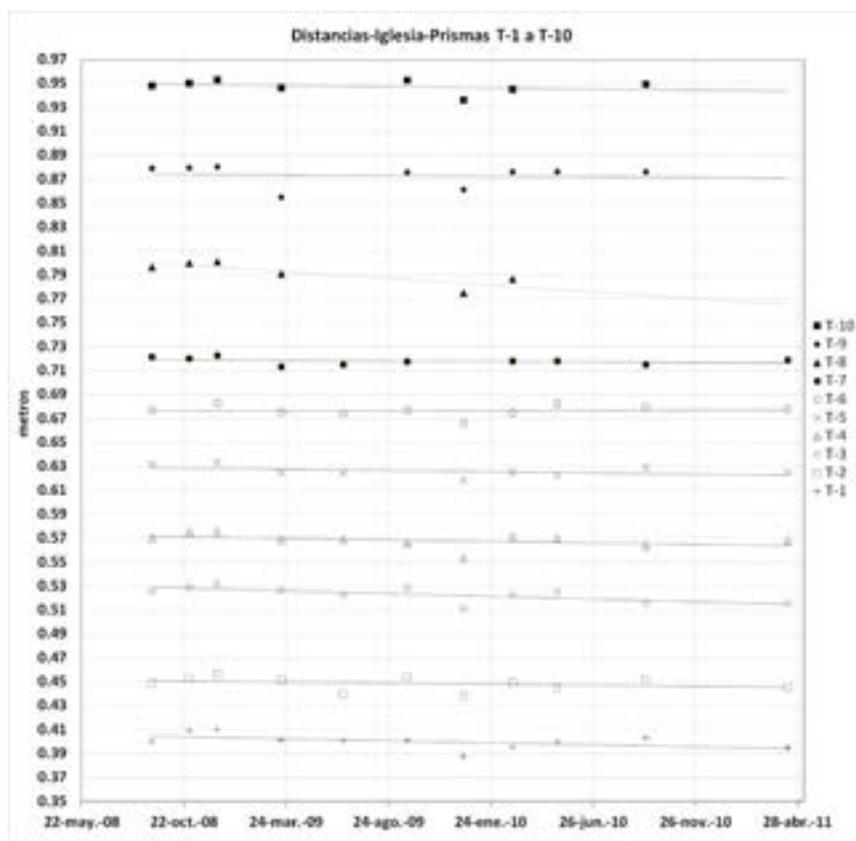
Las distancias medidas entre la estación Iglesia y los prismas (T1 a T10) están en un rango de 507.4 m a 622.09 m, las desviaciones estándar de las mediciones estuvieron en un rango de 3.1 mm a 4.7 mm. Los desplazamientos y velocidades más relevantes que se observan en las mediciones desde esta estación, sin considerar las oscilaciones intermedias, corresponden a los puntos T-8(-10 mm,6 mm/año), T-3(-9 mm,3 mm/año), T-1(-5 mm, 2mm/año) y T-4(-2mm, 1mm/año) ([figura 6](#)) ([Tabla 2](#)). Es importante hacer notar que varios de estos desplazamientos no exceden los rangos de precisión y desviación estándar instrumentales y el signo negativo indica que los puntos se desplazan hacia abajo en dirección Este.



**FIGURA 6.** Vectores de desplazamiento observados en los vértices T1-T10. La escala de los vectores se indica con la flecha en negro al pie de la figura.

Las distancias medidas desde la estación Ixtipan a los puntos para prisma (T1 a T10; figura 7) están en el rango de 928.3 m a 991.3 m, con desviaciones estándar entre 3.8 mm y 5.2 mm. Los desplazamientos y velocidades más importantes corresponden a los puntos para prisma

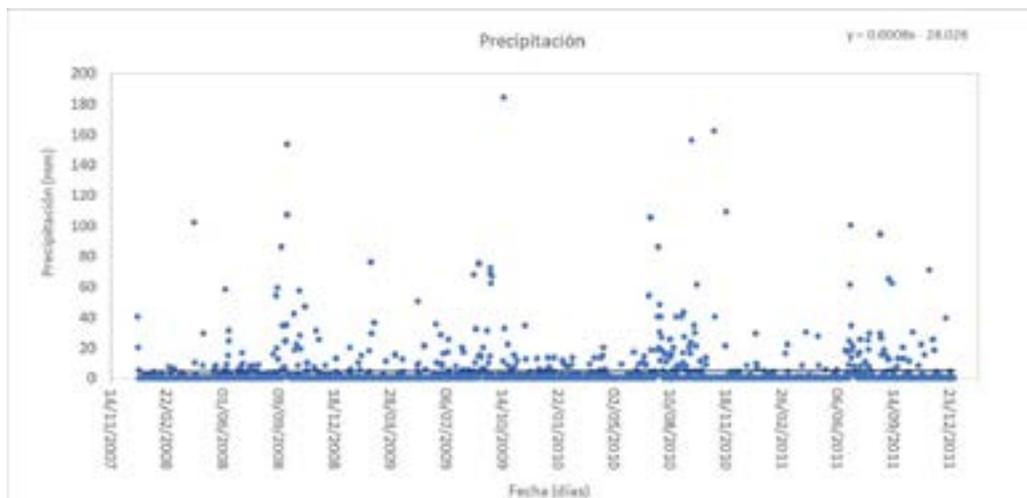
T-8(-19mm, 7mm/año), T-3(-13mm,5mm/año) y T-1(-6mm,2mm/año) (Tabla 2). También se observó que los desplazamientos más importantes obtenidos son razonablemente coincidentes en tamaño. El total de observaciones realizadas se muestra en la Tabla 2.



**FIGURA 7.** Distancias observadas entre la estación de control Iglesia y los puntos para prisma, de septiembre de 2008 a abril de 2011. Cada división de la escala vertical son 2 centímetros, los valores se normalizaron para fines de visualización.

Por otro lado, como se ha observado que una de las causas desencadenantes del movimiento de una ladera es la cantidad de lluvia que se infiltra en ella, es importante analizar la influencia de la precipitación en los desplazamientos. Para esto se realizó un análisis de correlación entre la variable de precipitación máxima y la variable de desplazamiento. Primero, para conocer la variable de precipitación máxima se calculó la estadística descriptiva (tabla 3), de 1461 datos diarios que corresponden al periodo de este estudio. Se observó que la media y la moda no son

tan diferentes y con el fin de analizar la existencia de tendencia en el tiempo se graficó y realizó una regresión lineal durante el periodo del año 2008 al 2011, observando en su ecuación una pendiente casi nula. Esto sugiere la ausencia de una tendencia marcada para este periodo de tiempo. Sin embargo, el signo positivo de la pendiente podría indicar que, si se mantiene el comportamiento de este periodo a muy largo plazo, se incrementaría muy lentamente la precipitación (figura 8).



**FIGURA 8.** Serie de tiempo de la precipitación diaria en la estación meteorológica Teziutlán; fuente <https://smn.conagua.gob.mx>. La línea negra y la ecuación corresponden al ajuste de una regresión lineal.

En la figura 9, se observa la precipitación diaria acumulativa. Se destaca que hay un ligero cambio en la pendiente en el intervalo de junio a noviembre del año 2010, sin embargo, este no

influye en la información global de la precipitación, dado que no se separa significativamente de la pendiente de la recta con  $R^2$  de 0.9897.



**FIGURA 9.** Precipitación diaria acumulativa en el periodo 2008 al 2011. Fuente CONAGUA, <https://smn.conagua.gob.mx>

Los coeficientes de correlación obtenidos entre los desplazamientos y la precipitación máxima se muestran en la **Tabla 4**. En general no se observaron correlaciones significativas dado que los coeficientes de correlación no muestran valores cercanos a uno, excepto el que corresponde al vértice T-1 (0.6) (**Tabla 4**).

### 5. Discusión y conclusiones

El desplazamiento detectado en el vértice T-8 es el mayor que se pudo medir desde las dos estaciones de control (**figura 6**) y es notoriamente distinto a los otros vértices, sugiriendo que este sitio podría estar desvinculado del movimiento general de la ladera. El desplazamiento del vér-

**Tabla 3.** Estadística descriptiva de los parámetros meteorológicos obtenidos de la estación Teziutlán de la CONAGUA-SMN(2008-2011), fuente <https://smn.conagua.gob.mx>

	Precipitación (mm)
Media	4.61
Moda	0.00
Mediana	0.00
Varianza	211.47
Desviación Estándar	14.54
Valor máximo	184.00
Valor min	0.00
Curtosis	52.15
Rango	184.00
Suma	6735.70
Cuenta	1461.00

**Tabla 4.** Coeficientes de correlación entre el valor máximo de la precipitación y el valor de los desplazamientos para los distintos puntos desde las estaciones Iglesia e Ixticpan.

Nota: Ixticpan T-10 e Ixticpan T-9 fueron excluidos por tener muy pocos registros

	Iglesia T-10	Iglesia T-9	Iglesia T-8	Iglesia T-7	Iglesia T-6	Iglesia T-5	Iglesia T-4	Iglesia T-3	Iglesia T-2	Iglesia T-1
Coefficiente de correlación	0.386	0.026	0.306	-0.037	0.019	0.059	0.132	0.244	0.182	0.598
	Ixticpan T-10	Ixticpan T-9	Ixticpan T-8	Ixticpan T-7	Ixticpan T-6	Ixticpan T-5	Ixticpan T-4	Ixticpan T-3	Ixticpan T-2	Ixticpan T-1
Coefficiente de correlación			0.065	0.118	0.247	-0.184	-0.192	0.030	0.009	0.282

tice T-3 que está próximo a la corona del proceso de remoción de masa del año 1999, podría estar asociado a un desplazamiento remanente de ese evento. El desplazamiento en el vértice para prisma T-6, se detectó con un movimiento positivo (figura 6), indicando posiblemente que la estructura sobre la que está instalado podría estar sufriendo un pequeño asentamiento que está siendo medido con este monitoreo.

El coeficiente de correlación más significativo fue observado en el vértice T-1, dado que este vértice se encuentra sobre la corona del muro de contención entre el cementerio y la ladera, sugiriendo que la precipitación esté provocando una influencia sobre la estabilidad de esta estructura. En este sentido es importante considerar que, en el caso del fallamiento de la ladera de la Aurora en 1999, la presencia de una barda de concreto favoreció la infiltración y acumulación de agua (Mendoza *et al.*, 2002), por lo que es posible que los pequeños desplazamientos y la correlación con la precipitación observada en T-1 sean influenciados por esta misma causa.

En general, los coeficientes de correlación son pequeños, sin embargo, la mayoría son positivos y muestran un patrón general que apunta a que los desplazamientos se incrementan cuando la precipitación aumenta y viceversa.

Con los valores de velocidad de desplazamiento aquí encontrados y de acuerdo con una clasificación propuesta por Cruden y Varnes (1996) y descrito en Hungr *et al.* (2014) para laderas inestables, en la cual considera esto como uno de sus parámetros, permite situar y describir a esta ladera en el número 1 con un movimiento extremadamente lento. Dado que la mayoría de los desplazamientos son con signo negativo y hacia el Este, esto sugiere que en general el patrón de movimiento es cuesta abajo, es decir hacia la parte del pie del deslizamiento.

Aun cuando no se observaron desplazamientos significativos, esta condición puede cambiar

rápidamente, principalmente si se presenta una alta precipitación sostenida que provoque un aumento en la velocidad de los desplazamientos, por lo que se recomienda a las autoridades de protección civil local, el estar atentos a esta condición, dado que es posible que en ese momento ocurra un nuevo proceso de remoción de masa.

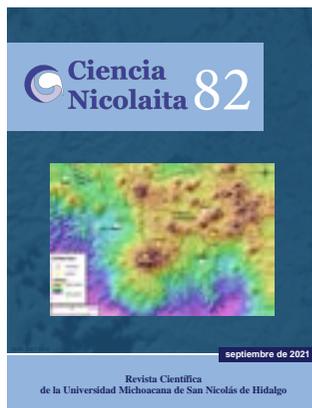
### Agradecimientos

Al CENAPRED, por los recursos instrumentales y financieros para las campañas de campo. A las direcciones de Investigación y de Instrumentación y Cómputo del CENAPRED, por el apoyo para la ejecución de este proyecto. A Teófilo Hernández Alcántara, Ana María Alarcón Ferreira y Andrés Ramírez Soto por el apoyo en el trabajo de campo.

### Referencias

- AFENI T. B. y Cawood F. T. 2013. Slope Monitoring using Total Station: What are the Challenges and How Should These be Mitigated? *South African Journal of Geomatics*, 2, (1): 41-53.
- ANUARIO Estadístico y Geográfico de Puebla 2017. Gobierno del Estado de Puebla. Instituto Nacional de Geografía e Informática INEGI, pp. 943.
- ARTESE S. y Perrelli M. 2018. Monitoring a Landslide with High Accuracy by Total Station: A DTM-Based Model to Correct for the Atmospheric Effects. *Geosciences*, 8: 46.
- ATLAS de Riesgos Naturales del Municipio de Teziutlán, Puebla, 2014, ([http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2015/21174\\_AtlasTeziutlan.pdf](http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2015/21174_AtlasTeziutlan.pdf))
- BARRELL H., Sears J. E. 1939. The Refraction and Dispersion of Air for the Visible Spectrum. *Philosophical Transactions Royal Society of London*, 238: 1-64.
- BERTACCHINI E., Capra A., Castagnetti C. Corsini A. 2011. Atmospheric Corrections for Topographic Monitoring Systems in Landslides. FIG Working Week 2011, Bridging the Gap between Cultures. Marrakech, Morocco, 18-22 May 2011

- BITRÁN, D. 2000. Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana durante 1999, Cuadernos de Investigación, 50, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- CAPRA, L., Lugo H. J. y Borselli, L., 2003. Mass movements in tropical volcanic terrains: the case of Teziutlán (México). *Engineering Geology*, 69: 359-379.
- CENAPRED, 2008. Serie Fascículos Inestabilidad de Laderas. ISBN: 970-628-896-1. Centro Nacional de Prevención de Desastres pp. 36.
- CONAGUA, 2020, <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Diarios/21091>
- CRUDEN D. M, Varnes D. J. 1996. Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL(eds) *Landslides investigation and mitigation*. Transportation research board, US National Research Council. Special Report 247, Washington, DC, Chapter 3: 36–75
- DIOPTRA, S. L. 2000. Instrumentación para la topografía y su cálculo. AA.VV. Editorial, ISBN: 978-84-931536-0-1, pp. 391.
- DVOŘÁČEK Filip. 2012. Calibration of Electronic Distance Meters, Master's thesis. CZECH Technical University in Prague, pp. 149.
- FLORES, P. y Alcántara Ayala, I. 2002. Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM*, 49: 7-26.
- GARIANO S. y Guzzetti L. 2016. Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*. 162: 227-252. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.08.011
- GHILANI, C. D. and Wolf, P. R. 2012. *Elementary surveying: an introduction to geomatics* 13th ed. Prentice Hall. ISBN-13: 978-0-13-255434-3, pp. 983.
- HUNGR O., Leroueil S. y Picarelli L. 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 11, 167–194.
- LEICA AG, Heerbrugg. 1992. Instruction manual. DI300S. Switzerland.87p.
- LEMMENS M. 2016. Total Stations: the Surveyor's Workhorse, *GIM International*, 30 (10), 20-25.
- LUGO H. J., Zamorano-Orozco J. J., Capra L., Inbar M. y AlcántaraAyala I. 2005. Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: Causa y efectos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22 (2), 212-228.
- MAČEK M., Petkovšek A., Majes B., and Mikoš M. 2014. Landslide Monitoring Techniques Database. In K. Sassa *et al.* (eds.), *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, 1, Springer International Publishing Switzerland, 193-197.
- MENDOZA L. M. J., Domínguez Morales L., Noriega Rioja I. y Guevara Ortiz E. 2002. Monitoreo de Laderas con fines de Evaluación y Alertamiento. Secretaría de Gobernación. Centro Nacional de Prevención de Desastres. ISBN: 970-628-632-2, pp. 78.
- ORDENAMIENTO Territorial de Teziutlán Puebla. 2021. Gobierno Municipal de Teziutlán, <https://teziutlan.gob.mx/Archivos/ContenidoNavegacion-22173.pdf>.
- SAFE LAND. 2012. Living with landslide risk in Europe. Assemnet, effects of global change, and risk management strategies, pp. 301.
- SERVICIO Geológico Mexicano. 2011. Carta Geológica de Teziutlán, Puebla. E14-B15.
- SONG, Y.-S.; Chae, B.-G.; Kim, K.-S.; Park, J.-Y.; Oh, H.-J.; Jeong, S.-W. A. 2021. Landslide Monitoring System for Natural Terrain in Korea: Development and Application in Hazard Evaluations. *Sensors*, 21,3040. <https://doi.org/10.3390/s21093040>
- TÉLLEZ de la Cruz Óscar Alexis, González Guevara, José Luis, Martínez Mirón Yleana Claudia, Coba Báez Alfredo Yael, Ventura Marroquín Julia Isabel, Castillo Pensado Juan Luis, Alonso Ruíz Francisco Martín, Mejía Pérez José Alfredo y Vera Zeller Marco Alejandro. 2021. Elaboración de mapa de vulnerabilidad por inestabilidad de laderas en la zona de los llanos de San Juan, norte de la III región del estado Puebla: caso particular de Cuyoaco, Puebla, México. *Geos*, 40 (1).
- VÁZQUEZ-CONDE, M.T., Lugo, H. J., Matías, L.G., 2001, Heavy rainfall effects in Mexico during early October 1999, en Grunfest, E., Handmer, J. (eds.), *Coping with Flash Floods: Países Bajos*, Kluwer Academic Publications, 289-299.



## Caracterización de un holograma mediante el dopaje de un PDLC con violeta de genciana

Mauricio Ortiz Gutiérrez, Mario Pérez Cortés, Juan Carlos Ibarra Torres, Jorge Lugo Jiménez, Otilio Santos Aguilar, Maritza De Coss Gómez

Para citar este artículo: [Ortiz Gutiérrez Mauricio, Pérez Cortés Mario, Ibarra Torres Juan Carlos, Jiménez Jorge Lugo, Santos Aguilar Otilio, De Coss Gómez Maritza. 2021. Caracterización de un holograma mediante el dopaje de un PDLC con violeta de genciana. Ciencia Nicolaita, número 82, 81-88. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi82.562>.](#)

---

Ver material suplementario

---

Publicado en línea el 30 de septiembre de 2021

---

Envíe su artículo a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

---

# Caracterización de un holograma mediante el dopaje de un PDLC con violeta de genciana

Mauricio Ortiz Gutiérrez<sup>1\*</sup>, Mario Pérez Cortés<sup>2</sup>, Juan Carlos Ibarra Torres<sup>3</sup>,  
Jorge Lugo Jiménez<sup>2</sup>, Otilio Santos Aguilar<sup>2</sup>, Maritza De Coss Gómez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

<sup>2</sup> Campus de Ciencias e Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.

<sup>3</sup> Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara

## HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 5 de diciembre de 2019

Aceptado: 21 de junio de 2021

## RESUMEN

Se propone la utilización de un dispositivo PDLC (Polymer Dispersed Liquid-Crystal) dopado con violeta de genciana para su utilización en el grabado de rejillas holográficas (H-PDLC). Se muestra el comportamiento de la eficiencia de difracción de rejillas holográficas grabadas en un H-PDLC con un espesor de 10  $\mu\text{m}$ . El proceso de grabado se lleva a cabo por la modulación del índice de refracción del H-PDLC al ser expuesto a un patrón de luz. La eficiencia máxima que alcanza este dispositivo es del 5% medido en el orden 1 de difracción. Este dispositivo promete ser un buen material para funcionar como alternativa de las películas holográficas.

**PALABRAS CLAVE:** Rejillas holográficas, Cristal Líquido, PDLC.

## ABSTRACT

We propose the use of a PDLC device (Polymer Dispersed Liquid-Crystal) doped with gentian violet for its use in the etching of holographic gratings (H-PDLC). The behavior of the diffraction efficiency of holographic gratings recorded on an H-PDLC with a thickness of 10  $\mu\text{m}$  is shown. The etching process is carried out by modulating the refractive index when exposed to a pattern of light. The maximum efficiency that this device achieves is 5% measured in order 1 of diffraction. This device promises to be a good material to work as an alternative to holographic films.

**KEYWORDS:** Holographic gratings, Liquid Crystal, PDLC.

## 1. Introducción

La desaparición de las películas fotográficas por causa de la tecnología digital ocasionó que desaparecieran de las películas utilizadas en la holografía. La holografía es un campo importante en la actualidad debido a la importancia que tiene por su capacidad de almacenar enormes cantidades de datos de información, así como en la futura industria del entretenimiento.

Este trabajo presenta la utilización de polímeros como un sustituto para el grabado de rejillas holográficas, además de incrementar su sensibilidad a la luz mediante el dopaje por medio de otro material que ayude en el proceso de grabado. También se incorporó un cristal líquido para tener un dispositivo dinámico, a este tipo de dispositivos se les conoce como H-PDLC (Holographic Polymer Dispersed Liquid Crystal). Los PDLC se obtienen mediante la polimerización de separación de fase inducida (Ramanitra *et al.*, 2004).

Los PDLC se utilizan en tecnologías como sensores de voltaje (Scherschener *et al.*, 2006), en la realización de lentes de Fresnel (Ren *et al.*, 2003), en la construcción de filtros espaciales para el procesamiento de señales ópticas (Fuh y Lin 2004), y otras aplicaciones.

Los H-PDLC son una promesa tecnológica para su utilización en las redes de comunicación a base de fibras ópticas (Domash *et al.*, 1997), en el uso de almacenamiento de datos (Date *et al.*, 1998), sistemas para la captura de imagen (Fiske, 2000), y otras aplicaciones (Bunning, *et al.*, 2000; Bowley y Crawford, 2000).

A lo largo de dos décadas los dispositivos HPDLC muestran algunas evoluciones en la introducción de nuevos polímeros para aumentar la sensibilidad de la fase: se incorporan diversos elementos como en segmentos VTMOs para las cadenas de los polímeros ya que esto reduce la tensión de conmutación y obtiene una modifica-

ción en las interfaces (Jeong y Kim, 2009). Estos autores explican que la presencia de átomos de silicio en las interfaces de un polímero / LC debería disminuir la fuerza de la energía de anclaje de la superficie y, por lo tanto, influir en la orientación de la dirección de la gota de LC. También espera que los átomos de silicio aumenten la separación de fase polímero / LC como resultado de su incompatibilidad química, lo que conduce a una alta eficiencia de difracción.

En la última década los HPDLC se han incorporado al desarrollo de la óptica no lineal, tal es el caso de los cristales fotónicos. Este hecho ha atraído un interés considerable debido a sus importantes aplicaciones. Actualmente se está dedicando un estudio intensivo al control eléctrico, térmico y óptico de la propagación de la luz. Algunos de estos dispositivos están hechos de poliestireno, que es un tipo de conjugado orgánico no lineal, mientras que otros son estructuras artificiales infiltradas con moléculas orgánicas (Ming Shian Li *et al.*, 2011).

