



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN
MASA EN LA CABECERA MUNICIPAL DE TEZIUTLÁN, PUEBLA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A:

JUAN LUIS CORDERO VARGAS

ASESORA: DRA. IRASEMA ALCÁNTARA AYALA

MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA, 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatorias

A mis padres **Dolores Marcela Vargas Mercado** y **Juan Luis Cordero Leal**, que gracias a ellos soy la persona que soy y que con su apoyo incondicional, enseñanzas diarias, regaños, comprensión, educación, valores pero sobre todo amor, cumpla una de mis más grandes metas ¡Gracias infinitas!

A mis hermanas **Monica Cordero Vargas** y **Tania Cordero Vargas**, por sus consejos, jalones de orejas y por estar siempre al pendiente tanto de mi desarrollo profesional como personal ¡Las amo!

A mi novia, amiga, compañera, pareja y confidente **Yadira González Aragón**, por todo su apoyo y consejos brindados, por todo lo que hemos vivido y lo que nos falta ¡Te amo changuita!

Agradecimientos

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, a la **Facultad de Filosofía y Letras**, al **Colegio de Geografía** y al **Instituto de Geografía** por brindarme las instalaciones, profesores, apoyos y conocimiento idóneos para cursar satisfactoriamente mis estudios profesionales. A la máxima casa de estudios, gracias.

A mi asesora y profesora, Dra. **Irasema Alcántara Ayala**, por darme la oportunidad de trabajar a su lado, por guiarme y brindarme su conocimiento para poder culminar con una de mis más grandes metas, muchas gracias.

Al Mtro. y amigo **Ricardo Javier Garnica Peña**, por apoyarme en todas las cuestiones tecnológicas, digitales y cartográficas de la tesis, siempre con paciencia y compañerismo.

Al **Proyecto CONACyT 156242** “MISTLI: Monitoreo, Instrumentación y Sistematización Temprana de Laderas Inestables, el cual se desarrolla especialmente en el municipio de Teziutlán, Puebla”, por brindarme la beca con la cual pude cubrir los gastos necesarios a lo largo del desarrollo de la tesis.

A mi profesora de Geografía del Colegio de Ciencias y Humanidades plantel Oriente, **Norma Leticia Ledesma Cárdenas**, que con su entusiasmo y sabiduría, me contagió la pasión por la Geografía y es la responsable de que haya cursado la carrera, si no hubiera sido por ella estaría en otra.

A mis grandes profesores y mentores de la carrera, que con sus clases cambiaron mi visión de la Geografía y del mundo, entre ellos a la profesora **Tobyanne Berenberg Martín** (Pensamiento Geográfico y Geografía Política I y II), al Dr. **Álvaro Sánchez Crispín** (Geografía Económica I y II), al Dr. **José Juan Zamorano Orozco** (Geomorfología y Geomorfología Dinámica), al Mtro. **Reynaldo Mauricio Aceves García** (Enseñanza de la Geografía en Secundaria y Preparatoria) y el Dr. **Enrique Propín Frejomil** (Seminario de titulación).

A mi mejor amigo y hermano, **Víctor Bello Carranza**, por pasar los mejores momentos juntos en la carrera, llenos de grandes historias, trabajo, compañerismo y risas ¡Lo logramos carnal!

A mis mejores amigos de la carrera, **Arturo, Octavio y Raúl**, con los que viví momentos inolvidables tanto en el salón como fuera de él, tanto en prácticas como en fiestas, siempre con el mejor humor, los mejores chistes y la mejor amistad, gracias por su apoyo y por estar siempre conmigo.

A mi abuelita **Marcela** y a mi tía **Julia**, por todo el apoyo brindado durante el tiempo que viví con ellas, para terminar la carrera.

A mi familia, amigos y conocidos, a todas y cada una de las personas que estuvieron a mi lado en el transcurso de mi licenciatura, que se tomaron aunque sea un pequeño momento de su tiempo para brindarme su apoyo, muchas gracias a todos.

