

Caracterización del deslizamiento de ladera de la colonia Vista Alamar, Tijuana, Baja California, México, mediante el uso de ruido sísmico y el método HVSR

Lenin Ávila-Barrientos^{1,*}, Luis A. Yegres-Herrera², Arturo Aragón³, Mario Rodríguez-Corella³, Alicia Cruz-Berumen³

¹ CONACyT-CICESE, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología. Carretera Ensenada – Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C. P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

² Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología. Carretera Ensenada – Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C. P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

³ Coordinación Estatal de Protección Civil de Baja California. Pánfilo Natera No. 6400, Col. Francisco Villa, C.P. 22615, Tijuana, Baja California.

ORCID: LA-B 0000-0001-7451-8636; LAY-H 0000-0002-1631-2266

*lenavila@cicese.mx

Resumen

Los deslizamientos de ladera son fenómenos naturales que pueden causar daños severos, lo cual incluye pérdidas económicas y en algunos casos pérdida de vidas. La ciudad de Tijuana, Baja California, México, se ha visto afectada por la ocurrencia de varios deslizamientos de ladera. Del localizado en la colonia Vista Alamar se presenta la caracterización del deslizamiento mediante el uso de ruido sísmico y el método HVSR (*Horizontal Vertical Spectral Ratio*). Los modelos obtenidos de las velocidades de la onda S muestran la posible superficie de deslizamiento, la cual corresponde con la observada en el campo. Los valores altos V_p/V_s se localizan en los extremos sur y norte del deslizamiento. Hacia el extremo sur, se puede especular sobre la migración de flumientras que idos hacia la parte inferior del deslizamiento, la presencia de los valores altos en la parte superior no queda clara, por lo que se recomienda efectuar con su análisis, así como aplicar otras técnicas geofísicas para corroborar los resultados obtenidos.

Palabras clave: Alamar; Deslizamiento; HVSR; Ruido sísmico; Tijuana; V_p/V_s ; V_s

Introducción

Un deslizamiento de ladera, en adelante indicado solo como “deslizamiento”, es un fenómeno natural definido como un movimiento pendiente abajo de masas de roca, tierra o escombros (Cruden, 1991; Turner, 2018). Un deslizamiento puede ser caracterizado como un cuerpo geológico complejo formado por capas con propiedades físicas que contrastan, lo que implica un movimiento repentino o gradual pendiente abajo (Bogoslovsky y Ogilvy, 1977). Los deslizamientos afectan los materiales geológicos y exhiben muchas formas y volúmenes (Jongmans y Garambois, 2007; Figura 1) Las velocidades de los deslizamientos pueden ser de unos pocos milímetros al año a más de 5 m/s (Turner, 2018). La gravedad es la fuerza que genera un deslizamiento, pero éste solo ocurre

cuando la gravedad supera a las fuerzas inerciales y resistentes, es decir la resistencia al esfuerzo cortante del material (Turner, 2018; Pradhan y Siddique, 2019).

De acuerdo con Turner (2018), los deslizamientos se clasifican de acuerdo al tipo de material y movimiento. La Tabla 1 muestra la clasificación de los deslizamientos (Cruden y Varnes, 1996, en Turner 2018).

La naturaleza del daño por un deslizamiento es compleja por los diferentes factores involucrados, como puede ser el mecanismo de falla, distancia recorrida, características de la pendiente, tipos de estructuras que pudieran ser afectadas, así como la vulnerabilidad de ellas (Wong *et al.*, 1997). Los daños pueden incluir pérdidas económicas,

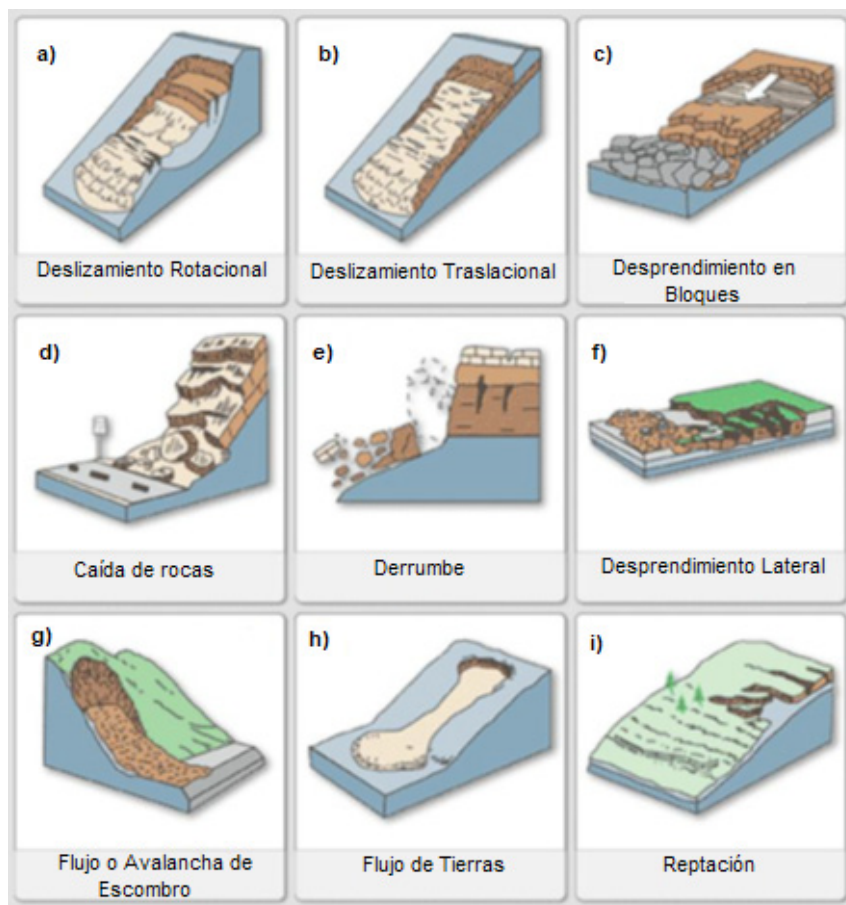


Figura 1. Principales tipos de movimientos en masa (tomado de Gómez, 2010).

Tabla 1. Clasificación de los deslizamientos de acuerdo con Cruden y Varnes (1996), modificado de Turner (2018).

Tipo de movimiento	Tipo de material		
	Roca	Suelos ingenieriles	
		Predominantemente grueso	Predominantemente fino
Caídas	Caída de roca	Caída de escombros	Caída de tierra
Derrumbes	Derrumbe de rocas	Derrumbe de escombros	Derrumbe de tierra
Deslizamientos Rotacional Traslacional	Deslizamientos de roca	Deslizamiento de escombros	Deslizamiento de tierra
Propagación lateral	Propagación de roca	Propagación de escombros	Propagación de tierra
Flujos	Flujo de roca	Flujo de escombros	Flujo de tierra
Complejo	Combinación de dos o más tipos de movimientos principales		

afectación a áreas importantes de desarrollo económico, daño a las estructuras ingenieriles, lesiones y hasta la pérdida de la vida (Cruden, 1991; Bogoslovsky y Ogilvy, 1977; Del Gaudio *et al.*, 2014). Los deslizamientos son peligros extendidos y causan miles de muertes, lesiones y billones de dólares en pérdidas cada año (Kjekstad y Highland, 2009).

