

TESIS DEFENDIDA POR
Gemma Gómez Castillo
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

M. en C. Francisco Suárez Vidal
Director del Comité

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar
Miembro del Comité

Dr. José Manuel Romo Jones
Miembro del Comité

Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera
Miembro del Comité

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar
Coordinador del programa de
posgrado en Ciencias de la Tierra

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

Mayo de 2010.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN
CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PELIGRO GEOLÓGICO EN LA ZONA DE PLAYA SALDAMANDO-
EL MIRADOR EN LA AUTOPISTA TIJUANA - ENSENADA**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

GEMMA GÓMEZ CASTILLO

Ensenada, Baja California, México, Mayo de 2010

RESUMEN de la tesis de **Gemma Gómez Castillo**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA CON ORIENTACIÓN EN GEOCIENCIAS AMBIENTALES. Ensenada, Baja California. Mayo de 2010.

PELIGRO GEOLÓGICO EN LA ZONA DE PLAYA SALDAMANDO-EL MIRADOR
EN LA AUTOPISTA TIJUANA – ENSENADA

Resumen aprobado por:

M. en C. Francisco Suárez Vidal

La carretera de cuota Tijuana-Ensenada es una arteria vial escénica que se extiende a lo largo de casi 110 kilómetros de la costa noroeste de Baja California. En el presente trabajo se estudió el área entre los kilómetros 84 a 96, desde El Mirador hasta Playa Saldamando. Esta zona es propensa a deslizamientos por encontrarse sobre terrenos inestables de las Formaciones Rosario y Rosarito Beach, además de ser afectada por fallas activas y fracturas de extensión regional. El objetivo del trabajo es determinar las zonas más propensas a sufrir nuevos eventos de deslizamientos.

Para determinar las áreas más susceptibles a un nuevo deslizamiento, se procesó la información en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Usando los datos vectoriales de INEGI de 1999 se produjo un Modelo Digital de Elevación (MDE) con resolución espacial de diez metros. Para identificar las zonas inestables se elaboró un mapa de pendientes, un MDE en tercera dimensión, se mapeó la hidrología superficial, y se usaron registros pluviométricos de la estación hidrológica más cercana al área. Para establecer las zonas con mayores desplazamientos se usaron tres conjuntos de fotografías aéreas de los años 1973, 1990 y 2006, y, un conjunto de ortofotos digitales de 1993 como referencia; se hicieron traslapes entre las fotografías digitalizadas y georreferidas para medir desplazamientos horizontales en los deslizamientos activos. Para tomar mediciones en el plano vertical, se contó con una imagen LIDAR (Light Detection And Ranging) con resolución espacial de cinco metros. Finalmente, para mejorar la confianza en los resultados se realizó un levantamiento topográfico en el kilómetro 91+300 y se obtuvieron datos con un altímetro en un banco de nivel de INEGI y en puntos de control de CAPUFE.

Considerando las altas pendientes, la escorrentía, la litología, las fallas y los fuertes desplazamientos que ya han sufrido estas áreas, como resultado de este trabajo proponemos que las áreas más susceptibles son los kilómetros 88, el 91 y el 95.

Palabras Clave: Deslizamiento, peligro geológico, fotografía aérea, Sistemas de Información Geográfica, autopista Tijuana-Ensenada.

ABSTRACT of the thesis presented by **Gemma Gómez Castillo** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Earth Sciences with orientation in Geoenvironmental Sciences. Ensenada, Baja California, México. May, 2010.

GEOLOGIC HAZARD IN THE ZONE OF SALDAMANDO BEACH – EL MIRADOR ALONG THE TIJUANA-ENSENADA HIGHWAY

The toll road from Tijuana to Ensenada is a scenic highway 110 kilometers in length along the northwest coast of Baja California. We studied the area between kilometers 84-96 (from El Mirador to Playa Saldamando). This area is prone to landslides because of the terrain instability, which is due to the physical and geological properties of the Rosario and Rosarito Beach Formations. Regionally, from the structural and tectonic points of view, the study area is affected by active faults and fractures with regional extension. The purpose of this study is to identify the areas where new landslides events can take place.

To determine the areas most susceptible to mass movement, we worked on a Geographic Information System (GIS), in which we used vectorial data from INEGI from 1999, to produce a Digital Elevation Model (DEM) with spatial resolution of ten meters. Zones of instability were identified from generated slope map, a three-dimensional DEM, surface hydrology and rainfall records from the nearest hydrological station of the area. To establish areas with longer displacements we used three sets of aerial photographs from 1973, 1990 and 2006, and a set of 1993 digital orthophotos as reference. The aerial photographs were digitized and georeferenced to overlaps between different years, with this we measured the horizontal displacement in active landslides. Measurements of the vertical plane were calculated from a LIDAR (Light Detection And Ranging) image with spatial resolution of five meters. Finally, to improve confidence in the results, a topographical surveying was done at km 91+300 and altitude data were obtained with an altimeter in an INEGI bank level and CAPUFE checkpoints.

Results from this study suggest that the most susceptible areas are the kilometers 88, 91 and 95 due to the steep slopes, runoff, lithology, faults and strong displacements that these areas have already suffered.

Key words: Landslide, Geological Hazard, Aerial Photographs, Geographic Information System, Tijuana-Ensenada Highway.

DEDICATORIA

A mi madre...

Por todo.

Para Ricky...

*Vivirás eternamente en mi corazón
mi amado niño.*

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Conchita, por haberme dado la vida, su amor y su dinero, espero que por fin esté orgullosa de mí. A mis hermanos Juan Pablo, Luis Javier y María Vianney por ser la chispa, motivación y desmotivación de mi vida. A mamá Jú por cuidarme, aconsejarme, enseñarme vocabulario y apoyarme en todo momento. A mi papá Javier. A mi primo Ricky, por cuidarme y estar a mi lado siempre. A mis suegros José e Irma, por su cariño y apoyo. A mi sobrino José Carlos por iluminar tantos días de mi vida. A Alejandro, muchas gracias por los buenos momentos, por su apoyo y por haber querido a Lunnita.

Agradecimiento especial a mi Sensei Francisco Suárez Vidal, porque aparte de ser un gran investigador, es un magnífico guía y amigo. Gracias por su paciencia, por el apoyo económico y por soportarme.

Gracias a mis estimados sinodales: Dr. José Manuel Romo Jones, Dr. Thomas G. Kretzschmar y Dr. Luis E. Calderón Aguilera por sus comentarios, contribuciones y correcciones a este trabajo. Muchas gracias a los profesores que me dieron clases, por su dedicación y entrega a la labor docente. Gracias también a Ramón Mendoza (por proporcionarnos las Ortofotos digitales y los datos vectoriales geológicos), Juan Manuel Espinoza (por la elaboración de la altimetría y la nivelación), Elvia Ramón, Alejandro Hinojosa (por proporcionarnos la imagen LIDAR), Maricarmen Pérez, Marthita Barrera, Jaime Calderón, Humberto Benítez, Víctor Frías (por proporcionarnos las cartas topográficas escaneadas y los datos vectoriales 1:50,000) y personal de CAPUFE que contribuyeron varias maneras para esta tesis. Gracias al Dr. Luis Delgado por haberme recibido cuando llegué a CICESE.

A todos mis compañeros y amigos de generación de maestría y doctorado. Muchas gracias a Juan Carlos, Sandra, Juan Pablo, Porfirio, Diana, Karla Pedraza, Lupita Cabrales, Jesús, Cristina Ballardo, Tomás, Carlos Suárez, Mónica, Erick, Adriana, Doris, Toñito, Francisco del Toro, Francisco Núñez, Emilia, Selene, Carpio, Rosita, Orlando y Mafer... a todos los que compartimos estudio, penas, diversión y logros, ¡Muchas gracias amigos!

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada CICESE.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento de dos años.

A todos y cada uno de los mexicanos que con sus impuestos contribuyeron a que yo tuviera beca y pudiera realizar mi maestría.

CONTENIDO

| | Página |
|--|-----------|
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| I.1. Localización | 4 |
| I.2. Objetivos..... | 5 |
| II. ANTECEDENTES | 6 |
| II.1. Trabajos Previos..... | 6 |
| II.2. Cronología de Eventos de Deslizamientos en el área | 8 |
| III. MARCO GEOLÓGICO..... | 11 |
| III.1. Formación Alisitos..... | 11 |
| III.2. Formación Rosario..... | 11 |
| III.3. Formación Rosarito Beach | 12 |
| IV. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 14 |
| IV.1. Modelo Digital de Elevación..... | 14 |
| IV.2. Mapa de Pendientes..... | 15 |
| IV.3. Modelo Digital de Elevación en Tercera Dimensión | 16 |
| IV.4. Hidrología..... | 16 |
| IV.4.1. Análisis de Hidrología Superficial | 16 |
| IV.4.2. Precipitación Pluvial..... | 17 |
| IV.5. Mapa Geológico..... | 18 |
| IV.6. Imágenes Aéreas..... | 19 |
| IV.6.1. Fotografías Aéreas..... | 19 |
| IV.6.2. Ortofotos Digitales..... | 20 |

CONTENIDO (Continuación)

| | Página |
|---|-----------|
| IV.6.3. Procesamiento..... | 21 |
| IV.7. Altimetro y Nivelación..... | 22 |
| IV.7.1 Altimetro barométrico..... | 22 |
| IV.7.2 Nivelación Topográfica con Estación Total..... | 24 |
| IV.8. Trabajo de Campo..... | 25 |
| V. RESULTADOS..... | 26 |
| V.1. Modelo Digital de Elevación..... | 26 |
| V.2. Mapa de Pendientes..... | 28 |
| V.3. Modelo Digital de Elevación en Tercera Dimensión | 30 |
| V.4. Hidrología..... | 33 |
| V.4.1. Análisis de Hidrología Superficial | 33 |
| V.4.2. Precipitación Pluvial..... | 36 |
| V.5. Mapa Geológico..... | 38 |
| V.6. Imágenes Aéreas..... | 41 |
| V.7. Altimetro y Nivelación..... | 50 |
| V.7.1 Altimetro barométrico..... | 50 |
| V.7.2 Nivelación Topográfica con Estación Total..... | 51 |
| V.8. Trabajo de Campo..... | 53 |
| VI. DISCUSIÓN | 60 |
| VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 67 |
| VIII. LITERATURA CITADA | 69 |

CONTENIDO (Continuación)

| | Página |
|------------------|--------|
| IX. ANEXO 1..... | 75 |
| X. ANEXO 2..... | 79 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|--------|---|--------|
| 1 | Principales Tipos de Movimientos de Masas, de acuerdo al tipo de Material; tomado y modificado de Highland y Bobrowsky (2008). | 3 |
| 2 | Partes principales de un deslizamiento Rotacional (Tomado y traducido de Highland y Brobowsky, 2008) | 4 |
| 3 | Mapa de localización del área de estudio (mostrado en el cuadro rojo). | 5 |
| 4 | Ejemplificación de la resolución usada en el MDE y LIDAR. Una celda de LIDAR cabe 4 veces en una del MDE. | 15 |
| 5 | Localización de la estación hidrometeorológica de CNA 2036, Olivares Mexicanos. La línea roja marca la autopista en el área de estudio y el punto verde señala la ubicación de "Olivares Mexicanos" (32°01'47.99" y -116°40'12.02"). | 18 |
| 6 | Mapa mundial de localización de áreas en dónde las lluvias son disparadores potenciales de deslizamientos (Guzzetti <i>et al.</i> , 2008). | 18 |
| 7 | Cada "+" indica el centro de una fotografía aérea. + Fotografías del año 1973. + Fotografías del año 1990. + Fotografías del año 2006. | 20 |
| 8 | Mosaico en el que se muestran las 3 ortofotos usadas de base para la georreferenciación, mediciones y comparaciones con las fotografías aéreas. Los polígonos con diferentes tramas muestran los límites de cada ortofoto. | 21 |
| 9 | Altímetro barométrico American Paulin Systems, modelo M-1. Rango de -1000 pies a +5000 pies de altura. Graduación de una pulgada. Precisión de ±1 a 5 pies. | 23 |
| 10 | Mapa de localización de los puntos en donde se obtuvieron alturas mediante el altímetro barométrico. | 24 |
| 11 | A la izquierda se muestra el tramo de la carretera donde se realizó el levantamiento topográfico, la marca roja representa el punto de control del km 91 proporcionado por CAPUFE. A la derecha se muestra el mapa del área de estudio y el recuadro blanco representa la ubicación de la ampliación de la izquierda. | 25 |

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

| Figura | | Página |
|--------|--|--------|
| 12 | Imagen LIDAR que abarca el área de estudio, con ella fueron tomados los datos de alturas y desplazamientos en la vertical. Visualización con la paleta de colores “Elevation 1”, teniendo como fondo un efecto de sombreado. | 27 |
| 13 | Modelo Digital de Elevación (MDE) creado a partir de las curvas de nivel de INEGI, representados con la paleta de color “Elevation 1”. a) Vista en miniatura del total del área cartografiada, cartas usadas H11B11, H11B12, I11D81 e I11D82. b) Ampliación del área de estudio. | 28 |
| 14 | Mapas de pendientes elaborados a partir de a) Modelo Digital de Elevación, los lugares numerados son los siguientes: 1-Salsipuedes, 2-Mesa del Tigre, 3-Cañada Pescaderos, 4-Rancho Bonito, 5-Km 90, 6-Km 93 a 94 y 7-playa Saldamando; y b)Imagen LIDAR, el recuadro negro representa el área de estudio, de la cual la pendiente media es 17.81° , con una desviación estándar de 12.79° . | 29 |
| 15 | a) Efecto de “Hillshade” o sombreado, la fuente de luz esta a 315° de azimut y con un ángulo de altitud de 45° . b) “Aspect” u orientación, la media es de 185.9, con una desviación estándar de 91.7 azimut. | 29 |
| 16 | Imagen en perspectiva del área de estudio en tercera dimensión. Las líneas negras representan los perfiles creados y fueron numerados del 1 al 37 comenzando de norte a sur. La línea continua verde representa el trazo de la autopista. Se usó la paleta de colores Elevation 1, la exageración vertical es de 2. | 30 |
| 17 | Representación gráfica de los valores de la pendiente de cada perfil. | 32 |
| 18 | Mapa de Localización de los perfiles de pendientes y zonas delimitadas en el área de estudio. Las imágenes miniatura representan algunos de los perfiles que se hicieron en tercera dimensión, las flechas señalan al Norte (el resto de los perfiles se muestran en el Anexo 1). | 32 |
| 19 | Mosaico del MDE de las cartas H11B11, H11B12, I11D81 e I11D82 donde se aprecian los escurrimientos creados cada 10,000 celdas, las cuencas fueron creadas cada millón de celdas ($\sim 10\text{km}^2$). | 33 |

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

| Figura | | Página |
|--------|--|--------|
| 20 | Escurrimientos del MDE creados a partir de 1000 celdas, escurrimientos de LIDAR cada 4000 celdas. La línea punteada marca el extremo oeste del parteaguas de la cuenca del arroyo San Miguel. | 34 |
| 21 | Escurrimientos generados a partir de LIDAR con acumulación de 40,000 celdas. Para cada escurrimiento, el programa genera una microcuenca. | 35 |
| 22 | Gráfica dónde se muestra el comportamiento de las áreas de las microcuencas. El promedio de tamaño de cuencas es 1.88km ² , con una desviación estándar de 1.41. | 35 |
| 23 | Registros Pluviométricos de la estación más cercana al área de estudio. En los años en que no se contaba con al menos 75% de datos, se considera que no se pudo procesar. La línea negra discontinua nos indica el promedio anual para esos años de registro (Cortesía de Moraila-Martínez, 2009). | 37 |
| 24 | Representación gráfica de las tablas de datos mensuales que proporciona CNA en su página digital de las estaciones hidrometeorológicas de la República Mexicana. Acumulado mensual de 29 años de registros (1971 al 2000). | 38 |
| 25 | Representación gráfica de datos mensuales, a partir del procesado de datos diarios. Acumulado mensual de 31 años de registros (1969 al 2000). | 38 |
| 26 | Mapa geológico sintetizado del área, la línea marcada con P y P' indica la ubicación del perfil de la figura 27. Fm. R.B. significa Formación Rosarito Beach, Fm. R. significa Formación Rosario y Fm. A. significa Formación Alisitos. Tomado y modificado de Gastil <i>et al.</i> , (1975), Yoe (1981), INEGI (1998) y Cruz-Castillo y Delgado-Argote (1999). El mapa posee como fondo un efecto de sombreado para representar el relieve. | 39 |
| 27 | Perfil topográfico y geológico que muestra la litología sintetizada del área de estudio, su ubicación se muestra en la figura 25 con una línea continua. Los colores y simbología son los mismos que los del mapa geológico. Este perfil tiene una exageración vertical de 2.3x. Tomado y modificado de Yeo (1981). | 40 |

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

| Figura | | Página |
|---------------|---|---------------|
| 28 | Representación gráfica del tamaño promedio de celdas. La desviación estándar es el error que se deberá tener en cuenta en lo sucesivo en todas las mediciones hechas en las fotografías aéreas. | 42 |
| 29 | Ejemplo del caso en el que las mediciones de desplazamiento fueron hechos en varias partes de los deslizamientos. La flecha señala la dirección de movimiento principal. La línea roja continua señala el deslizamiento principal, la línea punteada marca el área de influencia del deslizamiento principal. | 43 |
| 30 | Mosaico de recortes de las fotografías aéreas de 1990. Las líneas rojas discontinuas representan las zonas de deslizamientos con mayor movimiento y a las que se les midió su desplazamiento. | 44 |
| 31 | Mosaico de recortes de las fotografías aéreas de 1973. Las líneas rojas discontinuas representan las zonas de deslizamientos con mayor movimiento y a las que se les midió su desplazamiento. | 45 |
| 32 | Representación gráfica de los resultados de las mediciones de desplazamientos entre las fotografías de 1973 y 1990. Se omiten algunos datos de mediciones en el plano vertical debido a que la resolución de LIDAR no permitió observar cambios. | 46 |
| 33 | Mosaico de recortes de las fotografías aéreas del 2006. Las líneas rojas discontinuas representan las zonas de deslizamientos con mayor movimiento y a las que se les midió su desplazamiento. | 47 |
| 34 | Fotografía de 1990 debajo de una del 2006 con transparencia de 40% para apreciar los cambios realizados en el trazo de la autopista en el km 91+300. El mapa miniatura muestra los lugares en lo que se hicieron mediciones de desplazamiento. | 48 |
| 35 | Representación gráfica de los resultados de las mediciones de desplazamientos entre las fotografías de 1990 y 2006. Se omiten algunos datos de mediciones en el plano vertical debido a que la resolución de LIDAR no permitió observar cambios. | 49 |
| 36 | Gráfica que muestra el total de las mediciones realizadas en varios deslizamientos activos de la autopista. | 49 |

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

| Figura | | Página |
|---------------|--|---------------|
| 37 | Perfil topográfico basado en el banco de nivel de INEGI con cota de 30.721msnm. | 51 |
| 38 | Perfil topográfico basado en el punto de control proporcionado por CAPUFE con cota de 65.048msnm, marcado como Km-91. Las flechas negras indican el tramo que abarca el perfil de la figura 39. | 52 |
| 39 | Perfil del km 91, en el cual se aprecian los desplazamientos sufridos en el plano vertical, la última medición fue en junio de 1995. Elaborado por GEOTEC, 1995. | 53 |
| 40 | Resultados de las observaciones de campo de los puntos en los cuales se observaron grietas o fallas y se tomaron, en la mayoría de los casos, datos geométricos. Las líneas negras indican el rumbo de estos datos. Equidistancia entre curvas de nivel: 20 metros. | 54 |
| 41 | Fotografías tomadas en el km 90+900 el 20 de enero de 2010 después de lluvias intensas ocurridas en la región. a) Grieta en el cuerpo A de la autopista, la línea roja marca su trazo. b) Grietas en el cuerpo B de la autopista. c) Fractura en el muro de contención en el lado este del cuerpo B de la autopista. | 55 |
| 42 | Fotografías tomadas en el km 94+200 el 20 de enero de 2010 después de lluvias intensas ocurridas en la región. a) Grietas en el cuerpo A de la carretera, la línea roja continua marca el trazo de la principal, la línea roja discontinua marca el trazo de otra que tiene el mismo rumbo. b) Grieta en el cuerpo B de la carretera, la cual produce un desnivel muy notorio. | 56 |
| 43 | Fotografía tomada el 20 de enero de 2010 en el km 89+800. La letra A indica el cuerpo de la autopista que va hacia Ensenada, la letra B señala el cuerpo que va hacia Tijuana. Se aprecia claramente, en el centro de la imagen, el trazo de carretera abandonado. | 57 |
| 44 | Fotografías tomadas el 20 de enero de 2010. a) Grieta principal del km 88+800, a la derecha de la línea roja sobre la carretera se muestra el trazo de ésta; la línea roja en la parte superior marca una falla. b) Vista panorámica de una fracción de la zona de estudio, el recuadro rojo marca la ubicación de "Destino". | 58 |

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

| Figura | | Página |
|---------------|---|---------------|
| 45 | Plano de falla de la falla principal localizada al sureste de Cañada Pescaderos, marcada con el número 8 en la figura 40. | 59 |
| 46 | Fotografías aéreas del km 88+300 de los años 1973 (A), 1990 (B) y 2006 (C). En ellas se pueden apreciar los cambios realizados en el deslizamiento activo junto a “Destino”. | 64 |
| 47 | En estas fotografías del deslizamiento del kilómetro 91+300 se puede apreciar el cambio en la profundidad del columpio que se formaba y que requería constantes y fuertes reparaciones antes de haber sido cambiado el trazo de la carretera. A) Fotografía del año 1987. B) Fotografía del año 1995. Las flechas señalan al norte. Fotografías tomadas de GEOTEC (1987; 1995). | 65 |

LISTA DE TABLAS

| Tabla | | Página |
|--------------|---|---------------|
| I | Versión Simplificada de la clasificación de los Movimientos de Masas de acuerdo al tipo de Material, hecha por Varnes en 1978 (Highland y Bobrowsky, 2008). | 2 |
| II | En esta tabla se describen los ángulos de pendiente de cada perfil, kilómetro en el que se ubican, así como la zona a la que pertenecen. | 31 |
| III | Orden y frecuencia de los escurrimientos creados cada 2000 celdas, contabilizados en el área de la imagen LIDAR. | 34 |
| IV | Número de cuenca (mostrado en figura 21) y área correspondiente a cada una de ellas en km ² . | 36 |
| V | Se muestra el tamaño promedio de celdas de las ortofotos digitales en latitud y longitud. También se proporciona la desviación estándar y el número de celdas medidas en cada una de las zonas (mostradas en la figura 18). | 41 |
| VI | Categorización de susceptibilidad por litología. Tomada de Nadim <i>et.al.</i> , (2006). | 63 |

I. INTRODUCCIÓN

El término *riesgo* se define como una medida de la probabilidad de que consecuencias dañinas o pérdidas esperadas (tales como muertes, daños a bienes materiales y de sustento, interrupción de la actividad económica o daños al ambiente), resulten de interacciones entre peligros, naturales o inducidos por el hombre y las condiciones de vulnerabilidad del sitio en cuestión (Varnes, 1984; Ogura y Macedo, 1995; Nava-Pichardo, 2002; Hufschmidt y Crozier, 2008). De la definición anterior se desprende el término *peligro natural*, el cual significa la probabilidad de la ocurrencia, dentro de un periodo específico de tiempo y en un área dada, de un fenómeno que pueda ser potencialmente dañino (Varnes, 1984). En el presente trabajo, nos enfocaremos en el *peligro natural* conocido como *deslizamientos de terreno*, los cuales se clasifican dentro de los movimientos de masas (Tabla 1). *Deslizamiento* puede definirse más apropiadamente como el movimiento pendiente abajo de rocas o suelo, o ambos, ocurrido a partir de una superficie de ruptura –que puede ser curva (deslizamiento rotacional) o plana (deslizamiento traslacional)(figura 1, incisos a y b)– en la cual la gran mayoría del material se mueve generalmente como una masa coherente o semicoherente con una deformación interna muy pequeña. Los principales disparadores de los deslizamientos son la precipitación pluvial excesiva, temblores, volcanes, incendios forestales y otros mecanismos (como ciertas actividades humanas) (Hart, 1977; OEA, 1993; Highland y Bobrowsky, 2008).

El evento de deslizamiento del que se tenga registro que más vidas ha cobrado, fue el ocurrido en la localidad de Kansu, República Popular China, el 16 de diciembre de 1920; se estima que en este evento murieron alrededor de 200,000 personas; el disparador de este deslizamiento de tipo traslacional fue un terremoto de 8.6 grados en la escala de Richter, que hizo que literalmente “las montañas caminaran” (Willis, 1922). También es importante señalar que cada año mueren entre 1500 y 1600 personas a causa de los deslizamientos; según algunas

estadísticas (Petley, 2004) desde el año 1947 al 2000 han fallecido más de 82,000 personas, y se cree que esta cifra está subestimada, ya que sólo se registran eventos donde haya más de una docena de defunciones. Esto convierte a los deslizamientos en la quinta causa de fallecimientos de personas a causa de fenómenos naturales en el mundo, desafortunadamente, Sudamérica ocupa el primer lugar de entre los demás continentes (Nadim *et al.*, 2006).

Tabla I: Versión Simplificada de la clasificación de los Movimientos de Masas de acuerdo al tipo de Material, hecha por Varnes en 1978 (Highland y Bobrowsky, 2008).

| Tipo de Movimiento | | Tipo de Material | | |
|----------------------------|--------------|---|------------------------------|---------------------------|
| | | Rocas | Textura del Suelo | |
| | | | Predominantemente Gruesa | Predominantemente Fina |
| Caídas | | Caída de Rocas | Caída de Escombros | Caída de Tierra |
| Derrumbes | | Derrumbe de Rocas | Derrumbe de Escombros | Derrumbe de Tierra |
| Deslizamientos | Rotacional | Deslizamiento de Rocas | Deslizamiento de Escombros | Deslizamiento de Tierra |
| | Traslacional | | | |
| Desprendimientos Laterales | | Desprendimiento de Rocas | Desprendimiento de Escombros | Desprendimiento de Tierra |
| Flujos | | Flujo de Rocas (Reptación Profunda) | Flujo de Escombros | Flujo de Tierra |
| Complejos | | Combinación de Dos o Más Tipos Principales de Movimientos | | |

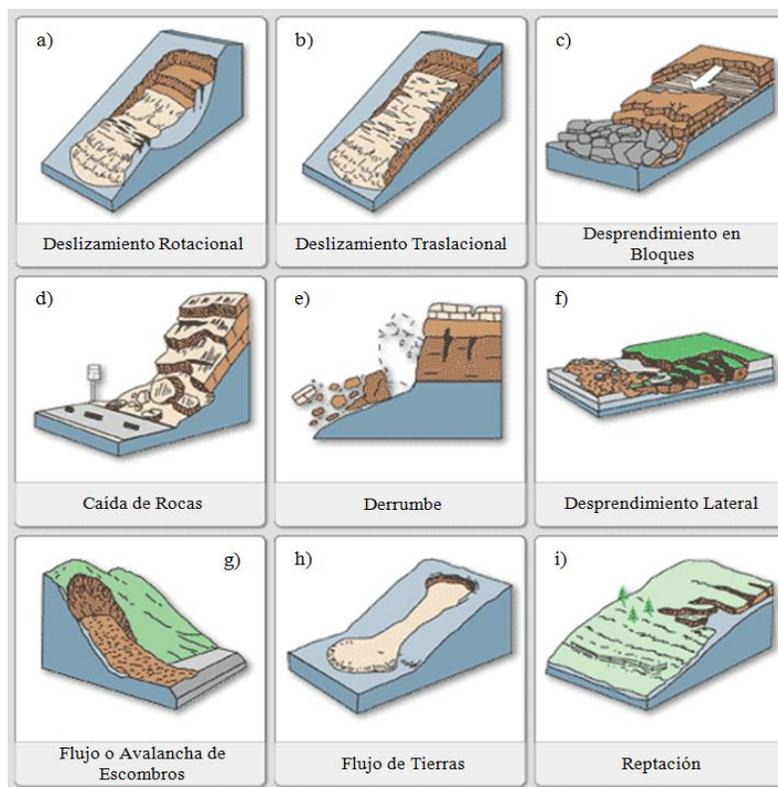


Figura 1: Principales Tipos de Movimientos de Masas, de acuerdo al tipo de Material; tomado y modificado de Highland y Bobrowsky (2008).

En Baja California existe una región que por sus características geológicas (sedimentarias y estructurales) está sujeta a ser afectada por continuos deslizamientos rotacionales (figura 2). Esta región se localiza a lo largo de la costa, desde Tijuana hasta finalizar la zona de acantilados en Ensenada, por tanto, se ve afectada la carretera de cuota Tijuana-Ensenada. Este tramo carretero fue un proyecto concebido debido a la necesidad de contar con una arteria vial que ayudara a evitar los severos congestionamientos de tráfico que se presentaban en las temporadas vacacionales, debido al turismo nacional e internacional que gustaba de disfrutar el paisaje, el clima y las actividades recreativas de la ciudad de Ensenada y sus alrededores. Es importante mencionar, que el trazo de la autopista se ubicó en esta área de acantilados debido a que así se decretó en el Diario Oficial de la Federación y se enfatizó que el trazo de la carretera no debería alejarse más de un kilómetro de distancia de la

costa, probablemente con la intención de ofrecer al turismo magnificas vistas de la costa del Pacífico a lo largo de prácticamente todo el trayecto.

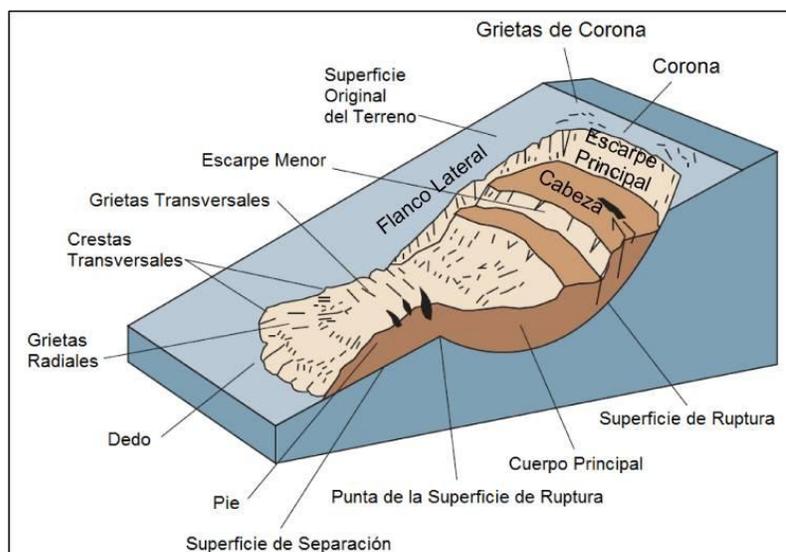


Figura 2: Partes principales de un deslizamiento Rotacional (Tomado y traducido de Highland y Brobowsky, 2008).

Los estudios y primeras obras para la construcción de la carretera de cuota comenzaron en 1961 y, finalmente, pudo ser inaugurada el 25 de abril de 1967 (CAPUFE, 1982). Desde su inauguración, han ocurrido frecuentes movimientos de masas en el tramo comprendido entre el km 84 al 98 (dos de los cuales impidieron el paso de la circulación vehicular y tardaron varias semanas en ser reparados); hasta la fecha no se ha podido estabilizar completamente este tramo de la autopista.

I.1. Localización

El área de interés de este trabajo se localiza en el municipio de Ensenada, a 11 kilómetros al noroeste de la ciudad de mismo nombre. Más específicamente, del kilómetro 84 (El Mirador) al kilómetro 96 (Playa Saldamando) (Figura 3). Las coordenadas extremas de estos puntos, sobre la carretera, son $116^{\circ}48'46.83''W$, $31^{\circ}58'57.25''N$ y $116^{\circ}45'8.18''W$, $31^{\circ}54'52.78''N$.

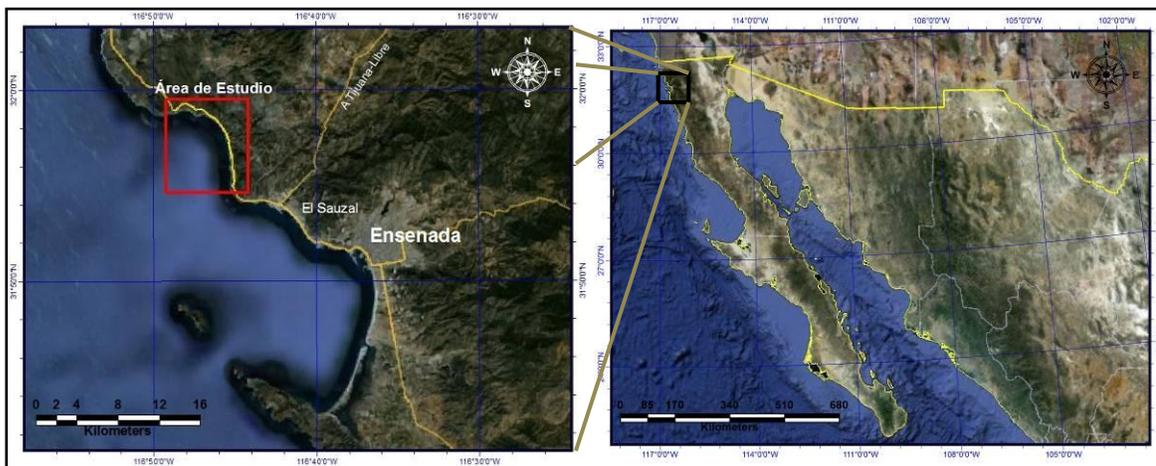


Figura 3: Mapa de localización del área de estudio (mostrado en el cuadro rojo).

