

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra con orientación
en Geociencias Ambientales**

**Análisis del deslizamiento en la carretera Tijuana-Ensenada
(km 93 +50) a partir modelos de relieve de alta resolución
espacial**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Patricia Andrade García

Ensenada, Baja California, México
2016

Tesis defendida por
Patricia Andrade García
y aprobada por el siguiente Comité

M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Director de tesis

Dr. Luis Alberto Delgado Argote

Dr. Horacio De la Cueva Salcedo

Dr. Francisco Suárez Vidal



Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la
Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Patricia Andrade García** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Análisis del deslizamiento en la carretera Tijuana-Ensenada (km 93 +50) a partir modelos de relieve de alta resolución espacial

Resumen aprobado por:

M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Director de tesis

El aumento de actividad antropogénica en la zona costera de Baja California ha incrementado la susceptibilidad a los deslizamientos de laderas. La combinación particular de historia geológica, tipo de rocas, condiciones tectónicas y del relieve, así como la persistente acción del oleaje en la costa de la Bahía Salsipuedes, la expone como una zona especialmente propensa a eventos de remoción de masa. Este trabajo se enfoca en el análisis del deslizamiento rotacional en el km 93 +50 ocurrido el 28 de diciembre de 2013 en la Carretera escénica Tijuana-Ensenada, se discuten los posibles factores que desencadenan el deslizamiento y la dinámica de los bloques deslizantes. Se analiza una serie de tiempo de mediciones de la topografía con técnicas emergentes como levantamientos LiDAR terrestre, aéreo y fotogrametría por drones. Se calculó una serie de modelos digitales de alta resolución (MDE) para estimar los cambios en elevación y volumen desde una situación pre-deslizamiento hasta la completa reconstrucción en la carretera, se analiza la evolución en la transformación del relieve. La primera reconstrucción 3D post-deslizamiento se hizo a partir de fotos aéreas tomadas por dron unas horas después del evento. Se estimó un volumen desplazado cercano a los 390 mil m³ durante el deslizamiento. En la transformación del relieve se analizó un levantamiento laser terrestre (TLS), un modelo de elevación derivado de estéreo por satelital GeoEye, un levantamiento aéreo LiDAR y un último de fotografía con dron. Los vectores de movimiento relativo de los bloques deslizantes se determinaron a partir de actitud de lineaciones con respecto al rumbo y echado de los planos de deslizamiento. Se extrajeron los vectores de las estrías en la pared de piso registrados fielmente en la nube de puntos del escaneo con láser terrestre. La reparación de la carretera afectada por el deslizamiento tardó más de un año en restablecer el tráfico. Existen tramos cercanos al deslizamiento de 2013 propensos a correr la misma suerte. Los resultados de este trabajo serán de utilidad para comprender mejor las características de esta zona y de los factores que desencadenan los deslizamientos. La metodología usada puede servir como modelo en eventos futuros.

Palabras clave: Deslizamiento, Carretera Tijuana-Ensenada, LiDAR, Fotogrametría por dron SfM, escáner laser terrestre TLS.

Abstract of the thesis presented by **Patricia Andrade Garcia** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Science with orientation in Environmental Geoscience.

Analysis of landslide of Tijuana-Ensenada Highway (km 93 +50) from relief models of high spatial resolution

Abstract approved by:

M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Thesis Director

The increase of anthropogenic activity in the Baja California coastal zone has augmented the susceptibility to landslides. The combination of geological and tectonic history, rock types, steep slopes and the persistent wave erosion in Salsipuedes Bay, makes this zone prone to landslides along the coastal bluffs. This work focuses on the rotational landslide that occurred on December 28, 2013 at km 93 +50 of Tijuana-Ensenada Scenic Road. We analyze the possible factors that triggered the failure of the land mass. A series of high resolution digital terrain models (DTM) were used to estimate the elevation and volume change between pre- and post-landslide up to the complete reconstruction of highway, the terrain transformation is presented. The first post-event 3D reconstruction was from a series of aerial photos taken by a drone few hours after the landslide and applying the emergent Structure from Motion (SfM) technology. A displaced volume close to 390,000 m³ was calculated for the landslide. To continue with the landscape transformation, we used a satellite-derived DTM from a GeoEye stereo pair, a Terrestrial Laser Scan (TLS), a LiDAR aerial survey and a final DTM derived from drone photogrammetry after the highway was completely repaired. Relative motion of the sliding blocks was determined from lineation's attitude. Motion vectors were extracted from striations carved on the footwall by the sliding hanging wall and accurately recorded in the TLS point cloud. It took almost a year to restore traffic after the landslide. There are highway stretches close to the 2013 landslide that are prone to the same fate. The results of this work will be useful to better understand the characteristics of this area and the factors that trigger landslides. The methodology used can serve as a model for future events.

Keywords: Landslide, Tijuana-Ensenada Scenic Highway, LiDAR, Structure from Motion SfM, Terrestrial Laser Scanner TLS.

Dedicatoria

A mis padres, María de Lourdes García Villegas y Ramón Andrade Ojeda por la educación y el apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida.

A mis hermanas, por Rosario y Sandra, por sus consejos y cariño.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por la oportunidad y el apoyo económico para realizar esta maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento de dos años como becario (No. becario: 337992) para obtener el grado de maestro en ciencias.

Al M.C. Alejandro Hinojosa Corona por permitirme trabajar en el proyecto y por todo el apoyo brindado en la realización de esta tesis.

A los miembros del comité: Dr. Luis Alberto Delgado Argote, Dr. Horacio Jesús De la Cueva Salcedo, M.C. Francisco Suárez Vidal (qepd). Por todos los consejos y comentarios la realización de la tesis.

A CAPUFE y Protección Civil por permitirnos el acceso al área del deslizamiento.

A Alejandro González Ortega por el apoyo en la mediciones GPS para los puntos de control para el MDE obtenido de las imágenes estéreo par GeoEye.

A Carlos Vargas de Cavaro Comunicación por tomar las fotos con su dron DJI S800 el día del deslizamiento.

A Ulises Uscanga de FARO por realizar las mediciones de demostración del escaneo laser terrestre (TLS) con el equipo FARO Focus X330.

Al Dr. Juan Fernández de la National Center for Airborne Laser Mapping (NCALM) por coleccionar los datos LiDAR del deslizamiento durante el proyecto de mapeo de la Falla Agua Blanca.

A Martin Isenburg por la licencia LASmoons para poder utilizar el programa LAsTools por tres meses.

Al personal técnico Octavio Meillón, Sergio Arregui, Luis Gradilla por su valioso el apoyo en campo y para aprender a usar los programas usados en esta tesis.

Un agradecimiento especial a Mariana Espinosa, Laura Vallín y Abel Gutiérrez por su ayuda en el trabajo de campo realizado.

Al personal de Ciencias de la Tierra, por la ayuda brindada durante mi estancia y especialmente a Ana Rosa Soto y Olympia Caudillo.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xii
Capítulo 1	
1. Introducción	1
1.1. Deslizamientos en zonas costeras.....	2
1.2. Antecedentes	6
1.3. Área de estudio y características topográficas	7
1.3.1. Marco Geológico	10
1.3.2. Estructuras regionales y sismicidad	12
1.3.3. Clima y vegetación	14
1.4. Objetivos	15
Capítulo 2	
2. Metodología.....	17
2.1. Materiales	17
2.2. Procesamiento de nubes de puntos.....	26
2.2.1. Obtención de Modelos Digitales de Elevación.....	26
2.2.2. Estimación de cambio volumétrico	28
2.2.3. Análisis de la superficie de deslizamiento en la nube de puntos TLS	29
2.3. Análisis de factores desencadenantes	31
Capítulo 3	
3. Resultados.....	32
3.1. Modelos Digitales de Elevación (MDE)	32
3.2. Estimación de cambio volumétrico	36
3.3. Análisis de la superficie de deslizamiento en la nube de puntos TLS	41
3.4. Análisis de factores desencadenantes	42

Capítulo 4

4. Discusión	51
4.1. Modelos Digitales de Elevación (MDE)	51
4.2. Estimación de cambio volumétrico	54
4.3. Análisis de la superficie de deslizamiento en la nube de puntos TLS	55
4.4. Análisis de factores desencadenantes	56

Capítulo 5

5. Conclusiones	58
Literatura citada	60

Lista de figuras

Figura	Página
1 Mapa de deslizamientos reportados entre 2007-2016 entre la zona sur de California y noroeste de Baja California. El tamaño y el color de la simbología indican el número de muertes reportadas para cada evento. En base a los registros de los deslizamientos en la zona fronteriza entre Estados Unidos y México se observa que este tipo de eventos no suelen representar pérdidas de vidas humanas ya que se asocian a deslizamientos de escala media a pequeña. Fuente: NASA, 2016a; NASA, 2016b.....	5
2 Nomenclatura de un deslizamiento rotacional desarrollada por la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (IAEG, 1990). Diagrama idealizado de los atributos morfológicos (izq.) y de las dimensiones de un movimiento de ladera (der.)	5
3 Mapa de la región NW del municipio de Ensenada, Baja California. El mapa se enmarca con rojo la zona de estudio que se sitúa a 16 Km al NW de la ciudad de Ensenada y está limitada al oriente por las carreteras federales de cuota y libre no. 1 y al poniente por el Océano Pacífico.	8
4 Mapa de pendientes de la zona entre punta San Miguel y punta Salsipuedes. La topografía cercana a la costa presenta pendientes moderadas a fuertes (10°-60°). De acuerdo a la clasificación del área de estudio por el tipo de pendiente se observa que 30% de la zona tiene una gradiente fuerte, localizados en la cresta y en la base de la pendiente.	9
5 Columna estratigráfica compuesta del área de Salsipuedes-Cíbola del Mar. Destacan tres tipos de unidades: volcanosedimentarias de la Fm. Alisitos del Aptiano-Albiano, las sobreyacen las rocas sedimentarias de la Fm. Rosario del Campaniano-Maastrichtiano, coronadas por rocas volcánicas del Mioceno Medio de la Fm. Rosarito Beach (Cruz-Castillo, 1998; modificado de Morales-Pérez, 1995).	10
6 Mapa geológico y estructuras regionales observadas en el corredor punta San Miguel-punta Salsipuedes. En la simbología se abreviaron el nombre de las Formaciones Rosarito Beach como Fm. R.B., Rosario como Fm. R. y Alisitos como Fm. A. La unidad dominante en el área de estudio es la de derrames de basalto que se sobreyacen a conglomerados polimícticos (conglomerados/ areniscas poco consolidados) pertenecientes al miembro superior de la Formación Rosario. El mapa también muestra estructuras geológicas como las fracturas (línea dentada) y una interpretación de los límites de deslizamientos realizados con fotointerpretación por Minch, 1972. En la zona principal del deslizamiento se observa la convergencia de antiguos deslizamientos. El área del deslizamiento en el km 93 +50 está señalado con el triángulo morado y la línea roja entre A y A' representa la sección transversal de la zona central del deslizamiento observado en el perfil del lado izquierdo (Modificado de Gómez-Castillo, 2010).	11
7 Mapa de distribución de epicentros sísmicos (1980-2015) en el noroeste de Ensenada elaborada con la base de datos de RESNOM. a) Epicentros con $M > 3$. b) Epicentros con $M < 3$. El noroeste de Ensenada se ve afectado por dos grandes sistemas de fallas, hacia el sur la falla Agua Blanca y hacia al NE por el sistema San Miguel-Vallecitos, conformado por la falla San Miguel, la cual se considera una falla activa, y las fallas Vallecitos-Calabazas. Aunque Ensenada es considerado un margen continental tectónico activo se	

	presentan pocos eventos de $M > 3$ (modificado de Cruz-Castillo, 2002; Fuente epicentros: RESNOM, 2016).....	13
8	Componentes básicos de los sistemas LiDAR. a) Diagrama esquemático del funcionamiento de las líneas de escaneo de LiDAR aerotransportado resultando en líneas paralelas de puntos medidos. Los tres componentes básicos de un sistema ALS son: Sistema de escáner láser, GPS (sistema de posicionamiento global diferencial), el cual registra la posición de la plataforma y su diferencia con respecto a una estación base, (factor de corrección) y, Sistema de navegación inercial (Inertial Measuring Units, IMU por sus siglas en inglés), que se basa en la rotación, inclinación y encabezamiento del sistema LiDAR, los cuales permiten definir la posición exacta de la plataforma midiendo el movimiento en todas las direcciones (modificado de NOAA, 2012).....	18
9	Esquema de la reconstrucción de una escena 3D a partir de fotografías tomadas por una cámara en movimiento (SfM) y la identificación de n puntos de correspondencia en m imágenes. Como resultado final se obtiene una nube de puntos semejante a los datos obtenidos por LiDAR (modificado de TNT, 2015).....	20
10	Mapa de localización de los escaneos terrestres adquiridos por el equipo FARO Focus 3D x 330 el 2 de febrero de 2014. Se registraron 12 escaneos de la zona del deslizamientos desde diferentes perspectivas sobre un área de aproximadamente de 16,789 m ²	22
11	Mapa de localización de las estaciones meteorológicas empleadas en el análisis de climatología en el noroeste de Ensenada. Las estaciones con coloración verde-azul pertenecen a bases de datos de estaciones privadas colectados por The Weather Company y la estación del Valle de Guadalupe administrada por el Departamento de Oceanología del CICESE, el resto de los datos fueron tomados de la base de datos de estaciones meteorológicas administradas por CLICOM (rojo-naranja). CLICOM es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa CLImate COMputing project. CLICOM recopila información diaria de las variables climáticas (evaporación, precipitación, temperatura y unidades de calor) de diferentes estaciones de México entre 1920 y 2012. Fuente: http://clicom-mex.cicese.mx	23
12	Componentes principales del GPS Magellan Pro-Mark 3, un sistema GPS diferencial que consta de: 1) unidad receptora (GPS), 2) base para elevar la antena hasta 2 m sobre el nivel de la superficie, y 3) Antena GNSS externa. Para el levantamiento de puntos se emplearon dos equipos, uno como base que se mantiene en el mismo sitio durante todo el levantamiento y el segundo es la estación móvil con la cual se ubican los puntos de control terrestre GCPs cuya ubicación precisa se incorpora en el procesado de las fotos (Magellan, 2007).....	24
13	El procesamiento de datos a partir de SfM se puede clasificar en tres grandes grupos: Trabajo de campo, Trabajo de computo (flujo de trabajo SfM) y post procesamiento (modificado de Westoby et al., 2012). En el caso del km 93+50, se implementaron dos plataformas para la adquisición de datos, de las cuales sólo con eBee se trabajó personalmente en los tres niveles. La segunda plataforma utilizada fue el dron DJI S800. Para los datos del dron DJI S800 se realizó el flujo de trabajo SfM y post-procesamiento. Debido a que los datos del dron DJI S800 fueron proporcionados por Cavaro Comunicación no hubo una planeación para la adquisición de fotografías del área de interés, del traslape entre fotografías ni de los puntos de control en tierra. Esta última	

	parte se realizó durante el post-procesamiento a partir de una ortoimagen GeoEye 1 con resolución a 1m.....	27
14	La diferencia entre DEMs es en una operación algebraica entre los valores de elevación de una fecha posterior a) y otra anterior b). El ráster resultante c) es la diferencia y en este se revelan las zonas de cambio y zonas sin cambio.	29
15	Generación de MDE a partir de nube de puntos NCALM. La escala de color en las nubes de puntos a y b representan un gradiente de altura donde azul representa los valores más bajos y el rojo lo más alto. a) Nube de puntos original con presencia de ruido (nubosidad). b) Nube de puntos procesada en LAsTools para ignorar la clase 7 (ruido). c) MDE sombreado.	32
16	Nubes de puntos densas para el km 93+50 obtenidas con drones. a) Nube de puntos a partir del dron DJI S800. Las imágenes empleadas en la reconstrucción de la escena se enfocaron en el área principal del deslizamiento por lo que la mayor acumulación de error se ubica en la periferia del modelo, especialmente del lado derecho. Los modelos b y c son nubes de puntos obtenidas a partir del dron eBee en color verdadero (RGB) y color cercano al infrarrojo (NIR), respectivamente. A diferencia del modelo RGB, el modelo NIR fue construido con aproximadamente 20% menos fotografías.....	34
17	Mosaicos generados a partir de las nubes de puntos de drones. a) Mosaico DJI S800 con resolución de 5cm. b) Mosaico eBee RGB con resolución de 4.5 cm. C) Mosaico eBee NIR con resolución de 4.8 cm.	35
18	Determinación general de las dimensiones del deslizamiento en el km 93+50. Las secciones transversales amarillas representan las zonas de donde se extrajeron las dimensiones del deslizamiento. Las secciones transversales verdes son zonas de donde se realizaron perfiles entre el MDE INEGI (2006) y DJI S800 (2013).	36
19	Perfiles topográficos del cambio de elevación entre los MDE INEGI (2006) y DJI S800 (2013). En la Figura 18 se indica la ubicación de los perfiles. El perfil a está indicado por el transecto E. El perfil b está indicado por el transecto F. El perfil c está indicado por el transecto H. El transecto d está indicado por el transecto I.	38
20	Detección de cambio de volumen en el km 93+50 entre 2006 y 2016. a) Cambio de elevación MDE INEGI (2006) y DJI S800 (2013). b) Cambio de elevación entre MDE DJI S800 (2013) y GeoEye 1(enero de 2014). c) Cambio de elevación entre MDE GeoEye 1 (enero 2014) y NCALM (julio de 2014). d) Cambio de elevación entre MDE NCALM (julio de 2014) y eBee (marzo de 2016).	40
21	Nube de puntos TLS unificada para el km 93+50 de la carretera escénica Tijuana-Ensenada. La alta precisión de las nubes de puntos TLS permite extraer planos y estrías a escalas menores.	41
22	Análisis de planos generados por el movimiento de un bloque deslizante en el km 93+50. La pared principal del deslizamiento fue dividida en cuatro secciones conforme al cambio de orientación de la pared.	42

- 23 Mapa de permeabilidad en la zona NW de Ensenada. La simbología en el mapa indica el cambio de permeabilidad en base a la clasificación del tipo de litología en el noroeste de Ensenada. Las flechas simbolizan la dirección del flujo de agua subterránea, mientras que las líneas representan perfiles topográficos SW-NE (negra) y W-E (azul) del km 93. La ladera oeste (costa) se caracteriza por una pendiente moderada a fuerte ($>25^\circ$) donde hay evidencia de múltiples fracturas y antiguos deslizamientos. Esta zona está constituida por material no consolidado con permeabilidad baja a media. Por otra parte al NE de la zona de estudio se observan materiales no consolidados con permeabilidad variable. Las zonas de alta permeabilidad se localizan en el Valle de Guadalupe, el ejido El Porvenir y las áreas de acumulación de escorrentías, donde la pendiente es moderada a suave ($< 20^\circ$)..... 44
- 24 Registros de precipitación mensuales en el noroeste de Ensenada y la influencia del ENSO para el 2010-2015. En la gráfica superior se observan las precipitaciones mensuales acumuladas, en donde las columnas azules representan las precipitaciones durante el mes de diciembre en los diferentes periodos. En la gráfica inferior se representan los umbrales de anomalías del ENSO registrados por la NASA. En la gráfica inferior las columnas azules oscuro representan periodos de calentamiento de la superficie del océano (fenómeno de El Niño), mientras las columnas rojas significan periodos de enfriamiento (fenómeno La Niña) y, las columnas azul claro constituyen periodos en donde la temperatura superficial del océano se mantiene dentro del rango normal. Las marcas verdes delimitan los valores de precipitación y umbrales de anomalías del ENSO durante el ciclo hidrológico 2013-2014. Durante este periodo las precipitaciones son inferiores a las observadas en otros años y la temperatura del océano se mantuvo dentro de los rangos promedios, lo que significa que no se presentó efectos por calentamiento/enfriamiento de la superficie del océano..... 45
- 25 Mapa de sismicidad en el noroeste de Baja California entre octubre a diciembre de 2013. La magnitud de los sismos está representada por los símbolos graduados, mientras que la coloración indica el lapso de tiempo en el que ocurrieron. Durante el 2013 se registraron 2 eventos con magnitud > 3 y 49 sismos con magnitud < 3 , asociado principalmente al sistema San Miguel-Vallecitos-Calabazas y Agua Blanca. Durante diciembre de 2013 ocurrieron 25 sismos, de los cuales sólo dos alcanzaron una magnitud > 3 (M 4.6 Fecha 2013-12-26 00:18:20 y M 5.2 Fecha 2013-12-20 05:27:08). Los microsismos ocurrieron en radios mayores a 30 km de la zona del deslizamiento, mientras que los sismos mayores ocurrieron en radios mayores a 70 km. Fuente: RESNOM. 47
- 26 Imágenes satelitales de Google Earth Pro para el km 93+50 entre 2006 y 2013, la línea roja representa el límite del deslizamiento de 2013. En todas las imágenes se distingue un deslizamiento parcial de una masa a hacia el mar donde el pie y dedos de este generan un forma convexa en la línea de costa. Entre 2006 y 2010 (a y b) se observa una zona con un cambio significativo en la geomorfología. En la imagen b se distingue una alteración en la cabeza del deslizamiento ocasionada por la pérdida de cobertura vegetal exponiendo parte superior de la zona de fractura. Entre 2012 y 2013 (c y d) se observan la adición de reductores de velocidad en ambos lados del margen del deslizamiento, así como diversas reparaciones en esta zona. Por otra parte, entre 2010 y 2012 se distingue la pérdida de un bloque de suelo entre la carretera y la línea de costa (circulo azul).d) En febrero de 2013 se observa un hundimiento considerable de la carretera y de la problemática del límite del deslizamiento en la carretera. 48

- 27 Fotografía del deslizamiento en la carretera Escénica Tijuana-Ensenada en el km 93 +50 a partir del dron DJI S800 (28 de diciembre de 2013). El deslizamiento en el km 93+50 afectó 200 metros de la carretera Escénica. A lo largo de esta sección se observó una variación del grosor de la carretera de aproximadamente 30 -70 cm (b). Algunas zonas cercanas al límite del deslizamiento presentaron grosores de hasta 1.2 m (a). Los grosores fueron medidos a partir de la nube de puntos generada por el dron DJI S800 en CloudCompare..... 50
- 28 Identificación de deslizamiento previo al colapso en el km 93+50 de la carretera Escénica Tijuana-Ensenada. El deslizamiento del 28 de diciembre de 2013 está indicado con la línea roja, mientras la línea amarilla indica el deslizamiento previo a éste. Las flechas punteadas indican el movimiento observado desde la zona principal de fractura (punto blanco) después del evento en el km 93+50..... 55
- 29 Gráfica de precipitación diaria para el mes de diciembre de 2013. Los registros indican que la precipitación se agrupa en dos períodos El primer período se presentó durante los primeros días de diciembre con una precipitación máxima de 10.7 mm (7 de diciembre) y una precipitación acumulada de 16 mm (3–7 de diciembre). El segundo período se presentó entre el 14 al 20 de diciembre con una precipitación máxima de 15 mm y una precipitación acumulada de 17.3 mm. En ambos casos, la precipitación se considera baja.. 56

Lista de tablas

Tabla	Página
1 Versión simplificada de la clasificación de los movimientos de masas de acuerdo al tipo de material (Varnes, 1978) y la clasificación de velocidad descrita por Cruden y Varnes (1996 en Highland y Bobrowsky, 2008; Gómez-Castillo, 2010).....	3
2 Causas y factores desencadenantes de deslizamientos definida por Varnes (1978, en Highland y Bobrowsky, 2008).....	3
3 Características de los datos para el deslizamiento en el km 93 +50 de la carretera Tijuana-Ensenada obtenidos por tecnologías emergentes. Como datos pre-evento se descargó un modelo digital de terreno, con resolución de 5 m INEGI y como datos post- evento se recolectaron datos de tres fuentes diferentes: Drones (Dji S800 y eBee), plataforma satelital (GeoEye 1) y Vuelo LiDAR (NCALM).....	21
4 Características de los escaneos terrestres obtenidos por el equipo Faro Focus 3D x 330 el 12/02/2014 (+46 días después del deslizamiento).....	21
5 Características de los drones usados para capturar las fotografías del área de la zona del deslizamiento. Las fotografías fueron procesadas posteriormente para la reconstrucción 3D.....	25
6 Características del escáner laser terrestre Faro Focus 3D x 330. Fecha escaneo 12/2/2014.....	25
7 Ecuaciones para determinar los cosenos directores de las coordenadas esféricas (Allmendinger, 2016).....	31
8 Parámetros de error de georeferenciación para la nube de puntos generada con las fotos del dron DJI S800.....	33
9 Parámetros de error de georeferenciación para las nubes de puntos a partir del dron eBee.....	33
10 Tasa de permeabilidad para diferentes tipos de materiales.....	45
11 Características de los modelos de alta resolución espacial empleados en el análisis del km 93+50.	53

Capítulo 1

1. Introducción

Los deslizamientos son procesos de erosión que han actuado continuamente para conformar la superficie de la Tierra. Sin embargo, por su extensa variedad de escalas y localizaciones son procesos que constituyen uno de los peligros geológicos más importantes, generando impactos económicos y sociales a corto y largo plazo (Ren, 2015).

El desarrollo y la ocurrencia de deslizamientos, por lo general, es un proceso progresivo y dinámico. Los inventarios de deslizamientos son críticos para apoyar las investigaciones sobre los eventos que han ocurrido y las zonas susceptibles en el futuro. Sin embargo, en la mayoría de los países, la identificación de dónde y cuándo ocurre un deslizamiento, a diferencia de otros peligros naturales que cuentan con amplias redes de vigilancia como los sismos y los huracanes, se ve limitada por el tamaño del evento y las secuelas en las actividades humanas (Kirschbaum et al., 2015).

En el caso de Baja California la falta de las redes de información consistentes han restringido la información disponible a los eventos que han tenido mayor efecto en las poblaciones de la región (Rico et al., 1969 en Morales-Pérez, 1995; Minch, 1972; Cruz-Castillo y Delgado-Argote, 1999; Cruz-Castillo y Delgado-Argote, 2000) y a catálogos de susceptibilidad (Morales-Pérez, 1995, Gómez-Castillo, 2010, Nava-Licona, 2016).

Adicionalmente a los métodos tradicionales para el análisis de deslizamientos (morfológicos, hidrológicos, geofísicos, etc.), el uso de modelos de relieve de alta resolución es parte integral de la comprensión del comportamiento de los deslizamientos, particularmente de aquellos con una tasa de movimiento lento (Niethammer et al., 2009).