Determinar la estructura del subsuelo en un área susceptible a deslizamientos ayuda a prevenir su ocurrencia, tomando las medidas necesarias para su estabilización, lo que requiere de una caracterización geológica y geofísica del área (Bogoslovsky y Ogilvy, 1977). Uno de los estudios geofísicos aplicables es el uso del ruido sísmico, la medición de ruido sísmico para caracterizar la estructura del subsuelo y la estimación de la velocidad de corte (V_s) de las diferentes capas de suelo. Estos estudios se han incrementado en las últimas décadas. Específicamente, el uso de ruido

sísmico en áreas propensas a deslizamientos es útil, ya que a lo largo de la superficie de deslizamiento, hay contraste de las velocidades de corte, lo cual se puede identificar y caracterizar mediante el análisis del ruido empleando el método de cocientes espectrales HVSR (Horizontal Vertical Spectral Ratio) (Jongmans y Garambois, 2007; Méric *et al.*, 2007).

El problema de los deslizamientos en Tijuana

La ciudad de Tijuana, Baja California, México, ha sido afectada históricamente por deslizamientos (Olivia *et al.*, 2021; Delgado-Argote *et al.*, 2017, 2012, 2011; Mendoza-Garcilazo *et al.*, 2007; Aragón, 1994). Con el crecimiento de la ciudad, la población gradualmente ha ido asentándose en las colinas, zonas de laderas y cauces de arroyo, por lo regular, en forma de asentamientos irregulares (Ángeles, 2020; Bocco *et al.*, 1993; Mendoza-Garcilazo *et al.*, 2007).

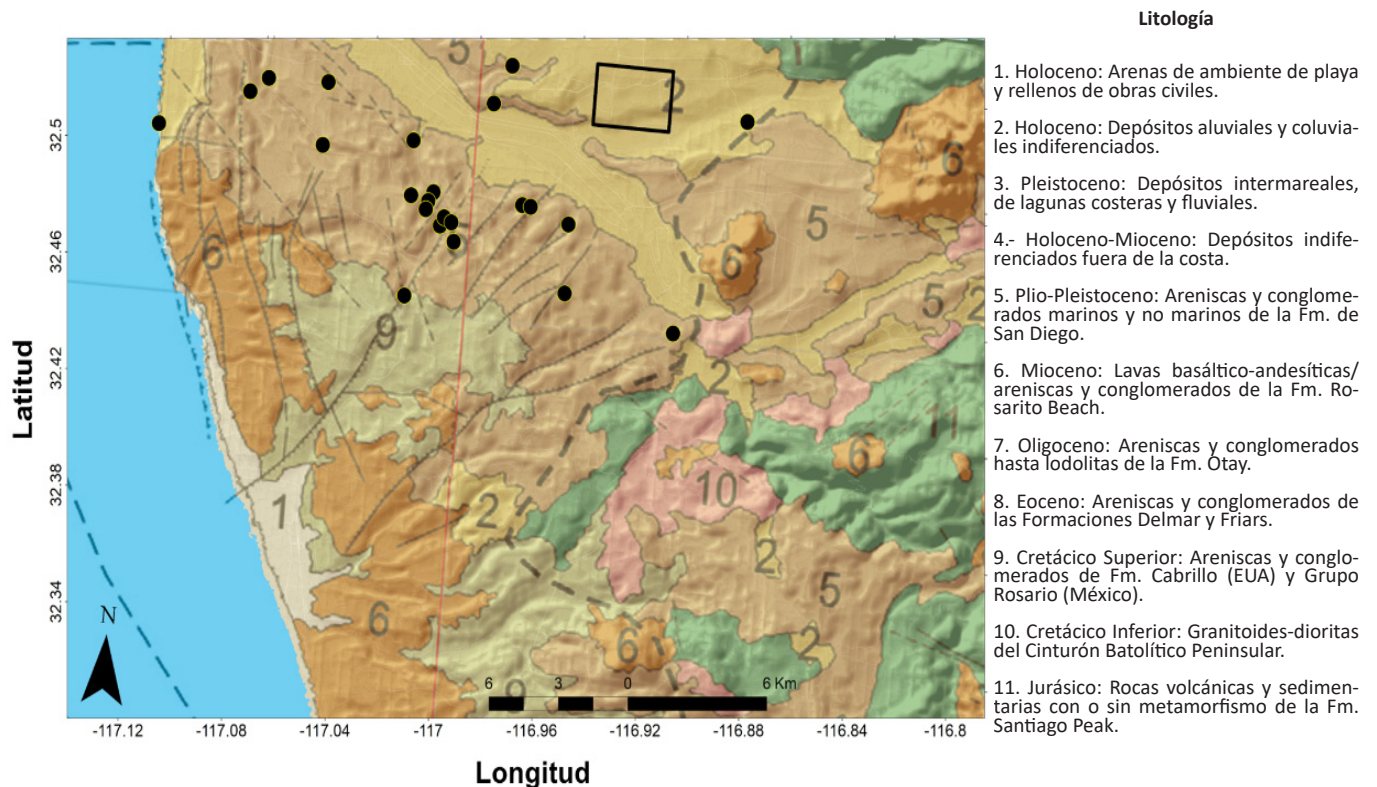


Figura 2. Mapa geológico del municipio de Tijuana (modificado de Delgado-Argote *et al.*, 2017). Se muestran los rasgos estructurales principales (líneas negras continuas). Los círculos representan los deslizamientos ocurridos en el municipio (con información de SEDATU, 2014). El cuadro negro indica el área de estudio

Las condiciones geológicas de la ciudad de Tijuana son propicias para deslizamientos de ladera (Figura 2), debido a que se localiza en un área tectónicamente activa y sobre sedimentos pobremente consolidados (Figura 2) (Delgado-Argote *et al.*, 1996; López-Álvarez, 2001; Mendoza-Garcilazo *et al.*, 2007; Domínguez-Morales *et al.*, 2016). Además, existen otras variables detonadoras como son las pendientes, fracturas, precipitación y saturación de agua en los sedimentos (Delgado-Argote *et al.*, 2011, 2012, 2017).

En el año 2020, en la colonia Vista Alamar ocurrió un deslizamiento (Figura 3), que afectó 13 viviendas, 12 de ellas catalogadas como de alto riesgo y una más en riesgo medio (Protección Civil Tijuana, 2020; Figuras 3 y 4). Al inicio, la zona del deslizamiento era una zona de depresión, probablemente el cauce de un arroyo (Figura 5-A), la cual fue rellenada para construir sobre ella una obra civil que según se aprecia en el campo es el cauce del drenaje (Figura 5-B). Posteriormente, ocurrió el deslizamiento de ladera causando un daño severo a la obra civil y afectaciones a las viviendas localizadas pendiente abajo (Figura 5-C).



Figura 3. A) y B) Deslizamiento ocurrido en la colonia Vista Alamar. Las flechas amarillas indican la dirección y sentido del movimiento, el círculo amarillo es el acercamiento visto en C, el círculo amarillo con doble línea es el acercamiento en D.