Para fines prácticos, se nombrará cuerpo “A” a los dos carriles de la carretera que van hacia el sur, hacia la ciudad de Ensenada, y cuerpo “B” a los carriles cuya circulación va hacia el norte, a la ciudad de Tijuana.

I.2 Objetivos

- Determinar si la zona continúa siendo inestable y de ser así, identificar las zonas más propensas a nuevos deslizamientos.
- Cuantificar o medir los desplazamientos horizontales y verticales que se han presentado en los principales deslizamientos del área.
- Definir la hidrología superficial y determinar si existe relación entre la precipitación pluvial y los eventos de deslizamientos.
- Realizar un perfil topográfico del deslizamiento del km 91 para conocer el comportamiento después del cambio del trazo de la carretera.

II. ANTECEDENTES

II.1. Trabajos previos

La península de Baja California por sus características geológicas ha sido ampliamente estudiada, su morfología es el resultado de los procesos tectónicos que han ocurrido a través del tiempo geológico; desde la época en que hubo subducción a lo largo de la trinchera (durante el Mesozoico y hasta mediados del Cenozoico), desde la latitud de San Francisco, California, hasta la actual región de los Cabos en Baja California Sur. Posteriormente, pasó por el episodio de desprendimiento de la placa Norte América, la formación del Golfo de California y actualmente adherida a la Placa Pacífico, se encuentra sujeta a un régimen tectónico transtensivo. Este se manifiesta estructuralmente en la parte continental de la península por una serie de fallas activas de carácter regional, predominantemente de rumbo. Su continuo movimiento junto con los procesos erosivos, producen un paisaje cambiante y complejo.

La región norte de la península está constituida por rocas de diversas litologías, las cuales han sido descritas ampliamente por Gastil, et al., (1975). Son de especial interés para este trabajo las agrupadas estratigráficamente en la formación Rosario del Cretácico Superior y Rosarito Beach del Mioceno Superior, por sus características geotécnicas, que conjuntamente con la topografía a lo largo de un sector de la costa al norte de Ensenada son susceptibles al movimiento de grandes volúmenes de tierra.

La Formación Rosario se extiende a lo largo de la costa oeste del estado de Baja California, desde el Rosario, Baja California hasta la frontera internacional y está constituida por una alternancia de arenas, arcillas y conglomerados de edad Cretácica Superior. En la zona de interés para el presente trabajo la formación Rosario está compuesta por areniscas y lodolitas (Yeo, 1981).

La formación Rosarito Beach primeramente descrita por Minch (1967), aflora a lo largo de la costa oeste del estado de Baja California desde la ciudad de

Rosarito y hacia el sur hasta la latitud de Ensenada. Está constituida por 10 miembros cuyas litologías varían de basaltos, tobas, areniscas, brechas y limolitas. En la zona de estudio, el miembro La Misión, culmina la sección y está constituido por flujos de basalto porfírico y tobas, sobreyaciendo a la formación Rosario (Carreño y Smith, 2007). Ambas formaciones geológicas poseen características petrofísicas que generan inestabilidad del terreno, propiciando a que la zona comprendida entre los kilómetros 84 al 96 esté expuesta a continuos deslizamientos.

Uno de los primeros trabajos reportados, concernientes al problema de deslizamientos en el área, fue el que elaboró Rico-Rodríguez *et al.*, (1975). En ese trabajo se hace mención de las condiciones del terreno, previas a la construcción de la autopista, y se considera de relevancia el hecho de que había evidencia de deslizamientos antiguos, que debido a las características geológicas del área, podrían reactivarse y seguir causando conflictos.

Plaza-Flores (1979), describió brevemente la geología, fisiografía y litología del área de San Miguel, debido al interés que tuvo en valorar y cuantificar los cambios que produjo el deslizamiento que ocurrió en el mes de agosto de 1976, en la playa San Miguel.

Posteriormente Yoe (1981) elaboró perfiles regionales y varios mapas del área de Salsipuedes en los cuales se aprecia claramente la distribución e inclinación hacia el mar de las formaciones geológicas que se extienden en esta área. Reconoció además numerosas fallas y mencionó que las rocas marinas están muy poco consolidadas, comparadas con la misma formación en otras partes.

En 1982, la empresa Metodologías y Proyectos de Ingeniería MEPRO hizo un estudio geológico para Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE). Éste fue solicitado debido a que urgían obras de estabilización para las fallas ubicadas en los kilómetros 90+700, 93+400, 94+000, 94+500 y 97+700 (este kilometraje inicia en la ciudad de Tijuana y aumenta hacia Ensenada). De este estudio se desprendieron algunas recomendaciones acerca

de la perforación de pozos y drenaje del agua, la mecánica de suelos y las obras de estabilización que se recomendaba se debían aplicar o se siguieran aplicando, ya que, en algunos casos sí estaban contribuyendo a estabilizar ciertas áreas (CAPUFE, 1982).

La empresa GEOTEC realizó varios reportes, de los cuales se desprenden datos muy importantes sobre velocidades de desplazamiento (tanto verticales como horizontales) de las fallas principales, así como fotografías que evidencian las grietas y los movimientos más importantes presentes en la carretera desde 1978 hasta 1995 (GEOTEC, 1987; 1992; 1994; 1995).

Uno de los trabajos más recientes y completos fue la tesis de maestría de Cruz-Castillo (1998). En ella se presentan análisis cinemáticos de las fallas existentes en el área, la geometría del deslizamiento del km 98+300, mapa de riesgo por deslizamientos, entre las más importantes.

II.2 Cronología de Eventos de Deslizamientos en el área

Pobladores del área cercana a la actual autopista señalan que en la década de los años 40's ocurrió un deslizamiento súbito en el kilómetro 90 (Cruz-Castillo, 1995).

Para desplantar la autopista en el kilómetro 91+300, se construyó un terraplén de 24 metros de altura sobre una falla geológica, que se ubica al pie de un cantil de aproximadamente 60 metros de altura formado de lutita sana. En el año de 1963 se activó una primera masa en este kilómetro. El evento en este sitio consistió en un movimiento lento de la masa del terraplén y del terreno natural ladera abajo formando en el camino un escalón de 1.80 metros de altura, longitud de 80 metros y un desplazamiento hacia el mar de más de un metro. Los principales factores que originaron este deslizamiento fueron el peso del terraplén sobre la falla, así como la influencia del agua infiltrada, producto de las lluvias (Anónimo, 2009).

En el km 90+200, desde el comienzo de la construcción de la autopista, se descubrió que existe un deslizamiento doble. La masa deslizante mayor tiene 230 metros de longitud por 250 metros de ancho y la menor, que se encuentra dentro de la mayor, tiene 115 metros de longitud y 100 metros de ancho, pero se desplaza a mayor velocidad que la más grande. En abril de 1967 ocurrió un tercer deslizamiento, que se ubicó también dentro del deslizamiento mayor.

Uno de los primeros deslizamientos en presentar evidencia de actividad fue el del km 94, que colapsó súbitamente en mayo de 1967, después de haber presentando movimientos de mediana magnitud. El deslizamiento ocurrió mes y medio después de terminada la temporada de lluvias, cuando la acción del agua infiltrada era muy importante para la estabilidad del terraplén. En esa ocasión, las autoridades decidieron desplazar el trazo de la autopista ladera arriba, debido a la urgencia de ponerla en funcionamiento a la brevedad posible (Rico-Rodríguez *et al.*, 1975). A principios de 1969 se empezaron a manifestar más movimientos sobre el nuevo trazo, arrastrando el terraplén del camino, a pesar de haber sido construido sobre terreno firme (CAPUFE, 1982).

En el km 95 existe una gran zona inestable de varios deslizamientos asociados a fallamiento, más específicamente en 95+000, 95+300 y 95+450. Esta zona se detectó cuando al finalizar la carretera comenzó a haber movimientos de baja magnitud. Se han realizado numerosas obras para tratar de estabilizar el área, entre las principales se mencionan: colocación de líneas de colimación, construcción de una galería filtrante (tipo bóveda), eliminación de varios miles de metros cúbicos de material de la parte superior de los deslizamientos y construcción de una trinchera estabilizadora (Rico-Rodríguez *et al.*, 1975).

En noviembre de 1969 comenzó a manifestarse un evento de deslizamiento en el km 88+400. Este afecta una longitud de aproximadamente 40 metros de la autopista, abarcando el acotamiento y el carril de baja velocidad del cuerpo "A", y se extiende hacia la playa, logrando abrirse hasta una longitud de más de 300

metros, su trazo se pierde en el mar. La superficie afectada por éste deslizamiento es de 4.5 hectáreas (Anónimo, 2009).

En agosto de 1976, en el km 98+300 ocurrió un gran evento de deslizamiento que destruyó varias casas y empujó un amplio tramo de la carretera hacia el mar, provocando el cierre de la circulación en la carretera por varios meses (Plaza-Flores, 1979). Se sabe que en esta misma fracción de la autopista ocurrió otro deslizamiento importante en el año 1984, pero no está bien documentado (GEOTEC, 1987).

III. MARCO GEOLÓGICO

La litología del área se puede resumir en tres formaciones, las cuales, de la más antigua a la más reciente, son:

III.1 Formación Alisitos

La localidad tipo fue descrita por primera vez en 1930 por Santillán y Barrera (citados por Suárez-Vidal, 1987) en el Rancho Alisitos, ubicado en el Valle de Santo Tomas Baja California ($31^{\circ}33'1.62''$ de latitud Norte y $116^{\circ}36'11.25''$ de longitud Oeste). Esta Formación de edad Aptiano-Albiano representa a un arco volcánico de naturaleza andesítica. Las rocas que constituyen a la Formación Alisitos afloran en la parte central y en la costa oeste del estado de Baja California, y está intrusionada por el batolito peninsular. La columna estratigráfica compuesta de la Formación Alisitos alcanza los 5000 metros de espesor (Almazan-Vázquez, 1988). La litología de esta formación está integrada por una interestratificación de brechas volcánicas, flujos porfíricos, calizas biohémicas y sedimentos tobáceos y piroclásticos (Suárez-Vidal, 1987). Gastil *et al.*, (1975) menciona las principales localidades donde se han descrito columnas estratigráficas de la Formación Alisitos, las cuales son: el sureste de Ensenada, Valle de Santo Tomás (localidad tipo), el este de El Rosario, la Misión San Fernando, el arroyo San José, el cuadrángulo de la bahía de Santa Rosalía, la región de Miraflores y el arroyo Calamajué.

III.2 Formación Rosario

Beal (1948) afirma que la localidad tipo fue descrita por primera vez en 1924 y, nombrada así por su cercanía al poblado de El Rosario, Baja California. Esta formación del Cretácico superior (del Turoniano al Campaniano) se constituyó a partir de un megaciclo eustático que provocó una transgresión marina de entre 5 y 15 kilómetros al este de la actual línea de costa (Yeo, 1981). La Formación Rosario aflora desde la frontera internacional con E.U.A. hasta Punta

Canoas (Beal, 1948). Esta formación está integrada por tres unidades informales o miembros (areniscas inferiores, lodolitas medias y areniscas-conglomerados superiores) que muestran distintos cambios de facies de Este a Oeste, caracterizándose por transiciones de aguas someras a aguas profundas (Yeo, 1981) donde, los principales agentes de formación de estructuras sedimentarias fueron las corrientes turbidíticas y los derrumbes (Gastil *et al.*, 1975).

III.3 Formación Rosarito Beach

Minch (1967) describió en las cercanías de Playas de Tijuana, Baja California, una gruesa intercalación de flujos basálticos, tobas, brechas, areniscas y limolitas, los cuales subyacen a rocas del Plioceno. La edad de la Formación Rosarito Beach va desde el Mioceno Medio al Plioceno Temprano y afloran a lo largo de la costa desde Playas de Tijuana hasta La Misión. Esta Formación se constituyó a partir de flujos de lodo y detritos de ríos o corrientes marinas someras, los cuales posteriormente quedaron sepultados por las erupciones basálticas ocurridas en todo el margen continental (Minch *et al.*, 1970). La columna estratigráfica alcanza los 400 metros, que se clasifican en dos cuencas principales, Tijuana y La Misión. La cuenca Tijuana se divide en los siguientes 5 miembros, desde la base: Mira al Mar (compuesto de areniscas fosilíferas, esquistos, limolitas y brechas), Costa Azul (formado predominantemente de basaltos y tobas), Amado Nervo (compuesto de basaltos y gruesas capas de cenizas), Las Glorias (formado por areniscas volcanoclásticas y limolitas intercaladas con basaltos) y Los Buenos (predominantemente formado de basaltos de olivino, intercalados con delgadas capas de areniscas y limolitas) (Minch, 1967; Gastil *et al.*, 1975). La cuenca la Misión agrupa también 5 miembros, los cuales son, desde la base: Punta Mezquite (conformado por brechas y tobas), Medio Camino (compuesto de tobas, basaltos y areniscas), La Misión (formado de basaltos y tobas), Los Indios (que consiste en tobas y sedimentos volcanoclásticos marinos y no marinos con abundancia de fosilíferos) y El Descanso (compuesto principalmente de conglomerados) (Carreño y Smith, 2007).

Por otra parte, para el presente trabajo es importante mencionar la geología estructural, ya que, una buena parte de las fallas está asociada a deslizamientos. En este sentido Cruz-Castillo y Delgado-Argote (1999) mencionan que para el área de estudio, al igual que en el noroeste de Baja California, el sistema de fallas es principalmente de rumbo lateral derecho y los sistemas que no coinciden con la solución anterior se pueden asociar con eventos de deformación o bloques discretos con comportamiento distinto. Estos autores también mencionan que las rocas de la Fm. Rosario buzcan con ángulos menores de 10° , principalmente hacia el SW pero el echado y la dirección de la pendiente de la estratificación coinciden. Las rocas de la Fm. Rosarito Beach no tienen una dirección preferente.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se cuenta con una herramienta útil, eficaz y rápida para evaluar entre muchos aspectos, el peligro por deslizamientos de grandes masas de tierra. La recopilación, manipulación y análisis de los datos ambientales es más eficiente y costeable empleando la metodología SIG, la cual facilita el uso de los mismos datos para diferentes tipos de peligros (Carrara *et al.*, 1999; Zeng-wang, 2001; Fernández *et al.*, 2003; Colombo *et al.*, 2005; Saha *et al.*, 2005; Gorum *et al.*, 2008; Jimenez-Peralvarez, 2008). Aprovechando las ventajas del SIG, en el presente trabajo la mayor parte del procesado y análisis de información se hizo empleando el software de SIG existente en la División de Ciencias de la Tierra del CICESE, con excepción de la fotointerpretación, altimetría y nivelación.

IV.1 Modelo Digital de Elevación

Un Modelo Digital de Elevación (MDE) o Modelo Digital del Terreno es una de las varias formas en que se puede representar digitalmente la topografía de un área determinada. La ventaja del MDE estriba en la simplicidad que involucra su rejilla regular (García-Puga, 2000). En el presente trabajo, se elaboró un MDE a partir de las curvas de nivel de los datos vectoriales elaborados por INEGI (1999), escala 1:50,000. La equidistancia entre curvas de nivel es de 20 metros. Las claves de las cartas utilizadas son: H11B11 (Sauzal de Rodríguez), H11B12 (Ensenada), I11D81 (Primo Tapia) e I11D82 (Francisco Zarco). La herramienta usada para convertir las curvas de nivel (vector de tipo polilínea) a un raster fue "Topo to Raster" del programa ArcMap versión 9.3 (ESRI, 2008). La resolución por celda de este MDE es de 10 metros. Posteriormente, se procesó una imagen LIDAR (por sus siglas en inglés Light Detection And Ranging) la cual tiene una resolución de 5 metros por celda y fue elaborada por INEGI (2006). La clave de carta es H11B11 y sus coordenadas extremas son al NW, 512754.2 y 3540604.6 y al SE 531686.5 y 3525244.2.

Los insumos mencionados se utilizaron para la construcción y obtención de estos MDE con los que se realizaron las mediciones de desplazamientos del terreno en el área de interés, en el plano vertical.

Se debe tener en cuenta que la resolución de LIDAR es el doble del MDE, sin embargo, la relación espacial es 1:4 (figura 4).

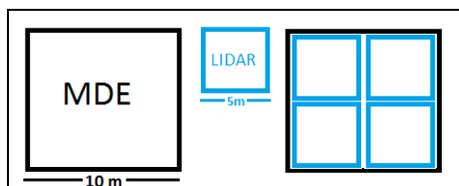


Figura 4: Ejemplificación de la resolución usada en el MDE y LIDAR. Una celda de LIDAR cabe 4 veces en una del MDE.

IV.2 Mapa de Pendientes

Un mapa de pendientes es un modelo matemático de un MDE que ha sido procesado para representar la variación continua del relieve en el espacio (Pereira-Neto y Limberger, 2004). Para el estudio de peligro geológico por deslizamientos, el análisis de pendientes es un factor imprescindible a definir, ya que al plasmar las pendientes del terreno en un mapa se facilita la identificación y mapeo de las áreas susceptibles a deslizarse (Miliaresis *et al.*, 2005; Bromhead y Ibsen, 2007; Galli y Guzzetti, 2007).

En esta tesis se elaboraron dos mapas de pendientes, los cuales tuvieron como insumos el MDE y la imagen LIDAR, esto para contrastar los resultados de las resoluciones, las cuales son 10 metros y 5 metros por celda, respectivamente. Estos mapas de pendientes se elaboraron con la herramienta Slope, del programa ArcMap 9.3 (ESRI,2008) y lo que hace esta herramienta es ajustar un plano a los valores z (altitud) del centro de una celda, tomando en cuenta sus 8 vecinos de alrededor; la dirección de la cara del plano es la orientación de la celda a procesar; el raster de salida puede ser calculado en dos tipos de unidades: grados o porcentajes; la razón de cambio (delta) de la superficie en las direcciones

horizontal (dz/dx) y la vertical (dz/dy) de la celda determinan la pendiente; el algoritmo básico que usa el programa para el cálculo de la pendiente en grados es:

$$\text{Pendiente en grados} = \text{ATAN} (\sqrt{ ([dz/dx]^2 + [dz/dy]^2) }) * 57.29578 \quad (1)$$

Donde, ATAN es el arco tangente, dz/dx y dz/dy son las derivadas parciales de la altura en las direcciones Oriente-Poniente y Norte-Sur respectivamente y 57.29578 es una constante para convertir de radianes a grados.

IV.3 Modelo Digital de Elevación en Tercera Dimensión

Un MDE en tercera dimensión ayuda a una mejor visualización de las condiciones del terreno, facilitando la comprensión de las estructuras geológicas en áreas inestables, así como, los mecanismos actuantes en la formación de deslizamientos (Kajiyama *et al.*, 2005). En el presente trabajo, se usaron dos MDE en tercera dimensión, uno elaborado a partir del MDE con resolución de 10 metros por celda y el otro a partir de la imagen LIDAR que tiene mayor resolución (5 metros por celda). Estos MDE se procesaron en el programa ArcScene del paquete de ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008). Una vez que se contó con los MDE se elaboraron perfiles, los cuales consistieron en marcar líneas perpendiculares al eje de la carretera con una separación entre perfil y perfil de 333.3 metros. El objetivo de la elaboración de estos perfiles fue poder realizar el cálculo de pendientes y delimitar sub-áreas tomando en cuenta el grado de cada pendiente; en total se produjeron 37 perfiles (Anexo 1), que iniciaban en el nivel del mar y finalizaban en el punto más alto o escarpe.

IV.4 Hidrología

IV.4.1 Análisis de Hidrología Superficial

La hidrología superficial (escurrimientos y delimitación de microcuencas) del área se elaboró en el programa ArcMap (ESRI, 2008) empleando la rutina

Watershead Delineation, teniendo como insumo el MDE de 10 metros de resolución y la imagen LIDAR. Este programa básicamente trabaja en dos procesos, el primero es un pre-procesamiento que define las cuencas hidrológicas a partir de parámetros que define el usuario, como el área mínima para considerarse una cuenca y la longitud mínima de los arroyos. La segunda parte rellena los huecos que hubiera en el MDE, calcula la pendiente del terreno, el trazo de arroyos, dirección de flujo y zonas de acumulación. Con las direcciones de flujo y las trayectorias, se contabilizan las celdas que aportan en la formación de un escurrimiento, almacenando el resultado en un raster de acumulación. Cada celda almacena la suma de celdas aguas arriba que contribuyeron para la formación del arroyo. En este paso también se genera la red hidrológica en formato vectorial (García-Puga, 2000). Posterior a esto se procedió a jerarquizar los escurrimientos que resultaron del análisis hidrológico (pero sólo de la imagen LIDAR), esta jerarquización se hizo de acuerdo al método propuesto por Horton y Strahler (en Garcia-Puga, 2000) y consiste en asignar un orden de importancia a los arroyos de cada cuenca, dependiendo de su orden jerárquico en la red hidrológica superficial. La red está integrada por un cauce principal y una serie de tributarios cuyas ramificaciones se extienden desde las partes más altas hacia las partes más bajas donde convergen los escurrimientos a través de los canales.

IV.4.2 Precipitación Pluvial

Considerando que un agente importante en el proceso de movimiento de masas de tierra es el agua (precipitación pluvial), es necesario tomar en cuenta los ciclos de lluvia para la región, y en ese sentido, para la ciudad de Ensenada y sus alrededores según Rivas-Martínez (2008) la precipitación promedio anual es de 280mm; sin embargo, en el presente trabajo se utilizaron los datos de precipitación de la estación Olivares Mexicanos, por ser la que posee el mayor tiempo continuo de registro; con más confianza en cuanto a su localización y la más cercana al área de estudio (figura 5). De esta estación se tienen registros pluviales desde el año 1969 y hasta el 2000, con una media anual de precipitación de 337mm.

Aunque la precipitación en esta área no es abundante, sí juega un papel importante como disparador de eventos de deslizamientos (Guzzetti *et al.*, 2008) en esta región del mundo (Figura 6).



Figura 5: Localización de la estación hidrometeorológica de CNA 2036, Olivares Mexicanos. La línea roja marca la autopista en el área de estudio y el punto verde señala la ubicación de "Olivares Mexicanos" (32°01'47.99" y -116°40'12.02").

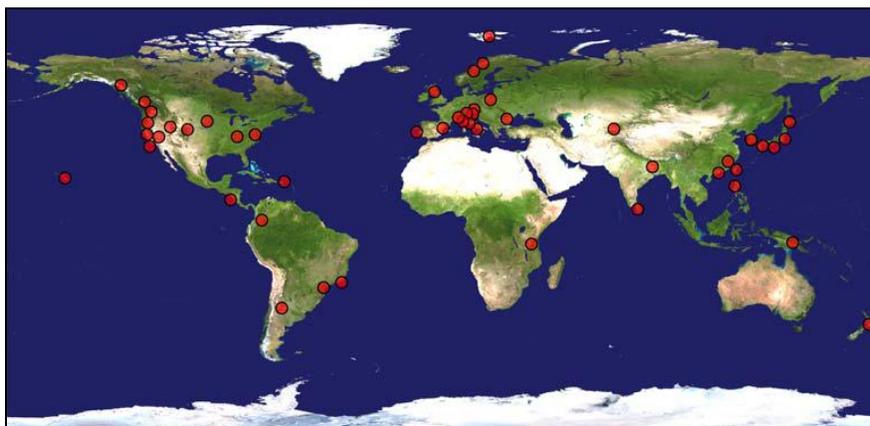


Figura 6: Mapa mundial de localización de áreas en dónde las lluvias son disparadores potenciales de deslizamientos (Guzzetti *et al.*, 2008).

IV.5 Mapa Geológico

Los mecanismos iniciales de falla en los deslizamientos están fuertemente influenciados por la geología y la topografía (Carrara *et al.*, 1999; Kahmen *et al.*,

2005; Chacon *et al.*, 2006; Evans *et al.*, 2006; Bromhead y Ibsen, 2007; Dong-Wang *et al.*, 2008; Ozdemir, 2008), por tal motivo es importante estudiarlos a detalle. Para la elaboración del mapa geológico del área se usaron como mapas de referencia los elaborados anteriormente por algunos autores como Gastil *et al.* (1975), Cruz-Castillo y Delgado-Argote (1999) y Yeo (1981); así como material fotográfico, aerofotográfico y diversas imágenes digitales. La base cartográfica sobre la cual se modificó y actualizó la geología fueron los datos vectoriales geológicos de las cartas H11-2 (Ensenada) e I11-11 (Tijuana), escala 1:250,000, producidos por INEGI (1998); estos datos vectoriales fueron proporcionados por personal del departamento de Ciencias de la Tierra de CICESE.

IV.6 Imágenes Aéreas

IV.6.1 Fotografías Aéreas

En una primera etapa para identificar, limitar y evaluar una zona propensa a deslizamientos, es necesario contar con material aereofotográfico, con el que se hace análisis de fotointerpretación, que es una herramienta básica en los estudios de determinación de peligro y riesgo (Van-Westen *et al.*, 2003; Yamagishi *et al.*, 2004; Colombo *et al.*, 2005; Clerici *et al.*, 2006; Romeo *et al.*, 2006). Con ello se puede inferir la existencia de estructuras geológicas adversas, como: lineamientos, fracturas, fallas, deslizamientos, etc.

En el presente trabajo, se utilizaron tres juegos de fotografías aéreas tomadas en diferentes años por INEGI (figura 7). El primer juego es del año 1973, son 23 fotografías a color, escala aproximada de 1:25,000; El segundo juego de fotografías aéreas corresponde al año de 1990, son 7 fotografías en tonos de grises y su escala aproximada es 1:75,000; El tercer juego es del año 2006, consta de 14 fotografías a color y la escala aproximada es 1:40,000.

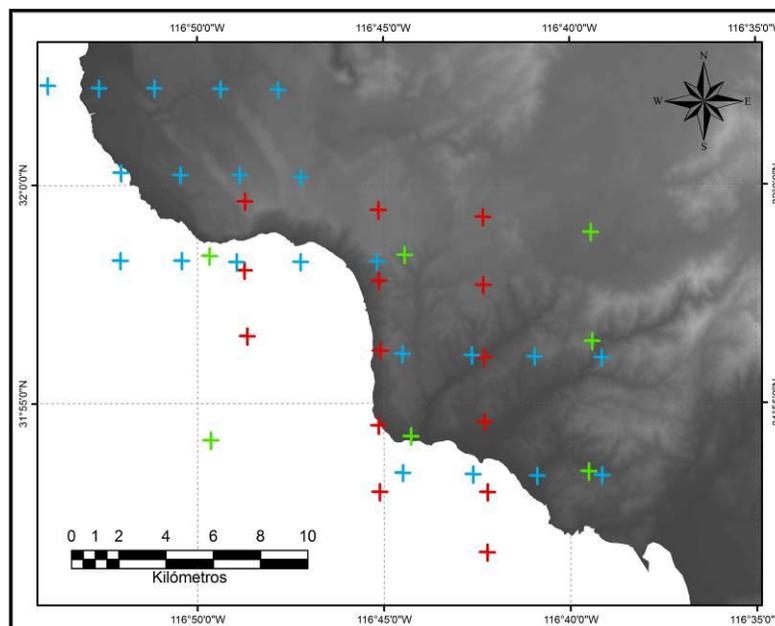


Figura 7: Cada “+” indica el centro de una fotografía aérea. + Fotografías del año 1973. + Fotografías del año 1990. + Fotografías del año 2006.

IV.6.2 Ortofotos Digitales

Complementando al material aereofotográfico se usaron las ortofotos digitales que cubren parte de las cartas H11B11, H11B12, I11D81 e I11D82 (figura 8), obtenidas gratuitamente de la página de INEGI con ayuda del programa ErMapper 7.2 (ERDAS, 2008). La escala aproximada de estas ortofotos es 1:75,000, están en tonos de grises y su tamaño promedio de celda es de 2.66 metros en X y 3.09 metros en Y. Estas imágenes fueron obtenidas con referencia espacial de NAD 1927 UTM zona 11 Norte y para el presente trabajo sirvieron como base para georreferenciar y hacer mediciones en las fotografías aéreas.

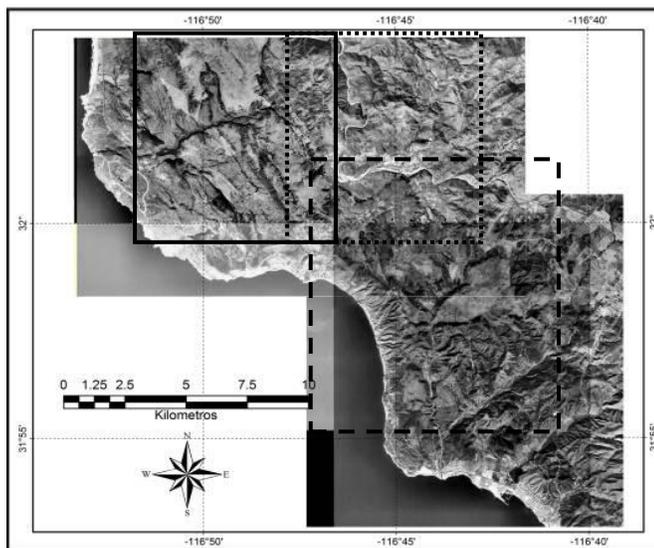


Figura 8: Mosaico en el que se muestran las 3 ortofotos usadas de base para la georreferenciación, mediciones y comparaciones con las fotografías aéreas. Los polígonos con diferentes tramas muestran los límites de cada ortofoto.

IV.6.3 Procesamiento.

Las fotografías aéreas fueron escaneadas con una resolución DPI (*dots per inch*) específica para cada juego fotográfico, debido a que el tamaño de celda debe ser lo más cercana posible al de las ortofotos siguiendo el razonamiento de que si la celda escaneada tiene resolución mayor se estaría sobreestimando la información, si la resolución es menor se corre el riesgo de perder información (Hinojosa-Corona A., CICESE, comunicación personal, 2009). Las fotografías aéreas de 1973 se escanearon con resolución de 1200 DPI, las de 1990 con 350 DPI y las de 2006 con 800 DPI.

Posterior al escaneo, las fotografías aéreas fueron seleccionadas y recortadas para que cubrieran el área de estudio específicamente y luego fueron cuidadosamente georreferidas (sobrepuestas) a las ortofotos digitales. La georreferenciación se conoce también como la corrección geométrica o rectificación de la imagen, que establece una relación entre un sistema de referencia cartográfica y la imagen, donde a cada celda le corresponde una posición en el sistema de referencia (García-Puga, 2000). Para aplicar este procedimiento en nuestro caso específico se requirió identificar rasgos (*piercing*

points), tanto en las fotografías aéreas, como en el sistema de referencia (ortofotos), luego se anclaban con ayuda de la herramienta Georeferencing de ArcMap 9.3 (ESRI, 2008).

Del año 1973 se seleccionaron las fotografías 4 y 6 de la línea 30 y de la línea 31 se utilizó la fotografía 34; del año 1990 se usó la fotografía 1 de las líneas 5 y 6; y del año 2006 se usaron las fotografías 3 de la línea 10 y las 2 y 3 de la línea 11. Previo a la georreferenciación, las 3 fotografías de 1990 que se habían seleccionado por cubrir adecuadamente el área se recortaron a 6 partes más pequeñas, ya que así se disminuye el error por deformación y para anclarlas se usaron 213 puntos (Anexo 2); para el juego fotográfico de 1973 se hicieron 4 recortes y fueron usados 184 puntos de anclaje y para las fotografías de 2006 se emplearon 4 recortes que se anclaron con 227 puntos.

IV.7 Altimetro y Nivelación.

IV.7.1 Altimetro barométrico.

El altímetro barométrico es un instrumento que registra la diferencia de altitud con respecto al nivel del mar, en el que el dato de la altitud es obtenido basándose en la medición de la presión atmosférica (Mena-Berrios, 2008). Este instrumento funciona bajo el principio de que la presión atmosférica en cualquier parte de la Tierra es equivalente al peso de la columna de aire extendida desde la superficie hasta los confines de la atmósfera; el peso de la columna de aire depende de la densidad del aire y ésta, a su vez, varía en un rango significativo de valores como respuesta a los cambios en la temperatura del aire. En la práctica, las mediciones de la temperatura hechas en campo pueden aproximarnos a un promedio diario real de la temperatura del aire. Con esta información se puede corregir las lecturas directas del altímetro para obtener diferencias de altura reales (Hodgson, 1957).