ÍNDICE

<u>Introducción</u>	1
<u>Capítulo I. Impacto de la inestabilidad de laderas en México</u>	5
1.1 Desastres en América Latina	5
1.2 Desastres en México	6
a) Volcán Parícutín (1943 – 1952)	7
b) Erupción del Chichonal en 1982	8
c) Sismo de la Ciudad de México en 1985	9
d) Inundaciones en Tabasco en 2007	9
1.3 Procesos de Remoción en Masa y tipología	11
a) Caídas o desprendimientos	12
b) Vuelcos o desplomes	12
c) Deslizamientos	13
d) Flujos	13
e) Expansiones laterales	14
f) Movimientos complejos	14
1.4 Ejemplos de procesos de remoción en masa en México	15
a) Movimiento complejo en Acapulco, Guerrero	15
b) Deslizamientos en Motozintla de Mendoza, Chiapas	17
c) Deslizamientos en Pahuatlán, Puebla	18
d) Deslizamientos en Angangueo, Michoacán	20
e) Deslizamientos en Guerrero en 2013	21
<u>Capítulo II. Inestabilidad de ladera en Teziutlán, Puebla</u>	24
2.1 Caracterización de la zona de estudio	24
2.2 Inestabilidad de laderas: antecedentes históricos	28
2.3 Desastre de 1999	30
2.4 Lluvias del 2005	34
a) Tormenta Tropical <i>José</i>	35
b) Huracán <i>Stan</i>	37
2.5 Lluvias del 2013	38
a) Tormenta Tropical <i>Barry</i>	39
b) Tormenta Tropical <i>Fernand</i>	40
c) Huracanes <i>Manuel</i> e <i>Ingrid</i>	42
<u>Capítulo III. Técnicas empleadas</u>	45
3.1 Percepción remota	45
a) Fotografías aéreas	46
Tipos de fotos	51
Blanco y negro	51
A color	51
b) Imágenes de satélite	51
Tipos de imágenes de satélite	52
<i>SPOT</i>	53
<i>IKONOS</i>	53

<i>Quickbird</i>	54
<i>Pléiades</i>	54
<i>WorldView 1</i>	54
<i>GeoEye 1</i>	55
<i>WorldView 2</i>	55
<i>WorldView 3</i>	56
3.2 Sistemas de Posicionamiento Global – GPS	57
Ventajas y desventajas	60
3.3 Sistemas de Información Geográficas	60
3.3.1 Componentes de los SIG's	61
3.3.2 Tipos de SIG	62
<i>ArcGIS</i>	62
<i>GRASS</i>	62
<i>gvSIG</i>	63
<i>ILWIS</i>	63
3.4 Fotointerpretación	64
a) Estereoscopios físicos	64
b) Estereoscopios digitales	65
3.5 Uso del PLANAR StereoMirror	66
<u>Capítulo IV. Materiales y Metodología</u>	68
4.1 Materiales	68
a) Fotografías aéreas	68
b) Imágenes de satélite	69
c) GPS	71
d) PLANAR	72
e) SIG	73
4.2 Metodología	73
a) Búsqueda de referencias bibliográficas	73
b) Creación de Modelos 3D	73
c) Análisis de Imágenes de Satélite	78
d) Fotointerpretación	80
e) Trabajo de campo	82
<u>Capítulo V. Caracterización de la distribución espacial de los PRM</u>	87
5.1 Análisis espacial	87
a) Cuadrante Ayotzingo	90
b) Cuadrante La Aurora – Río Ixticpan	92
c) Cuadrante Xoloco	95
5.2 Tipología	98
5.3 Impacto de los PRM sobre la población	100
<u>Conclusiones</u>	104
<u>Bibliografía</u>	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I. Cabecera municipal de Teziutlán, Puebla	3
Figura 1.1. Caída o desprendimiento	12
Figura 1.2. Vuelcos o desplomes	13
Figura 1.3. Deslizamiento	13
Figura 1.4. Flujo	14
Figura 1.5. Expansiones laterales	14
Figura 1.6. Caídas y derrumbes locales en la parte alta de Acapulco	16
Figura 1.7. Flujos de lodo y escombros tuvieron un alto potencial destructivo	17
Figura 1.8. Motozintla después del paso de <i>Stan</i>	18
Figura 1.9. Vista del deslizamiento de la calle Cinco de Mayo	20
Figura 1.10. Flujos de escombros devastadores	21
Figura 1.11. Deslizamiento en autopista del Sol	23
Figura 2.1. Localización de la Sierra Norte de Puebla en el país	24
Figura 2.2. Geología de Teziutlán	27
Figura 2.3. Ejemplos de la geología de Teziutlán	26
Figura 2.4. Localización de Teziutlán, Puebla	29
Figura 2.5. Trayectoria de la DT-11	31
Figura 2.6. Precipitación diaria y acumulada	32
Figura 2.7. Deslizamiento y flujo de la colonia Aurora, Teziutlán, Puebla, 5 de octubre de 1999	34
Figura 2.8. Deslizamiento de la colonia La Aurora, donde hubo mayor cantidad de víctimas fatales	34
Figura 2.9. Trayectoria de la Tormenta Tropical "José"	36
Figura 2.10. Mapa de México de la precipitación relacionada por la Tormenta Tropical José	36
Figura 2.11. Trayectoria del Huracán "Stan"	38
Figura 2.12. Trayectoria de la Tormenta Tropical "Barry"	40
Figura 2.13. Trayectoria de la Tormenta Tropical "Fernand"	41
Figura 2.14. Bloqueo por deslizamiento en la carretera a Teziutlán – Nautla	43
Figura 3.1. Elementos de un sistema de teledetección	45
Figura 3.2. Elementos principales de una fotografía aérea	48
Figura 3.3. Marcas fiduciales y punto central	48
Figura 3.4. Puntos transferidos	49
Figura 3.5. Desviación del avión	49
Figura 3.6. Línea de vuelo	50
Figura 3.7. a) Recubrimiento longitudinal; b) Recubrimiento lateral	50
Figura 3.8. Imagen de satélite de Google Earth	52
Figura 3.9. Ejemplo de imagen de satélite SPOT 4	53
Figura 3.10. Ejemplo de imagen satelital IKONOS	53
Figura 3.11. Ejemplo de imagen satelital Quickbird	54
Figura 3.12. Ejemplo de imagen de satélite Pléiades	54
Figura 3.13. Ejemplo de imagen de satélite WorldView 1	55
Figura 3.14. Ejemplo de imagen de satélite GeoEye 1	55
Figura 3.15. Ejemplo de imagen de satélite WorldView 2	56
Figura 3.16. Ejemplo de imagen de satélite WorldView 3	56