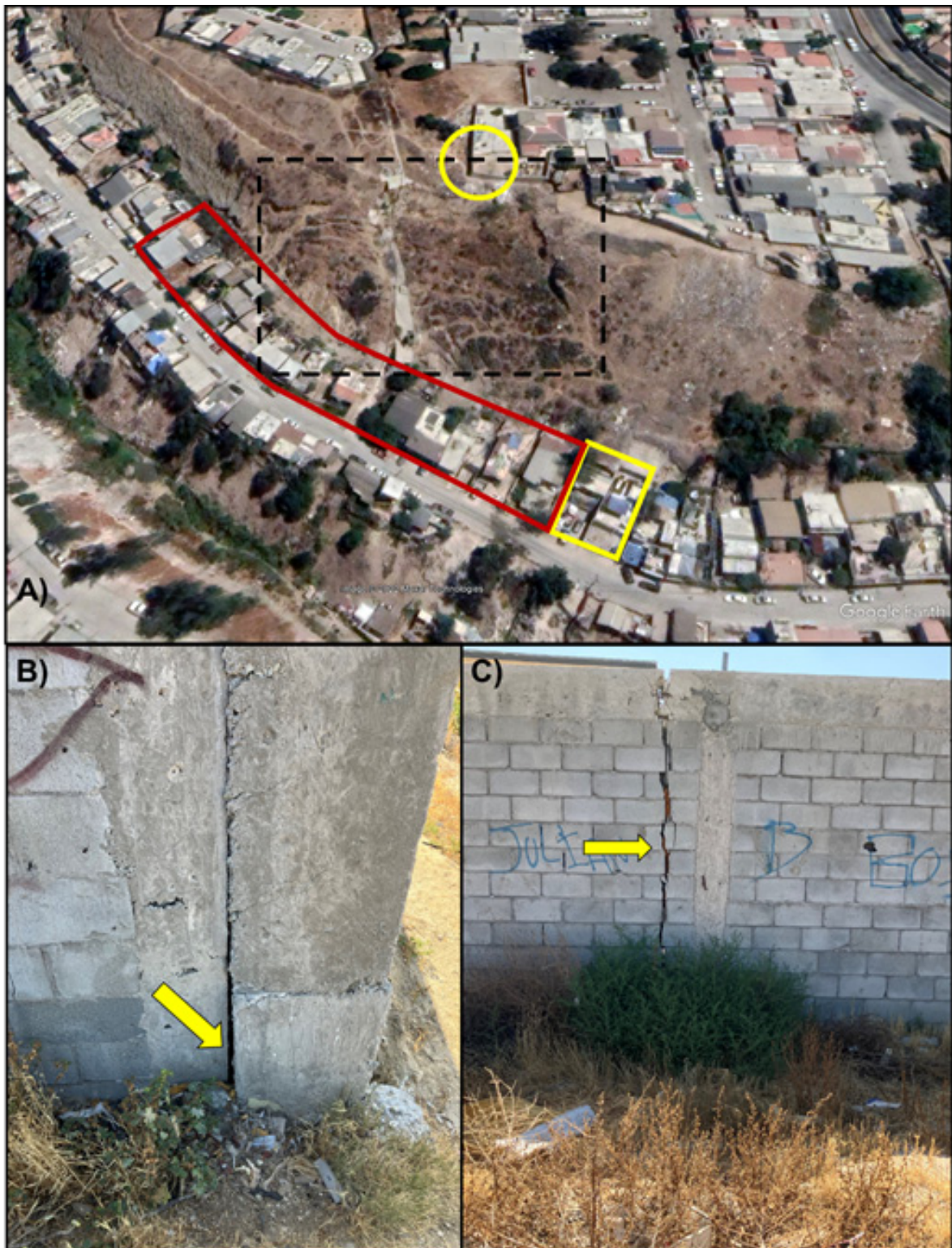


Figura 4. A) Zona afectada por el deslizamiento. El polígono rojo corresponde a viviendas en alto riesgo; el polígono amarillo corresponde a viviendas en riesgo medio (con información de Protección Civil Tijuana, 2020; imagen tomada de Google Earth). El cuadro segmentado indica la zona del deslizamiento. B) y C) Daños observados en una barda localizada en la corona del deslizamiento, su ubicación se muestra en el círculo amarillo en "A".



Figura 5. Evolución de la zona del deslizamiento (cuadro de línea segmentada). A) Hasta 2009, la zona del deslizamiento era una depresión con orientación NNE-SSW (línea negra segmentada). B) Del 2010 al 2020, se observa la depresión rellena. C) En el 2020, ocurre el deslizamiento dañando la obra construida sobre la depresión (imágenes tomadas de Google Earth).

Ruido sísmico y el método HVSR

El ruido sísmico es definido como las señales sísmicas generadas por el viento, fenómenos atmosféricos, actividades antropogénicas, ondas oceánicas, etc. (Bonnetfoy-Claudet *et al.*, 2006a). Los registros de ruido sísmico usualmente contienen señales generadas por todo tipo de fuentes con frecuencias traslapadas (Flores-Estrella *et al.*, 2022). Lunedei y Malischewsky (2015) mencionaron que el campo de ondas del ruido sísmico está compuesto por todas las fases sísmicas viajando en la superficie, *i.e.* viaja como una combinación de ondas de cuerpo y ondas de superficie, lo cual permite considerarlo para análisis a diferentes escalas. Desde los años 50 se ha usado el ruido sísmico para caracterizar la estructura del subsuelo (Aki 1957, 1965; Kanai *et al.* 1954).

Existen diversas metodologías de análisis, la más popular, es el cociente espectral H/V (Horizontal/Vertical), debido a su practicidad. El uso de ruido sísmico y el método H/V es una herramienta fácil de aplicar, la cual tiene la ventaja de ser rápida en la adquisición de datos, análisis y resultados (Cheng, 2020). La metodología, también denominada HVSR (Horizontal Vertical Spectral Ratio), fue inicialmente propuesta por Nogoshi e Igarashi (1971) y después retomada por Nakamura (1989, 2000, 2009; en Mucciareli *et al.*, 2009). El HVSR provee una estimación de los parámetros de las condiciones del sitio, especialmente en lugares con grandes amplificaciones y una geología simple del subsuelo (Nakamura, 1989, 1996, 2000; Lermo y Chávez-García, 1993, 1994a, 1994b; Bard, 1999; SESAME, 2004; Bonnetfoy-Claudet *et al.*, 2006a, 2006b; Zuccarello *et al.*, 2016; Bergamo *et al.*, 2019, 2021; Torrese *et al.*, 2020; Muzli *et al.*, 2021).

En áreas susceptibles a deslizamientos, la estructura del subsuelo se caracteriza por tener discontinuidades a lo largo de la cual el movimiento de deslizamiento de masa puede ocurrir. Esta superficie está marcada por fuertes contrastes en

la velocidad de corte (V_S). El uso de ruido sísmico y el método HVSR pueden detectar estos contrastes, permitiendo caracterizar la superficie en términos de su localización, profundidad, espesor, etc. (Pazzi *et al.*, 2017; Galea *et al.*, 2014; Panzera *et al.*, 2012). La metodología para el estudio de áreas susceptibles a deslizamientos, anteriormente mencionada, ha sido utilizada en diversas partes del mundo (Méric *et al.*, 2007; Imposa *et al.*, 2017; Pazzi *et al.*, 2017; Suhendra y Sugianto, 2018; Hussain *et al.*, 2019; Gallipolli *et al.*, 2000; Rezaei *et al.*, 2020; Noguchi *et al.*, 2021; Delgado *et al.*, 2021; Tebbouche *et al.*, 2022).

Como se ha mencionado la ciudad de Tijuana ha presentado deslizamientos en diferentes partes. En el ocurrido en la colonia Vista Alamar utilizamos mediciones de ruido sísmico y la metodología HVSR para caracterizar el deslizamiento, como una primera aproximación.