Kun Gui y colaboradores (2015) desarrollaron plasmón en una superficie localizada (LSPR) mediante nanopartículas de plata (NP) incrustadas en la interfaz de separación de fase de las rejillas de cristal líquido (H-PDLC) dispersadas en polímero utilizando el método de dominio de tiempo de diferencias finitas. Kun muestra que las NP exhiben un pico de doble resonancia en la interfaz, y estos picos están influenciados por el ángulo de la luz incidente (Kun Gui *et al.*, 2015).

La eficiencia de difracción, el voltaje de operación y los tiempos de respuesta son las características de rendimiento más importantes de los HPDLC. K. Moon y colaboradores incorporan dos tipos de isocianurato de trialilo (TI) con diferentes estructuras en la red de transmisión convencional de HPDLC. Reportan que la viscosidad de la premezcla disminuye en un 13–18% con hasta un 3% de TI (Moon *et al.*, 2015).

Es posible que, para la próxima década, la miniaturización de los láseres se pueda realizar a base de polímero contaminado y cristal líquido, esto es debido a los trabajos reportados en este año por grupos del área de fotónica (Maozhou Chen *et al.*, 2018). Esto es debido a que se ha logrado realizar en el HPDLC el efecto túnel; y esto representa un bajo costo y simple proceso de fabricación. Existen varios estudios en el proceso de creación y del manejo de polímeros, y diferentes cristales líquidos que podrían dar este tipo de elementos (Fernández *et al.*, 2018).

Se realizó una revisión bibliográfica de algunos trabajos previos donde se han grabado hologramas (Ortiz Gutiérrez *et al.*, 2016; Villa-Manríquez, 2012) en los cuales se basó la construcción básica del H-PDLC. En este trabajo se presenta la fabricación y caracterización de un dispositivo H-PDLC basado en la mezcla del cristal líquido E7, el polímero Norland Optical Adhesive No. 65 (NOA 65) y violeta de genciana (VG) en el que se registraron rejillas holográficas con un láser con línea de emisión en el rango visible.

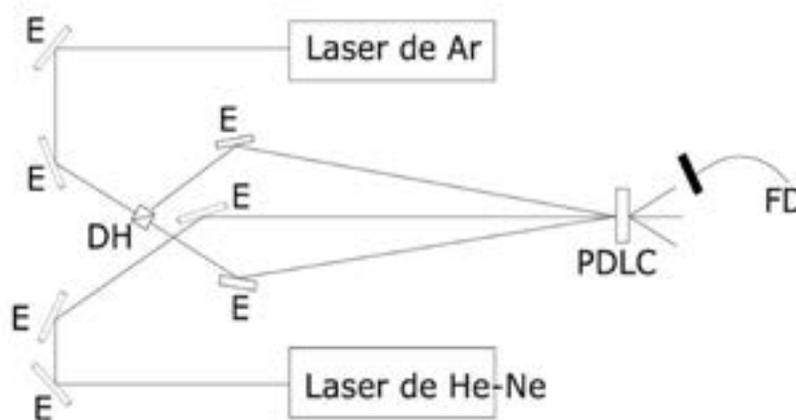
## 2. Metodología

Los materiales empleados en fabricación del PDLC dopado son violeta de genciana (VG), el polímero Norland Optical Adhesive No. 65 y el cristal líquido nemático E7. El VG es una sustancia de color verde - azul que es utilizado con fines médicos en sanitización de heridas superficiales y presenta solubilidad en agua, alcohol isopropílico y cloroformo y tiene una línea de absorción en 575 nm que lo hace atractivo para mezclarse con polímeros y grabar en líneas de emisión cercanas. El polímero NOA 65 es un adhesivo que se emplea para unir componentes ópticas y tiene una absorción en el rango de 350-380 nm (Aparicio *et al.*, 2009). El cristal líquido nemático fue adquirido de la compañía Merck.

En este trabajo se mezcla el tinte violeta de genciana (VG) con un PDLC sobre el que se grabaron rejillas holográficas de fase por modulación del índice de refracción de baja frecuencia, este dispositivo que contiene la mezcla del tinte con un PDLC se le conoce como H-PDLC (Holographic Polymer-Dispersed Liquid-Crystal). El proceso de fabricación de un H-PDLC se realiza al mezclar 0.15% de VG y 99.85% en peso de NOA 65. Después de esto, se incorpora el cristal líquido nemático E7 en proporción 1:2. La mezcla se deposita en una celda formada por dos portaobjetos recubiertos con ITO (Indium Tin Oxide), de la que se prepararon celdas con espesores de 10 micras.

Antes de que ocurra el proceso de polimerización, al PDLC dopado con el violeta de genciana se le introdujo un patrón de interferencia mediante la superposición de dos haces con lo que se obtuvo el registro de una rejilla holográfica de fase con perfil cosenoidal (Villa-Manríquez 2012). La longitud de onda del haz de luz procede de un láser de argón con 190 mW de potencia, con longitud de onda de 532 nm y el ángulo de interferencia entre dos haces se fijó en 3,6 grados. En estas condiciones, la rejilla holográfica tuvo un período de 8,5 micras y una frecuencia espacial de 118 líneas / mm.

Durante el proceso de grabación se midió la evolución de la eficiencia de difracción de la rejilla, en tiempo real, con la ayuda de un haz láser He-Ne con longitud de onda de 632,8 nm (llamado haz de lectura). Las intensidades de los haces incidentes y refractados se midieron con un medidor de potencia óptica modelo 2929-C de Newport. La eficiencia de difracción (DE) se define como la relación entre la intensidad del haz de orden difractado +1 y la intensidad del haz incidente y se expresa como porcentaje. El esquema del arreglo utilizado se muestra en la Figura 1.

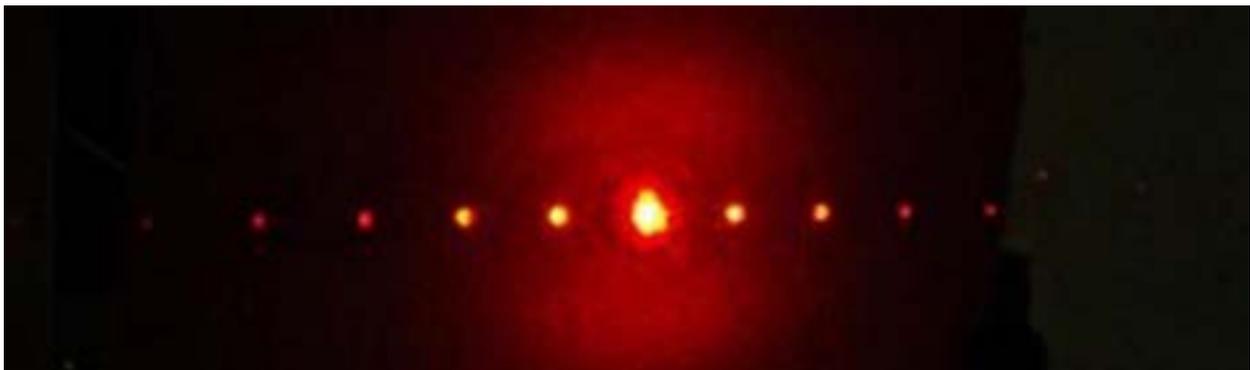


**FIGURA 1.** Esquema del arreglo óptico para la grabación de rejillas holográficas. El haz del láser de Ar genera dos haces debido al Divisor de haz (DH) que son reflejados por los espejos (E) e inciden en la celda del PDLC. Un segundo haz proveniente del láser He-Ne incide en la zona donde se graba la rejilla y se difracta; la intensidad del haz difractado en el orden +1 se mide con un fotodetector (FD).

## Resultados

La Figura 2 muestra un patrón de difracción que se produce en la creación del holograma dentro del PDLC. La mancha más brillante central se llama orden cero y en el lado derecho de este punto se ven los órdenes difractados +1,

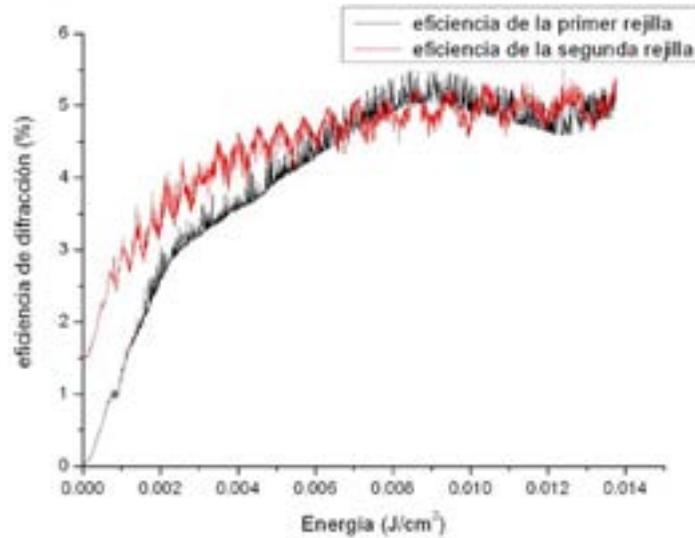
+2 y superiores. A la izquierda del punto central también se ven los órdenes difractados -1, -2 y superiores. Los puntos brillantes a cada lado del punto central pueden explicarse debido a la baja respuesta del material propuesto. La modulación en el índice de refracción inducida en el H-PDLC dopado corresponde a un patrón cuadrado en lugar de un patrón cosenoidal.



**FIGURA 2.** Fotografía del patrón de difracción producido por una rejilla holográfica registrada en el PDLC dopado cuando se ilumina con el haz de lectura (luz roja, 633 nm).

La Figura 3 muestra el comportamiento de la eficiencia de difracción de dos rejillas holográficas, donde se grabaron en un PDLC dopado con espesor de 10 micras. Se realizaron dos pruebas obteniendo resultados similares. Las

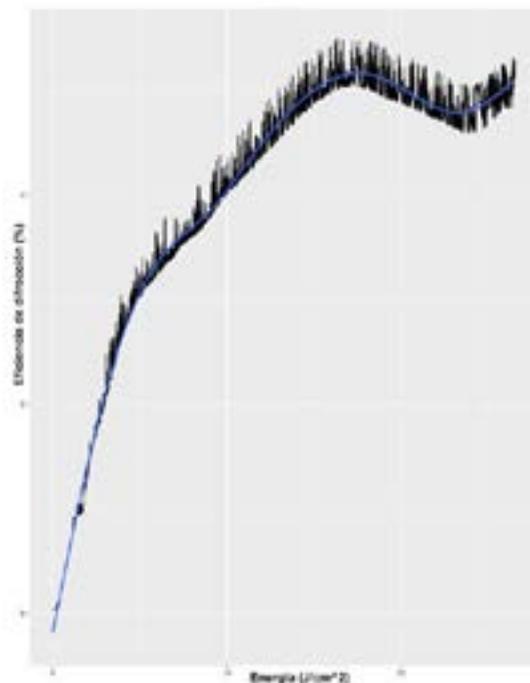
mediciones fueron tomadas con un medidor de potencia óptica de la marca Newport, modelo 2930C conectado a una computadora por medio del software LabView.



**FIGURA 3.** Gráfica de eficiencia de difracción vs tiempo para un PDLC de 10  $\mu\text{m}$ .

En la Figura 4 se muestra la gráfica promedio de la eficiencia de difracción para cada rejilla holográfica de fase que fue grabada en el PDLC dopado con VG y con un espesor de 10 micras. El valor máximo es del 5% para la energía de

0.010J /  $\text{cm}^2$ . Es importante tener en cuenta que la eficiencia de difracción medida es para el orden difractado +1 y no se tienen en cuenta las pérdidas de Fresnel por reflexión.



**FIGURA 4.** Comportamiento de la energía de exposición vs. eficiencia de difracción. La línea azul indica el promedio de los puntos indicados en la gráfica.

La baja eficiencia se debe a la consideración de dos factores: 1) el VG absorbe la longitud de onda de 570 nm, que es cercana a la longitud de onda de los láseres utilizados en este experimento para realizar el grabado y el análisis de la eficiencia de difracción; 2) la intensidad del haz de lectura se difracta y se distribuye en 9 órdenes de difracción claramente visibles (figura 2). Para mejorar la eficiencia de difracción lo conveniente es que solo aparecieran 3 órdenes de difracción correspondientes al patrón cosenoidal que se registra en el H-PDLC, esto indica que la respuesta en modulación del índice de refracción del material no tiene la resolución adecuada.

## Conclusiones

Aunque este dispositivo muestra una baja eficiencia, promete ser un buen candidato para funcionar como material holográfico. En futuros trabajos se estudiará la formación del dispositivo cuando se exponga al proceso de polimerización, para buscar su máxima respuesta hacia la formación del grabado de rejillas, y así lograr obtener una máxima eficiencia de difracción en la medida de lo posible.

## Referencias

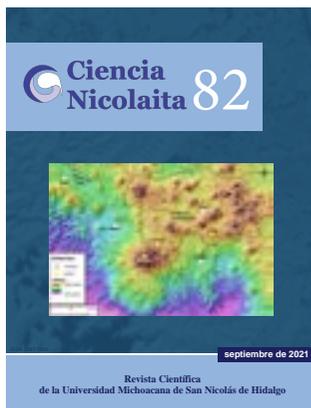
- APARICIO Ixta, L., Ortíz Gutiérrez, M., Valdez de Anda A. A., Ponce de León Y. R. 2009. Hologramas de Fourier en el polímero NOA 65 y violeta de cristal. *Ciencia Nicolaita*. 51: 207-219.
- BOWLEY C. C., Crawford G. P. 2000. Improved reflective displays based on polymer-dispersed liquid crystals. *J. Opt. Technol. C/C Opticheskii Zhurnal* 67 (8):717-722.
- BUNNING T. J., Natarajan L. V., Sutherland R. L., Tondiglia V. P. 2000. Switchable reflective displays formed from holographic polymer-Dispersed liquid crystals (HPDLC). Blackwell Publishing Ltd. *SID Symposium Digest of Technical Papers* 31 (1): 121-123.
- DATE M., Takeuchi Y., Kato K. 1998. A memory-type holographic polymer dispersed liquid crystal (HPDLC) reflective display device. *J. Phys. D: Appl. Phys* 31 (18): 2225.
- DOMASH L. H., Chen Y. M., Gozewski C. M., Haugsjaa P. O., Oren M. 1997. Electronically switchable Bragg gratings for large-scale NXN fiber optic crossconnects. *Photonics West 97*, International Society for Optics and Photonics, 214-228.
- JEONG, E. H., and Kim, B. K. 2009. Holographic polymer dispersed liquid crystals using vinyltrimethoxysilane. *Optics Communications* 282: 1541-1545.
- FERNÁNDEZ, S. Gallego, A. Márquez, J. Francés, F.J. Martínez, I. Pascual, A. Beléndez. 2018. Analysis of holographic polymer-dispersed liquid crystals (HPDLCs) for tunable low frequency diffractive optical elements recording. *Optical Materials* 76: 295-301.
- FISKE T. G., Silverstein L. D., Colegrove J., Yuan H. 2000. H-PDLC color separation device for image capture systems. Blackwell Publishing Ltd. *SID Symposium Digest of Technical Papers* 31 (1): 1134-1137.
- FUH A. Y. G., Lin T. H. 2004. Electrically switchable spatial filter based on polymer-dispersed liquid crystal film. *J. Appl. Phys.* 96 (10): 5402-5404.
- KUN G., Zheng, J., Wang, K., Li, D., Zhuang, S. 2015. FDTD Modelling of Silver Nanoparticles Embedded in Phase Separation Interface of H-PDLC, Hindawi Publishing Corporation *Journal of Nanomaterials*: 298913.
- MOON, K. R., Bae, S. Y., Kim B. K. 2015. Electro-optical properties of low viscosity driven holographic polymer dispersed liquid crystals. *Optical Materials* 42: 160-166.
- MAOZHOU C., Haitao D, Dongshuo W, Yue Yang, D. L., Xiaodong Z., Changlong L. 2018. Thermally and optically tunable lasing properties from dye-doped holographic polymer dispersed liquid crystal in capillaries. *Journal of Applied Physics* 123: 103105.
- MING S. L., Andy Y. G. F., Shing T. W. 2011. Optical switch of diffractive light from a BCT photonic crystal based on HPDLC doped with azo component. *Optics Letters* 36 (19): 3864-3866.
- ORTÍZ Gutiérrez, M., Ibarra Torres, J. C., Salgado Verduzco, M. A., Pérez Cortés, M., Orozco Muñoz, R. 2016. Caracterización de la gelatina de pescado dicromatada como material fotosensible. *Ciencia Nicolaita* 67: 84 - 95.
- RAMANITRA H., Chanclou P, Dupont L., Vinouze B. 2004. Polymer-dispersed liquid crystal structure for

variable optical attenuator application, *Optical Engineering* 43 (6): 1445–1453.

REN H., Fan Y. H., Wu S. T. 2003. Tunable Fresnel lens using nanoscale polymer-dispersed liquid crystals, *Applied Physics Letters* 83 (8): 1515–1517.

SCHERSCHENER E., Perciante C. D., Dalchiele E. A, Frins E. M., Korn M., Ferrari J. A. 2006. Polymer-dispersed liquid-crystal voltage sensor, *Applied Optics* 45 (15): 3482–3488.

VILLA-MANRÍQUEZ, José Fabián. 2012. Construcción y caracterización de un PDLC. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Licenciatura.



## Estudios de repetibilidad y reproducibilidad de métodos no destructivos en maderas angiospermas

Javier Ramón Sotomayor Castellanos, René Navarrete Padilla

Para citar este artículo: [Sotomayor Castellanos Ramón Javier, Navarrete Padilla René. 2021. Estudios de repetibilidad y reproducibilidad de métodos no destructivos en maderas angiospermas. Ciencia Nicolaita, número 82, 89-104. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi82.533>](#)

---

Ver material suplementario

---

Publicado en línea el 30 de septiembre de 2021

---

Envíe su artículo a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

---

# Estudios de repetibilidad y reproducibilidad de métodos no destructivos en maderas angiospermas

Javier Ramón Sotomayor Castellanos<sup>1\*</sup>, René Navarrete Padilla<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

<sup>2</sup>Universidad de Guanajuato, División de Arquitectura, Arte y Diseño

## HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 23 de octubre de 2020

Aceptado: 13 de marzo de 2021

## RESUMEN

Los estudios de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) de las características mecánicas de la madera pueden garantizar la validez de los datos experimentales empleados en la caracterización y cálculo ingenieril. El objetivo de la investigación fue verificar que un estudio de R&R de la velocidad de onda, determinada con pruebas no destructivas, explica las interacciones entre los instrumentos, operadores y probetas. La primera etapa experimental consistió en el análisis de los resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo y de ultrasonido realizadas en probetas de *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga*. En la segunda etapa se analizaron las variaciones de los resultados de la velocidad de onda. La investigación confirma la conveniencia de los estudios de R&R para la validación de las mediciones de velocidad de onda con los dos métodos citados. La variabilidad de la velocidad de onda es causada principalmente por el instrumento de medición, pero esta es pequeña en comparación con la variabilidad entre las especies analizadas. Las magnitudes de las interacciones son particulares a cada caso de estudio.

**PALABRAS CLAVE:** velocidad de onda, ondas de esfuerzo, ultrasonido, *Fraxinus americana*, *Albizia plurijuga*.

## ABSTRACT

The repeatability and reproducibility (R&R) studies of the mechanical characteristics of wood can guarantee the validity of the experimental data used in the characterization and engineering calculation. The objective of the investigation was to verify that an R&R study of the wave velocity, determined with non-destructive tests, explains the interactions between the instruments, operators and specimens. The first experimental stage consisted of the analysis of the results of the stress wave and ultrasound tests carried out on specimens of *Fraxinus americana* and *Albizia plurijuga*. In the second stage, the variations of the wave velocity results were analyzed. The research confirms the suitability of R&R studies for the validation of wave velocity measurements with the two cited methods. The variability of the wave speed is caused mainly by the measuring instrument, but this is small compared to the variability between the analyzed species. The magnitudes of the interactions are particular to each case study.

**KEYWORDS:** wave velocity, stress waves, ultrasound, *Fraxinus americana*, *Albizia plurijuga*.

## Introducción

Los estudios de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) son los más usados en el análisis de sistemas de medición (Gong *et al.*, 2015, Ha *et al.*, 2017). La repetibilidad se define como la variación en las mediciones obtenidas con un medidor utilizado varias veces por un operador, mientras se mide una característica en una parte. La reproducibilidad se define como la variación en el promedio de las mediciones realizadas por diferentes operadores que usan el mismo indicador al medir una característica en una parte (Wang y Chien, 2010; Saikaew, 2018). En otras palabras, la repetibilidad se refiere a la variación de mediciones repetidas en un mensurando por un operador que usa el mismo dispositivo de medición. Por su parte la reproducibilidad se relaciona con la variación de los promedios de medición entre varios dispositivos de medición, distintos procedimientos y/o diferentes operadores (Mohamed *et al.*, 2018; Mendes *et al.*, 2019). Los principales componentes de los estudios de R&R son muestras al azar de piezas del proceso, las cuales son medidas por operadores escogidos aleatoriamente varias veces con uno o varios dispositivos de medición (Li y Al-Refaie, 2008; Zanobini *et al.*, 2016).

Los estudios de R&R reportados en la literatura están encaminados al control estadístico de la calidad, así como al análisis de la estabilidad de sistemas de medición. Esta técnica tiene múltiples enfoques y amplias aplicaciones (Senvar y First, 2010; Gómez, 2013; Peruchi *et al.*, 2013; González y Falcón, 2015; Tiplica *et al.*, 2015; López *et al.*, 2018). En este sentido, los estudios de R&R se orientan a la evaluación de los sistemas de medición en ambientes industriales donde las características de los productos o piezas por evaluar pueden ser controlables. Las ventajas de los estudios de R&R por el método del análisis de varianza son su flexibilidad para estudiar cual-

quier arreglo o estructura experimental, el uso de varianzas como parámetros de comparación, el manejo de mayor información de los datos experimentales y la identificación de la interacción entre la repetibilidad y la reproducibilidad (González y Falcón, 2015; Botero *et al.*, 2007). De esta manera el análisis de varianza se aplica para detectar estas fuentes de variación.

Para estudiar procesos donde intervienen métodos no destructivos, se trabaja bajo los supuestos de estabilidad temporal de los mensurados y de la solidez entre mediciones. Es decir, las propiedades físicas de los objetos no se ven modificadas por el proceso de medición. En este contexto, la repetibilidad se puede definir como la varianza de las mediciones obtenidas al medir las características de un dispositivo de medición. Por su parte, la reproducibilidad es la varianza del medio de las mediciones obtenidas por diferentes operadores, al medir las mismas características de la misma pieza, con el mismo dispositivo de medición (Senol, 2004; De Mast y Trip, 2005). Así, los estudios de R&R proporcionan criterios para estimar dos componentes independientes de la varianza de medición.