En las últimas décadas, la investigación de los deslizamientos a partir de técnicas de percepción remota se ha transformado rápidamente, en parte por la posibilidad de la adquisición de información 3D del terreno con una alta precisión y resolución espacial. Los modelos digitales elevación (MDE) de alta resolución son herramientas que apoyan la visualización, análisis de los procesos morfológicos e identificación de las condiciones geométricas de frontera de modelados (Henry et al., 2002). De acuerdo con la escala requerida y la resolución espacial, los MDE se pueden obtener por fotogrametría, nubes de puntos LiDAR y otras técnicas.

El uso de datos de alta resolución representa una ventaja en el estudio de deslizamientos de pequeña a mediana escala, debido a que estos eventos se consideran como parte de un fenómeno natural de importancia para el análisis de deformaciones y requieren un estudio más sutil de la escena medida (Zeibak y Filin, 2007).

El propósito de este trabajo es utilizar técnicas emergentes, como fotogrametría por drones y satelital, y datos LiDAR para obtener MDE. Los MDE se utilizaron para dimensionar y analizar el deslizamiento ocurrido el 28 de diciembre de 2013 en la carretera Tijuana-Ensenada. Así mismo, los datos de alta resolución obtenidos de LiDAR terrestre se emplearon en el análisis de estructuras geológicas (planos y estrías) de los bloques deslizantes.

1.1. Deslizamientos en zonas costeras

De acuerdo a Cruden y Varnes (1996) un deslizamiento es el movimiento pendiente abajo de suelo, roca, derrubios y material orgánico bajo los efectos de la gravedad, la cual actúa sobre una área donde el peso en la ladera supera la capacidad de carga (Ren, 2015). En este sentido, los deslizamientos reducen las pendientes a ángulos más estables. Aunque actualmente existe una diversidad de definiciones y sistemas de clasificación para reflejar la complejidad de este tipo de fenómeno, la mayoría se basa en el mecanismo específico de fractura y, las propiedades y características del tipo de fallamiento (Tabla 1).

Adicionalmente a los efectos de la gravedad, se reconocen factores condicionantes y desencadenantes que controlan el movimiento pendiente abajo. En la mayoría de los casos, los deslizamientos son resultado de una serie de condiciones predeterminadas que favorecen el fenómeno. Dentro de los factores condicionantes, las propiedades del suelo y las características geomorfológicas de la zona tienen efecto en la densidad, la resistencia y el comportamiento hidrológico del suelo (Sidle et al., 1985). En contraste, los factores desencadenantes son agentes externos que modifican el comportamiento del suelo y son responsables por lo general de la magnitud y velocidad de los deslizamientos (González et al., 2002). En la Tabla 2 se enlistan los factores que afectan la estabilidad de las laderas de acuerdo con la clasificación de Cruden y Varnes (1996).

Tabla 1. Versión simplificada de la clasificación de los movimientos de masas de acuerdo al tipo de material (Varnes, 1978) y la clasificación de velocidad descrita por Cruden y Varnes (1996 en Highland y Bobrowsky, 2008; Gómez-Castillo, 2010).

Tipo de movimiento	Tipo de material			Tasa de movimiento*	Velocidad	
	Rocas	Textura predominante del suelo				
		Gruesa	Fina			
Caídas o desprendimiento	Caída de rocas	Caída de escombros	Caída de tierra	> 6	3m-5m/s	
Derrumbes	Derrumbe de rocas	Derrumbe de escombros	Derrumbe de tierra	1-7	15mm/año-5m/s	
Deslizamiento	Rotacional	<ul style="list-style-type: none"> Sencillo Múltiple Sucesivo 	<ul style="list-style-type: none"> Sencillo Múltiple Sucesivo 	<ul style="list-style-type: none"> Sencillo Múltiple Sucesivo 	< 4	<0.06m/año-1.5m/mes
	Traslacional	Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de escombros	Deslizamiento de tierra	> 3	1.5m/mes-1.5m/día
Expansión lateral	Expansión de rocas	Expansión de escombros	Expansión de tierra	3-5	1.6m/año-3m/min	
Flujos	Reptación profunda	Reptación de suelo		> 5	1.8m/h-56km/h	
Complejos	Combinación de dos o más tipos principales de movimientos (alud de rocas, flujo deslizante, rotación con flujos de suelo, etc.)					

***Clasificación de la tasa de movimiento:** 1= Extremadamente lento, 2= Muy lento, 3= Lento, 4= Moderado, 5= Rápido, 6= Muy rápido, 7= Extremadamente rápido.

Tabla 2. Causas y factores desencadenantes de deslizamientos definida por Varnes (1978, en Highland y Bobrowsky, 2008).

Causas por los materiales del suelo	Causas físicas
<ul style="list-style-type: none"> • Materiales débiles, sensibles e intemperizados. • Cizallas • Fisuras y diaclasas • Discontinuidades estructurales y orientadas adversamente (esquistosidad, planos de inclinación, fallas, discordancias, contactos, etc.) • Contraste en la permeabilidad • Contraste en materiales con diferente plasticidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Lluvias intensas o prolongadas • Rápido abatimiento de nivel de agua (o inundaciones y mareas) • Actividad sísmica • Meteorización por dilatación y contracción • Expansión e hidratación de arcillas
Causas morfológicas	Causas antropogénicas
<ul style="list-style-type: none"> • Erosión fluvial al pie de las laderas • Erosión marina al pie de los acantilados • Erosión en márgenes laterales • Erosión subterránea • Remoción de vegetación (por incendios, inundaciones y sequías) • Levantamiento tectónico 	<ul style="list-style-type: none"> • Excavación de laderas o del pie de las laderas • Incremento de peso en las laderas o en la cresta de las laderas • Abatimiento de reservorios • Deforestación • Vibraciones artificiales

Los deslizamientos son producto de una amplia variedad de factores, los cuales determinan los diferentes ambientes en los que se pueden desarrollar. Dentro de los diferentes ambientes con mayor riesgo de este tipo de fenómeno, las zonas costeras son más susceptibles a los deslizamientos debido a la naturaleza dinámica de la topografía asociada a procesos costeros (Bush y Young, 2009). Aunado a las características y condiciones de las zonas costeras, el impacto humano por desarrollo de vías de comunicación mal planeadas, intensidad de desarrollo urbano, uso del suelo a gran escala y cambios de cobertura vegetal, son factores que aumentan la probabilidad de que se presente un deslizamiento.

A nivel mundial los deslizamientos cercanos a las costas se concentran en la región circum-Pacífico (Sidle et al., 1985). De acuerdo con el análisis que realizaron Kirschbaum et al. (2015) a partir de bases de datos globales y reportes registrados sobre deslizamientos entre 2007 y 2013, en las costas del Pacífico, sobre todo en el hemisferio norte, hay mayor incidencia de deslizamientos. En Norteamérica, las costas oeste de Estados Unidos y noroeste de México son zonas con mayor número reportes de deslizamientos, aunque la mayoría están asociados a deslizamientos sin fatalidades. Aun así representan un alto impacto económico y social en las regiones en las que se presentan. De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Mansillas y Rubio, 2010; García-Arróliga et al., 2015) entre 1980 y 2014 los desastres naturales de origen geológico (deslizamientos, derrumbes, sismos y actividad volcánica) representaron hasta 7% de las pérdidas económicas en México. Durante el 2013 los deslizamientos fueron el mayor impacto por desastres geológicos con 79.2% (654.4 millones de pesos) de los daños y pérdidas económicas (García-Arróliga et al., 2014). A nivel regional, la línea de costa entre Tijuana-Ensenada, se caracterizan por zonas de deslizamientos promovidos por la construcción habitacional y de carreteras panorámicas (Cruz, 1998; Minch, 1972).

La problemática de carreteras cercanas a la costa está asociada a los efectos que el sitio tiene en su planificación, desarrollo y mantenimiento. En el caso de la carretera Tijuana-Ensenada, las características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas y tectónicas de la región han provocado deslizamientos desde su apertura ocasionados por la eliminación de material al pie del talud de deslizamientos antiguos estabilizando las laderas (Delgado, 2015).

En base a las características geológicas y condiciones ambientales en la zona costera de Baja California se reconocen dos movimientos principales de deslizamientos: desprendimientos de rocas y deslizamientos rotacionales. A diferencia de los desprendimientos, los deslizamientos rotacionales o depresiones son movimientos en masa que conllevan mayores efectos para las actividades humanas. Los deslizamientos rotacionales están asociados a laderas con pendientes de 20 a 40° y se desarrollan con un plano cóncavo

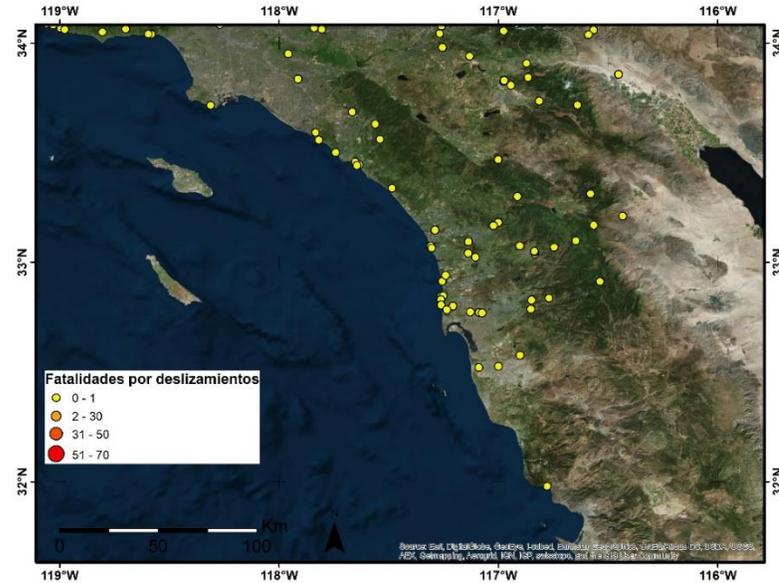


Figura 1. Mapa de deslizamientos reportados entre 2007-2016 entre la zona sur de California y noroeste de Baja California. El tamaño y el color de la simbología indican el número de muertes reportadas para cada evento. En base a los registros de los deslizamientos en la zona fronteriza entre Estados Unidos y México se observa que este tipo de eventos no suelen representar pérdidas de vidas humanas ya que se asocian a deslizamientos de escala media a pequeña. *Fuente:* NASA, 2016a; NASA, 2016b.

(falla lítrica) provocado por la distribución geométrica de la tensión de cizallamiento (Varnes, 1958). En la Figura 2 se ilustran los diferentes elementos morfológicos y morfométricos observados en un deslizamiento rotacional. Este tipo de movimiento es definido por Varnes (1958) como uno de los principales problemas a los que se enfrentan los ingenieros en la construcción de carreteras.

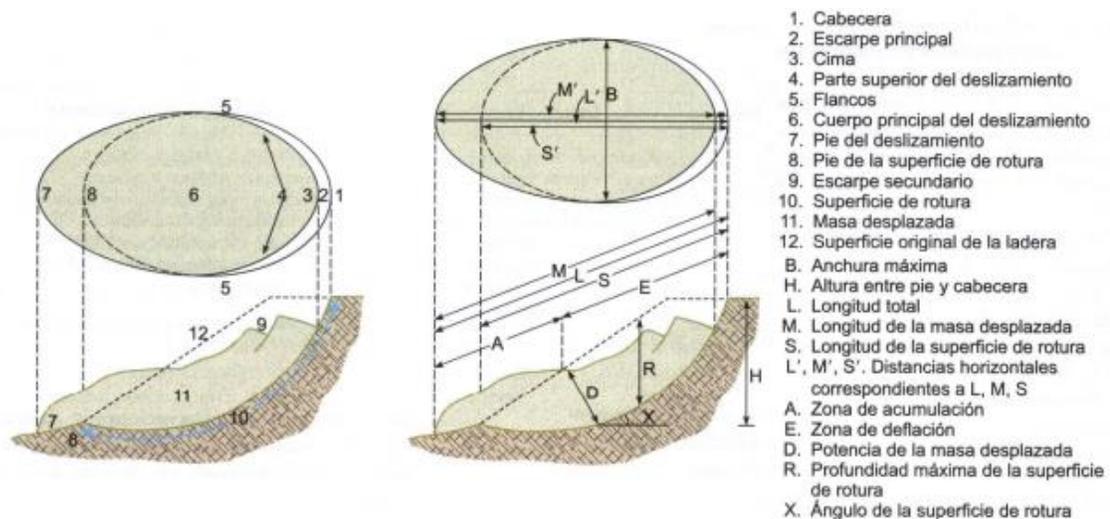


Figura 2. Nomenclatura de un deslizamiento rotacional desarrollada por la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (IAEG, 1990). Diagrama idealizado de los atributos morfológicos (izq.) y de las dimensiones de un movimiento de ladera (der.)

1.2. Antecedentes

La carretera escénica Tijuana-Ensenada es una vía de cuota federal de 95 kilómetros concesionada por la Secretaría de comunicaciones y Transportes (SCT) al Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN) y operada por Caminos y Puentes Federales (CAPUFE) con el objetivo principal de incentivar el turismo de bajo impacto en la región (SCT, 2014). Desde su creación esta vía de comunicación ha sido catalogada por varias fuentes como una de las carreteras con mayor atractivo en México debido a la cercanía a la costa, las espectaculares vistas de acantilados y playas de bolsillo, así como la panorámica que ofrece de la bahía Todos Santos. Sin embargo, parte de las características que hacen tan atractiva su ubicación también representan factores de inestabilidad en la zona. Estos factores eran conocidos antes de su construcción.

Meses antes de la apertura de la carretera escénica en 1967 se presentaron daños estructurales debido a la influencia de la fallas geológicas y límite de los deslizamientos antiguos preservados en tramos cercanos a la costa (SCT, 2014). Rico et al. (1969, en Morales-Pérez, 1995; Cruz-Castillo, 2000) realizaron una investigación de mecánica de suelos y reportaron la reactivación de planos de deslizamiento en nueve zonas de la carretera Tijuana-Ensenada entre los km 90 y 98.3. Estos autores observaron que meses antes de terminar la carretera se empezaron a manifestar los primeros deslizamientos. Este problema continuó hasta un mes después de la inauguración, cuando un derrumbe en el km 94.5 provocó el cierre total de la carretera (Cruz-Castillo y Delgado-Argote, 2000).

Minch (1972) empleó la fotointerpretación para determinar la velocidad de movimiento de los deslizamientos y concluyó que la presencia de sedimentos poco consolidados soportando basalto y de sistemas de fallas y fracturas son los factores que aumentan el riesgo de deslizamientos y erosión costera. Asimismo, los deslizamientos cercanos a Punta Salsipuedes se han desarrollado sobre la línea de contacto entre las rocas volcánicas y las rocas sedimentarias de grano fino subyacentes (Jiménez, 1972).

Posterior a la apertura de la carretera Escénica se presentaron otras afectaciones significativas ocasionando el cierre parcial y total de esta ruta. En agosto de 1976 ocurrió un agrietamiento de una porción de la carretera y el derrumbe de una parte del cerro anexo, así como un deslizamiento súbito que afectó un área de 300 m de largo por 300 m de ancho (Cruz-Castillo y Delgado-Argote, 2000).

Desde la perspectiva del análisis de peligro geológico, se han identificado las características geológicas, obras civiles y otros factores antrópicos como los principales agentes promotores de los deslizamientos en esta zona (Cruz, 1998; Cruz y Delgado, 2000). En concordancia con lo anterior Cruz y Delgado (1999)

concluyeron que en el área entre El Tigre y la Mesa San Miguel, el miembro medio de la Fm. Rosario es el que presenta mayor potencial a deslizarse, ya que es el menos consolidado y contiene lutitas interestratificadas que lo hacen inestable y definen superficies de deslizamiento eficientes bajo condiciones de pendientes mayores a los 9° con inclinación hacia la costa. Por otra parte, aunque la lluvia es un factor importante en la saturación de sedimentos y como factor lubricante en los planos de contacto, la cantidad de precipitación en la zona no se considera como un factor que se correlacione con la velocidad de deslizamiento (Cruz-Castillo y Delgado-Argote, 2000).

Adicionalmente a los eventos de deslizamientos significativos, cada año la carretera Escénica registra otras afectaciones como desprendimientos de rocas, hundimientos y agrietamientos, principalmente en la zona entre San Miguel y Salsipuedes.

1.3. Área de estudio y características topográficas

La zona de estudio se encuentra entre punta San Miguel y punta Salsipuedes, a una distancia aproximada de 16 km al noroeste de la ciudad de Ensenada y abarca un área aproximada de 1 km². Está delimitada hacia el oriente por la carretera Escénica Tijuana-Ensenada (Carretera Federal de cuota No. 1D) y la carretera libre Tijuana-Ensenada (Carretera Federal libre No. 1) y al poniente por el Océano Pacífico. El área principal del deslizamiento se encuentra en el tramo del km 93 +50 de la carretera Escénica Tijuana-Ensenada. Los límites geográficos del área correspondientes a las coordenadas geográficas son 31° 56.79' a 31° 56.13' N y 116° 45.4' a 116° 45.03' O (Figura 3).

A lo largo de punta San Miguel y punta Salsipuedes se desarrolla un sistema de drenaje corto conforme a las características topográficas de los acantilados. Dos de los sistemas de drenaje más prominentes en la zona son el arroyo el Tigre y el arroyo El Carmen (Figura 3). El arroyo el Tigre tiene orientación norte-sur con una longitud total de 11.5 km y una pendiente media de aproximadamente 3%. La elevación máxima en la que se observa es de 383 msnm y la elevación mínima es de 40 msnm en donde se une al arroyo El Carmen. El arroyo El Carmen tiene una orientación noroeste con una longitud de 38 km. La elevación máxima es de 1067 msnm y desemboca en punta San Miguel hacia el Océano Pacífico. Al igual que el arroyo El Tigre, el arroyo El Carmen tiene un pendiente media de aproximadamente 3%.

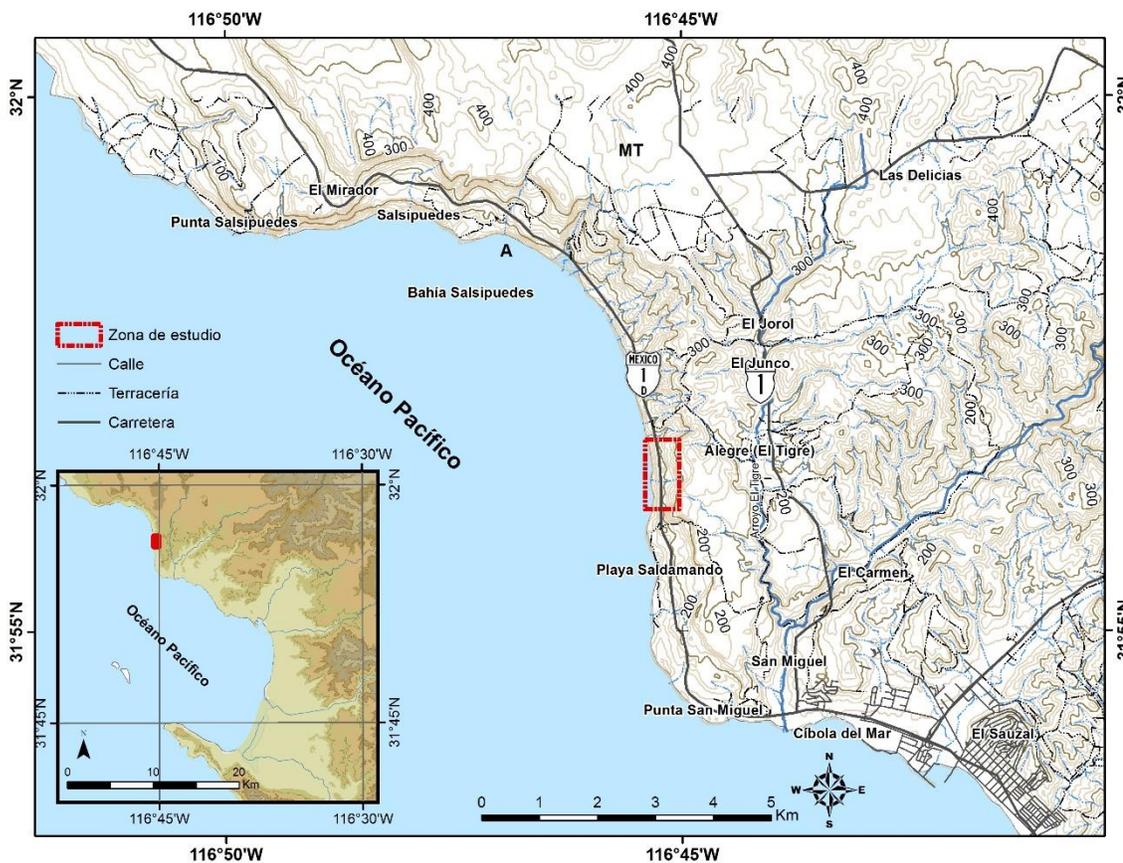


Figura 3. Mapa de la región NW del municipio de Ensenada, Baja California. El mapa se enmarca con rojo la zona de estudio que se sitúa a 16 Km al NW de la ciudad de Ensenada y está limitada al oriente por las carreteras federales de cuota y libre no. 1 y al poniente por el Océano Pacífico.

De acuerdo con las características estructurales de la zona costera, Baja California está dividido en doce provincias distinguidas en base a los patrones tectónicos e historia estructural clasificadas en tres categorías: borde continental, península estable y depresión del Golfo de California (Gastil et al., 1975). De acuerdo al interés del estudio la provincia de mayor importancia es el borde continental.

Morfológicamente el borde continental entre punta Salsipuedes y punta San Miguel se caracteriza por la presencia de mesetas y altiplanicies. La zona de altiplanicies se distribuye a lo largo de la costa con elevaciones máximas de 400 msnm, entre la punta Salsipuedes y punta San Miguel. Los acantilados (A) característicos de esta zona son derrames basáltico-andesítico superpuestos sobre sedimentos marinos y presencia de playas de bolsillo en su base (Cruz-Castillo, 1998). La base de los acantilados está erosionada por el oleaje y en conjunto con la inclinación favorece el desprendimiento de bloques (Morales-Pérez, 1995). Aproximadamente el 60% del terreno presenta una pendiente moderadamente fuerte a fuerte (20° a 40°) con una elevación máxima de 280 m (Figura 4).

Al NE de la zona de altiplanos se localiza la meseta El Tigre (MT) con una variación de elevación de 200 a 400 m, Mueller et al. (2009) describen esta meseta como una de las terrazas marinas más amplias en la parte norte de Baja California. En la parte sur de la zona de estudio se observan valles fluviales y remanentes de terrazas marinas asociados a acantilados bajos y abanicos aluviales y llanuras de bajo relieve dominados por sedimentos marinos y no marinos del Cretácico (Moore, 1969, Minch, 1972). La presencia de terrazas marinas en el borde continental es evidencia de levantamiento continuo de la península de Baja California durante el Cuaternario tardío (Ortlieb, 1978).

Muchas de las plataformas de terraza más prominentes están presentes en las zonas donde las fallas influyen localmente y controlan la estructura costera y la geomorfología (Mueller et al., 2009). La actividad tectónica activa y la presencia de terrazas marinas en la región combinan negativamente con las rocas de densidad relativamente baja y los acantilados creando ambientes susceptibles a derrumbes y deslizamientos (Goldberg, 2006).

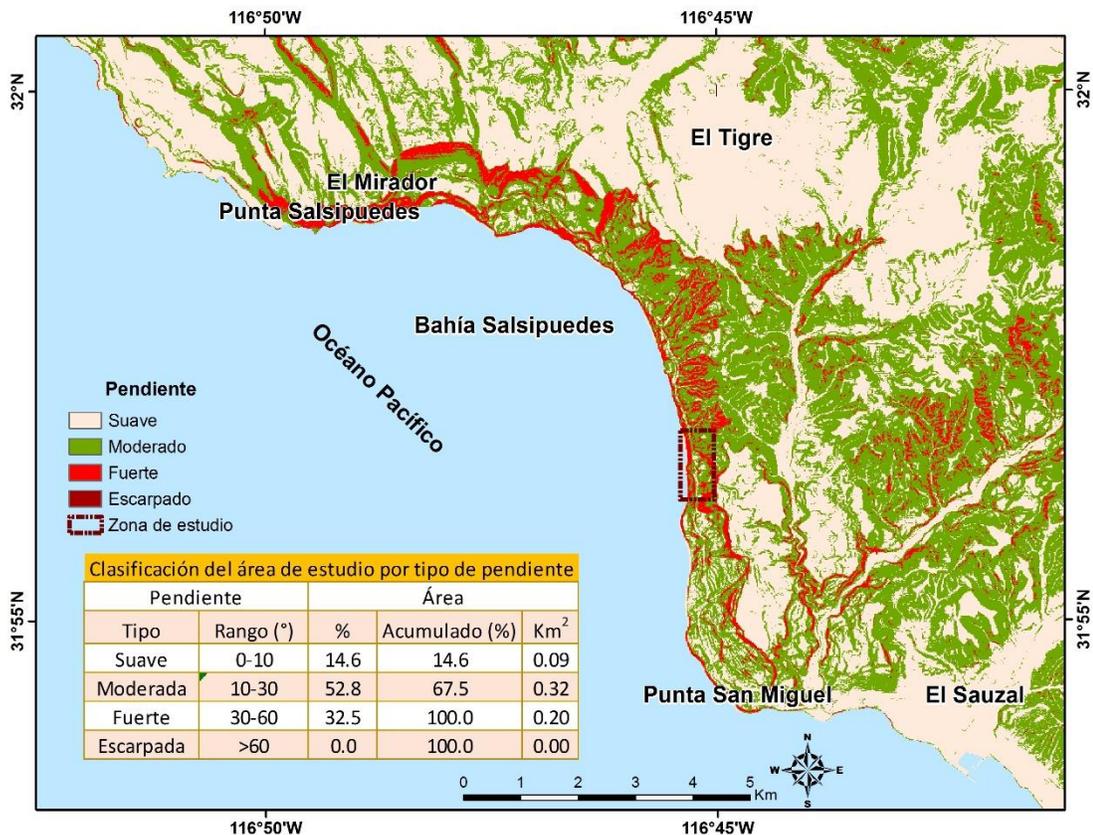


Figura 4. Mapa de pendientes de la zona entre punta San Miguel y punta Salsipuedes. La topografía cercana a la costa presenta pendientes moderadas a fuertes (10°-60°). De acuerdo a la clasificación del área de estudio por el tipo de pendiente se observa que 30% de la zona tiene una gradiente fuerte, localizados en la cresta y en la base de la pendiente.

1.3.1. Marco Geológico

La litología es uno de los factores más importantes en la generación de deslizamientos. El área de estudio se caracteriza por afloramientos de rocas volcánicas y sedimentarias características de tres provincias geológicas del Borde Continental descrita por Gastil et al. (1975): Formación Alisitos, Formación Rosario y Formación Rosarito Beach (Cruz-Castillo, 1998). En la Figura 5 se presenta la columna estratigráfica compuesta del área San Miguel-Salsipuedes, mientras que en la Figura 6 se describe la distribución de la litología en el noroeste de Ensenada.