Base de datos y análisis

Para explorar el alcance del análisis del método HVSR, empleamos sismógrafos de periodo corto de tres componentes, SARA SS20, un digitalizador de 24 bits SL06 con 200 muestras por segundo, una batería y una antena GPS. Los registros de ruido sísmico, con una duración de 30 minutos, se tomaron en siete puntos a lo largo de la dirección del deslizamiento (Figura 6).

Las señales sísmicas obtenidas fueron preprocesadas y procesadas usando el software *Geopsy* (Wathelet *et al.*, 2020). Durante el preprocesado se removió la tendencia, se realizó la corrección por línea base y se filtraron en una banda de frecuencias de 0.25 a 25 Hz. Para el análisis se seleccionaron, de manera automática, ventanas de 30 segundos empleando el algoritmo STA/LTA con un STA/LTA mínimo de 0.20 y máximo de 2.00. Para la obtención de las curvas se consideró el promedio de las componentes horizontales (Ec. 1 y 2):

$$H(f) = \sqrt{\frac{N(f)^2 + E(f)^2}{2}} \quad (1)$$

$$H/V = \frac{H(f)}{V(f)} \quad (2)$$

donde $N(f)$, $E(f)$ y $V(f)$ son los espectros de las componentes del movimiento Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical, respectivamente. En la Figura 7-A, se muestra, a manera de ejemplo, las señales de ruido sísmico para las tres componentes registradas en el punto AL-05. En la Figura 7-B, se muestra las curvas HVSR obtenidas para cada ventana de tiempo, representadas por las líneas de colores; la línea negra continua indica el promedio y las líneas negras segmentadas indican la desviación estándar.

Una vez determinadas las curvas HVSR, el análisis consiste en invertir la curva completa para obtener un modelo del subsuelo, tal como ha sido propuesto en trabajos previos (Malischewsky y Scherbaum, 2004; Malischewsky *et al.*, 2010; Zor *et al.*, 2010; Tuan *et al.*, 2011; Flores *et al.*, 2013; Wathelet *et al.*, 2020). La inversión de la curva se llevó a cabo en el módulo *Dinver* del software *Geopsy* (Wathelet *et al.*, 2020), se estimaron las variaciones con la profundidad de las velocidades de las ondas compresional (V_p) y de corte (V_s), *i.e.*, los perfiles de velocidad de V_p y V_s . En el proceso de inversión cada parámetro fue ajustado a los datos observados, *i.e.*, la curva HVSR, con un mínimo error (desajuste). El desajuste es calculado con base en la ecuación 3 (Arintalofa *et al.*, 2020):



Figura 6. Distribución espacial de los puntos en donde se realizaron las mediciones de ruido sísmico (imagen tomada de Google Earth). Cuadro segmentado indica la zona del deslizamiento.

$$misfit = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{Di - Mi}{\sigma_i} \right)^2} \quad (3)$$

donde N es el número de datos de la curva HVSR, Di es dato resultante de la inversión, Mi es el modelo estructural del suelo apropiado a los parámetros de entrada en el modelo de referencia y σ_i es el error de la medida de los datos. Un 10% del ajuste de la dispersión (o de los perfiles del suelo) corresponde a un desajuste de aproximadamente 0.1 (<https://www.geopsy.org/>). Debido a que Di , Mi y σ_i tienen las mismas unidades, el desajuste es adimensional.

En la Figura 8, se muestra el proceso de inversión para curva HVSR mostrada en la Figura 7-B. En la Figura 8-A, se muestra la curva HVSR como la línea sólida oscura, con la desviación estándar para cada punto y las curvas de elipticidad, en colores, obtenida de los perfiles de velocidad (sintético). La barra de colores representa la escala del desajuste entre la curva observada HVSR y las curvas sintéticas. En las Figuras 8-B y 8-C se muestran los perfiles de velocidad para VP y VS y la escala de color corresponde al desajuste.

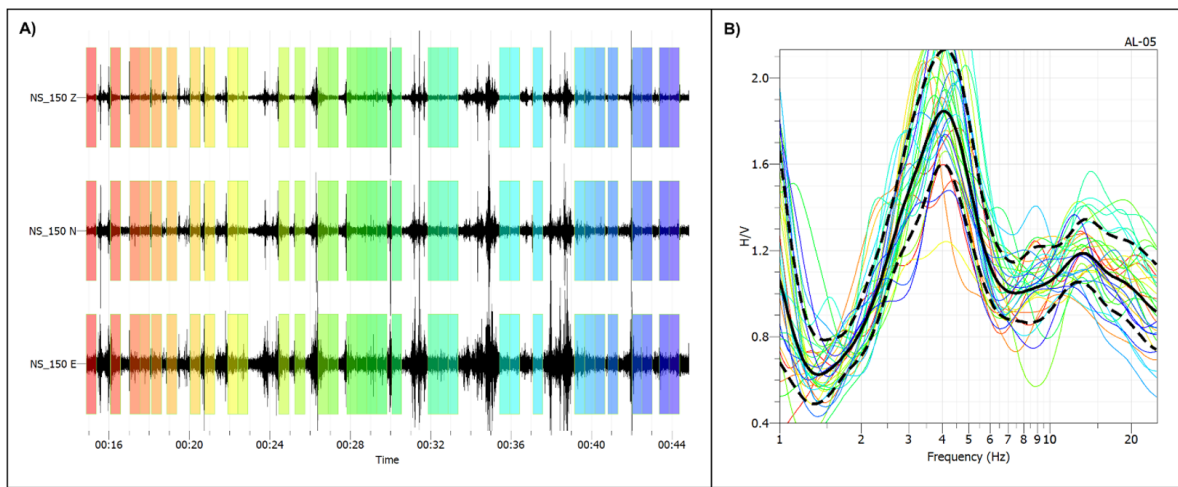


Figura 7. A) Señales de ruido sísmico para las tres componentes: Vertical, Norte-Sur y Este-Oeste. Los rectángulos de colores indican las ventanas seleccionadas; B) curvas HVSR calculadas para cada ventana de “A”, para el punto AL-05.