Figura 3.17. Posicionamiento de un punto sobre el globo terrestre	58
Figura 3.18. Satélites en órbita del GPS	59
Figura 3.19. Segmentos del GPS	59
Figura 3.20. Logo de ArcGIS	62
Figura 3.21. Logo de GRASS GIS	63
Figura 3.22. Logo de gvSIG	63
Figura 3.23. Logo de ILWIS	64
Figura 3.24. a) Estereoscopio de espejos; b) Estereoscopio de bolsillo	65
Figura 3.25. Ejemplo de estereoscopio digital	66
Figura 3.26. Sistema Planar StereoMirror	67
Figura 4.1. Ejemplo de fotos aéreas utilizadas de 1942 y 1956	69
Figura 4.2. Ejemplo de fotos aéreas utilizadas de 1999 y 2007	69
Figura 4.3. Ejemplo de imagen satelital LANDSAT 7	70
Figura 4.4. Ejemplo de imagen satelital SPOT 5	70
Figura 4.5. Imágenes de satélite utilizadas	71
Figura 4.6. GPS STAR S86T	72
Figura 4.7. PLANAR Stereomirror PX2611W	72
Figura 4.8. Alineación automática de las fotos en el LPS	74
Figura 4.9. Puntos de control y <i>tie points</i>	75
Figura 4.10. Triangulación del modelo orientado	76
Figura 4.11. Importación del bloque orientado a ArcGIS	76
Figura 4.12. Campos correctos en la importación del bloque orientado	77
Figura 4.13. Visión 3D del bloque de fotografías aéreas en Stereo Analyst	78
Figura 4.14. Identificación de PRM en imagen de satélite de Google Earth 2003, barranca de la colonia San Andrés, Teziutlán	79
Figura 4.15. Ejemplo del uso del PLANAR para la fotointerpretación	81
Figura 4.16. Diagrama de la metodología utilizada en la identificación de PRM	82
Figura 4.17. Levantamiento de punto en el deslizamiento de la colonia La Aurora, Teziutlán, Puebla	83
Figura 4.18. Levantamiento de punto en la desviación a Huehueimico	84
Figura 4.19. Síntoma de inestabilidad de laderas: inclinación de postes, colonia Ávila Camacho	84
Figura 4.20. Colonias visitadas en trabajo de campo	85
Figura 4.21. Casas abandonadas en la ladera de la colonia Juárez, Teziutlán	86
Figura 4.22. Colonia La Gloria sobre circo de erosión	86
Figura 5.1. Mapa de la distribución espacial de los PRM	89
Figura 5.2. Mapa: Cuadrante Ayotzingo	91
Figura 5.3. Mapa: Cuadrante La Aurora – Río Ixticpan	93
Figura 5.4. Colonias afectadas por PRM	94
Figura 5.5. Mapa: Cuadrante Xoloco	96
Figura 5.6. Rosa de los vientos utilizada	97
Figura 5.7. Porcentaje de los PRM por tipología	99
Figura 5.8. Gráfico del número de PRM identificados por colonia de la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla	101
Figura 5.9. Relación entre el número de PRM con el grado de marginación de la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de PRM	11
Tabla 2.1. Clasificación general de relieve de le Sierra Norte de Puebla	25
Tabla 2.2. Cuadro resumen sobre los deslizamientos ocurridos	44
Tabla 3.1. Resoluciones de las imágenes de diversas plataformas	57
Tabla 3.2. Ventajas y desventajas del uso del GPS	60
Tabla 4.1. Características de las fotografías aéreas utilizadas	68
Tabla 4.2. Ventajas y desventajas de utilizar Google Earth	80
Tabla 5.1. Datos generales del inventario	87
Tabla 5.2. Número de PRM identificados por año	88
Tabla 5.3. Número de PRM identificados en documentos consultados	88
Tabla 5.4. Número de PRM por punto cardinal	98
Tabla 5.5. Número de PRM por tipología	99