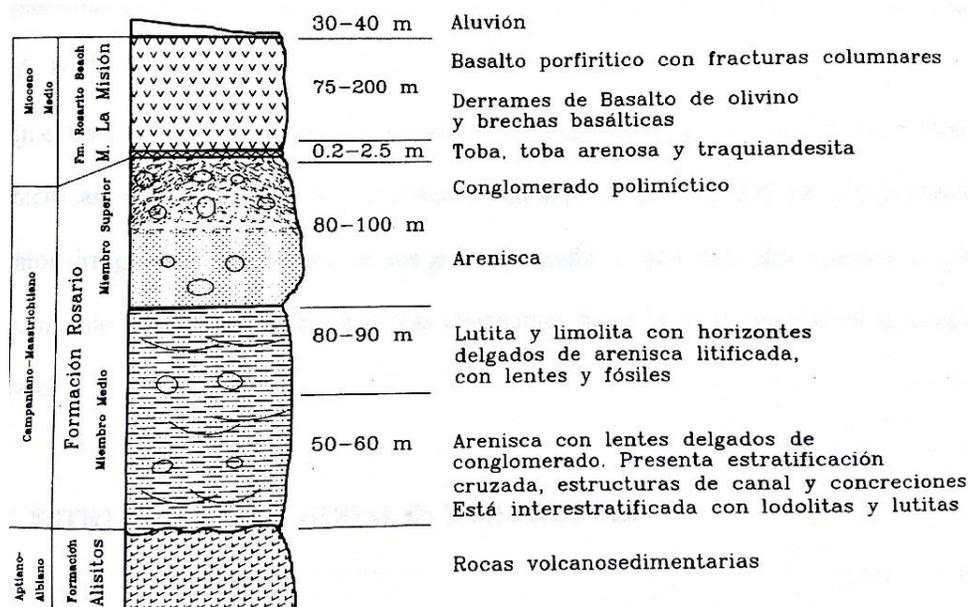


Figura 5. Columna estratigráfica compuesta del área de Salsipuedes-Cíbola del Mar. Destacan tres tipos de unidades: volcanosedimentarias de la Fm. Alisitos del Aptiano-Albiano, les sobreyacen las rocas sedimentarias de la Fm. Rosario del Campaniano-Maastrichtiano, coronadas por rocas volcánicas del Mioceno Medio de la Fm. Rosarito Beach (Cruz-Castillo, 1998; modificado de Morales-Pérez, 1995).

En la parte inferior se encuentran rocas volcanosedimentarias de la Formación Alisitos. La litología de la Formación Alisitos es un arco insular del Cretácico Temprano (Aptiano-Albiano) situado en la margen occidental de California y Baja California, en una franja de aproximadamente 25,000 km² a lo largo de la costa, y caracterizada por el afloramiento discontinuo por rocas piroclásticas, volcanoclásticas, derrames de lava y estratos delgados de caliza intercalados (Almazan-Vázquez, 1988). La Formación Alisitos es estructuralmente compleja y consta de nueve miembros litológicos: dos inferiores de composición volcánica, tres intermedios de rocas sedimentarias con fauna fósil del Albiano Medio o Aptiano y cuatro superiores de clásticos gruesos de origen volcánico. Sus afloramientos se extienden por más de 240 km a

lo largo de la porción occidental del norte de la península de Baja California, desde Punta China hasta casi llegar a Rosarito (CONAGUA, 2015).

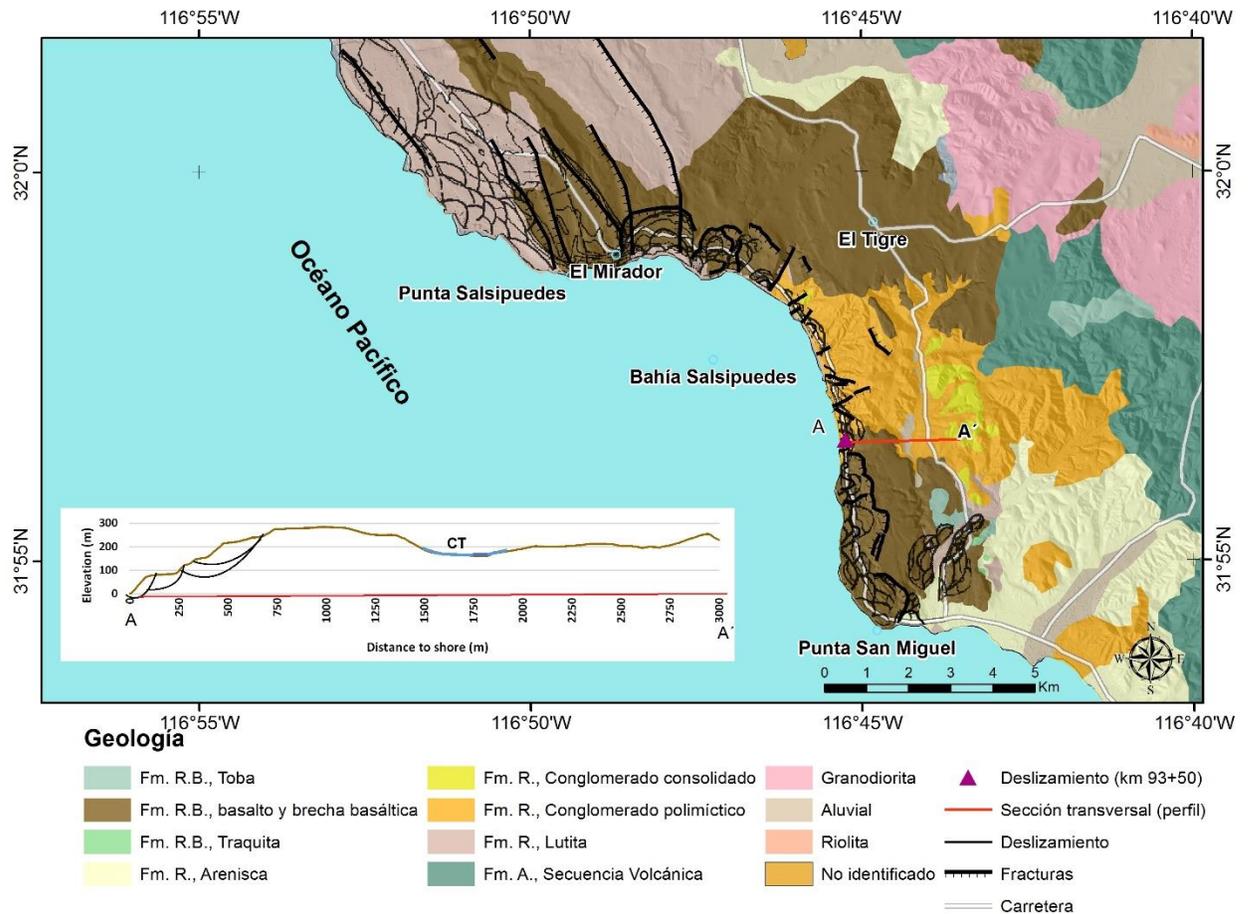


Figura 6. Mapa geológico y estructuras regionales observadas en el corredor punta San Miguel-punta Salsipuedes. En la simbología se abreviaron el nombre de las Formaciones Rosarito Beach como Fm. R.B., Rosario como Fm. R. y Alisitos como Fm. A. La unidad dominante en el área de estudio es la de derrames de basalto que se sobreyacen a conglomerados polimíticos (conglomerados/ areniscas poco consolidados) pertenecientes al miembro superior de la Formación Rosario. El mapa también muestra estructuras geológicas como las fracturas (línea dentada) y una interpretación de los límites de deslizamientos realizados con fotointerpretación por Minch, 1972. En la zona principal del deslizamiento se observa la convergencia de antiguos deslizamientos. El área del deslizamiento en el km 93 +50 está señalado con el triángulo morado y la línea roja entre A y A' representa la sección transversal de la zona central del deslizamiento observado en el perfil del lado izquierdo (Modificado de Gómez-Castillo, 2010).

La Formación Rosario es la unidad más joven de un cinturón de rocas sedimentarias del Cretácico Superior que afloran de forma discontinua a lo largo del margen de la costa del Pacífico del sur de California y Baja California y sobreyace discordantemente a la Formación Alisitos (Almanzan-Vázquez, 1988; Gastil et al., 1975). La estratigrafía general de la Formación Rosario refleja una fase inicial de condiciones no marinas, seguida por la extensa incursión marina de la última gran elevación eustática del nivel del mar en el Cretácico (Pérez-Flores *et al.*, 2004). La Formación Rosario consiste de estratos de areniscas, limonitas y

conglomerados poco consolidados con presencia de fósiles marinos, que indica una variación fluctuante de la línea de costa (Gastil et al., 1975). El SGM (2012) subdivide la Formación Rosario en Miembro inferior, medio, y superior conformados de areniscas rojizas de grano fino y compacto a granos medio a fino con frecuencia alineados a planos de estratificación. El miembro superior se caracteriza por dos grupos: *miembro inferior arenoso*, constituido por arcosa masiva intercalada con lutita de 0.5 a 1 m de espesor, y *miembro inferior lodoso*, formado por lutita finamente estratificada con contenido de materia orgánica y abundantes microfósiles.

La parte superior está conformada por la Formación Rosarito Beach del Mioceno. La Formación Rosarito Beach se caracteriza por derrames de lava, conglomerados y sedimentos de ambiente costero que sobreyacen discordante a la Fm. Rosario (Cruz-Castillo, 1998). La Formación se compone de 10 miembros, de los cuales, el miembro La Misión es el más antiguo. Se componen principalmente de basalto con textura vesicular porfirítica de grano muy grueso (Morales-Pérez, 1995).

1.3.2. Estructuras regionales y sismicidad

El noroeste de Baja California es una región tectónicamente activa caracterizada por una continua actividad sísmica con movimiento predominante de rumbo gobernada por el régimen tectónico del Sistema San Andrés-Golfo de California (Wong et al., 1987; Cruz-Castillo y Delgado-Argote, 2000). Este sistema genera esfuerzos tensionales que se manifiestan en una serie de fallas activas. La zona de la Bahía de Todos y Ensenada-Tijuana es afectada por la falla San Miguel, el sistema El Descanso-Estero y la falla Agua Blanca, las cuales conservan una orientación NW con un movimiento relativo diestro (Wong et al., 1987; Morales-Pérez, 1995, Cruz-Castillo, 2002). Wong et al. (1987) identificaron dos patrones sísmicos en la región: a) sismos principales asociados a la falla San Miguel y b) sismos de enjambre sin ningún sismo principal, predominante de la zona de Salsipuedes.

La falla San Miguel es la estructura principal de un arreglo de fallas en echelón. Al NW se localizan las fallas Vallecitos y Calabazas que son continuaciones de esta falla. La falla San Miguel tiene un desplazamiento lateral derecho a una velocidad de 0.1-3 mm/año y rumbo N60°W que se extiende desde el sur de San Miguel hasta el oriente del Valle de San Rafael (Shor y Roberts, 1958; Cruz-Castillo, 2002). La falla San Miguel es considerado como una zona con sismicidad fuerte, donde históricamente se han presentado eventos de magnitud mayor a 6 (Shor y Roberts, 1958; Kenji et al., 1996).

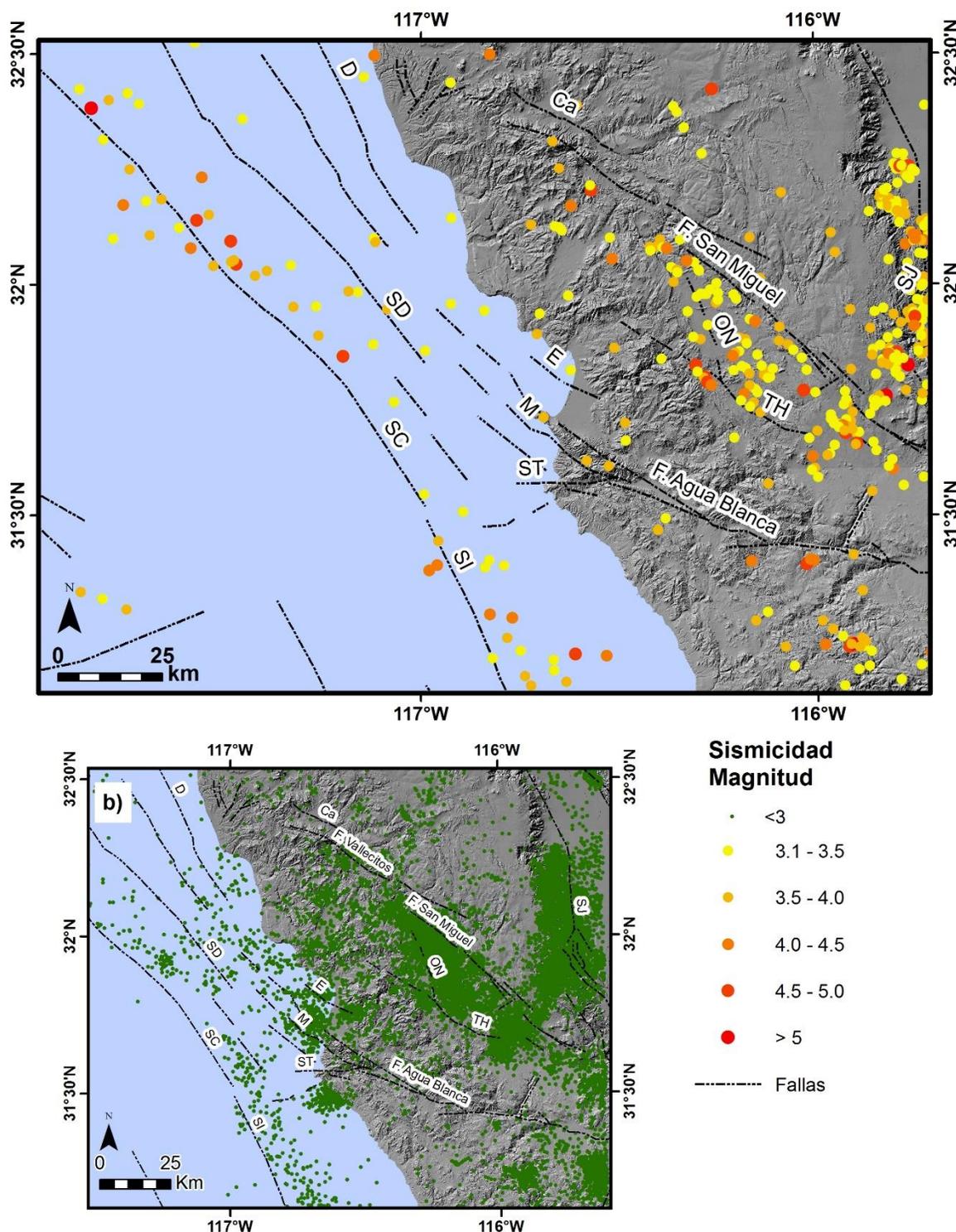


Figura 7. Mapa de distribución de epicentros sísmicos (1980-2015) en el noroeste de Ensenada elaborada con la base de datos de RESNOM. a) Epicentros con $M > 3$. b) Epicentros con $M < 3$. El noroeste de Ensenada se ve afectado por dos grandes sistemas de fallas, hacia el sur la falla Agua Blanca y hacia al NE por el sistema San Miguel-Vallecitos, conformado por la falla San Miguel, la cual se considera una falla activa, y las fallas Vallecitos-Calabazas. Aunque Ensenada es considerado un margen continental tectónico activo se presentan pocos eventos de $M > 3$ (modificado de Cruz-Castillo, 2002; Fuente epicentros: RESNOM, 2016).

*Ca= Falla Calabazas, D= Falla El Descanso, E= Falla Estero Beach, SD= Falla San Diego, M= Falla Maximinos, ON= Falla Ojos Negros, ST= Falla Santo Tomás, SC= Falla San Clemente, SI= Falla San Isidro y SJ= Falla Sierra Juárez.

El sistema El Descanso-Estero define el límite oriental de la provincia estructural continental de California y consiste de numerosas discontinuidades subparalelas con arreglo escalonado en tramos menores a 10 km y movimiento lateral derecho (Cruz-Castillo, 2002). Registros de la sismicidad entre 1980-2015 indican que durante los últimos 30 la sismicidad en esta zona ha sido baja, con eventos de magnitud menor o igual a 3 (RESNOM, 2016).

La falla Agua Blanca es una de las estructuras geológicas más antiguas documentada en la zona norte de Baja California que se caracteriza por discontinuidades subparalelas. La falla Agua Blanca se extiende desde el Paso de San Matías hasta la Bahía Todos Santos, con un rumbo de N72°W y un desplazamiento lateral aproximado de 130 km a una velocidad promedio de 1-4 mm/año (Morales-Pérez, 1995; Cruz-Castillo, 2002). En la región norte de la Bahía de Todos Santos, la falla Agua Blanca se aproxima a la punta Salsipuedes mediante un sistema complejo de fallas hasta la falla Coronado Banks (Wong et al., 1987). Al igual que el sistema El Descanso-Estero, los registros sísmicos no demuestran sismicidad muy fuerte.

1.3.3. Clima y vegetación

El clima en el noroeste de Baja California es generado por la latitud geográfica, la variabilidad topográfica (altitud, orientación del relieve con respecto a la incidencia de los rayos solares y los vientos predominantes), las corrientes oceánicas y la lejanía de la región respecto del océano. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen el noroeste de Baja California es considerado como clima templado mediterráneo (costas del Pacífico) a seco desértico (Golfo de California) con lluvias en invierno. Las temperaturas en las costas, sobre todo del lado del Pacífico es siempre menor, debido a que las corrientes marinas transportan agua fría del norte (Rebman y Roberts, 2012): Las precipitaciones son escasas manteniéndose en un promedio de 200 a 250 mm por año, mientras que la temperatura media ronda los 21-25°C. Las bajas temperaturas cercanas en la costa del Pacífico producen nubes bajas y niebla durante invierno y primavera, que ocasiona un efecto de enfriamiento y entrada de humedad a varios kilómetros de la costa.

El fenómeno de El Niño, es otra característica climática que juega un papel importante en los ecosistemas áridos y semiáridos de Baja California. El fenómeno de El Niño genera anomalías de lluvias en intensidad y frecuencia e incrementa la temperatura del océano afectado la productividad primaria (Rebman y Roberts, 2012).

Características como la baja precipitación y entrada de humedad desde el océano a las costas de Baja California permiten que el noroeste de la región sea clasificada como región mediterránea. En relación a las características biogeográficas, la región se conoce como provincia florística de California, por la similitud en vegetación con los ecosistemas observados en California. La provincia está integrada por cinco ecosistemas principales: las sierras californianas, las islas del pacifico, el chaparral, el matorral rosetófilo costero y el matorral costero. Este último se encuentra a lo largo de la costa del Océano Pacífico desde la frontera México-Estados Unidos hasta San Vicente (31° 20'N), con elevaciones entre 400-600 msnm y se caracteriza, por lo general, por paisajes de acantilados marinos, terrazas fluviales y costeras, y dunas costeras arenosas (Rebman y Roberts, 2012, González-Abraham et al., 2010).

El matorral costero está compuesto, predominantemente por arbustos aromáticos y caducifolios (vegetación que pierde su follaje durante una parte del año, en la mayoría de los casos coincide con las temporadas desfavorables) adaptados al fuego y la sequía, con alturas promedio de aproximadamente 1.5 m y raíces someras (González-Abraham et al., 2010). Algunas especies típicas asociadas a este ecosistema son, de acuerdo con Beyers & Wirtz (1995): *Artemisia californica* (romerillo), *Encelia californica* (Girasol de California), *E. farinosa* (incienso), *Eriogonum fasciculatum* (valeriana), y varias especies de salvia incluyendo *S. apiana* (salvia real o salvia blanca), *S. leucopla* (Salvia morada), y *S. mellifera* (salvia negra); además de especies de hojas grandes como *Malosma laurina* (lentisco) y *Rhus integrifolia* (Saladito); y especies de suculentas como: *Berberocactus emoryi* (cirio de oro), *Dudleya* spp. (Siempreviva) y *Opuntia littoralis* (nopal costero).

1.4. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es dimensionar y analizar la dinámica superficial del deslizamiento ocurrido el 28 de diciembre de 2013 en la carretera Tijuana-Ensenada a partir de modelos de relieve de alta resolución espacial. La finalidad es aplicar técnicas emergentes en el análisis geomorfológico de un fenómeno común en el área entre punta San Miguel y punta Salsipuedes para comparar las ventajas y desventajas de los diferentes métodos empleados en el análisis y apoyar en la colección de datos para estudios futuros del área. Para lograr este objetivo se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- Analizar la precipitación del ciclo hidrológico 2013-2014 y ver su relación con la climatología y su posible influencia en el deslizamiento.

- Generar una serie de tiempo de modelos digitales de terreno (MDT) de alta resolución del sitio de deslizamiento a partir de fotogrametría por drones y levantamientos LiDAR en la ventana temporal 12/2013-3/2016.
- Determinar el cambio de volumen generado por el deslizamiento y las obras de rehabilitación.
- Estimar la dinámica de los bloques deslizantes a partir del análisis de estrías registradas por datos TLS.

Capítulo 2

2. Metodología

2.1. Materiales

Con el fin de analizar una serie de tiempo de mediciones topográficas de la zona del deslizamiento en el tramo 93+50 de la carretera Escénica Tijuana-Ensenada se contó con modelos de relieve de alta resolución (INEGI y GeoEye 1) y modelos creados a partir del procesado de nubes de puntos con levantamientos de técnicas emergentes como LiDAR aéreo y, fotogrametría por drones y satelital. Se detallan la característica de los diferentes conjuntos de datos y las diferentes herramientas empleadas en su procesamiento.

a) Datos: De acuerdo con la fecha de adquisición de los datos relativos al deslizamiento (28/12/2013), éstos fueron clasificados como datos pre-evento y post-evento. Los modelos digitales de elevación (MDE) fueron obtenidos a partir de cinco fuentes de información (Tabla 3). Con base en la plataforma de adquisición, éstos se pueden agrupar como datos tipo LiDAR aéreo, LiDAR terrestre y datos por fotogrametría.

LiDAR aéreo: La tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging, por sus siglas en inglés) o altimetría laser es una técnica de teledetección óptica que mide el tiempo entre la emisión de un haz de luz láser, usualmente con una longitud de onda en el espectro del infrarrojo cercano (~1500 nm) a una alta tasa de captura de datos (~60-200KHz) y, el tiempo de retorno detectado por el sensor que es asociado a una coordenada del blanco que reflejo el pulso láser (Lemmens, 2011). Como producto se obtiene una nube de puntos densa de elevación geo-referenciados (Figura 9).

Del portal de INEGI se descargaron los modelos digitales de alta resolución (5 m) LiDAR de tipo terreno con escala 1:10,000 para los cuadrantes H11B11c1 y H11B11c. Estos modelos fueron generados a partir de un vuelo realizado por el INEGI en agosto de 2006, por lo que se considera como marco de referencia del relieve previo al deslizamiento en la carretera Escénica Tijuana-Ensenada (pre-evento).

Seis meses después al deslizamiento, la agencia “National Center for Airborne Laser Mapping” (NCALM) realizó un levantamiento aéreo LiDAR en la zona. NCALM entregó una nube de puntos con densidad promedio de 10 pts/m² para un área de 0.54 km². La componente vertical de esta nube estaba con respecto

al Sistema Geodésico de Referencia de 1980, es decir, el elipsoide GRS80. Apoyados con información y herramientas del INEGI, se ajustó la altura al Geoide Gravimétrico Mexicano, unificando así la referencia vertical de todos los modelos de elevación al geoide. A diferencia de los modelos de elevación obtenidos de INEGI y por fotogrametría, el modelo obtenido por el vuelo de la NCALM representa un modelo de elevación de superficie. Los MDE de tipo superficie son un registro de las elevaciones existentes sobre el nivel del mar. Dependiendo del objetivo del análisis se pueden obtener dos tipos de modelos de elevación: a) superficie, incluye todas las características sobre la superficie (vegetación, infraestructura, etc.) y b) terreno, filtra la nube de puntos para tener solo los valores del relieve del terreno.

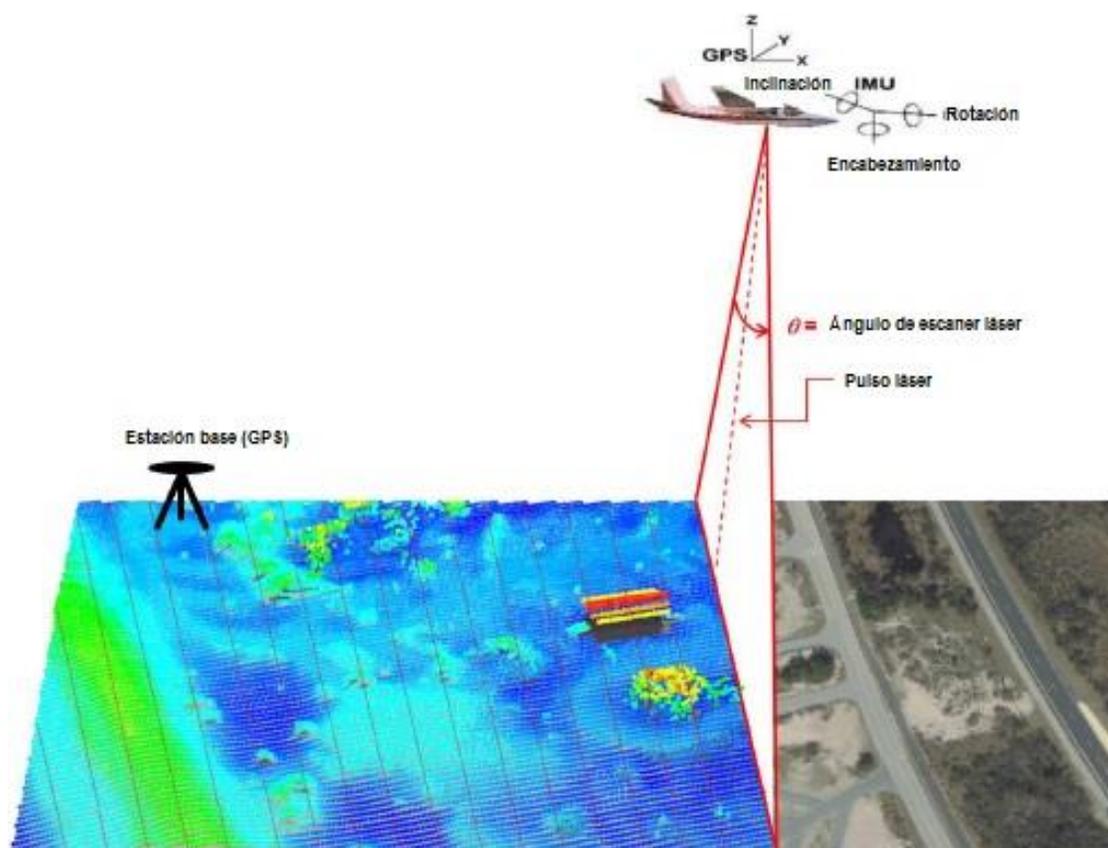


Figura 8. Componentes básicos de los sistemas LiDAR. a) Diagrama esquemático del funcionamiento de las líneas de escaneo de LiDAR aerotransportado resultando en líneas paralelas de puntos medidos. Los tres componentes básicos de un sistema ALS son: Sistema de escáner láser, GPS (sistema de posicionamiento global diferencial), el cual registra la posición de la plataforma y su diferencia con respecto a una estación base, (factor de corrección) y, Sistema de navegación inercial (Inertial Measuring Units, IMU por sus siglas en inglés), que se basa en la rotación, inclinación y encabezamiento del sistema LiDAR, los cuales permiten definir la posición exacta de la plataforma midiendo el movimiento en todas las direcciones (modificado de NOAA, 2012).