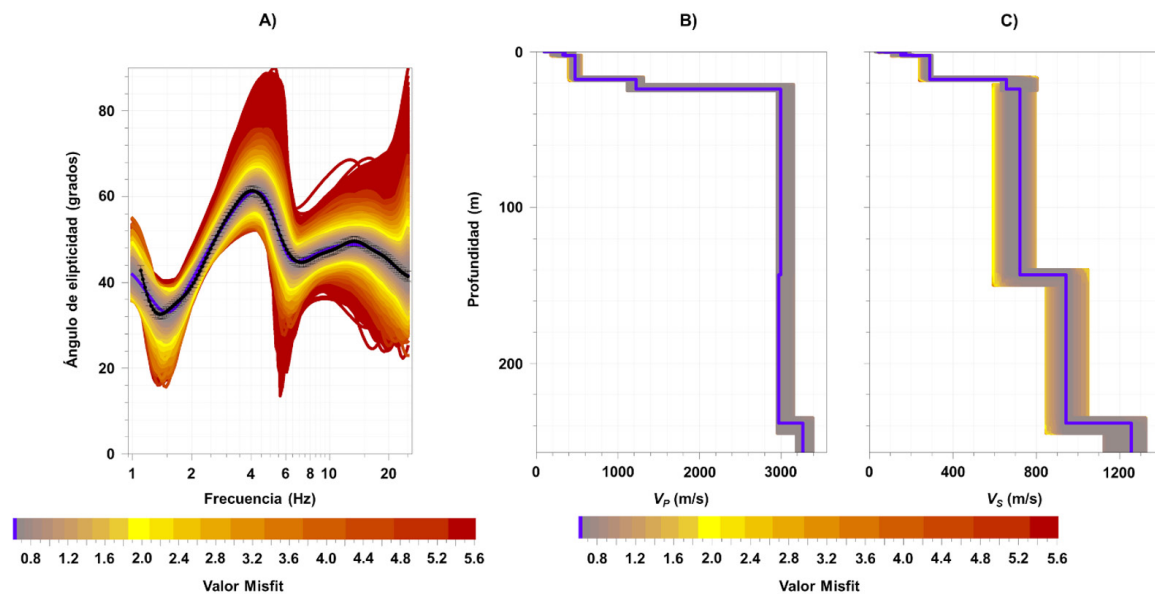


Figura 8. Punto AL-05. A) Ajuste a la curva de elipticidad; B) Perfil de VP; C) Perfil de VS. La línea en azul indica el modelo con el mínimo desajuste.

Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2, la cual contiene el número de ventanas empleadas para la determinación de las curvas HVSR, la frecuencia fundamental (f_0), rango de profundidad, rango de VS y VP, cocientes VP/VS,

así como el mínimo desajuste. Se elaboró el perfil con los resultados obtenidos para el deslizamiento de la colonia Vista Alamar, empleando el software Generic Mapping Tools (GMT; Wessel et al., 2019) en donde se muestra el contraste de las velocidades de la onda de corte (VS, Figura 9-A).

tabla 2. Parámetros obtenidos para cada uno de los puntos en el deslizamiento Alamar. Se muestra el número de ventanas empleadas para la determinación de la curva HVSR, Frecuencia fundamental (f_0), Rango de profundidad, Rango de VS, Rango de VP, Rango del cociente VP/VS y, el mínimo desajuste.

Punto	No. de ventanas	f_0 (Hz)	Rango de Profundidad (m)	Rango de Vs (m/s)	Rango de Vp (m/s)	Rango de Vp/Vs	Desajuste
AL-01	42	2.55	0.00 - 6.47	46.90 – 357.95	93.52 – 605.13	1.99 – 1.69	0.71
			6.47 - 7.77	457.7	825.18	1.80	
			7.77 - 22.58	522.25	1089.24	2.08	
			22.58 - 37.32	595.60 – 757.43	1606.36 – 1306.95	1.72	
			37.32 - 73.27	1059.52	1880.89	1.77	
			73.27 - 78.56	976.34	1949.34	1.99	
			78.56 - 119.58	1405.40	2709.88	1.92	
			119.58	1348.48	2606.51	1.93	
AL-02	44	3.61	0.00 – 5.11	111.49 – 302.20	202.32 – 513.33	1.81 – 1.69	0.62
			5.11 – 18.95	413.69	1013.99	2.45	
			18.95 – 23.85	615.10	1546.33	2.51	
			23.85 – 28.42	774.79	1470.28	1.89	
			28.42 – 86.25	1023.19	2398.85	2.34	
			86.25 – 131.99	1094.16	2321.46	2.12	
			131.99 – 169.56	2158.75	4850.00	2.24	
			169.56	2217.90	4836.38	2.18	
AL-03	45	2.23	0.00 – 6.12	57.21 – 376.28	298.53 – 693.89	5.2 – 1.84	0.51
			6.12 – 7.77	402.69	911.74	2.26	
			7.77 – 24.93	646.94	1315.16	2.03	
			24.93 – 49.29	711.76	1449.26	2.03	
			49.29 – 67.14	843.23	1438.60	1.70	
			67.14 – 106.23	1178.71	2184.55	1.85	
			106.23 – 148.72	1287.51	3271.49	2.54	
			148.72	1210.44	3900.22	3.22	

Punto	No. de ventanas	f_0 (Hz)	Rango de Profundidad (m)	Rango de V_s (m/s)	Rango de V_p (m/s)	Rango de V_p/V_s	Desajuste
AL-04	38	3.19	0.00 – 4.46	95.72 – 151.83	418.97 – 305.50	4.37 – 2.00	1.2
			4.46 – 8.13	166.69	270.59	1.62	
			8.13 – 10.58	245.90	541.17	2.20	
			10.58 – 15.97	255.81	418.97	1.63	
			15.97 – 27.41	381.23	715.75	1.87	
			27.41 – 29.64	358.13	1850.46	5.16	
			29.64 – 171.00	442.30	2059.95	4.65	
			171.00	611.24	3313.10	5.40	
AL-05	33	4.11	0.00 – 2.45	42.17 – 150.96	99.76 – 325.30	2.36 – 2.15	0.65
			2.45 – 17.12	202.41	349.88	1.72	
			17.12 – 23.60	286.75	468.40	1.63	
			23.60 – 142.97	652.96	1210.70	1.85	
			142.97 – 237.82	718.61	2995.99	4.16	
			237.82	943.17	2960.64	3.13	
AL-06	46	2.23	0.00 – 4.03	135.47 – 202.93	513.45 – 606.36	3.79 – 2.98	0.56
			4.03 – 17.90	207.82	369.19	1.77	
			17.90 – 22.95	322.03	823.96	2.55	
			22.95 – 49.80	390.82	850.86	2.17	
			49.80 – 54.50	422.08	758.45	1.79	
			54.50 – 199.96	766.00	2691.96	3.51	
			199.96	719.11	3845.66	5.34	
AL-07	2.1	49	0.00 – 4.49	93.35	158.92	1.66	0.37
			4.49 – 31.02	230.00	393.64	1.71	
			31.02 – 122.85	539.47	915.13	1.69	
			122.85	967.87	3677.90	3.79	

El perfil en la Figura 9-A, muestra el contraste de velocidades para la onda de corte en la dirección del deslizamiento. Se observa que la parte superior del perfil está caracterizada por velocidades bajas que varían entre ~ 100 y 500 m/s por arriba de la línea segmentada en la Figura 9-A. Los valores bajos de velocidad están asociados con el material del deslizamiento (Imposa *et al.*, 2017; Göktürkler *et*

al., 2008). Debajo de la zona de bajas velocidades se encuentra una zona de transición con velocidades de ~ 500 a 600 m/s (línea segmentada en Figura 9-A). Esta zona de transición es la interfaz entre el material de deslizamiento y la capa de roca, debido a las distintas características físicas y mecánicas de los materiales (Imposa *et al.*, 2017) y estaría representado la superficie del deslizamiento,