Introducción

Los fenómenos naturales son el resultado de la dinámica de la Tierra, en otras palabras, son las distintas manifestaciones de la naturaleza, que tienen diferentes temporalidades y magnitudes, además de manifestaciones ordinarias o extraordinarias que pueden ser previsibles o imprevisibles. Ejemplos de ellos son las lluvias, tormentas, tornados, huracanes, sequías, inundaciones, sismos, erupciones volcánicas tsunamis, procesos de ladera, entre muchos otros.

Los efectos por sí solos de los fenómenos naturales no son necesariamente desastrosos. Para que un desastre como tal ocurra, se necesita la correlación entre una amenaza y ciertas condiciones sociales inapropiadas, es decir de vulnerabilidad.

Existe una estrecha interacción entre los sistemas físicos y humanos. El sistema físico es toda la dinámica natural de la Tierra, es decir los fenómenos naturales, estas manifestaciones pueden ser llamadas amenazas, cuando pueden potencialmente afectar a una población, mientras que el sistema humano, es la relación de factores sociales, económicos, políticos y culturales de una sociedad, la cual es vulnerable en función de dichos factores. Cuando esta íntima relación entre sistemas entra en un desequilibrio se habla de riesgo, y cuando finalmente se rompe la relación, se genera un desastre (Romero y Maskrey, 1993).

Vulnerabilidad se refiere a ser susceptible de sufrir daño frente a una amenaza, o también a la incapacidad de una comunidad para absorber de manera autónoma los efectos de un cambio en su entorno social, así como la dificultad para recuperarse de tal evento.

La vulnerabilidad al ser un sistema dinámico, es decir que surge a causa de la interacción de factores y características que convergen en una comunidad, involucra la existencia de muchos tipos de vulnerabilidades como la natural, física, económica, social, política, técnica, ideológica, cultural, educativa, ecológica y institucional (Wilches-Chaux, 1993).

Entre algunas de las condiciones más frecuentes que generan riesgo, se encuentran las siguientes:

- Asentamientos irregulares en terrenos inapropiados para la vivienda, por el tipo de suelo, inclinación de las pendientes, etc.

- Construcciones de las viviendas inapropiadas, es decir no tienen la resistencia necesaria, hechas con materiales precarios, malos cimientos, etc.
- Condiciones socioeconómicas paupérrimas para vivir, tales como, pobreza, desempleo, falta de ingreso, ingreso insuficiente, marginación, escasez de bienes, analfabetismo, bajo nivel de educación, segregación social, etc.

El riesgo es el grado relativo de probabilidad de sufrir algún daño físico o material por determinado evento (Cuny, 1983).