Fotogrametría: Es una técnica de mapeo que se basa en la triangulación de características individuales combinadas en múltiples imágenes para construir la geometría de una escena a partir de la orientación,

posición y geometría interna de la cámara y puntos de control en tierra. Recientemente el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs o drones) se ha adoptado para tomar fotografías y a partir de ellas generar modelos de elevación de alta resolución aplicando técnicas fotogramétricas. Structure from Motion (SfM) es un algoritmo incorporado en software comercial y de código abierto que aplica principios fotogramétricos para generar modelos tridimensionales de alta resolución. A diferencia de la fotogrametría tradicional, el algoritmo de SfM permite utilizar fotografías y cámaras con diferentes perspectivas y escalas para el reconocimiento de características (Johnson et al., 2014; Snavely et al., 2008).

El procedimiento de SfM se basa en la captura de vistas múltiples de un objetivo desde diferentes posiciones. Posteriormente se aplica una transformación de escala invariante a las características (SIFT, por sus siglas en inglés scale invariant feature transform) y se identifican puntos de correspondencia en el conjunto de imágenes para establecer la relación espacial entre la ubicación de la imagen original en un sistema arbitrario coordenado 3D (Snavely et al., 2008). A continuación se estima la ubicación relativa de la cámara y la geometría de la escena a partir de la identificación automática de puntos de correspondencia en las imágenes. Este procedimiento es descrito por Triggs et al. (1999) como ajuste por paquetes (bundle adjustment), el cual busca refinar por mínimos cuadrados una reconstrucción visual para producir una estructura 3D y una estimación de los parámetros de visualización (posición de la cámara y calibración). La posición de la cámara se deriva de la relación entre el modelo generado por los puntos de correspondencia en el ajuste de paquetes y la alineación de puntos de control en tierra con respecto a un sistema de coordenado en el mundo real (Snavely et al., 2008, Westoby et al., 2012). Al final, el producto esencial de SfM es una nube de puntos densa que fielmente reconstruye la escena en 3D. Posteriormente, las nubes de puntos se procesan para generar ortomosaicos y modelos digitales de elevación (MDE).

En la primer reconstrucción 3D del deslizamiento por fotogrametría, se utilizaron 144 imágenes tomadas con un dron Marca DJi modelo Spreading Wings S800 unas horas posteriores al evento cubriendo un área de 0.30 km². Adicionalmente, se compraron 25 km² de un MDE de 1m de resolución generado a partir de un estéreo par de imágenes del satélite GeoEye colectadas 28 días después del deslizamiento. Se proporcionaron al proveedor nueve puntos de control terrestre ubicados con GPS diferencial para incorporarlos en la reconstrucción fotogramétrica. El producto incluía los 25 km² de ortoimagen satelital. Por último, se realizó un vuelo 806 días después del deslizamiento con un dron eBee. Durante esta misión se tomaron aproximadamente 1400 imágenes que se usaron en la generación de dos MDE, uno con imágenes infrarrojas y otra con imágenes en color natural (RGB).

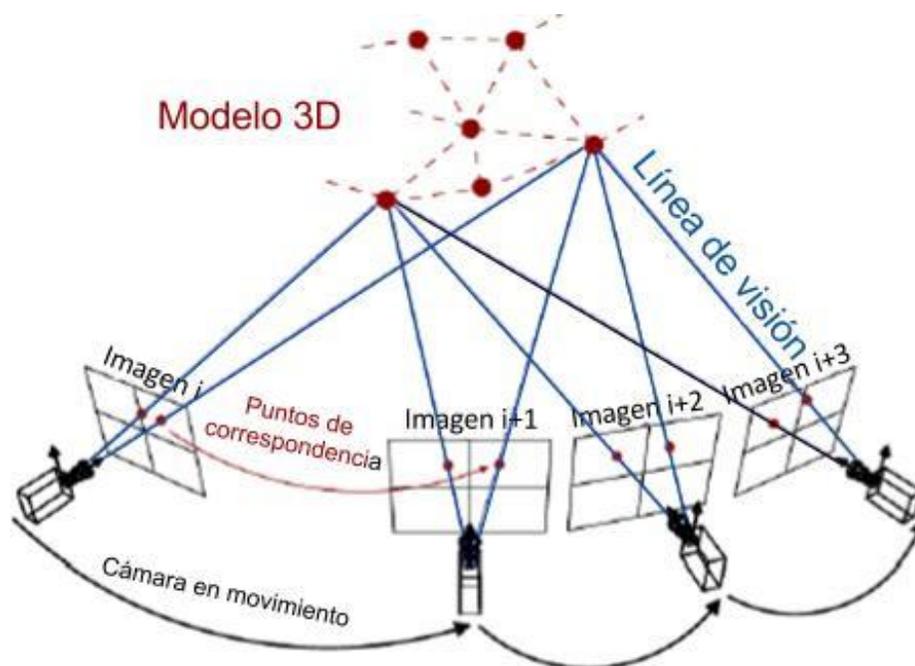


Figura 9. Esquema de la reconstrucción de una escena 3D a partir de fotografías tomadas por una cámara en movimiento (SfM) y la identificación de n puntos de correspondencia en m imágenes. Como resultado final se obtiene una nube de puntos semejante a los datos obtenidos por LiDAR (modificado de TNT, 2015)

LiDAR terrestre: La tecnología LiDAR tiene como objetivo adquirir densas nubes de puntos de la superficie de la tierra con mediciones láser. A diferencia de LiDAR aéreo, LiDAR terrestre (TLS, acrónimo de Terrestrial Laser Scanning) emplea estaciones en la superficie de la Tierra que escanean la escena. Esta característica es una de las razones por las que esta técnica se ha aprovechado en los últimos años en el estudio de la evolución geomorfológica (Alba y Scaioni, 2010; Wilkinson et al., 2012) y deformación del relieve (Gordon et al., 2001; Bu y Zhang, 2008; DeLong et al., 2015).

Para registrar con mayor precisión la superficie de las paredes del deslizamiento, 46 días después se realizó una serie de 12 escaneos con LiDAR terrestre con el equipo Faro Focus 3D x 330 el 2 de febrero de 2014. La densidad promedio de la nube de puntos fue de 1030 pts/m^2 . En la Tabla 4 se describen las características de los escaneos terrestres, mientras que en la Figura 10 se muestra la localización desde donde se tomaron los escaneos. Las mediciones TLS tuvieron como objetivo registrar las estrías del deslizamiento en la pared de piso (footwall) y orientación de los planos.

Factores desencadenantes: Se realizó una revisión de las bases de datos de los registros diarios de precipitación para el noroeste de Ensenada y de la intensidad del fenómeno de El Niño. Los registros de precipitación diarios para el periodo 2010-2015 fueron obtenidos de una estación meteorológica en el

Tabla 3. Características de los datos para el deslizamiento en el km 93 +50 de la carretera Tijuana-Ensenada obtenidos por tecnologías emergentes. Como datos pre-evento se descargó un modelo digital de terreno, con resolución de 5 m INEGI y como datos post- evento se recolectaron datos de tres fuentes diferentes: Drones (DJI S800 y eBee), plataforma satelital (GeoEye 1) y Vuelo LiDAR (NCALM).

Características de los modelos de alta resolución espacial						
	INEGI	DJI s800	Imagen GeoEye 1	NCALM	Ebee RGB	Ebee NIR
Fecha	01/08/2006	28/12/2013	25/01/2014	02/07/2014	10/03/2016	
	-7 años	+ 15 horas	+28 días	+186 días	+806 días	
Imágenes	N/D	144	N/D	N/D	762	625
Puntos de control	N/D	12	N/D	N/D	5	5
Tipo	LiDAR aéreo	Fotogrametría por dron	Fotogrametría satelital	LiDAR aéreo	Fotogrametría por dron	
Resolución (m)	5	0.5	1	0.5	1	
Densidad (pt/m²)	0.013	43	N/D	10	63	48
Altura	Geoidal	Geoidal	Geoidal	Elipsoidal	Geoidal	
Área (km²)	2.96	0.30	25	0.54	1.65	1.45

Tabla 4. Características de los escaneos terrestres obtenidos por el equipo Faro Focus 3D x 330 el 12/02/2014 (+46 días después del deslizamiento).

Escaneo #	Densidad (puntos/m²)	Área cubierta (m²)
54	672	14,988
55	1,143	13,304
56	356	14,200
57	2,507	8,500
58	966	18,040
59	969	17,824
60	1,214	15,488
61	1,080	15,852
62	1,329	13,408
63	650	25,088
64	448	27,988

Valle de Guadalupe, administrada por el departamento de Oceanografía Física, CICESE y cuatro estaciones meteorológicas privadas en diferentes partes de la ciudad de Ensenada colectados por The Weather Company (www.wunderground.com). Adicionalmente se obtuvieron registros históricos (1990-2010) de cuatro estaciones a partir en la base de datos de CLICOM (<http://clicom-mex.cicese.mx/>). Las estaciones meteorológicas empleadas están son observadas en la Figura 12. La intensidad (desviación estándar de la temperatura de la superficie del océano, SST) del fenómeno de El Niño para los años 2010-2015 se adquirió de los registros de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml).

Se realizó una revisión de los registros sísmicos cercanos a la zona de deslizamiento en fechas cercanas al evento a partir del catálogo de la RESNOM (<http://resnom.cicese.mx/sitio/>), así como de los registros de aforo vehicular en la carretera Escénica Tijuana-Ensenada durante el año 2013.

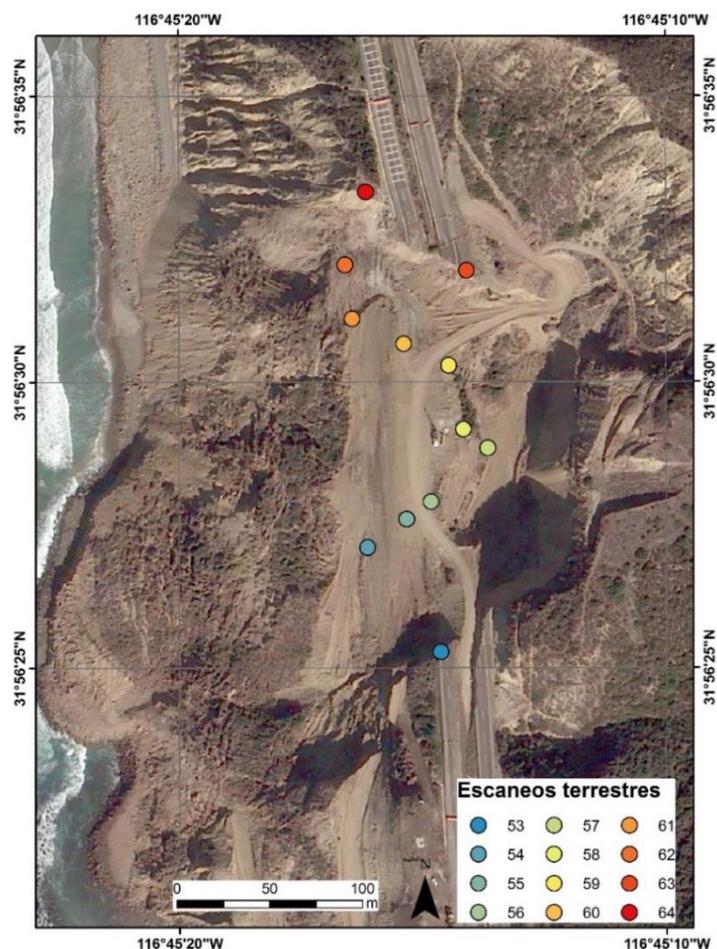


Figura 10. Mapa de localización de los escaneos terrestres adquiridos por el equipo FARO Focus 3D x 330 el 2 de febrero de 2014. Se registraron 12 escaneos de la zona del deslizamientos desde diferentes perspectivas sobre un área de aproximadamente de 16,789 m².

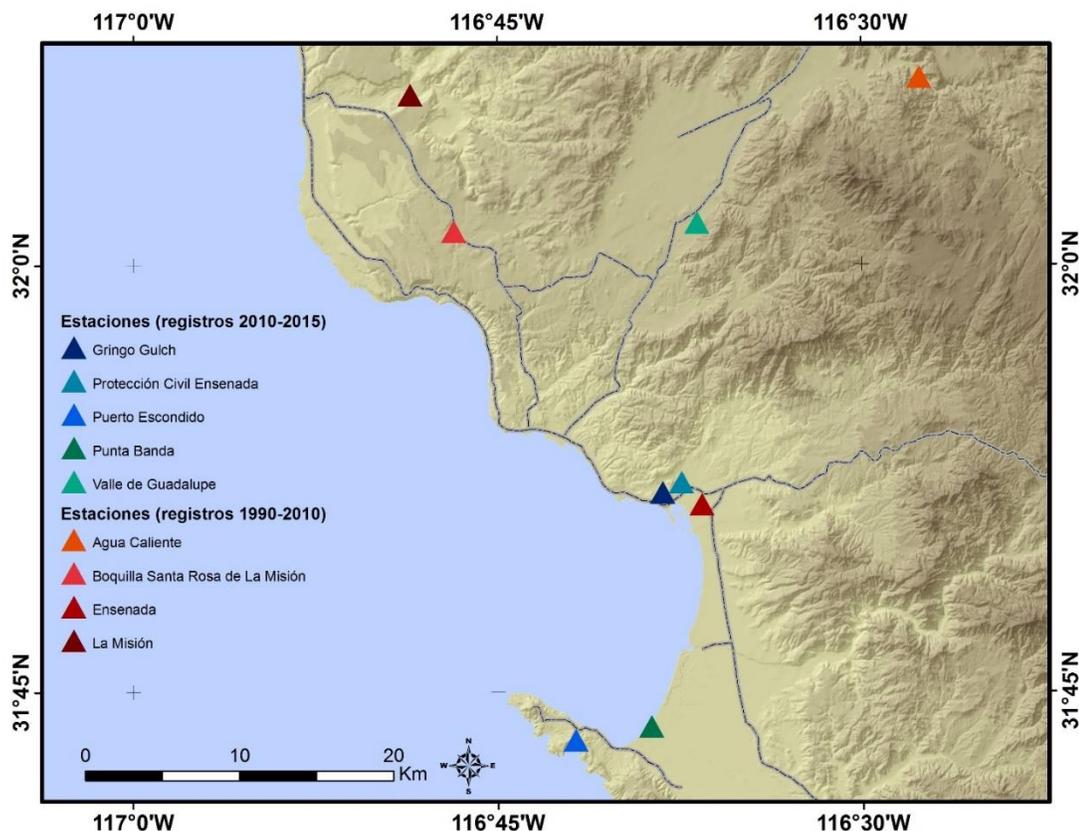


Figura 11. Mapa de localización de las estaciones meteorológicas empleadas en el análisis de climatología en el noroeste de Ensenada. Las estaciones con coloración verde-azul pertenecen a bases de datos de estaciones privadas colectados por The Weather Company y la estación del Valle de Guadalupe administrada por el Departamento de Oceanología del CICESE, el resto de los datos fueron tomados de la base de datos de estaciones meteorológicas administradas por CLICOM (rojo-naranja). CLICOM es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa CLImate COMputing project. CLICOM recopila información diaria de las variables climáticas (evaporación, precipitación, temperatura y unidades de calor) de diferentes estaciones de México entre 1920 y 2012. Fuente: <http://clicom-mex.cicese.mx>.

b) Herramientas:

Equipo: La Tabla 5 describe las características de los drones utilizados para la toma de fotografías aéreas de la zona del deslizamiento que posteriormente fueron procesadas para la reconstrucción 3D. Para el levantamiento aéreo con el dron eBee se colocaron cinco puntos de control terrestre (GCPs) que se ubicaron con un GPS diferencial Magellan Pro-Mark 3 (Figura 12). La Tabla 6 muestra algunas características del equipo usado en el escaneo laser terrestre (TLS).

Software: La adquisición de las fotos aéreas con el dron eBee se programó con eMotion 2 (<https://www.sensefly.com/software/emotion-2.html>) que es un programa para la planeación y control de vuelo para este dron. La adquisición de las fotos con el dron DJI s800 se estableció dirigiendo el vuelo y disparando manualmente la fotografía con el control remoto. El procesado de las fotos aéreas se realizó

con los programas: Agisoft PhotoScan Pro (<http://www.agisoft.com/>) y Pix4D Mapper Pro (<https://www.pix4d.com/>). Ambos programas realizan funciones equivalentes y los productos que



Figura 12. Componentes principales del GPS Magellan Pro-Mark 3, un sistema GPS diferencial que consta de: 1) unidad receptora (GPS), 2) base para elevar la antena hasta 2 m sobre el nivel de la superficie, y 3) Antena GNSS externa. Para el levantamiento de puntos se emplearon dos equipos, uno como base que se mantiene en el mismo sitio durante todo el levantamiento y el segundo es la estación móvil con la cual se ubican los puntos de control terrestre GCPs cuya ubicación precisa se incorpora en el procesamiento de las fotos (Magellan, 2007).

generan son la nube de puntos, ortomosaicos y modelos digitales de superficie. Si se cuentan con puntos de control terrestre (GCPs), éstos los incorporan en el proceso para generar productos con mayor exactitud en su geolocalización. El programa Agisoft PhotoScan Pro se utilizó para procesar la primera reconstrucción con las fotos del dron DJI S800, y las fotos del eBee fueron procesadas con Pix4D Mapper Pro.

LAStools (<https://rapidlasso.com/lastools/>) es un programa para el procesamiento de nubes de puntos, diseñado para procesar nubes de puntos de levantamientos aéreos LiDAR, que contienen mucho más información que las nubes generadas por fotogrametría, sin embargo se puede utilizar con éstas últimas. Esta herramienta se utilizó para clasificar, filtrar y procesar las nubes de puntos teniendo la capacidad de generar modelos digitales de superficie y terreno.

Para la visualización, generación de productos cartográficos y tratamiento final de los MDE se utilizó el programa ArcMap 10.2 (<http://desktop.arcgis.com/es/desktop/>) que es la herramienta comercial de amplia penetración en el mercado.

Tabla 5. Características de los drones usados para capturar las fotografías del área de la zona del deslizamiento. Las fotografías fueron procesadas posteriormente para la reconstrucción 3D.

Drones			
	DJI S800	eBee	
			
Fecha	2013/01/28	2016/03/10	
Cámara	SONY NEX-5N	Canon PowerShot ELPH 110 HS	SONY DSC-WX220
Tipo	RGB	NIR	RGB
Resolución	4912x2760	4606x3456	4896 x3672
Número de fotos	144	625	762
GCP	No	5	5
Geolocalización	No	Si	Si
Plan de vuelo	No	Si	Si
Fuente	Cavaro Comunicación	CICESE	

Tabla 6. Características del escáner láser terrestre Faro Focus 3D x 330. Fecha escaneo 12/2/2014.

	
Tipo de Láser	Diferencial de fase (PD)
Rango de alcance (m)	0.6-330
Precisión de distancia (mm)	± 2
Velocidad (ptos/seg)	976,000
Velocidad de escaneo vertical	976 kHz
Ángulo de escaneo vertical	305°
Ángulo de escaneo horizontal	360°
Fuente	FARO (Ulises Uscanga)

Para las nubes de puntos del escáner láser terrestre (TLS) se utilizaron los programas CloudCompare (<http://www.danielgm.net/cc/>) y LidarViewer (keckcaves.org/software/lidarviewer). En CloudCompare se hizo el co-registro de las nubes de puntos desde los diferentes puntos de escaneo, unificando en una sola nube. Esta se limpió de ruido y finalmente se geolocalizó la nube integrada apoyados en puntos de control extraídos de la ortoimagen y modelo de elevación derivados del estéreo par satelital GeoEye. LidarViewer es un programa visualizador de nubes de puntos desarrollado en la UC Davis (Kreylos, 2016). En este programa se extrajeron la actitud de las estrías y de la superficie de deslizamiento en el bloque piso. Por último, para graficar los valores sobre la actitud de estrías y superficie de deslizamiento, se utilizó el programa Stereonet 9.5.3 (<http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/stereonet.html>). Stereonet es un programa de acceso libre que permite graficar polos, ángulos y planos.

2.2. Procesamiento de nubes de puntos

2.2.1. Obtención de Modelos Digitales de Elevación

Se aplicó la técnica fotogramétrica SfM a las fotografías tomadas por los drones DJI S800 y eBee para generar los MDE. Las 144 fotografías tomadas el 28 de diciembre 2013 por el dron DJI S800, se procesaron con el programa Agisoft PhotoScan Pro. Cuando se hizo el vuelo el mismo día del deslizamiento, no hubo oportunidad de colocar GCPs para su ubicación posterior con GPS diferencial. Para subsanar esta deficiencia y geo-referenciar los productos de SfM, se extrajeron las coordenadas de 12 rasgos claramente distinguibles tanto en las fotos del dron como en la ortoimagen GeoEye capturada 28 días después. Se identificaron los rasgos alrededor del deslizamiento, fuera de la zona afectada. Las coordenadas horizontales de los GCPs se obtuvieron de la ortoimagen y la coordenada Z del DEM satelital. En la Figura 13 se muestra el flujo de trabajo SfM, primero se alinean las imágenes y después se incorporan los puntos de control terrestre (GCPs). La nube de puntos se generó en el sistema coordenado WGS84/UTM zona 11N (EPSG:32611).

Las imágenes eBee fueron procesadas con el programa Pix4D Mapper Pro. A diferencia de las imágenes DJI S800, las fotos tomadas por el eBee son geo-etiquetadas con la posición fuente registrada en la bitácora del dron durante el vuelo. Las observaciones de los GPS Magellan Pro-Mark 3, estación base y móvil, ubicando los puntos de control terrestre (GCPs) fueron procesadas en el programa GNSS Solutions. En el

proceso se incorporaron las observaciones de la estación fija IMIE Ensenada, B.C. de la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/drgna2.aspx>). La exactitud en la geo-localización de los productos aumenta con el geo-etiquetado de las fotos y la incorporación de GCPs. El flujo de trabajo en Pix4D es similar al Agisoft, primero se alinean los fotos, se incorporan los GCPs y se densifica la nube de puntos. En ambos programas, los productos finales son ortomosaicos de la zona de estudio, la nube de puntos y modelos digitales de superficie. La nube de puntos fue posteriormente procesada en LAsTools.

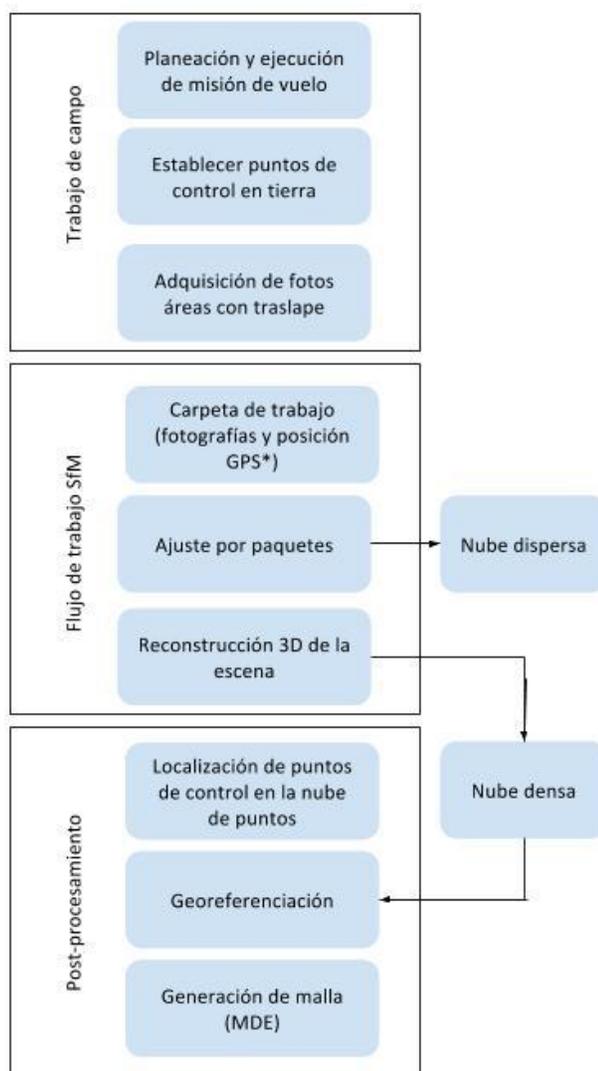


Figura 13. El procesamiento de datos a partir de SfM se puede clasificar en tres grandes grupos: Trabajo de campo, Trabajo de computo (flujo de trabajo SfM) y post procesamiento (modificado de Westoby et al., 2012). En el caso del km 93+50, se implementaron dos plataformas para la adquisición de datos, de las cuales sólo con eBee se trabajó personalmente en los tres niveles. La segunda plataforma utilizada fue el dron DJI S800. Para los datos del dron DJI S800 se realizó el flujo de trabajo SfM y post-procesamiento. Debido a que los datos del dron DJI S800 fueron proporcionados por Cavaro Comunicación no hubo una planeación para la adquisición de fotografías del área de interés, del traslape entre fotografías ni de los puntos de control en tierra. Esta última parte se realizó durante el post-procesamiento a partir de una orto imagen GeoEye 1 con resolución a 1m.

En LAStools se realizaron procesos de filtrado de los puntos en base a su clasificación removiendo datos considerados como ruido hasta obtener los datos que representan la superficie del suelo (lasnoise, lasground) y conversión de la nube de puntos de una triangulación temporal a un TIN y posteriormente a un modelo digital de elevación (MDE) con una resolución de 0.5 metros (las2dem, lasgrid, blast2dem). Para mayor información de los comandos para flujo de trabajo en LASTools se revisaron las entradas sobre cómo crear modelos de terreno en la página de rapidlasso (<https://rapidlasso.com>). En el caso de los datos NCALM, la nube de puntos no tenía clasificación por lo que el resultado final fue un modelo de superficie.