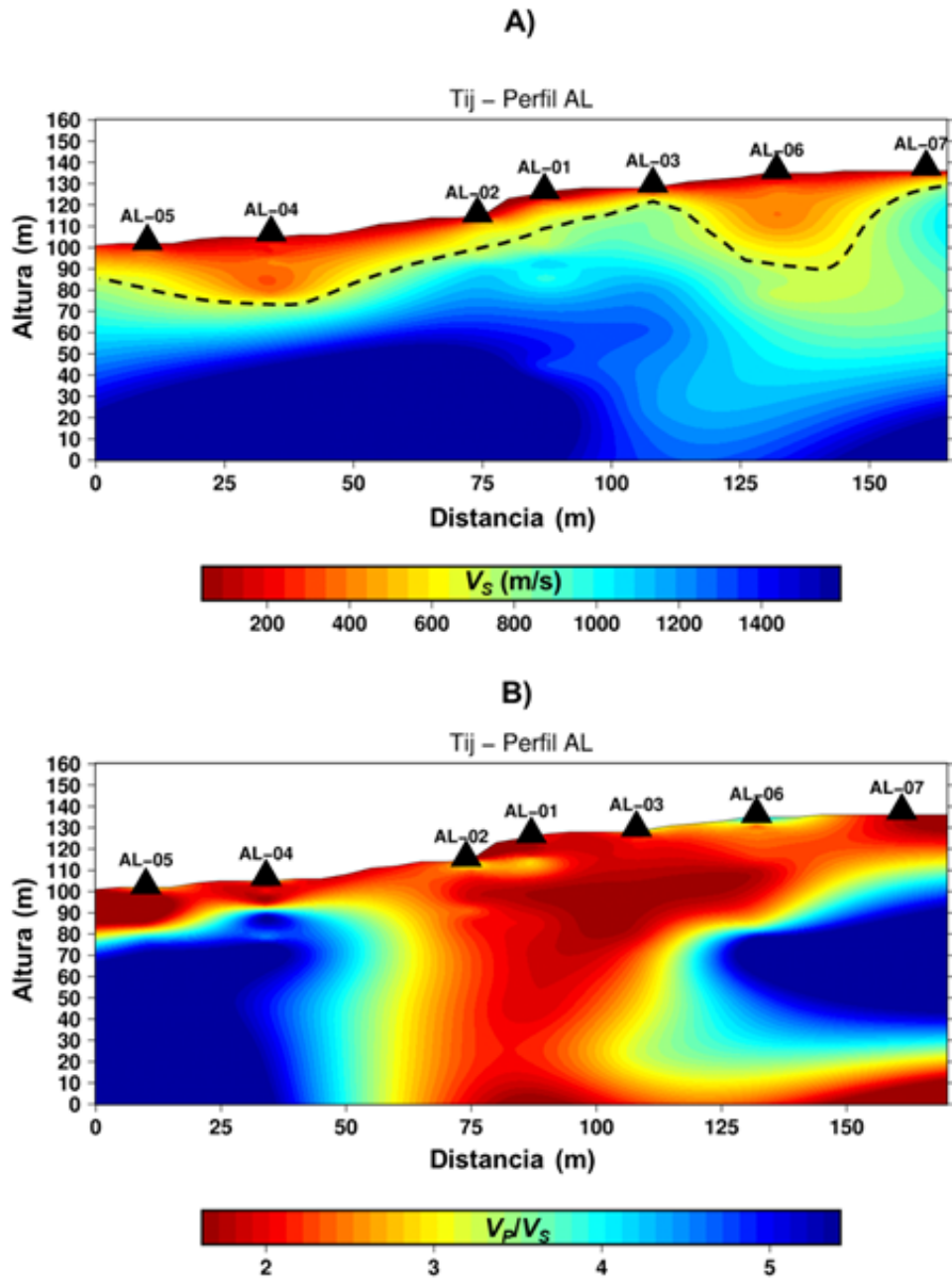


Figura 9. Perfil a lo largo de la dirección del deslizamiento de ladera de la colonia Vista Alamar, A) Perfil de contraste de velocidades de la onda de corte. B) Perfil de los cocientes V_p/V_s .

la cual separa la zona de bajas velocidades de aquellas altas que caracterizan el fondo del perfil. El rango de velocidades que representa a la superficie de deslizamiento (zona de transición), ha sido propuesta por varios autores quienes se apoyaron con métodos geológicos y geofísicos (*e.g.*, Göktürkler *et al.*, 2008; Delgado *et al.*, 2021; Bogoslovsky y Ogilvy, 1977).

En la Figura 9-A se observa, entre los puntos AL-03 y AL-07, una depresión que puede corresponder a material de relleno, cuyo espesor aproximado es de 30 m, los puntos AL-06 y AL-07 se encuentran al interior de la unidad habitacional Residencial Rincón de Otay (Figuras 5 y 6). Después del punto AL-03, localizado entre el deslizamiento y la unidad habitacional, hacia el sur, se observa que la superficie de deslizamiento presenta una inclinación mayor y es en esta parte, donde se observa el movimiento de material (Figura 3). Otra depresión, con materiales que presentan velocidades bajas, es observada en los puntos AL-04 y AL-05, los cuales están ubicados en la parte inferior del deslizamiento (calle Anáhuac), a unos cuantos metros del Cañón de la Amistad (al sur del punto AL-05). Esta depresión podría representar tanto material de relleno como material que se fue depositando pendiente abajo.

Los altos cocientes VP/VS se localizan en los extremos del perfil (Figura 9-B). Hacia el extremo sur podemos especular sobre la migración de fluidos hacia la parte inferior del deslizamiento. El cociente VP/VS incrementa cuando la saturación tiende al 100%, por lo que lo hace sensible al contenido de fluidos en el material (Liu y Zhao, 2015). El origen de los altos valores VP/VS en la parte norte del perfil, correspondiente a la parte superior del deslizamiento no es clara, por lo que es necesario extender el estudio y complementarlo con otras técnicas geofísicas (*e. g.*, métodos eléctricos). El alto valor en el punto AL-03 (Tabla 2) corresponde a la parte más somera (~30 cm), por lo que no se ve reflejado en el modelo 2D (Figura 9-A).

Conclusiones

En este estudio se llevó a cabo el uso de ruido sísmico y la metodología HVSR para caracterizar el deslizamiento ocurrido en la colonia Vista Alamar, Tijuana, Baja California. La metodología empleada, permitió la identificación de la posible superficie de deslizamiento y los resultados obtenidos corresponden con el movimiento observado en el campo.

La corona del deslizamiento está situada en el punto AL-03. La corona se extiende hacia el este y ha causado daño a las estructuras cercanas.

Los valores altos de VP/VS encontrados en la parte inferior del deslizamiento indican la presencia de fluidos, lo cual supone una migración de fluidos hacia la parte inferior del deslizamiento que era una depresión, probablemente el cauce de un arroyo orientado NNE-SSW y cuya pendiente es paralela a la del actual deslizamiento (Figura 5).

Derivado del análisis realizado se recomienda extender el estudio de ruido sísmico para estimar las dimensiones del deslizamiento y aplicar otras técnicas geofísicas, como los análisis eléctricos, con el fin de corroborar los resultados obtenidos.

Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Felipe Escalona por sus valiosos comentarios de revisión que contribuyeron a la mejora de este trabajo.

El trabajo de LA-B es apoyado por el programa Investigadoras e Investigadores por México del CONACYT (proyecto 2602). Agradecemos el apoyo del M. C. José G. Acosta Chang, M. C. Luis H. Mendoza Garcilazo y de la Unidad Estatal de Protección Civil de Tijuana.