Un desastre afecta la cotidianeidad de la sociedad, es decir, se pierden desde bienes materiales, fuentes de trabajo, hasta la vida misma. Son procesos socialmente construidos y no resultado del impacto de la naturaleza.

La ocurrencia de desastres en países en vías de desarrollo ha aumentado significativamente en los últimos años. La falta de ordenamiento territorial y adecuadas condiciones de bienestar y vivienda de la población son ingredientes fundamentales además de que se adolece de estrategias reales de cultura de prevención.

En cierta manera, los seres humanos deben entender que conviven con una “naturaleza viva”, en donde la Tierra tiene sus propias leyes de funcionamiento, las cuales no puede detener, sino comprender y sobre todo respetar.

El presente trabajo se centra en la ocurrencia de procesos de remoción en masa, vistos como uno de los más importantes tipos de amenazas, que junto con la vulnerabilidad de las sociedades han generado altos niveles de riesgos.

El área de interés es la zona urbana del municipio de Teziutlán, Puebla (Figura I), ya que ha sido afectado considerablemente por este tipo de procesos.

En su mayoría estos procesos se originan en temporadas de lluvias, por lo cual afectan a numerosas comunidades del municipio. En este sentido, el objetivo de la tesis es realizar un inventario de dichos procesos, así como su caracterización y tipología.

El objetivo general fue caracterizar la distribución espacial de los procesos de remoción en masa (PRM) en la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla y los objetivos particulares: 1) Fotointerpretar las fotografías aéreas y las imágenes satelitales disponibles de la zona de estudio; 2) realizar un inventario de los PRM; 3) identificar la tipología de los PRM existentes; y 4) elaborar un mapa de la distribución espacial de los PRM de Teziutlán, Puebla.