2.2.2. Estimación de cambio volumétrico

La estimación del cambio en elevación y volumen en la zona de deslizamiento se obtuvo a partir de la diferenciación entre modelos de elevación (DEM) en ArcMap. La diferencia entre modelos digitales de elevación (Difference of DEMs, DODs por sus siglas en inglés) es un método basado en la aproximación algebraica de los valores individuales de los píxeles entre dos MDE de diferentes periodos (James et al., 2012). Este método busca determinar el cambio de altitud entre dos fechas. Matemáticamente, la diferencia entre MDE se describe con la fórmula (1):

$$\Delta E_{ij} = Z_{2ij} - Z_{1ij} \quad (1)$$

donde Z_{2ij} y Z_{1ij} son MDE con tiempos T_2 (después) y T_1 (antes). En la Figura 14 se representa el funcionamiento de la diferencia entre DEM.

Como datos multitemporales se emplearon los modelos de elevación de alta resolución del 2006 (datos pre-evento) y, 2013, 2014 y 2016 (datos post-evento). Para delimitar la zona de cambio afectada por el deslizamiento se utilizaron ortoimágenes 2013, 2014 y 2016. Posteriormente, se calculó el cambio volumétrico en base a la diferencia de alturas por el área de cada celda (2):

$$\Delta V = \Delta E_{ij} a_p \quad (2)$$

donde ΔE_{ij} es la diferencia de alturas calculada entre dos DEM y a_p es el área de la celda (resolución del ráster).

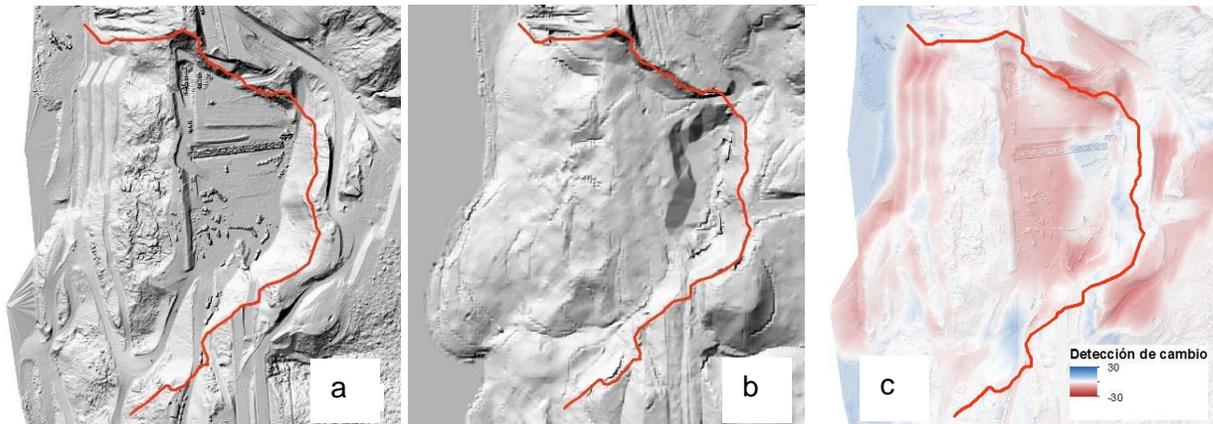


Figura 14. La diferencia entre DEMs es en una operación algebraica entre los valores de elevación de una fecha posterior a) y otra anterior b). El ráster resultante c) es la diferencia y en este se revelan las zonas de cambio y zonas sin cambio.

2.2.3. Análisis de la superficie de deslizamiento en la nube de puntos TLS

a) Pre-procesamiento

El pre-procesamiento de los escaneos TLS consistió en la reducción del ruido, el co-registro y georeferenciación hacia un mismo sistema coordenado (WGS 84 UTM 11N). Estas tareas se realizaron con el programa CloudCompare. Sobre la nube filtrada se delimitaron los escaneos al área de interés (zona principal del deslizamiento) y se eliminaron los puntos que no eran clasificados como suelo y aquellos con coloración no correspondiente a la zona. El co-registro de los escaneos se fundamentó en dos pasos (Theiler et al., 2015):

1.- Alineación aproximada. En este paso se identificaron rasgos correspondientes entre las nubes de puntos (estrías más prominentes, estructuras, rocas prominentes). Se estableció el escaneo 57 como la nube objetivo para el co-registro de las otras nubes del escaneo TLS (Figura 10). El escaneo 57 es el central y el más cercano a la superficie principal del deslizamiento.

2.- Alineación fina. En esta fase se aplicó el algoritmo iterativo de punto más cercano (Iterative closest point, ICP por sus siglas en inglés) para nubes parcialmente traslapadas a partir de la función de error cuadrático medio con diferencia de valores entre escaneos de 1×10^{-10} a 1×10^{-8} .

Para transformar la nube unificada (co-registrada) de un sistema coordinado arbitrario a un sistema coordinado geo-localizado, se utilizaron cuatro puntos de control extraídos de la ortoimagen y DEM GeoEye generados de un estéreo por satélite colectado 18 días antes del TLS. Con estos puntos de control se trasladó la nube a un espacio geo-localizado.

b) Procesamiento de características estructurales

El movimiento del bloque de techo se obtuvo a partir de las mediciones de marcas de estrías. Se seleccionó la nube de puntos que representaba con mayor claridad los planos de deslizamiento. Los criterios utilizados para la selección de la nube de puntos fue la ubicación, distancia al objetivo y la densidad de la nube de puntos, en este caso el escaneo 57. El análisis de los vectores de orientación e inclinación para planos y estrías se realizó en LidarViewer (Bowles y Kreylos, 2010).

El flujo de trabajo para la extracción de características a partir de nubes de puntos 3D se basó en:

- Preparación de datos (LidarPreprocessor) → Transformación de nube de puntos al formato nativo de LidarViewer (.LIDAR). Debido a que LidarViewer utiliza números enteros para representar las coordenadas de una escena, se aplica una traslación a la nube a un nuevo espacio a través del comando lasOffset manteniendo las características estructurales en la pared del deslizamiento.
- Normales (LidarIlluminator) → Se empleó para sombrear la nube de puntos calculando la normal por aproximación de mínimos cuadrados que mejor se ajustan al plano.
- Extracción de características (LidarViewer) → En la ventana de visualización se utilizaron una serie de barras de menú para extraer parámetros de planos y dirección de estrías (Geometric Primitives). Se extrajo el rumbo y echado de planos de la superficie de deslizamiento. Como resultado de la extracción de estrías, el programa arroja los cosenos directores de los vectores de las estrías. En la Tabla 7 se describen las fórmulas empleadas en geología estructural para calcular los cosenos directores a partir del rumbo y el echado de un plano (Allmendinger, 2016). Al despejar el rumbo (3) y echado (4) para los ejes norte y este se obtuvo la relación entre los cosenos directores para definir las características de las estrías. Finalmente el rumbo y echado de los planos y estrías fueron graficados en Stereonet.

Tabla 7. Ecuaciones para determinar los cosenos directores de las coordenadas esféricas (Allmendinger, 2016).

Ejes	Coseno director	Líneas
Norte	$\text{Cos}\alpha$	$\text{cos}(\text{Rumbo})\text{cos}(\text{Echado})$
Este	$\text{Cos}\beta$	$\text{sin}(\text{Rumbo})\text{cos}(\text{Echado})$
Z	$\text{cos}\gamma$	$\text{sin}(\text{Echado})$

$$\text{Rumbo} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{cos}\beta}{\text{cos}\alpha} \right) \quad (3)$$

$$\text{Echado} = \sin^{-1}(\text{cos}\gamma) \quad (4)$$

2.3 Análisis de factores desencadenantes

Para analizar los factores climáticos se aplicó estadística descriptiva para determinar anomalías en la intensidad de la precipitación mensual y anomalías en la temperatura de la superficie del océano (Índice Oceánico de El Niño) durante el periodo 2010-2015. Adicionalmente compararon los registros históricos para observar frecuencia e intensidad de eventos de precipitación en los últimos 25 años.

Con relación a otros factores que afectan la estabilidad del suelo se realizaron búsquedas de sismicidad, evidencias de reparaciones en la carretera después de eventos fuertes en el norte de Baja California, así como el flujo de vehículos durante el 2013.

Capítulo 3

3. Resultados

3.1. Modelos Digitales de Elevación (MDE)

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son importantes para en el entendimiento de las características y la evolución temporal de los procesos que afectan a los paisajes en la superficie de la Tierra, particularmente en los procesos geomorfológicos.

Los MDE como herramientas de visualización y análisis de los procesos geomorfológicos se han visto promovidos durante las últimas décadas por el uso de tecnologías emergentes: LiDAR, Radar, Drones, etc. En este trabajo se empleó una serie de MDE obtenidos de diferentes fuentes.

Como se mencionó en el apartado 5.1, para el estudio de la zona del deslizamiento se analizaron dos MDE (INEGI 2006 y GeoEye 2014), una nube de puntos de LiDAR aéreo de alta resolución (NCALM) y un conjunto de fotografías aéreas tomadas en dos diferentes fechas y con dos diferentes plataformas. Para el MDE generado a partir de la nube NCALM se filtraron puntos que no representaban la superficie del suelo, en particular una nube que se registró durante el levantamiento aéreo (Figura 15). El producto final fue un MDE con una resolución de 0.5 m con un sistema de coordenadas WGS84 Zona UTM 11N con alturas geoidales.

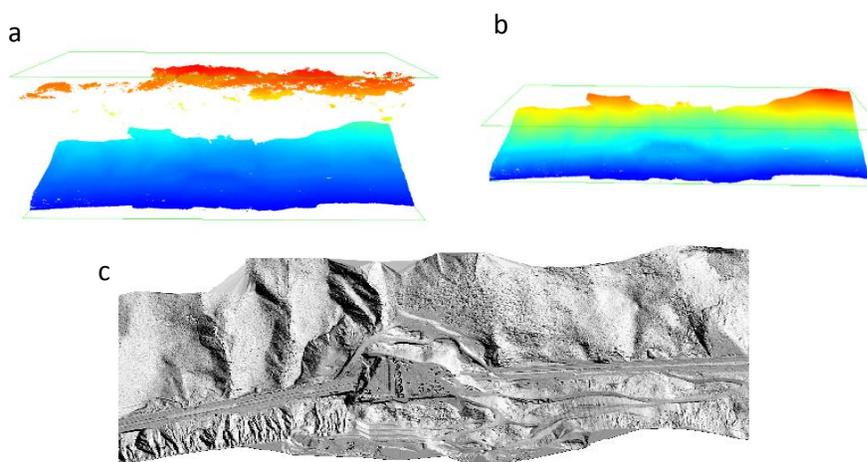


Figura 15. Generación de MDE a partir de nube de puntos NCALM. La escala de color en las nubes de puntos a y b representan un gradiente de altura donde azul representa los valores más bajos y el rojo lo más alto. a) Nube de puntos original con presencia de ruido (nubosidad). b) Nube de puntos procesada en LAStools para ignorar la clase 7 (ruido). c) MDE sombreado.

Para la nube de puntos a partir de las fotos tomadas por el dron DJI S800, se realizó una alineación del 73% de las fotos. Durante la reconstrucción se emplearon 11 GCPs de los 12 propuestos, alcanzando un error promedio en XYZ de 0.83m (Tabla 8). El ajuste del modelo (alta calidad con filtro agresivo) generó una nube de aproximadamente 23 millones de puntos, con una densidad promedio 43 puntos/m² (Figura 16a).

Tabla 8. Parámetros de error de georeferenciación para la nube de puntos generada con las fotos del dron DJI S800.

Punto de control	Error XY (m)	Error Z (m)	Error (m)	Proyecciones	Error (pix)
1	/	/	/	14	1.32
2	0.84	-0.20	0.86	30	1.08
3	1.75	0.19	1.76	32	1.33
4	0.75	0.05	0.75	18	1.43
5	1.74	-0.36	1.77	1	0.00
6	/	/	/	/	/
7	0.45	-0.09	0.46	10	0.43
8	0.68	0.18	0.70	16	2.40
11	0.14	0.11	0.18	3	0.39
12	0.14	-0.11	0.18	22	0.84
Promedio	0.81	-0.03	0.83	/	0.99

Por otra parte, las nubes de puntos generadas a partir del dron eBee tuvieron una alineación del 94% para las imágenes RGB y 86% para las imágenes infrarrojas (NIR). Los modelos generados presentaron una diferencia relativa de 1.8% y 0.31% con respecto a la optimización de los parámetros internos y los parámetros de la cámara durante su procesamiento con PIX4D. El error RMS promedio en los modelos de las nubes de puntos fue menor a 10 cm. En el caso del modelo a partir de las imágenes NIR se alcanzaron errores en XYZ menores al centímetro, mientras que para el modelo RGB el error promedio se mantuvo en el rango de los 2 cm (Tabla 9). El tamaño de ambas nubes fue superior a los 70 millones de puntos, y la densidad oscila entre 47 a 63 puntos/m² (Figura 16b).

Tabla 9. Parámetros de error de georeferenciación para las nubes de puntos a partir del dron eBee.

Puntos de control	Error NIR				Error RGB			
	X (m)	Y (m)	Z (m)	pixel	X (m)	Y (m)	Z (m)	pixel
1	0.014	0.012	-0.045	0.874	0.008	-0.047	-0.032	0.942
2	-0.011	-0.001	0.027	0.24	-0.023	0.003	0.003	0.999
3	-0.001	-0.003	-0.039	0.306	0.05	-0.014	-0.034	1.308
4	-0.008	0.003	0.03	0.378	-0.036	0.038	0.061	0.909
5	0.018	-0.012	-0.007	0.011	0.107	0.097	-0.386	0.262
Promedio (m)	0.002	-0.0001	-0.006	0.36	0.021	0.015	-0.077	0.884

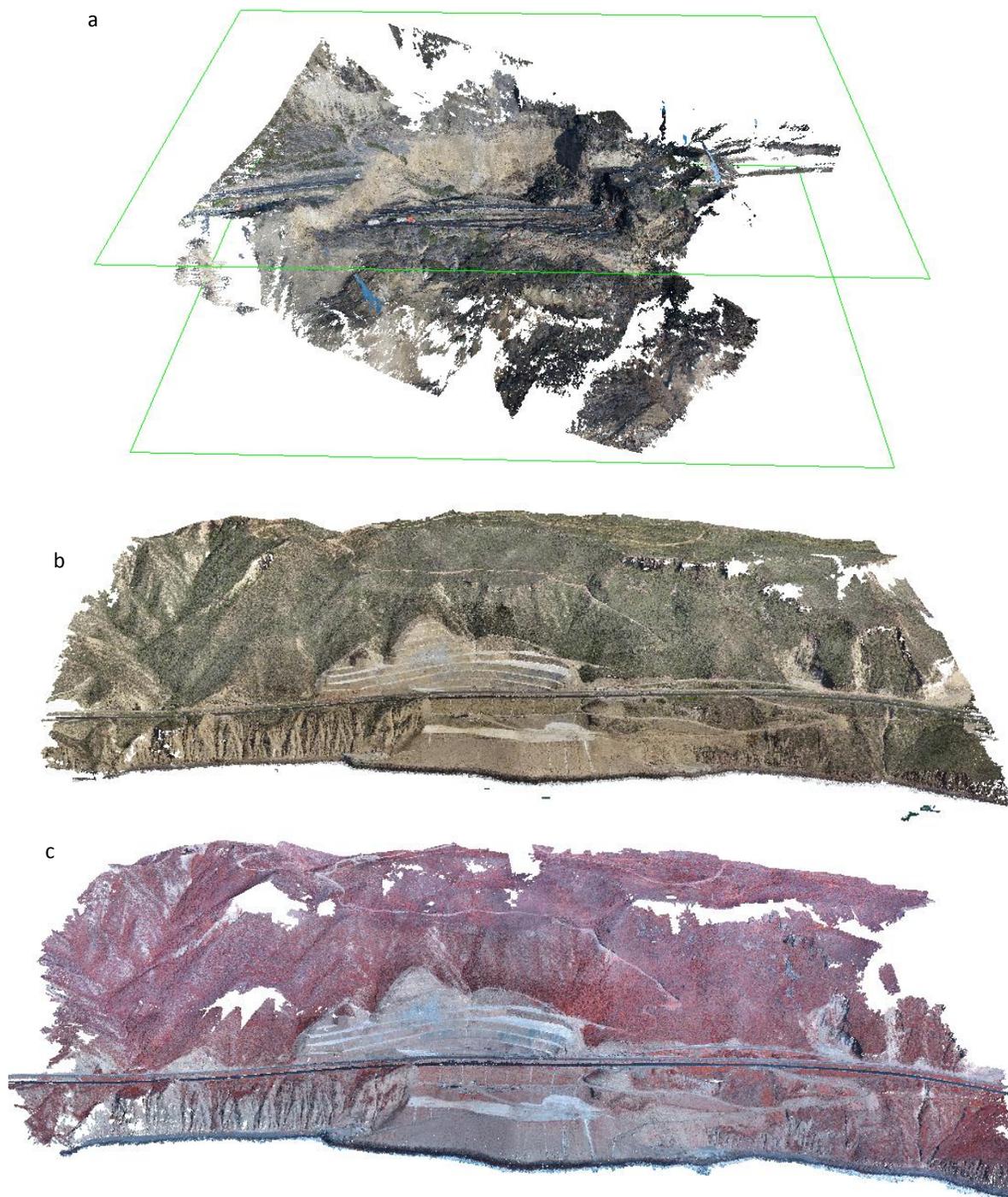


Figura 16. Nubes de puntos densas para el km 93+50 obtenidas con drones. a) Nube de puntos a partir del dron DJI S800. Las imágenes empleadas en la reconstrucción de la escena se enfocaron en el área principal del deslizamiento por lo que la mayor acumulación de error se ubica en la periferia del modelo, especialmente del lado derecho. Los modelos b y c son nubes de puntos obtenidas a partir del dron eBee en color verdadero (RGB) y color cercano al infrarrojo (NIR), respectivamente. A diferencia del modelo RGB, el modelo NIR fue construido con aproximadamente 20% menos fotografías.

Las nubes de puntos de ambos drones fueron procesadas en LASTools y como producto final se obtuvieron MDE con resolución de 0.5m para DJI S800 y 1m para eBee. En la Tabla 3 se resumen las características de las diferentes fuentes de datos a partir de las que se generaron los MDE. Otros productos que se generaron fueron ortomosaicos de la zona de estudio con resolución de 5 cm y 4.5 cm, respectivamente (Figura 17).

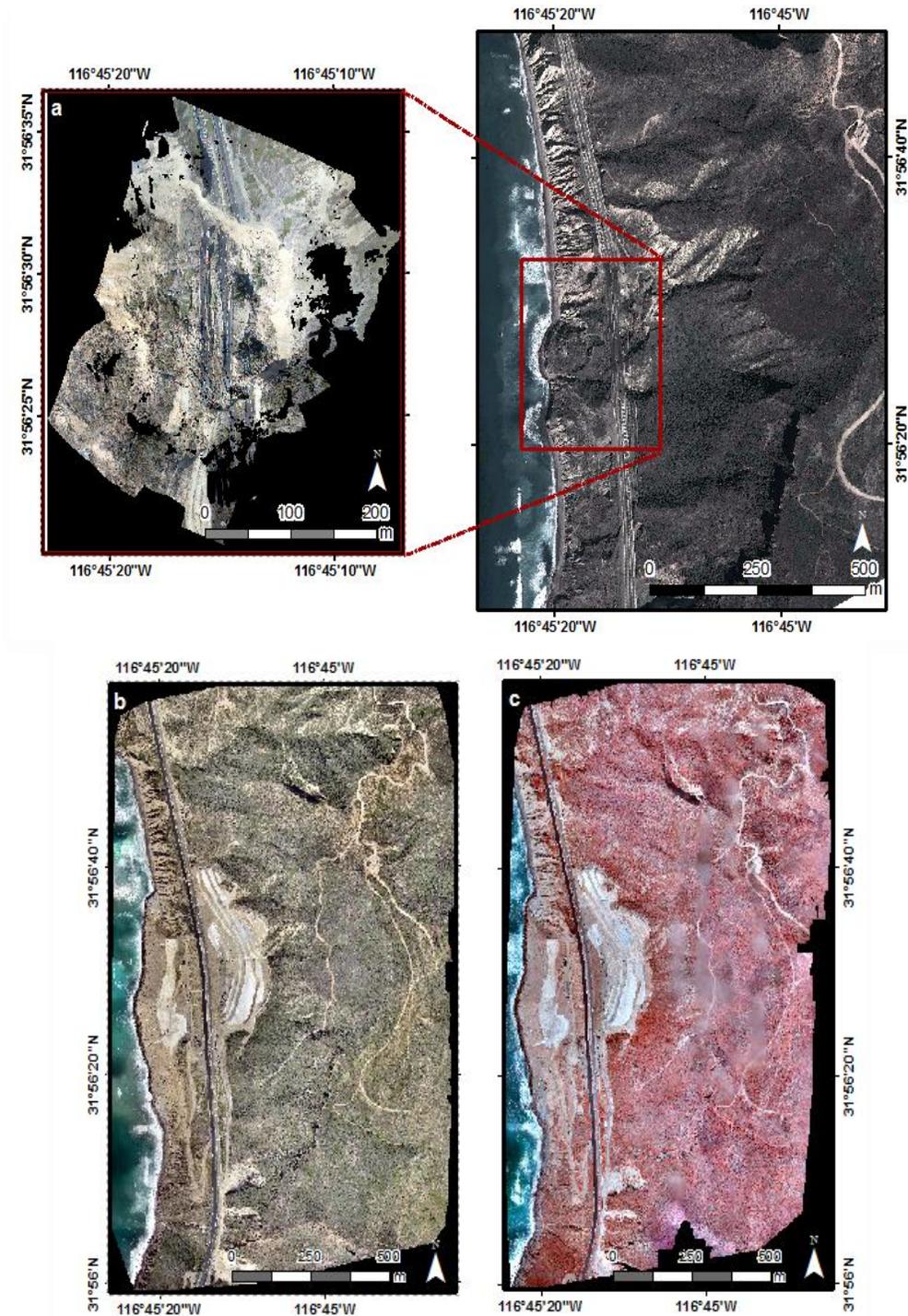


Figura 17. Mosaicos generados a partir de las nubes de puntos de drones. a) Mosaico DJI S800 con resolución de 5cm. b) Mosaico eBee RGB con resolución de 4.5 cm. C) Mosaico eBee NIR con resolución de 4.8 cm.

3.2. Estimación de cambio volumétrico

La estimación del volumen desplazado en los deslizamientos se basa en el principio de la conservación de las masas. El balance de masa determina las zonas en donde hay pérdida de material (remoción) y la distribución final del suelo (zonas de acumulación). La cuantificación del volumen desplazado es un dato que apoya en el entendimiento del tipo de deslizamiento que se presenta en determinada zona.

El deslizamiento en el km 93+50 ocurrido el 28 de diciembre de 2013 fue un evento de tipo rotacional. La Figura 18 muestra cinco secciones en donde se representan las diferentes dimensiones observadas en el deslizamiento. La parte más ancha del deslizamiento se localiza entre los segmentos C y D con aproximadamente 370 m. La zona más angosta tiene 135 m (segmento A). El segmento B indica la zona del deslizamiento que afectó al trazo de la carretera (aproximadamente 170 m). El segmento D marca una zona de ~230 m en donde hay una transición del movimiento del deslizamiento, mientras que el segmento E marca indica la longitud (~190 m) general del deslizamiento descrita en la Figura 18.

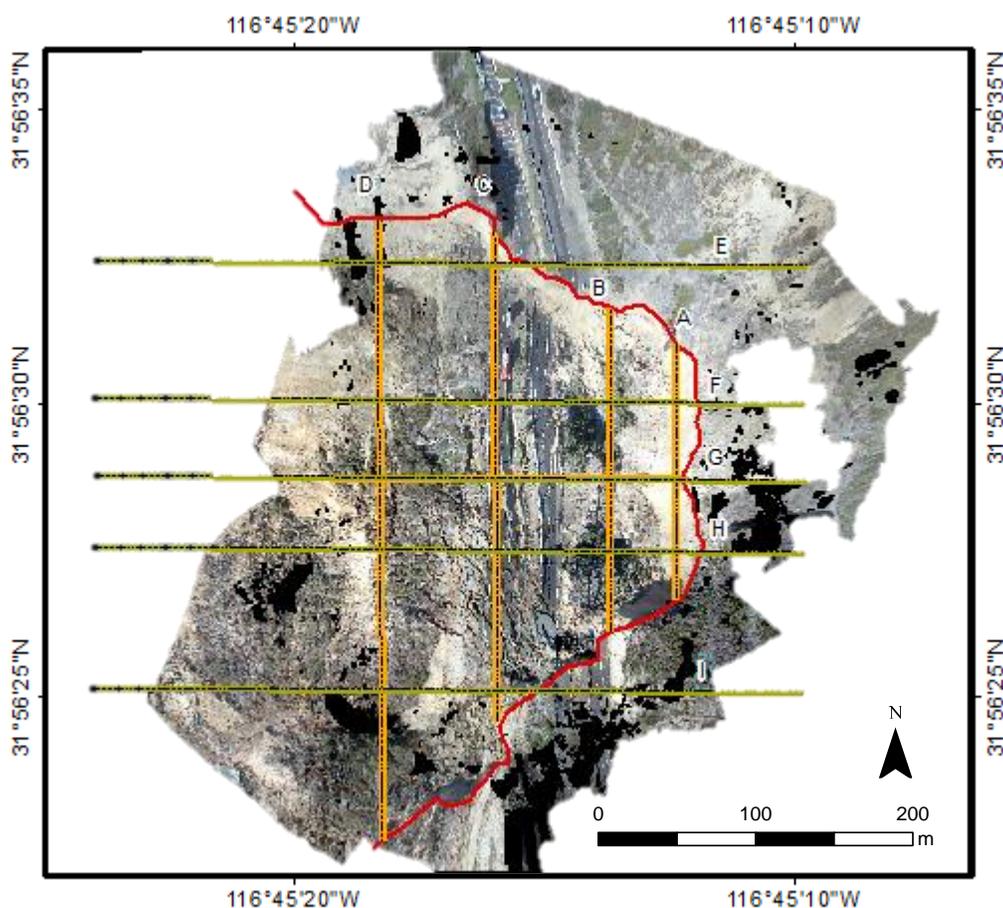


Figura 18. Determinación general de las dimensiones del deslizamiento en el km 93+50. Las secciones transversales amarillas representan las zonas de donde se extrajeron las dimensiones del deslizamiento. Las secciones transversales verdes son zonas de donde se realizaron perfiles entre el MDE INEGI (2006) y DJI S800 (2013).