Los estudios de R&R de características mecánicas de la madera, son importantes para garantizar la validez de los datos experimentales empleados en cálculo ingenieril y son valiosos para contrastar los datos de diferentes investigaciones (Shi *et al.*, 2014). Sin embargo, con excepción de Yu *et al.* (2017), no se identificaron trabajos aplicados a la caracterización de maderas por métodos no destructivos. Existe evidencia empírica de variabilidad en las características físicas de la madera entre especies y al interior de una especie (De Oliveira y Sales, 2006). En este contexto, la evaluación de mediciones de velocidades de onda en la madera, aplicando un estudio de R&R, requiere un enfoque diferente, dado que las probetas o piezas de madera a observar son de origen natural y resultado de la

fisiología particular a cada especie y de las condiciones de crecimiento del árbol.

### Pruebas de ondas de esfuerzo y ultrasonido

La velocidad de onda en la madera está documentada con pruebas de ondas de esfuerzo (Lin y Wu, 2013; Yu *et al.*, 2017; Nasir *et al.*, 2019) y de ultrasonido (De Oliveira y Sales, 2006; Del Menezzi *et al.*, 2014; Gonçalves *et al.*, 2014). La literatura acerca de la caracterización mecánica de la madera de especies mexicanas también informa sobre datos obtenidos con estos dos métodos no destructivos (Sotomayor, 2014; Sotomayor, 2015). Empero, no existen antecedentes de estudios de R&R comparando estos métodos y midiendo maderas mexicanas.

Las magnitudes de las velocidades de onda varían entre especies y según el método empleado para su caracterización (Hasegawa *et al.*, 2011; Del Menezzi *et al.*, 2014). De aquí surgen las siguientes interrogaciones: ¿es la variabilidad del instrumento de medición pequeña en comparación con la variabilidad de la especie? y ¿cuánto de la variabilidad de la velocidad de onda medida en una probeta es causada por el aparato y/o por el operador?

Para responder a estas preguntas se plantea la siguiente hipótesis de investigación: el estudio de R&R de las velocidades de onda determinadas con ondas de esfuerzo y con ultrasonido en una misma especie explica las fuentes de variabilidad y las interacciones entre los instrumentos, operadores y probetas. Esta hipótesis está restringida a los resultados experimentales de muestras homogéneas y estadísticamente representativas de las maderas estudiadas, así como a las condiciones particulares de la metodología empleada.

El objetivo de la investigación fue verificar experimentalmente la hipótesis de investigación efectuando estudios de R&R de las velocidades

de onda derivadas de pruebas no destructivas. Para esto se realizaron pruebas de ondas de esfuerzo y de ultrasonido en probetas de madera de *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga* y con las mediciones se realizaron sus análisis estadísticos. El alcance y límite de la investigación es informar sobre la conveniencia de los estudios R&R para la validación de las mediciones de velocidades de onda con los dos métodos citados. Los resultados pretenden contribuir en la aplicación de los estudios R&R en ciencias y tecnología de la madera.

### Materiales y métodos

La estrategia experimental asume dos etapas: la primera es el análisis de los resultados de las velocidades de onda, derivados de pruebas de ondas de esfuerzo y de ultrasonido que se realizaron en dos especies angiospermas: *Fraxinus americana* L. y *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton y Rose. Esta etapa tiene como objetivo validar la homogeneidad y la representatividad de las muestras de las maderas en estudio. La segunda etapa se refiere a los estudios de R&R de las variaciones de los resultados de las velocidades de onda. Su objetivo es construir tablas de repetibilidad y reproducibilidad, así como de su análisis de varianza. Los cálculos y análisis estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphics*<sup>®</sup>, siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez y De la Vara (2009) y Gutiérrez y De la Vara (2013).

Se recolectaron piezas de madera aserrada de *F. americana* y *A. plurijuga* en empresas de transformación de productos forestales en el estado de Michoacán, México. La madera no contenía anomalías estructurales ni defectos de crecimiento y con ella se prepararon 40 probetas con una sección transversal de 0,02 m de ancho, 0,02 m de espesor y de 0,4 m de largo

de acuerdo con la norma ISO 3129: 2012 (International Organization for Standardization, 2012). Las probetas se almacenaron durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C ( $\pm 1$  °C) y una humedad relativa del aire de 65% ( $\pm 5\%$ ), hasta que su peso fue constante y la madera alcanzó su contenido de humedad en equilibrio. El presente estudio forma parte de la línea de investigación de caracterización mecánica de maderas mexicanas, desarrollada en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, Michoacán, México. Por este motivo el material experimental y las velocidades de onda son los reportados por Sotomayor y Ávila (2020a) y Sotomayor y Ávila (2020b).

La densidad de la madera se determinó con la relación peso/volumen de acuerdo con la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014a). El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos de acuerdo con la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014b). Ambos parámetros se determinaron en 40 probetas adicionales obtenidas de los mismos lotes de madera para las pruebas de ondas de esfuerzo y ultrasonido, con dimensiones de 0,02 m  $\times$  0,02 m de sección y 0,06 m de largo. Para que los errores aleatorios propios de estas mediciones no influyan en los resultados, los pesos fueron medidos por operadores capacitados con una balanza digital con precisión de 0,1 g y las dimensiones de las probetas fueron medidas con un calibrador con precisión de 0,00001 m.

Las pruebas de ondas de esfuerzo (Sotomayor *et al.*, 2020) consistieron en suministrar un impacto en la dirección longitudinal en un extremo de la probeta. Con un acelerómetro emisor, posicionado en el aparato *Metriguard*<sup>®</sup> con frecuencia de emisión de 44 kHz y precisión de

0,000001 s (Figura 1a), registrándose el tiempo inicial. En el otro extremo de la probeta, en un segundo acelerador receptor, se registró el tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo. Con este valor, dividido por la distancia entre los acelerómetros, se definió la velocidad de la onda de esfuerzo ( $v_{oe}$ ).

Las pruebas de ultrasonido (Sotomayor, 2020) consistieron en suministrar un impulso ultrasónico en transmisión directa a lo largo de la probeta con el aparato *Sylvatest*<sup>®</sup> con frecuencia de emisión de 22 kHz y precisión de 0,000001 s (Figura 1b). De esta forma se midió el tiempo de transmisión de la onda en la dirección longitudinal. Con la longitud de las probetas y el tiempo de transmisión del ultrasonido, se calculó la velocidad de onda del ultrasonido ( $v_{us}$ ).

## Diseño experimental

La unidad experimental consistió en dos grupos homogéneos de 40 probetas cada uno de maderas de *F. americana* y *A. plurijugata* seleccionadas de manera aleatoria. El instrumento de medición (aparatos de ondas de esfuerzo *versus* ultrasonido) se considera el factor de variación. Los pesos, las dimensiones de las probetas, así como el contenido de humedad de la madera y su densidad, son factores fijos y controlables. Las variables de entrada son las velocidades de onda medidas con ondas de esfuerzo y las variables de salida son las medidas con ultrasonido. Se realizó un experimento de un solo factor de variación (tipo de prueba), el cual consistió en el análisis de las velocidades de onda ( $v_{oe}$  *versus*  $v_{us}$ ) con dos niveles (*F. americana* y *A. plurijugata*).

Para cada par de muestras independientes (ondas de esfuerzo *versus* ultrasonido) se calcularon las medias ( $\mu$ ), las desviaciones estándar ( $\sigma$ ) y los coeficientes de variación ( $CV = \sigma/\mu$ ). Se calcularon los sesgos (S) y apuntamientos (A)

derivados de pruebas de normalidad. El criterio de demarcación para considerar normal la distribución de una muestra fue:  $[-2 < S < +2, -2 < A < +2]$ . Se verificaron las igualdades de varianzas y se practicaron análisis de varianzas. Para todas las pruebas el nivel de confiabilidad fue de 95% ( $\alpha = 0,05$ ). Por lo tanto, el criterio de demarcación fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa para valores  $P_{(\alpha = 0,05)} \leq 0,05$ . Se verificó la hipótesis nula  $H_0: \mu_1 = \mu_2$ , donde:  $H_0$  = Hipótesis nula (el tipo de prueba no influye en el parámetro calculado);  $\mu_1$  = Medias de las velocidades de onda con ondas de esfuerzo;  $\mu_2$  = Medias de las velocidades de onda por ultrasonido. Se calculó el tamaño de la muestra para un error aceptable de 0,05 de acuerdo con Gutiérrez y De la Vara (2009).

## Estudios de repetibilidad y reproducibilidad

Se realizaron dos estudios cruzados incluyendo interacción de operador por probeta (repetibilidad y reproducibilidad), uno para cada especie estudiada (*F. americana* y *A. plurijuga*). Se analizaron datos empíricos de las velocidades de onda medidas con dos instrumentos (medidores de ondas de esfuerzo y de ultrasonido). Con cada instrumento dos operadores realizaron dos mediciones aleatorias en 20 probetas (partes) en la dirección longitudinal (Figuras 1a y 1b). Estas mediciones se analizaron como variables aleatorias e independientes. Se realizaron análisis de varianza ( $\sigma^2$ ) entre los instrumentos y partes. El nivel de confiabilidad fue de 95%. Por lo tanto, el criterio de demarcación fue aceptar que no existe interacción significativa para valores de  $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$ .

Las fuentes de variabilidad que se evaluaron en el estudio de R&R se definieron de acuerdo con Gutiérrez y De la Vara (2013):

$\sigma^2_{\text{probetas}}$  = Variabilidad atribuible a las probetas

$\sigma^2_{\text{instrumentos}}$  = Variabilidad de los instrumentos de medición

$\sigma^2_{\text{operadores}}$  = Variabilidad de los operadores

$\sigma^2_{\text{operadores} \times \text{probetas}}$  = Variabilidad por la interacción entre operadores y probetas

De tal forma que la variabilidad total observada fue:

$\sigma^2_{\text{total}} = \sigma^2_{\text{probetas}} + \sigma^2_{\text{operadores}} + \sigma^2_{\text{operadores} \times \text{probetas}} + \sigma^2_{\text{instrumentos}}$	(1)
--	-----

Considerando que:

$\sigma^2_{\text{repetibilidad}} = \sigma^2_{\text{instrumentos}}$	(2)
--	-----

$\sigma^2_{\text{reproducibilidad}} = \sigma^2_{\text{operadores}} + \sigma^2_{\text{operadores} \times \text{probetas}}$	(3)
---	-----

La variabilidad R&R se definió como:

$\sigma^2_{\text{R\&R}} = \sigma^2_{\text{repetibilidad}} + \sigma^2_{\text{reproducibilidad}}$	(4)
---	-----

De los datos del estudio de R&R se calcularon las sumas de cuadrados (SC) correspondientes a cada componente de variación dado en la ecuación (1), mismas que cumplen la relación:

$SC_{\text{total}} = SC_{\text{probetas}} + SC_{\text{operadores}} + SC_{\text{operadores} \times \text{probetas}} + SC_{\text{instrumentos}}$	(5)
--	-----

La suma de cuadrados  $SC_{\text{instrumentos}}$  corresponde a la suma de cuadrados del error  $SC_{\text{error}}$ .

Al dividir cada suma de cuadrados por sus grados de libertad se obtuvieron los cuadrados medios (CM). Con estos parámetros se construyeron pruebas estadísticas para verificar diferencias entre las partes, entre los operadores y el efecto de interacción operadores  $\times$  probetas. Si se definen p = probetas, o = operadores y t = pruebas, los grados de libertad correspondientes a cada suma de cuadrados de la ecuación (5) fueron, respectivamente:

$GL_{probetas} = (p - 1)$	(6)
$GL_{operadores} = (o - 1)$	(7)
$GL_{operadores \times probetas} = [(o - 1) \times (p - 1)]$	(8)
$GL_{instrumentos} = [p \times o \times (t - 1)]$	(9)
$GL_{total} = (p - 1) + (o - 1) + [(o - 1) \times (p - 1)] + [p \times o \times (t - 1)]$	(10)

Además de los valores esperados de los cuadrados medios, se dedujo que los estimadores de los componentes de varianza para cada caso estuvieron dados por:

$\sigma^2_{instrumentos} = CM_{error}$	(11)
$\sigma^2_{probetas} = \frac{CM_{probetas} - CM_{operadores \times probetas}}{t \times o}$	(12)
$\sigma^2_{operadores} = \frac{CM_{operadores} - CM_{operadores \times probetas}}{t \times p}$	(13)
$\sigma^2_{operadores \times partes} = \frac{CM_{operadores \times probetas} - CM_{error}}{t}$	(14)

De esta manera se obtuvo la repetibilidad, la reproducibilidad y el error de medición, los cuales, para su interpretación, se expresan como porcentajes de la variación total.

### Resultados y discusión

El contenido de humedad para *F. americana* fue de 10% (CV = 6%) y para *A. pluriyuga* de 12% (CV = 5%). La densidad de la madera fue para *F. americana* de 654 kg m<sup>-3</sup> (CV = 6%) y para *A. pluriyuga* fue de 830 kg m<sup>-3</sup> (CV = 3%). Estos resultados coinciden con los reportados por Sotomayor y Ávila (2020a) y Sotomayor y Ávila (2020b) para ambas especies.

### Pruebas de ondas de esfuerzo y de ultrasonido

La **Tabla 1** presenta los resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo y ultrasonido. Las velocidades de onda del ultrasonido de *F. americana* son en promedio 13% mayores que las correspondientes a las de ondas de esfuerzo. Las correspondientes para *A. pluriyuga* son también 17% mayores que las medidas por ondas de esfuerzo. Para *F. americana*, sus coeficientes de variación de ondas de esfuerzo y ultrasonido son en promedio 4,75%. Para *A. pluriyuga* son mayores y en promedio 7,98%.

Para ambas especies, las pruebas de normalidad indican que las muestras están uniformemente repartidas. Asimismo, las varianzas verificaron su igualdad. Finalmente, los análisis de varianza indican diferencias estadísticamente significativas entre las velocidades de onda según el instrumento de medición. Empero, las velocidades de onda son grupos homogéneos al interior de cada especie según el tipo de instrumento de medición. Para cada grupo que se midió, el tamaño de muestra calculado es menor y suficiente respecto al número de pruebas medidas. Las **Figuras 2 y 3** presentan la convergencia del tamaño de la muestra (número de probetas necesarias) en función del error aceptable para *F. americana* y *A. pluriyuga* respectivamente (**Tabla 1**). Los estudios de R&R de un sistema de medición (cruzados), igual que otros procedimientos de análisis de sistemas de medición, son experimentos diseñados. Para que los resultados sean válidos, la aleatorización y el muestreo representativo son esenciales.

Estos resultados verifican la homogeneidad de las muestras, la diferenciación de las velocidades de onda medidas con ondas de esfuerzo, especificadas como variables de entrada y las medidas con ultrasonido catalogadas como variables de salida, de tal forma que se pueden analizar como

**Tabla 1.** Resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo y ultrasonido

Instrumento de medición	Ondas de esfuerzo		Ultrasonido	
Parámetro	$v_{oe}$	$v_{oe}$	$v_{us}$	$v_{us}$
Unidades	(m s <sup>-1</sup> )	(m s <sup>-1</sup> )	(m s <sup>-1</sup> )	(m s <sup>-1</sup> )
Operador	1	2	1	2
Especie	<i>Fraxinus americana</i>			
Media	4008	4025	4498	4601
Desviación estándar	183	197	205	231
Coefficiente de Variación	5	5	5	5
Mínimo	3704	3636	4124	4167
Máximo	4396	4396	4878	5000
Sesgo	0,425	-0,204	-0,149	0,187
Apuntamiento	-0,089	0,400	-0,777	-0,458
Tamaño de la muestra	3	4	3	4
	Valor $P_{(\alpha = 0,05)}$			
Verificación de varianza	0,672*			
Análisis de varianza	< 0,001#			
Grupos homogéneos	X	X		
Grupos homogéneos			X	X
Especie	<i>Albizia plurijuga</i>			
Media	4071	4040	4775	4689
Desviación estándar	277	259	440	444
Coefficiente de Variación	7	6	9	10
Mínimo	3604	3509	4000	4211
Máximo	4545	4444	5556	5479
Sesgo	-0,026	-0,095	0,184	0,599
Apuntamiento	-1,279	-0,930	-0,447	-0,814
Tamaño de la muestra	7	10	15	18
	Valor $P_{(\alpha = 0,05)}$			
Verificación de varianza	0,115*			
Análisis de varianza	< 0,001#			
Grupos homogéneos	X	X		
Grupos homogéneos			X	X

$v$  = Velocidad de onda;  $oe$  = Ondas de esfuerzo;  $us$  = Ultrasonido; Coeficiente de variación en porcentaje; \* $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$  = No existe diferencia significativa; # $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$  = Sí existe diferencia significativa; Filas compartiendo X son grupos homogéneos; Tamaño de la muestra para un error de 0,05%. Fuente: elaboración propia.

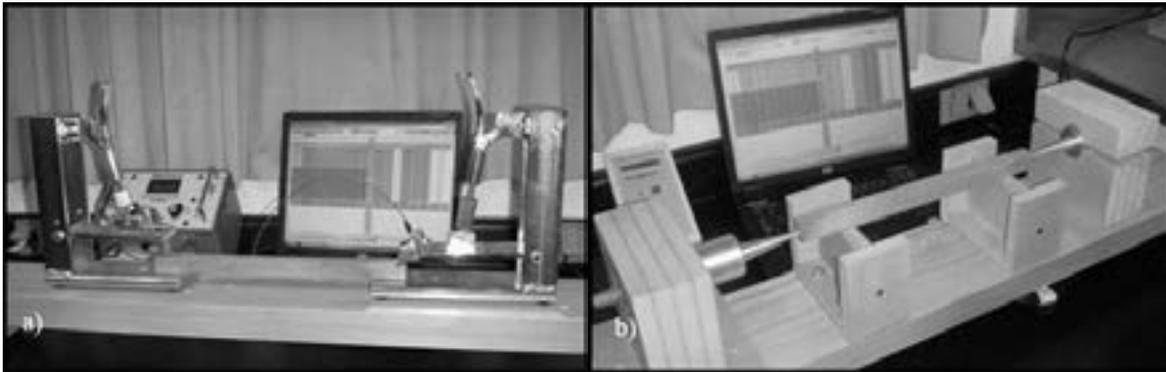


FIGURA 1. Pruebas de: a) ondas de esfuerzo; b) ultrasonido (Sotomayor *et al.*, 2011).

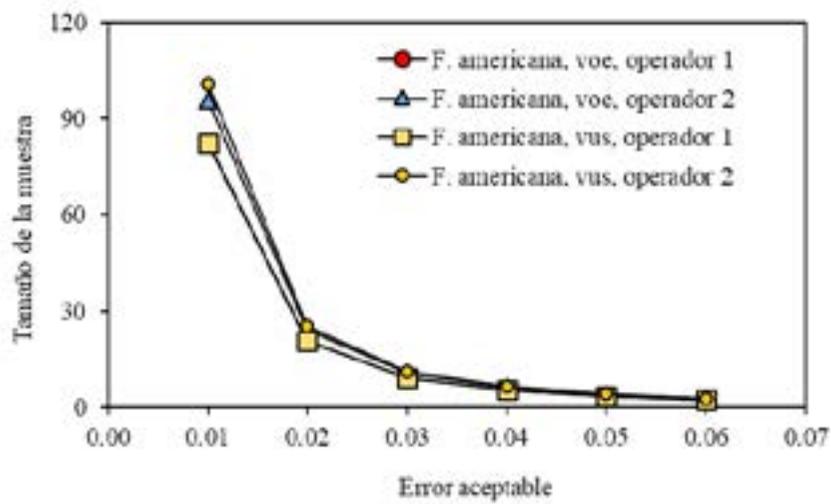


FIGURA 2. Tamaño de la muestra en función del error aceptable de *F. americana*.

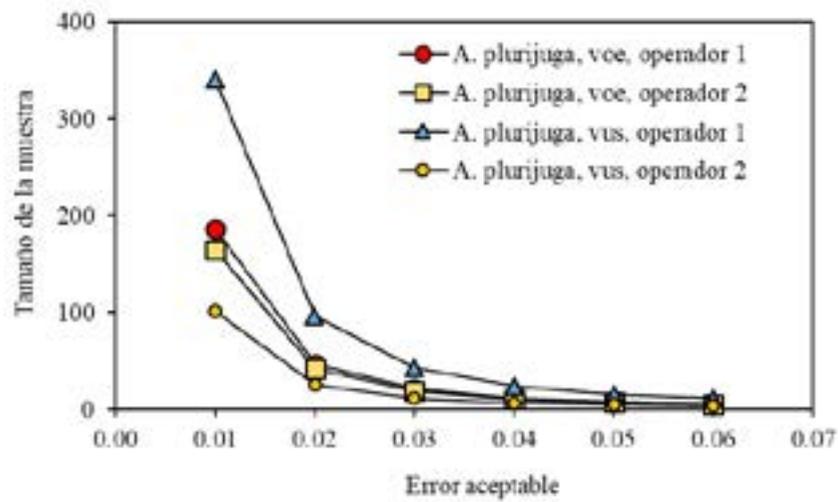


FIGURA 3. Tamaño de la muestra en función del error aceptable de *A. pluriyuga*.

variables aleatorias e independientes en los estudios de R&R. El alcance de este enfoque es limitado para cuantificar la exactitud de las mediciones. Esto sucede por el hecho de que no se puede determinar un valor medio para la velocidad de onda de una especie de madera y por consiguiente es difícil cuantificar la diferencia entre un valor experimental promedio y un valor de referencia. Caso particular son los valores de las características mecánicas tabuladas en los códigos y reglamentos de construcción con madera. En cambio, el coeficiente de variación puede ser un indicador de la precisión del sistema de medición cuando la misma probeta se mide repetidamente con el mismo instrumento. Además, la repetibilidad y reproducibilidad son componentes de un mismo sistema de medición.

En la investigación, la estrategia experimental se orientó hacia el análisis de resultados especie por especie. De acuerdo con el paradigma contemporáneo que rige en investigación e ingeniería de la madera, es necesario caracterizar el comportamiento mecánico de ésta con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular. Cada procedimiento debe estar referido a las variables de referencia de las condiciones de ensayo, por ejemplo, la densidad y el contenido de humedad de la madera y con datos derivados de la observación de un tamaño de muestra estadísticamente representativo. Una vez que se tienen las observaciones integrantes y la estadística, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar (Sotomayor y Correa, 2016).

### Estudios de repetibilidad y reproducibilidad

La [Tabla 2](#) presenta los resultados de los estudios de R&R y la [Tabla 3](#) presenta los resulta-

dos del análisis de varianza. Los resultados se presentan de manera independiente para cada una de las dos especies. Así, se consideran dos casos diferentes de estudio, pero con mediciones equivalentes para su comparación. Las tablas se construyeron utilizando las ecuaciones (1) a (14).