Se llevaron a cabo la toma de datos de alturas, para las cuales se empleó un altímetro barométrico de campo marca American Paulin Systems, modelo M-1

(figura 9). Se realizaron tres levantamientos altimétricos, que estuvieron referidos a unos puntos proporcionados por CAPUFE (estos puntos habían servido anteriormente en líneas de control para los levantamientos topográficos que se llevaban a cabo a lo largo de la carretera de cuota en las décadas de los 80's y 90's y tenían como inicio o referencia un punto de control ubicado en la caseta de cobro de San Miguel, actualmente ese punto no existe). Los puntos se distribuyeron de sur a norte de la siguiente manera (figura 10): Punto base del Km. 96, se ubica a una altura de 71.667 msnm y en $31^{\circ}55'11.6''$ latitud Norte y $116^{\circ}45'06.1''$ longitud Oeste. Punto del km 91, se ubica a una altura de 65.048 msnm y en $31^{\circ}57'19.8''$ latitud N y $116^{\circ}45'28.2''$ longitud O. Punto del km 88, se ubica a una altura de 109.606 msnm y en $31^{\circ}58'38.8''$ latitud N y $116^{\circ}46'35.4''$ longitud O.



Figura 9: Altímetro barométrico American Paulin Systems, modelo M-1. Rango de -1000 pies a +5000 pies de altura. Graduación de una pulgada. Precisión de ± 1 a 5 pies.

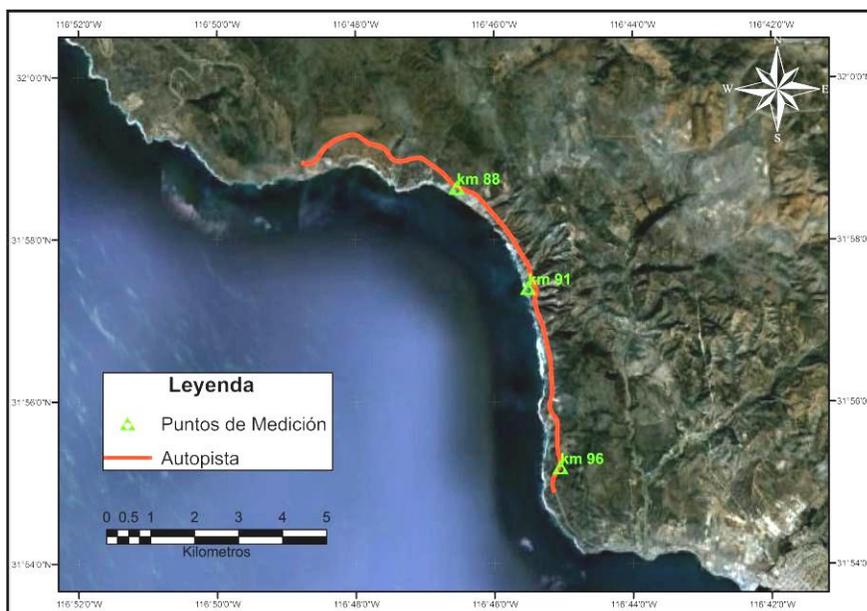


Figura 10: Mapa de localización de los puntos en donde se obtuvieron alturas mediante el altímetro barométrico.

IV.7.2 Nivelación Topográfica con Estación Total.

La nivelación es el proceso de medición de elevaciones o altitudes de puntos sobre la superficie de la Tierra. La elevación o altitud es la distancia vertical medida desde la superficie de referencia hasta el punto considerado. La distancia vertical debe ser medida a lo largo de una línea vertical definida como la línea que sigue la dirección de la gravedad o dirección de la plomada (Casanova-Matera, 2002). En esta tesis se usó la nivelación trigonométrica, que es un método altimétrico que permite obtener desniveles entre puntos, con observaciones de distancias cenitales de cualquier inclinación (Farjas-Abadia, 2008). Este procedimiento consiste en llegar de un punto de partida hasta otro punto a través de un itinerario de nivelación, el cual se compone de un cierto número de tramos de nivelación donde se determina el incremento parcial de altitud mediante un aparato que materializa la línea horizontal o nivel (Mena-Berrios, 2008).

Se utilizó una estación total marca Topcon, modelo GTS226 (alcance de 4000-4700 metros utilizando tres prismas, exactitud de $\pm 2\text{mm} + 2\text{ppm} \times D$, distancia mínima de enfoque 1.3 metros) para obtener un perfil topográfico del

tramo de la autopista en el trayecto del km 91+100 al 91+470. El perfil comenzó por el sur, debido a que existe un banco de nivelación de INEGI, del cual se sabía que tiene una cota de nivel de 30.721 msnm (figura 11).

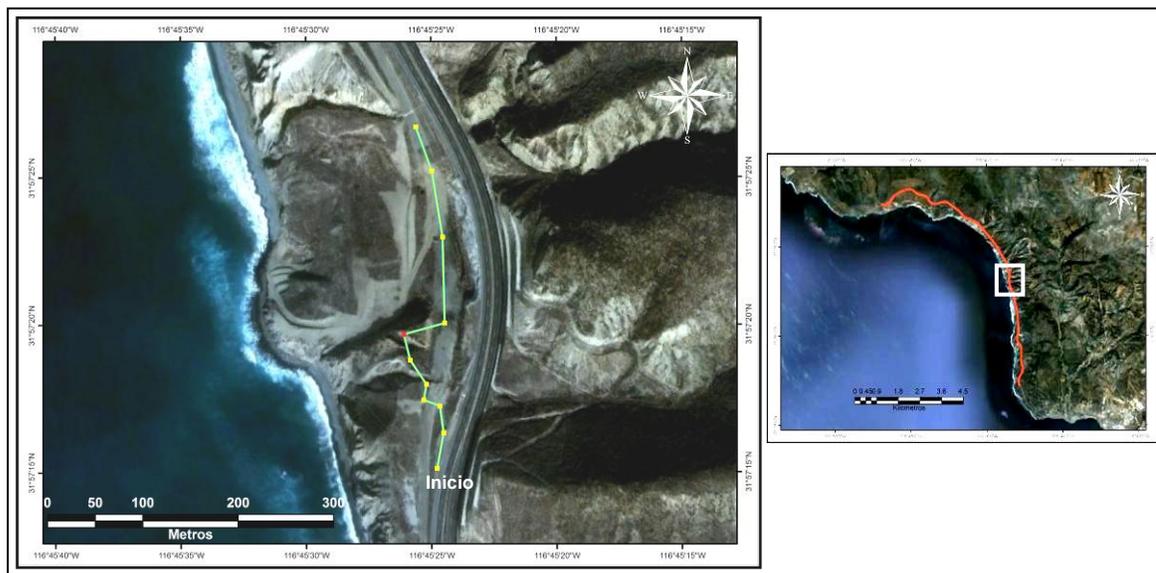


Figura 11: A la izquierda se muestra el tramo de la carretera donde se realizó el levantamiento topográfico, la marca roja representa el punto de control del km 91 proporcionado por CAPUFE. A la derecha se muestra el mapa del área de estudio y el recuadro blanco representa la ubicación de la ampliación de la izquierda.

IV.8 Trabajo de Campo

Se realizaron 7 salidas al área de estudio. El trabajo de campo consistió en verificar los rasgos geológicos identificados en las fotografías aéreas, así como para actualizar el mapa geológico y ubicar nuevas o posibles fallas en el área de la autopista. El trabajo de campo se realizó en diferentes épocas de los años 2008 y 2009; una primera salida fue de reconocimiento y en las siguientes se visitaron sitios específicos en donde existen nuevas evidencias de fracturamiento, tanto en las pendientes como en la carpeta asfáltica de la carretera escénica y a lo largo de la costa. Se ubicaron los sitios de interés con GPS y se tomaron los datos estructurales de fallas y fracturas.

V. RESULTADOS

V.1 Modelo Digital de Elevación.

El MDE elaborado a partir de las curvas de nivel de los datos vectoriales de INEGI no fue usado para realizar las mediciones de desplazamientos en el plano vertical debido a que la precisión en su ubicación y resolución de celda es menor en comparación con la de la imagen LIDAR, esto se debe a que:

a) Respecto a la ubicación del MDE, se le debió realizar una corrección para que empatara adecuadamente con las ortofotos, ya que, aunque tenían el mismo sistema de coordenadas (NAD 1927 UTM zona 11 Norte) quedaba desfasado por cuestión de varios metros. Para la corrección se usaron las cartas topográficas escaneadas y georreferidas H11B11 (El Sauzal de Rodríguez) e I11D81 (Primo Tapia), las cuales quedan perfectamente sobrepuestas con las ortofotos, y se usaron como base para mover y anclar todas las curvas de nivel.

b) La resolución lograda es producto de un método de interpolación que usa una técnica iterativa de diferencias finitas, hecho por el programa en que se elaboró el MDE. ESRI (2007), el proveedor del programa ArcMap, afirma que esta herramienta de interpolación es ideal para trabajar en MDEs que serán usados para hidrología, por tal motivo el MDE (figura 13) fue conservado y usado posteriormente para el procesado hidrológico.

Debido a los motivos anteriores y a que la imagen LIDAR (figura 12) es más reciente, se optó por usar ésta última para la toma de mediciones en el plano vertical; aún así, los datos obtenidos de estas mediciones se deben tomar en consideración con reserva, debido a que la resolución por celda es de cinco metros; por tanto, sus celdas son más grandes que las celdas de las fotografías aéreas y ortofotos.

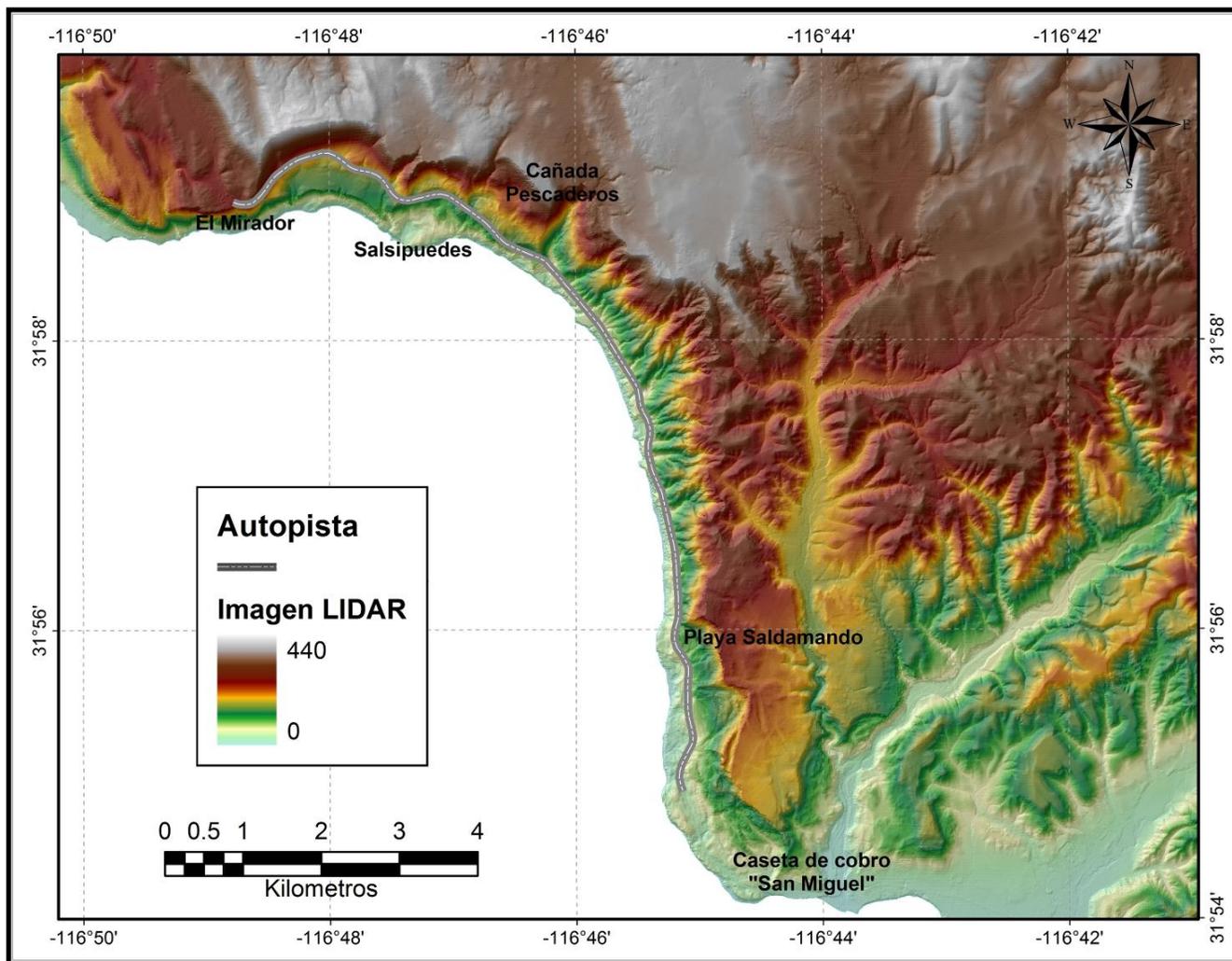


Figura 12: Imagen LIDAR que abarca el área de estudio, con ella fueron tomados los datos de alturas y desplazamientos en la vertical. Visualización con la paleta de colores "Elevation 1", teniendo como fondo un efecto de sombreado.

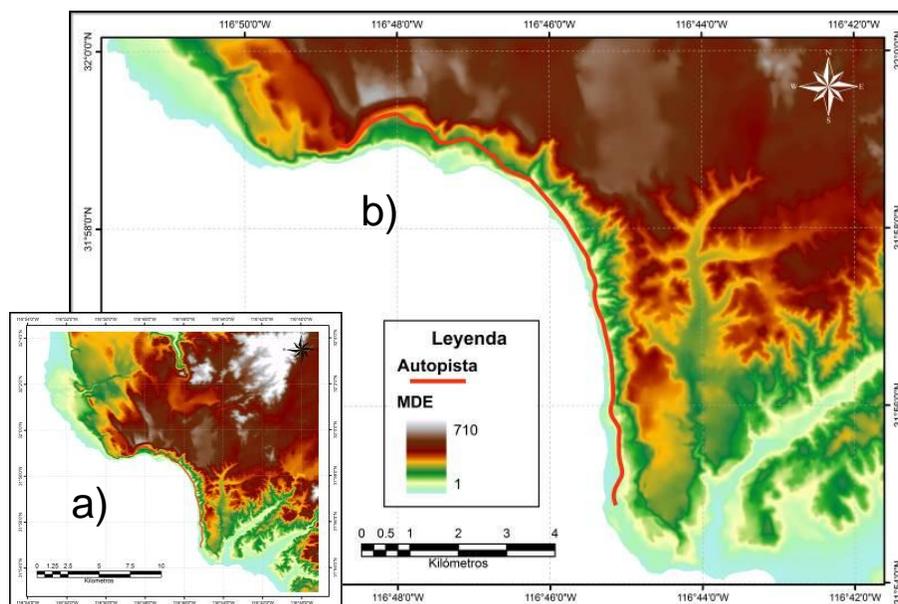


Figura 13: Modelo Digital de Elevación (MDE) creado a partir de las curvas de nivel de INEGI, representados con la paleta de color “Elevation 1”. a) Vista en miniatura del total del área cartografiada, cartas usadas H11B11, H11B12, I11D81 e I11D82. b) Ampliación del área de estudio.

V.2 Mapa de Pendientes.

Como resultado del análisis de pendientes, se identificaron las áreas con pendientes más abruptas (figura 14), que aunadas a otros factores que se analizarán más adelante, pueden ser las zonas más propensas de sufrir eventos de deslizamientos, en este caso son las de Salsipuedes, Mesa del Tigre, Cañada Pescaderos, Rancho Bonito, Km 91, Km 93 a 94 y playa Saldamando.

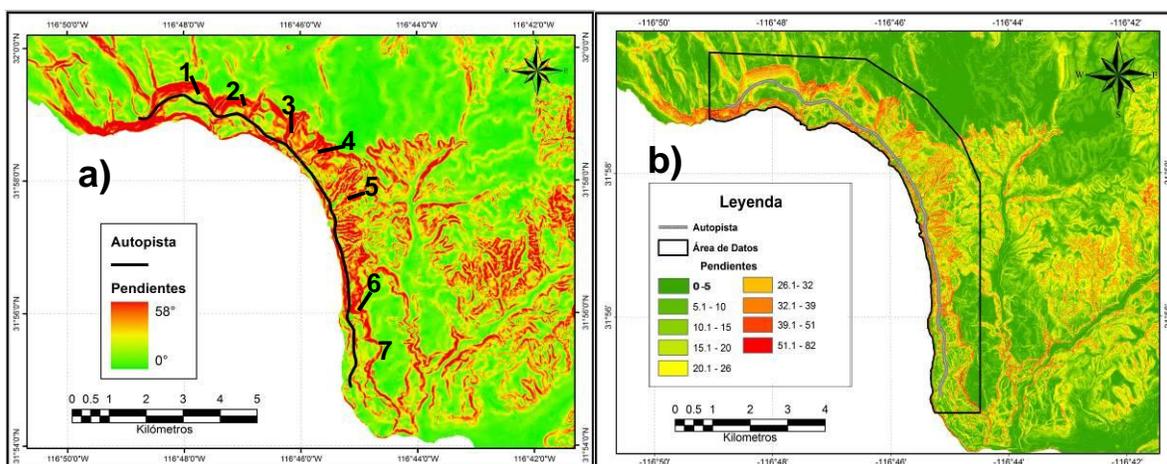


Figura 14: Mapas de pendientes elaborados a partir de a) Modelo Digital de Elevación, los lugares numerados son los siguientes: 1-Salsipuedes, 2-Mesa del Tigre, 3-Cañada Pescaderos, 4-Rancho Bonito, 5-Km 90, 6-Km 93 a 94 y 7-playa Saldamando; y b) Imagen LIDAR, el recuadro negro representa el área de estudio, de la cual la pendiente media es 17.81° , con una desviación estándar de 12.79° .

Empleando las herramientas de Análisis de Superficie en el programa ArcMap para LIDAR se obtuvo un mapa “Hillshade” (figura 15a). El resultado es un mapa del sombreado del relieve, y en el cual el análisis de las sombras se hace considerando los efectos del horizonte local en cada celda. El otro producto obtenido fue un “Aspect” (figura 15b) que consiste en identificar la orientación de la pendiente de cada celda con respecto a la de sus vecinos.

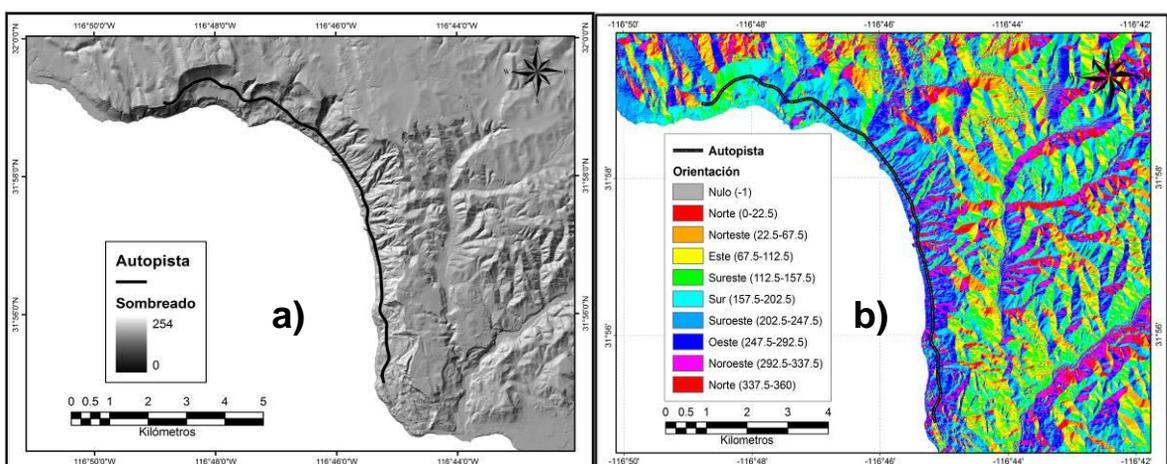


Figura 15: a) Efecto de “Hillshade” o sombreado, la fuente de luz está a 315° de azimut y con un ángulo de altitud de 45° . b) “Aspect” u orientación, la media es de 185.9 , con una desviación estándar de 91.7 azimut.

V.3 Modelo Digital de Elevación en Tercera Dimensión

A partir de la elaboración de perfiles de pendientes (figura 16) se obtuvo una microzonificación, que consistió en 4 diferentes polígonos que se extienden desde el nivel del mar hasta algunos cientos de metros al este de los acantilados o pendientes abruptas (figura 18). En la tabla 2 se describen brevemente las características de cada perfil.

Con ayuda de esta tabla y de las imágenes de los perfiles (Anexo 1) se puede apreciar que las áreas con más pendientes son las cercanas a Salsipuedes, cañada Pescaderos, km 91 y km 93 a 94. También este modelo en tercera dimensión facilitó la identificación de evidencias de antiguos deslizamientos, como los que se aprecian en los perfiles de la figura 18 y, además, fue de gran ayuda para después del procesado de las fotografías aéreas porque se pudo confirmar que en algunos lugares había una pendiente abrupta y que las geoformas del terreno eran susceptibles a un nuevo evento de deslizamiento, tal es el caso de los kilómetros 88, 91 y 94.

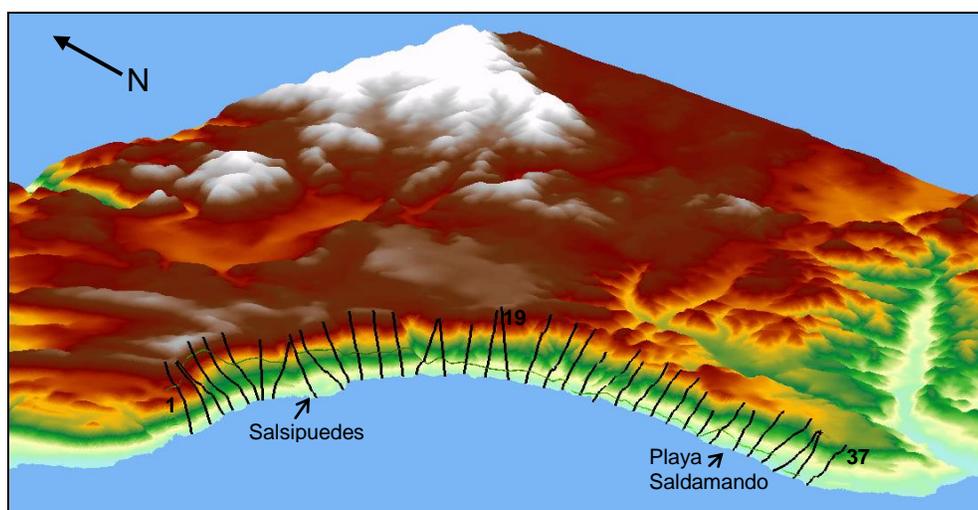


Figura 16: Imagen en perspectiva del área de estudio en tercera dimensión. Las líneas negras representan los perfiles creados y fueron numerados del 1 al 37 comenzando de norte a sur. La línea continua verde representa el trazo de la autopista. Se usó la paleta de colores Elevation 1, la exageración vertical es de 2.

Tabla II: En esta tabla se describen los ángulos de pendiente de cada perfil, kilómetro en el que se ubican, así como la zona a la que pertenecen.

| No. Perfil | Pendiente en grados | Kilómetro | Zona | No. Perfil | Pendiente en grados | Kilómetro | Zona |
|------------|---------------------|-----------|------|------------|---------------------|-----------|------|
| 1 | 28.21 | 84 | 1 | 20 | 14.08 | 90 | 3 |
| 2 | 20.91 | 84 | 1 | 21 | 13.45 | 90 | 3 |
| 3 | 23.17 | 84 | 1 | 22 | 13.59 | 90 | 3 |
| 4 | 24.78 | 84 | 1 | 23 | 15.93 | 91 | 3 |
| 5 | 23.4 | 85 | 1 | 24 | 14.82 | 91 | 3 |
| 6 | 21.77 | 85 | 1 | 25 | 19.96 | 91 | 3 |
| 7 | 22.37 | 85 | 1 | 26 | 17.56 | 92 | 3 |
| 8 | 20.79 | 86 | 1 | 27 | 23.06 | 92 | 4 |
| 9 | 19.55 | 86 | 1 | 28 | 20.99 | 92 | 4 |
| 10 | 20.16 | 86 | 1 | 29 | 28.03 | 93 | 4 |
| 11 | 22.02 | 87 | 1 | 30 | 31.69 | 93 | 4 |
| 12 | 19.24 | 87 | 1 | 31 | 17.44 | 93 | 4 |
| 13 | 22.02 | 87 | 2 | 32 | 16.89 | 94 | 4 |
| 14 | 22.54 | 88 | 2 | 33 | 16.81 | 94 | 4 |
| 15 | 18.22 | 88 | 2 | 34 | 13.47 | 94 | 4 |
| 16 | 19.86 | 88 | 2 | 35 | 13.45 | 95 | 4 |
| 17 | 20.32 | 89 | 2 | 36 | 13.14 | 95 | 4 |
| 18 | 19.44 | 89 | 2 | 37 | 12.29 | 95 | 4 |
| 19 | 19.49 | 89 | 2 | | | | |

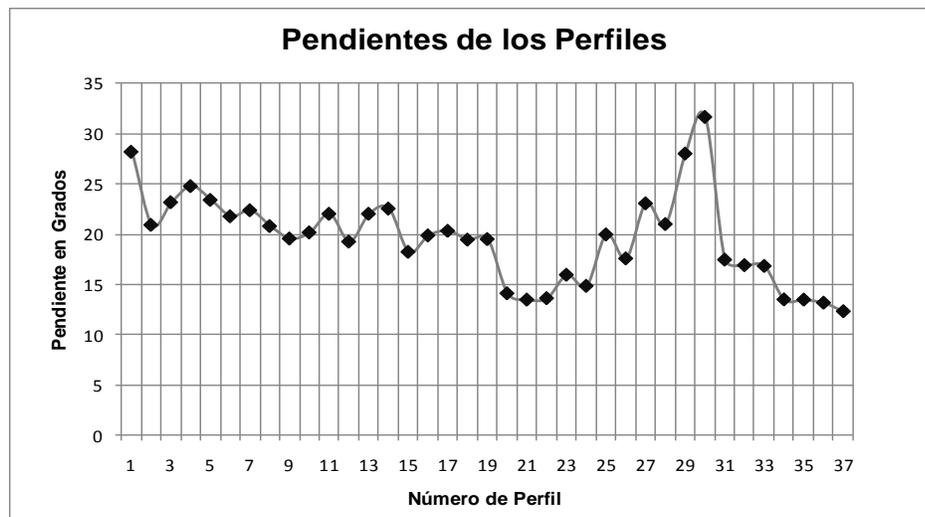


Figura 17: Representación gráfica de los valores de la pendiente de cada perfil.

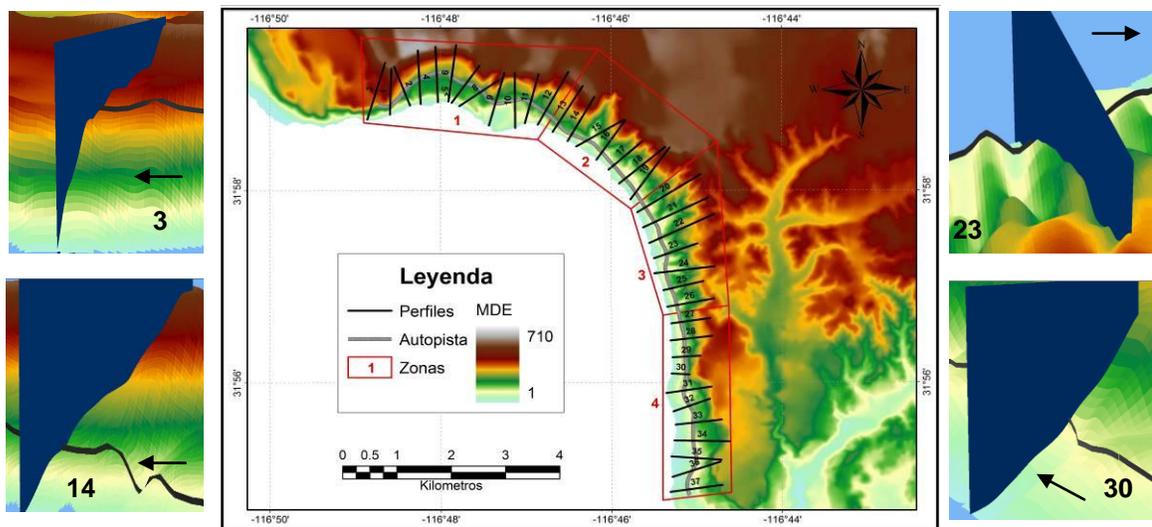


Figura 18: Mapa de Localización de los perfiles de pendientes y zonas delimitadas en el área de estudio. Las imágenes miniatura representan algunos de los perfiles que se hicieron en tercera dimensión, las flechas señalan al Norte (el resto de los perfiles se muestran en el Anexo 1).

V.4 Hidrología

V.4.1 Análisis de Hidrología Superficial

El área de estudio es pequeña, por tanto se realizaron análisis hidrológicos en escala pequeña y mediana, usando como insumos el MDE y LIDAR, para comparar resultados. A continuación se muestran los mapas elaborados y resultados obtenidos.

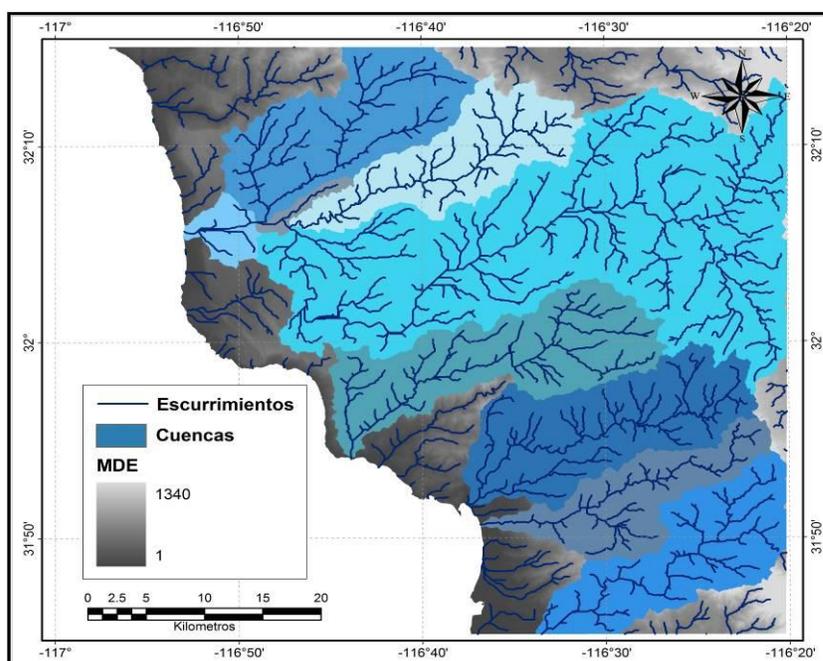


Figura 19: Mosaico del MDE de las cartas H11B11, H11B12, I11D81 e I11D82 donde se aprecian los escurrimientos creados cada 10,000 celdas, las cuencas fueron creadas cada millón de celdas (~10km²).

Una vez que se obtuvieron las corrientes superficiales, se procedió a jerarquizarlas según el método de Horton y Strahler descrito en el apartado IV.4.1, esto se hizo a mano, ya que sólo se contabilizaron los escurrimientos del área de la imagen LIDAR (marcados en azul rey en la figura 20).

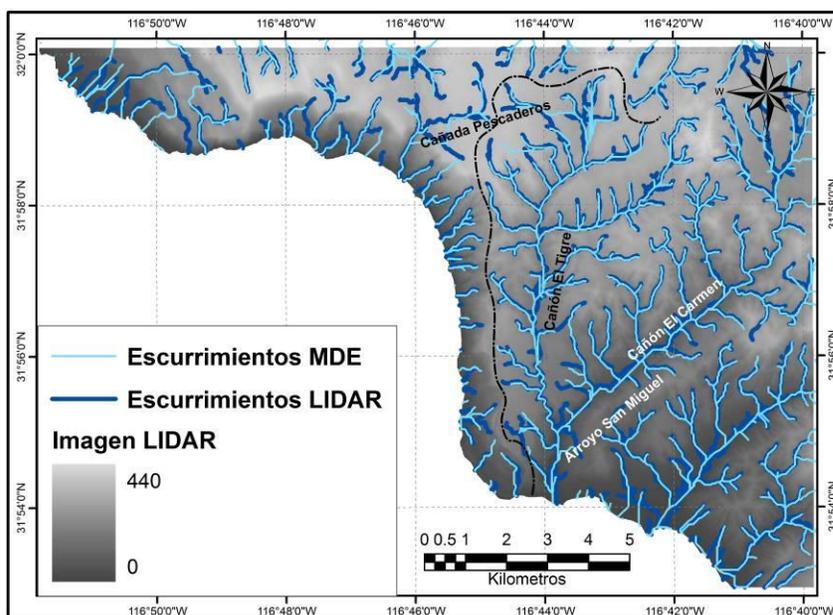


Figura 20: Escurremientos del MDE creados a partir de 1000 celdas, escurremientos de LIDAR cada 4000 celdas. La línea punteada marca el extremo oeste del parteaguas de la cuenca del arroyo San Miguel.