Para la determinación del cambio de altura entre 2006 y 2013 en el km 93+50 se usó el MDE descargado del INEGI y a partir de la nube de puntos generada de las imágenes del dron DJI S800. La Figura 19 representa los perfiles topográficos de las secciones E, F, H e I indicadas en la Figura 18. A partir de los perfiles topográficos se distingue que las secciones E y F se encuentran incompletas. Esto se debe a que en la adquisición de imágenes con las cuales se realizó la reconstrucción de la escena solo se tomó en cuenta la zona principal del deslizamiento limitando los puntos de correspondencia fuera de esta zona. Esto se traduce en distorsión en los bordes de la escena y pérdida de información (vacíos). Otra característica observada a partir de los perfiles topográficos es la tendencia de la masa removida. De acuerdo a los perfiles la parte central del deslizamiento es la zona con mayor pérdida de material (b y c).

Mientras que el segmento I (perfil d) indica un movimiento hacia el suroeste. El balance de masas del deslizamiento en el km 93+50 revela un cambio de elevación de hasta 35 m en la zona de ruptura del deslizamiento (rojo), mientras que la acumulación de material se dio en dos zonas cercanas a la costa con acumulaciones de hasta 35 m (Figura 20a). En relación al cambio volumétrico se calcula que el deslizamiento removió $302,444 \text{ m}^3$ y se acumularon $291,256 \text{ m}^3$. De acuerdo con la definición de balance de masas la cantidad de volumen desplazado debe ser igual al removido por lo que se considera una buena estimación. No obstante se debe considerar el efecto del material poco consolidado en el cambio de volumen durante el transporte de la masa, por lo cual se considera que el volumen acumulado debería de rondar los $400,000 \text{ m}^3$. La diferencia entre los volúmenes de acumulación calculado y esperado se puede explicar con los perfiles a y b de la Figura 19, en donde se observa una pérdida de información por una adquisición insuficiente de datos.

Adicionalmente se hizo el ejercicio del balance de masas para los MDE entre 2013 a 2016. El balance de masas para este periodo constituye las obras de rehabilitación de la carretera escénica Tijuana-Ensenada. Entre diciembre de 2013 y enero de 2014 no se presentaron cambios significativos en la elevación (menores a 10 m Figura 20b). El balance de masas indica que se removieron $\sim 45,000 \text{ m}^3$ y se acumularon $\sim 52,000 \text{ m}^3$. Entre enero de 2014 y julio de 2014 los trabajos de rehabilitación de la carretera escénica generaron un remoción de $155,407 \text{ m}^3$ y una acumulación de $242,442 \text{ m}^3$, con cambios de altura entre 5 y 10 m (Figura 20c). Entre julio de 2013 y marzo de 2016 se completaron las obras de rehabilitación de la carretera. Las obras de rehabilitación incluyeron el corte $158,829 \text{ m}^3$ sobre la pendiente en la que ocurrió el deslizamiento y el relleno de la depresión formada en el deslizamiento y una plataforma en la línea costa, ambos con un volumen de $220,454 \text{ m}^3$ (Figura 20d).

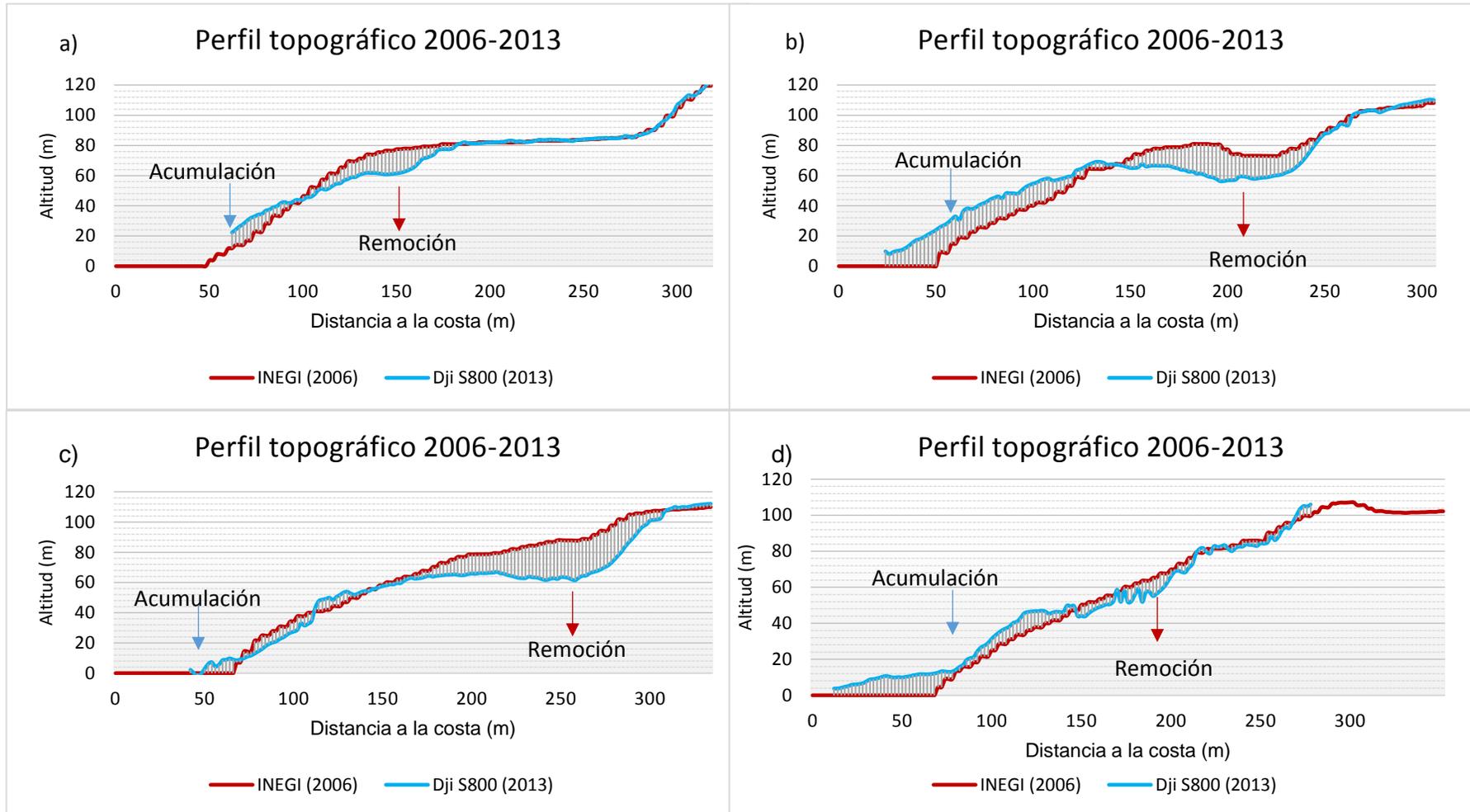
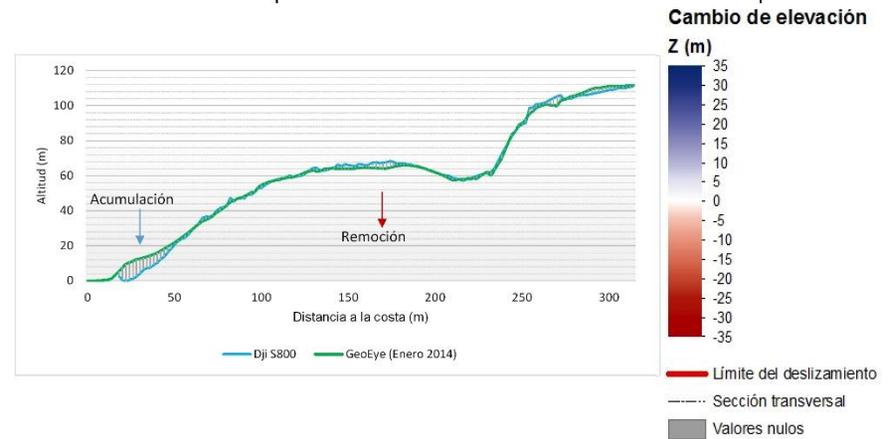
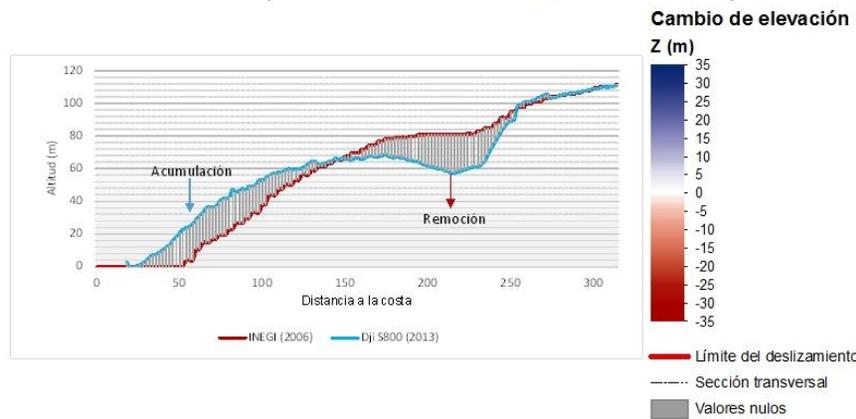
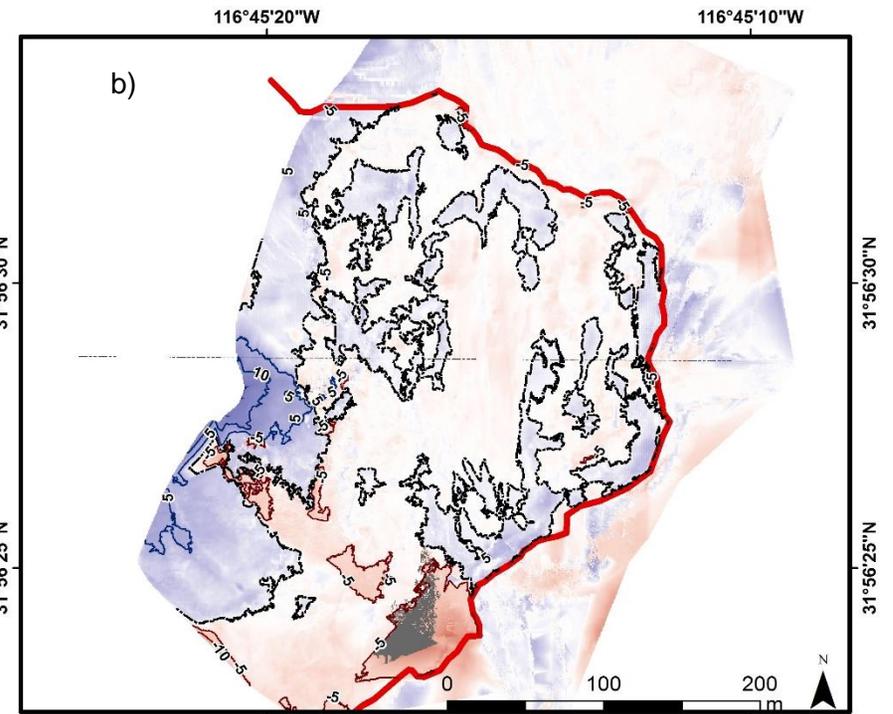
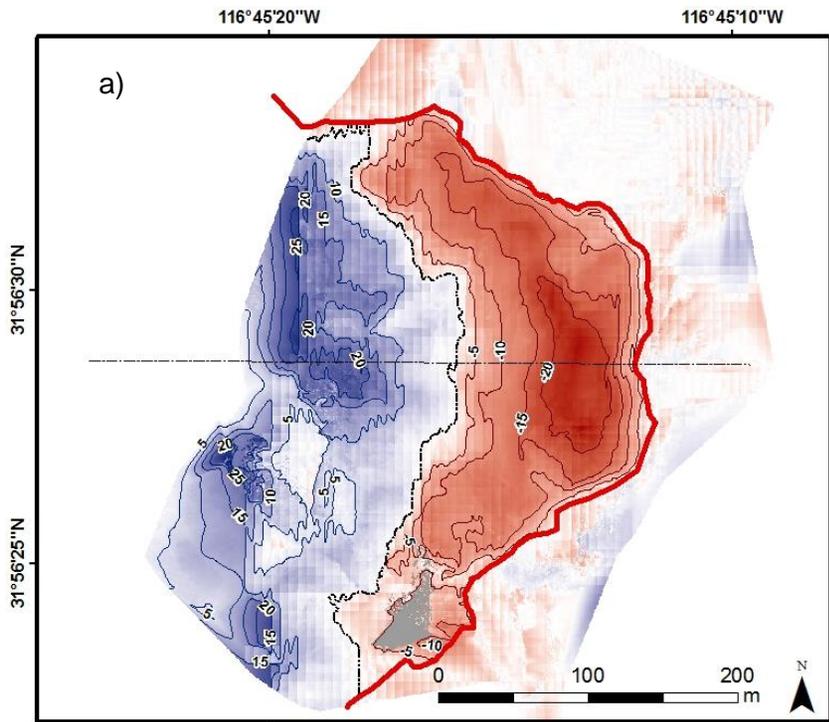


Figura 19. Perfiles topográficos del cambio de elevación entre los MDE INEGI (2006) y DJI S800 (2013). En la Figura 18 se indica la ubicación de los perfiles. El perfil a está indicado por el transecto E. El perfil b está indicado por el transecto F. El perfil c está indicado por el transecto H. El transecto d está indicado por el transecto I.



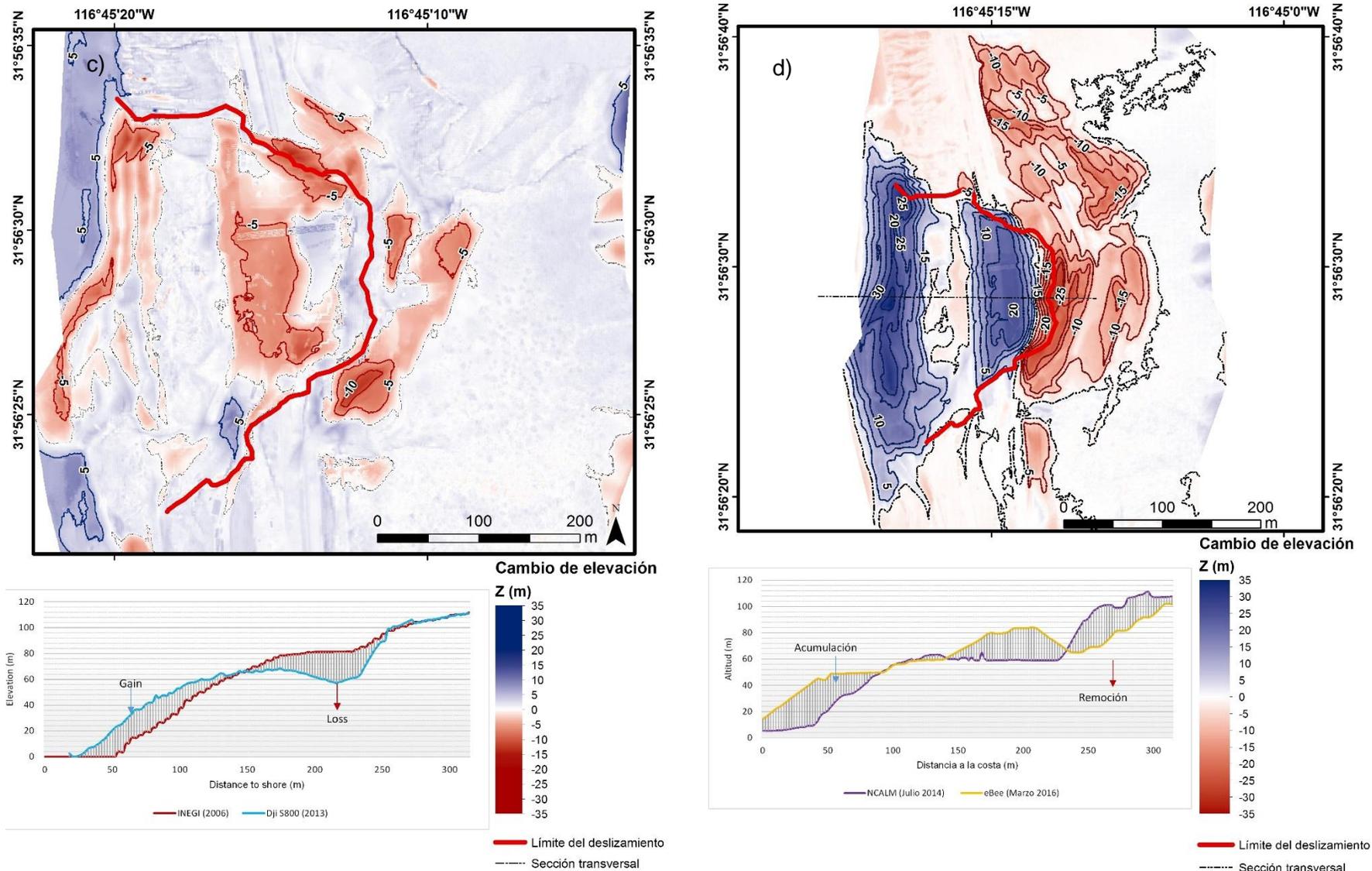


Figura 20. Detección de cambio de volumen en el km 93+50 entre 2006 y 2016. a) Cambio de elevación MDE INEGI (2006) y DJI S800 (2013). b) Cambio de elevación entre MDE DJI S800 (2013) y GeoEye 1(enero de 2014). c) Cambio de elevación entre MDE GeoEye 1 (enero 2014) y NCALM (julio de 2014). d) Cambio de elevación entre MDE NCALM (julio de 2014) y eBee (marzo de 2016).

3.3. Análisis de la superficie de deslizamiento en la nube de puntos TLS

Los planos y estrías son estructuras geológicas que definen el movimiento de los deslizamientos. El uso de sistemas de escaneo láser terrestres o LiDAR terrestre (TLS) son una herramienta poderosa para la adquisición y análisis estructural. TLS ofrece un método altamente efectivo para coleccionar datos con alta precisión y resolución 3D. En este trabajo se usaron 12 nubes TLS para ajustar un modelo de la zona principal del deslizamiento. Como resultado se obtuvo una nube de puntos unificada con una densidad de 4118 pts/m² (Figura 21). Al comparar la densidad de puntos de las nubes TLS y las nubes de puntos por LiDAR aéreo (NCALM) o incluso con las nubes generadas por drones, es claro que la fidelidad de los detalles de los planos es más precisa (~2mm). Por otra parte, esta misma característica permite extraer las estrías registradas en los planos durante el deslizamiento.

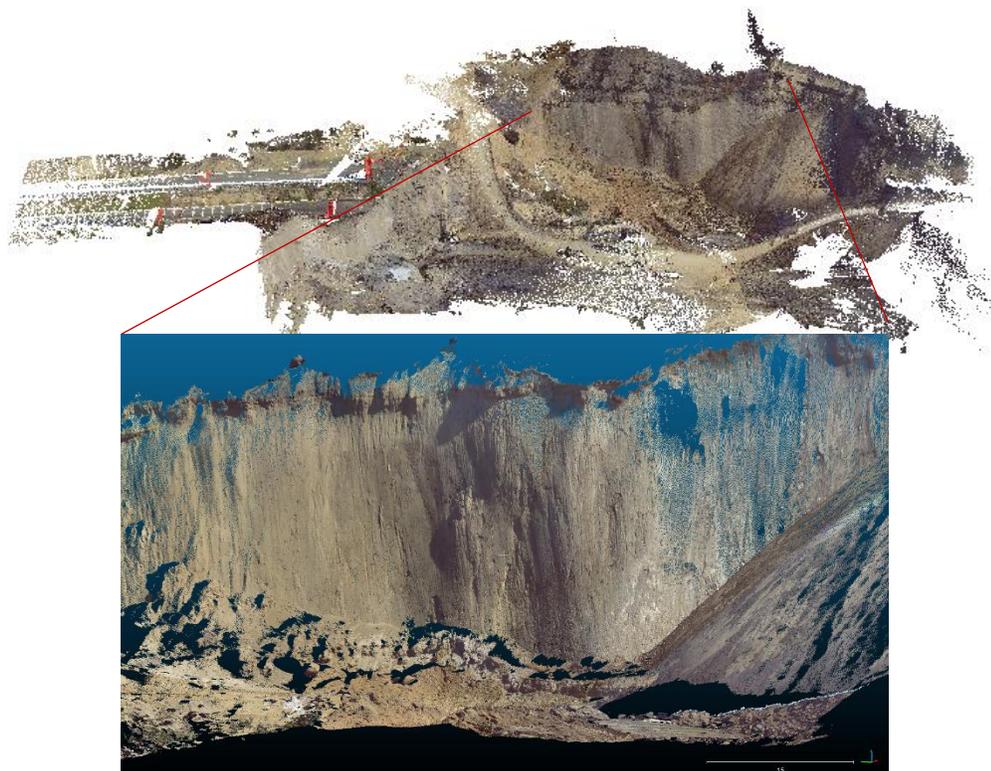


Figura 21. Nube de puntos TLS unificada para el km 93+50 de la carretera escénica Tijuana-Ensenada. La alta precisión de las nubes de puntos TLS permite extraer planos y estrías a escalas menores.

Se empleó la nube de puntos central (#57) de la zona del deslizamiento para realizar una extracción de la geometría de los planos y estrías. La pared de deslizamiento fue seccionada en cuatro zonas para revisar ambas características y determinar si se presentó rotación en las marcas de los planos durante el deslizamiento. El reconocimiento en campo de las características estructurales de la zona indicaron que el

deslizamiento fue de tipo rotacional con una geometría normal, lo que significa que no se espera que haya una variación entre la orientación de las estrías con respecto a los planos. En la Figura 22 se resumen los resultados observados al graficar los planos y las estrías.

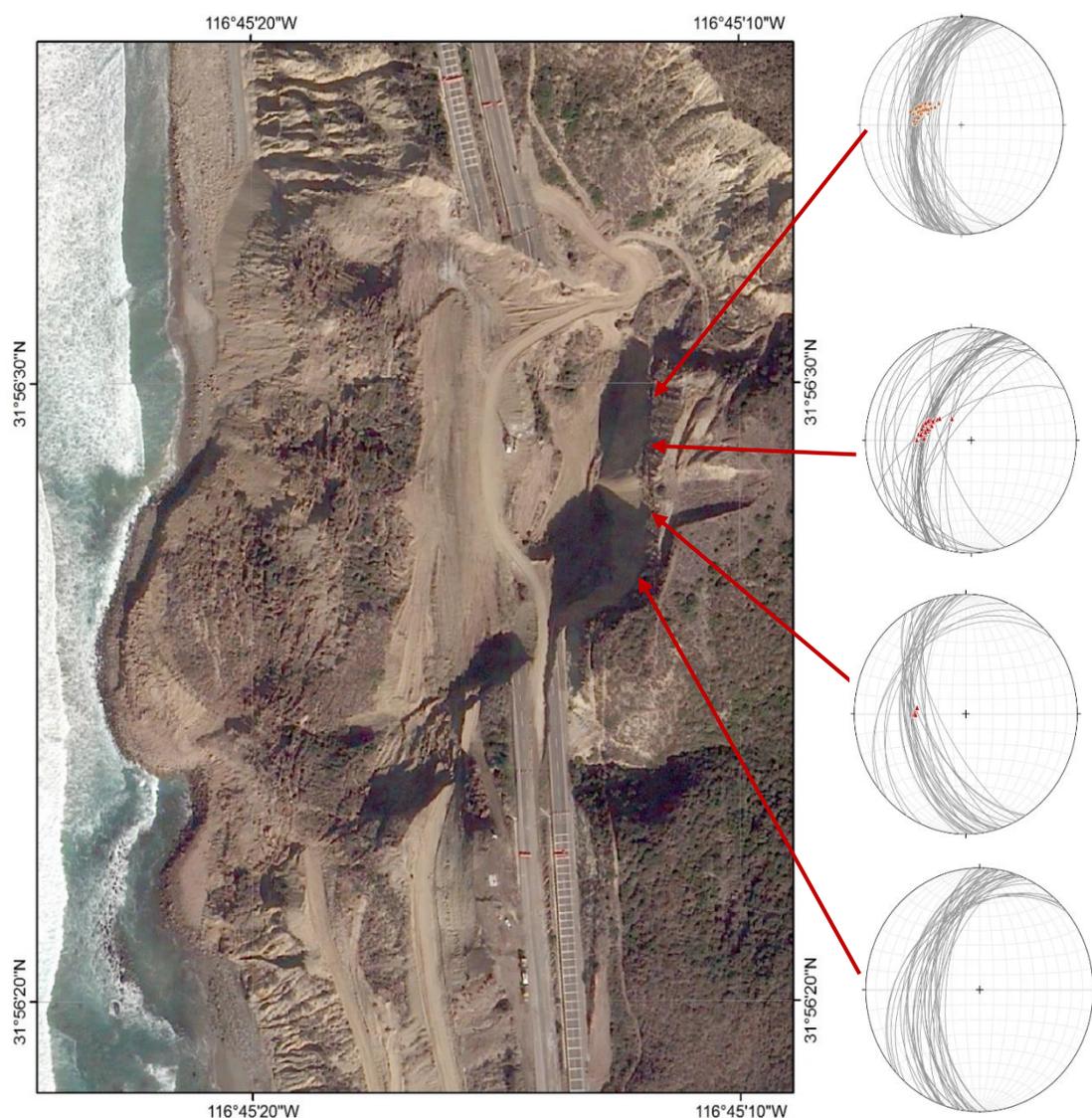


Figura 22. Análisis de planos generados por el movimiento de un bloque deslizante en el km 93+50. La pared principal del deslizamiento fue dividida en secciones conforme al cambio de orientación de pared.

3.4. Análisis de factores desencadenantes

Los deslizamientos se caracterizan por una variedad de mecanismos y factores desencadenantes que definen la velocidad de desarrollo del movimiento de laderas. Aunque factores como la litología, la orientación de las capas y la existencia de fracturas pre-existentes en la zona tiene un efecto notable en la

evolución de los deslizamientos, otros factores como la precipitación y las propiedades hidrológicas de los estratos inferiores como presión de poro y densidad afectan su velocidad.

Como se menciona en el marco geológico, la zona de estudio se caracteriza por un conjunto de derrames basálticos superpuestos a estratos pobremente consolidados, primordialmente de una alternancia de areniscas, limonitas, conglomerados y lutitas. Las lutitas son rocas sedimentarias formadas por arcillas, cuyas propiedades químicas y físicas son complejas. Presentan espacios intersticiales muy pequeños, por lo que el agua tiene dificultad para moverse a través de la roca; sin embargo cuando se encuentra en un horizonte fracturado aumenta su transmisión considerablemente, además de tener una capacidad para absorber grandes cantidades de agua y expandirse.