El estudio de R&R de *F. americana* indica que el 81% de la varianza se debe a la reproducibilidad que corresponde a diferencias entre operadores y probetas, en tanto que 16% se debe a la repetibilidad que corresponde a los instrumentos ([Tabla 2](#)) y el 3% corresponde a la fuente de variación R&R. Para esta misma especie, los resultados presentan la misma tendencia. Los datos de la [Tabla 3](#) indican que, entre instrumentos, sí existe contribución significativa al error de medición dado que su valor es  $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$ . En cambio, las probetas y la interacción de instrumentos y probetas no contribuyen de manera significativa al error de medición dado su valor  $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$ . Aquí la fuente residual corresponde a la repetibilidad.

Para *A. plurijuga*, el estudio de R&R indica que el 44% de la varianza total se debe a la reproducibilidad que corresponde a diferencias entre los instrumentos, en tanto que 56% se debe a la repetibilidad que corresponde a operadores y probetas ([Tabla 2](#)). Como consecuencia, en este caso el factor R&R es nulo. Para esta misma especie, la [Tabla 3](#) indica que sí existe interacción significativa entre instrumentos y para las probetas ( $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$ ). En cambio para la combinación de instrumentos y probetas no existe interacciones significativas ( $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$ ). De manera análoga al estudio R&R de *F. americana*, la fuente residual corresponde a la repetibilidad.

La repetibilidad representa la variación causada por los instrumentos de medición. En esta investigación se trata de la medición de probetas de una misma especie (*F. americana* y solamente esta especie, o en su caso, las probetas de *A. plu-*

**Tabla 2.** Resultados de los estudios de repetibilidad y reproducibilidad

Fuente de variabilidad	Velocidad de onda en <i>F. americana</i>				
	$\sigma$	% <sub>var</sub>	$\sigma^2$	% <sub>con</sub>	%R&R
Repetibilidad	164	38	26987	15	16
Reproducibilidad	376	88	141070	77	81
Interacción	72	17	5202	3	3
R&R	416	97	173258	94	100
Probetas	102	24	10382	6	
Variación total	429	100	183640		
Fuente de variabilidad	Velocidad de onda en <i>A. plurijuga</i>				
	$\sigma$	% <sub>var</sub>	$\sigma^2$	% <sub>con</sub>	%R&R
Repetibilidad	422	64	178258	40	44
Reproducibilidad	478	72	228514	52	56
Interacción	0	0	0	0	0
R&R	638	96	406771	92	100
Probetas	184	28	33951	8	
Variación total	664	100	440723		

Dos operadores por instrumento efectuando dos mediciones en 20 partes (probetas).  $\sigma$  = Desviación estándar; %<sub>var</sub> = Porcentaje variación total;  $\sigma^2$  = Varianza; %<sub>con</sub> = Porcentaje de contribución; %R&R = Contribución a la repetibilidad y reproducibilidad. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 3.** Resultados del análisis de varianza de los estudios de repetibilidad y reproducibilidad

Fuente de variabilidad	Velocidad de onda en <i>F. americana</i>				
	SC	GL	CM	Razón F	Valor P
Instrumentos (2)	5680180	1	5680180	152	<0.0001#
Probetas (20)	1499470	19	78919	2	0.0560*
Instrumentos × probetas	710401	19	37390	1	0.1890*
Error residual	1079460	40	26987		
Total	8969510	79			
Fuente de variabilidad	Velocidad de onda en <i>A. plurijuga</i>				
	SC	GL	CM	Razón F	Valor P
Instrumentos (2)	9154400	1	9154400	661	<0.0001#
Probetas (20)	2843590	19	149663	11	<0.0001#
Instrumentos × probetas	263284	19	13857	0	1.0000*
Error residual	7130320	40	178258		
Total	19391600	79			

Dos operadores por instrumento efectuando dos mediciones en 20 partes (probetas). SC = Suma de cuadrados; GL = Grados de libertad; CM = Cuadrado medio; \* $P_{(\alpha=0,05)} > 0,05$  = No existe interacción significativa; # $P_{(\alpha=0,05)} < 0,05$  = Sí existe interacción significativa. Fuente: elaboración propia.

*rijuga* y solamente de esta especie) con un instrumento de medición (*Metriguard*<sup>®</sup> y solamente este aparato; o comparativamente, *Sylvatest*<sup>®</sup> y solamente este aparato). Por su parte, la repetitividad para *F. americana* contribuye a la variabilidad total un 15% y para *A. plurijuga* un 40%.

No obstante que las mediciones de las velocidades de onda son precisas con coeficientes de variación máximos de 10%, se observan diferencias entre especies. Una causa que provoca la variabilidad de la velocidad de onda en la madera son las diferentes configuraciones de las pruebas con que se miden (Bachtiar *et al.*, 2017). Si bien los parámetros medidos son teóricamente equivalentes, no lo son sus solicitaciones. Una interpretación de estos resultados implica considerar que cada uno de los dos instrumentos mide el tiempo de transmisión de la onda en la dirección longitudinal de la probeta con diferentes tipos de solicitaciones. Las ondas de esfuerzo provocan la vibración de la masa de una sección transversal al sentido de la fuerza que origina el movimiento. En cambio, las ondas de ultrasonido viajan en paquete a través de la estructura material de la madera.

La reproducibilidad representa la variación causada por los operadores, más la combinación de operadores y probetas. En esta investigación se trata de mediciones en la misma especie (*F. americana* o *A. plurijuga*) pero con diferentes instrumentos (*Metriguard*<sup>®</sup> y *Sylvatest*<sup>®</sup> a la vez). La reproductibilidad contribuye a la variabilidad total para *F. americana* 77% y para *A. plurijuga* 52%. Este resultado es mayor a la contribución adjudicada a los instrumentos (repetitibilidad). En efecto, los resultados sugieren que la variabilidad es específica a cada especie y, de esta manera, se distinguen sus características mecánicas para fines de diseño y cálculo ingenieril.

La interacción representa la variación causada por la combinación de operadores y pro-

betas. Para *F. americana*, la contribución de la interacción es de 3%. En cambio, para *A. plurijuga* el porcentaje de contribución a la variabilidad total es nulo (Tabla 2). Este resultado sugiere que los operadores midieron las probetas con precisión y exactitud. Particularmente en el caso de las velocidades de onda en la madera de *A. plurijuga*.

La contribución a la variabilidad total de R&R de *F. americana* es 94% y para *A. plurijuga* es 92% (Tabla 2). De acuerdo con Woodall y Borrór (2008) y Yeh y Sun (2013), en los estudios de R&R enfocados al análisis de sistemas de medición, los valores superiores al 30% generalmente se consideran inaceptables y se recomienda hacer todo lo posible para mejorar el sistema de medición. Este criterio va más allá de los alcances de esta investigación. Empero, los resultados del diseño experimental en lo concerniente a las velocidades de onda indican normalidad de las distribuciones y suficiencia en el tamaño de las muestras estudiadas (Tabla 1). Asimismo, la verificación de varianzas indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las desviaciones estándar (con un nivel del 95% de confianza), mientras que el análisis de varianza distingue entre muestras de acuerdo con el instrumento de medición (*Metriguard*<sup>®</sup> versus *Sylvatest*<sup>®</sup>).

La contribución a la variabilidad total adjudicada a las probetas para *F. americana* es de 6% y para *A. plurijuga* de 8% (Tabla 2). Estos resultados pueden compararse con los coeficientes de variación (Tabla 1) de ondas de esfuerzo y ultrasonido: para *F. americana* son en promedio de 5% y para *A. plurijuga* son en promedio de 8%, magnitudes prácticamente equivalentes. En el mismo contexto, los valores promedio de las velocidades de onda de ultrasonido para *F. americana* son 13% mayores con respecto a las de ultrasonido y para *A. plurijuga* este cálculo es de 17%. Estas diferencias, según la técnica em-

pleada, han sido observadas en otras especies y con los métodos aquí utilizados por Sotomayor (2014) y Sotomayor (2015). Estos resultados resaltan las ventajas de los estudios de R&R respecto al análisis tradicional que presenta la literatura en ciencias y tecnología de la madera. Mientras que la Tabla 1 provee únicamente los coeficientes de variación como medida para estimar la precisión de las mediciones, los datos de las Tablas 2 y 3 indican la variabilidad de los instrumentos, operadores y probetas, así como su interacción, que en este caso coincide con el promedio de los coeficientes de variación de cada muestra.

En síntesis, los resultados pueden explicarse por la variabilidad natural en la magnitud de las características físicas que existe entre especies y al interior de una especie (Perré *et al.*, 2016), por la heterogeneidad anatómica de las maderas (Schubert *et al.*, 2009), por la anisotropía material (Brémaud *et al.*, 2011) y por la higroscopicidad del tejido leñoso (Mvondo *et al.*, 2017). La diversidad en las propiedades mecánicas de la madera también depende de factores genéticos y ambientales y se encuentra en todos los niveles tanto entre especies gimnospermas y angiospermas, como entre árboles de climas tropicales y templados, entre poblaciones de una especie determinada, entre árboles de una población y finalmente, entre ubicaciones de muestreo dentro de un solo árbol (Zhang *et al.* 2011). Sin embargo, el diseño experimental y los estudios de R&R mostraron de manera explícita los diferentes componentes de la variabilidad total en las magnitudes de las velocidades de onda para *F. americana* y *A. pluriyuga*.

## Conclusiones

Los estudios de R&R de las velocidades de onda determinadas en maderas de *F. americana* y *A. pluriyuga*, con instrumentos de ondas de esfuerzo y de ultrasonido, permiten cuantificar las

fuentes de variabilidad entre los instrumentos, los operadores y las probetas. La investigación informa sobre la conveniencia de los estudios de R&R para la validación de las mediciones de velocidades de onda con los dos métodos citados. La contribución a la variabilidad entre los dos instrumentos de medición es pequeña en comparación con la variabilidad entre las especies *F. americana* y *A. pluriyuga*.

La variabilidad en la velocidad de onda medida en una probeta es causada principalmente por el instrumento de medición. Las magnitudes de las interacciones son particulares a cada caso de estudio. Los resultados están restringidos por la experimentación de muestras homogéneas y estadísticamente representativas de las maderas estudiadas y son válidos para las condiciones particulares de la metodología empleada.

## Agradecimientos

La investigación estuvo patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) en Morelia, Michoacán, México. Se agradece la participación en las mediciones de laboratorio a los alumnos de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la UMSNH.

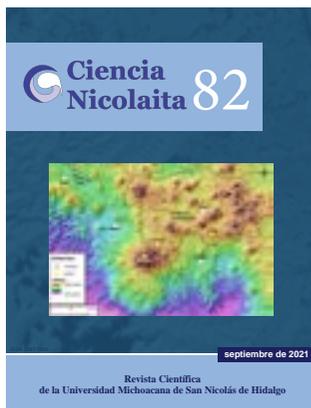
## Referencias

- BACHTIAR, E. V., Sanabria, S. J., Mittig, J. P., y Nimes, P. 2017. Moisture-dependent elastic characteristics of walnut and cherry wood by means of mechanical and ultrasonic test incorporating three different ultrasound data evaluation techniques. *Wood Science and Technology*, 51 (1): 47-67.
- BOTERO, M., Arbeláez, O., y Mendoza, J. A. 2007. Método ANOVA utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición. *Scientia et Technica*, 13 (37): 533-537.

- BRÉMAUD, I., Gril, J., y Thibaut, B. (2011). Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*, 45 (4): 735-754.
- DE Mast, J., y Trip, A. 2005. Gauge R&R Studies for Destructive Measurements. *Journal of Quality Technology*, 37(1): 40-49.
- DE Oliveira, F. G. R., y Sales, A. 2006. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical Woods. *Bioresource Technology*, 97 (18): 2443-2446.
- DEL Menezzi, C. H. S., Amorim, M. R. S., Costa, M. A., y Garcez, L. R. O. 2014. Evaluation of Thermally Modified Wood by Means of Stress Wave and Ultrasound Nondestructive Methods. *Materials Science (Medziagotyra)*, 20 (1): 61-66.
- GÓMEZ, R. A. 2013. Modelo estadístico de medición R&R en el pesaje de productos de la preparación de pedidos en un centro de distribución. *Revista Soluciones de Postgrado EIA*, 5 (10): 45-64.
- GONÇALVES, R. A., Trinca, J., y Pellis, B. P. 2014. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. *Wood Science and Technology*, 48 (2): 269-287.
- GONG, L., Burdick, R. K., y Quiroz, J. 2015. Confidence Intervals for Unbalanced Two-factor Gauge R&R Studies. *Quality and Reliability Engineering International*, 21: 727-741.
- GONZÁLEZ, G. y Falcón, C. F. 2015. Procedimiento para el análisis de repetibilidad y reproducibilidad en procesos de manufactura. *Revista Cubana de Ingeniería*, 6 (3): 53-59.
- GUTIÉRREZ, H., y De la Vara, R. 2009. Análisis y diseño de experimentos. México: McGraw-Hill.
- GUTIÉRREZ, H., y De la Vara, R. 2013. Control estadístico de la calidad y Seis Sigma. México: Mc Graw Hill.
- HA, C., Kim, D. S., y Park, S. 2017. Assessment of the Adequacy of Gauge Repeatability and Reproducibility Study Using a Monte Carlo Simulation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017 (7237486): 1-15.
- HASEGAWA, M., Takata, M., Matsumura, J., y Oda, K. 2011. Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood. *Ultrasonics*, 51 (3): 296-302.
- INTERNATIONAL Organization for Standardization. 2012. ISO 3129:2012. Wood. Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens. Geneva: International Organization for Standardization.
- INTERNATIONAL Organization for Standardization. 2014a. ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. Geneva: International Organization for Standardization.
- INTERNATIONAL Organization for Standardization. 2014b. ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical. Geneva: International Organization for Standardization.
- LI, M. C., y Al-Refai, A. 2008. Improving Wooden Parts' Quality by Adopting DMAIC Procedure. *Quality and Reliability Engineering International*, 24: 351-360.
- LIN, W. y Wu, J. 2013. Nondestructive Testing of Wood Defects based on Stress Wave Technology. *Telkomnika*, 11 (11): 6802-6807.
- LÓPEZ, G., Mazaira, Z., Hernández, I. A., y Cabrera, H. R. 2018. Análisis de la calidad de las mediciones en el proceso de laboratorio. *Revista Espacios*, 39 (6): 1-18.
- MOHAMED, O. A., Masood, S. H., y Bhowmik, J. L. 2018. Investigation of dimensional variation in parts manufactured by fused deposition modeling using Gauge Repeatability and Reproducibility. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 310: 012090.
- MENDES, L. M., Gomes, R., Santana, R., Rotela, P., y De Freitas, J. H. 2019. New indicators for measurement error detection in GR&R studies. *Measurement*, 140: 557-564.
- MVONDO, R. R. N., Meukam, P., Jeong, J., Meneses, D. D., y Nkeng, E.G. 2017. Influence of water content on the mechanical and chemical properties of tropical wood species. *Results in Physics*, 7: 2096-2103.
- NASIR, V., Nourian, S., Avramidis, S., y Cool, J. 2019. Stress wave evaluation by accelerometer and acoustic emission sensor for thermally modified wood classification using three types of neural networks. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77 (1): 45-55.
- PERRÉ, P., Almeida, G., Ayouz, M., y Frank, X. 2016. New modelling approaches to predict wood properties from its cellular structure: image-based representation and meshless methods. *Annals of Forest Science*, 73 (1): 147-162.
- PERRUCCI, R. S., Balestrassi, P. P., De Paiva, A. P., Ferreira, J. R., y Carmelossi, M. S. 2013. A new multivariate gage R&R method for correlated characteristics. *International Journal of Production Economics*, 144 (1): 301-315.
- SAIKAEW, C. 2018. An implementation of measurement system analysis for assessment of machine and part

- variations in turning operation. *Measurement*, 118: 246-252.
- SCHUBERT, S., Gsell, D., Dual, J., Motavalli, M., y Niemz, P. 2009. Acoustic wood tomography on trees and the challenge of wood heterogeneity. *Holzfor-schung*, 63 (1): 107-112.
- SENL, S. 2004. Measurement system analysis using designed experiments with minimum  $\alpha$ - $\beta$  risks and n. *Measurement*, 36: 131-141.
- SENVAR, O. y FIRST, S. U. K. 2010. An overview of capability evaluation of Measurement Systems and Gauge Repeatability and Reproducibility Studies. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 1 (2): 121-127.
- SHI, L., Chen, W., y Lu, L. F. 2014. An Approach for Simple Linear Profile Gauge R&R Studies. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014(816980): 1-7.
- SOTOMAYOR, J. R. 2014. Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- SOTOMAYOR, J. R. 2015. Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- SOTOMAYOR, J. R. 2020. Efecto del preservado de la madera con boro sobre el módulo dinámico. Evaluación por medio de ultrasonido. *Científica*, 24 (1): 67-76.
- SOTOMAYOR, J. R., y Ávila, L. E. A. 2020a. Efecto de la impregnación con boro sobre las densidades y módulos dinámicos de tres maderas angiospermas. *Revista Ingeniería al Día*, en prensa.
- SOTOMAYOR, J. R., y Ávila, L. E. A. 2020b. Impregnación con sales de boro de la madera de *Spathodea campanulata* P. Beauv, *Fraxinus americana* L. y *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton y Rose. Evaluación con ultrasonido de la velocidad de onda y del módulo dinámico. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 8 (45): 40-50.
- SOTOMAYOR, J. R. y Correa, S. 2016. Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico. *Revista Científica*, 24 (1): 1-19.
- SOTOMAYOR, J. R., Adachi, K., Iida, R., y Hayashi, T. 2020. Aumento del módulo dinámico en madera densificada. Evaluación con ondas de esfuerzo en ocho especies. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 24 (1): 7-20.
- SOTOMAYOR, J. R., García, L. J., Hernández, S. A., Moya, C. E., y Olguín, J. B. 2011. Dispositivo de usos múltiples para pruebas no destructivas en madera y materiales compuestos de madera. *Ultrasonido, Ondas de esfuerzo y Vibraciones transversales. Investigación e Ingeniería de la Madera*, 7 (3): 20-33.
- TÍPLICA, T., Verron, S., Grémy-Gros, C., Vandewalle, P., y Mehinagic, E. 2015. On the quality of acoustical measures when evaluating fruits quality. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 6 (201): 1-8.
- WANG, F. K. y Chien, T. W. 2010. Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study. *Computers y Industrial Engineering*, 58: 143-150.
- WOODALL, W. H. y Borror, C. M. 2008. Some Relationships between Gage R&R Criteria. *Quality and Reliability Engineering International*, 24: 99-106.
- YEH, T., y Sun, J. 2013. Using the Monte Carlo Simulation Methods in Gauge Repeatability and Reproducibility of Measurement System Analysis. *Journal of Applied Research and Technology*, 11 (5): 780-796.
- YU, Y., Liu, Y., Gong, M., Xu, Z., y Fang, Y. 2017. R&R study of using a stress wave timer to measure the elastic modulus of structural dimension lumber. *Measurement*, 95: 293-296.
- ZANOBINI, A., Sereni, B., Catelani, M., y Ciani, L. 2016. Repeatability and Reproducibility techniques for the analysis of measurement systems. *Measurement*, 86: 125-132.
- ZHANG, T., Bai, S. L., Bardet, S., Alméras, T., Thibaut, B., y Beauchêne, J. 2011. Radial variations of vibrational properties of three tropical woods. *Journal of Wood Science*, 57 (5): 377-386.





## Transformadores de Potencia con Doble Núcleo: Análisis de respuesta a la frecuencia

Carlos Pérez Rojas, Sigridt García Martínez

Para citar este artículo: [Pérez Rojas Carlos, García Martínez Sigridt. 2021. Transformadores de Potencia con Doble Núcleo: Análisis de respuesta a la frecuencia. Ciencia Nicolaita, número 82, 105-118. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi82.543>](#)

---

Ver material suplementario

---

Publicado en línea el 30 de septiembre de 2021

---

Envíe su artículo a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

---

# Transformadores de Potencia con Doble Núcleo: Análisis de respuesta a la frecuencia

Carlos Pérez Rojas<sup>1\*</sup>, Sigridt García Martínez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Eléctrica

## HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 11 de enero de 2021

Aceptado: 22 de febrero de 2021

## RESUMEN

El Análisis de Respuesta a la Frecuencia (FRA, Frequency Response Analysis), es una excelente herramienta en el diagnóstico y detección de fallas internas en el transformador, como lo son: el desplazamiento y deformación de devanados, debidos a fuerzas electromagnéticas como resultado de corrientes de falla, aflojamiento de los soportes de los devanados a consecuencia de descargas eléctricas o transporte del transformador. Este tipo de fallas están involucradas básicamente con el cambio en la geometría del transformador en su conjunto, factor que altera los parámetros RLC (Resistor, Inductor, Capacitor), que representan al transformador y por ende sus puntos de resonancia. En la literatura se tiene el estándar del comportamiento de los transformadores trifásicos con núcleo de tres piernas. En este trabajo se realiza el análisis de las pruebas que se obtienen en un transformador de doble núcleo de los que se utilizan en los hornos de arco, cuya característica principal es que alimentan altas corrientes sobre un amplio rango de voltajes.

**PALABRAS CLAVE:** Barrido en la frecuencia, transformadores de horno de arco, fallas internas.

## ABSTRACT

The Frequency Response Analysis (FRA), is an excellent tool for the diagnosis and detection of internal faults in a transformer, such as: a displacement and winding deformation due to electromagnetic forces as a result of fault currents, the loosening of winding supports as a consequence of electric shocks or when the transformer is transported. These type of faults are mainly involved with the change in the geometry of the transformer as a whole, a factor that alters the RLC (Resistor, Inductor, Capacitor), parameters which represent the transformer, and therefore, its resonance points. The standard behavior of the three-phase three limbs transformer can be found in the literature. In this work, an analysis of the tests, which were applied in a double core transformer that is commonly used in arc furnaces, was carried out. The main feature of these transformers is that they feed high currents over a wide range of voltages.

**KEYWORDS:** Sweep frequency, Arc furnace transformers, Internal Faults.

## 1. Introducción

La estructura interna de un transformador representa un conjunto de circuitos RLC multicoplados, lo anterior implica que sus diferentes modos serán excitados a valores distintos de frecuencia. Esto permite obtener una representación de la geometría del transformador identificando, mediante su excitación, los distintos modos que responden a diferentes frecuencias. De lo expuesto se deduce que cualquier cambio en la geometría del transformador, provocado por movimientos o deformaciones en los devanados, núcleo o ambos, modificará los modos que a su vez cambiarán sus frecuencias de resonancia originales (Modley, 2006; Nirgude *et al.*, 2004). Esta técnica permite, mediante la excitación de un pequeño voltaje en un rango de frecuencias de 20 Hz a 2 MHz, o mayores, excitar las frecuencias de resonancia del transformador, identificando con esto la geometría propia del mismo, por lo que cualquier cambio en su geometría se reflejará como un desplazamiento de los puntos de resonancia o bien en la trayectoria de la respuesta obtenida, permitiendo así detectar fallas internas en el transformador.