Tabla III: Orden y frecuencia de los escurremientos creados cada 2000 celdas, contabilizados en el área de la imagen LIDAR.

| Orden | Frecuencia |
|-------|------------|
| 1 | 561 |
| 2 | 123 |
| 3 | 18 |
| 4 | 4 |
| 5 | 1 |

El arroyo principal y de mayor extensión dentro del área es el de San Miguel, que alcanza el orden 5, sus tributarios principales vienen de cañón El Carmen y cañón El Tigre, cada uno de orden 4. En el área de la autopista, el arroyo de Cañada Pescaderos tiene orden de 3 y se considera el de mayor importancia, debido a que cuenta con mayor extensión y con más número de tributarios. El resto de los escurremientos de la autopista son de orden 1 o 2, a excepción de uno ubicado en Salsipuedes que es orden 3, como se puede apreciar también en la figura 20. El principal parteaguas o límite de cuenca se

localiza cercano al escarpe de la autopista (marcado con línea punteada en la figura 20) y esto nos indica que el agua circula directamente hacia el mar.

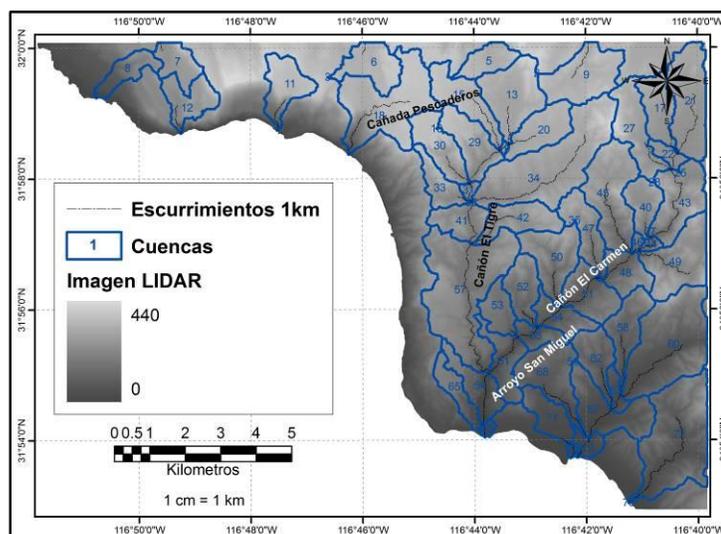


Figura 21: Escurremientos generados a partir de LIDAR con acumulación de 40,000 celdas. Para cada escurreimiento, el programa genera una microcuenca.

Con el análisis de escurreimientos, se pudo obtener el número de microcuencas y sus áreas, generados con los mismos insumos mencionados anteriormente.

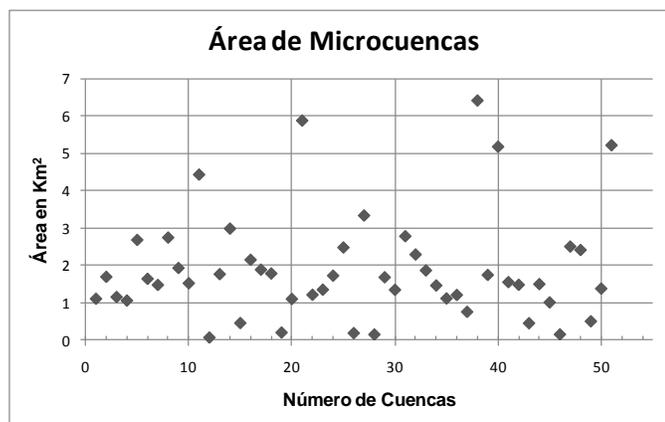


Figura 22: Gráfica dónde se muestra el comportamiento de las áreas de las microcuencas. El promedio de tamaño de cuencas es 1.88km^2 , con una desviación estándar de 1.41.

Tabla IV: Número de cuenca (mostrado en figura 21) y área correspondiente a cada una de ellas en km².

| Número | Área | Número | Área | Número | Área |
|--------|----------|--------|----------|--------|----------|
| 1 | 0.000025 | 26 | 0.000017 | 51 | 1.859663 |
| 2 | 0.000141 | 27 | 2.144493 | 52 | 1.457841 |
| 3 | 0.000139 | 28 | 0.000025 | 53 | 1.110505 |
| 4 | 0.000025 | 29 | 1.880104 | 54 | 1.2028 |
| 5 | 1.100008 | 30 | 1.778473 | 55 | 0.750524 |
| 6 | 1.688247 | 31 | 0.19804 | 56 | 0.00005 |
| 7 | 1.146671 | 32 | 0.000768 | 57 | 6.407892 |
| 8 | 1.053393 | 33 | 1.095923 | 58 | 1.738419 |
| 9 | 2.676261 | 34 | 5.871268 | 59 | 0.000016 |
| 10 | 0.000052 | 35 | 0.000017 | 60 | 5.170911 |
| 11 | 1.634855 | 36 | 0.000025 | 61 | 1.546493 |
| 12 | 1.470956 | 37 | 0.00016 | 62 | 1.474823 |
| 13 | 2.739373 | 38 | 0.000025 | 63 | 0.447723 |
| 14 | 0.000025 | 39 | 0.000025 | 64 | 1.493496 |
| 15 | 1.924393 | 40 | 1.208064 | 65 | 1.004498 |
| 16 | 0.000017 | 41 | 1.344106 | 66 | 0.147938 |
| 17 | 1.51685 | 42 | 1.719519 | 67 | 2.498527 |
| 18 | 4.424964 | 43 | 2.473984 | 68 | 2.406062 |
| 19 | 0.063311 | 44 | 0.182782 | 69 | 0.000017 |
| 20 | 1.759939 | 45 | 3.329885 | 70 | 0.498486 |
| 21 | 2.978875 | 46 | 0.145191 | 71 | 1.373682 |
| 22 | 0.451898 | 47 | 1.676922 | 72 | 5.211706 |
| 23 | 0.000025 | 48 | 1.341172 | 73 | 0.000225 |
| 24 | 0.000025 | 49 | 2.775471 | | |
| 25 | 0.000025 | 50 | 2.286452 | | |

Las cuencas más grandes son las que se encuentran en cañón El Tigre (número 57 en la figura 21), cañón El Junco (número 34), la desembocadura del arroyo Cuatro Milpas (número 72) y Cuesta Mar, ubicada sobre la carretera a San Antonio de las Minas (número 60). Las cuencas más pequeñas, de apenas algunos metros cuadrados, se eliminaron del cálculo de promedios y desviación estándar (figura 22), ya que el programa las genera debido a que se encuentran muy cercanas a un escurrimiento, pero no por esto son independientes. Se eliminaron 22 cuencas, todas ellas con áreas inferiores a 0.0007 km² (700m²).

V.4.2 Precipitación Pluvial

A continuación se muestra la gráfica de las precipitaciones ocurridas en la estación pluviométrica Olivares Mexicanos, manejada por el Servicio

Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CNA). Estos son los resultados del procesamiento y análisis de datos diarios.

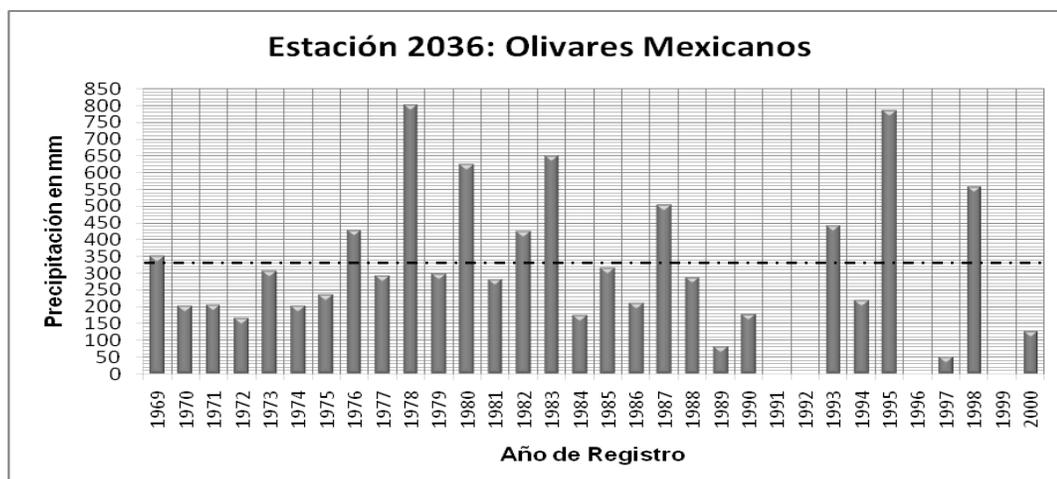


Figura 23: Registros Pluviométricos de la estación más cercana al área de estudio. En los años en que no se contaba con al menos 75% de datos, se considera que no se pudo procesar. La línea negra discontinua nos indica el promedio anual para esos años de registro (Cortesía de Moraila-Martínez, 2009).

Podemos apreciar que los años con más lluvias registradas en el área de estudio fueron 1978 (801.1mm), seguido de 1995 (786.4mm) y 1983 (651.3mm). Los años con menos precipitación fueron 1997 (con apenas 51.9mm), 1989 (82.5mm) y 2000 (128.6mm). Con estos datos se espera determinar si existe o no una relación directa entre los años de mayor precipitación con algún evento de deslizamiento importante y también si estas lluvias extraordinarias se relacionan con episodios fuertes del fenómeno meteorológico El Niño.

Cómo ejercicio de comparación y contrastación, se graficaron los datos que se tomaron directamente de la página de CNA (2000) para la estación 2036 y los resultados mensuales proporcionados por Moraila-Martínez (2009). Los datos de la página de internet de CNA son un breve resumen de las precipitaciones ocurridas de 1971 al 2000, las cuales se muestran en un acumulado mensual (figura 24). Considerando que no se sabe el tratamiento y análisis que se le dio a los datos de CNA para lograr esos resultados, se tomaron como referencia los datos proporcionados por Moraila-Martínez (2009).

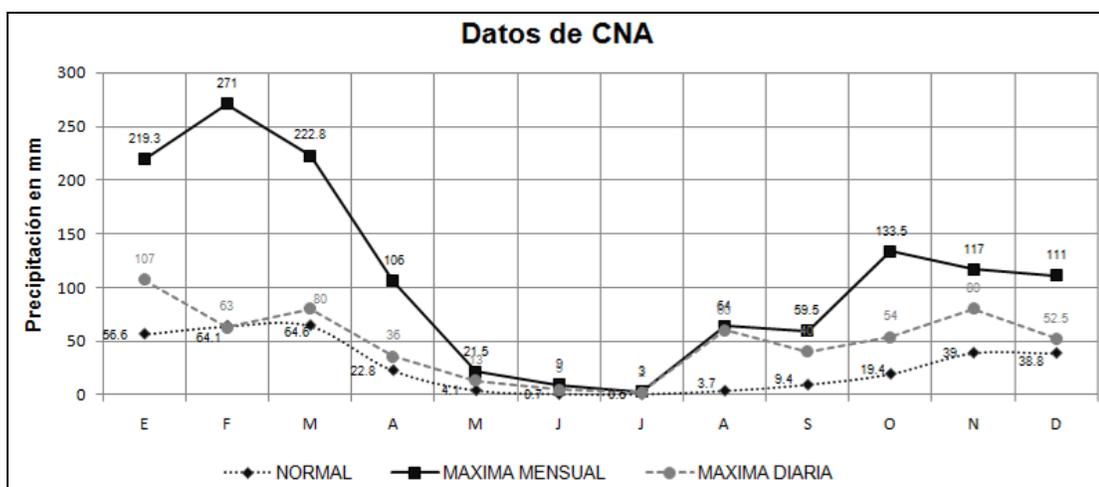


Figura 24: Representación gráfica de las tablas de datos mensuales que proporciona CNA en su página digital de las estaciones hidrometeorológicas de la República Mexicana. Acumulado mensual de 29 años de registros (1971 al 2000).

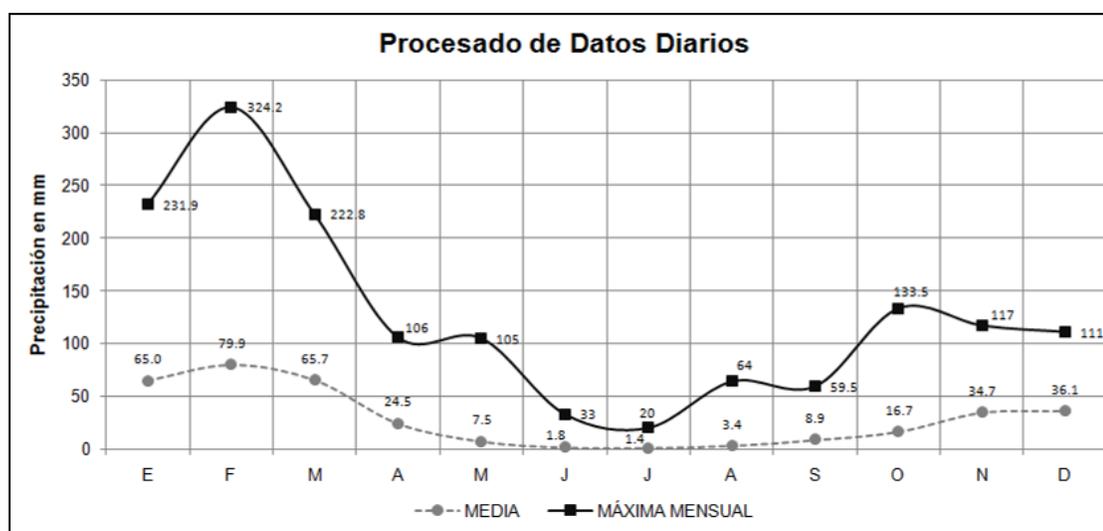


Figura 25: Representación gráfica de datos mensuales, a partir del procesado de datos diarios. Acumulado mensual de 31 años de registros (1969 al 2000).

V.5 Mapa Geológico

El presente mapa geológico se elaboró con base en la litología presentada por Cruz-Castillo y Delgado-Argote (2000), misma que coincide en su mayoría con la de Yeo (1981), por lo que se decidió tomar un perfil geológico creado por este último que cruza una parte del área de estudio (figura 27). Se marcaron

solamente las zonas de deslizamientos que GEOTEC (1987, 1992, 1994, 1995) reportó en varios años como activos, ya que sólo de ellos se midió desplazamiento en las fotografías aéreas. Las principales estructuras fueron tomadas de Cruz-Castillo y Delgado-Argote (2000) y actualizado con trabajo de campo realizado para el presente trabajo.

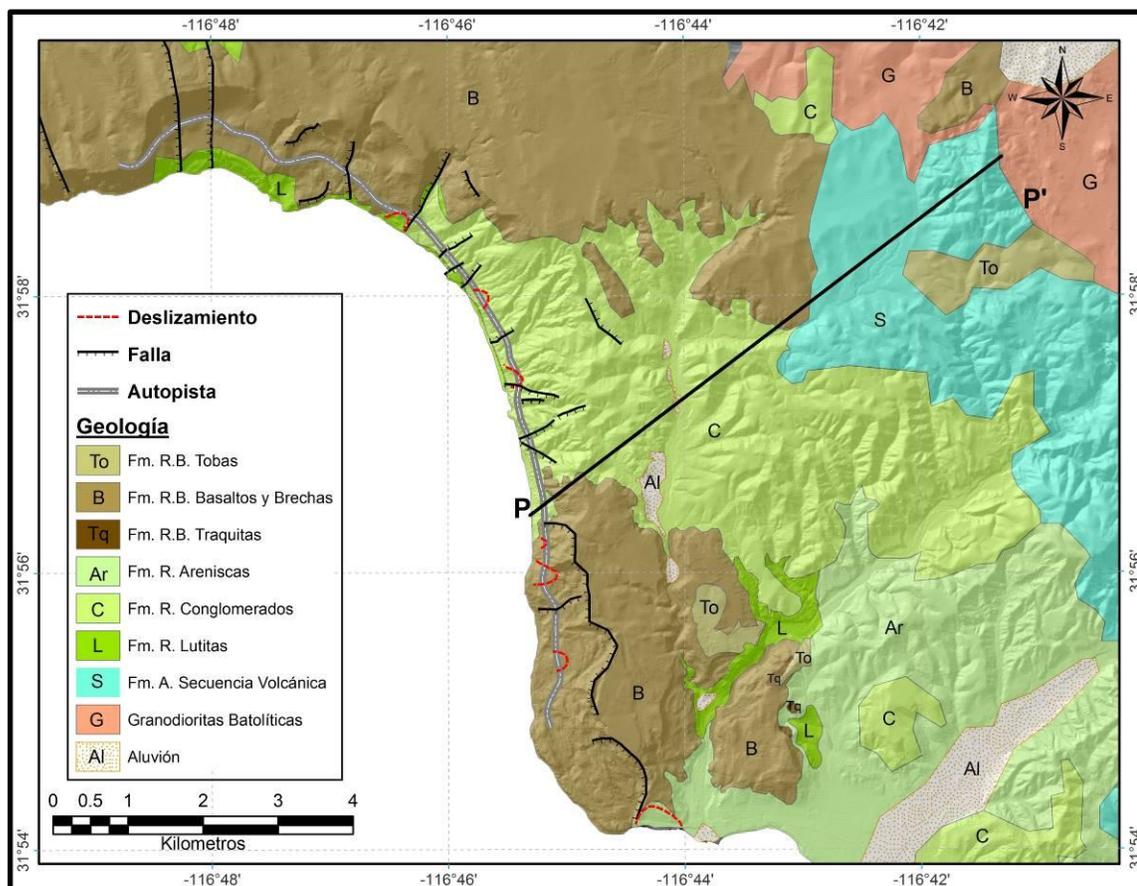


Figura 26: Mapa geológico sintetizado del área, la línea marcada con P y P' indica la ubicación del perfil de la figura 27. Fm. R.B. significa Formación Rosarito Beach, Fm. R. significa Formación Rosario y Fm. A. significa Formación Alisitos. Tomado y modificado de Gastil *et al.*, (1975), Yoe (1981), INEGI (1998) y Cruz-Castillo y Delgado-Argote (1999). El mapa posee como fondo un efecto de sombreado para representar el relieve.

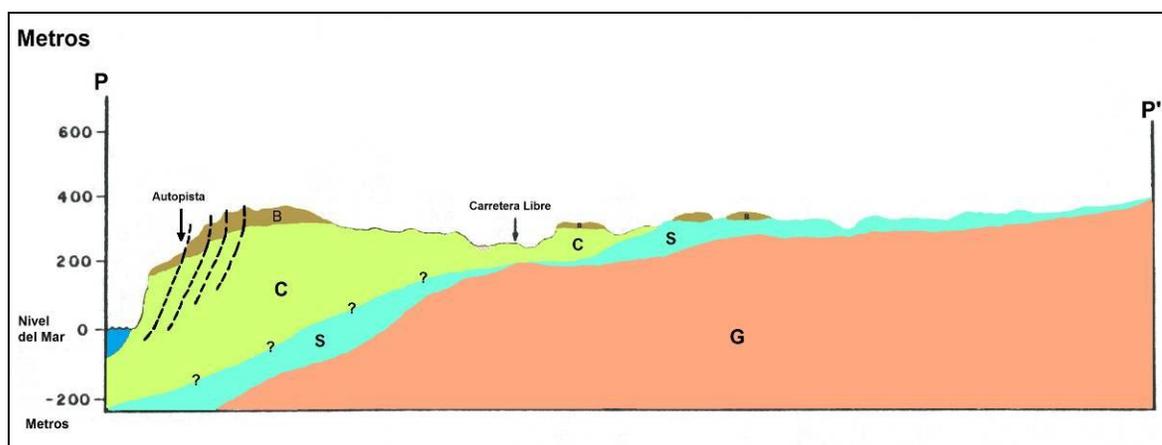


Figura 27: Perfil topográfico y geológico que muestra la litología sintetizada del área de estudio, su ubicación se muestra en la figura 25 con una línea continua. Los colores y simbología son los mismos que los del mapa geológico. Este perfil tiene una exageración vertical de 2.3x. Tomado y modificado de Yeo (1981).

En el mapa se puede apreciar que la mayoría de los contactos litológicos, las fallas y deslizamientos coinciden con cambios marcados en el relieve topográfico. Los contactos litológicos en el área representan un factor potencial de riesgo; tal es el caso del contacto entre las formaciones Rosario y Alisitos, en el que la primera se acuña contra la secuencia de volcanoclásticos de la formación Alisitos a lo largo de una pendiente muy pronunciada, lo que puede constituir zonas de debilidad por donde puede filtrarse el agua, y propiciar el movimiento de grandes masas de tierra y roca. Aunado a lo anterior existen estructuras que colaboran a generar inestabilidad al área de estudio; un claro ejemplo es el trazo de Cañada Pescaderos, donde se encontró que ésta la controla una falla normal, y a lo largo del plano de falla hay escurrimientos, principal agente que disparador de deslizamientos. Por otro lado, la presencia de arcillas expansivas, tales como esmectita, clorita y vermiculita en las rocas sedimentarias de la Fm. Rosario contribuyen a la disgregación de las mismas. Las capas de lutitas húmedas presentes en algunas áreas sirven como plano de despegue de algunos deslizamientos ya que llegan a comportarse de manera plástica (Cruz-Castillo y Delgado-Argote, 1999). Las rocas sedimentarias de la Fm. Rosario presentes en el

área no son consolidadas en su mayoría, por tanto, es más fácil su meteorización y erosión (Yeo, 1981).

En la figura 27 se puede apreciar que los estratos están inclinados hacia el oeste, en dirección al mar, desde la secuencia volcánica de la Fm. Alisitos, hasta los basaltos y brechas de la Fm. Rosarito Beach, lo cual sirve como superficie de despegue a los deslizamientos. Es importante apreciar que una extensa capa de basaltos y brechas sobreyace a los sedimentos marinos poco consolidados de la Fm. Rosario, lo cual implica un peso adicional a la columna litológica que ya de por sí es inestable.

V.6 Imágenes Aéreas

Las primeras fotografías aéreas en ser georreferidas fueron las del año 1990 (figura 30), ya que las ortofotos son del año 1993 y se consideró que por ser un lapso de tiempo corto se podrían identificar rasgos más fácilmente. Al momento de realizar la georreferenciación, se observó que el tamaño de celda de las ortofotos variaba considerablemente entre una y otra, por tanto fue necesario obtener un promedio de su tamaño, lo cual se logró midiendo cada celda que ya había sido anclada a las fotografías aéreas de 1993. En total se midieron 213 celdas y el tamaño promediado resultó en 2.66 metros de ancho y 3.09 metros de alto.

Tabla V: Se muestra el tamaño promedio de celdas de las ortofotos digitales en latitud y longitud. También se proporciona la desviación estándar y el número de celdas medidas en cada una de las zonas (mostradas en la figura 18).

| | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| X (metros) | 2.63 | 2.66 | 2.68 | 2.68 |
| Desv. Est. | 0.17 | 0.19 | 0.25 | 0.25 |
| Y (metros) | 3.08 | 3.13 | 3.07 | 3.09 |
| Desv. Est. | 0.20 | 0.24 | 0.22 | 0.32 |
| Celdas Medidas | 63 | 70 | 32 | 48 |

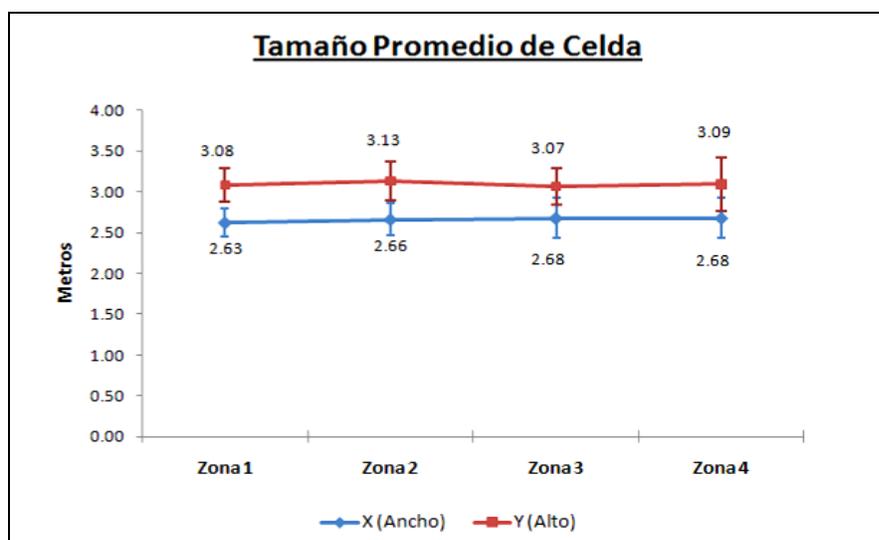


Figura 28: Representación gráfica del tamaño promedio de celdas. La desviación estándar es el error que se deberá tener en cuenta en lo sucesivo en todas las mediciones hechas en las fotografías aéreas.

De acuerdo a la gráfica anterior, el error máximo manejado es de ± 0.32 metros, por tanto, si alguno de los valores de las mediciones es inferior a este valor no se le debe tomar en consideración. En la figura 29 se muestra de manera generalizada en dónde se realizaron las mediciones de los casos en que los deslizamientos fueron medidos en varias de sus partes y cómo se le nombra a cada una de ellas, a excepción del km 91+300 para el lapso de 1990 a 2006.

Las figuras 30, 31 y 33 muestran los mosaicos que se produjeron de cada juego de fotografías, en las cuales, las mediciones de desplazamiento se hicieron en los sitios indicados en los reportes de GEOTEC como activos y aparecen en las imágenes con líneas rojas y el número del km como referencia.

En el deslizamiento del km 88+300 se realizaron tres mediciones; la medición que se localiza en el noroeste se le llama también km 88+300, la medición de la parte central del deslizamiento se le denomina km 88+400 y la del sureste es nombrada también km 88+500. Es el mismo caso para el km 91+300, en donde, para el periodo de 1973 a 1990, se le nombra a la parte noroeste km 91+200, la parte central es también km 91+300 y la sección sureste de igual forma

se le llama km 91+400. Para el tramo del km 95+100, el deslizamiento se dividió en dos partes, a la noroeste se le nombra 94+950 y a la sureste se le designa 95+130.

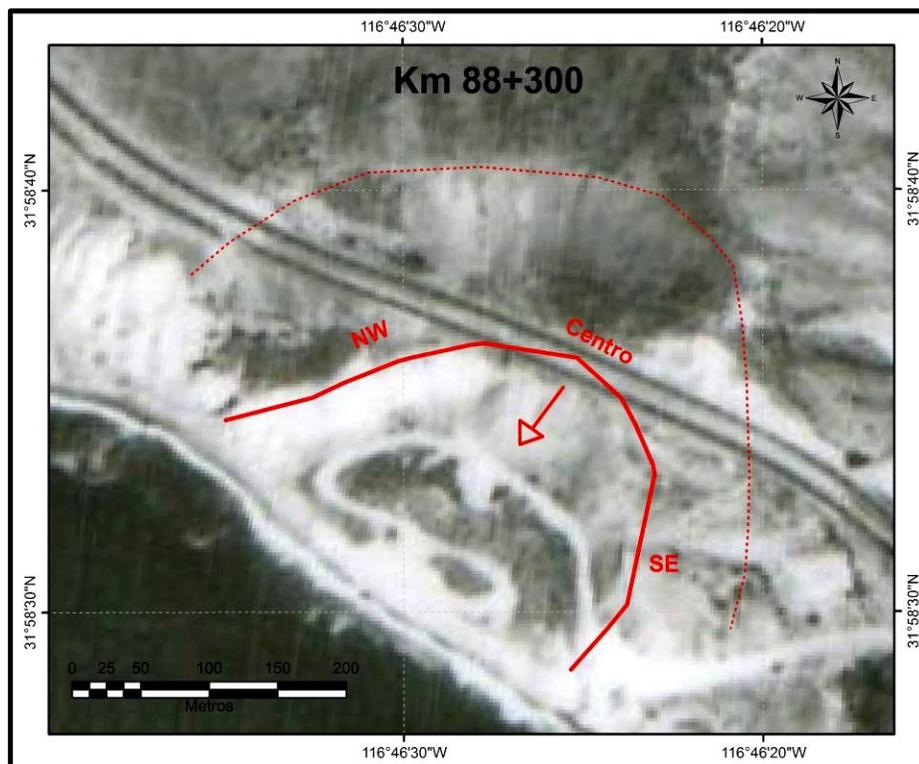


Figura 29: Ejemplo del caso en el que las mediciones de desplazamiento fueron hechas en varias partes de los deslizamientos. La flecha señala la dirección de movimiento principal. La línea roja continua señala el deslizamiento principal, la línea punteada marca el área de influencia del deslizamiento principal.

Una vez realizadas las mediciones y comparaciones entre las ortofotos y las fotografías aéreas de 1990, no se logró apreciar desplazamientos, esto debido probablemente a la resolución a la cual se está trabajando y al error que se está manejando.

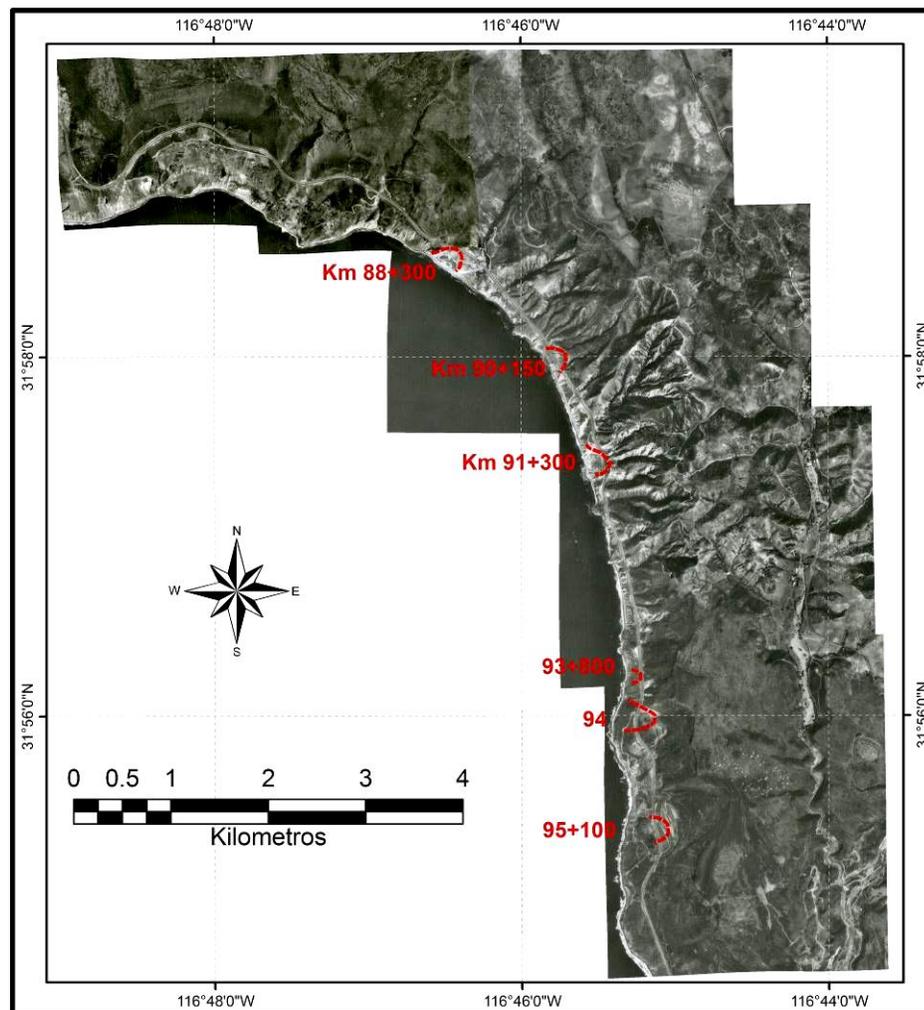


Figura 30: Mosaico de recortes de las fotografías aéreas de 1990. Las líneas rojas discontinuas representan las zonas de deslizamientos con mayor movimiento y a las que se les midió su desplazamiento.