La humedad en las capas inferiores en la zona de estudio es un factor importante debido a que esta actúa como lubricante entre bloques cuando hay una fractura pre-existente. En el caso del corredor entre Punta San Miguel y Punta Salsipuedes la presencia de fracturas múltiples y límites de antiguos deslizamientos son puntos en donde la infiltración de agua pudo actuar como lubricante entre bloques.

Observaciones en la zona de estudio anteriores al deslizamiento demostraron que las capas de lutitas contenían humedad. La humedad en estas capas es, posiblemente, resultado de la infiltración de agua en zonas al este de la zona de estudio, donde la pendiente y material de la cuenca permite la entrada de humedad a los estratos inferiores y posteriormente su transporte hacia la costa (Figura 23). En la Tabla 10 se expresan los valores de permeabilidad observados en los diferentes tipos de materiales observados en el mapa geológico de la zona de estudio. Al noroeste de la zona del deslizamiento se encuentran una litología con permeabilidad alta. Estas zonas están constituidos por areniscas y conglomerados que se distribuyen en el valle de Guadalupe y los cauces de escurrimientos de la región. De acuerdo con el INEGI estas zonas se clasifican como unidades geohidrológicas con alta porosidad y permeabilidad. Mientras que la región entre San Miguel y Salsipuedes presentan permeabilidad media a baja. En el caso del corredor entre punta San Miguel y punta Salsipuedes se genera una permeabilidad secundaria asociada a fracturas que actúan como conductos a través de la columna estratigráfica.

En conjunto, la baja precipitación del mes de diciembre de 2013 y la alta evapotranspiración asociada a zonas áridas no justifican la cantidad de humedad en la zona, por lo que se puede suponer que la humedad en la zona es resultado del movimiento lento durante un lapso de tiempo largo.

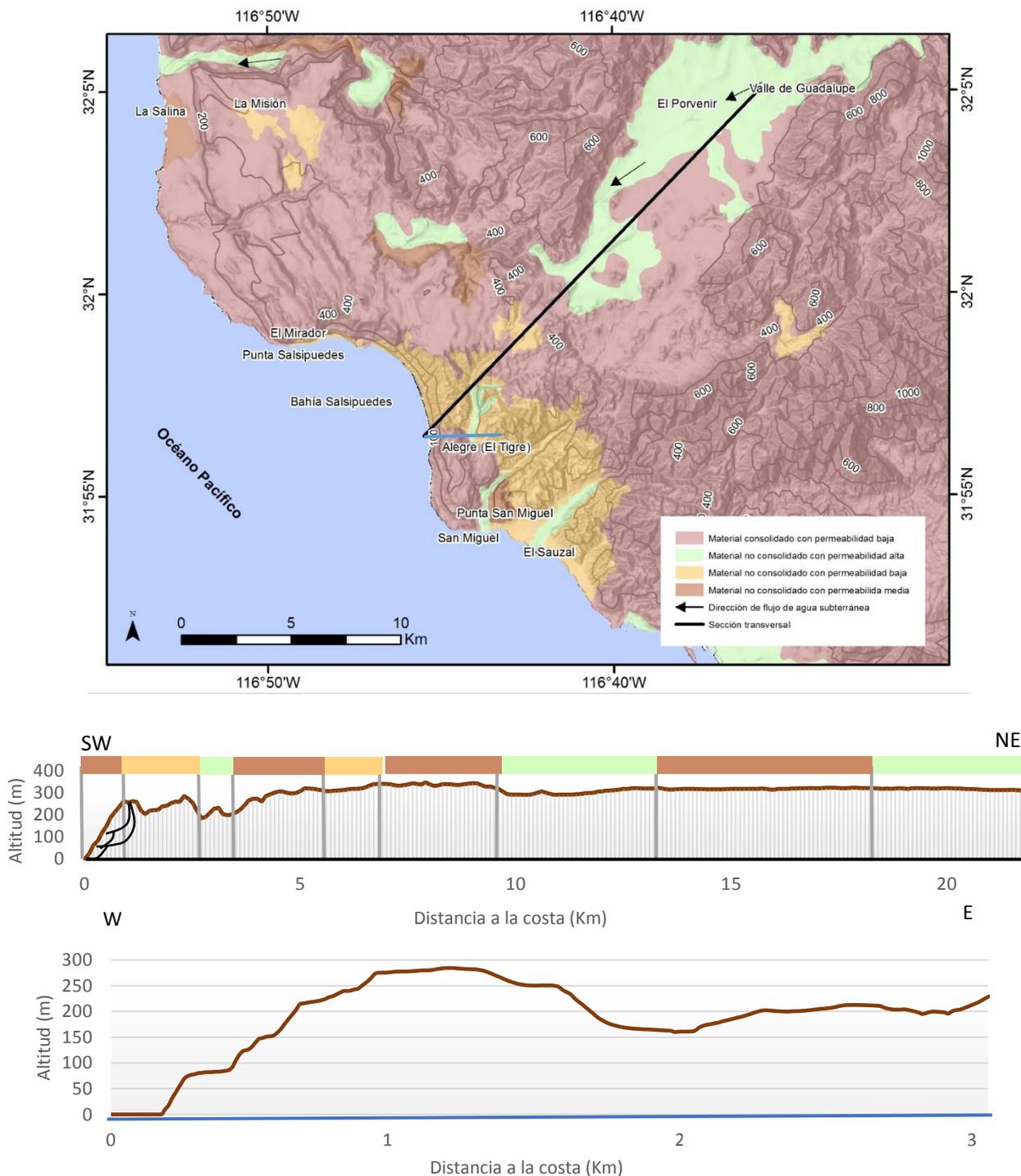
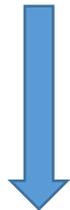


Figura 23. Mapa de permeabilidad en la zona NW de Ensenada. La simbología en el mapa indica el cambio de permeabilidad en base a la clasificación del tipo de litología en el noroeste de Ensenada. Las flechas simbolizan la dirección del flujo de agua subterránea, mientras que las líneas representan perfiles topográficos SW-NE (negra) y W-E (azul) del km 93. La ladera oeste (costa) se caracteriza por una pendiente moderada a fuerte ($>25^\circ$) donde hay evidencia de múltiples fracturas y antiguos deslizamientos. Esta zona está constituida por material no consolidado con permeabilidad baja a media. Por otra parte al NE de la zona de estudio se observan materiales no consolidados con permeabilidad variable. Las zonas de alta permeabilidad se localizan en el Valle de Guadalupe, el ejido El Porvenir y las áreas de acumulación de escorrentías, donde la pendiente es moderada a suave ($< 20^\circ$).

Tabla 10. Tasa de permeabilidad para diferentes tipos de materiales.		
Suelo	Coefficiente de permeabilidad, k (m/año)	Permeabilidad relativa
Grava	$1 \times 10^4 - 1 \times 10^7$	<p style="text-align: center;">Alta</p>  <p style="text-align: center;">Semi-permeable (Muy lento)</p>
Arena	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^5$	
Limo-arena	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^4$	
Basalto permeable	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^5$	
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^3$	
Limo	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^2$	
Caliza y dolomita	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^1$	
Arenisca	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^1$	
Esquisto, lutita	$1 \times 10^6 - 1 \times 10^2$	

En base a los registros de precipitación de estaciones meteorológicas privadas en el noroeste de Ensenada se demuestra que durante el ciclo hidrológico 2013-2014 la precipitación acumulada de diciembre de 2013 no es significativa como factor desencadenante del deslizamiento en el km 93 +50 (Figura 24). Durante diciembre de 2013, la precipitación promedio registrada fue de 25 mm, presentándose a principios y a mediados de mes. Al comparar las precipitaciones durante este mes con los años anteriores se observa que la precipitación acumulada es inferior a lo observado para esta época del año en la región.

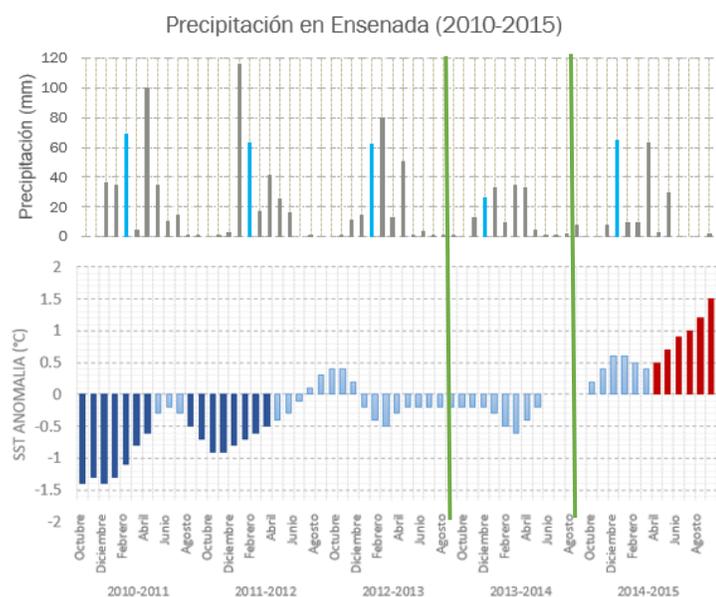


Figura 24. Registros de precipitación mensuales en el noroeste de Ensenada y la influencia del ENSO para el 2010-2015. En la gráfica superior se observan las precipitaciones mensuales acumuladas, en donde las columnas azules representan las precipitaciones durante el mes de diciembre en los diferentes periodos. En la gráfica inferior se representan los umbrales de anomalías del ENSO registrados por la NASA. En la gráfica inferior las columnas azules oscuro representan periodos de calentamiento de la superficie del océano (fenómeno de El Niño), mientras las columnas rojas significan periodos de enfriamiento (fenómeno La Niña) y, las columnas azul claro constituyen periodos en donde la temperatura superficial del océano se mantiene dentro del rango normal. Las marcas verdes delimitan los valores de precipitación y umbrales de anomalías del ENSO durante el ciclo hidrológico 2013-2014. Durante este periodo las precipitaciones son inferiores a las observadas en otros años y la temperatura del océano se mantuvo dentro de los rangos promedio, lo que significa que no se presentó efectos por calentamiento/enfriamiento de la superficie del océano.

Conforme a lo anterior, los registros revelan que durante los años 2010 y 2012 las precipitaciones anuales superan el promedio regional (>250 mm/año), años que coinciden con influencia del fenómeno de El Niño (periodos de enfriamiento de la superficie del océano). De igual modo la base de datos de precipitaciones históricas de CLICOM (2016) indican que entre el 2000 y 2010, años anteriores al deslizamiento, la región se vio afectada por lluvias intensas superando los 300 mm anuales con un intervalo de recurrencia relativamente corto. En conjunto se tiene registros de precipitaciones extraordinarias durante el 2003, 2008, 2010, 2011 y 2012. Comparando la frecuencia de precipitaciones intensas entre 1990-2000 y 2000-2015, resulta notorio que durante los últimos 10 años ha habido una alta frecuencia de eventos extraordinarios.

En relación a la sismicidad presente durante el 2013, la base de datos de RESNOM registró que durante este año se presentaron 1006 sismos en el norte de Baja California, de los cuales 92% fueron catalogados como microsismos ($M < 3$) y menos de 0.5% alcanzaron una magnitud mayor a 4. No obstante 60% de los registros sísmicos en la zona se registraron entre los meses de noviembre y diciembre. En diciembre de 2013 se registraron dos eventos fuertes: a) Evento de magnitud 5.2 ocurrido el día 20 ubicado a 115 km al sureste de la zona de deslizamiento, b) Evento de magnitud 4.6 ocurrido el día 26 ubicado a 70 km al noreste de la zona de deslizamiento. La Figura 25 muestra la sismicidad en el noroeste de Baja California durante el 2013.

Como dato complementario se buscó realizar un cálculo de la velocidad del deslizamiento, no obstante la falta de registros consecutivos en la zona limitaron la obtención de este dato. De acuerdo al tipo de deslizamiento, la velocidad de desplazamiento fue de aproximadamente 10 cm/mes durante los últimos tres meses. En base a los registros de notas periodísticas entre 2010 hasta la fecha del deslizamiento (diciembre de 2013) se observó un periodo de diferentes velocidades de desplazamiento (Figura 26). Antes de 2010 los registros de reparaciones en el tramo del km 93 son esporádicos. Por otra parte entre 2010 y 2012 se registró un periodo en el aumento de reparaciones entre los tramos 91 y 95, como consecuencia del sismo de magnitud de 7.2 ocurrido el 4 de abril en Mexicali (Ing. Ramiro Martínez Medina titular de la subdelegación técnica de CAPUFE, comunicación personal). Durante 2013 se observa un aumento en la velocidad del deslizamiento. A principios de octubre se reportó un hundimiento de 10 cm de profundidad y 27 cm de ancho en la zona de estudio. Para el 20 de diciembre se observaron fisuras en el pavimento y hundimiento de entre 10 a 15 cm en esta zona. Esto se asoció a un sismo de magnitud 5.2 en Camalú. El 26 de diciembre otro reconocimiento en la zona indicó un hundimiento acumulado de 30 cm. Entre la noche del 27 de diciembre y la madrugada del 28 de diciembre la velocidad promedio del deslizamiento fue menor a los 5 cm/hr alcanzando un hundimiento acumulado de 20 cm. Más tarde el conjunto de

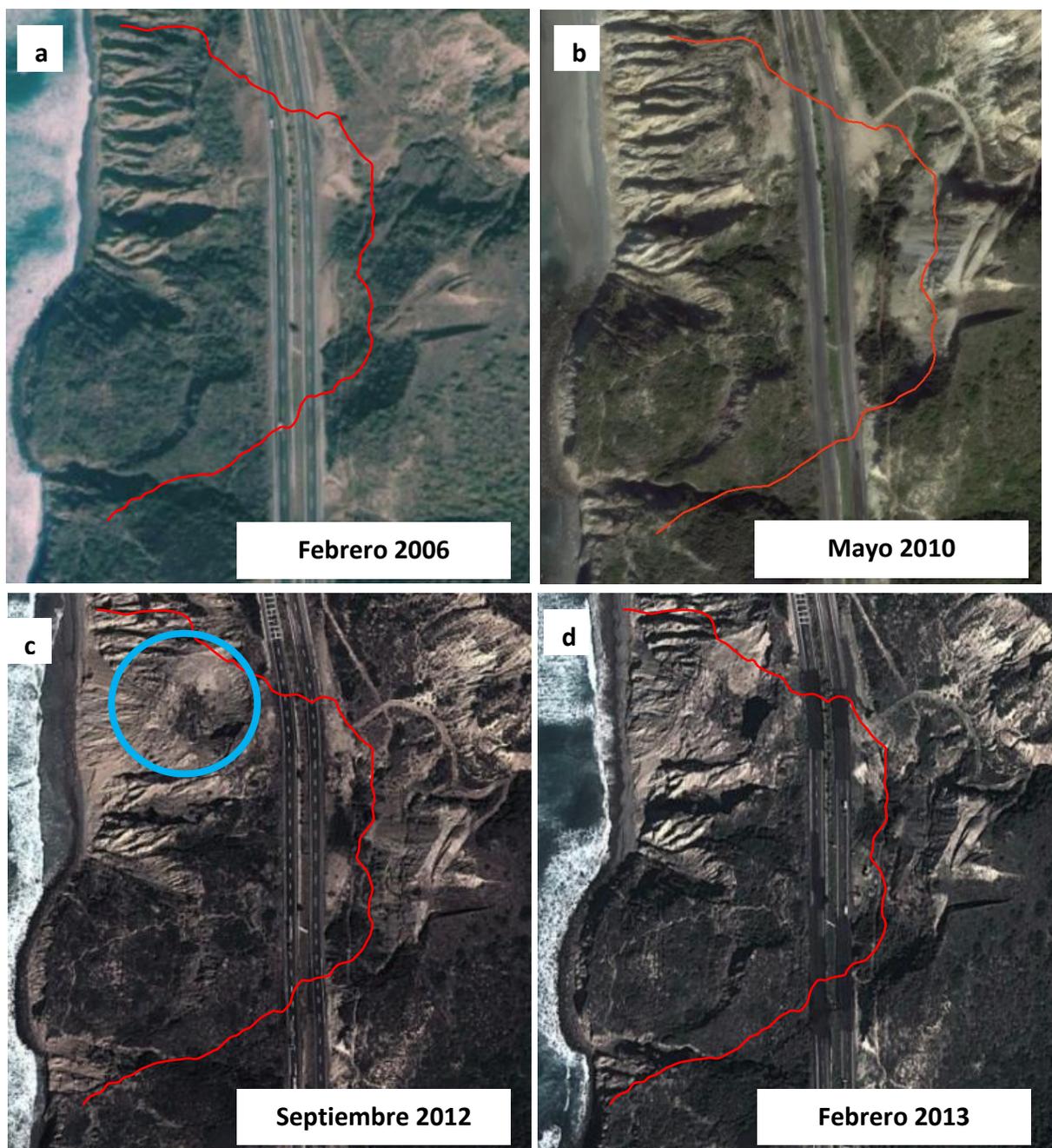


Figura 26. Imágenes satelitales de Google Earth Pro para el km 93+50 entre 2006 y 2013, la línea roja representa el límite del deslizamiento de 2013. En todas las imágenes se distingue un deslizamiento parcial de una masa a hacia el mar donde el pie y dedos de este generan un forma convexa en la línea de costa. Entre 2006 y 2010 (a y b) se observa una zona con un cambio significativo en la geomorfología. En la imagen b se distingue una alteración en la cabeza del deslizamiento ocasionada por la pérdida de cobertura vegetal exponiendo parte superior de la zona de fractura. Entre 2012 y 2013 (c y d) se observan la adición de reductores de velocidad en ambos lados del margen del deslizamiento, así como diversas reparaciones en esta zona. Por otra parte, entre 2010 y 2012 se distingue la pérdida de un bloque de suelo entre la carretera y la línea de costa (circulo azul).d) En febrero de 2013 se observa un hundimiento considerable de la carretera y de la problemática del límite del deslizamiento en la carretera.

Otro factor que afecta la zona es la densidad de vehículos que transitan la carretera escénica cada año y la presencia de reductores de velocidad que actúan como irregularidades en la carretera. Cuando un vehículo entra en contacto con los reductores de velocidad induce una carga dinámica en el pavimento que se convierte en ondas de esfuerzos que se propagan excitando a las partículas del suelo y aumentando la presión entre los poros de los suelos no consolidados.

En la zona entre San Miguel y el Mirador se ubicaron diferentes zonas con reductores de velocidad. Adicionalmente a los reductores de velocidad, CAPUFE colocó a principios de noviembre de 2013 12 topes de caucho de 1.4 m de largo, 12 cm de ancho y 10 cm de alto entre los km 92 +200 y 93+300 como una forma para disminuir la velocidad de los vehículos en esta zona, mismo que fueron retirados cinco días después por problemas con los usuarios de la carretera. La colocación de las estructuras de caucho pudo contribuir al aumento de la inestabilidad de la zona por la vibración excesiva.

La carretera Escénica Tijuana-Ensenada registra mayor volumen de tráfico debido a factores como el atractivo turístico, la reducción de tiempo de viaje y condiciones de esta vía con respecto a la carretera libre Tijuana-Ensenada. La carretera Escénica mantiene un volumen promedio de 12 millones de vehículos al año. Los registros de aforo de la SCT indican que el 86% de los vehículos que usan esta vía son automóviles, 2.5% autobuses y 11.5% camiones de dos a nueve ejes. Sin embargo el efecto de vibración inducida es más pronunciado con los camiones. Al analizar el balance de cargas que genera cada uno de estos vehículos se puede observar que al año, los camiones representan aproximadamente 70% de la carga añadida a la zona, mientras que los automóviles sólo representan 25%.

Otra característica es el grosor del asfalto en la zona. En algunos puntos se observan secciones de asfalto de 30 a 70 cm (Figura 27). Esta variación se debe a que la SCT emplea el sobrecarpeta como propuesta de rehabilitación de estructuras. Parte de las obras de rehabilitación se observa en la Figura 26d donde las primeras etapas del deslizamiento generaron agrietamiento en el límite de éste. En base a la densidad del asfalto ($1,500 \text{ kg/m}^3$) se calcula que en el área afectada representa una carga agregada de 450-1050 kg/m^3 .



Figura 27. Fotografía del deslizamiento en la carretera Escénica Tijuana-Ensenada en el km 93 +50 a partir del dron DJI S800 (28 de diciembre de 2013). El deslizamiento en el km 93+50 afectó 200 metros de la carretera Escénica. A lo largo de esta sección se observó una variación del grosor de la carretera de aproximadamente 30 -70 cm (b). Algunas zonas cercanas al límite del deslizamiento presentaron grosores de hasta 1.2 m (a). Los grosores fueron medidos a partir de la nube de puntos generada por el dron DJI S800 en CloudCompare.

Capítulo 4

4. Discusión

4.1. Modelos Digitales de Elevación (MDE)

El INEGI produce MDE de alta resolución a partir de vuelos LiDAR, una de las tecnologías con mayor precisión para la obtención de geo-información. La base de datos de MDE de INEGI es una fuente de acceso libre que permite obtener modelos tanto de terreno como de superficie. Los modelos de terreno tienen la ventaja de representar el relieve excluyendo la información de infraestructura o la vegetación que se mantiene en los modelos de superficie. No obstante, la densidad de puntos por metro cuadrado en los escaneos láser ($<0.5 \text{ pt/m}^2$) y la resolución de pixel (5m) es tan baja que los modelos disponibles no permite resolver los rasgos geomorfológicos a escalas finas. Otra de las desventajas observadas en el uso de datos de fuentes de acceso libre en México es que la resolución temporal es muy limitada, al momento solo se cuenta con el último vuelo LiDAR que realizó INEGI en 2006.

Por otra parte, el MDE producido a partir de fotogrametría de imágenes del satélite GeoEye 1 presenta una ventaja en cuanto a la resolución temporal comparado con los datos de INEGI. El satélite GeoEye 1 es un sistema comercial de teledetección que es capaz de adquirir datos en menos de tres días, la resolución espacial de las imágenes de color es de 2 m (Satellite Imaging Corporation, 2015). Para el km 93 +50 se compró un par de imágenes estéreo par para la construcción de MDE capturadas 28 días después del deslizamiento. La resolución del MDE obtenido fue de un metro, permitiendo una definición mayor de los detalles geomorfológicos.

En el caso de los MDE a partir del vuelo LiDAR, y las plataformas DJI S800 y eBee la resolución espacial permite observar detalles geomorfológicos a escala ultrafina ($< 1\text{m}$), especialmente el vuelo NCALM. En contraste con la densidad de nubes de puntos de estas tres plataformas se esperaría que las plataformas DJI S800 y eBee mantuvieran una mayor precisión de los detalles geomorfológicos, no obstante por la técnica de SfM la reconstrucción del MDE es de menor calidad que el vuelo LiDAR. Lo anterior se explica por el método que emplea cada técnica para la obtención de datos topográficos. LiDAR emplea mediciones láser de la superficie de la Tierra, mientras que SfM emplea una fórmula matemática para determinar un modelo de superficie con respecto a puntos de correspondencia observados en diferentes proyecciones.

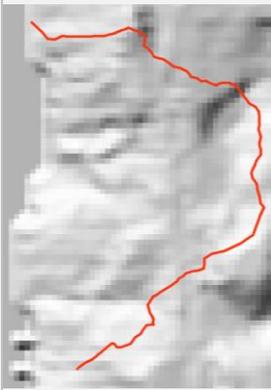
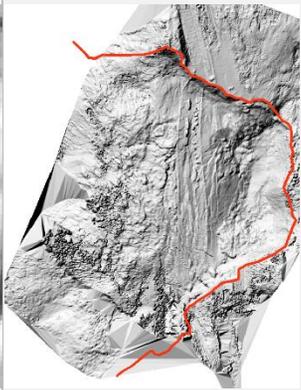
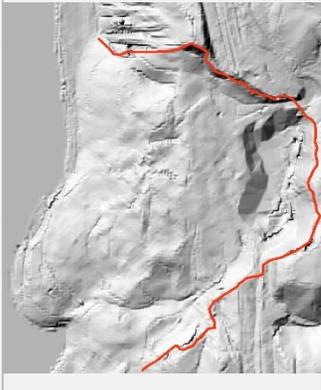
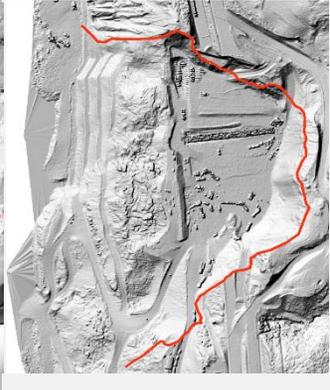
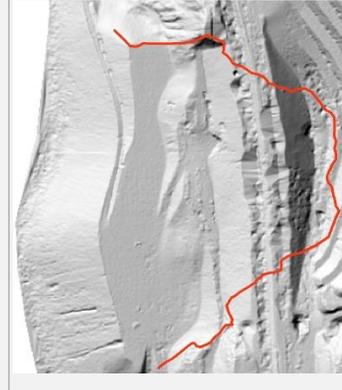
En relación a la resolución temporal, las tres plataformas tienen una alta capacidad para obtener datos en lapsos de tiempo muy cortos. Sin embargo el uso de drones tiene una mayor ventaja en relación a los costos de operación.

Para la obtención de datos a partir de drones se debe tener en una mayor consideración en la planeación del vuelo, debido a que son plataformas de vuelo bajo que capturan zonas de estudio de pequeñas escalas. Esta característica fue un factor limitante para la reconstrucción del MDE a partir del dron DJI S800. La falta de planeación de vuelo de esta plataforma limitó la generación del MDE a la zona principal del deslizamiento en el km 93 +50, acumulando valores nulos o anómalos en los contornos del modelo de hasta 20 m. Esto se observó en la zona de acumulación donde la falta de imágenes no permitió un buen análisis. Otra desventaja de los datos obtenidos por esta plataforma fue la falta de geolocalización de las imágenes o puntos de control. La georeferenciación de la reconstrucción 3D se realizó a partir de la ortofoto GeoEye 1, la cual fue tomada 28 días después y con una resolución espacial de 1 m por lo que parte de las características correspondientes (características distinguibles en ambos ortomosaicos) estuvieron limitadas a las imágenes de la zona principal del deslizamiento y rasgos distinguibles en píxeles de 1 m. Esto último generó errores de hasta un metro en XY.