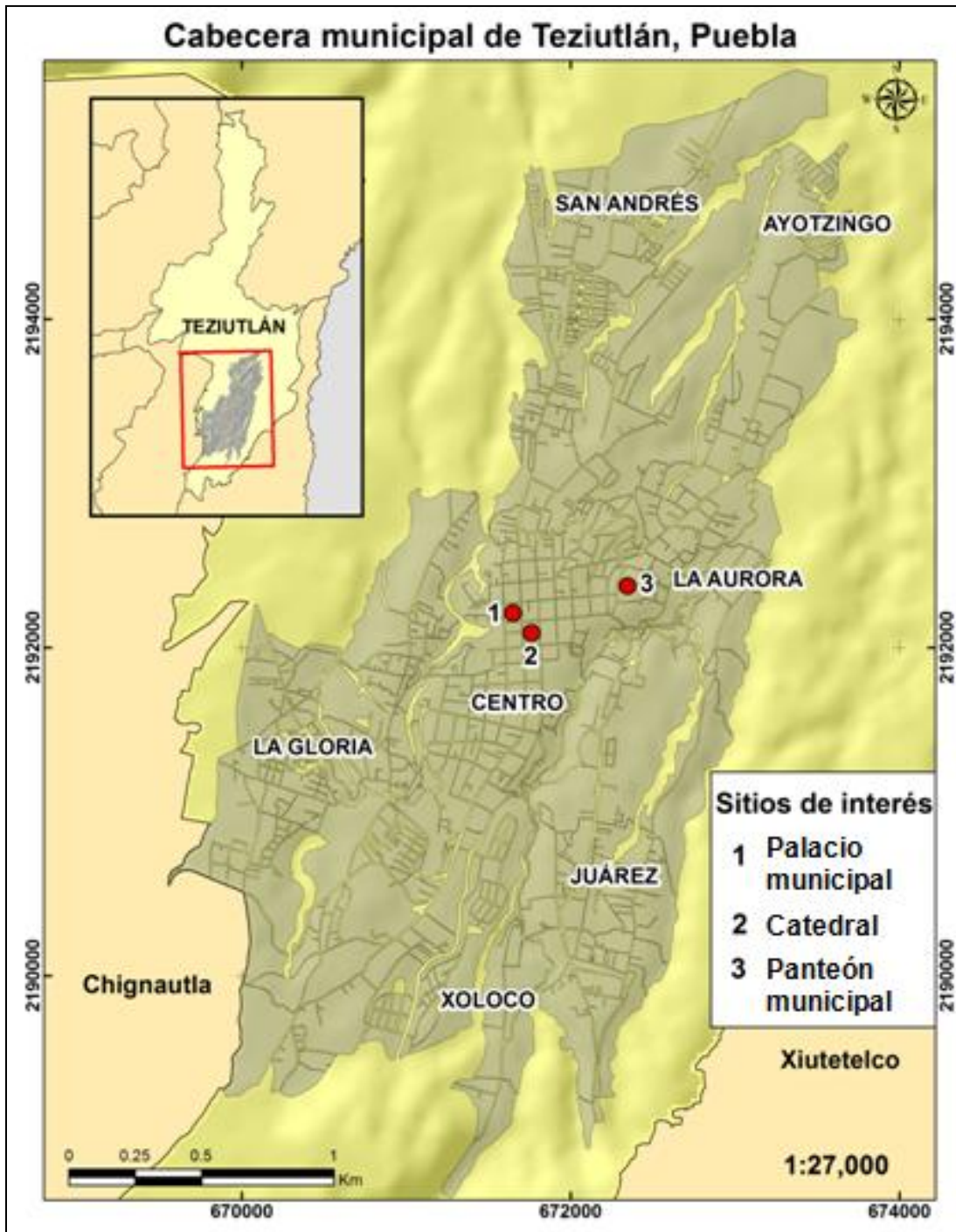


Figura I. Cabecera municipal de Teziutlán, Puebla (Con base en INEGI, 2015).

La estructura de la tesis comprende 5 capítulos. En el primer capítulo se habla de manera general de los principales desastres que han afectado el continente americano. Se hace énfasis en los desastres ocurridos en México, en particular se hace referencia a eventos como las erupciones de los volcanes Parícutín (1943 – 1952) y Chichón (1982), el sismo de la ciudad de México (1985) y las inundaciones de Tabasco (2007). En este mismo apartado, se sientan las bases conceptuales de la investigación, se definen los procesos de remoción en masa y su tipología. Por último, se hace una revisión de los principales desastres ocurridos en México por PRM, desde 1997 hasta el 2013.

De manera inicial, el segundo capítulo se centra en la descripción geográfica del área de estudio, es decir, de la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla. Después, se pone en contexto la situación del municipio con respecto a la ocurrencia de PRM; se incluyen antecedentes históricos, el desastre de 1999 y las lluvias del 2005 y 2013.

En el capítulo tercero, se abordan las técnicas utilizadas necesarias para poder llevar a cabo el inventario. Se hace un recuento del uso y funcionamiento de las herramientas utilizadas a lo largo del trabajo, entre ellas la teledetección, fotografías aéreas, imágenes de satélite, GPS, GIS, fotointerpretación y el PLANAR.

El cuarto capítulo describe el material específico utilizado en el trabajo, además de la metodología empleada para desarrollar el inventario.

En el quinto y último capítulo, se muestran los resultados obtenidos, esto es, tanto la tipología como el mapa de la distribución espacial de los procesos de remoción en masa de la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla.

Finalmente se presentan las conclusiones y discusiones pertinentes al trabajo de tesis. Por último, un apartado de las referencias bibliográficas, hemerográficas y consultas de páginas de internet.

Cabe mencionar que esta tesis fue desarrollada en el marco del Proyecto CONACyT 156242 “MISTLI: Monitoreo, Instrumentación y Sistematización Temprana de Laderas Inestables, el cual se desarrolla especialmente en el municipio de Teziutlán, Puebla”.

Capítulo I. Impacto de la inestabilidad de laderas en México

1.1 Desastres en América Latina

En América Latina el estudio de los desastres, desde una perspectiva integral, y no exclusivamente desde las ciencias naturales, es un campo de investigación que hasta hace poco empezó a recibir la atención requerida. Los terremotos de Huaraz en Perú (1970), Managua en Nicaragua (1972), y Guatemala (1976), así como la ocurrencia de desastres de gran magnitud, entre las cuales destacan las inundaciones y sequías asociadas al fenómeno del Niño (que en la década de los ochentas afectaron a muchos países de América del Sur); el sismo de Popayán en 1983 y el flujo de lodo en Armero en 1985, ambos en Colombia; y el sismo de México también en 1985, dieron pauta a la generación de investigaciones relativas a su impacto, su conformación y a la respuesta social e institucional (Maskrey, 1993).