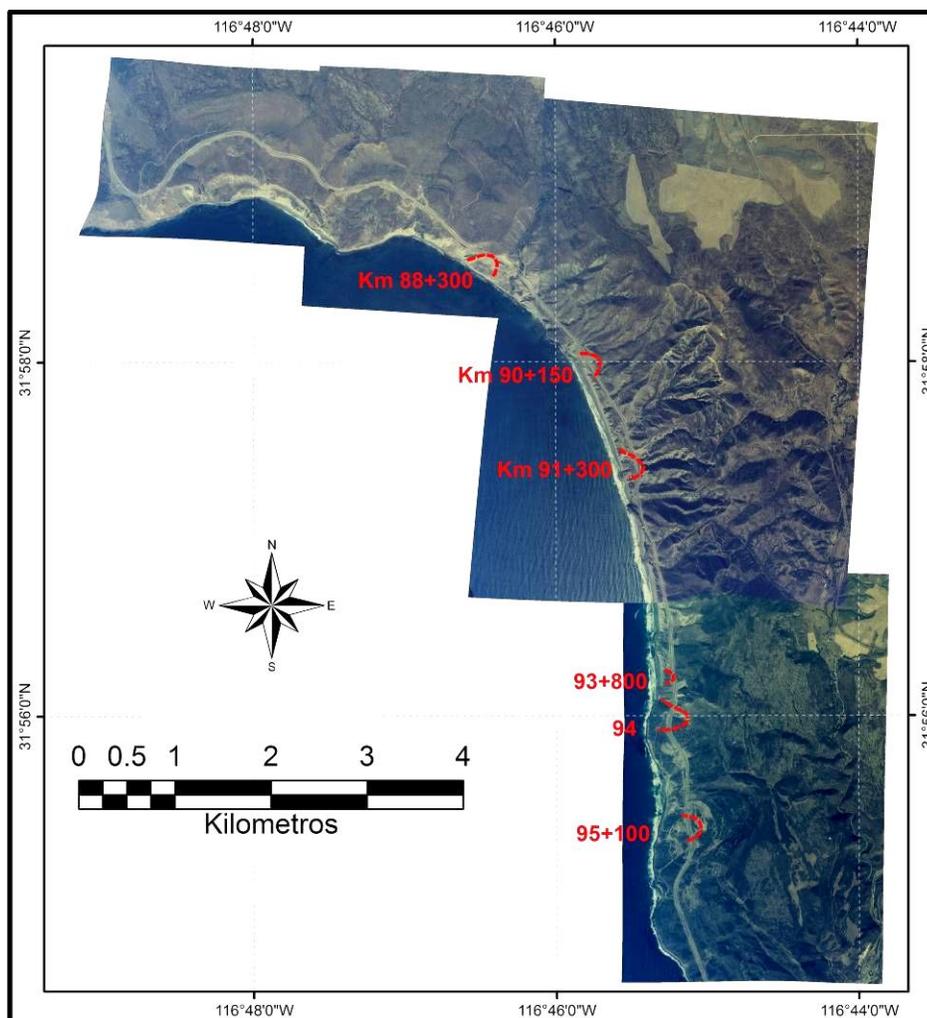


Figura 31: Mosaico de recortes de las fotografías aéreas de 1973. Las líneas rojas discontinuas representan las zonas de deslizamientos con mayor movimiento y a las que se les midió su desplazamiento.

Las primeras mediciones en las que se pudieron apreciar y registrar desplazamientos fueron entre las fotografías aéreas de 1973 y 1990. En el km 88+300 se tomaron mediciones de tres partes de ese deslizamiento activo, en la parte noroeste del deslizamiento se contabilizaron 12.59 metros de desplazamiento en la horizontal y 5.2 metros en la vertical; la parte central del deslizamiento presentó 3.23 metros de desplazamiento horizontal y 0.23 metros de desplazamiento en la vertical; la parte sureste del deslizamiento registró un cambio de 10.58 metros en la horizontal y 11.5 metros en la vertical. En la parte

central del deslizamiento del km 90+150 se midieron 6.78 metros de desplazamiento horizontal. En el deslizamiento del km 91+300 se midió desplazamiento en tres secciones, la primera de ellas al noroeste presentó 5.40 metros en la horizontal y 0.96 metros en la vertical; en la sección central se registró 0.79 metros de movimiento horizontal y; en la parte sureste se contabilizaron 5.82 metros de desplazamiento horizontal y 1.87 metros en el plano vertical. Para el deslizamiento del km 93+800, en la parte de la cabecera se registraron 5.24 metros de desplazamiento horizontal y 1.02 metros en la vertical. En el km 94 se midió 1.62 metros de desplazamiento horizontal en la parte central del deslizamiento. Para el deslizamiento ubicado en el km 95+100, se tomaron mediciones de los dos extremos del mismo, la parte noroeste se desplazó 4.8 metros en la horizontal y la parte sureste se movió 6.83 metros en el plano horizontal y 1.21 metros en la vertical.

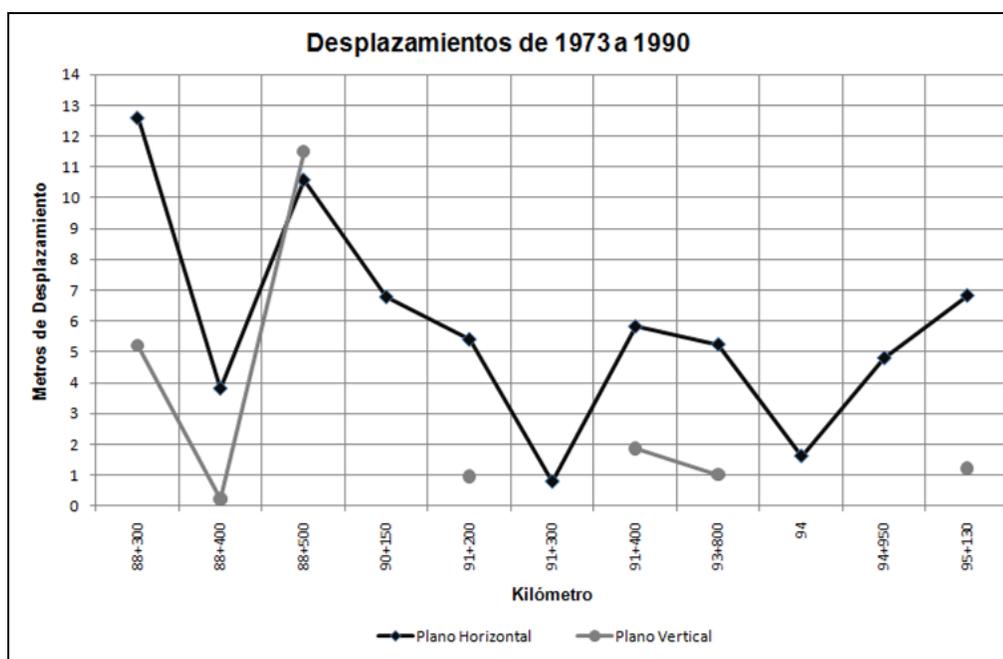


Figura 32: Representación gráfica de los resultados de las mediciones de desplazamientos entre las fotografías de 1973 y 1990. Se omiten algunos datos de mediciones en el plano vertical debido a que la resolución de LIDAR no permitió observar cambios.

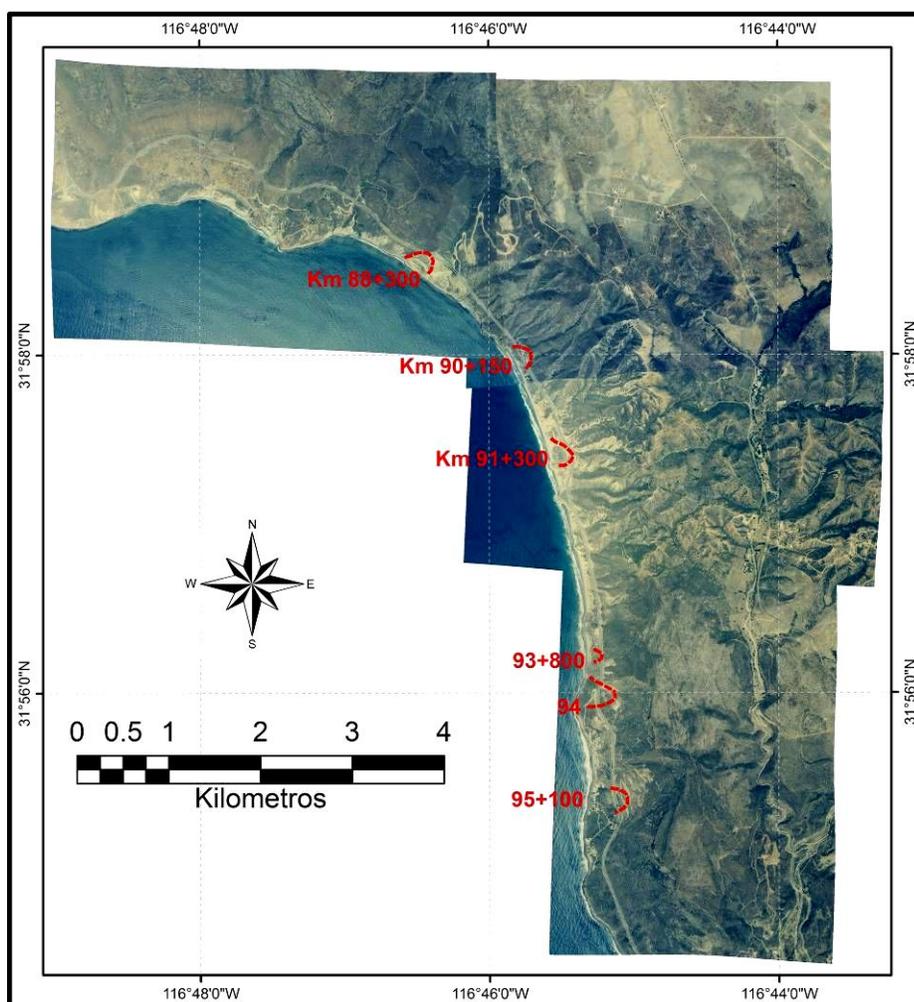


Figura 33: Mosaico de recortes de las fotografías aéreas del 2006. Las líneas rojas discontinuas representan las zonas de deslizamientos con mayor movimiento y a las que se les midió su desplazamiento.

Para estas mediciones se tomaron en cuenta los mismos puntos de medición que para las fotografías anteriores. En el km 88, la parte noroeste registró 8.2 metros de desplazamiento horizontal y 5.32 metros en vertical; la parte central presentó 10.84 metros de movimiento horizontal y 6.03 metros en el plano vertical; al sureste de este mismo deslizamiento se contabilizaron 24.91 metros de desplazamiento horizontal y 11.72 metros en la vertical. Del km 90+150 sólo se pudo registrar cambio en el plano horizontal y fue de 0.72 metros. En el km 91 hubo un cambio en el trazo de la autopista en el año 1997 y, para este kilómetro

en particular, las mediciones registradas en este apartado se dirigen a esos cambios efectuados en la carretera (figura 34); en la parte norte del deslizamiento se midió un cambio en el trazo de la carretera de 24.25 metros horizontales y 14.1 metros verticales; para la parte central se registraron 39.54 metros de variación horizontal hacia el este y se elevó 20.53 metros el trazo de la autopista; en la parte sur se contabilizaron 28.48 metros de variación horizontal también hacia el este, mientras que el cambio vertical fue de 0.83 metros. En el km 94, el desplazamiento fue casi imperceptible, pues solamente se registraron 0.83 metros de movimiento en el plano horizontal. El tramo del km 95+100 que se encuentra al noroeste se desplazó 3.72 metros en la horizontal y 0.44 metros en la vertical; la parte que se localiza al sureste sufrió 1.39 metros de desplazamiento horizontal y 1.33 metros en el plano vertical.

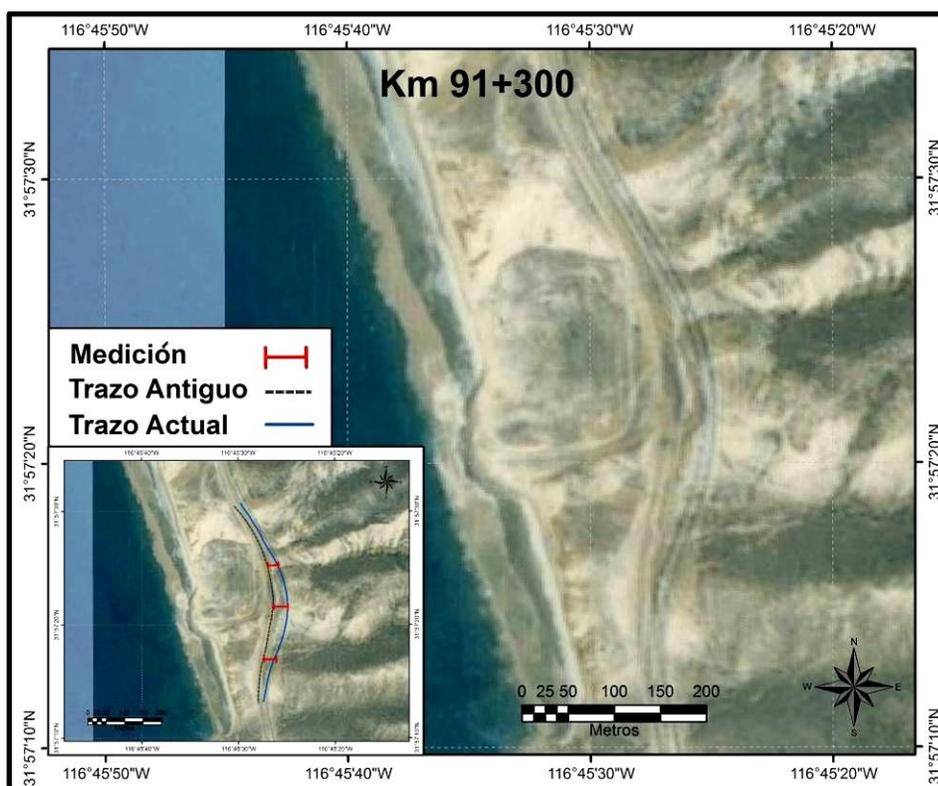


Figura 34: Fotografía de 1990 debajo de una del 2006 con transparencia de 40% para apreciar los cambios realizados en el trazo de la autopista en el km 91+300. El mapa miniatura muestra los lugares en lo que se hicieron mediciones de desplazamiento.

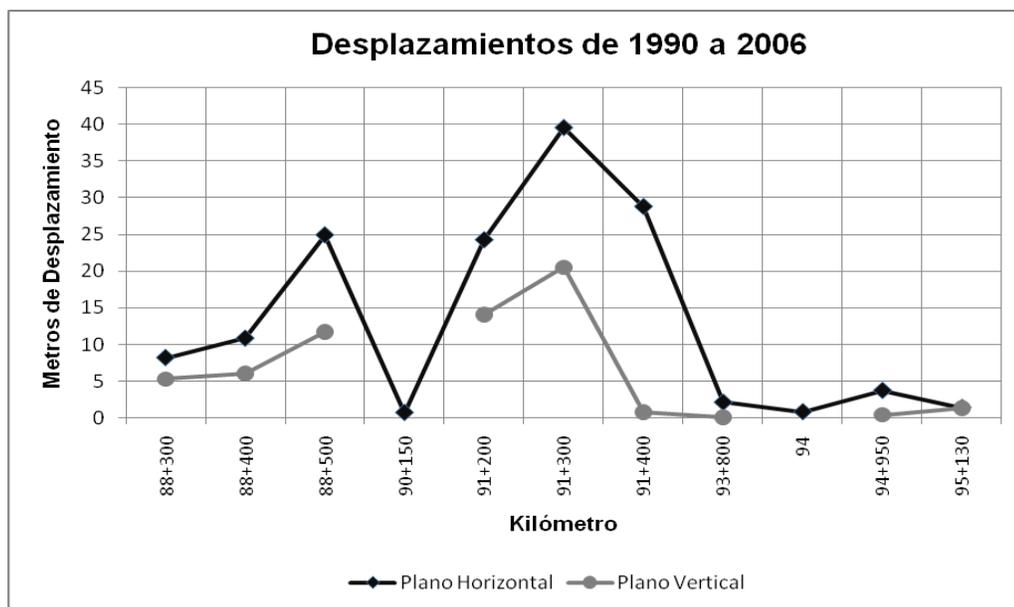


Figura 35: Representación gráfica de los resultados de las mediciones de desplazamientos entre las fotografías de 1990 y 2006. Se omiten algunos datos de mediciones en el plano vertical debido a que la resolución de LIDAR no permitió observar cambios.

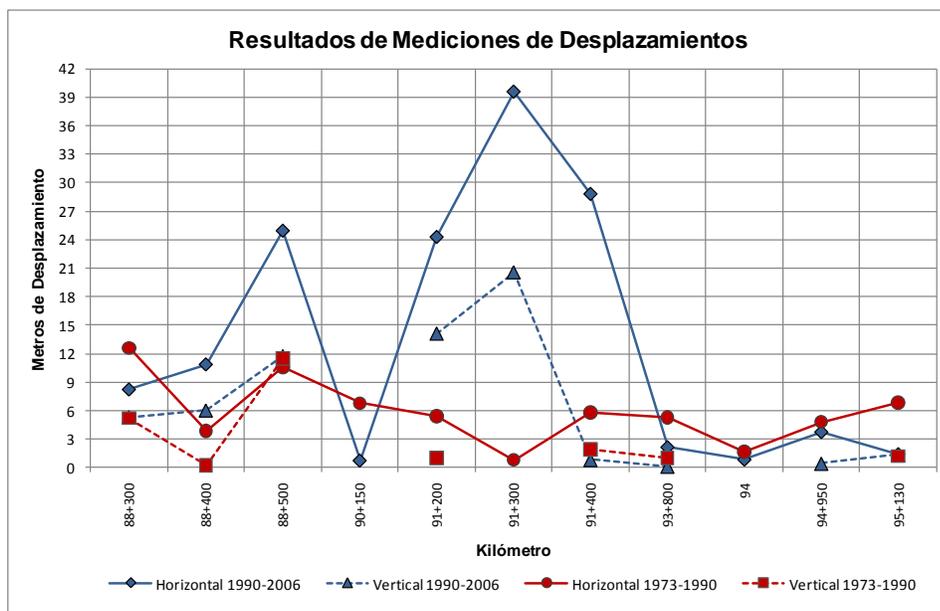


Figura 36: Gráfica que muestra el total de las mediciones realizadas en varios desplazamientos activos de la autopista.

V.7 Altimetría y Nivelación

V.7.1 Altímetro Barométrico

Se obtuvieron los datos de alturas de los tres puntos medidos al borde de la carretera. En el primero de ellos (km 96) se instaló un barologger (marca Solinst modelo 3001) que tomó datos de temperatura y presión cada 30 segundos, los cuales sirvieron para posteriormente realizar las correcciones para presión y temperatura durante el periodo de mediciones.

En el punto 2 (km 91) se registró un aumento de la elevación, es decir, del dato de altura que se nos había proporcionado de 65.048msnm, aumentó a 73.118msnm y el punto 3 (km 88) igualmente registró un aumento de la elevación, pasando de 109.606msnm a 128.076msnm. Esto es contrario a lo que se esperaba, ya que estos puntos de control se encuentran en las coronas de los deslizamientos, las cuales siempre se mueven hacia abajo (figura 2); la parte de los deslizamientos que sí podría registrar aumento en la elevación sería el pie, por que en ocasiones es empujado hacia arriba, pero los puntos de control no están ubicados en estas partes.

Para este trabajo, estos aumentos de elevación se atribuyen a la constante remoción y reubicación de los puntos de control de CAPUFE, ya que, posterior a la toma de mediciones, se le preguntó a la persona que había proporcionado la información de estos puntos si existía la certidumbre de que el punto no hubiera sido reubicado debido a las constantes re-encarpetadas con asfalto y reparaciones a la autopista, esta persona no tenía la certeza de que la altura proporcionada fuera la del punto donde actualmente se encuentra. Por tanto, los datos del altímetro no fueron usados, y sólo han servido para darse cuenta que los puntos de control de CAPUFE deben ser usados con mucha precaución debido a que son reubicados o removidos constantemente.

V.7.2 Nivelación Topográfica con Estación Total

De acuerdo al perfil elaborado según la cota de nivel del banco de INEGI (30.721msnm) se obtuvo que el punto de control 2 (proporcionado por CAPUFE) tenía una altura de 23.95msnm, lo cual es erróneo debido a que nos ubicamos en un cantil de más de 50 metros de altura. De acuerdo al perfil elaborado en esta tesis, y teniendo como referencia el punto de control proporcionado por CAPUFE, el banco de nivel tiene una altura de 71.819msnm.

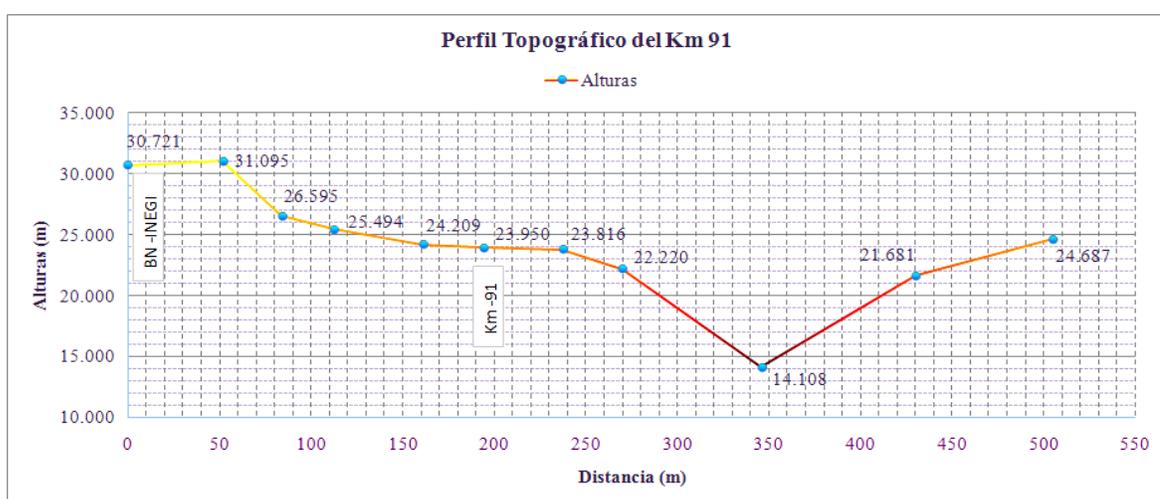


Figura 37: Perfil topográfico basado en el banco de nivel de INEGI con cota de 30.721msnm.

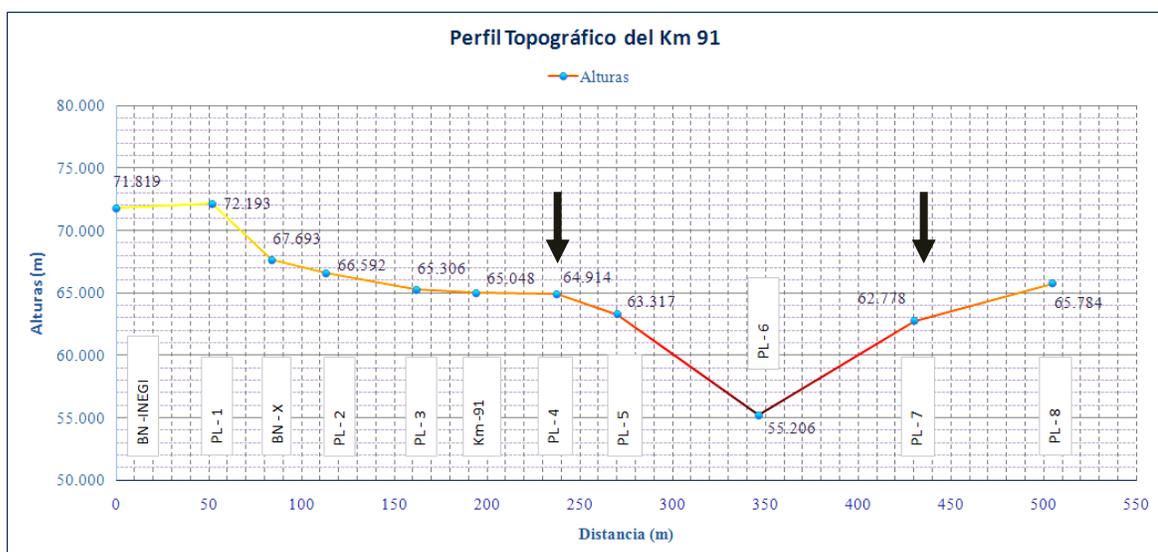


Figura 38: Perfil topográfico basado en el punto de control proporcionado por CAPUFE con cota de 65.048msnm, marcado como Km-91. Las flechas negras indican el tramo que abarca el perfil de la figura 39.

Estos perfiles pueden ser comparados con los elaborados por GEOTEC (1995) para esta misma área (figura 39), y se puede apreciar que la zona continúa presentando desplazamientos. La evidencia más clara es que GEOTEC reportó desplazamientos en la vertical de más de 3.5 metros en 6 años, y a partir del año 1995 a la fecha con este levantamiento topográfico se encontró que existen más de 7 metros aparte de los reportados por GEOTEC.

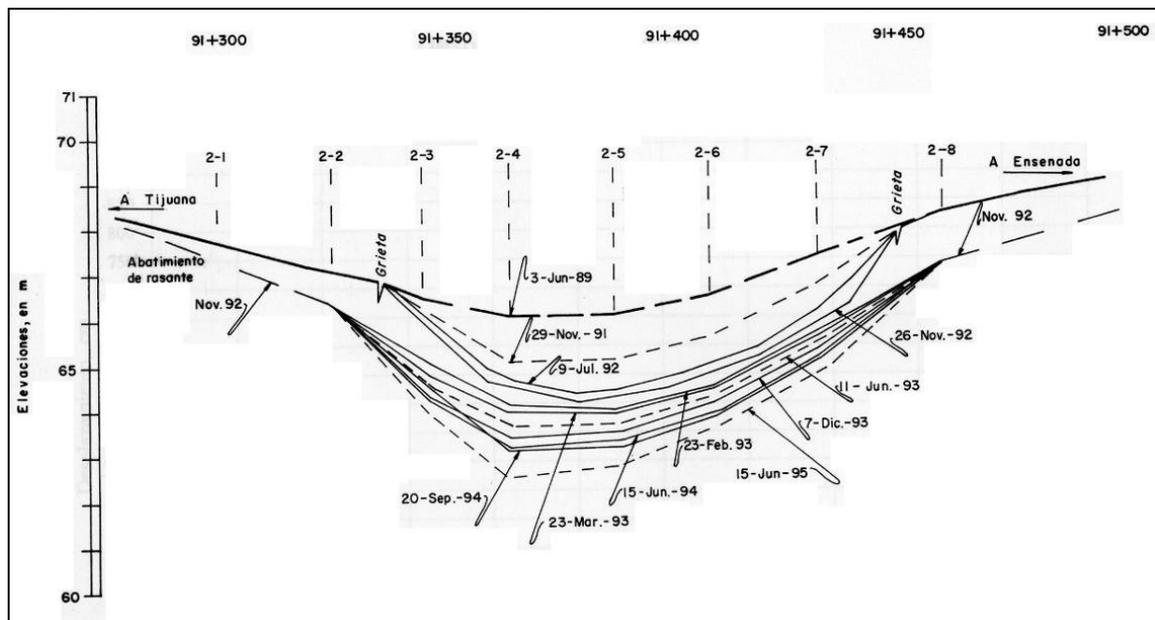


Figura 39: Perfil del km 91, en el cual se aprecian los desplazamientos sufridos en el plano vertical, la última medición fue en junio de 1995. Elaborado por GEOTEC, 1995.

V.8 Trabajo de Campo

En la figura 40 se muestra la localización de los principales puntos donde se observaron fracturas y fallas en o cerca de la autopista. En todos los sitios se tomaron fotografías y en la mayoría de ellos se tomaron datos del rumbo.

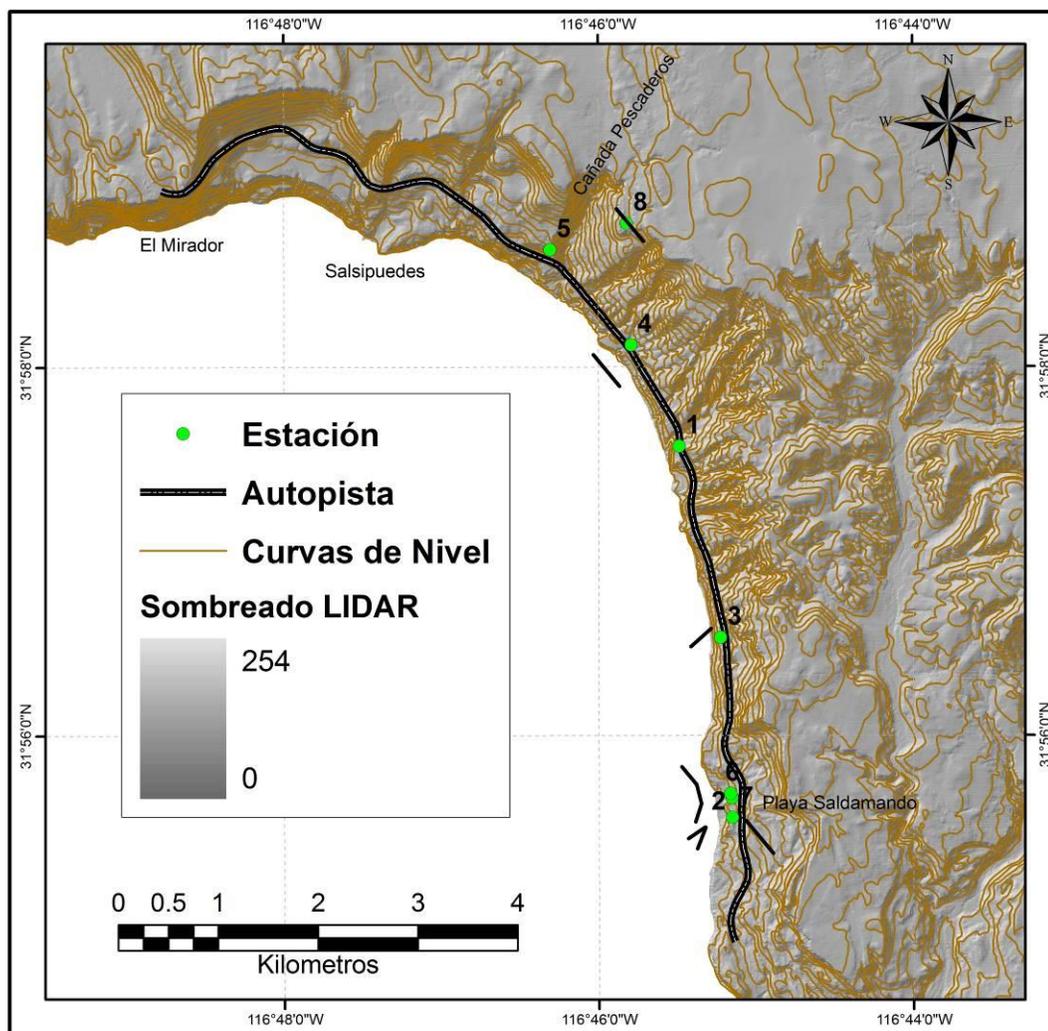


Figura 40: Resultados de las observaciones de campo de los puntos en los cuales se observaron grietas o fallas y se tomaron, en la mayoría de los casos, datos geométricos. Las líneas negras indican el rumbo de estos datos. Equidistancia entre curvas de nivel: 20 metros.

El punto 1 se localiza en el km 90+900, en este lugar se aprecian grietas en los dos cuerpos de la autopista, su rumbo es (aproximadamente) de 310° y es la parte noroeste del deslizamiento del km 91 (figura 41).

Los puntos 2, 6 y 7 se ubican muy cercanos entre sí, en el km 94+400, en donde el desnivel que se ha generado en la autopista es muy pronunciado (figura 42). Esta parte de la autopista es reparada y reencarpetada constantemente en temporada de lluvias debido a que las grietas aumentan considerablemente sus

dimensiones en estos periodos. El rumbo principal de las grietas del punto 2 es de 320° ; el punto 6 se compone de tres partes, que tienen 340° , 350° y 10° de rumbo respectivamente y; en el punto 7 se encontraron dos rumbos, que tienen 230° y 190° cada una.



Figura 41: Fotografías tomadas en el km 90+900 el 20 de enero de 2010 después de lluvias intensas ocurridas en la región. a) Grieta en el cuerpo A de la autopista, la línea roja marca su trazo. b) Grietas en el cuerpo B de la autopista. c) Fractura en el muro de contención en el lado este del cuerpo B de la autopista.

El punto 3 se encuentra en el km 92+900 y en este sitio también se encontraron grietas con rumbo de 45° que atraviesan la autopista en los dos cuerpos. Estas grietas tienen evidencia de reparaciones recientes.

En el km 89+800 se localiza el punto 4, donde se detectaron algunas grietas en la autopista, pero principalmente se identificó que también en esta área había sido cambiada una parte del trazo de la carpeta asfáltica (figura 43).

El punto 5 se localiza en el km 88+500. Esta área es la parte sur del deslizamiento y se identificaron grietas que atraviesan ambos cuerpos de la autopista (figura 44 a). En este lugar fue donde se tomaron datos con el altímetro barométrico y también se hicieron mediciones en las fotografías aéreas, ya que

muy cerca se encuentra “Destino”, que es un desarrollo turístico que se localiza en la parte baja de Cañada Pescadero (figura 44 b).



Figura 42: Fotografías tomadas en el km 94+200 el 20 de enero de 2010 después de lluvias intensas ocurridas en la región. a) Grietas en el cuerpo A de la carretera, la línea roja continua marca el trazo de la principal, la línea roja discontinua marca el trazo de otra que tiene el mismo rumbo. b) Grieta en el cuerpo B de la carretera, la cual produce un desnivel muy notorio.



Figura 43: Fotografía tomada el 20 de enero de 2010 en el km 89+800. La letra A indica el cuerpo de la autopista que va hacia Ensenada, la letra B señala el cuerpo que va hacia Tijuana. Se aprecia claramente, en el centro de la imagen, el trazo de carretera abandonado.

El punto 8 se localiza al sureste de Cañada Pescadero. En esta zona se encontró una terraza que estaba fallada; se ubicaron dos fallas normales, la principal tiene rumbo de 340° y un echado de $78^\circ W$, con una longitud de aproximadamente 90 metros y 2.5 de altura (figura 45); la segunda tiene rumbo de 330° y echado de $70^\circ W$, longitud de 60 metros y altura de 1.8 metros.