A diferencia del dron DJI S800, la plataforma eBee contó con un plan de vuelo, datos de geolocalización y puntos de control en tierra. Por lo que se refiere al plan de vuelo, los datos a partir del dron eBee mantuvieron un traslape mayor a cinco imágenes en la zona de interés disminuyendo los valores nulos o anómalos observados con la plataforma DJI S800. Mientras que en lo referente a la georeferenciación del modelo de nubes de puntos se realizó una comparación entre la nube de puntos generada por geoetiquetado (proceso de agregar información geográfica en los metadatos EXIF de archivos de imágenes para su georeferenciación) e implementando los puntos de control para la corrección del modelo. Al final se observó que la reconstrucción con geoetiquetado era precisa en cuanto a los valores en XY. Sin embargo por la configuración del vuelo las alturas representaban a las de un elipsoide. En contraste, a partir del uso de puntos de control se ajustó el modelo de la nube de puntos para reducir el error 1.8 m en XY y 34.8 m en Z para obtener alturas geoidales.

En la Tabla 11 se resumen las características principales de los MDE a partir de las diferentes plataformas implementadas.

Tabla 11. Características de los modelos de alta resolución espacial empleados en el análisis del km 93+50.

	INEGI	S800 DJI	Imagen GeoEye 1	NLCAM	Ebee RGB	Ebee NIR
Fecha	01/08/2006	28/12/2013	25/01/2014	02/07/2014	10/03/2016	
						
	-7 años	+ 15 horas	+28 días	+186 días	+806 días	
Tipo	LiDAR aéreo	Fotogrametría por dron	Fotogrametría satelital	LiDAR aéreo	Fotogrametría por dron	
Resolución (m)	5	0.5	1	0.5	1	
Densidad de puntos	0.013	43	n/a	10	~50	
Altura	Geoidal	Geoidal	Geoidal	Elipsoidal	Geoidal	

4.2. Estimación de cambio volumétrico

El método para la estimación del cambio volumétrico se ve limitado porque su funcionamiento tiene mayor eficiencia para procesos geomorfológicos que actúan sobre la superficie de la tierra. En los casos de deslizamientos con movimiento de grandes cantidades de material es necesario implementar otro tipo de análisis para la geometría de la porción de masa enterrada. Otra de las limitaciones presentadas por el método es que el cálculo que se realiza es para determinar cambios volumétricos aparentes. Lo anterior se refiere a que durante el deslizamiento el volumen desplazado puede ser menor al volumen acumulado ya que en el proceso de transporte se produce un aumento de la porosidad del material de hasta un tercio de su volumen original. De acuerdo con Varnes (1978) se esperaría que el volumen acumulado aumentará 30% más que el volumen desplazado, debido al cambio de densidad aparente por el aumento en los espacios de los poros de la lutita. En base a lo anterior podríamos suponer que el volumen final acumulado en el deslizamiento fue de $\sim 380,000\text{m}^3$. Sin embargo, la diferencia entre el volumen desplazado y acumulado depende de la forma de distribución final del deslizamiento. Las imágenes posteriores al deslizamiento indican que la masa de suelo removida presentó dos formas de distribución. En la zona de la carretera, la masa colapsada se mantuvo como un bloque relativamente uniforme, mientras que la sección que superó el pie del deslizamiento, tuvo un comportamiento de derrame, el cual llegó hasta la línea de costa. Otra razón para explicar la diferencia entre el balance de masa del deslizamiento se mencionó en la sección anterior. La forma en la que se obtuvo el MDE del día del deslizamiento limitó la precisión del modelo, debido a que las imágenes tomadas con el dron se enfocaron en el área principal de remoción del deslizamiento, generando valores nulos o anómalos en los límites del deslizamiento, específicamente en la parte cercana a la costa.

Por otra parte, la presencia de un deslizamiento previo en la zona tuvo influencia la distribución del colapso del 2013. A partir de imágenes Google Earth y GeoEye 1 previas y posteriores al 2013 de la zona de estudio, se detectó el límite de un deslizamiento de $\sim 10,000\text{m}^2$ en el margen inferior izquierdo del deslizamiento en el km 93+50. El 60% del área del deslizamiento previo se vio afectado por el movimiento del colapso del 28 de diciembre, añadiendo un volumen promedio de $35,000\text{m}^3$ a la detección de cambio de elevación y volumen del deslizamiento en el km 93+50 (Figura 28).

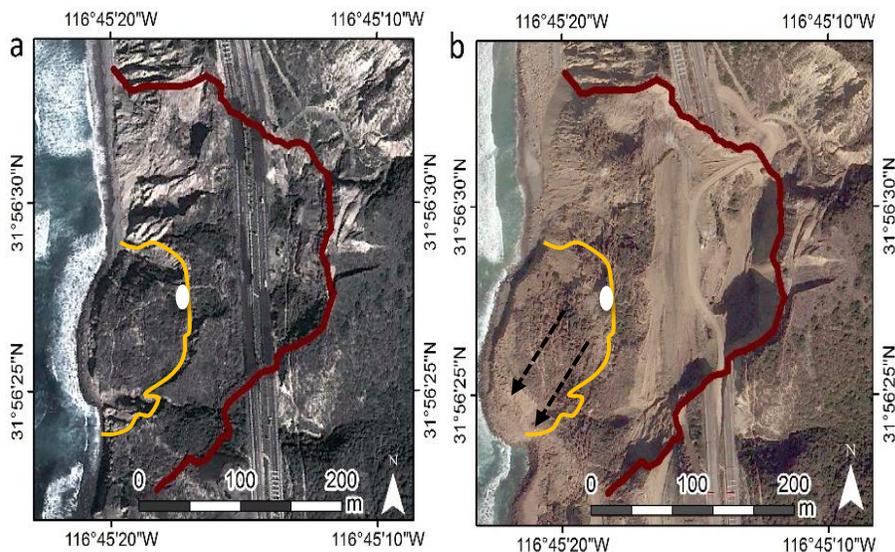


Figura 28. Identificación de deslizamiento previo al colapso en el km 93+50 de la carretera Escénica Tijuana-Ensenada. El deslizamiento del 28 de diciembre de 2013 está indicado con la línea roja, mientras la línea amarilla indica el deslizamiento previo a éste. Las flechas punteadas indican el movimiento observado desde la zona principal de fractura (punto blanco) después del evento en el km 93+50.

4.3. Análisis de la superficie de deslizamiento en la nube de puntos TLS

La implementación del TLS como una técnica emergente para el análisis geológico es una herramienta de gran valor para estudio de los rasgos geomorfológicos que requieren un estudio detallado, en el estudio de deformaciones y otros eventos. A diferencia de las técnicas a partir de plataformas aérea LiDAR, dron, imágenes satelitales, etc., las técnicas TLS presentan una limitante en la capacidad de obtención de datos debido a que se enfocan en el escaneo detallado de planos verticales. Lo anterior indica aunque los datos obtenidos por TLS tienen una mayor resolución espacial que LiDAR aéreo, la captura de datos, sobre todo de planos verticales y cercanos a la fuente de escaneo aumenta los puntos de oclusión del modelo resultante. En el caso del km 93+50, la ubicación de los puntos de escaneo delimitó el modelo obtenido a la pared del deslizamiento, por lo que no se pudo realizar una comparación entre MDE LiDAR (28 días después) y el MDE TLS (46 días después).

Por otra parte, el deslizamiento en el km 93+50 tiene un buzamiento casi vertical, lo cual indican que las marcas en el bloque de la pared de techo se encuentran debajo del mismo marcador en el bloque de la pared de piso. Esto se comprobó con los estereogramas calculados a partir de la extracción de características de las nubes de puntos TLS. Sin embargo, éstos mismos resultados se pueden obtener directamente de la observación en campo, por lo que se considera un análisis adicional confirmativo para las zonas sin acceso.

4.4. Análisis de factores desencadenantes

Según el comunicado presentado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2014), los factores que afectaron la estabilidad de la zona en el km 93 +50 fueron una serie de siete sismos entre 1.3 a 4.3 grados Richter registrados en la falla geológica que cruza esa ruta días antes del deslizamiento, así como las constantes lluvias registradas en esa zona. Sin embargo, los registros de precipitación mostraron que durante el 2013 la precipitación fue inferior a la precipitación promedio de la región (Figura 24). De igual modo los registros diarios contradicen lo reportado por la SCT. De acuerdo con los registros diarios, no hay registros de precipitación después del 20 de diciembre y el valor máximo fue de 15 mm, lo que es un valor bajo. Si bien no se descarta la importancia de la precipitación como factor desencadenante del deslizamiento en el km 93+50, se debe considerar los efectos de la precipitación a largo plazo y el transporte de agua por las capas del subsuelo tienen mayor consideración. Años anteriores al deslizamiento se presentaron valores superiores al promedio regional lo que se traduce en un mayor aporte y tiempo de retención para las cuencas en la zona. La cantidad de humedad en los estratos de lutitas respalda la idea de que los planos han recibido aporte de zonas con mayor permeabilidad.

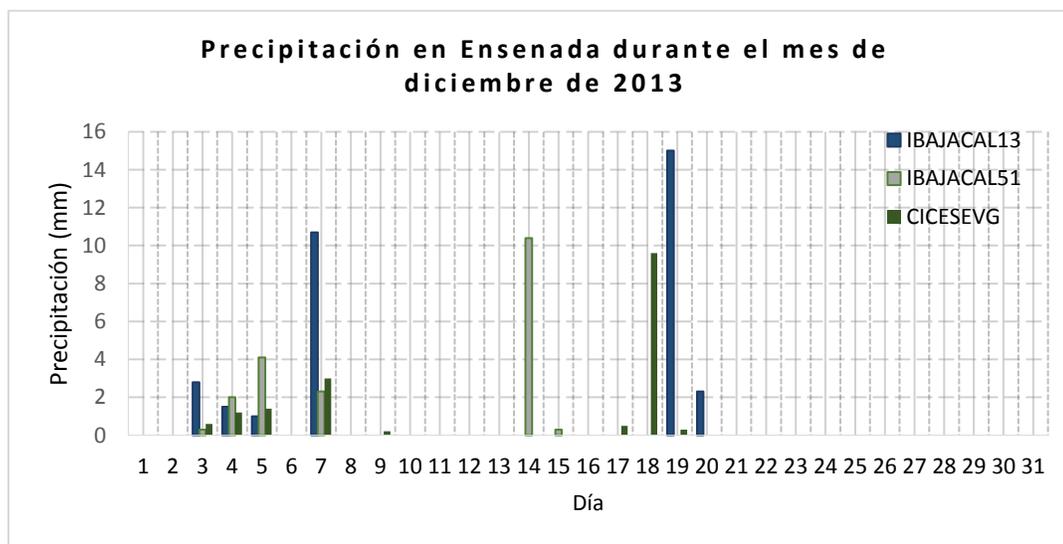


Figura 29. Gráfica de precipitación diaria para el mes de diciembre de 2013. Los registros indican que la precipitación se agrupa en dos períodos. El primer período se presentó durante los primeros días de diciembre con una precipitación máxima de 10.7 mm (7 de diciembre) y una precipitación acumulada de 16 mm (3–7 de diciembre). El segundo período se presentó entre el 14 al 20 de diciembre con una precipitación máxima de 15 mm y una precipitación acumulada de 17.3 mm. En ambos casos, la precipitación se considera baja.

En relación a la sismicidad, se tiene un precedente que en la fecha del sismo de magnitud 4.6 (26 de diciembre, 70 km al NE de la zona de estudio) se registró un desplazamiento pendiente abajo en la zona. Sin embargo, los otros sismos mencionados se localizaron a más de 100 km al sureste y durante un espaciado de una semana, por lo tanto se considera que no tienen relación con el deslizamiento.

Capítulo 5

5. Conclusiones

El cierre de la carretera Tijuana-Ensenada por el deslizamiento en el km 93+50 generó pérdidas de aproximadamente 100 millones de dólares para el sector turístico, el sector productivo y en el transporte de mercancías, adicionalmente a los 900 millones pesos que invirtió el gobierno para reparar una zona menor a 0.5km² (SCT, 2014; Cervantes, 2014). La importancia social y económica asociada a la carretera escénica Tijuana-Ensenada genera una necesidad para el monitoreo activo de las zonas identificadas como peligros geológicos.

Desde este punto de vista, la incorporación de plataformas aéreas, como son los drones, son extremadamente útiles. Algunas ventajas del uso de drones frente otras plataformas aéreas, como LiDAR e imágenes satelitales, es que permite la adquisición de datos a bajo costo, además de que la capacidad de vuelo y la facilidad para manipular este tipo de plataformas disminuye el tiempo de respuesta para la investigación en las geociencias.

Otra característica asociada a la implementación de plataformas aéreas basadas en SfM es que tienen un gran potencial para la generación de modelos digitales de elevación de alta resolución tanto espacial como temporalmente para el monitoreo de procesos en evolución de la superficie del suelo. Es necesario enfatizar que se debe apoyar en otras metodologías tradicionales para el entendimiento de los procesos observados.

Por otra parte, la resolución ultrafina (< 1 cm) de la nube de puntos TLS permitió extraer la geometría de planos, estrías. Algunas de las observaciones de este análisis se pueden obtener a partir del conocimiento de las características del deslizamiento y de la zona de estudio. Desde el punto de vista metodológico, esta técnica es muy útil en zonas con caídas de bloques o deslizamientos de mayor escala en donde el nivel de detalle de los modelos puede apoyar en la determinación de la deformación que sufre una zona, especialmente en zonas con problemas de acceso.

Algunas recomendaciones para continuar la investigación sobre las zonas de peligro geológico en la carretera Tijuana-Ensenada son:

- Se debe mantener un mejor registro de la precipitación de la región debido a que la información disponible de los últimos años se encuentra incompleta en las diferentes bases de datos locales.

-Tener un mejor registro de los deslizamientos y caídas de bloques en la carretera, así como realizar un registro continuo de las zonas de fracturas para identificar el grado de actividad en cada una de las zonas.

-Establecer un levantamiento continuo para determinar la deformación y velocidad de movimiento en las zonas de peligro geológico en la carretera.

Literatura citada

- Alba, M., Scaioni, M. 2010. Automatic detection of changes and deformation in rock faces by terrestrial laser scanning. En: Proceedings of the ISPRS Commission V Mid-Term Symposium 'Close Range Image Measurement Techniques. 38(5), 11–16.
- Allmendinger, R., 2016. A structural geology laboratory manual for the 21st Century. Consultado el 18 de agosto de 2016, de <http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/structure-lab-manual/>
- Almazan-Vázquez, E. 1988. Marco paleosedimentario y geodinámico de la formación Alisitos en la península de Baja California. UNAM, Revista del Instituto de Geología. 7(1), 41-51.
- Beyers, J. L., Wirtz, W. O., 1995. Vegetative Characteristics of Coastal Sage Scrub Sites Used by California Gnatcatchers: Implications for Management in a Fire-Prone Ecosystem. En: Proceedings-Fire Effects on Rare and Endangered, Species and Habitats Conference, pp. 81-89.
- Bowles, C., Kreylos, O. 2010. The LiDAR Viewer Manual. Consultado el 6 de septiembre de 2016, de https://wiki.cse.ucdavis.edu/media/keckcaves/100324_lvmanualdraft.pdf
- Bu, L., Zhang, Z. 2008. Application of point clouds from terrestrial 3D laser scanner for deformation measurements. En: Proceedings of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 37, 545-548.
- Bush, D.M., and Young, R. 2009. Coastal features and processes, En: Young, R., Norby, L. (eds.) Geological Monitoring: Boulder, Colorado, Geological Society of America, 47–67 pp. doi: 10.1130/2009.monitoring(03).
- Cervantes, S. 2014. Ensenada tiene mermas millonarias por Escénica. Milenio. Consultado el 14 de octubre de 2016, de <http://eleconomista.com.mx/estados/2014/02/18/ensenada-tiene-mermas-millonarias-escenica>
- CONAGUA. 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Descanso (0203), Estado de Baja California. Consultado el 20 de marzo de 2016, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103401/DR_0203.pdf
- Cruden, D. M., Varnes, D. J. 1996. Landslides: investigation and mitigation. En: Schuster R., L., Krizek R., J. (eds.) Landslides investigation and control, Special report 247. Transportation Research Board, Washington, DC, 36–75 pp.
- Cruz-Castillo, M. 1998. Evaluación de riesgo geológico por deslizamiento de laderas en la zona Salsipuedes-Cíbulas del Mar, Ensenada, Baja California. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 149 pp.
- Cruz-Castillo, M. 2002. Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. GEOS. 22, 37-42.
- Cruz-Castillo, M., Delgado-Argote, L. A. 1999. Descripción geológica y estructural de la zona de deslizamientos Salsipuedes-Cíbola del Mar, Ensenada, Baja California. GEOS. 19(3), 159-174.
- Cruz-Castillo, M., Delgado-Argote, L. A. 2000. Los deslizamientos de la carretera de cuota Tijuana-Ensenada, Baja California. GEOS. 20, 418-432.

- DeLong, S. B., Lienkaemper, J. J., Pickering, A. J., Avdievitch, N. N. 2015. Rates and patterns of surface deformation from laser scanning following the South Napa earthquake, California. *Geosphere*, 11(6). doi:10.1130/GES01189.1
- Dunning, S. A., Massey, C. I., Rosser, N. J. 2009. Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning. *Geomorphology*. 103(1), 17-29. doi: 10.1016/j.geomorph.2008.11.005.
- García-Arróliga, N. M., Méndez-Estrada, K., Nava-Sánchez, S. 2015. Impacto Socioeconómico de los Desastres en México durante 2015: Resumen Ejecutivo. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Consultado el 25 de abril de 2016, de <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/340-no.17-resumenejecutivoimpacto2015.pdf>
- García-Arróliga, N. M., Méndez-Estrada, K., Reyes-Rodríguez, R. 2014. Impacto socioeconómico de los desastres en México durante el 2013. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Consultado el 25 de abril de 2016, de <http://www.cenapred.gob.mx/es/publicaciones/archivos/324-no.15-impactosocioeconomicodelosprincipalesdesastresocurridosenmexicoenelao2013.pdf>
- Gastil, G. R., Phillips, P. R., Allison, C. E. 1975. Reconnaissance Geology of the State of Baja California. *Geological Society of America Memoirs*. 140, 201 p.
- Goldberg, S. 2006. Falling into the Pacific: California Landslides and Land Use Controls. *Southern California Review of Law and Social Justice*. 16(1), 95-161.
- Gómez-Castillo, G. 2010. Peligro geológico en la zona de Playa Saldamando-El Mirador en la autopista Tijuana-Ensenada. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 87pp.
- González, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. 2002. *Ingeniería geológica*. Pearson Prentice Hall. Madrid.
- González-Abraham, Charlotte E., Garcillán, Pedro P., Ezcurra, Exequiel. 2010. Ecorregiones de la Península de Baja California: una síntesis. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 87, 69-82.
- Gordon, S., Lichti, D., Stewart, M. 2001. Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements. En: *Proceedings of 10th International FIG Symposium on Deformation Measurements*. 19-22.
- Henry, J. B., Malet, J. P., Maquaire, O., Grussenmeyer, P. 2002. The use of small-format and low-altitude aerial photos for the realization of high-resolution DEMs in mountainous areas: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Earth Surface Processes and Landforms*. 27(12), 1339-1350.
- Highland, L., Bobrowsky, P. 2008. *The Landslide Handbook— A Guide to Understanding Landslides*. U.S. Geological Survey. Circular 1325. 129 pp.
- IAEG. 1990. Suggested nomenclature for Landslides. *Bulletin International Association of Engineering Geology*. 41, 13-16 pp.

- James, L. A., Hodgson, M. E., Ghoshal, S., Latiolais, M. M. 2012. Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis. *Geomorphology*. 137(1), 181-198. doi:10.1016/j.geomorph.2010.10.039.
- Jimenez, J. 1972. Embankment failures on the Tijuana-Ensenada turnpike in the lower California Peninsula, Mexico. En: Twenty-third anual highway Geology Symposium Proc. 1-9 pp.
- Johnson, K., Nissen, E., Saripalli, S., Arrowsmith, J. R., McGarey, P., Scharer, K., Williams, P., Blisniuk, K. 2014. Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion. *Geosphere*, 10(5), 969-986. doi:10.1130/GES01017.1
- Kenji-Hirabagashi, C., Suarez-Vidal, F., Rockwell, T., Wesnousky, S. G., Stirling, M. W. 1996. A neotectonic study of the San Miguel-Vallecitos fault, Baja California, Mexico. *Bulletin of The Seismological Society of America*. 86(6), 1770-1783.
- Kreylos, O. 2016. LidarViewer. University of California, Davis, W.M. Keck Center for Active Visualization in the Earth Sciences (KeckCAVES). Consultado el 04 de noviembre de 2016, de <http://www.keckcaves.org>.
- Kirschbaum, D., Stanley, T., Zhou, Y. 2015. Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*. 249, 4-15. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.03.016
- Kuhn, D., Prüfer, S. 2014. Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rugen, Germany. *Geomorphology*. 213, 153-165. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.01.005
- Lemmens, M. 2011. *Geo-information: technologies, applications and the environment* Vol. 5. Springer Science & Business Media. New York.
- Magellan. 2007. ProMark3/ProMark3 RTK: Guía básica de utilización. Consultado el 7 de marzo de 2016, de <http://www.surveyrental.net/Util/MANUAL%20GPS%20DIFERENCIAL%20PROMARK3%20ESP.pdf>
- Mansillas, E., Rubio, I. 2010. Diagnóstico nacional de los asentamientos humanos ante el riesgo de desastres. Secretaría de Desarrollo Social. Consultado el 25 de abril de 2016, de http://www.2006-2012.sedesol.gob.mx/work/models/SEDESOL/Resource/1778/2/images/Diagnostico_PRAH.pdf
- Minch, A., J. 1972. Landsliding and the effects of resort development between Tijuana and Ensenada, Baja California, Mexico. Department of Geography, University of California, Riverside, California 92502. Coastal Studies in Baja California. Technical Report N° 0-72-1. Office of Naval Research ONR Contract N00014-69-A-0200-5003. Project N° NR 387-045.
- Moore, D. G. 1969. Reflection profiling studies of the California continental borderland: structure and Quaternary turbidite basins. *Geological Society of America Special Papers*. 107, 136 pp.
- Morales-Pérez, M. B. 1995. Caracterización de los factores geológicos que controlan los deslizamientos de ladera en el área de San Miguel- Salsipuedes, Ensenada, B.C., México". Tesis de Licenciatura en Geología. Universidad Autónoma de Nuevo León. 120 pp.
- Mueller, K., Kier, G., Rockwell, T., Jones, C. H. 2009. Quaternary rift flank uplift of the Peninsular Ranges in Baja and southern California by removal of mantle lithosphere. *Tectonics*. 28(5), 1-17.

- NASA. 2016a. List of all potential landslides. Consultado el 7 de Agosto de 2016, de https://trmm.gsfc.nasa.gov/trmm_rain/Events/latest_total_landslide.html
- NASA. 2016b. List of all potential landslides. Consultado el 7 de Agosto de 2016, de <https://data.nasa.gov/dataset/Global-Landslide-Catalog-Export/dd9e-wu2v>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center. 2012. Lidar 101: An introduction to LiDAR technology, data, and applications. Consultado el 20 de septiembre de 2016, de <https://coast.noaa.gov/data/digitalcoast/pdf/lidar-101.pdf>
- Nava-Licona, G. J. 2016. Análisis de riesgo por deslizamiento de ladera en el tramo Arroyo Guadalupe-El Mirador, de la autopista Tijuana-Ensenada, Baja California Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 42 pp.
- Niethammer, U., Rothmund, S., Joswig, M. 2009. UAV-based remote sensing of the slow-moving landslide super-sauze. In Proceedings of the International Conference on Landslide Processes: From Geomorphologic Mapping to Dynamic Modelling, Strasbourg, France. 67, 69-74.
- Ortlieb, L. 1978. Reconocimiento de las terrazas marinas cuaternarias en la parte central de Baja California. Revista mexicana de ciencias geológicas. 2(2), 200-211.
- Pérez Flores, M., Suárez-Vidal, F., Gallardo-Delgado, L. A., González-Fernández, A. 2004. Patrón estructural de la Planicie Costera de Todos Santos con base en datos geofísicos. Ciencias Marinas. 30(2), 349-364.
- Rebman, J. P., Roberts, N. C. 2012. Baja California: Plant Field Guide. (3rd ed.) San Diego Natural History Museum. San Diego.
- Ren, D. 2015. Storm-Triggered Landslides in Warmer Climates. Springer. New York.
- RESNOM. 2015. Catálogo de la Red Sísmica del Noroeste de México. Consultado el 8 de septiembre de 2016, de <http://resnom.cicese.mx/sitio/busqueda>
- Satellite Imaging Corporation. 2015. GeoEye-1 Satellite Sensor. Consultado el 09 de julio de 2016, de <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/geoeeye-1/>
- SCT. 2014. Com. 004: Problemática de la autopista Tijuana-Ensenada. Consultado el 17 de marzo de 2016, de <http://www.sct.gob.mx/despliega-noticias/article/problematika-de-la-autopista-tijuana-ensenada/>
- SGM. 2012. Ficha de unidad litoestratigráfica (Formación Rosario cretácico tardío). Consultado el 15 de marzo de 2016, de <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Rosario.pdf>
- Shor, G. G., & Roberts, E. 1958. San Miguel, Baja California Norte, earthquakes of February 1956: A field report. Bulletin of the Seismological Society of America. 48(2), 101-116.
- Sidle, R. C., Pearce, A. J., O'Loughlin, C. L. 1985. Hillslope stability and land use. American geophysical union. Water Resources, Monograph no. 11. Washington.
- Snavely, N., Seitz, S.N., Szeliski, R. 2008. Modeling the world from internet photo collections: International Journal of Computer Vision. 80, 189–210. doi: 10.1007 /s11263 -007 -0107 -3.

- Theiler, P. W., Wegner, J. D., Schindler, K. 2015. Globally consistent registration of terrestrial laser scans via graph optimization. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 109, 126-138. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.08.007.
- TNT. 2015. 3D Reconstruction and Camera Motion Estimation. Consultado el 24 de septiembre de 2016, de <http://www.tnt.uni-hannover.de/project/motionestimation/index.php?staffshow=1>
- Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I., Fitzgibbon, A. W. 1999. Bundle adjustment—a modern synthesis. En *International workshop on vision algorithms*. Springer. Berlin Heidelberg.
- Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. En: *Landslides and Engineering Practice*. Eckel, E. B. (Ed.) Highway Research Board Special Report 29. Washington, 20-47 pp.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, J. M. 2012. Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*. 179, 300-314. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
- Wong, V., Legg, M., Suárez, F. 1987. Sismicidad y tectónica de la margen continental del sur de California (USA) y Baja California Norte (México). *Geofísica Internacional*. 26(3), 459-478.
- Zeibak, R. and Filin, S. 2007. Change detection via terrestrial laser scanning. *IASPRS*. 36(3), 430–435.