

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^{1*} y Ana Teresa Mendoza-Rosas²

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

² 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).

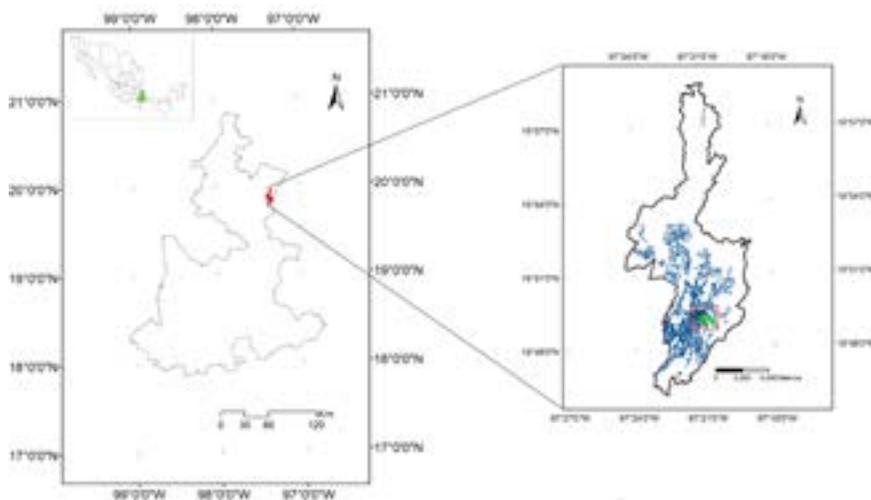


FIGURA 1. En el recuadro de arriba a la izquierda se muestra la República Mexicana y el Estado de Puebla (en verde), en seguida, localización dentro del estado del municipio de Teziutlán (en rojo). A la derecha se indica en el cuadro en rojo la zona de estudio y su ubicación dentro del municipio, en 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 m³ (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.

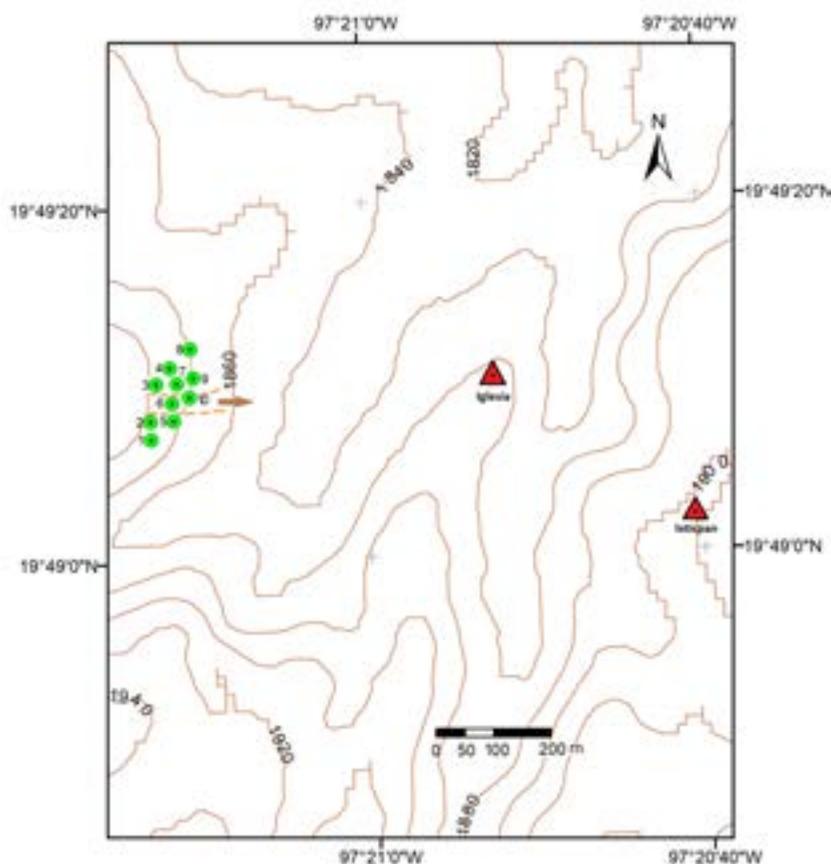


FIGURA 5. Red geodésica para observar desplazamientos en la ladera de la colonia La Aurora en Teziutlán, Pue. Las curvas de nivel son a cada 20m. Los círculos verdes son los puntos para prisma y los triángulos son las estaciones remotas de control. La flecha en café y la línea punteada muestran la dirección 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 (Δt), 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>T-1 (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>T-6 (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>T-2 (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>T-7 (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>T-3 (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>T-8 (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>T-4 (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>T-9 (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>T-5 (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>T-10 (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.