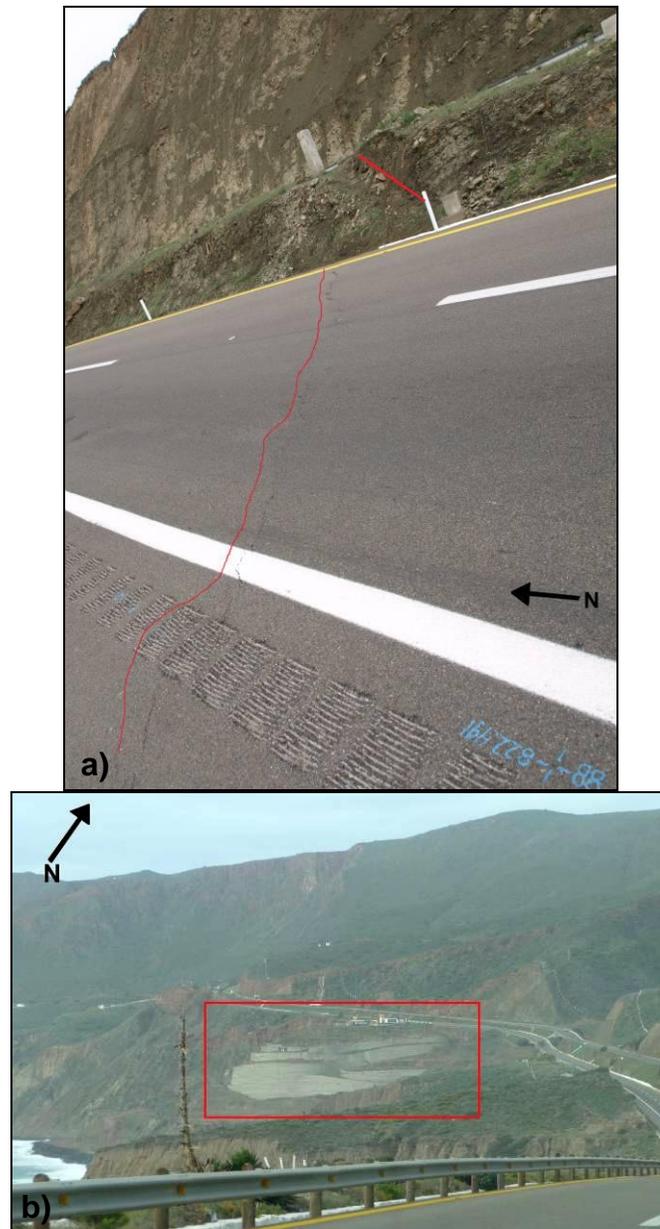


Figura 44: Fotografías tomadas el 20 de enero de 2010. a) Grieta principal del km 88+800, a la derecha de la línea roja sobre la carretera se muestra el trazo de ésta; la línea roja en la parte superior marca una falla. b) Vista panorámica de una fracción de la zona de estudio, el recuadro rojo marca la ubicación de “Destino”.

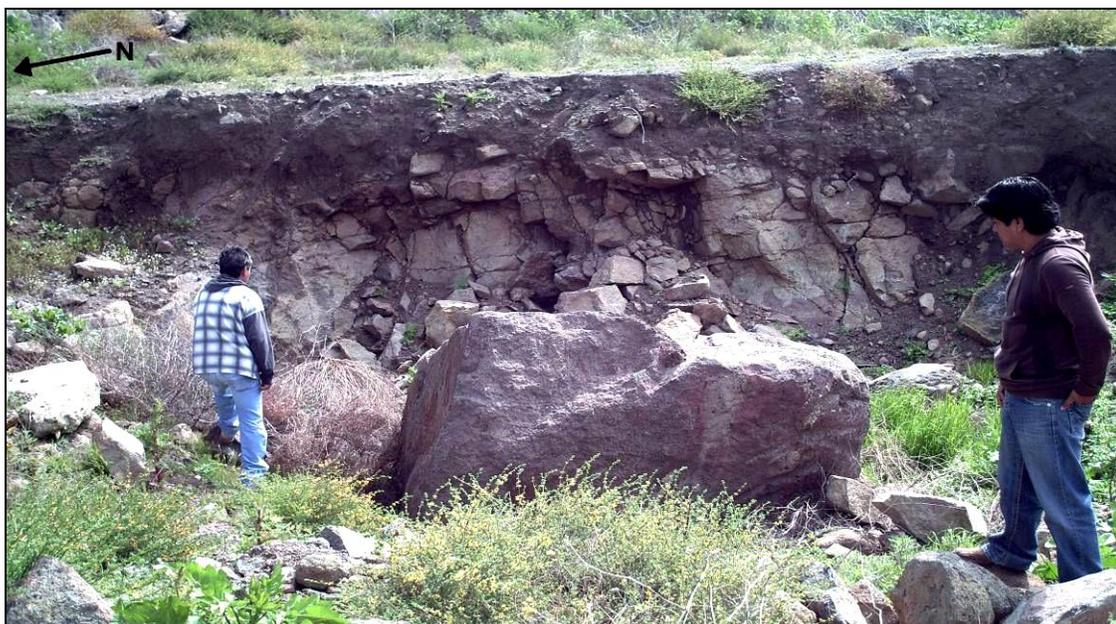


Figura 45: Plano de falla de la falla principal localizada al sureste de Cañada Pescaderos, marcada con el número 8 en la figura 40.

VI. DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados, se ha determinado que la zona sigue siendo inestable y continua habiendo movimientos de masas, a pesar de los trabajos de estabilización realizados por personal y directivos de CAPUFE encargados de esta autopista. Esto se debe a que tenemos factores muy importantes como el tipo de rocas poco consolidadas, altas pendientes, escurrimientos superficiales que fluyen directamente al mar y la actividad antropogénica.

El MDE producido a partir de los datos vectoriales de INEGI no fue usado en este trabajo para hacer mediciones en el plano vertical, a pesar de que se invirtió mucho tiempo en hacer coincidir los límites de las cuatro cartas y posteriormente en ubicarlas con la mayor precisión posible. Según Stolz y Huggel (2008), al usar un MDE de alta resolución se puede llegar a determinar las áreas más propensas a sufrir movimientos de masas con mayor precisión, por eso se trató de adquirir un modelo de alta resolución (de 1 o 2 metros por celda), pues con ello los resultados en las mediciones y en la visualización en tercera dimensión hubieran sido más exactos y confiables, pero no fue posible conseguirlo. A falta de ese recurso, se optó por usar LIDAR para las mediciones en el plano vertical porque es más reciente, tiene mayor resolución y precisión en la ubicación, en comparación con el MDE creado con las curvas de nivel. Sin embargo, la falta de un MDE de alta resolución se reflejó en que los resultados de las mediciones hechas con LIDAR no coinciden con algunas de las mediciones realizadas en campo por GEOTEC (1987; 1992; 1994; 1995), pues ellos reportaron que para la mayoría de los deslizamientos activos, los desplazamientos en el plano horizontal son menores que los del plano vertical, contrario a lo que se obtuvo con el método aquí empleado. También se observó que los resultados de los otros procesados del MDE y LIDAR varían bastante, por ejemplo, en el mapa de pendientes de la figura 14 podemos apreciar que el grado máximo de

inclinación de la pendiente en el MDE es de 58°, mientras que en LIDAR es de 82°.

El MDE en tercera dimensión fue una herramienta que contribuyó a visualizar rasgos del terreno con mayor facilidad, sin embargo, se podía haber explotado todo su potencial si se hubiera contado con un MDE de alta resolución, que permitiera determinar y puntualizar deformaciones a micro escala.

Las pendientes de los perfiles basados en el MDE en tercera dimensión (figura 17) no son iguales, y por lo mismo hay que tratarlos en forma independiente, aunque sean lugares contiguos. Enfocándonos en casos específicos, podemos apreciar que según el mapa de pendientes (figura 14), la zona del km 93-94 tiene pendientes muy pronunciadas, contrario a lo que se aprecia en los perfiles, esto se debe a que los perfiles sólo toman como referencia la altura cero (o nivel del mar) y su contraparte en el cantil, por tanto, se subestima lo que sucede entre esos dos puntos. Para evitar este inconveniente, se elaboraron las imágenes de los perfiles en tercera dimensión, porque con ello se puede apreciar el relieve en la línea del perfil (Anexo1).

Rico-Rodríguez *et al.*, (1975) y Geotec (1987; 1994) aseguran que los desplazamientos de la zona de estudio aceleran su velocidad después de la temporada de lluvias, debido al flujo subterráneo del agua y la gradual saturación de los suelos de la vecindad de las superficies de falla, esto se refleja principalmente en los meses de marzo y abril, cuando las tasas de desplazamiento reportadas aumentan considerablemente su magnitud. En el presente trabajo, se intentó probar si existía una relación directa entre los años lluviosos y eventos de deslizamientos significativos, sin embargo, esta determinación fue muy difícil debido a que no se cuenta con un registro formal y preciso de los movimientos de masas presentados en la autopista y las secuencias fotográficas con las que se laboró no permiten identificar eventos puntuales, ya que los intervalos de tiempo entre ellas es de 16 a 17 años. Los reportes que elaboraba GEOTEC son una herramienta práctica para ayudar a relacionar años lluviosos con grandes tasas de

desplazamiento en la autopista, sin embargo, dejaron de realizarse en el año de 1995 por falta de recursos humanos y económicos.

Algunos años con lluvias abundantes para la región no se pudieron llegar a correlacionar con algún deslizamiento significativo y esto se puede deber a que se realizaron obras de mantenimiento y reparaciones mayores a la autopista en años previos. Un ejemplo sería que en 1976 ocurrió un deslizamiento importante en la autopista y éste requirió de fuertes reparaciones, por tanto, para el año de 1978 (que ha sido el más lluvioso registrado en la estación #2036) el área estaba recién restaurada y no hubo deslizamientos representativos. Lo mismo para el km 91+300, para el cual se cambió el trazo en 1997 y para el año de 1998 (que registró precipitación muy por arriba del promedio anual), probablemente la acción del agua no se acumuló suficientemente como hubiera sucedido si no se hubieran aplicado las correcciones.

De acuerdo con Field *et al.*, (1999), Gabet y Dunne (2002) y Godt (1999), para el norte de Baja California y el sur de California, los años con registros de precipitación por arriba del promedio anual pueden relacionarse con años intensos del fenómeno meteorológico El Niño y, como se ha dicho anteriormente, estas lluvias extraordinarias pueden acelerar los procesos de deslizamientos en áreas que ya son susceptibles (Moreiras, 2005; Schulz *et al.*, 2009). En el condado de San Diego, CA se está probando un sistema de alarma que advierte cuando se iguala o sobrepasa el umbral de precipitación suficiente para producir movimientos de masas para cada cuenca específica, debido a que se tiene registrado que después de fuertes precipitaciones han ocurrido eventos importantes de deslizamientos (NOAA-USGS_Debris_Flow_Task_Force, 2005; NOAA y USGS, 2005; Baum y Godt, 2009) y estos índices se pueden incrementar si ha ocurrido un incendio recientemente en el área (Cannon *et al.*, 2009).

Según una clasificación de susceptibilidad por litologías hecha por Nadim *et al.*, (2006) el área presenta rocas con susceptibilidad alta y muy alta (Tabla VI),

debido a la presencia de rocas ígneas extrusivas del cenozoico que se consideran débiles y permeables y rocas sedimentarias del Cretácico poco consolidadas.

Tabla VI: Categorización de susceptibilidad por litología. Tomada de Nadim *et.al.*, (2006).

| Litología y Estratigrafía | Susceptibilidad |
|---|------------------------|
| Rocas volcánicas extrusivas – Precámbrico, proterozoico y paleozoico. | Baja |
| Rocas endógenas (plutónicas y/o metamórficas) - Precámbrico, proterozoico, paleozoico y arqueano. Rocas sedimentarias antiguas - Precámbrico, arqueano, proterozoico y paleozoico. | Moderada |
| Rocas volcánicas extrusivas – Paleozoico y mesozoico. Rocas endógenas - Paleozoico, mesozoico, triásico, jurásico y cretácico. Rocas sedimentarias - Paleozoico, mesozoico, triásico, jurásico y cretácico. Rocas volcánicas extrusivas – Mesozoico, triásico, jurásico y cretácico. | Media |
| Rocas endógenas – Mesozoico y cenozoico. Rocas sedimentarias – Cenozoico y cuaternario. Rocas volcánicas extrusivas – Mesozoico y cenozoico. | Alta |
| Rocas volcánicas extrusivas – Cenozoico. | Muy Alta |

Con respecto a las mediciones en las fotografías aéreas, podemos observar que no existe una tendencia clara en el comportamiento de los deslizamientos (figura 36). En la mayoría de los lugares se produjo mayor desplazamiento en el lapso de 1973-1990, a excepción de los picos del km 88+400, 88+500, 91+200, 91+300 y 91+400, los cuales se pueden explicar como parte de la actividad de reparaciones, cambios en el trazo, construcción y modificación de las áreas aledañas a la autopista.

Para el caso específico del km 88+400, se puede corroborar la alteración antropogénica con ayuda de la figura 46, en la que se muestran evidencias de la modificación intensiva de la vereda y los acantilados que se encuentran en el deslizamiento, debido a la construcción de “Destino”. En la figura 46-c se aprecia

en la orilla de la playa el espigón construido para tratar de detener los desplazamientos. Se debe tener en consideración que el km 88+300 es una zona con gran flujo de agua, agrietamientos constantes en la autopista, se localiza muy cerca a cañada Pescadero que representa una de las principales fallas del área y existen contactos litológicos que pueden acrecentar el peligro.

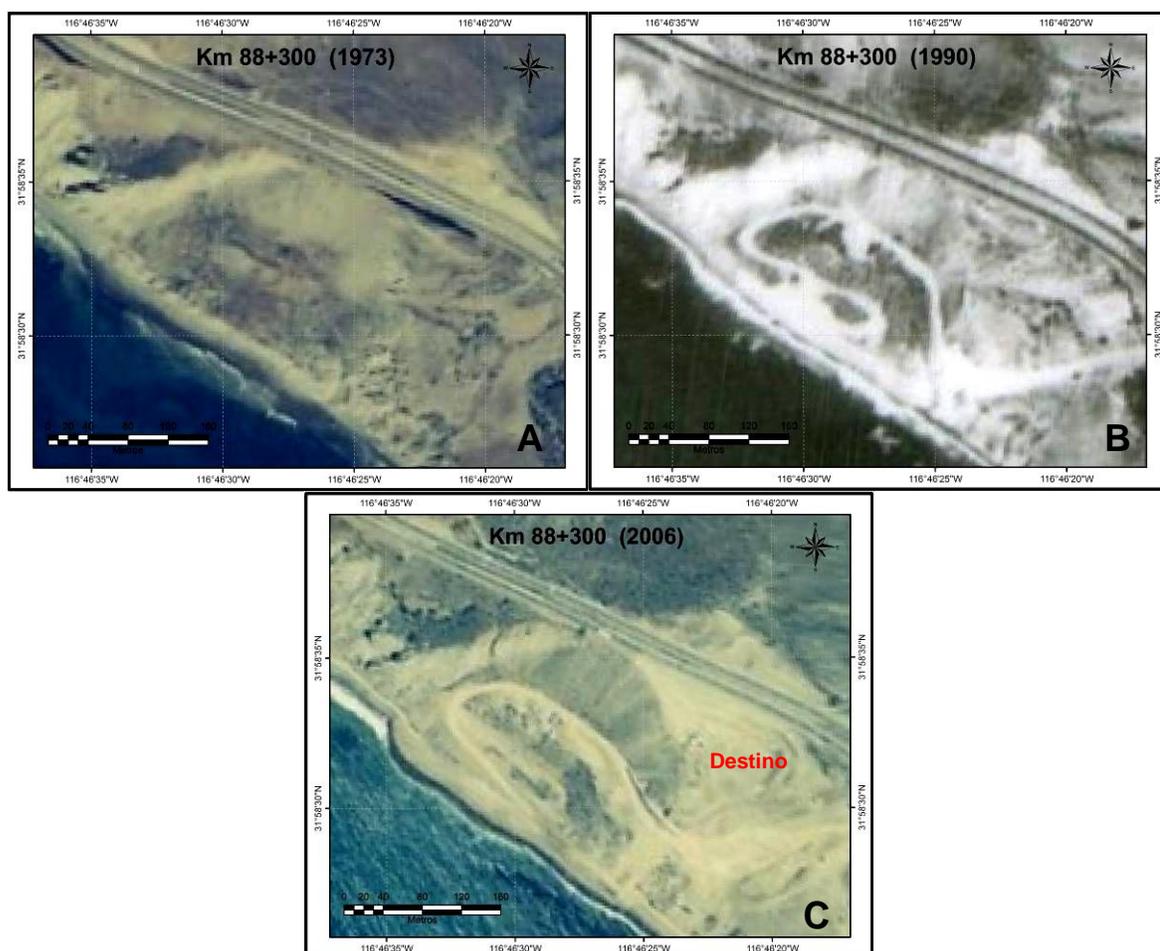


Figura 46: Fotografías aéreas del km 88+300 de los años 1973 (A), 1990 (B) y 2006 (C). En ellas se pueden apreciar los cambios realizados en el deslizamiento activo junto a “Destino”.

En el km 91+300 se presenta un caso excepcional, pues para el periodo de 1973 a 1990, según mediciones en las fotografías aéreas, la cabecera del

deslizamiento presentó 0.79 metros de desplazamiento horizontal (este valor puede caer dentro del margen de error con el que se está trabajando), mientras que los flancos NW y SE presentaron 5.4 metros y 5.82 metros respectivamente. Usando mediciones en campo, GEOTEC (1995) reportó que la cabecera del deslizamiento presentó hasta 80cm de desplazamiento horizontal y 215cm de desplazamiento vertical de 1985 a 1995, para el cuerpo principal del deslizamiento se obtuvieron hasta 425cm de desplazamiento horizontal (localizado en la parte central) y hasta 170cm de movimiento vertical (ubicado en los flancos) de 1985 a 1995. Debido a estos fuertes desplazamientos (figura 47) el trazo de la carpeta asfáltica debió de ser cambiado varios metros hacia el este en 1997.

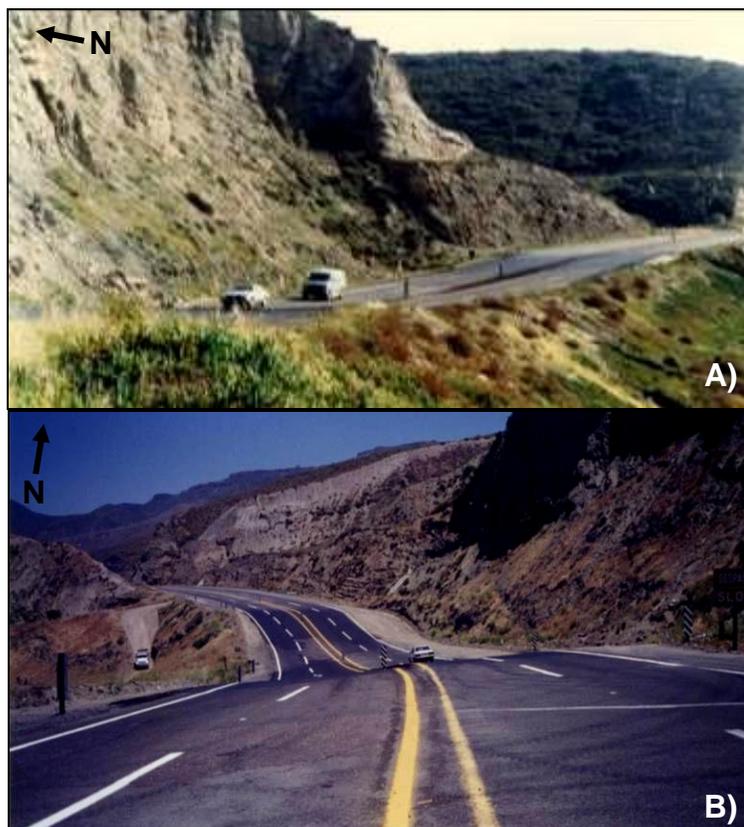


Figura 47: En estas fotografías del deslizamiento del kilómetro 91+300 se puede apreciar el cambio en la profundidad del columpio que se formaba y que requería constantes y fuertes reparaciones antes de haber sido cambiado el trazo de la carretera. A) Fotografía del año 1987. B) Fotografía del año 1995. Las flechas señalan al norte. Fotografías tomadas de GEOTEC (1987; 1995).

En la mayoría de los sitios en que se realizaron mediciones se pudieron identificar evidencias de que en las coronas existe retrogresión, es decir, se amplía el deslizamiento en dirección contraria al movimiento, lo que provoca que éste siga creciendo. Con el trabajo de campo se pudieron confirmar las evidencias de retrogresión en los deslizamientos y con ello se pudo determinar que continúan activos y afectando la autopista y zonas adyacentes.

Con el empleo del altímetro barométrico se pudo detectar que las reparaciones en varias partes de la autopista son muy numerosas, debido a que los puntos de control que se usaban para los levantamientos topográficos han sido removidos, cambiados o sepultados en asfalto, esto a causa de que ya no se realiza la toma de esas mediciones desde 1995. Por otra parte, el perfil topográfico del km 91+300 (figura 36) ayudó a corroborar que ese deslizamiento sigue activo, ya que hubo una diferencia de alturas de 7.59 metros (62.8msnm en 1995 y 55.206mnm en 2010) y, adicionalmente, se observó en campo que existen grandes grietas en la orilla del acantilado y que el revestimiento que se le colocó a la pared entre el trazo antiguo y el nuevo se deteriora y cae aceleradamente. El banco de nivel que INEGI tiene ubicado en ese punto de la autopista no está bien referido, ya que se contemplaba que tenía una altura de 30.721msnm y resultó erróneo al compararlo con el perfil topográfico.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye que:

- La zona de estudio no es apta para la construcción y desarrollo habitacional o turístico, debido a que pueden reactivar antiguos deslizamientos y contribuir a que los actuales aumenten sus tasas de movimiento.
- La remoción de material para la construcción de Destino está acelerando un movimiento de masa de tierra.
- Si se crea un desarrollo turístico en Saldamando, se corre el riesgo de que suceda lo mismo que en Destino, ya que se aceleran los procesos de deslizamientos.
- El empleo de Fotografías Aéreas permitió obtener aproximaciones de los movimientos ocurridos; por lo que, se convierte en una herramienta eficiente y su precisión es mejor en cuanto se tengan mayor número de años a comparar.
- El empleo de las ortofotos y la imagen LIDAR de buena resolución permitió obtener resultados confiables.
- La imagen LIDAR resultó ser una herramienta valiosa en la elaboración de los perfiles, y permite que periódicamente de forma rápida se actualicen estos perfiles para monitorear el área de forma cualitativa.

Se recomienda que:

- Se debe estar informado de los años en que se presenten fenómenos El Niño intensos, debido a que se presentarán más lluvias de lo habitual.
- Las autoridades de CAPUFE encargadas del tramo carretero en cuestión pueden crear un convenio con las autoridades del condado de San Diego, CA encargadas del manejo del proyecto Monitoreo y Predicción de Inundaciones Relámpago (Flash Flood Monitoring and Prediction, FFMP) del Sistema Meteorológico Nacional de Estados Unidos Americanos

(National Weather Service, NWS). De esta manera, CAPUFE podría estar advertido de lluvias extraordinarias y el condado de San Diego podría servirse del comportamiento del área con respecto a las lluvias.

- Hacer un análisis del comportamiento del agua subterránea para entender la dinámica y comportamiento de esta con respecto a los deslizamientos (Shrestha *et al.*, 2008).
- Crear un registro preciso de cada evento de movimiento de masas que ocurra en la autopista, ya que estos son una fuente invaluable de información del comportamiento y actividad de las zonas problemáticas.
- Se recomienda la instalación de inclinómetros y extensómetros y el levantamiento periódico de nivelación.
- Establecer una red geodésica para hacer mediciones periódicas con GPS Geodésico.

VI. LITERATURA CITADA

- Almazan-Vázquez, E. 1988. Marco Paleosedimentario y Geodinámico de la Formación Alisitos en la Península de Baja California. *Revista del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México*. 7(1): 41-51.
- Anónimo. 2009. Resumen Histórico de las Fallas de la Autopista Tijuana-Ensenada. In: Gómez-Castillo, G. (ed). Ensenada, Baja California
- Baum, R. L. y J. W. Godt. 2009. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA Landslides. *Springer-Verlag*
- Beal, C. H. 1948. Reconnaissance of the geology and oil possibilities of Baja California, Mexico. Vol 31. *Geological Society of America Memoir* 138.
- Bromhead, E. N. y M. L. Ibsen. 2007. An Overview of Landslide Problems in the British Isles, with Reference to Geology, Geography and Conservation. En: Heidelberg, S. B. (ed). *Progress in Landslide Science* p. 13-25.
- Cannon, S. H., J. E. Gartner, M. G. Rupert, J. A. Michael, A. H. Rea y C. Parrett. 2009. Predicting the probability and volume of postwildfire debris flows in the intermountain western United States. *Geological Society of America Bulletin*. 122: 127-144.
- CAPUFE. 1982. Autopista Tijuana-Ensenada Deslizamientos... Consolidación. 1977-1980. In: Conexos, C. y. P. F. d. I. y. S. (ed)
- Carrara, A., F. Guzzetti, M. Cardinali y P. Reichenbach. 1999. Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. *Natural Hazards*. 20: 117–135.
- Carreño, A. L. y J. T. Smith. 2007. Stratigraphy And Correlation For The Ancient Gulf Of California and Baja California Peninsula, Mexico. Vol 371. *Paleontological Research Institution*. Ithaca, New York.
- Casanova-Matera, L. 2002. Nivelación. En. Topografía Plana. *Taller de Publicaciones de Ingeniería, ULA*. Merida, Venezuela
- Clerici, A., S. Perego, C. Tellini y P. Vescovi. 2006. A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the Conditional Analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines). *Environmental Geology*. 50: 941–961.
- CNA. 2000. Estación 2036 Olivares Mexicanos. In: 1971-2000, N. C. (ed). *Servicio Meteorológico Nacional*
- Colombo, A., L. Lanteri, M. Ramasco y C. Troisi. 2005. Systematic GIS-based landslide inventory as the first step for effective landslide-hazard management. *Landslides Springer-Verlag*. 2: 291–301.

- Cruz-Castillo, M. 1995. Evaluación de Riesgo Geológico por Deslizamiento de Laderas en la Zona Salsipuedes-Cíbola del Mar, Ensenada, Baja California. *CICESE*. Ensenada, Baja California. 148.
- Cruz-Castillo, M. y L. A. Delgado-Argote. 1999. Descripción Geológica y Estructural de la Zona de Deslizamientos Salsipuedes-Cíbola del Mar, Ensenada, Baja California. *Geos*. 19: 159-174.
- Cruz-Castillo, M. y L. A. Delgado-Argote. 2000. Los Deslizamientos de la Carretera de Cuota Tijuana-Ensenada, Baja California. *Geos*.
- Chacon, J., C. Irigaray, T. Fernandez y R. E. Hamdouni. 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems.
- Dong-Wang, W., X. Gang-Du y C. Ming-Xie. 2008. Road landslide information management and forecasting system base on GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*. 156: 391–406.
- ERDAS. 2008. ErMapper 7.2
- ESRI. 2007. Hydrologically correct surfaces: Topo to Raster. Web Page. [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Hydrologically correct surfaces%3A Topo to Raster](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Hydrologically%20correct%20surfaces%3A%20Topo%20to%20Raster).
- ESRI. 2008. ArcGIS
- Evans, S. G., G. S. Mugnozza, A. L. Strom, R. L. Hermanns, A. Ischuk y S. Vinnichenko. 2006. Landslides from Massive Rock Slope Failure and Associated Phenomena. En: Netherlands, S. (ed). *Landslides from Massive Rock Slope Failure*. Vol 49. p. 03-52.
- Farjas-Abadia, M. 2008. Nivelación Trigonométrica. En. Curso de Topografía 2
- Fernández, T., C. Irigaray, R. E. Hamdouni y J. Chacón. 2003. Methodology for Landslide Susceptibility Mapping by Means of a GIS. Application to the Contraviesa Area (Granada, Spain). *Natural Hazards*. 30: 297–308.
- Field, C. B., G. C. Daily, F. W. Davis, S. Gaines, P. A. Matson, J. Melack y N. L. Miller. 1999. Confronting Climate Change in California: Ecological Impacts on the Golden State. Washington, DC.
- Gabet, E. J. y T. Dunne. 2002. Landslides on coastal sage-scrub and grassland hillslopes in a severe El Niño winter: The effects of vegetation conversion on sediment delivery *Geological Society of America Bulletin*. 114(8): 983-990
- Galli, M. y F. Guzzetti. 2007. Landslide Vulnerability Criteria: A Case Study from Umbria, Central Italy. *Environmental Management*. 40: 649–664.
- García-Puga, J. L. 2000. Geomorfología e hidrología superficial entre Puertecitos y San Luis Gonzaga, Baja California, apoyados en sensores remotos y modelos digitales de elevación. *CICESE*. Ensenada, Baja California. 103.

- Gastil, G. R., R. P. Phillips y G. C. Allison. 1975. Reconnaissance Geology of the State of Baja California. Vol 140. *Geological Society of America Memoir* 170.
- GEOTEC. 1987. Reporte de Mediciones en los Deslizamientos de la Autopista Tijuana-Ensenada. *Caminos y Puentes Federales de Ingreso y Servicios Conexos*.
- GEOTEC. 1992. Reporte de Mediciones en los Deslizamientos de la Autopista Tijuana-Ensenada. *Caminos y Puentes Federales de Ingreso y Servicios Conexos*.
- GEOTEC. 1994. Reporte de Mediciones en los Deslizamientos de la Autopista Tijuana-Ensenada. *Caminos y Puentes Federales de Ingreso y Servicios Conexos*.
- GEOTEC. 1995. Reporte de Mediciones en los Deslizamientos de la Autopista Tijuana-Ensenada. *Caminos y Puentes Federales de Ingreso y Servicios Conexos*.
- Godt, J. W. 1999. Maps showing locations of damaging landslides caused by El Niño rainstorms, winter season 1997-98, San Francisco Bay region, California. In: Survey, U. S. G. (ed)
- Gorum, T., B. Gonencgil, C. Gokceoglu y H. A. Nefeslioglu. 2008. Implementation of reconstructed geomorphologic units in landslide susceptibility mapping: the Melen Gorge (NW Turkey). *Natural Hazards*. 46: 323–351.
- Guzzetti, F., S. Peruccacci, M. Rossi y C. P. Stark. 2008. The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*. 5: 3–17.
- Hart, M. W. 1977. Landslides in the San Diego Area. En: Abott, P. L., J. K. Victoria (eds). *Geologic Hazards in San Diego: Earthquakes, Landslides and Floods. The San Diego Society of Natural History*.
- Highland, L. M. y P. Bobrowsky. 2008. The Landslide Handbook— A Guide to Understanding Landslides. In: Survey, U. S. G. (ed)
- Hinojosa-Corona, A. 2009. Resolución de Fotografías Aéreas. In: Gómez-Castillo, G. (ed)
- Hodgson, R. A. 1957. Precision Altimeter Survey Procedures. Vol. *American Paulin System*. Los Angeles, CA.
- Hufschmidt, G. y M. J. Crozier. 2008. Evolution of natural risk: analysing changing landslide hazard in Wellington, Aotearoa/New Zealand. *Natural Hazards*. 45: 255–276.
- INEGI. 1998. Datos Vectoriales Geológicos 1:250,000. Cartas H11-2 (Ensenada) e I11-11 (Tijuana).