Referencias

- Aki, K., 1957. Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415–456.
- Aki, K., 1965. A Note on the Use of Microseisms in Determining the Shallow Structures of Earth's Crust. *Geophysics*, 30, 4, 665–666. <https://doi.org/10.1190/1.1439640>
- Angeles, A. D. S., 2020. La adaptación ante procesos de remoción en masa en Tijuana, B. C. El Colegio de la Frontera Norte, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Tesis de maestría, p. 75.
- Aragón Arreola, M. D. J., 1994. Evaluación de riesgo geológico debido a movimientos de ladera en la Ciudad de Tijuana B.C., México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Tesis de maestría, p. 124.
- Arintalofa, V., Yuliyanto, G., Harmoko, U., 2020. Subsurface characterization of Diwak-Derekan geothermal field by HVSR analysis method based on microtremor data. *AIP Conference proceedings* 2296, 020057, <https://doi.org/10.1063/5.0030356>.
- Bard. P. Y., 1999. Microtremor Measurements: A Tool for site effect estimation?, In *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (eds), 1251-1279.
- Bergamo, P., Hammer, C., Fah, D., 2021. On the relation between empirical amplification and proxies measured at swiss and japanese stations: systematic regression analysis and neural network prediction of amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 111, No. 1, 101–120. <https://doi.org/10.1785/0120200228>
- Bergamo, P., Perron, V., Hammer, C., Faeh, D., Panzera, F., 2019. Assessing the Sensitivity of Site Condition Parameters towards seismic local Amplification and their potential Use for Site Response Prediction. 17th Swiss Geoscience Meeting, Fribourg, 2 p. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000390366>
- Bocco, G., Sánchez-Rodríguez, R. A., Reimann, H., 1993. Evaluación del impacto de las inundaciones en Tijuana (enero de 1993). *Uso integrado de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica*. *Revista Frontera Norte* No. 10, vol. 5. Pp. 53-83.
- Bogoslovsky, V. A., Ogilvy, A. A., 1977. Geophysical methods for the investigations of landslides. *Geophysics*, Vol. 42, No. 3, P. 562-571.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P. Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J., Fäh, D., 2006a. H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulation. *Geophysical Journal International*, 167, 2, 827–837. [doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03154.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03154.x).
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., Bard, P. Y., 2006b. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. *Earth Science Reviews*, 79, 3-4, 205–227. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.07.004>
- Cheng, T., 2020. Statistical methods for metermining f0 and its mariance from mingle- and multi-station HVSR measurement. Ph. D. Thesis. The University of Texas, Austin.
- Cruden, D. M., 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 43.
- Cruden, D. M., Varnes, D. J., 1996. Landslide types and processes. In Schuster, R. L., Turner, A. K., (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press,

Washington, DC, pp 36–75.

- Delgado, J., Galiana-Merino, J. J., García-Tortosa, F.J., Garrido, J., Lenti, L., Martino, S., Peláez, J. A., Rodríguez-Peces, M. J., Sanz de Galdeano, C., Soler-Llorens, J. L., 2021. Ambient noise measurements to constrain the geological structure of the Güevéjar landslide (S Spain). *Applied Sciences*, 11, 1454. <https://doi.org/10.3390/app11041454>
- Delgado-Argote, L. A., Hinojosa-Corona, A., Aragón-Arreola, M., Frías-Camacho, V. M., 1996. Estudio de riesgo reológico en Tijuana, Baja California con base en rasgos estructurales y la respuesta del terreno. *GEOS*, Vol. 16, No. 2. Pp 57-89.
- Delgado-Argote, L. A., Gómez-Castillo, G., Peña-Alonso, T. A., Torres-Carrillo, X. G., Avilez-Serrano, P., 2011. Rasgos geológicos y morfológicos asociados con peligros naturales en los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto, Tijuana, Baja California. *GEOS*, 30 (2).
- Delgado-Argote, L. A., Hurtado-Brito, J. C., Avilez-Serrano, P., Gómez-Castillo, G., 2012. Factores geológicos y antrópicos de riesgo en Tijuana, Baja California: El caso del fraccionamiento Jardines de Agua Caliente. *GEOS*, 32(2), 1-25.
- Delgado-Argote, L. A., Pérez-Flores, M. A., Herrera-Barrientos, F., Sarychikhina, O., Contreras-López, M., Ochoa-Tinajero, L., Avilés-Esquivel, T. A., 2017. Interpretación geológica y geoeléctrica de un deslizamiento rotacional relacionado con paleo drenaje en el fraccionamiento Valle del Sur, en Tijuana, Baja California. *GEOS*, 37(2), 1-17.
- Del Gaudio, V., Muscillo, S., Wasowski, J., 2014. What we can learn about slope response to earthquakes from ambient noise analysis: An overview. *Engineering Geology*, 182, 182-200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.05.010>
- Domínguez-Morales, L., Castañeda-Martínez, A., González-Huesca, A. E., 2016. Análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en un sistema de alerta temprana por inestabilidad de laderas. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)
- Flores-Estrella, H., Ávila-Barrientos, L., González-Huizar, H., 2022. Seismological footprint of an anomalous atmospheric activity registered in March 2021, in Baja California, Mexico. *Acta Geophysica*, <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00941-1>.
- Flores, H., Malischewsky, P., Jentzsch, G., 2013. H/V spectral ratio analysis and Rayleigh modelization in Eastern Thuringia, Germany. *Geofísica Internacional*, 52-4: 355-364.
- Galea, P., D'Amico, S., Farrugia, D., 2014. Dynamic characteristics of an active coastal spreading area using ambient noise measurements (Anchor Bay, Malta). *Geophysical Journal International*, 199, 1166-1175. <http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggu318>.
- Gallipoli, M. R., Lapenna, V., Lorenzo, P., Mucciarelli, M., Perrone, A., Piscitelli, S., Sdao, F., 2000. Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in Southern Italy. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4, pp. 117-128.
- Göktürkler, G., Balkaya, Ç., Erhan, Z., 2008. Geophysical investigation of a landslide: The Altındağ landslide site, İzmir (western Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 65, 84–96.
- Gómez Castillo, G., 2010. Peligro geológico en la zona de playa Saldamando- El mirador en la autopista Tijuana – Ensenada. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Tesis de maestría, p. 105.

- Hussain, Y., Martínez-Carvajal, H., Condori, C., Uagoda, R., Cárdenas-Soto, M., Cavalcante, A. L. B., Cunha, L. S. Da., Martino, S., 2019. Ambient seismic noise: a continuous source for the dynamic monitoring of landslides. *Terræ Didactica*, 15, 1-5, e01001. doi: 10.20396/td.v15i0.8652455
- Imposa, S., Grassi, S., Fazio, F., Rannisi, G., Cino, P., 2017. Geophysical surveys to study a landslide body (north-eastern Sicily). *Natural Hazards*, 86, S327-S343. DOI 10.1007/s11069-016-2544-1
- INEGI, 2022. <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/>
- Jongmans, D., Garambois, S., 2007. Geophysical investigation of landslides: a review. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178, No. 2, pp. 101-112.
- Kanai, K., Osada, T., Tanaka, T., 1954. Measurement of the microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 32, 199-209.
- Kjekstad, O., Highland, L., 2009. Economic and social impacts of landslides. In Sassa, K., Canuti, P. (Eds.). *Landslides-Disaster Risk Reduction*. Springer. P. 649.
- Lermo, J., Chávez-García, F. J., 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 83, No. 5, pp. 1574-1594.
- Lermo, J., Chávez-García, F. J., 1994a. Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13, 413-423.
- Lermo, J., Chávez-García, F. J., 1994b. Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 5, pp. 1350-1364.
- Liu, Z., Zhao, J., 2015. An experimental Study of Velocity-Saturation Relationships in Volcanic Rocks. *The Open Petroleum Engineering Journal*, 8, 142-152.
- López-Álvarez, L. A., 2001. Diagnóstico de riesgos urbanos en el área metropolitana de Tijuana. H. Ayuntamiento Constitucional del Municipio de Tijuana B. C. <http://www.proteccioncivil.tijuana.gob.mx/pdf/planes/estudios/>
- Lunedei, E., Malischewsky, P., 2015. A Review and Some New Issues on the Theory of the H/V Technique for Ambient Vibrations. In: Ansal A. (ed.) *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, Vol. 39. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16964-4_15.
- Malischewsky, P., Scherbaum, F., 2004. Love's formula and H/V-ratio (ellipticity) of Rayleigh waves. *Wave Motion*, 40, 57-67.
- Malischewsky, P., Zaslavsky, Y., Gorstein, M., Pinsky, V., Tran, T. T., Scherbaum, F., Flores, H. E., 2010. Some new theoretical considerations about the ellipticity of Rayleigh waves in the light of site effect studies in Israel and Mexico. *Geofísica Internacional*, 49, 141-152.
- Mendoza-Garcilazo, L. H., Vásquez-Hernández, S., Rosquillas-Navarro, A., 2007. Movimientos de ladera o de masas de terreno en Tijuana, B. C. Sus causas y prevenciones. Ayuntamiento Constitucional de Tijuana.
- Méric, O., Garambois, S., Malet, J.-P., Cadet, H., Guéguen, P., Jongmans, D., 2007. Seismic noise-based methods for soft-rock landslide characterization. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178, No. 2, pp.137-148.