Este método, para su análisis, se compone de dos pasos, donde el primero de ellos consiste en contar con la prueba de fábrica del transformador (Coffen *et al.*, 2002), conocida como huella digital del mismo, que permite dar un seguimiento a la condición interna de los devanados y núcleo del transformador mediante su comparación con pruebas posteriores, realizadas éstas de forma periódica o bien posterior al sometimiento del transformador a grandes esfuerzos eléctricos debidos a fallas severas o bien ante desplazamientos del transformador por motivo de una posible reubicación del mismo o movimientos sísmicos de gran relevancia. Lo anterior permitirá detectar variaciones en la respuesta del barrido en la frecuencia para así de-

terminar la posible existencia de fallas internas en el mismo. El segundo paso consiste en que cuando no se cuente con una prueba previa de la respuesta del transformador, se comparan los resultados ya sea con unidades gemelas o bien entre la respuesta obtenida en las diferentes fases del transformador probado, partiendo del hecho de que las fases laterales deben comportarse de manera idéntica entre sí, debido a que las trayectorias magnéticas son simétricas y del conocimiento previo de las respuestas típicas esperadas para las diferentes conexiones de un transformador.

El desarrollo en las pruebas de respuesta a la frecuencia se ha debido principalmente a la experiencia práctica, conocimiento físico del sistema y la interpretación de resultados. De aquí la importancia de resaltar el análisis de un transformador de doble núcleo. Los transformadores de doble núcleo son los usados en los hornos de arco donde se requieren enormes cantidades de corriente para fundir el material. Debido a que estos transformadores son especiales, se considera de gran valor los resultados presentados y posible referencia para trabajos futuros.

La prueba de FRA es no destructiva, basada en el hecho de que cada devanado del transformador tiene una frecuencia característica que es sensitiva al cambio de los parámetros eléctricos del devanado, principalmente su equivalente inductivo y capacitivo. Cualquier movimiento mecánico debido a situaciones internas o externas se verá reflejado en estos parámetros eléctricos lo que conlleva un cambio en la respuesta de la frecuencia característica.

Los transformadores para horno de arco, de acuerdo con Kulkany y Khaparde (2013), son usados en varias industrias, tal como la industria del acero y en otras diferentes donde se requieran altas corrientes difíciles de conseguir con transformadores convencionales. Igualmente se indica el creciente aumento en el uso

de estos transformadores de arco eléctrico, de ahí la importancia del análisis que se presenta en este artículo.

## 2. Transformadores de Doble Núcleo

La aplicación principal de los transformadores de doble núcleo es como transformadores de horno de arco en la producción de acero. Son construidos para hornos de acero, principalmente de arco grande, hornos de cucharón, hornos de arco corto y sumergido. Los transformadores de horno de arco (AFT, Arc Furnace Transformer) operan bajo condiciones dinámicas muy severas con sobrecorrientes y sobrevoltajes, debido a los cortocircuitos generados por el horno. De todos los aparatos que producen arco eléctrico en un sistema de potencia, son los hornos de arco eléctrico los que pueden causar los problemas más severos, porque representan una fuente de armónicos de gran capacidad concentrada en un lugar específico. Los hornos de arco eléctrico (EAF, Electric Arc Furnace) son una de las principales causas del parpadeo de voltaje, mismo que afecta a los consumidores conectados a las mismas líneas, debido a la alta demanda de corriente de las cargas (Knnit.com, 2021).

Los EAF utilizan el efecto térmico de un arco eléctrico para fundir el contenido del horno. En el EAF se tienen tres electrodos conectados a las terminales secundarias del AFT. Por lo tanto, el transformador tiene que ser especialmente diseñado para soportar cortocircuitos en el lado secundario, además, un transformador alimentando un horno de arco tiene que entregar una corriente extraordinariamente alta a voltajes relativamente modestos, digamos entre 200 y 1000 Volts. Sus rangos de potencia varían entre 50 y 100 MVA y son bastante comunes las corrientes en el secundario de más de 50 KA alcanzando en ocasiones los 200 KA.

La reactancia de dispersión necesita ser mantenida tan baja como sea prácticamente posible, tomando en consideración el diseño mecánico de los devanados y los soportes de las estructuras. Los transformadores de horno cuentan con un devanado regulador independiente que es un devanado con derivaciones. La variación del porcentaje de reactancia sobre el rango completo de cambios de derivación depende de la disposición de los devanados.

El proceso de fundición en un horno requiere una potencia inicial muy grande para fundir la carga del horno, la potencia requerida después de esto para el refinamiento del material derretido es menor. El requerimiento de potencia variable a la entrada se logra cambiando el voltaje de alimentación del horno de manera continua sobre un rango amplio mediante el uso de un cambiador de derivación bajo carga (OLTC, on-load tap changer). Su uso es primordial donde no se desea tener interrupciones temporales de suministro en el cambiador de derivación. Debido a que la regulación requerida es muy fina, se requiere de un OLTC con gran número de pasos.

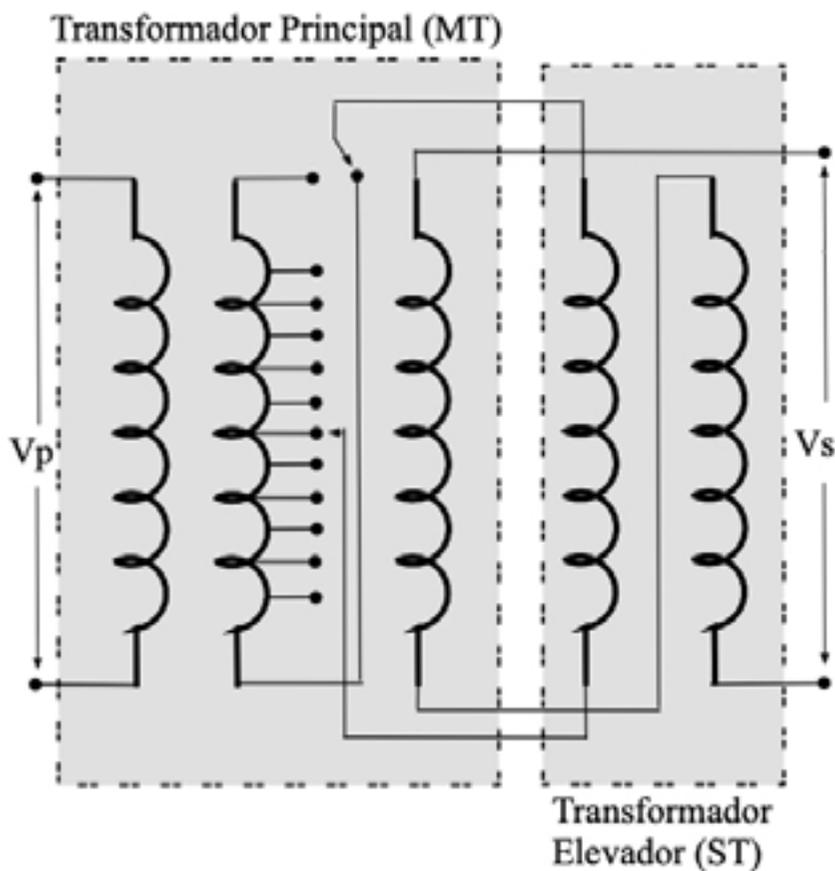
El arreglo más utilizado para aplicaciones de hornos de mediana y alta potencia es el transformador de horno con un arreglo elevador como se muestra en la [Figura 1](#).

El transformador elevador en las salidas aumenta o reduce el voltaje del secundario del transformador principal. El devanado primario del transformador elevador es alimentado del devanado de derivación del transformador principal y el voltaje de alimentación es seleccionado de tal forma que resulte en condiciones de operación menos costosas para el OLTC. Así, el costo del OLTC es muy bajo en este arreglo. También la variación del voltaje del secundario es igual de una derivación a otra a través del rango de regulación. Normalmente, el transformador principal y el transformador elevador son

colocados en el mismo tanque minimizando el tamaño de las conexiones entre los devanados secundarios de ambos transformadores.

La capacidad del transformador elevador es mucho menor que la del transformador principal, siendo suficiente sólo para propósitos de regulación. Además, los diámetros de los núcleos son diferentes, los circuitos magnéticos de los dos transformadores tienen generalmente la misma distancia de centro a centro y la misma altura de ventanas para facilitar las conexiones

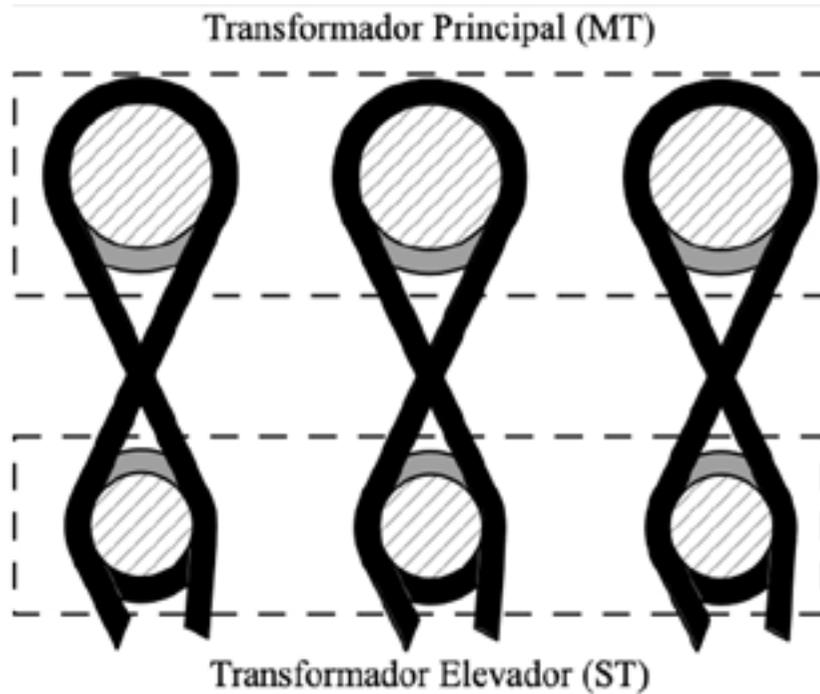
entre sus devanados secundarios. Si se quisiera reducir el material del núcleo, la distancia de centro a centro del transformador elevador puede ser menor, pero las conexiones se vuelven un poco más complicadas. Debido a que las corrientes en los devanados secundarios del transformador principal y del primario del transformador elevador son iguales se utiliza el mismo tipo y tamaño de conductor para ambos devanados.



**FIGURA 1.** Transformador de horno, arreglo elevador

También los dos devanados son a menudo conectados en una figura de ocho, como se muestra en la Figura 2, evitando conexiones extras entre ellos. Se requiere un arreglo especial

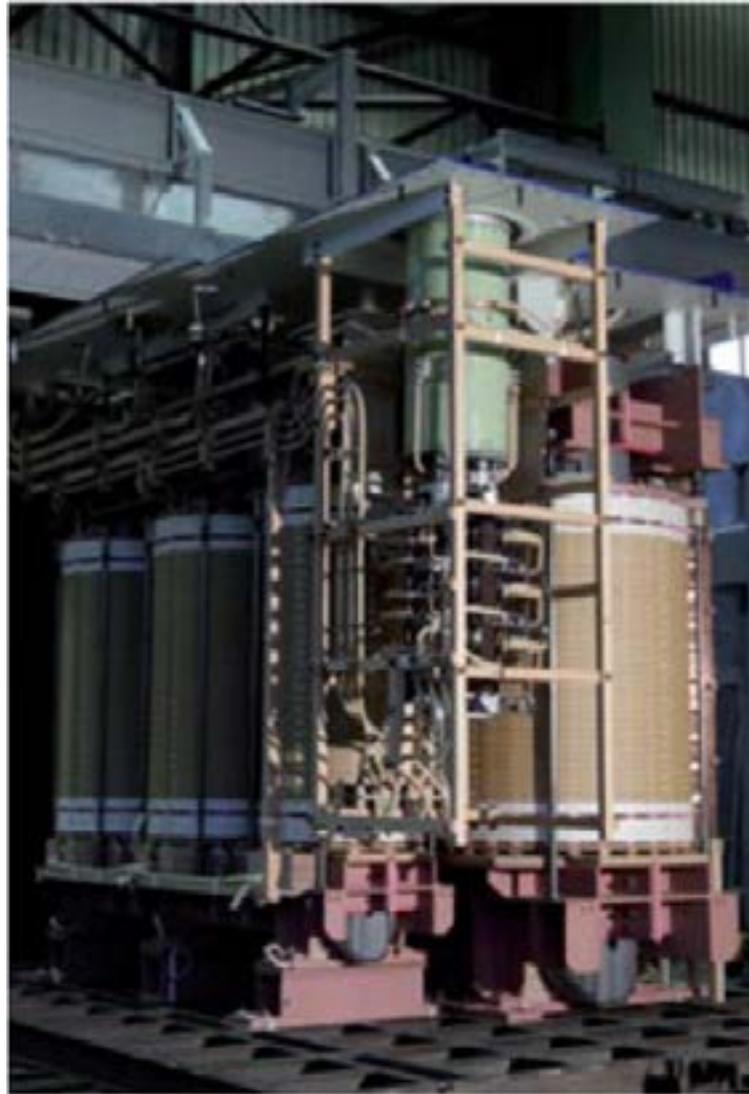
para levantar los dos devanados de los núcleos ensamblándolos simultáneamente (Knnit.com, 2021).



**FIGURA 2.** Conexión en ocho.

El devanado secundario de un transformador de horno está constituido por un número de bobinas en paralelo arregladas verticalmente y conectadas por medio de barras de cobre verticales. El arreglo de ida y retorno es usado para las conexiones de entrada/salida reduciendo el campo magnético y las pérdidas asociadas en las partes estructurales cercanas. Es preferible un devanado secundario conectado en delta, debido a que la corriente circulante por éste será reducida. Muchas veces los finales de cada fase del devanado secundario son extraídas del tanque y la conexión delta es realizada en el horno. Esto minimiza las caídas de voltaje inducido en el conductor y puede lograr un mejor balance por fase en las corrientes de los electrodos. El devanado de bajo voltaje (secundario del transformador principal), es invariablemente el devanado más expuesto y el devanado de alto voltaje (primario del transformador elevador), puede ser localizado junto al núcleo. En tal caso el devanado de regulación (con derivaciones), está entre los devanados de alta y de baja. Tal

disposición de devanados reduce la variación de porcentaje de impedancia a medida que la posición de derivación se cambia de un valor mínimo a uno máximo en el diseño de flujo variable (Knnit.com, 2021; Heathcote, 2007; Villanueva-Hernández, 2007). En la [Figura 3](#) se muestra el arreglo de los devanados y los núcleos del transformador de horno. El funcionamiento en general del transformador de horno puede apreciarse mejor en la [Figura 4](#), donde para propósitos prácticos se muestra una vista de perfil del transformador de horno permitiendo ver sólo una fase del transformador, además los devanados han sido defasados sobre las piernas para su apreciación. En el núcleo del transformador principal (MT), se puede apreciar en la parte superior el devanado primario, en el centro el devanado con derivaciones y en la parte de abajo el devanado secundario. En el núcleo del transformador elevador (ST), se puede apreciar en la parte superior el devanado de excitación y en la parte de abajo el devanado secundario.



**FIGURA 3.** Arreglo de los devanados y núcleos del transformador de horno. Figura tomada de [www.tamini.com](http://www.tamini.com)

Si se tiene una corriente en el devanado primario, como se indica en la [Figura 4](#), se genera un campo magnético de abajo hacia arriba en el núcleo principal, que induce una corriente que genera un flujo en sentido contrario en los devanados con derivaciones y secundario. Como resultado, en el núcleo secundario se tiene un flujo generado por el devanado secundario que va de arriba hacia abajo y, dependiendo de la conexión entre las terminales P0-P1 ó P0-P2 en el devanado de excitación, se tendrá un flujo que se suma o se resta al generado por el devanado

secundario en el núcleo pequeño, la magnitud que se suma o resta dependerá de la posición del tap en el devanado con derivaciones, lo que se puede apreciar en la [Figura 4](#).

Como se puede ver la estructura de construcción respecto al núcleo y devanados difiere mucho del transformador de horno en comparación al tradicional de un núcleo, de aquí la importancia de ver la respuesta en la frecuencia para este tipo de transformadores y que sirva como referencia para futuras aplicaciones.

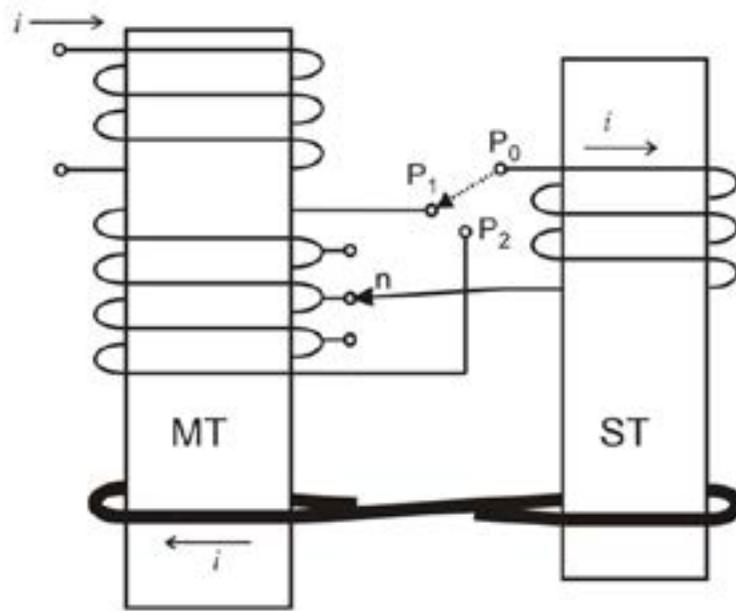


FIGURA 4. Vista lateral de un transformador de doble núcleo

### 3. Respuesta típica de un transformador $\Delta-Y$

Con el objetivo de ver el alcance de la aplicación del FRA en transformadores de potencia se presentan los resultados de su aplicación a un transformador trifásico de tres piernas. Las

principales pruebas que se realizan consisten en: pruebas de circuito abierto de alta y baja tensión y pruebas de cortocircuito en las cuales se alimenta el lado de alta tensión mientras se cortocircuita el lado de baja tensión. La respuesta típica de estas pruebas en un transformador conectado en  $\Delta-Y$  se muestran en la Figura 5.

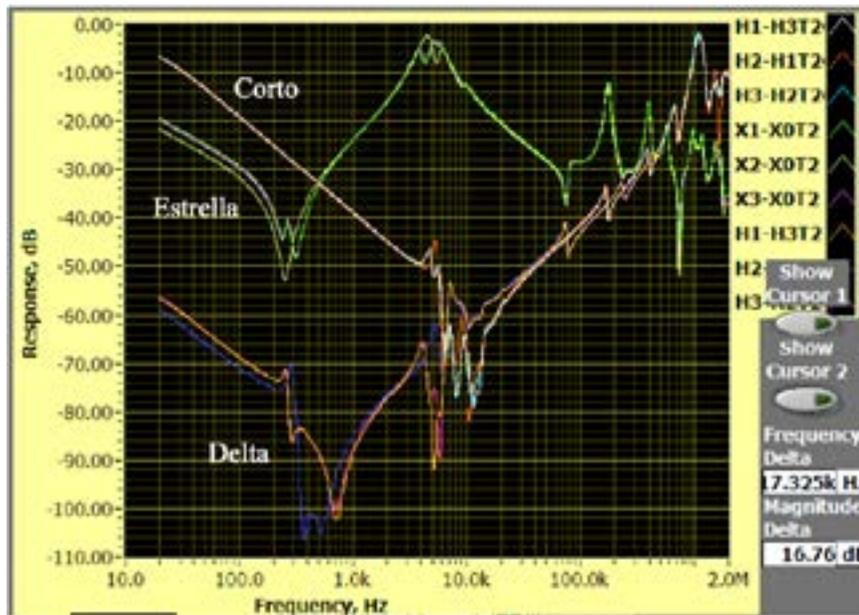


FIGURA 5. Respuesta típica para una conexión  $\Delta-Y$

La Figura 5 muestra la respuesta clásica para las pruebas de circuito abierto tanto para una conexión delta como para una conexión estrella, así mismo, se muestra la respuesta de la prueba de cortocircuito. De aquí se observa que la respuesta en la prueba de circuito abierto de las fases laterales tanto para la conexión delta como para la conexión estrella son idénticas mientras que la fase central en ambos casos refleja una mayor impedancia debido a la diferencia en las trayectorias de la estructura magnética del transformador, así como puntos de resonancia distintos. Por su par-

te la prueba de cortocircuito presenta un comportamiento idéntico debajo de los 4 kHz y posteriormente se cumple el hecho de que las fases laterales presentan un comportamiento idéntico mientras que la fase central refleja en su respuesta un incremento en su impedancia y cambios en distintos puntos de resonancia.

Es importante señalar que diferentes rangos de frecuencia están asociados con las distintas fallas posibles dentro del transformador en devanados y núcleo, tal como se observa en la Figura 6.

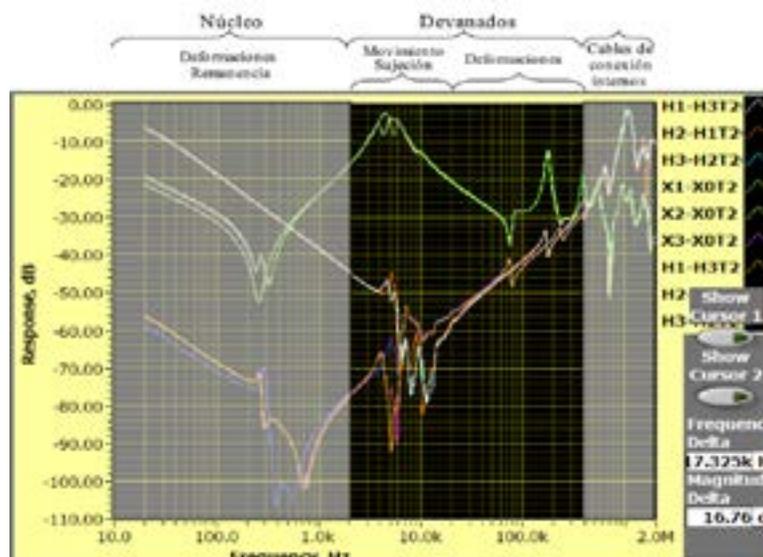


FIGURA 6. Asociación de rangos de frecuencia con fallas internas

Como puede observarse en la Figura 6, el rango de frecuencias de 20 Hz a 2 kHz excita los modos de falla correspondientes a deformaciones en el núcleo, magnetismo remanente, cortocircuitos entre espiras y circuitos abiertos en devanados (Behjat *et al.*, 2012). Por otro lado, el rango de 2 kHz a 20 kHz permite detectar desplazamientos de devanados y pérdida de los soportes de los mismos. En el rango de 20 kHz a 400 kHz es posible detectar deformaciones en los devanados y en los cambiadores de derivación. El rango restante de frecuencia de 400 kHz a 2 MHz permite detectar movimientos en

los cables de conexión interna de devanados y el cambiador de derivación.