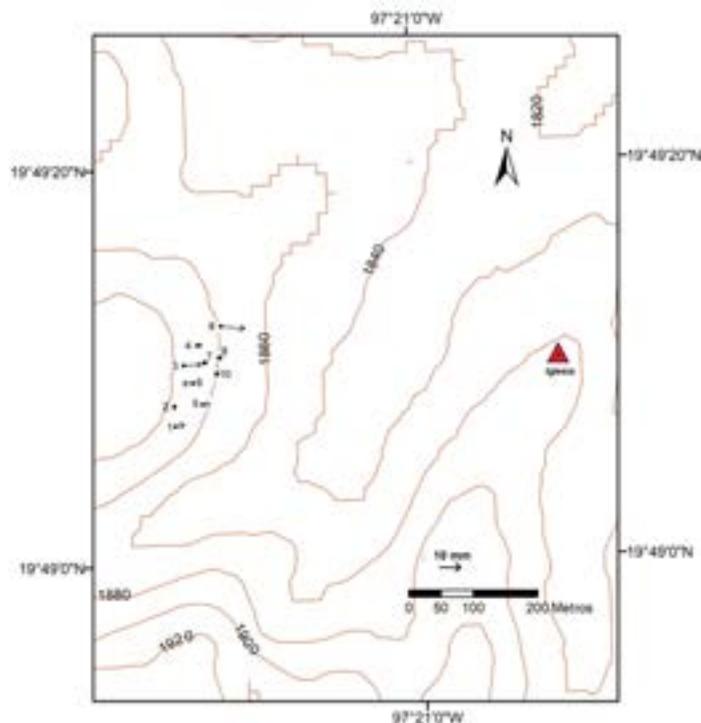


FIGURA 6. Vectores de desplazamiento observados en los vértices T1-T10. La escala de los vectores se indica con la flecha en negro al pie de la figura.

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.

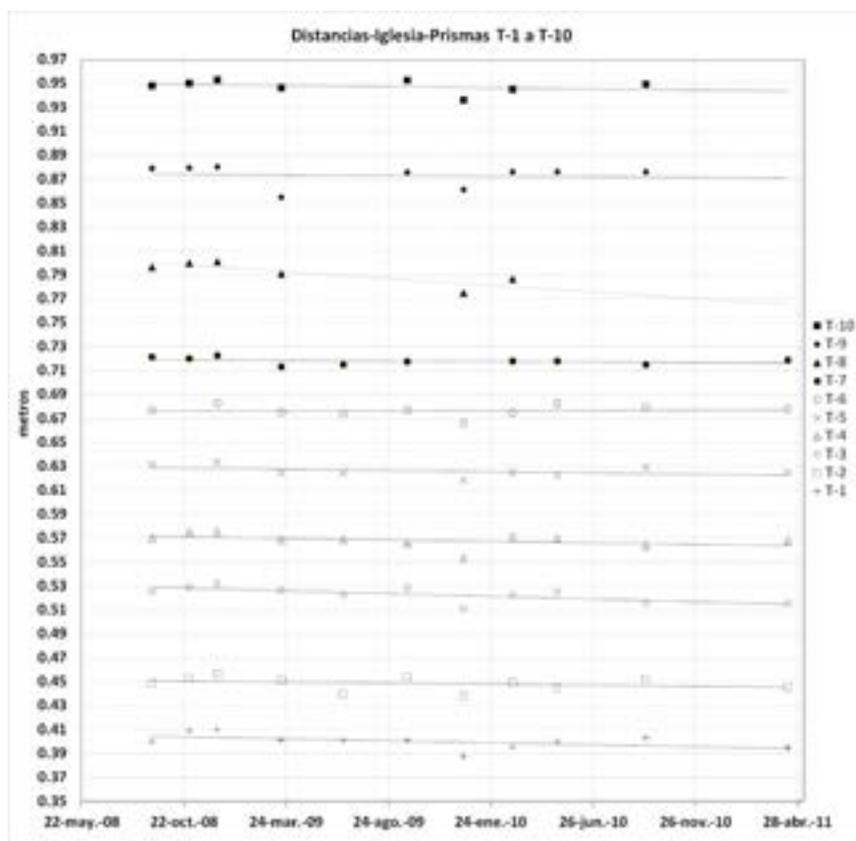


FIGURA 7. Distancias observadas entre la estación de control Iglesia y los puntos para prisma, de septiembre de 2008 a abril de 2011. Cada división de la escala vertical son 2 centímetros, los valores se normalizaron para fines de visualización.

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).

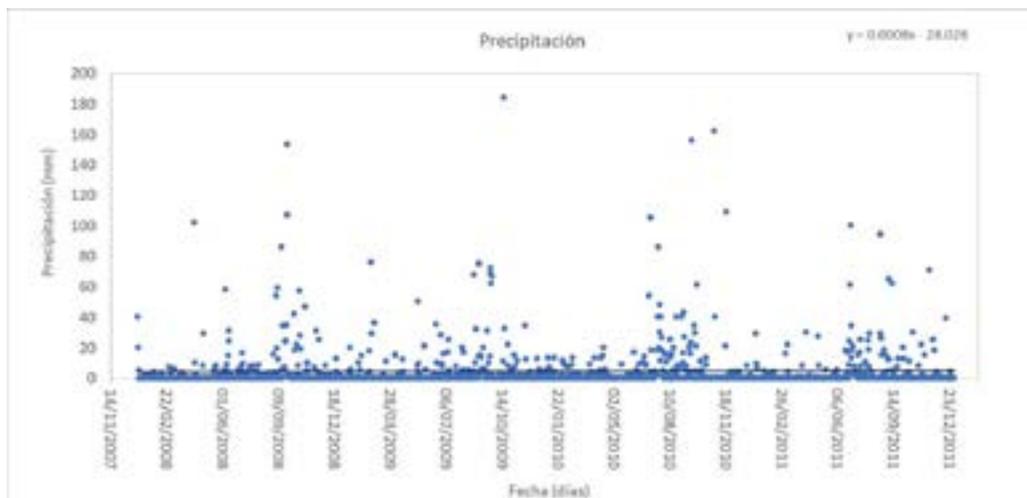


FIGURA 8. Serie de tiempo de la precipitación diaria en la estación meteorológica Teziutlán; fuente <https://smn.conagua.gob.mx>. La línea negra y la ecuación corresponden al ajuste de una regresión lineal.

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)
- 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.