- Mucciarelli, M., Herak, M., Cassidy, J., 2009. Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer Dordrecht.
- Muzli, M., Kambali, R. A. P., Nugraha, J., Sulastri, S., Hakim, A. R., Rohadi, S., Triyono, R., Riama, N. F., Karnawati, D., 2021. Site characterizations of BMKG seismic network, Indonesia, based on HVSR analysis. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 873, The 3rd Southeast Asian Conference on Geophysics 3-5 November 2020, Bandung, Indonesia (Virtual). doi:10.1088/1755-1315/873/1/012025
- Nakamura, Y., 1989. A Method for Dynamic characteristics Estimation of Subsurface using Microtremors on the Ground Surface, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No.1.
- Nakamura, Y., 1996. Real-time information systems for hazards mitigation. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.
- Nakamura, Y., 2000. Clear Identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. 12 World Conference of Earthquake Engineering, New Zealand.
- Nogoshi, M., Igarashi, T., 1971. On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2), Journal Seismological Society Japan, 24, 26-40.
- Noguchi, T., Nishimura, I., Kagawa, T., 2021. Estimation of subsurface structure of landslide area based on microtremor observation in the Hojoshima, Nawashiro and Amedaki area, Tottori, Japan. International Journal of GEOMATE, Vol.21, Issue 88, pp.48-53. DOI: <https://doi.org/10.21660/2021.88.gxi279>
- Oliva González, A.O., Mascareño Jiménez, D., Gallardo Amaya, R.J., Berumen Rodríguez, M.A., 2021. Urban growth and landslide risk in Tijuana, Mexico. Academia Letters, Article 3386. <https://doi.org/10.20935/AL3386>.
- Panzer, F., D'Amico, S., Lotteri, A., Galea, P., Lombardo, G., 2012. Seismic site response of unstable steep slope using noise measurements: the case study of Xemxija bay area, Malta. Natural Hazards and Earth System Sciences, 12, 11, 3421-3431. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-12-3421-2012>.
- Pazzi, V., Tanteri, L., Bicocchi, G., D'Ambrosio, M., Caselli, A., Fanti, R., 2017. H/V measurements as an effective tool for the reliable detection of landslide slip surfaces: Case studies of Castagnola (La Spezia, Italy) and Roccalbegna (Grosseto, Italy). Physics and Chemistry of the Earth, 98, 136-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2016.10.014>
- Pradhan, S. P., Siddique, T., 2019. Mass Wasting: An overview. In Pradhan, S. P., Vishal, V., Singh, T. N., (Eds.), Landslides: Theory, Practice and Modelling. Advances in Natural and Technological Hazards Research, Springer, P. 313.
- Protección Civil Tijuana, 2020. Ficha técnica Vista Alamar, 30 de marzo 2020. XXIII Ayuntamiento 2019-2021, Tijuana, Baja California, P. 1
- Rezaei, S., Shooshpasha, I., Rezaei, H., 2020. Evaluation of ground dynamic characteristics using ambient noise measurements in a landslide area. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79, 1749–1763. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01637-5>
- SEDATU, 2014. Atlas de Riesgos Naturales del municipio de Tijuana 2014. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.

- SESAME, 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation SESAME European Research Project, deliverable D23.12.
- Suhendra, Z. B. C., Sugianto, N., 2018. Geological condition at landslides potential area based on microtremor survey. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 13, No. 8, 3007-3013.
- Tebbouche, M. Y., Benamar, D. A., Hassan, H. M., Singh, A. P., Bencharif, R., Machane, D., Meziani, A. A., Nemer, Z., 2022. Characterization of El Kherba landslide triggered by the August 07, 2020, Mw = 4.9 Mila earthquake (Algeria) based on post-event field observations and ambient noise analysis. *Environmental Earth Sciences*, 81, 46. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10172-8>
- Torrese, P., Rossi, A. P., Unnithan, V., Pozzobon, R., Borrmann, D., Lauterbach, H., Luzzi, E., Sauro, F., 2020. HVSr passive seismic stratigraphy for the investigation of planetary volcanic analogues. *Icarus*, 351, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113970>.
- Tuan, T. T., Scherbaum, F., Malischewsky, P. G., 2011. On the relationship of peaks and troughs of the ellipticity (H/V) of Rayleigh waves and the transmission response of single layer over half-space models: Relationship of peaks and troughs of H/V-ratio. *Geophysical Journal International*, 184, 793–800. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04863.x>
- Turner, A. K., 2018. Social and environmental impacts of landslides. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3, 70. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0175-y>
- Wathelet, M., Chatelain, J.-L., Cornou, C., Di Giulio, G., Guillier, B., Ohrnberger, M., Savvaidis, A., 2020. Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1878--1889, doi: 10.1785/0220190360.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., Tian, D., 2019. The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556–5564. doi.org/10.1029/2019GC008515.
- Wong, H. H., Ho, K. K. S., Chan, Y. C., 1997. Assessment of consequence of landslides. In Cruden, D., Fell, R. (Eds.), *Landslide Risk Assessment*. Balkema, Rotterdam.
- Zor, E., Özalaybey, S., Karaaslan, A., Tapırdamaz, M. C., Özalaybey, S. Ç., Tarancıoğlu, A., Erkan, B., 2010. Shear wave velocity structure of the İzmit Bay area (Turkey) estimated from active–passive array surface wave and single-station microtremor methods. *Geophysical Journal International*, 182, 1603–1618. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04710.x>
- Zuccarello, L., Paratore, M., La Rocca, M., Ferrari, F., Messina, A., Branca, S., Contrafatto, D., Galluzzo, D., Rapisarda, S., García, L., 2016. Shallow velocity model in the area of Pozzo Pittarone, Mt. Etna, from single station, array methods and borehole data. *Annals of Geophysics*, 59, 4, doi:10.4401/ag-7086.

Manuscrito recibido: 23 de noviembre de 2022

Recepción del manuscrito corregido: 16 de diciembre de 2022

Manuscrito aceptado: 20 de enero 2023