Existen distintos factores externos que alteran la respuesta de la prueba y que deben tenerse en cuenta al momento de realizar ésta (Behjat *et al.*, 2012), ya que normalmente será complicado justificar el volver a sacar de operación el transformador por un error en la realización de la prueba a menos que existan fuertes indicios de fallas al interior del transformador en las respuestas obtenidas. Lo anterior hace evidente la necesidad de una buena capacitación del personal que realizará la prueba para

una toma de decisiones correcta en el análisis de la respuesta.

Como puede verse las respuestas a un transformador trifásico de núcleo sencillo (Figura 6), son las que se pueden encontrar en la literatura y se considera que es de gran importancia presentar resultados de estas pruebas para un transformador de arco de gran potencia. Se deben analizar con las respuestas tradicionales ya que se tienen dos grandes diferencias: los núcleos y los devanados y es precisamente donde se tiene la sensibilidad de la respuesta a la frecuencia.

conexión delta los dos. Considerando que las pruebas se realizaron estando el transformador en perfectas condiciones se considerarán estas respuestas como la referencia para pruebas futuras de la unidad, así como de otras unidades gemelas o similares. En la Figura 7 las gráficas superiores corresponden a la prueba de circuito abierto del lado de baja tensión y las gráficas inferiores son las correspondientes a la misma prueba del lado de alta del transformador de horno.

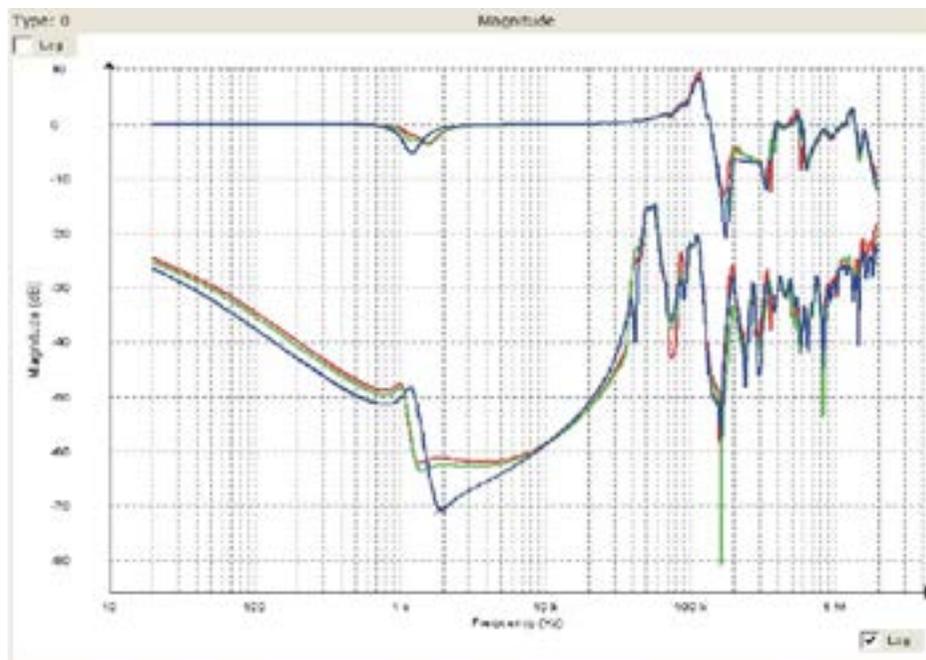


FIGURA 7. Prueba de circuito abierto, lado de alta y baja tensión.

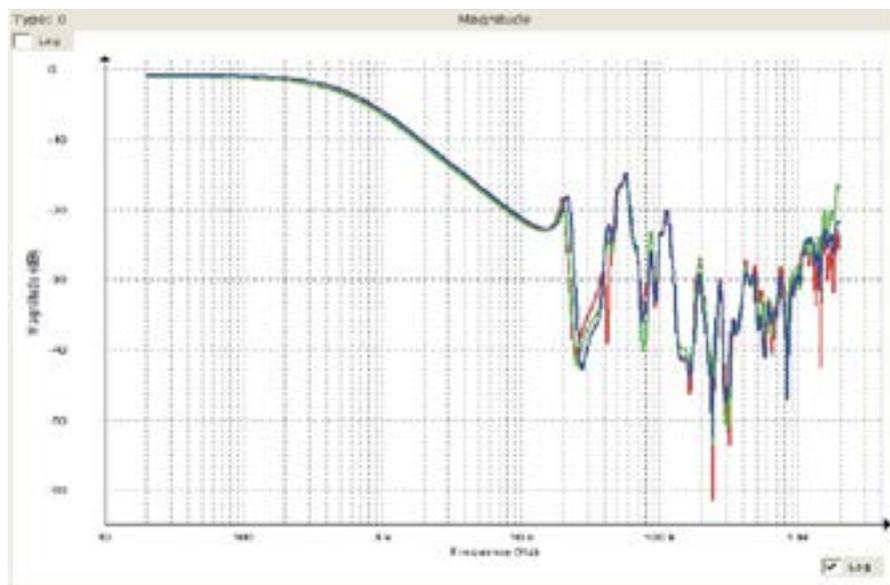
#### 4. Análisis de la respuesta de las pruebas del transformador de doble núcleo

El transformador bajo análisis tiene una capacidad de 155 MVA, relación de transformación de 66/0.96 KV, en derivación nominal el tap se localiza en la posición 3 (Sánchez *et al.*, 2008). La Figura 7 muestra la respuesta de la prueba en circuito abierto aplicada en ambos lados primario y secundario del transformador, con

Analizando las respuestas de las Figuras 6 y 7 se pueden distinguir varias diferencias entre los resultados para un transformador de núcleo sencillo (Figura 6) y uno de horno de arco (Figura 7). Primero, en la respuesta de circuito abierto del lado de baja se puede observar que el valor de la magnitud de la impedancia es constante y muy cercano a cero en el intervalo de 20Hz a 50kHz, con excepción del punto de resonancia, no muy pronunciado, alrededor de 1.5kHz. Esta impe-

dancia es meramente resistiva ya que el devanado secundario consiste de muy pocas vueltas de un conductor muy grueso, tipo solera. Ahora, comparando la respuesta de circuito abierto del lado de alta en delta, se observa un efecto muy importante, el rango de frecuencia en que se tiene la respuesta de los devanados y núcleo. Mientras que este rango en un transformador de núcleo sencillo es de 20Hz a 400kHz, en el transformador de horno llega hasta 2MHz, lo cual es lógico ya que es muy diferente el arreglo de los núcleos y devanados en el transformador de horno. Otro aspecto importante a notar son los puntos de resonancia ya que precisamente éstos permiten realizar adecuadamente un diagnóstico de posible falla interna en el transformador; aquí se puede

ver que en el transformador de núcleo sencillo en lo referente al mismo rango de frecuencia se tienen tres puntos de resonancia, mientras que en el transformador de horno sólo se tienen dos y algo interesante con diferente pendiente. Recordando que la diferencia principal es que estos puntos de resonancia ocurren a muy diferente frecuencia. Lo destacable es que observando las gráficas, las respuestas para las fases externas son muy similares mientras que para la central hay una pequeña diferencia esto es igual en el transformador de núcleo sencillo como en el de arco, debido a la simetría de núcleos y devanados. Cabe resaltar que el análisis de la respuesta a la frecuencia para el diagnóstico de fallas internas se basa en la comparación cualitativa de las respuestas.



**FIGURA 8.** Prueba de cortocircuito, lado de alta tensión

La Figura 8 muestra adicionalmente la respuesta de cortocircuito del lado de alta donde también realizando la comparación como en el caso anterior, el primer punto a resaltar es el rango de frecuencias que es el mismo que en el caso anterior. El otro aspecto es que el valor de la magnitud de la impedancia en el transformador de núcleo sencillo inicia disminuyendo

a una pendiente constante, mientras que en el transformador de arco el valor de la magnitud de la impedancia es cero por un intervalo de 20Hz hasta 200 Hz y posteriormente disminuye pero con una pendiente menos pronunciada. Hay que resaltar que estos son los detalles que proporcionan la información necesaria para realizar un buen diagnóstico.

## 5. Conclusiones

La detección de fallas incipientes en transformadores mediante la prueba de FRA ha demostrado su efectividad en múltiples ocasiones, debido a su alta sensibilidad en la detección de deformación y movimiento de desplazamiento de devanados, así como de fallas en el núcleo, sin necesidad de abrir el transformador, además de que es una prueba no invasiva ni destructiva. En este trabajo se presentó la aplicación de estas pruebas a transformadores de horno de arco de gran potencia para tener una referencia que pueda ser utilizada a nivel académico y/o industrial. Estas pruebas se analizaron y compararon con las obtenidas para un transformador de núcleo sencillo, resaltando las diferencias existentes entre ambas lo cual es vital para el que pretenda diagnosticar, ya que debe recordarse que es fundamental una amplia experiencia en la prueba y en el dispositivo a medir. Por lo tanto se considera que estos resultados son de gran valor como registro base de comparación para transformadores de horno de arco. Haciendo énfasis en esto último, estas son mediciones que se pueden tomar como la huella digital del transformador de doble núcleo para que en las siguientes pruebas de rutina, o debidas a algún percance físico o natural, sean la referencia para detectar posibles fallas internas.

Los transformadores de doble núcleo utilizados en la industria acerera, de acuerdo con Knnit.com (2021), están en crecimiento a nivel global, de aquí la importancia del tema tratado y la base para el tratamiento de este tipo de transformadores ya que por su construcción, el devanado en ocho que une a los dos núcleos, hace complicado su análisis como circuito eléctrico equivalente porque no presenta un grafo lineal y la mejor forma de modelar su comportamiento es mediante el uso de componentes RLC. Más aun, el avance de la electrónica mi-

croprocesada ha permitido elaborar los equipos para realizar la pruebas de barrido de frecuencia, con mayor exactitud y precisión, de menor tamaño y a costos más asequibles.

Importante también es resaltar la indicación de que estos resultados se pueden usar como la huella digital porque se han realizado en un transformador real y en condiciones normales de trabajo. Por supuesto, que será de gran utilidad para cuando el transformador presente alguna falla como resultado de la edad de los materiales, movimientos mecánicos, sobrecargas o descargas atmosféricas; se tiene la referencia para poder diagnosticar el tipo y magnitud de la falla que se presente a consecuencia de los disturbios indicados.

## Referencias

- BEHJAT, V., A. Vahedi, A., A. Setayeshmehr, A., H. Borsi, H., y E. Gockenbach, E. 2012. "Sweep frequency response analysis for diagnosis of low level short circuit faults on the windings of power transformers: An experimental study", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, ISSN: 0142-0615, Vol: 42 (1): 78-90.
- COFFEEN, L. and C. Sweetser, C. 2002. "Different Aspects of Frequency Response Analysis (FRA)", *IEEE/PES Transformers Committee Spring 2002 Meeting* Vancouver, B.C., Canada April 14-18.
- HEATHCOTE, M. J. 2007. *The J & P Transformer Book*. 13<sup>th</sup>. Edition, Newnes, Elsevier.
- KNNIT.COM, 2021. *Electric Arc Furnace Transformers Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast, 2019–2027*, <https://www.transparencymarketresearch.com/electric-arc-furnace-transformers-market.html>.
- KULKARNI, S. V. and y S. A. Khaparde, S. A. 2013. *Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics*. Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, USA.
- MOODLEY, L. 2006. *Sweep frequency response analysis as a diagnostic tool to detect transformer mechanical integrity*, Congress the Association of Municipal Electricity Undertakings Southern Africa.

- NIRGUDE, P. M., Channakeshava, G. B., Rajkumar, A. D., Singh, B.P. 2004. Frequency Response Analysis approach for condition monitoring of transformers, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP appos; 04 2004 Annual Report Conference on Volume, Issue, 17-20 Oct: 186-189.
- SÁNCHEZ, S., Avalos J. A., y C. Pérez. C. “ 2008. Field and laboratory experiences in sweep frequency in transformers”, Doble Engineering Company- 75<sup>th</sup> Annual International Doble Client Conference.
- VILLANUEVA Hernández, H. D. 2007. Obtención de parámetros en transformadores mediante elementos finitos usando ansys. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Tesis de Maestría.





## **Análisis de las condiciones de iluminación en las aulas del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Guanajuato, de acuerdo con la NOM-025-STPS-2008 y NOM-007-ENER-2014**

**Luis Elías Chávez Valencia, César Leonardo Ruiz Jaime y Elia Mercedes Alonso Guzmán**

Para citar este artículo: [Chávez Valencia Luis Elías, Ruiz Jaime César Leonardo, Alonso Guzmán Elia Mercedes. 2021. Análisis de las condiciones de iluminación en las aulas del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Guanajuato, de acuerdo con la NOM-025-STPS-2008 y NOM-007-ENER-2014. Ciencia Nicolaita, número 82, 119-136. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi82.548>](#)

---

Ver material suplementario

---

Publicado en línea el 30 de septiembre de 2021

---

Envíe su artículo a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

---

# Análisis de las condiciones de iluminación en las aulas del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Guanajuato, de acuerdo con la NOM-025-STPS-2008 y NOM-007-ENER-2014

Luis Elías Chávez Valencia<sup>1\*</sup>, César Leonardo Ruiz Jaime<sup>1</sup> y Elia Mercedes Alonso Guzmán<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

## HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 6 de marzo de 2021

Aceptado: 21 de junio de 2021

## RESUMEN

Desde tiempos remotos el ser humano ha empleado diversas formas de iluminar los espacios que habitaba, inicialmente para protegerse y en la actualidad para continuar realizando actividades propias del día. Sin embargo, la iluminación en las casas-habitación y edificios públicos, entre ellos las escuelas, no presenta los niveles adecuados, lo que puede generar consecuencias sobre la salud de los usuarios para niveles bajos o una baja eficiencia energética para niveles altos, por lo que en esta investigación se analizó la iluminación en los salones disciplinares del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Guanajuato y se comparó con los niveles establecidos en las normas mexicanas NOM-025-STPS-2008 y NOM-007-ENER-2014. De los resultados se concluyó que la iluminación natural resulta insuficiente para realizar actividades de lectura y redacción, situación que es solventada con el encendido de la luz artificial, que, aunque para las aulas analizadas es energéticamente eficiente, la producción de la energía eléctrica conlleva un impacto ambiental.

**PALABRAS CLAVE:** fotometría, niveles de iluminación, eficiencia energética y normas mexicanas.

## ABSTRACT

Since ancient times humans have used various ways of illuminating the spaces inhabited, initially to protect themselves and now to continue with activities related with the day. However, the lighting in-room houses and public buildings including schools do not have the appropriate levels, low levels can lead to health consequences for users or high levels leads to low energy efficiency, so that this study analyzed the lighting in the classrooms of Civil Engineering Department of the University of Guanajuato and compared it with the levels set in the Mexican standards. From the results, it was concluded that natural lighting is insufficient for reading and writing activities, a situation that is solved with artificial light, although the classrooms analyzed are energy efficient the production of electricity involves an environmental impact.

**KEYWORDS:** photometry, lighting levels, energy efficiency and mexican standards.

## Introducción

En la prehistoria, la iluminación que empleaba el hombre fue la proporcionada por la luz del sol y por la biomasa. Durante el día los niveles de iluminación le permitían realizar la mayoría de las actividades relacionadas con su alimentación y en la noche mediante fogatas lograban tener una mejor protección y supervivencia ante amenazas. Desde la antigüedad, el hombre como especie empezó a iluminar los espacios que habitaba durante las noches, logrando perfeccionar los sistemas de alumbrado de acuerdo con los progresos tecnológicos y con los cánones estéticos de las distintas épocas. Las primeras formas de iluminación móviles fueron las antorchas, después las velas y posteriormente las vasijas con algunos combustibles que eran capaces de producir llamas (Gil, 2009). Es hasta después de 1879, cuando Tomas Alva Edison patentó la bombilla y la humanidad logró que la iluminación artificial fuera más aplicable en los hogares, sin embargo, no es hasta 1950 cuando nace la luminotecnia, como una rama de la electricidad que se encarga de la iluminación artificial para fines específicos y es hasta entonces que la iluminación cobra la importancia que ahora ostenta.

## Fotometría

Las radiaciones electromagnéticas se pueden identificar por su frecuencia o su longitud de onda, ya que están relacionadas entre sí, debido a que dichas radiaciones se desplazan a una misma velocidad de aproximadamente 300,000 km/s en el vacío. El espectro electromagnético incluye desde energías desde  $10^{-14}$  a  $10^8$  metros de longitud de onda, sin embargo, la luz visible se encuentra alrededor de  $10^{-7}$  y específicamente de

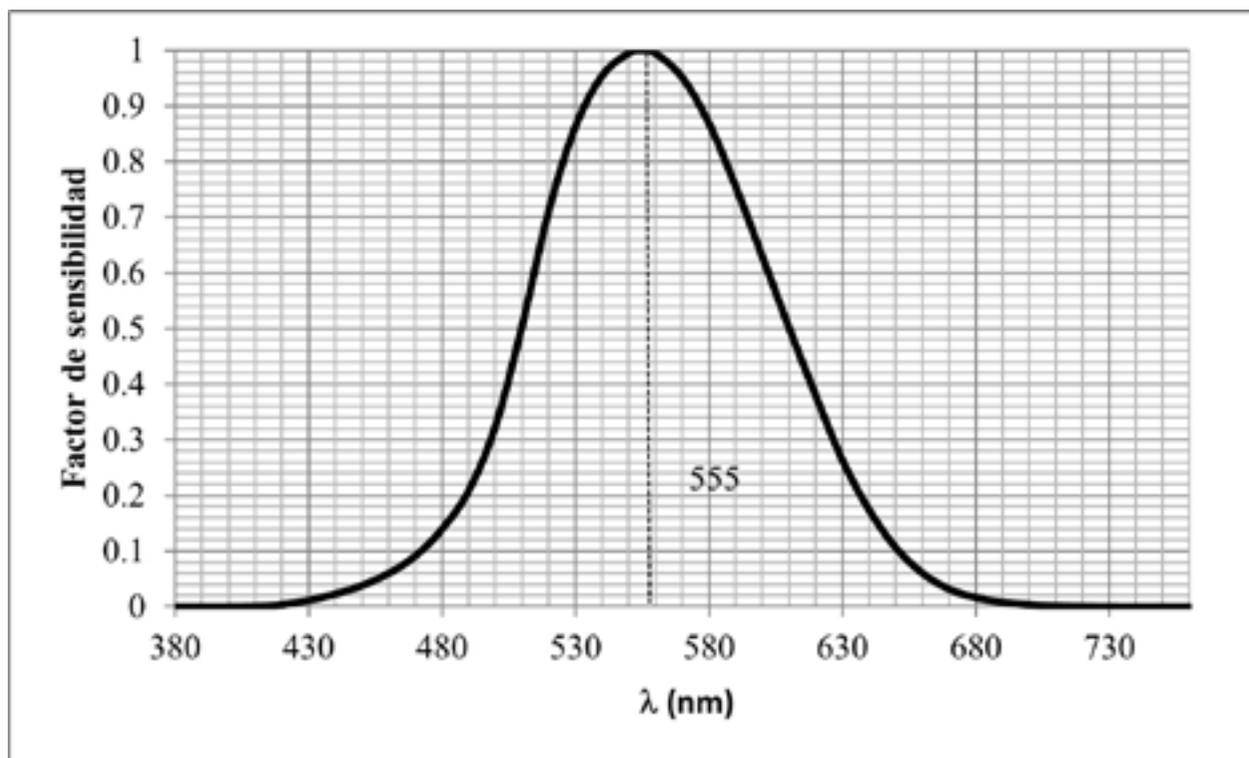
400 a 700 nanómetros (nm). No obstante que la luz visible es energía, ésta no tiene unidades de medida internacionales como debería de ser joules (J), lo anterior debido a que no toda la luz emitida por una fuente llega al ojo y produce sensación luminosa, es decir, no toda luz producida cumple con la definición de la Sociedad Americana de Óptica (OSA, por sus siglas en inglés). Por los motivos anteriores en los últimos años se ha llegado a la convención de emplear diversas unidades para la medida de las sensaciones producidas por la luz en la retina del ojo humano. Estas unidades están reunidas en la rama de la física llamada fotometría (Ganslandt, 2010).

## Unidades de fotometría

En el ojo humano existen dos células fotosensibles, los conos y los bastones, nombrados así por su forma y apariencia. Los conos son las células que permiten al ser humano ver durante el día, también conocida como visión fototópica, permite tener una visión nítida, colorida y de alto contraste, para lo cual se requieren altos niveles de iluminación (Burns, 1999). En cambio, los bastones son las células que permiten a los humanos ver durante la noche, conocida como visión escotópica, permite una visión de bajo contraste, en escala de grises y borrosa. La zona intermedia entre estas visiones se conoce como visión mesióptica. Sin embargo, el ojo humano no tiene la misma sensibilidad para todas las radiaciones del espectro visible, es decir la visión fototópica se da a los 555 nm y la escotópica a 480 nm, o sea, presenta un desplazamiento hacia longitudes de onda más corta, a este corrimiento se conoce como efecto Purkinje (Rea, 2007). Las unidades de fotometría más comunes son el flujo luminoso, eficiencia luminosa e iluminancia. A continuación, se describen.

*Flujo luminoso.* Es la cantidad de energía radiante luminosa emitida por una fuente de luz en la unidad de tiempo (s), entonces es por definición una potencia luminosa y su unidad es el lumen (lm) (Harper, 2006). El equivalente mecánico es un watt (W) de potencia luminosa a 555 nm es 683 lm, para un factor de sensibilidad igual a la unidad, sin embargo, la sensibilidad para el resto de las frecuencias es menor (ver Figura 1). La sensación luminosa que puede percibir el ojo humano es proporcional a la energía

radiante en cada frecuencia por la sensibilidad relativa correspondiente a dicha frecuencia. Por ejemplo, para una lámpara de vapor de sodio a baja presión produce la radiación monocromática características en 589 y 589.6 nm que de acuerdo con la Figura 1, la sensibilidad del ojo humano es de 0.75, es decir que los humanos sólo perciben el 75 por ciento de la luz producida por la lámpara, por lo cual su rendimiento luminoso es bajo.



**FIGURA 1.** Curva de sensibilidad del ojo humano. Elaboración propia con datos de (Leon, 2007)

*Eficiencia o rendimiento luminoso.* Es el cociente del flujo luminoso emitido por la fuente luminosa y el flujo que emitiría si toda su potencia estuviera en 555 nm, sin embargo, en la práctica es difícil determinar el flujo luminoso, por lo cual se emplea el equivalente mecánico citado anteriormente o se determina como la división entre el flujo luminoso y la potencia eléctrica consumida por dicha fuente.