A través del tiempo se han registrado numerosos desastres erróneamente llamados “naturales” (Maskrey, 1993), los cuales han generado cuantiosas pérdidas materiales y humanas. Gran parte de estos desastres tienen un considerable impacto principalmente en comunidades aisladas o en vías de desarrollo, debido a su alto grado de vulnerabilidad, aunque es importante señalar que incluso los países más poderosos del mundo, también son vulnerables a los desastres (Alcántara-Ayala, 2010).

El factor humano siempre está presente en los desastres, ya que la actividad antrópica afecta al medio ambiente y se establecen asentamientos humanos en zonas de exposición a riesgos. De manera particular se ha señalado que los desastres de origen meteorológico ocurridos en las últimas dos décadas, son resultado de la alteración climática global, acelerada por la acción humana (efecto invernadero, deforestación, destrucción de la capa de ozono, etc.), además de la inadecuada localización de los asentamientos (González y Baires, 1996).

Los desastres ocurren principalmente en ciudades o zonas altamente pobladas; algunos procesos que caracterizan el desarrollo actual de las ciudades y que favorecen la ocurrencia de desastres son: las transformaciones de la economía urbana, el crecimiento acelerado de la pobreza, el incremento de la fragmentación y exclusión social, el deterioro general del medio ambiente urbano (González y Baires, 1996).

Los desastres afectan a diversas partes del mundo, pero especialmente a las regiones más vulnerables de América y Asia. De acuerdo con la Estrategia

Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (por sus siglas en inglés UN/ IRDR, 2004) más del 90% de las muertes relacionadas con desastres asociados a fenómenos naturales se producen en países en vías de desarrollo.

El paso del huracán Mitch a finales de 1998 por Centroamérica, dejó un saldo de aproximadamente 20,000 víctimas entre muertos y desaparecidos, cientos de miles de damnificados y cerca de 3 millones de afectados (Sanahuja, 1999). Se calculó un monto aproximado de 6 mil millones de dólares para la reconstrucción de las zonas más afectadas, así mismo se estimó que los países más afectados por el huracán Mitch fueron Honduras y Nicaragua, lo que implicó el atraso equivalente a algunas décadas en cuanto a “Procesos de desarrollo” (Caballero, 1998).

En América Central durante el periodo de 1970 – 1994, entre el impacto de sismos, huracanes y tsunamis 5,000 personas perdieron la vida y hubo 400,000 afectados (CEPRENAC, 1996).

Antes de la ocurrencia del huracán *Katrina* en el 2005, era común suponer que el efecto de los desastres tuviera un impacto mayor en los países en vías de desarrollo (Benson, 2003). Sin embargo, este evento sirvió como parteaguas para entender que aún en las naciones más desarrolladas existen condiciones de vulnerabilidad y por ende de riesgo de desastre (Alcántara-Ayala, 2010).

Las amenazas son fenómenos naturales derivados de la interacción de la litósfera, atmósfera e hidrósfera, en la superficie terrestre, mientras que la vulnerabilidad puede ser considerada como el grado de susceptibilidad que tiene una población debido a sus condiciones socioeconómicas, políticas y culturales (Alcántara - Ayala, 2002). Aunque la vulnerabilidad no es sinónimo de pobreza, las sociedades con altos niveles de marginación son los más vulnerables (Blaikie *et al.*, 1994).

Durante décadas recientes, el impacto de los desastres ha reflejado un incremento global en el número de desastres, un decremento en el número de muertes, pero un aumento de personas afectadas (Alcántara-Ayala, 2010).

1.2 Desastres en México

Por la localización geográfica de México, se presentan varios y diversos fenómenos naturales, que aunados a las condiciones socioeconómicas del país, pueden tornarse en desastres.

Algunos de los principales desastres ocurridos en México son los que se mencionan en los apartados subsecuentes.

a) Volcán Paricutín (1943 – 1952)

El nacimiento del volcán Paricutín es uno de los eventos naturales más impresionantes mejor documentados del mundo, permitió a la sociedad y a la comunidad científica presenciar y registrar la actividad volcánica de inicio a fin (De Jesús, 2014).

El volcán surgió al Oeste del estado de Michoacán en el antiguo poblado de San Salvador Paricutín, de ahí su nombre, que perteneció al municipio de Parangaricutiro, entre valles rodeados de volcanes monogenéticos del Campo Volcánico Michoacán – Guanajuato (CVMG) (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

La actividad pre-eruptiva del volcán inició dos semanas antes (el 5 de febrero de 1943), con pequeños sismos en San Salvador Paricutín y que se percibían en los poblados contiguos, como Angahuan, Parangaricutiro, Zirosto, Los Reyes y Tancitaro (Rodríguez-Elizarrarás *et al.*, 1993).