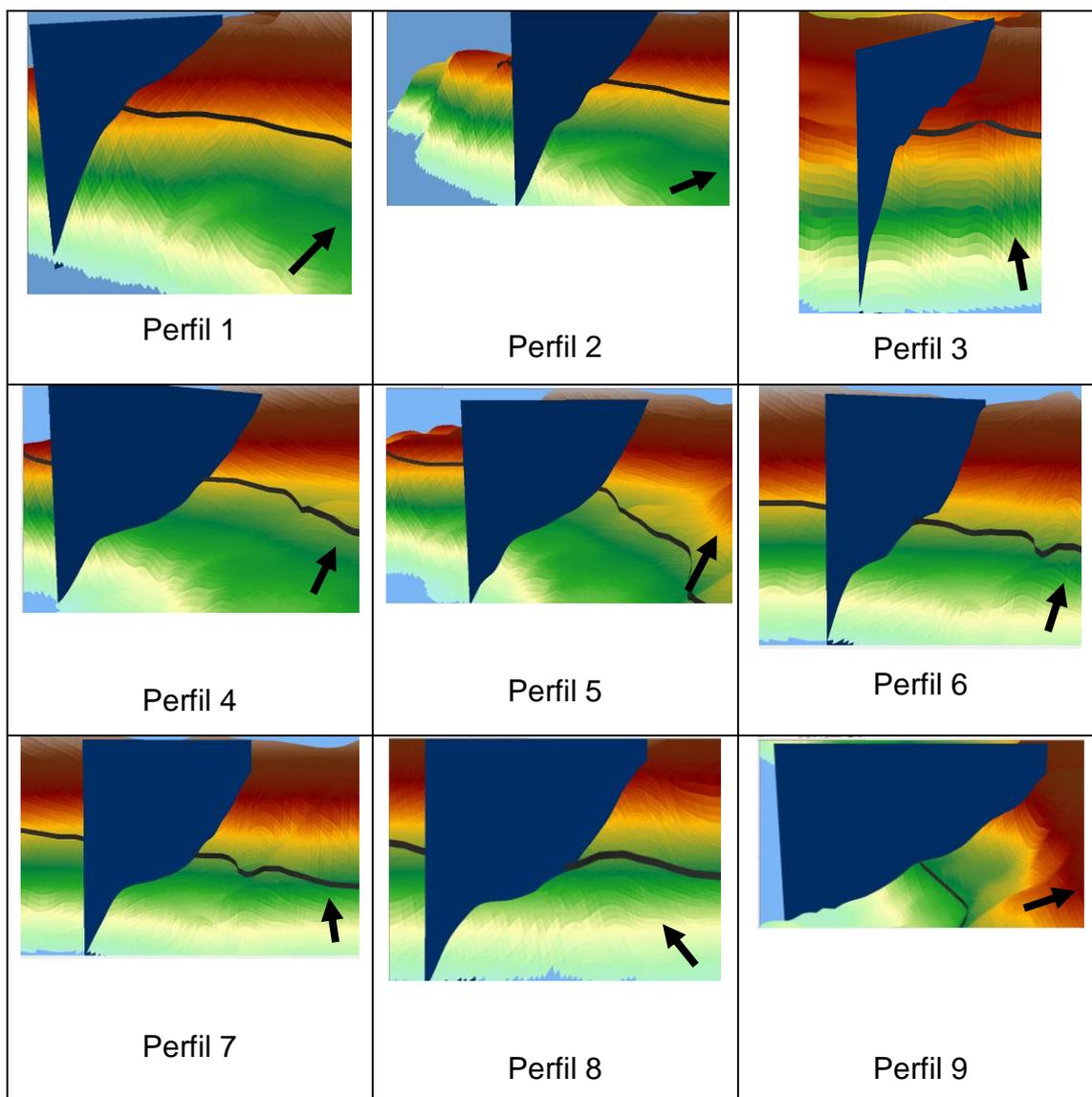
- INEGI. 2006. Modelo Digital de Elevación LIDAR. Clave de carta H11B11. Resolución 5 metros por celda.
- INEGI.(ed.). 1999. Conjunto de Datos Vectoriales de las Cartas Topográficas Escala 1:50,000. H11B11 (El Sauzal de Rodríguez), H11B12 (Ensenada), I11D81 (Primo Tapia) e I11D82 (Francisco Zarco). *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI* Aguascalientes, Ags., México
- Jimenez-Peralvarez, J. D. 2008. Building models for automatic landslide-susceptibility analysis, mapping and validation in ArcGIS. *Natural Hazards*. 20.
- Kahmen, H., A. Eichhorn y M. Haberler-Weber. 2005. A Multi-Scale Monitoring Concept for Landslide Disaster Mitigation. En: Heidelberg, S. B. (ed). *Dynamic Planet*
- Kajiyama, A., K. Shiono, S. Masumoto y T. Fujita. 2005. Basic theory of three-dimensional landslide modeling based on the logical model of geologic structure. *Landslides*. 2: 212–220.
- Mena-Berrios, J. B. 2008. Geodesia Superior. Vol 1. Madrid, España. 572-578.
- Miliaresis, G., N. Sabatakakis y G. Koukis. 2005. Terrain Pattern Recognition and Spatial Decision Making for Regional Slope Stability Studies. *Natural Resources Research*. 14:
- Minch, J. A. 1967. Stratigraphy and Structure of the Tijuana-Rosarito Beach Area, Northwestern Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*. 78: 1155-1178.
- Minch, J. A., K. C. Schulte y G. Hofman. 1970. A Middle Miocene Age For the Rosarito Beach Formation in Northwestern Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*. 81: 3149-3154.
- Moraila-Martínez, T. 2009. Registros de Precipitación de la Estación 2036 Olivares Mexicanos. In: Estación_2036 (ed) Excel. Ensenada, B.C.
- Moreiras, S. M. 2005. Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the Central Andes, Mendoza Province, Argentina. *Landslides*. 2: 53–59.
- Nadim, F., O. Kjekstad, P. Peduzzi, C. Herold y C. Jaedicke. 2006. Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides*. 3: 159–173.
- Nava-Pichardo, A. 2002. Terremotos. Vol 34. *La Ciencia Para Todos*. México, D. F.
- NOAA-USGS_Debris_Flow_Task_Force. 2005. NOAA-USGS debris-flow warning system—Final report. Virginia. 47.
- NOAA y USGS. 2005. A NOAA–USGS Demonstration Flash-Flood and Debris-Flow Early-Warning System.2.

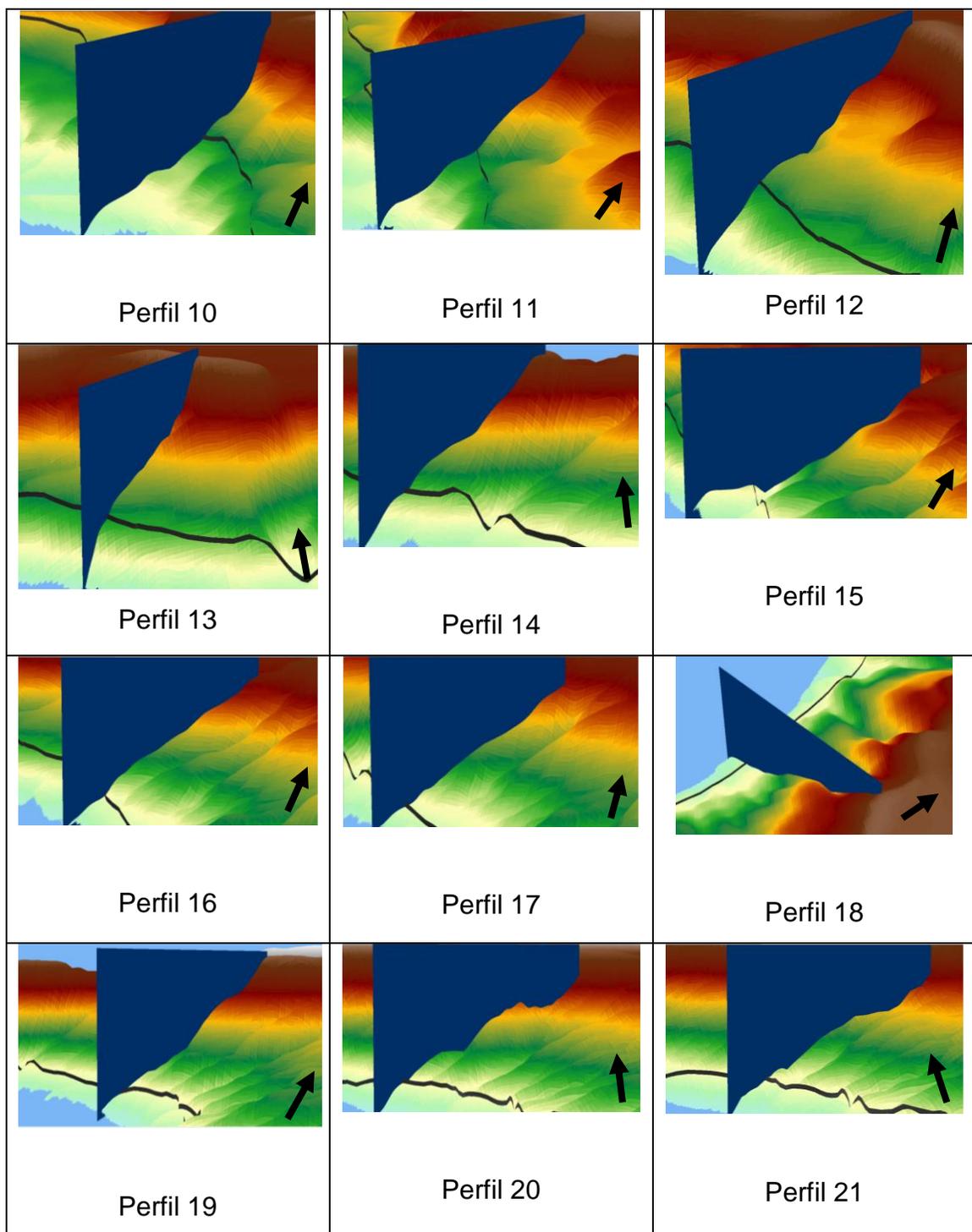
- OEA. 1993. Evaluación del Peligro de Deslizamientos de Tierra. In: Ambiente, D. d. D. R. y. M. (ed). Washington DC
- Ogura, A. y E. S. Macedo. 1995. Procesos y Riesgos Geológicos II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental
- Ozdemir, A. 2008. Landslide susceptibility mapping of vicinity of Yaka Landslide (Gelendost, Turkey) using conditional probability approach in GIS. *Environmental Geology*.
- Pereira-Neto, O. C. y L. Limberger. 2004. Análisis de la precisión de mapas de pendientes utilizando modelos digitales de terreno. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*. 105: 97-103.
- Plaza-Flores, J. F. 1979. Cambios en la Playa San Miguel Debidos a un Deslizamiento y a la Adición de Nuevo Material Vertido en la Línea de Costa. *Universidad Autonoma de Baja California*. Ensenada, Baja California. 65.
- Rico-Rodríguez, A., G. Springal-Caram, J. Springal-Caram y G. M. Pecero. 1975. Deslizamientos en la Autopista Tijuana-Ensenada. In: Públicas, S. d. O. (ed)
- Rivas-Martínez, S. 2008. Sistema de Clasificación Bioclimática Mundial. Web Page. <http://www.ucm.es/info/cif/station/me-ensen.htm>.
- Romeo, R. W., M. Floris y F. Veneri. 2006. Area-scale landslide hazard and risk assessment. *Environmental Geology*. 51: 1-13.
- Saha, A. K., R. P. Gupta, I. Sarkar, M. K. Arora y E. Csaplovics. 2005. An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation—with a case study in the Himalayas. *Landslides*. 2: 61–69.
- Schulz, W. H., J. P. McKenna, J. D. Kibler y G. Biavati. 2009. Relations between hydrology and velocity of a continuously moving landslide—evidence of pore-pressure feedback regulating landslide motion? *Landslides*. 6: 181–190.
- Shrestha, H. K., R. Yatabe y N. P. Bhandary. 2008. Groundwater flow modeling for effective implementation of landslide stability enhancement measures. *Landslides*. 5: 281–290.
- Stolz, A. y C. Huggel. 2008. Debris flows in the Swiss National Park: the influence of different flow models and varying DEM grid size on modeling results. *Landslides*. 5: 311–319.
- Suárez-Vidal, F. 1987. Las Facies Calcáreas de la Formación Alisitos, evidencia de calma tectónica en el Cretácico temprano. *Ciencias Marinas*. 13: 131-154.
- Van-Westen, C. J., N. Rengers y R. Soeters. 2003. Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. *Natural Hazards*. 30: 399–419.

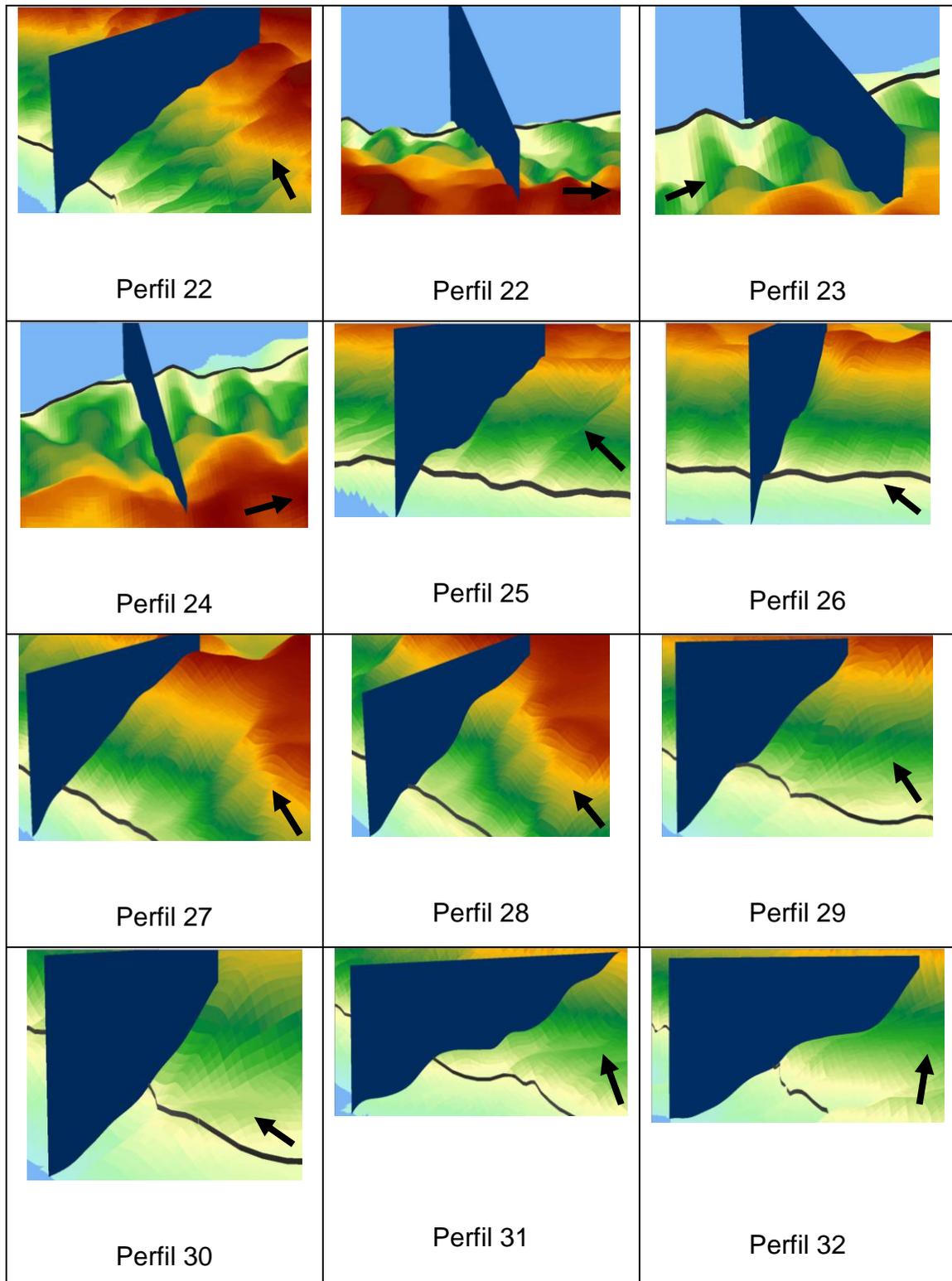
- Varnes, D. J. 1984. Landslide Hazard Zonation: A review of Principles and Practice. Vol. *International Association of Engineering Geology*. Paris, Francia.
- Willis, B. 1922. The Chinese Earthquake of December, 1920. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 12: 227 - 230.
- Yamagishi, H., H. Marui, L. Ayalew, T. Sekiguchi, T. Horimatsu y M. Hatamoto. 2004. Estimation of the sequence and size of the Tozawagawa landslide, Niigata, Japan, using aerial photographs. *Landslides*. 1: 299–303.
- Yeo, R. K. 1981. The Stratigraphy and Sedimentology of Upper Cretaceous Sediments of Southwestern California and Baja California, Mexico. *Rice University*. Houston, Texas. 603.
- Zeng-wang, X. 2001. GIS and ANN model for landslide susceptibility mapping. *Journal of Geographical Sciences*. 11: 374-381.

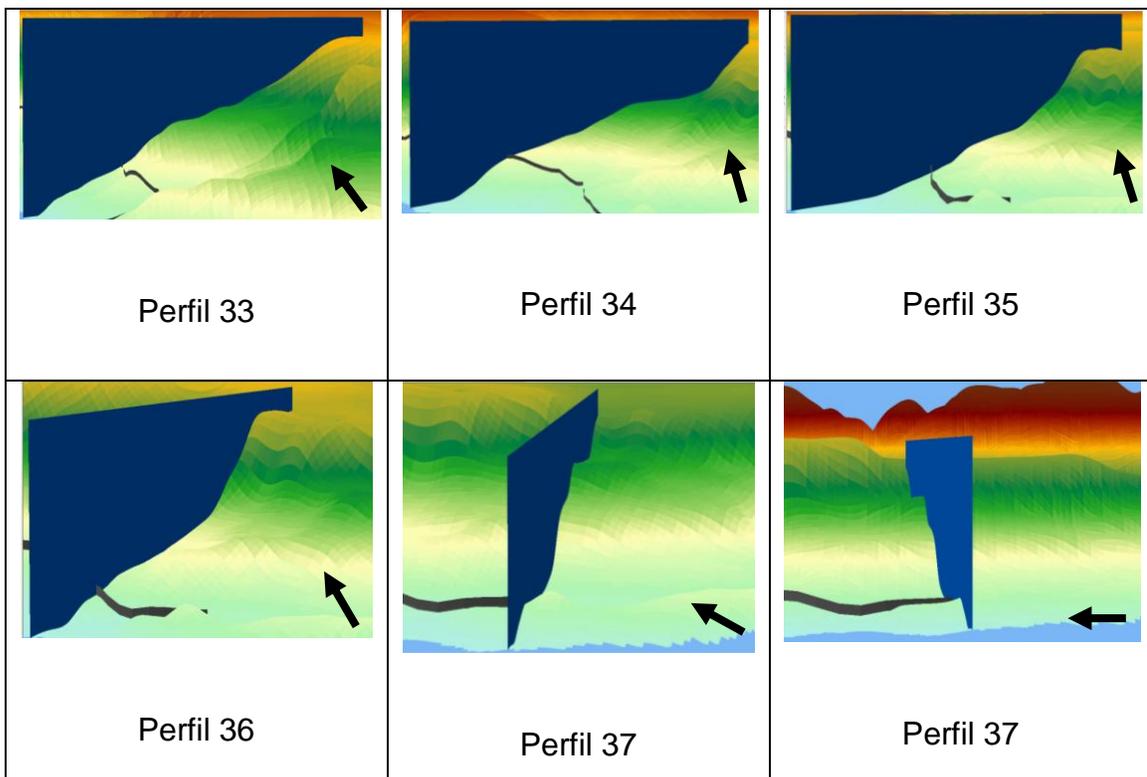
VIII. ANEXO 1

Imágenes de los perfiles de pendientes producidos a partir la imagen LIDAR. Las flechas señalan hacia el norte, la línea gris oscuro indica el trazo de la autopista y el tono azul cielo representa el mar. Algunos perfiles se repiten para presentar otra vista con mejor perspectiva.









IX. ANEXO 2

Puntos de anclaje (Piercing Points) usados para georreferir las fotografías aéreas. Los datos se encuentran ordenados en tablas por años y por recorte de fotografía aérea en la que fueron usados.

En la primer y segunda columna aparecen las coordenadas de la latitud y longitud que el programa asigna a la imagen que se va a georreferir. La tercera y cuarta columna muestran la latitud y longitud de las coordenadas UTM de ubicación final.

Fotografías de 1990

Recorte 1

Recorte 2

| X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino | X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino |
|----------|----------|-----------|------------|----------|----------|-----------|------------|
| 788.25 | -541.84 | 519343.46 | 3538570.00 | 53.56 | -517.46 | 519421.61 | 3538624.56 |
| 56.56 | -512.45 | 517444.87 | 3538573.76 | 52.57 | -680.37 | 519457.88 | 3538235.38 |
| 110.98 | -324.51 | 517570.95 | 3539041.87 | 16.51 | -52.56 | 519223.45 | 3539716.15 |
| 242.33 | -104.50 | 517883.29 | 3539575.35 | 26.50 | -389.50 | 519319.85 | 3538936.74 |
| 36.50 | -152.50 | 517377.43 | 3539470.17 | 386.38 | -517.33 | 520270.97 | 3538643.92 |
| 683.50 | -83.50 | 518977.90 | 3539635.79 | 166.43 | -807.48 | 519760.23 | 3537922.39 |
| 529.43 | -50.52 | 518587.80 | 3539704.50 | 791.42 | -837.47 | 521335.48 | 3537873.04 |
| 71.34 | -708.45 | 517539.94 | 3538140.13 | 571.15 | -43.66 | 520634.92 | 3539781.73 |
| 21.46 | -237.49 | 517345.81 | 3539260.53 | 315.47 | -179.49 | 519999.56 | 3539434.37 |
| 642.44 | -404.34 | 518957.69 | 3538906.93 | 254.45 | -3.51 | 519832.47 | 3539864.94 |
| 455.47 | -380.51 | 518469.87 | 3538954.16 | 208.43 | -302.44 | 519739.79 | 3539119.75 |
| 686.34 | -311.27 | 519046.59 | 3539131.42 | 257.47 | -248.51 | 519857.37 | 3539256.08 |
| 568.22 | -303.50 | 518721.61 | 3539151.97 | 281.48 | -632.50 | 520030.10 | 3538366.09 |
| 190.16 | -473.27 | 517780.26 | 3538673.57 | 439.43 | -671.60 | 520434.28 | 3538265.65 |
| 270.34 | -260.52 | 517955.44 | 3539178.46 | 141.45 | -506.49 | 519635.71 | 3538654.81 |
| 818.91 | -683.48 | 519459.20 | 3538233.28 | 653.50 | -618.48 | 520942.78 | 3538392.93 |
| 515.39 | -607.53 | 518673.78 | 3538424.54 | 439.46 | -165.45 | 520305.96 | 3539472.24 |
| 631.05 | -587.32 | 518973.07 | 3538481.76 | 669.44 | -767.53 | 521020.15 | 3538026.36 |
| 185.36 | -678.48 | 517848.08 | 3538226.90 | 805.48 | -486.52 | 521315.10 | 3538729.60 |
| 778.52 | -393.55 | 519283.35 | 3538931.21 | 426.41 | -336.48 | 520285.42 | 3539046.67 |
| 780.94 | -42.91 | 519218.65 | 3539743.21 | 888.60 | -23.53 | 521446.28 | 3539859.00 |
| 230.49 | -15.47 | 517849.54 | 3539802.64 | 760.58 | -191.42 | 521127.09 | 3539434.11 |
| 485.44 | -148.34 | 518484.62 | 3539466.00 | 899.47 | -145.41 | 521470.75 | 3539557.39 |
| 244.49 | -415.44 | 517911.17 | 3538818.13 | 643.50 | -141.32 | 520809.85 | 3539534.91 |
| 403.59 | -606.64 | 518343.33 | 3538427.79 | 591.50 | -392.50 | 520721.40 | 3538924.67 |
| 42.43 | -34.85 | 517389.26 | 3539740.09 | 903.39 | -239.53 | 521489.37 | 3539323.48 |

Anexo 2 (Continuación)

| | | | | | | | |
|--------|---------|-----------|------------|--------|---------|-----------|------------|
| 693.48 | -49.50 | 519008.86 | 3539722.65 | 801.50 | -561.50 | 521302.48 | 3538550.18 |
| 348.59 | -311.19 | 518175.93 | 3539092.71 | 679.54 | -333.42 | 520946.55 | 3539081.94 |
| 356.39 | -132.62 | 518155.51 | 3539485.34 | 517.40 | -597.41 | 520604.03 | 3538450.54 |
| 160.59 | -539.50 | 517717.68 | 3538516.05 | 720.45 | -499.51 | 521086.81 | 3538685.81 |
| 700.49 | -494.44 | 519110.70 | 3538685.03 | 809.39 | -26.34 | 521249.86 | 3539840.09 |
| 830.38 | -436.49 | 519437.94 | 3538829.83 | 764.48 | -811.43 | 521269.32 | 3537928.87 |
| | | | | 141.53 | -208.46 | 519561.00 | 3539350.68 |
| | | | | 900.49 | -356.46 | 521472.11 | 3539022.37 |
| | | | | 914.43 | -339.50 | 521511.03 | 3539067.95 |
| | | | | 471.30 | -759.22 | 520528.60 | 3538074.36 |

Recorte 3

Recorte 4

| X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino | X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino |
|----------|----------|-----------|------------|----------|----------|-----------|------------|
| 1009.18 | -347.27 | 524092.54 | 3539046.25 | 184.49 | -152.49 | 521280.62 | 3537934.42 |
| 920.56 | -133.52 | 523853.99 | 3539587.64 | 15.50 | -8.50 | 520845.39 | 3538294.06 |
| 172.27 | -260.62 | 521887.76 | 3539253.63 | 1495.49 | -42.46 | 524806.39 | 3538226.19 |
| 895.50 | -805.41 | 523816.63 | 3537860.57 | 719.50 | -498.50 | 522746.41 | 3537038.72 |
| 512.40 | -686.49 | 522809.78 | 3538157.05 | 739.50 | -823.50 | 522782.34 | 3536189.08 |
| 162.42 | -883.52 | 521807.74 | 3537671.04 | 1410.50 | -793.50 | 524596.35 | 3536291.36 |
| 200.29 | -670.54 | 521927.62 | 3538216.60 | 994.50 | -858.50 | 523502.26 | 3536101.27 |
| 75.46 | -47.50 | 521632.58 | 3539795.15 | 831.50 | -873.50 | 523045.26 | 3536056.87 |
| 552.50 | -93.42 | 522898.23 | 3539677.73 | 428.37 | -15.35 | 521969.73 | 3538289.81 |
| 368.49 | -463.50 | 522412.33 | 3538734.67 | 255.50 | -292.50 | 521446.26 | 3537577.54 |
| 51.49 | -791.48 | 521530.61 | 3537918.65 | 216.50 | -212.50 | 521353.97 | 3537786.58 |
| 23.47 | -801.33 | 521431.48 | 3537890.85 | 146.50 | -170.50 | 521174.86 | 3537887.86 |
| 44.50 | -721.50 | 521541.56 | 3538076.57 | 377.50 | -254.50 | 521805.48 | 3537670.83 |
| 15.44 | -210.36 | 521468.44 | 3539366.35 | 333.50 | -177.50 | 521676.26 | 3537876.88 |
| 316.50 | -500.50 | 522272.94 | 3538639.02 | 407.50 | -137.49 | 521899.18 | 3537973.23 |
| 93.50 | -498.50 | 521700.78 | 3538622.44 | 312.50 | -40.50 | 521654.31 | 3538215.64 |
| 52.50 | -611.50 | 521562.63 | 3538350.81 | 641.50 | -228.50 | 522561.32 | 3537722.23 |
| 343.50 | -555.50 | 522347.33 | 3538494.50 | 734.50 | -51.50 | 522822.74 | 3538172.24 |
| 463.50 | -771.50 | 522683.99 | 3537934.67 | 543.50 | -204.50 | 522277.44 | 3537791.57 |
| 254.50 | -517.50 | 522094.83 | 3538613.52 | 680.50 | -143.50 | 522684.05 | 3537931.77 |
| 250.50 | -659.50 | 522087.60 | 3538231.79 | 626.50 | -196.50 | 522516.42 | 3537807.54 |
| 154.44 | -735.41 | 521785.60 | 3538062.51 | 373.50 | -317.50 | 521782.53 | 3537502.20 |
| 359.50 | -854.50 | 522356.68 | 3537743.38 | 54.50 | -155.50 | 520882.00 | 3537928.51 |
| 117.50 | -806.50 | 521673.58 | 3537877.27 | 13.50 | -99.50 | 520814.18 | 3538067.97 |
| 60.50 | -844.50 | 521524.80 | 3537771.85 | 864.50 | -726.50 | 523128.08 | 3536449.01 |
| 6.50 | -343.50 | 521474.64 | 3539022.02 | 966.50 | -480.49 | 523431.41 | 3537086.65 |
| 327.50 | -777.50 | 522295.89 | 3537924.89 | 948.50 | -558.50 | 523366.05 | 3536886.56 |
| | | | | 686.50 | -733.50 | 522632.67 | 3536422.57 |
| | | | | 861.50 | -593.50 | 523143.54 | 3536790.27 |
| | | | | 1106.50 | -671.50 | 523810.58 | 3536588.21 |

Anexo 2 (Continuación)

| | | | |
|---------|---------|-----------|------------|
| 521.50 | -431.50 | 522190.13 | 3537213.34 |
| 1506.50 | -893.50 | 524853.78 | 3536033.92 |
| 1270.50 | -326.50 | 524217.68 | 3537495.23 |
| 1548.50 | -726.50 | 524958.05 | 3536477.46 |
| 1433.50 | -658.50 | 524663.20 | 3536640.10 |
| 398.50 | -99.50 | 521875.32 | 3538073.95 |
| 533.50 | -149.50 | 522274.45 | 3537924.78 |
| 145.50 | -47.50 | 521200.80 | 3538196.18 |
| 1161.49 | -19.50 | 523940.81 | 3538270.55 |
| 1226.50 | -79.50 | 524111.41 | 3538113.38 |
| 314.50 | -84.50 | 521644.33 | 3538107.88 |
| 169.50 | -144.50 | 521235.23 | 3537953.21 |
| 510.50 | -84.50 | 522211.58 | 3538090.42 |
| 476.50 | -6.50 | 522115.37 | 3538293.22 |
| 369.50 | -105.50 | 521784.02 | 3538061.98 |
| 1064.50 | -167.50 | 523691.83 | 3537881.38 |

Recorte 5

Recorte 6

| X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino | X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino |
|----------|----------|-----------|------------|----------|----------|-----------|------------|
| 693.50 | -176.50 | 524350.89 | 3535773.49 | 311.50 | -1188.50 | 523797.63 | 3530682.61 |
| 138.50 | -66.50 | 522832.73 | 3536040.90 | 787.50 | -1271.50 | 525080.31 | 3530486.05 |
| 888.50 | -984.50 | 524893.71 | 3533657.12 | 119.50 | -55.50 | 523237.13 | 3533695.46 |
| 274.50 | -953.50 | 523234.36 | 3533690.04 | 766.50 | -90.50 | 524983.07 | 3533652.77 |
| 278.50 | -70.50 | 523234.35 | 3536032.92 | 252.50 | -105.50 | 523635.98 | 3533598.24 |
| 467.50 | -108.50 | 523756.70 | 3535942.12 | 540.50 | -79.50 | 524395.03 | 3533680.55 |
| 985.50 | -32.50 | 525110.72 | 3536166.64 | 1061.50 | -1183.50 | 525809.71 | 3530743.49 |
| 959.50 | -285.50 | 525051.85 | 3535501.09 | 173.50 | -425.50 | 523399.00 | 3532717.17 |
| 1183.50 | -336.50 | 525648.04 | 3535376.86 | 760.50 | -248.50 | 524973.55 | 3533238.54 |
| 1146.50 | -2.50 | 525535.78 | 3536250.45 | 974.50 | -11.50 | 525532.33 | 3533873.41 |
| 721.50 | -29.50 | 524417.74 | 3536162.14 | 1020.50 | -445.50 | 525673.50 | 3532728.65 |
| 1181.50 | -1051.50 | 525673.99 | 3533492.48 | 857.50 | -775.50 | 525247.94 | 3531823.13 |
| 566.50 | -977.50 | 524056.05 | 3533673.58 | 473.50 | -349.50 | 524223.19 | 3532965.13 |
| 992.50 | -536.50 | 525150.64 | 3534846.02 | 102.50 | -758.50 | 523201.94 | 3531799.17 |
| 164.50 | -152.50 | 522909.06 | 3535810.90 | 481.50 | -1015.50 | 524266.60 | 3531195.00 |
| 173.50 | -266.50 | 522939.00 | 3535508.57 | 498.50 | -841.50 | 524308.01 | 3531659.98 |
| 444.50 | -423.50 | 523706.31 | 3535113.93 | 578.50 | -1138.50 | 524530.02 | 3530873.20 |
| 658.50 | -599.50 | 524271.57 | 3534661.92 | 871.50 | -1004.50 | 525293.34 | 3531203.98 |
| 423.50 | -293.50 | 523644.95 | 3535458.68 | 134.50 | -1014.50 | 523303.72 | 3531122.65 |
| 664.50 | -898.50 | 524308.00 | 3533883.12 | 426.50 | -965.50 | 524122.42 | 3531327.71 |
| 492.50 | -742.50 | 523850.00 | 3534285.24 | 560.50 | -672.50 | 524469.65 | 3532116.48 |
| 273.50 | -735.50 | 523224.88 | 3534268.28 | 159.50 | -515.50 | 523360.09 | 3532471.20 |
| 244.50 | -595.50 | 523140.06 | 3534640.96 | 207.50 | -479.50 | 523497.29 | 3532579.47 |
| 505.50 | -894.50 | 523889.92 | 3533888.61 | 106.50 | -496.50 | 523202.93 | 3532501.64 |