*Iluminancia o niveles de iluminación.* La iluminancia es la recepción de luz o energía radiante luminosa por el ojo humano, pero esta energía no necesariamente puede provenir de una fuente luminosa, sino que también puede ser la reflejada por una superficie, por lo anterior la unidad de medida de los niveles de iluminación es lumen/m<sup>2</sup> y en términos prácticos y por convención a esta relación se le conoce como luxes siendo su símbolo el lux.

*Otras unidades* En la actualidad existen otras unidades de fotometría tales como: intensidad luminosa con unidades de candela (Cd), luminancia con unidades de candelas por unidad de área (Cd/m<sup>2</sup>). Sin embargo, en la determinación de los niveles de iluminación de los espacios habitacionales y de los laborales, la norma mexicana NOM-025-STPS-2008 (STPS, 2021), establece el procedimiento y los límites de los niveles de iluminación con unidades de lux.

### Normas mexicanas

La Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, *condiciones de iluminación en los centros de trabajo*, tiene como objetivo establecer las características de iluminación en los centros de trabajo, para que no sea un factor de riesgo para la salud de los trabajadores al realizar las actividades, así mismo, obliga al patrón a informar al trabajador sobre los riesgos del exceso o deficiencia en los niveles de iluminación, dar mantenimiento al sistema de iluminación e instalar iluminación eléctrica de emergencia. Esta misma norma establece la definición de los espacios, los conceptos y las autoridades involucradas en el cumplimiento, a saber:

- a) *Área de trabajo*: es el lugar del centro de trabajo, donde normalmente un trabajador desarrolla sus actividades.
- b) *Autoridad laboral*: las unidades administrativas competentes de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, que realicen funciones de inspección en materia de seguridad e higiene en el trabajo y las correspondientes de las entidades federativas y del Distrito Federal, que actúen en auxilio de aquéllas.
- c) *Brillo*: es la intensidad luminosa de una superficie en una dirección dada, por unidad de área proyectada de la misma.

- d) *Deslumbramiento*: es cualquier brillo que produce molestia, interferencia con la visión o fatiga visual.
  - e) *Iluminación o iluminancia*: es la relación de flujo luminoso incidente en una superficie por unidad de área, expresada en lux.
  - f) *Iluminación complementaria*: es un alumbrado diseñado para aumentar el nivel de iluminación en un área determinada.
  - g) *Iluminación localizada*: es un alumbrado diseñado para proporcionar un aumento de iluminación en el plano de trabajo.
  - h) *Luminaria; luminario*: equipo de iluminación que distribuye, filtra o controla la luz emitida por una lámpara o lámparas y el cual incluye todos los accesorios necesarios para fijar, proteger y operar esas lámparas y los necesarios para conectarse al circuito de utilización eléctrica.
  - i) *Luxómetro*: es un instrumento para la medición del nivel de iluminación.
  - j) *Nivel de iluminación*: cantidad de energía radiante medida en un plano de trabajo donde se desarrollan actividades, expresada en lux.
  - k) *plano de trabajo*: es la superficie horizontal, vertical u oblicua, en la cual el trabajo es usualmente realizado y cuyos niveles de iluminación deben ser especificados y medidos.
  - l) *Reflexión*: es la luz reflejada por la superficie de un cuerpo.
  - m) *Sistema de iluminación*: es el conjunto de luminarias destinadas a proporcionar un nivel de iluminación para la realización de actividades específicas.
  - n) *Tarea visual*: actividad que debe desarrollarse con determinado nivel de iluminación.
- La norma oficial mexicana NOM-007-ENER-2014 (ENER, 2021), *eficiencia energética en sistemas de alumbrado en edificios no residenciales*, tiene como objetivo establecer los niveles de eficiencia energética en términos de Densidad de Potencia Eléctrica para el Alum-

brado (DPEA) con que deben de cumplir los sistemas de alumbrado para uso general en edificios no residenciales nuevos, ampliaciones y modificaciones de los ya existentes; con el fin de disminuir el consumo de energía eléctrica y contribuir a la preservación de los recursos energéticos y ecológicos de la nación. Así mismo, esta norma puede ser aplicada en oficinas, escuelas, comercios, hospitales, hoteles, restaurantes, bodegas, recreación, cultura, talleres y central de pasajeros. Esta misma norma establece la definición de los espacios y los conceptos, a saber:

- a) *Alumbrado general interior*. La iluminación que se localiza en los espacios interiores de un edificio, destinada a iluminar uniformemente las diferentes áreas dentro del mismo.
- b) *Ampliación*. Cualquier cambio en el edificio que incremente la superficie construida y/o área alumbrada.
- c) *Área cubierta*. Superficie o espacio construido delimitado por un perímetro que tiene envolvente estructural al menos en su cara superior (techo) y no forzosamente debe tener envolvente estructural en las caras laterales (paredes).
- d) *Área abierta*. Superficie o espacio construido delimitado por un perímetro que carece de envolvente estructural alguna.
- e) *Carga eléctrica*. Potencia que demanda, en un momento dado, un aparato o máquina o un conjunto de aparatos de utilización conectados a un circuito eléctrico. La carga eléctrica puede variar en el tiempo dependiendo del tipo de servicio.
- f) *Carga total conectada para alumbrado*. Es la suma de la potencia en watts, de todos los luminarios y sistema de iluminación permanentemente instalados dentro de un edificio, para la iluminación general, de acento, localizada, decorativa, etc., incluyendo la potencia del balastro.
- g) *Densidad de potencia eléctrica para alumbrado (DPEA)*. Índice de la carga conectada para alumbrado por superficie de construcción: se expresa en  $W/m^2$ .
- h) *Eficiencia energética*. Es la que persigue obtener el máximo rendimiento de la energía consumida, a través del establecimiento de valores límite de la DPEA sin menoscabo del confort psicofisiológico de sus ocupantes.
- i) *Iluminación de acento*. Iluminación dirigible para enfatizar un objeto en particular o alguna característica de una superficie o para llamar la atención hacia alguna porción de campo visual.
- j) *Iluminación decorativa*. La que proporciona un nivel y/o color diferente al de la iluminación general, con propósitos de embellecimiento de algún local o superficie.
- k) *Iluminación localizada*. Iluminación dirigida hacia un área o superficie específica que proporciona iluminación suficiente para la ejecución de la actividad.
- l) *Luminario*. Equipo de iluminación que distribuye, filtra o controla la luz emitida por una lámpara o lámparas y el cual incluye todos los accesorios necesarios para fijar, proteger y operar estas lámparas y los necesarios para conectarlas al circuito de utilización eléctrica.
- m) *Sistema de alumbrado*. Conjunto de equipos, aparatos, accesorios que ordenadamente relacionados entre sí, contribuyen a suministrar iluminación a una superficie o espacio.

De acuerdo con los datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés), el 17% de la energía eléctrica consumida en la casa-habitación y hasta el 30% en edificios públicos es empleada en iluminación (Fernández, 1992). Por lo anterior, es muy importante estudiar los niveles de iluminación conservando el confort necesario para la actividad en cuestión, así como su eficiencia energética, que es el objetivo de esta investigación.

## Materiales y métodos

En el desarrollo de esta investigación se empleó un medidor digital de luminosidad (luxómetro) marca Steren modelo HER-401, el cual emplea

un fotodiodo y cuenta con filtro para corrección de color y factor cosenoidal bajo la norma de la comisión internacional de iluminación (CIE, por sus siglas en inglés), ver [Figura 2](#).



**FIGURA 2.** Luxómetro Steren HER-401

La metodología empleada en la determinación de los niveles de iluminación y eficiencia energética es la descrita en la norma NOM-025-STPS-2008 y NOM-007-ENER-2014, respectivamente. La determinación de los niveles de iluminación se realizó en el siguiente orden:

1. Reconocimiento. Se realizó una visita en el lugar de trabajo, los salones disciplinares del Departamento de Ingeniería Civil en la Sede Belén, en éstos se identificaron las áreas y puestos de trabajo con deficiencia en los niveles de iluminación y/o deslumbramiento.

2. Identificación. A partir de la visita se determinaron las áreas de trabajo prioritarias de evaluación localizando los puestos de trabajo, luminarias, maquinaria y equipo en un plano de distribución, así mismo se describieron los puestos y procesos de trabajo y el número de trabajadores y los puntos de medición.

3. Zonas de medición de niveles de ilumi-

nación. Las áreas de trabajo seleccionadas se dividieron en zona de medición donde se localizaron los puntos de medición de acuerdo con el centro geométrico de la zona a evaluar. El número mínimo de las zonas a evaluar se muestra en la [Tabla 1](#) y está en función de dos factores: el índice de área (IC) y el traslape de los puntos de medición y los puntos focales de las luminarias (Fila B) y cuando no hay coincidencia entre éstos (Fila A). El índice de área se determinó con la ecuación 1.

$$IC = \frac{xy}{b(x+y)} \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

IC es el índice de área.

x, y son las dimensiones del área (largo y ancho), en metros.

h es la altura de la luminaria respecto al plano de trabajo, en metros.

**Tabla 1.** Relación entre el índice de área y el número de zonas de medición

Índice de área (IC)	<1	1 a 2	2 a 3	> 3
	Número de zonas de medición			
Fila A	4	9	16	25
Fila B	6	12	20	30

4. Determinación de los niveles de iluminación. Se evaluaron los niveles de iluminación en cada una de las zonas y cada puesto de trabajo colocando el luxómetro sobre el plano de trabajo y evitando causar interferencias con las lecturas mediante la proyección de reflejos o sombras.

5. Factor de reflexión. Se determinó el factor de reflexión de las superficies en áreas y puesto de trabajo seleccionados para la determinación de los niveles de iluminación, paso 3 de esta secuela, para lo cual se efectuó una primera medición (E1) con la fotocelda del luxómetro colocada de cara a la superficie a una distancia de  $10 \pm 2$  centímetros a lectura constante, así mismo se realizó una segunda lectura (E2) con la fotocelda colocada sobre la superficie para medir la luz incidente. Finalmente, se determinó el factor de reflexión con la ecuación 2.

$$K_r = 100 \frac{E_i}{E_s} \quad (\text{ecuación 2})$$

Para determinar la eficiencia energética se desarrolló el siguiente procedimiento:

1. La densidad de potencia eléctrica para alumbrado (DPEA) se calculó a partir de la carga total conectada de alumbrado y el área total por iluminar de acuerdo con la ecuación 3.

$$DPEA = \frac{CTCA}{ATI} \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde:

DPEA es la densidad de potencia eléctrica para alumbrado en  $W/m^2$ ,

CTCA es la carga total conectada para alumbrado, en W.

ATI es el área total iluminada, en  $m^2$ .

2. Se determinó la DPEA a los espacios del edificio de la Sede Belén correspondiente a los salones donde se imparten clases disciplinares del programa de estudios de Ingeniería Civil, siendo estas aulas las 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309 y aula Zamarripa.

## Resultados y discusión

En la [Figura 3](#) se muestra la ubicación de los salones en estudio de acuerdo con el edificio de la sede Belén de la Universidad de Guanajuato, ubicado en Avenida Juárez, en el Centro de la ciudad de Guanajuato, Guanajuato, México.

En las [Figuras 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11](#) se muestran los planos de los salones 301, 302, 303 al 305, 306, 307, 308, 309 y Zamarripa, respectivamente. Así mismo se puede observar la ubicación de los planos de trabajo (mesas), las lámparas y los puntos de medición en las áreas empleadas para determinar los niveles de iluminación, factor de reflexión y DPEA.

En la [Tabla 2](#) se muestran las zonas a evaluar de los salones en estudio de acuerdo con el IC y con la [Tabla 1](#), las cuales pueden ser 9 ó 16 de acuerdo con la columna A, sin embargo para este estudio, debido a que las lámparas o luminarias empleadas en estas aulas son fluorescentes tubulares de vapor de mercurio a baja presión y las curvas isolux del fabricante (GE) muestran que existe un traslape de nivel de iluminación de 300 luxes para áreas mayores que las consideradas como áreas de las zona a evaluar, por lo anterior se consideró que todos los puestos de trabajo coincidían con los puntos focales de las lámparas, por lo cual se tomó la columna B.

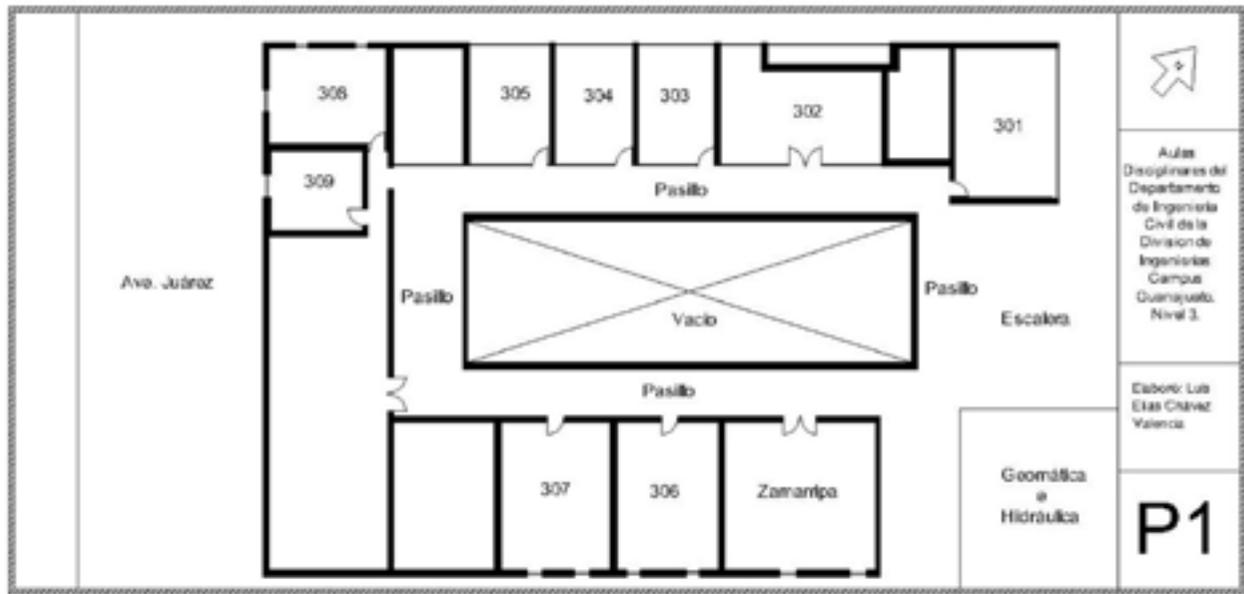


FIGURA 3. Ubicación de los salones de estudio.

Tabla 2. Zonas para evaluar de los salones

Salón	h (m)	x (m)	y (m)	IC	Zonas para evaluar	Área de la zona (m <sup>2</sup> )
301	2.11	7.9	6.9	1.75	12	4.5
302	2.11	7.45	7.5	1.77	12	4.6
303	2.11	5.9	8.7	1.66	12	4.3
304	2.11	5.9	8.7	1.66	12	4.3
305	2.11	5.9	8.7	1.66	12	4.3
306	2.11	11.3	6.4	1.94	12	6.0
307	2.11	11.3	5.7	1.79	12	5.4
308	2.11	8.0	5.9	1.60	12	3.9
309	2.11	6.6	6.45	1.54	12	3.5
Zamarripa	2.11	11.4	10.8	2.6	20	6.1

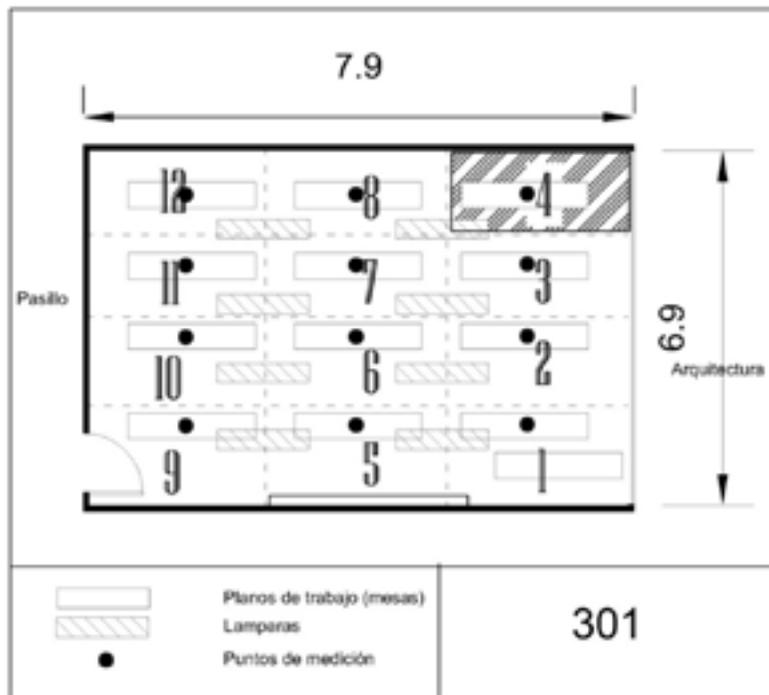


FIGURA 4. Localización de los planos de trabajo, lámparas y punto de medición del aula 301.

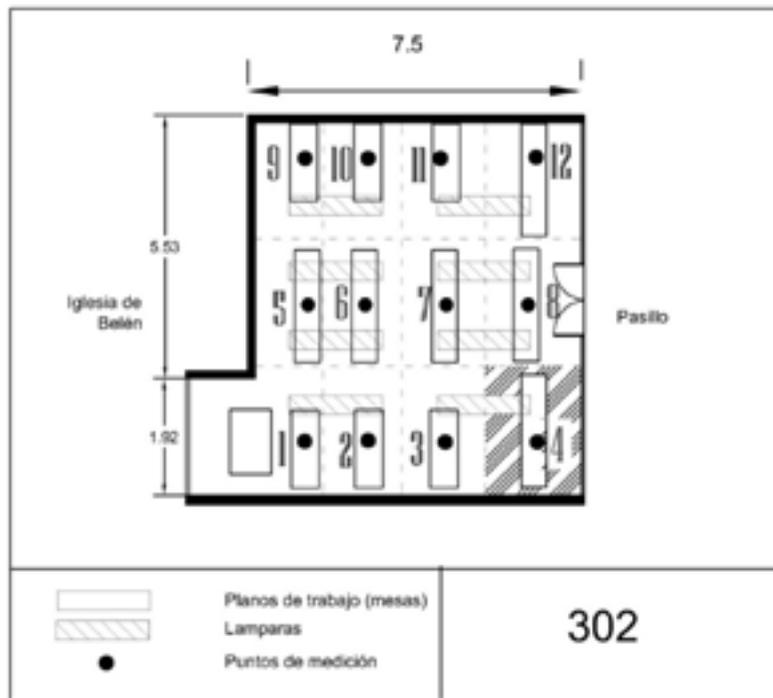


FIGURA 5. Localización de los planos de trabajo, lámparas y punto de medición del aula 302.

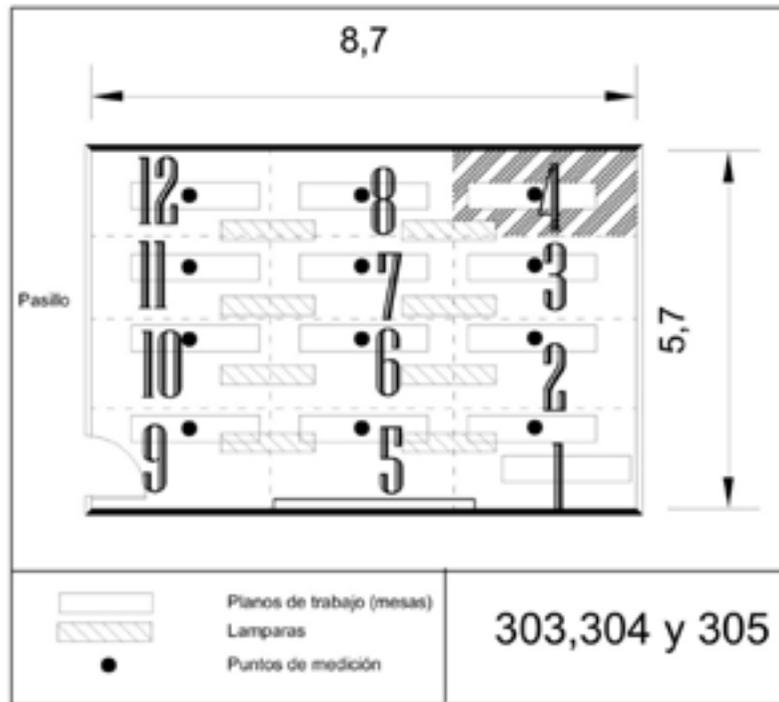


FIGURA 6. Localización de los planos de trabajo, lámparas y punto de medición de las aulas 303, 304 y 305.

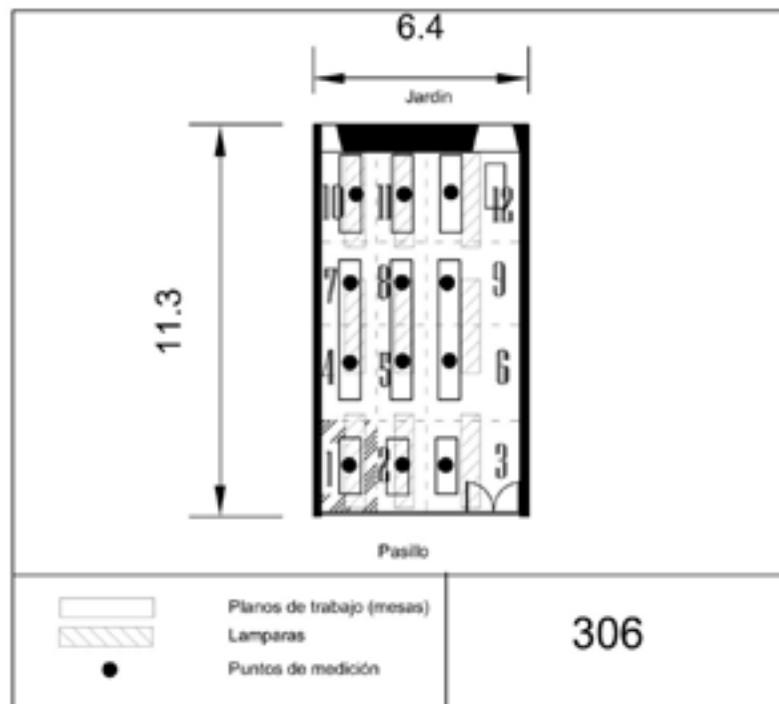
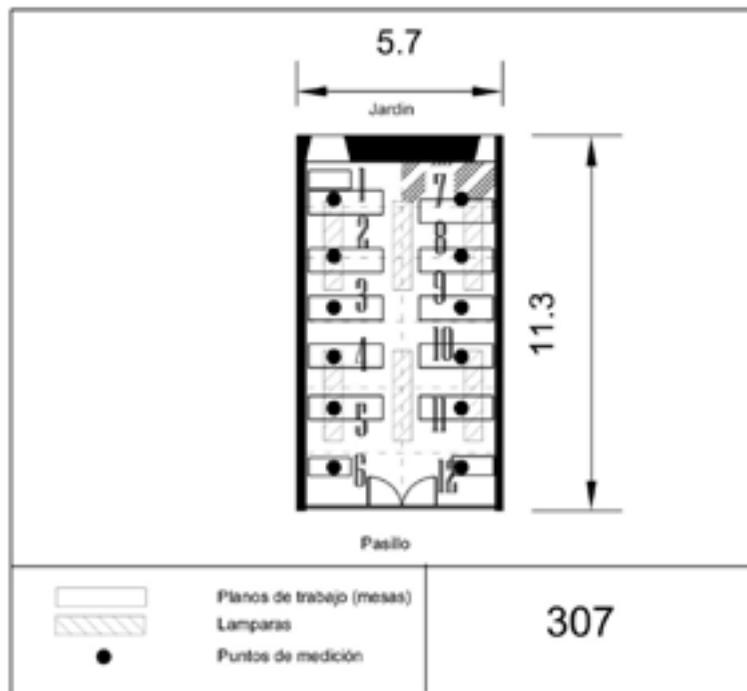
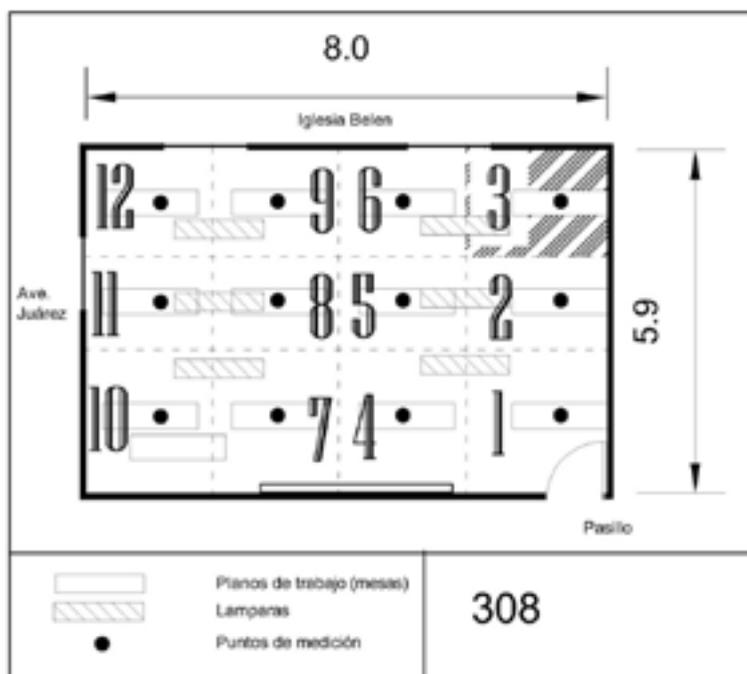


FIGURA 7. Localización de los planos de trabajo, lámparas y punto de medición del aula 306.



**FIGURA 8.** Localización de los planos de trabajo, lámparas y punto de medición del aula 307.



**FIGURA 9.** Localización de los planos de trabajo, lámparas y punto de medición del aula 308.

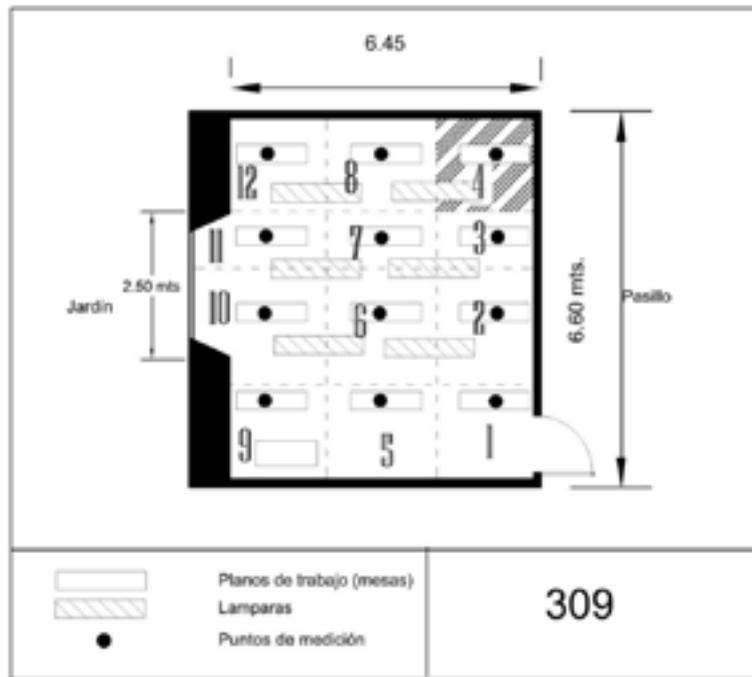


FIGURA 10. Localización de los planos de trabajo, lámparas y punto de medición del aula 309.

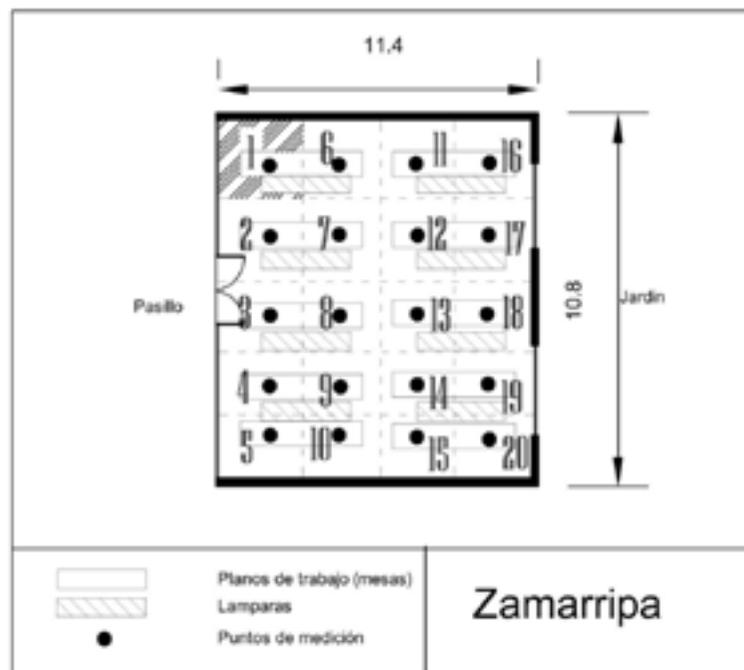


FIGURA 11. Localización de los planos de trabajo, lámparas y punto de medición del aula Zamarripa.

De la [Tabla 3](#) a la [7](#) se muestran los resultados de la evaluación de los niveles de iluminación y los factores de reflexión para las aulas en estudio, las lecturas de dichos niveles fueron realizados a las 14:00 horas para dos condicio-

nes, luz natural y con luz natural y artificial, en ambos casos con las ventanas abiertas. Así mismo, en la [Tabla 8](#) se muestran los resultados del cálculo del DPEA.

**Tabla 3.** Resultados de los niveles de iluminación para el salón 301 y 302

Punto de medición	301						302					
	Luz natural			Luz natural y artificial			Luz natural			Luz natural y artificial		
	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)
1	375	2120	17.7	437	1542	28.3	75	230	32.6	132	500	26.4
2	434	2330	18.7	330	1606	20.5	59	170	34.7	78	530	14.7
3	380	1920	19.8	371	1807	20.5	48	129	37.2	143	451	31.7
4	545	3120	17.5	255	1438	17.7	39	149	26.2	108	520	20.8
5	62	236	26.3	142	639	22.2	25	72	34.7	118	407	29.0
6	66	263	25.1	131	734	17.8	23	68	33.8	125	669	18.7
7	50	200	25.0	144	681	21.1	37	64	57.8	171	612	27.9
8	48	228	21.1	108	584	18.5	14	71	19.7	75	675	11.1
9	30	148	20.2	85	381	22.3	12	41	29.3	69	260	26.5
10	30	100	30.0	71	384	18.5	14	37	37.8	146	462	31.6
11	28	114	24.6	84	365	23.0	14	43	32.6	156	504	31.0
12	30	129	23.3	122	372	32.8	12	40	30.0	109	479	22.8

**Tabla 4.** Resultados de los niveles de iluminación para el salón 303 y 304

Punto de medición	303						304					
	Luz natural			Luz natural y artificial			Luz natural			Luz natural y artificial		
	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)
1	116	551	21.1	108	881	12.3	110	317	34.7	127	702	18.1
2	114	635	18.0	134	897	14.9	97	604	16.1	116	769	15.1
3	101	615	16.4	155	930	16.7	134	501	26.7	193	733	26.3
4	123	443	27.8	101	655	15.4	116	461	25.2	88	607	14.5
5	33	185	17.8	78	575	13.6	47	226	20.8	59	388	15.2
6	33	173	19.1	93	748	12.4	40	222	18.0	61	425	14.4
7	44	171	25.7	116	726	16.0	43	212	20.3	83	459	18.1
8	31	154	20.1	75	480	15.6	40	209	19.1	74	398	18.6
9	28	148	18.9	49	561	8.7	92	411	22.4	111	471	23.6
10	13	89	14.6	60	596	10.1	98	398	24.6	83	578	14.4
11	17	87	19.5	75	561	13.4	66	379	17.4	73	581	12.6
12	24	104	23.1	63	394	16.0	47	303	15.5	76	498	15.3

**Tabla 5.** Resultados de los niveles de iluminación para el salón 305 y 306

Punto de medición	305						306					
	Luz natural			Luz natural y artificial			Luz natural			Luz natural y artificial		
	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)
1	75	449	16.7	113	624	18.1	80	420	19.0	99	599	16.5
2	96	506	19.0	128	770	16.6	78	398	19.6	89	491	18.1
3	65	370	17.6	90	726	12.4	36	149	24.2	61	298	20.5
4	61	422	14.5	67	590	11.4	92	460	20.0	121	688	17.6
5	20	136	14.7	52	487	10.7	63	460	13.7	117	653	17.9
6	28	126	22.2	69	480	14.4	50	228	21.9	93	452	20.6
7	23	130	17.7	68	456	14.9	30	165	18.2	65	512	12.7
8	38	121	31.4	48	414	11.6	108	356	30.3	108	511	21.1
9	15	70	21.4	36	350	10.3	77	144	53.5	71	355	20.0
10	16	74	21.6	54	319	16.9	102	513	19.9	114	623	18.3
11	13	77	16.9	35	342	10.2	93	446	20.9	123	629	19.6
12	10	95	10.5	35	258	13.6	80	361	22.2	114	520	21.9

**Tabla 6.** Resultados de los niveles de iluminación para el salón 307 y 308

Punto de medición	307						308					
	Luz natural			Luz natural y artificial			Luz natural			Luz natural y artificial		
	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)
1	92	253	36.4	144	518	27.8	65	375	17.3	98	442	22.2
2	34	132	25.8	64	309	20.7	95	402	23.6	114	606	18.8
3	33	125	26.4	69	231	29.9	166	1151	14.4	256	1259	20.3
4	42	122	34.4	74	348	21.3	84	345	24.3	116	639	18.2
5	50	194	25.8	82	359	22.8	100	487	20.5	100	852	11.7
6	73	328	22.3	94	410	22.9	65	681	9.5	94	1066	8.8
7	36	117	30.8	69	342	20.2	89	452	19.7	127	699	18.2
8	40	128	31.3	57	288	19.8	130	676	19.2	133	1030	12.9
9	36	141	25.5	76	246	30.9	208	916	22.7	263	1219	21.6
10	39	164	23.8	64	314	20.4	157	720	21.8	93	827	11.2
11	52	230	22.6	76	322	23.6	423	2350	18.0	224	1843	12.2
12	64	306	20.9	78	313	24.9	125	890	14.0	186	1119	16.6

**Tabla 7.** Resultados de los niveles de iluminación para el salón 309 y Zamarripa

Punto de medición	309						Zamarripa					
	Luz natural			Luz natural y artificial			Luz natural			Luz natural y artificial		
	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)	E1 (lx)	E2 (lx)	Kf (%)
1	18	98	18.4	32	254	12.6	20	80	25.0	22	98	22.4
2	28	126	22.2	40	377	10.6	80	431	18.6	35	162	21.6
3	28	133	21.1	29	238	12.2	130	658	19.8	98	491	20.0
4	30	134	22.4	38	215	17.7	146	716	20.4	42	704	6.0
5	25	138	18.1	37	308	12.0	135	657	20.5	138	672	20.5
6	30	172	17.4	42	305	13.8	28	97	28.9	30	110	27.3
7	29	166	17.5	38	298	12.8	67	166	40.4	39	174	22.4
8	53	200	26.5	151	221	68.3	118	529	22.3	111	493	22.5
9	10	90	11.1	19	200	9.5	135	456	29.6	150	841	17.8
10	303	1816	16.7	272	1617	16.8	124	356	34.8	129	845	15.3
11	328	2820	11.6	366	2230	16.4	139	766	18.1	92	498	18.5
12	141	422	33.4	110	480	22.9	67	255	26.3	138	489	28.2
13							121	561	21.6	177	797	22.2
14							112	612	18.3	188	855	22.0
15							87	354	24.6	157	845	18.6
16							145	459	31.6	120	561	21.4
17							156	387	40.3	120	549	21.9
18							151	640	23.6	153	685	22.3
19							155	815	19.0	197	926	21.3
20							154	800	19.3	150	715	21.0

**Tabla 8.** Determinación de los valores de DPEA

Salón	Lámparas	Potencia (W)	CTCA (W)	x (m)	y (m)	Área (m <sup>2</sup> )	DPEA (W/m <sup>2</sup> )
301	8	75	600	7.9	6.9	54.51	11.00
302	8	75	600	7.45	7.5	55.87	10.74
303	8	75	600	5.9	8.7	51.33	11.69
304	8	75	600	5.9	8.7	51.33	11.69
305	8	75	600	5.9	8.7	51.33	11.69
306	9	75	675	11.3	6.4	72.32	9.21
307	6	75	450	11.3	5.7	64.41	6.99
308	6	75	450	8.0	5.9	47.2	9.54
309	6	75	450	6.6	6.45	42.57	10.57
Zamarripa	8	75	600	11.4	10.8	123.12	4.87

## Discusión

De acuerdo con la NOM-025-STPS-2008 el nivel mínimo de iluminación (E2) para aulas es de 300 lx, así mismo limita el Kf a 50 %. De los resultados presentados en las Tablas 3 a la 7 se puede observar que para la condición de iluminación natural sólo los planos de trabajo ubicados en las ventanas de las aulas tienen valores mayores a 300 lx en condición de luz natural y

todas las mesas cumplen con los requisitos mínimos para realizar actividades de aprendizaje cuando las lámparas fluorescentes son encendidas, que aunque en algunas casos se exceden los valores de incidencia (E2), los valores de Kf se mantienen dentro de la norma, en cierto grado por los niveles de iluminación, pero también por el material de los muebles, los acabados de los espacios y cubierta de las lámparas (ver Figura 12).



**FIGURA 12.** Configuración típica de las aulas del programa de ingeniero civil en Sede Belén

Así mismo la norma NOM-007-ENER-2014 restringe a la DPEA para salones de clase a un valor menor de  $17.2 \text{ W/m}^2$ , encontrando de acuerdo con los resultados (ver Tabla 8) que es parámetro adecuado en todos los salones analizados. No obstante, aunque con el encendido de las lámparas de tubulares de mercurio se mejora el confort de los usuarios de estas aulas, el gasto energético llega a ser de 5.6 KWh en promedio que se traduce en un costo por el consumo de energía eléctrica con un impacto económico para la Universidad de Guanajuato, pero tam-

bién con un impacto ambiental significativo ya que la producción dicha energía se realiza en la termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ubicada en la ciudad de Salamanca, Guanajuato, que es la ciudad más contaminada de ese estado.

## Conclusiones

1. En condiciones para las actividades que se dan exclusivamente con luz natural, sólo los

planos de trabajo que se encuentran en las ventanas cumplen con la iluminación (E2) mínima de 300 lx, en el momento de la determinación de los niveles que se dio a las 14:00 horas, no obstante, debido al diseño y ubicación del edificio de Sede Belén, durante el transcurso el día laborable estos niveles pueden llegar a ser menores.

2. El inmobiliario y materiales académicos existentes en las aulas del departamento de Ingeniería Civil presentan un factor de reflexión menor a  $K_f = 50\%$  establecido en la norma, excepto el pintarrón, cuya salvedad se subsana con el uso de una pantalla de proyección, lo que implica menor cansancio visual para los usuarios de estos espacios de enseñanza-aprendizaje.

3. Debido a que sólo las mesas contiguas a las ventanas tienen el nivel de iluminación mínima requerida para realizar trabajos de lectura y redacción, la luz artificial debe ser encendida durante todo el periodo de las actividades escolares llegando a ser hasta de 15 horas por día.

4. Aunque los valores del  $K_f$  y DPEA son menores a los establecidos por normas empleadas en esta investigación, la energía eléctrica es producida por la CFE en la ciudad de Salamanca, Guanajuato con la quema de productos derivados del petróleo, por lo que resulta urgente mejorar la iluminación en Sede Belén y promover su uso responsable.

## Referencias

- BURNS, S. M. 1999. Cone spacing and waveguide properties from cone directionality measurements. *Journal of the Optical Society of America A*: 995–1004.
- ENER. (04 de 03 de 2021). Norma Oficial Mexicana NOM-007-ENER-2014, Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en edificios. CDMX. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181647/NOM\\_007\\_ENER\\_2014.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181647/NOM_007_ENER_2014.pdf)
- FERNÁNDEZ, L. 1992. Técnicas y aplicaciones de la iluminación. CDMX: McGraw-Hill. ISBN: 84-481-0046-8, pp. 233.
- GANSLANDT, R. 2010. *Cómo planificar con Luz*. Berlin: Bertelsmann International, pp. 286.
- GIL, A. (2009). Historia de la iluminación. *Revista digital de innovación y experiencia educativas*, 1-9. Obtenido de [https://archivos.csif.es/archivos/andalucia/ensenanza/revistas/csicsif/revista/pdf/Numero\\_23/ANDRES\\_A\\_GIL\\_1.pdf](https://archivos.csif.es/archivos/andalucia/ensenanza/revistas/csicsif/revista/pdf/Numero_23/ANDRES_A_GIL_1.pdf)
- HARPER, E. 2006. *El abc del alumbrado y las instalaciones eléctricas de baja tensión*. CDMX: Limusa, ISBN: 978-968-18-6050-9, pp. 352.
- LEON, A. 2007. *Lighting*. Honolulu: AIU. Obtenido de <https://www.aiu.edu/applications/DocumentLibrary-Manager/upload/Lighting%20Adrian%20Leon.pdf>
- REA, M. 2007. Making the move to a unified system of photometry. *Lighting Research and Technology*: 393-408.
- STPS. (04 de 03 de 2021). Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. CDMX. Obtenido de <http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/nom-025.pdf>

# CIENCIA NICOLAITA

ISSN: 2007 7068

**Marco Antonio Landavazo Arias**

**COORDINADOR DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA**

**Pedro Corona Chávez**

**EDITOR**

## COMITÉ EDITORIAL

**Luca Tessieri**, Instituto de Física y Matemáticas, **Sabina Irene Lara Cabrera**, Facultad de Biología, **Martina Medina Nava**, Facultad de Biología, **María Lourdes González Arqueros**, Conacyt-Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, **Jeannette Sofía Bayuelo Jiménez**, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, **José Miguel Cervantes Alfaro**, Facultad de Medicina, **Jorge Alejandro Verduzco Martínez**, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales, **Claudio Rubén Fuerte Esquivel**, Facultad de Ingeniería Eléctrica, **Jesús Cirilo Trujillo Jiménez**, Facultad de Ingeniería Mecánica, **Elia Mercedes Alonso Guzmán**, Facultad de Ingeniería Civil.

## COMITÉ EDITORIAL EXTERNO

**Daniele Colosi**, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México, **Carlos Alonso Maya Lastra**, Columbia University, Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology (USA), **Rafael Ángel Reyna-Hurtado**, Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Campeche, México, **Zayre Ivonne González Acevedo**, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México, **Ramón Marcos Soto Hernández**, Colegio de Postgraduados, Posgrado en Botánica, Estado de México, **María Esther Olvera Cortés**, Centro de Investigación Biomédica de Michoacán, Instituto Mexicano del Seguro Social, México, **Ignacio Alejandro Figueroa Vargas**, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, **Enrique Acha**, Profesor Emérito en la Universidad de Tampere, Finlandia, **Víctor Manuel Ambríz Díaz**, Instituto Tecnológico de Chihuahua, **Luis Fernando Guerrero Baca**, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

***Ciencia Nicolaita 82***, año 29, septiembre 2021, es una publicación cuatrimestral editada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, con domicilio en Edi-ficio C-2, Ciudad Universitaria, C. P. 58030, Morelia, Michoacán. Tel. +52 (443) 327 2366, (443) 316 7436 (443) 322 35 00 EXT. 4112. Correo electrónico: [ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx](mailto:ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx). Página web: [ht-tps://www.cic.cn.umich.mx/cn](https://www.cic.cn.umich.mx/cn). Editor responsable: Pedro Corona Chávez. ISSN: 2007 7068 gestionado ante el Instituto Nacional de Derechos de Autor, Registro Latindex No. 21693. Responsable de la última actuali-zación de este número: Hugo Cesar Guzmán Rivera, fecha de última modificación: 29 septiembre de 2021.

***Ciencia Nicolaita 82*** fue formada y preparada para su versión electrónica por Silla vacía Editorial, Miguel Cabrera 88ª, Centro Histórico, Morelia, Mich. México. Tel. 443 312 26 29. Correo electrónico: [contacto@sillavaciaeditorial.com](mailto:contacto@sillavaciaeditorial.com). Con la colaboración para su corrección y edición final de Hugo Silva, Editorial Morevalladolid, S.A. de R. L. [editorialmorevalladolid@hotmail.com](mailto:editorialmorevalladolid@hotmail.com).

#### DERECHO DE USO

Se permite la reproducción, publicación, transmisión, difusión en cualquier modo o medio de cualquier parte del material contenido en el archivo (únicamente texto sin imágenes) sin alterar o modificar el original, con fines de referencia y/o reproducción, académicos o educacionales, con excepción de los personales o comercia-les, citando la fuente de referencia y otorgando el crédito correspondiente al autor y al editor.

Sitio implementado por el equipo de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoa-cana de San Nicolás de Hidalgo sobre la plataforma OJS3/PKP .