Anexo 2 (Continuación)

| | | | | | | | |
|---------|----------|-----------|------------|--------|----------|-----------|------------|
| 408.50 | -1001.50 | 523635.98 | 3533598.24 | 192.50 | -630.50 | 523455.88 | 3532163.38 |
| 289.50 | -795.50 | 523270.28 | 3534108.63 | 175.50 | -831.48 | 523410.00 | 3531621.55 |
| 226.50 | -883.50 | 523087.18 | 3533862.16 | 225.50 | -1143.50 | 523561.15 | 3530787.39 |
| 886.50 | -863.50 | 524879.74 | 3533973.93 | 82.50 | -1163.50 | 523167.52 | 3530715.54 |
| 876.50 | -358.50 | 524844.81 | 3535307.01 | 245.50 | -242.50 | 523624.00 | 3533241.02 |
| 123.50 | -4.50 | 522793.47 | 3536204.95 | 360.50 | -287.50 | 523926.34 | 3533125.28 |
| 553.50 | -24.50 | 523986.40 | 3536159.78 | 144.50 | -121.50 | 523313.68 | 3533523.41 |
| 1141.50 | -833.50 | 525559.24 | 3534071.22 | 517.50 | -518.50 | 524347.91 | 3532519.60 |
| | | | | 311.50 | -420.50 | 523798.12 | 3532770.55 |
| | | | | 192.50 | -320.50 | 523451.38 | 3533000.55 |
| | | | | 70.50 | -341.50 | 523109.63 | 3532926.21 |
| | | | | 417.50 | -149.50 | 524072.52 | 3533494.47 |
| | | | | 984.50 | -617.50 | 525585.19 | 3532273.14 |
| | | | | 422.50 | -874.50 | 524108.45 | 3531570.68 |
| | | | | 94.50 | -103.50 | 523168.57 | 3533565.68 |
| | | | | 538.50 | -1271.50 | 524415.77 | 3530484.55 |

Fotografías de 1973

Recorte 1

Recorte 2

| X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino | X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino |
|------------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|-----------|------------|
| 69458.46 | -667642.90 | 517422.11 | 3539280.44 | 2121063.15 | -1853060.92 | 521673.76 | 3537872.33 |
| 1047468.58 | -727253.82 | 518407.41 | 3539158.68 | 49608.15 | -1211960.93 | 519527.32 | 3538661.48 |
| 542905.39 | -710167.87 | 517963.44 | 3539181.27 | 55164.75 | -80626.08 | 519641.35 | 3539771.82 |
| 160177.35 | -968152.44 | 517510.99 | 3538967.27 | 29760.09 | -1583315.71 | 519481.40 | 3538282.81 |
| 131827.62 | -868927.55 | 517492.85 | 3539071.13 | 9908.54 | -344459.65 | 519566.65 | 3539522.33 |
| 681817.40 | -341617.29 | 518142.40 | 3539530.48 | 1294115.27 | -18305.73 | 520871.19 | 3539773.77 |
| 429501.88 | -120485.82 | 517854.55 | 3539797.52 | 1727932.45 | -123322.39 | 521316.45 | 3539640.56 |
| 21263.36 | -508880.94 | 517380.55 | 3539441.36 | 2164521.87 | -426667.98 | 521739.95 | 3539317.54 |
| 1691077.53 | -72292.47 | 519152.76 | 3539750.20 | 2314806.72 | -1288499.70 | 521875.05 | 3538421.60 |
| 477697.96 | -486202.46 | 517918.58 | 3539429.39 | 636472.43 | -168701.46 | 520205.55 | 3539660.43 |
| 710439.30 | -132102.92 | 518168.76 | 3539747.00 | 472026.34 | -460687.54 | 520021.91 | 3539374.34 |
| 752692.24 | -92137.29 | 518211.86 | 3539785.27 | 415327.41 | -840577.34 | 519945.69 | 3539003.18 |
| 2136172.31 | -43942.19 | 519609.79 | 3539754.28 | 1481287.34 | -744187.62 | 521020.32 | 3539022.03 |
| 2065297.34 | -1240312.62 | 519422.40 | 3538578.26 | 789547.30 | -1169437.40 | 520285.00 | 3538650.37 |
| 1435927.57 | -1350877.56 | 518733.71 | 3538521.27 | 1384897.60 | -1265827.46 | 520919.35 | 3538525.98 |
| 2082307.43 | -1427422.26 | 519431.28 | 3538387.40 | 1393402.71 | -1163767.58 | 520929.84 | 3538624.67 |
| 1674067.54 | -732847.51 | 519052.13 | 3539130.76 | 474862.52 | -1742107.72 | 519936.96 | 3538089.78 |
| 2167356.75 | -1013513.21 | 519546.10 | 3538808.58 | 832072.51 | -1577677.53 | 520320.57 | 3538248.13 |
| 267907.46 | -109147.51 | 517704.83 | 3539814.99 | 389812.37 | -1478452.52 | 519850.00 | 3538364.32 |
| 854752.41 | -216877.54 | 518317.74 | 3539645.14 | 208398.63 | -1722267.96 | 519657.12 | 3538124.44 |
| 1013512.50 | -253732.16 | 518477.26 | 3539600.97 | 375632.64 | -1390575.23 | 519843.59 | 3538452.90 |
| 591097.59 | -1280002.73 | 517924.48 | 3538633.10 | 602437.62 | -1226137.54 | 520087.77 | 3538604.81 |
| 452182.47 | -1268662.51 | 517808.89 | 3538649.37 | 168682.65 | -1271497.57 | 519657.08 | 3538595.18 |

Anexo 2 (Continuación)

| | | | | | | | |
|------------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|-----------|------------|
| 1336703.25 | -687488.24 | 518673.36 | 3539195.03 | 401152.43 | -1311187.51 | 519873.86 | 3538536.17 |
| 197032.53 | -1314022.56 | 517508.29 | 3538606.56 | 1739272.47 | -1056037.54 | 521272.76 | 3538709.53 |
| 985162.72 | -1262994.31 | 518267.32 | 3538640.31 | 1611697.69 | -1835662.43 | 521139.86 | 3537917.82 |
| 1756282.53 | -951142.47 | 519101.49 | 3538906.37 | 1878188.39 | -1753447.27 | 521421.13 | 3538010.53 |
| 369972.79 | -1257343.01 | 517704.51 | 3538654.86 | 1073047.41 | -1399072.57 | 520591.15 | 3538413.28 |
| 401240.80 | -1240402.53 | 517739.44 | 3538675.58 | 2212717.65 | -114817.54 | 521810.10 | 3539626.25 |
| 497542.75 | -1416082.48 | 517819.00 | 3538500.56 | 2150347.59 | -1112737.54 | 521703.33 | 3538622.44 |
| 625115.95 | -1679737.30 | 517851.39 | 3538224.95 | 1917881.97 | -1994410.79 | 521455.60 | 3537727.43 |
| 1279999.08 | -137496.05 | 518732.76 | 3539704.99 | 2017082.02 | -2039713.78 | 521554.42 | 3537681.36 |
| 137498.40 | -1379224.77 | 517451.56 | 3538550.14 | 1889777.74 | -2054081.26 | 521418.78 | 3537672.58 |
| 231351.37 | -1679674.09 | 517460.51 | 3538239.49 | 2096483.45 | -1631542.90 | 521644.32 | 3538107.88 |
| 194198.80 | -1733602.42 | 517365.17 | 3538179.08 | 2275312.74 | -2162096.54 | 521810.68 | 3537536.57 |
| 299092.55 | -817897.73 | 517667.79 | 3539099.95 | | | | |
| 29767.25 | -917122.73 | 517356.09 | 3539043.73 | | | | |
| 817897.65 | -917122.99 | 518164.56 | 3538975.14 | | | | |
| 783877.19 | -826402.54 | 518150.39 | 3539070.68 | | | | |
| 1435927.44 | -1166602.47 | 518754.35 | 3538730.13 | | | | |
| 1452937.58 | -1237477.45 | 518769.28 | 3538637.97 | | | | |
| 1597522.20 | -1211962.65 | 518937.16 | 3538653.60 | | | | |

Recorte 3

Recorte 4

| X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino | X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino |
|------------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|-----------|------------|
| 2709110.55 | -326561.39 | 524084.86 | 3539074.34 | 2141886.90 | -58203.45 | 525059.15 | 3534499.54 |
| 2356909.06 | -2870265.22 | 523632.47 | 3537057.45 | 440724.55 | -1189287.16 | 523307.68 | 3533407.00 |
| 2109733.80 | -5681129.76 | 523147.27 | 3534572.94 | 395482.67 | -3372233.18 | 523196.08 | 3531185.35 |
| 3732277.31 | -333112.42 | 524896.18 | 3539020.90 | 2555752.54 | -4018612.46 | 525415.98 | 3530513.11 |
| 1552162.49 | -588262.44 | 523148.52 | 3538936.58 | 2031277.08 | -4024282.59 | 524889.69 | 3530524.86 |
| 472027.27 | -690322.13 | 522253.99 | 3538919.11 | 1620202.73 | -250897.57 | 524540.08 | 3534322.80 |
| 137496.97 | -1356547.92 | 521847.78 | 3538387.69 | 588262.71 | -446512.49 | 523505.61 | 3534124.05 |
| 1494.84 | -2014217.63 | 521622.23 | 3537883.38 | 301926.89 | -60952.52 | 523157.44 | 3534580.09 |
| 327444.94 | -2448022.03 | 521850.67 | 3537483.69 | 370284.31 | -403725.62 | 523231.37 | 3534202.01 |
| 100642.97 | -2394157.56 | 521640.49 | 3537548.17 | 1135418.75 | -755528.31 | 524082.34 | 3533803.00 |
| 197032.93 | -2567093.36 | 521681.75 | 3537392.17 | 931297.59 | -667642.83 | 523884.51 | 3533891.07 |
| 1444431.97 | -1818653.21 | 522975.90 | 3537978.61 | 415328.05 | -687487.55 | 523269.32 | 3533922.84 |
| 2640802.35 | -5124262.37 | 523698.12 | 3535119.07 | 908616.63 | -1572010.85 | 523845.04 | 3533002.17 |
| 3995932.40 | -3465788.12 | 524932.00 | 3536440.14 | 851920.22 | -199867.48 | 523804.97 | 3534343.49 |
| 3771967.59 | -3111412.55 | 524773.39 | 3536753.15 | 1469947.35 | -66622.51 | 524395.42 | 3534494.13 |
| 3698257.72 | -3301358.08 | 524699.01 | 3536618.35 | 664910.65 | -46971.84 | 523609.66 | 3534502.66 |
| 2235400.68 | -5566454.01 | 523278.94 | 3534660.18 | 1370722.33 | -131827.71 | 524293.04 | 3534443.81 |
| 2017102.14 | -5532502.41 | 523071.27 | 3534712.72 | 1807312.59 | -715837.63 | 524716.18 | 3533857.92 |
| 4069642.24 | -5305702.21 | 524890.43 | 3534845.39 | 2170193.75 | -2303438.40 | 525056.92 | 3532265.83 |
| 4021685.21 | -5929583.23 | 524808.50 | 3534300.44 | 693157.49 | -1855507.68 | 523566.98 | 3532738.47 |
| 3709597.58 | -5940742.56 | 524545.40 | 3534317.59 | 409657.76 | -2765542.41 | 523213.20 | 3531802.70 |
| 2652142.41 | -4117837.58 | 523775.47 | 3535980.83 | 364297.30 | -1382061.47 | 523204.22 | 3533229.45 |
| 3051877.09 | -4701847.47 | 524073.22 | 3535489.58 | 1628707.47 | -3723772.49 | 524511.24 | 3530867.33 |
| 3933562.46 | -2535907.52 | 524932.83 | 3537244.25 | 2473537.53 | -866092.44 | 525382.34 | 3533691.95 |

Anexo 2 (Continuación)

| | | | | | | | |
|------------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|-----------|------------|
| 2754202.33 | -2192872.83 | 523995.85 | 3537584.17 | 1308352.76 | -1152426.19 | 524237.46 | 3533415.52 |
| 1963237.53 | -2277922.55 | 523367.54 | 3537570.34 | 999337.51 | -1427422.64 | 523934.25 | 3533146.80 |
| 2632273.07 | -1342403.53 | 523966.76 | 3538274.58 | 806557.53 | -2059627.56 | 523690.89 | 3532536.67 |
| 429502.58 | -1132582.47 | 522156.77 | 3538577.04 | 503212.66 | -1832827.72 | 523349.84 | 3532758.44 |
| 1002172.63 | -1557832.56 | 522611.79 | 3538216.64 | 267907.59 | -1671232.54 | 523095.60 | 3532930.86 |
| 1214797.98 | -1594686.82 | 522810.04 | 3538157.04 | 335946.95 | -1923547.52 | 523145.78 | 3532663.65 |
| 1073047.92 | -3267337.26 | 522419.20 | 3536746.49 | 460687.54 | -1407577.49 | 523340.15 | 3533182.50 |
| 2436681.78 | -3199297.44 | 523664.29 | 3536767.91 | 1254487.20 | -3043372.57 | 524154.39 | 3531550.83 |
| 1761952.54 | -3754957.49 | 522996.54 | 3536283.40 | 1053202.19 | -3403416.81 | 523942.14 | 3531185.37 |
| 2028441.74 | -4004436.86 | 523233.93 | 3536088.27 | 2087977.71 | -2785387.59 | 524976.07 | 3531770.55 |
| 3437438.22 | -3769131.88 | 524448.48 | 3536220.64 | 1821487.78 | -2374312.37 | 524725.16 | 3532200.11 |
| 1285670.20 | -3695422.95 | 522566.64 | 3536351.62 | 905782.64 | -2002927.66 | 523810.13 | 3532588.23 |
| 800888.79 | -2487712.68 | 522297.37 | 3537417.74 | 2017102.67 | -3275842.10 | 524894.06 | 3531289.39 |
| 1730767.01 | -2558587.82 | 523139.84 | 3537341.50 | 2541578.07 | -3156780.55 | 525409.59 | 3531390.18 |
| 919957.23 | -3026362.56 | 522315.85 | 3536959.13 | 713002.28 | -2345963.16 | 523579.07 | 3532236.12 |
| 1821487.19 | -3202132.83 | 523140.98 | 3536792.82 | 656308.70 | -1966068.87 | 523529.12 | 3532626.01 |
| 1929217.58 | -4656487.46 | 523068.13 | 3535485.91 | 761197.13 | -2099317.96 | 523636.29 | 3532493.11 |
| 1606027.47 | -4089487.49 | 522829.80 | 3536000.67 | 738517.61 | -2144677.46 | 523610.49 | 3532447.10 |
| 2314777.13 | -4364482.70 | 523460.93 | 3535765.59 | 1044697.49 | -2827912.20 | 523934.38 | 3531760.19 |
| 1756282.50 | -4415512.42 | 522939.37 | 3535702.31 | 460687.54 | -3000847.49 | 523263.93 | 3531566.69 |
| 1795972.82 | -4401337.24 | 522979.28 | 3535721.79 | 1141086.95 | -3173781.95 | 524040.21 | 3531423.16 |
| 1869682.53 | -5110087.55 | 522988.27 | 3535106.54 | 970950.10 | -3264561.08 | 523859.05 | 3531323.53 |
| 1892362.33 | -4789732.65 | 523037.26 | 3535389.63 | 585426.97 | -2810903.64 | 523411.82 | 3531768.52 |
| 2136172.97 | -5189468.07 | 523237.61 | 3535038.31 | 653466.83 | -2740031.19 | 523494.24 | 3531842.97 |
| 2793892.86 | -5504151.93 | 523802.18 | 3534790.49 | 690322.50 | -3117082.66 | 523529.87 | 3531456.97 |
| 2204212.71 | -5421937.46 | 523273.82 | 3534838.03 | 710167.78 | -2998012.56 | 523553.71 | 3531579.70 |
| 2713634.75 | -5974469.05 | 523701.85 | 3534399.07 | 1013513.88 | -3936397.82 | 523855.51 | 3530628.23 |
| 2584069.91 | -5872684.55 | 523589.82 | 3534491.11 | 806557.76 | -4174538.36 | 523623.02 | 3530375.29 |
| 2825043.91 | -5750795.04 | 523813.65 | 3534598.13 | | | | |
| 2121996.72 | -5898217.56 | 523140.43 | 3534363.53 | | | | |
| 72290.97 | -375637.13 | 521934.18 | 3539204.02 | | | | |

Fotografías de 2006

Recorte 1

Recorte 2

| X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino | X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino |
|------------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|-----------|------------|
| 4550752.08 | -574132.92 | 521916.29 | 3539270.67 | 111975.84 | -1197792.39 | 521984.05 | 3538520.22 |
| 163012.51 | -1314022.46 | 517469.88 | 3538669.71 | 3661402.45 | -131827.55 | 525608.61 | 3539613.11 |
| 44258.61 | -509032.52 | 517365.02 | 3539484.06 | 596767.47 | -2779717.49 | 522444.55 | 3536822.86 |
| 1651452.30 | -197025.38 | 519008.26 | 3539707.18 | 123322.64 | -21262.57 | 522038.76 | 3539755.74 |
| 2039881.83 | -1339607.07 | 519418.96 | 3538619.50 | 2989507.49 | -3043372.51 | 524940.64 | 3536631.18 |
| 3273007.66 | -80797.75 | 520631.49 | 3539782.21 | 905782.51 | -1600357.43 | 522822.89 | 3538167.03 |
| 3786142.39 | -1940557.24 | 521221.45 | 3537955.51 | 1926409.48 | -1909356.98 | 523843.70 | 3537856.58 |
| 4633797.39 | -2725873.96 | 522106.16 | 3537124.50 | 599602.48 | -307597.40 | 522523.15 | 3539457.55 |
| 4613962.72 | -2482042.43 | 522054.48 | 3537375.64 | 1932052.56 | -177187.54 | 523859.06 | 3539587.79 |

Anexo 2 (Continuación)

| | | | | | | | |
|------------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|-----------|------------|
| 4441027.47 | -2309107.75 | 521895.52 | 3537557.84 | 3085898.73 | -1163773.35 | 525021.42 | 3538583.36 |
| 4644895.22 | -2082158.70 | 522049.66 | 3537782.18 | 472027.48 | -721507.44 | 522381.83 | 3539059.36 |
| 741363.55 | -214034.03 | 518100.62 | 3539705.66 | 21262.39 | -537233.14 | 521930.50 | 3539231.27 |
| 834907.29 | -403987.02 | 518187.65 | 3539500.59 | 307597.63 | -2493382.53 | 522141.67 | 3537114.43 |
| 548572.19 | -318937.80 | 517911.92 | 3539601.66 | 32602.47 | -1722262.49 | 521892.05 | 3537971.88 |
| 639292.87 | -741352.25 | 517983.82 | 3539189.69 | 216877.39 | -1705252.40 | 522088.72 | 3538021.00 |
| 540067.44 | -1798807.21 | 517851.40 | 3538224.95 | 109147.52 | -2246737.38 | 521934.79 | 3537377.48 |
| 1401907.40 | -868929.15 | 518691.73 | 3539120.65 | 114778.41 | -2394237.94 | 521903.64 | 3537203.15 |
| 1580499.23 | -922797.40 | 518940.24 | 3539059.28 | 199867.21 | -2567093.46 | 522041.85 | 3537029.82 |
| 1382062.50 | -1486957.45 | 518736.44 | 3538521.36 | 2782552.36 | -1691077.03 | 524706.50 | 3538062.81 |
| 1554984.46 | -1109896.28 | 518917.61 | 3538876.16 | 1056037.51 | -636457.49 | 522977.03 | 3539139.29 |
| 1736437.07 | -1285672.49 | 519100.73 | 3538689.92 | 650686.28 | -1903775.10 | 522551.04 | 3537832.19 |
| 936967.47 | -1495462.64 | 518226.84 | 3538519.52 | 2399827.44 | -2255242.54 | 524330.19 | 3537448.60 |
| 1651387.32 | -1393419.09 | 519018.25 | 3538596.39 | 2547247.46 | -2448022.45 | 524474.18 | 3537254.22 |
| 775371.53 | -1197788.80 | 518090.13 | 3538774.12 | 613777.22 | -2238232.27 | 522494.70 | 3537416.89 |
| 956812.53 | -999337.64 | 518292.96 | 3538989.67 | 1450101.98 | -2201377.75 | 523362.33 | 3537575.31 |
| 817896.87 | -897279.27 | 518153.10 | 3539071.06 | 1716592.71 | -2646472.33 | 523628.07 | 3537095.48 |
| 406822.57 | -1464277.47 | 517720.05 | 3538516.20 | 1073046.80 | -2839252.69 | 522970.66 | 3536808.36 |
| 352957.51 | -633622.45 | 517704.06 | 3539316.57 | 1291342.53 | -2918632.48 | 523191.27 | 3536757.70 |
| 338782.33 | -1606027.67 | 517631.37 | 3538386.47 | 1625872.67 | -3006517.55 | 523535.30 | 3536690.38 |
| 2932800.60 | -832077.25 | 520283.15 | 3539046.60 | 1727932.41 | -2938477.28 | 523636.19 | 3536760.28 |
| 2725852.43 | -231052.20 | 520090.01 | 3539655.05 | 2708842.67 | -3032032.18 | 524637.38 | 3536675.46 |
| 2224056.34 | -114817.32 | 519583.53 | 3539772.36 | 693157.43 | -3091567.53 | 522537.40 | 3536485.30 |
| 2635132.54 | -460687.49 | 519993.07 | 3539425.97 | 800887.75 | -2448022.50 | 522683.94 | 3537250.19 |
| 2351632.48 | -1039027.50 | 519717.25 | 3538893.35 | 1484122.46 | -2924302.39 | 523390.32 | 3536740.52 |
| 3910882.44 | -63787.75 | 521278.76 | 3539787.95 | 1348042.66 | -2998012.25 | 523250.63 | 3536637.83 |
| 3740782.60 | -956812.38 | 521092.68 | 3538906.72 | 1240312.50 | -2890282.35 | 523141.06 | 3536795.41 |
| 3650063.03 | -202702.66 | 521001.40 | 3539643.70 | 194326.80 | -1132962.93 | 522109.32 | 3538611.02 |
| 2473537.54 | -1895197.47 | 519876.36 | 3538055.12 | 208372.43 | -2354467.34 | 522031.90 | 3537263.66 |
| 2323282.42 | -1915042.53 | 519717.35 | 3538035.46 | 2688997.50 | -2564257.50 | 524624.38 | 3537137.00 |
| 3536662.39 | -1362217.79 | 520934.21 | 3538545.20 | 2859097.67 | -2895952.53 | 524796.34 | 3536772.18 |
| 2827910.50 | -1781787.06 | 520236.83 | 3538167.19 | 1912207.42 | -2867602.47 | 523837.31 | 3536825.29 |
| 2864767.36 | -1294177.57 | 520242.16 | 3538631.55 | 3655732.69 | -2567092.52 | 525596.64 | 3537153.48 |
| 2708847.86 | -1328194.87 | 520090.57 | 3538602.53 | 3060382.39 | -2416837.45 | 524994.97 | 3537299.16 |
| 3017876.52 | -1376421.88 | 520407.75 | 3538549.51 | 3465787.73 | -1937722.23 | 525432.50 | 3537762.65 |
| 3060350.33 | -1399056.85 | 520451.96 | 3538529.63 | 3196462.31 | -1784632.69 | 525137.65 | 3537940.26 |
| 4613911.54 | -1277213.18 | 522044.52 | 3538594.32 | 2811123.26 | -2467867.32 | 524740.74 | 3537262.39 |
| 4387162.82 | -781042.64 | 521743.70 | 3539063.39 | 2921467.59 | -2456527.79 | 524845.30 | 3537280.70 |
| 4330589.91 | -1316734.75 | 521646.94 | 3538548.57 | 715837.54 | -1002172.45 | 522626.14 | 3538775.17 |
| 4299277.57 | -1486957.50 | 521654.20 | 3538377.67 | 222547.60 | -871762.45 | 522123.98 | 3538898.23 |
| 4129729.88 | -1801844.47 | 521504.03 | 3538086.92 | 707332.48 | -1685407.36 | 522622.70 | 3538082.09 |
| 3998767.46 | -1889527.83 | 521395.44 | 3538007.97 | 1121242.51 | -2527402.56 | 523026.53 | 3537181.99 |
| 4106496.93 | -2005762.31 | 521504.64 | 3537890.79 | 908615.09 | -2949816.81 | 522777.95 | 3536694.22 |
| 4202847.16 | -1963043.65 | 521664.80 | 3537927.90 | 1523812.51 | -2431012.35 | 523446.42 | 3537296.94 |
| 4341807.89 | -1827174.42 | 521784.21 | 3538064.49 | 1518142.71 | -2637967.47 | 523426.68 | 3537096.74 |
| 4409842.41 | -1577677.64 | 521835.11 | 3538292.58 | 3417592.46 | -934132.51 | 525361.15 | 3538805.87 |
| 4276598.92 | -1739272.88 | 521717.79 | 3538151.02 | 1328197.67 | -1546492.58 | 523248.40 | 3538225.71 |

Anexo 2 (Continuación)

| | | | |
|------------|-------------|-----------|------------|
| 4582779.35 | -1801642.57 | 521983.46 | 3538062.61 |
| 4585612.33 | -1640047.43 | 521988.56 | 3538235.19 |
| 3908044.67 | -1163766.04 | 521275.12 | 3538709.52 |
| 3822997.48 | -1450102.47 | 521219.46 | 3538448.94 |
| 3601867.72 | -1798807.67 | 520991.94 | 3538109.28 |
| 3170947.50 | -1855507.49 | 520596.28 | 3538086.02 |
| 3567846.45 | -2073802.91 | 521032.32 | 3537841.20 |
| 4041292.53 | -531562.48 | 521397.70 | 3539320.42 |
| 4287937.54 | -2192872.67 | 521746.67 | 3537685.47 |
| 4027117.46 | -2326117.61 | 521485.32 | 3537563.52 |
| 3729442.58 | -2014267.43 | 521174.89 | 3537890.34 |
| 2178697.46 | -1710922.66 | 519572.07 | 3538250.02 |

Recorte 3

Recorte 4

| X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino | X Origen | Y Origen | X Destino | Y Destino |
|------------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|-----------|------------|
| 3083324.39 | -145861.13 | 525076.06 | 3536746.36 | 313303.04 | -89281.40 | 523184.96 | 3534421.91 |
| 420996.33 | -199866.00 | 522324.45 | 3536859.33 | 2870437.53 | -43942.46 | 525815.68 | 3534344.15 |
| 4018563.55 | -152264.51 | 526015.54 | 3536652.18 | 551407.39 | -3207802.48 | 523309.31 | 3531123.03 |
| 3091678.11 | -1351044.25 | 525052.15 | 3535503.52 | 1858342.53 | -41107.53 | 524798.00 | 3534401.05 |
| 1592315.66 | -1894476.81 | 523485.05 | 3534999.29 | 2720182.53 | -857587.48 | 525665.58 | 3533516.24 |
| 4083558.21 | -2181653.24 | 526017.60 | 3534598.72 | 1756282.63 | -574087.16 | 524677.39 | 3533858.00 |
| 3156772.89 | -2133337.80 | 525093.26 | 3534698.34 | 1007842.39 | -568417.73 | 523889.97 | 3533885.99 |
| 4183042.70 | -1056037.09 | 526172.38 | 3535750.55 | 1104232.69 | -63787.60 | 524022.59 | 3534408.26 |
| 4095158.47 | -579754.42 | 526100.54 | 3536243.47 | 1441597.40 | -2082307.54 | 524285.88 | 3532316.18 |
| 4004437.92 | -786712.45 | 525963.84 | 3536005.49 | 2643638.33 | -1492627.51 | 525561.52 | 3532869.17 |
| 4208557.46 | -820732.48 | 526195.33 | 3535976.06 | 2524567.64 | -2924302.23 | 525426.22 | 3531347.40 |
| 3669907.55 | -1427422.46 | 525643.05 | 3535398.81 | 863257.01 | -3669907.47 | 523627.29 | 3530628.43 |
| 3068887.42 | -730012.76 | 525050.17 | 3536139.59 | 990821.55 | -959690.09 | 523859.52 | 3533493.50 |
| 137497.11 | -43942.44 | 522042.22 | 3537026.73 | 2535907.41 | -3720937.44 | 525413.47 | 3530496.75 |
| 409658.08 | -94973.51 | 522317.15 | 3536964.58 | 2816572.49 | -2603947.84 | 525737.81 | 3531684.91 |
| 361462.38 | -52447.54 | 522267.32 | 3537007.52 | 1520977.28 | -3139765.19 | 524328.06 | 3531213.10 |
| 2484877.55 | -661972.39 | 524450.21 | 3536216.16 | 1645717.48 | -3505477.36 | 524443.44 | 3530822.68 |
| 1583348.09 | -843412.39 | 523516.42 | 3536056.66 | 2612452.37 | -335947.55 | 525559.32 | 3534065.91 |
| 1022017.76 | -764032.75 | 522933.56 | 3536232.30 | 2124832.61 | -2694667.20 | 524977.56 | 3531624.44 |
| 2788222.56 | -1308352.53 | 524714.22 | 3535524.44 | 1050366.93 | -1294177.42 | 523908.31 | 3533141.30 |
| 2195707.53 | -1716592.52 | 524106.52 | 3535137.35 | 1495462.26 | -1881022.51 | 524350.55 | 3532519.64 |
| 2399827.44 | -1107067.67 | 524340.75 | 3535762.79 | 1087222.85 | -1560667.26 | 523932.07 | 3532868.04 |
| 3548001.29 | -1141087.13 | 525484.81 | 3535659.52 | 440918.06 | -2572783.76 | 523216.09 | 3531797.62 |
| 1903702.31 | -2068132.69 | 523794.12 | 3534790.31 | 392647.01 | -786712.63 | 523237.18 | 3533692.80 |
| 2456528.14 | -2090812.84 | 524360.02 | 3534754.97 | 775372.58 | -1209127.43 | 523624.08 | 3533243.75 |
| 2051122.45 | -1974577.61 | 523965.87 | 3534885.17 | 256567.24 | -1421752.85 | 523072.70 | 3533029.51 |
| 2640802.57 | -2521732.59 | 524545.28 | 3534322.84 | 1523812.51 | -2436682.54 | 524359.27 | 3531945.35 |
| 2082392.20 | -2402717.94 | 523976.86 | 3534461.73 | 1353712.83 | -3003682.52 | 524162.42 | 3531358.87 |
| 1506802.34 | -2178697.00 | 523391.24 | 3534731.03 | 1331031.91 | -2654977.46 | 524147.93 | 3531724.25 |
| 1623037.34 | -2232562.32 | 523511.12 | 3534669.42 | 2765542.82 | -2068132.24 | 525673.13 | 3532266.53 |
| 1280002.44 | -2277922.74 | 523137.17 | 3534640.83 | 851917.40 | -3840007.23 | 523608.31 | 3530444.42 |
| 1841387.01 | -2470753.29 | 523712.59 | 3534389.25 | 1801642.48 | -3825832.55 | 524604.09 | 3530454.94 |
| 1759117.56 | -2354467.51 | 523626.19 | 3534503.17 | 1495462.45 | -880267.73 | 524379.33 | 3533545.80 |

Anexo 2 (Continuación)

| | | | |
|------------|-------------|-----------|------------|
| 2677657.47 | -1518142.45 | 524607.28 | 3535323.05 |
| 3610372.69 | -871762.57 | 525565.79 | 3535933.34 |
| 3066052.51 | -1214797.37 | 525027.51 | 3535644.94 |
| 1183666.55 | -1044876.46 | 523063.01 | 3535925.27 |
| 1736437.62 | -1314022.62 | 523648.47 | 3535566.37 |
| 1821487.60 | -945472.50 | 523756.70 | 3535942.12 |
| 1384896.79 | -1075882.59 | 523303.36 | 3535853.16 |
| 1733636.06 | -1430307.50 | 523645.01 | 3535456.02 |
| 973822.87 | -1798808.62 | 522827.81 | 3535172.78 |
| 1223302.87 | -1172272.17 | 523124.95 | 3535772.85 |
| 905548.58 | -831887.19 | 522801.11 | 3536162.77 |
| 1257322.48 | -1299847.57 | 523158.02 | 3535633.91 |
| 922792.49 | -959647.74 | 522818.26 | 3536033.11 |
| 1138249.10 | -902946.38 | 523045.26 | 3536056.87 |
| 783904.67 | -540094.11 | 522684.60 | 3536467.81 |
| 724342.55 | -489037.58 | 522620.58 | 3536519.82 |
| 644962.56 | -537232.55 | 522534.45 | 3536480.03 |
| 2107822.33 | -1172272.44 | 524040.67 | 3535705.97 |
| 1957567.52 | -1067377.76 | 523883.86 | 3535813.64 |
| 2683327.99 | -29768.28 | 524663.52 | 3536861.18 |
| 2737192.47 | -216877.74 | 524713.92 | 3536615.57 |
| 2671987.60 | -188527.74 | 524643.73 | 3536647.85 |
| 2629461.99 | -154507.03 | 524599.39 | 3536681.20 |
| 2944147.91 | -279247.55 | 524934.98 | 3536612.92 |
| 2870437.30 | -233887.85 | 524855.33 | 3536626.72 |
| 3304192.48 | -154507.46 | 525296.78 | 3536657.79 |
| 2153182.25 | -593932.36 | 524117.69 | 3536284.33 |
| 2479207.59 | -412492.84 | 524447.47 | 3536448.94 |
| 3669906.62 | -134662.88 | 525665.99 | 3536679.52 |
| 3307026.69 | -664807.90 | 525292.62 | 3536194.99 |
| 897277.55 | -182857.13 | 522833.93 | 3536812.50 |
| 1682572.07 | -41107.09 | 523645.24 | 3536821.74 |
| 1073046.92 | -26932.55 | 523032.57 | 3536967.66 |
| 1251651.70 | -41107.88 | 523211.26 | 3536873.40 |
| 1864375.22 | -52299.18 | 523843.09 | 3536825.00 |
| 2107822.92 | -137497.55 | 524084.82 | 3536696.66 |
| 2175862.66 | -7087.43 | 524159.34 | 3536815.19 |