El 20 de febrero de 1943, en la parcela, propiedad del señor Dionisio Pulido, que junto a su esposa e hijo son los únicos testigos oculares del nacimiento del volcán (Rodríguez-Elizarrarás *et al.*, 1993), alrededor de las 4:00 p.m. se escuchó un ruido similar al de un trueno en su terreno, el cual generó una grieta de casi 30 m de largo con dirección E-W. Mientras crecía la grieta comenzó a emanar una columna de ceniza, escoria y bombas volcánicas, que poco a poco fueron construyendo el edificio del volcán (Yarza, 1992). En un solo día el volcán alcanzó una altura de 30 metros (Macías y Capra, 2005).

La secuencia volcánica se caracterizó por erupciones piroclásticas rítmicas y constantes, alternada con emanaciones de lavas durante todo el periodo de actividad (Martin y Németh, 2006). Debido al tipo de dinámica se explica porqué en tan poco tiempo el volcán alcanzó medidas significativas, ya que la emisión de materiales fue constante, se acumuló cerca de la fuente y formó un cono semi-estratificado con una dimensión de diámetro en su base de forma elíptica, de 965 m en su eje mayor (NW-SE) y de 620 m de eje menor (NE-SE) y 440 m de altura (Inbar *et al.*, 1994).

Para finales de abril y principios de mayo de 1944, un potente flujo de lava llegó al poblado de Paricutín a una velocidad de 24 m/hora, la destrucción del pueblo fue total, lo que obligó a los pobladores a trasladarse a Angahuan (Ordoñez, 1947).

En el mes de mayo un flujo avanzó en dirección al poblado de San Juan Parangaricutiro, por lo que se aceleró su abandono. Para el 16 de julio de 1944, el

poblado fue sepultado en su totalidad por lava y piroclastos, sólo el campanario de la iglesia y un sector del altar mayor no fueron cubiertos (Yarza, 1992).

Tras la actividad volcánica, hubo una reconfiguración del relieve y por ende la población local se vio afectada por la destrucción de sus viviendas, campos de cultivo, desabastos en la alimentación, modos de vida y una total migración de la población a consecuencia de las emisiones de lavas y flujos piroclásticos (De Jesús, 2014).

El tiempo total de la actividad volcánica del Parícutín fue de casi 9 años (1943 – 1952), presentó un estilo eruptivo estromboliano (Pioli *et al.*, 2008). Fue un evento de tiempo relativamente lento, en el cual dio tiempo para la evacuación y reubicación de los pobladores, aún así se le considera como desastre por el impacto que causó en la vida cotidiana de las familias de San Juan Parícutín.

b) Erupción del Chichonal en 1982

Uno de los fenómenos naturales más impactantes de México que se han tornado en desastre por la magnitud de sus efectos sobre la sociedad en cuanto a factores ambientales, sociales y económicos, es la erupción del volcán Chichonal, también conocido como Chichón, en el estado de Chiapas (Alcántara-Ayala *et al.*, 2013).

El volcán Chichonal, se localiza en la porción noroeste del estado de Chiapas, a unos 60 km de la ciudad de Pichucalco, es el volcán más activo y joven del arco volcánico Chiapaneco (Macías, 2005).

La cosmovisión de la población zoque aledaña al volcán, advirtió una serie de síntomas característicos de la actividad del Chichón, es decir intensa actividad sísmica volcano-tectónica. El 29 de marzo de 1982 inició la actividad explosiva: gases, material incandescente de diversos tamaños y ceniza fueron expulsados a la atmósfera y distribuidos por el viento en varias entidades federativas cercanas al volcán (Alcántara-Ayala *et al.*, 2013).

El 3 de abril ocurrió la erupción más violenta del Chichón, el magma entró en contacto con agua, del sistema hidrotermal, lo que provocó una explosión hidrotermal violenta que destruyó completamente el domo central y generó oleadas piroclásticas, las cuales viajaron hasta 8 km del cráter, arrastrando con todo lo que se encontraba a su paso (Macías, 2005). Oleadas y flujos piroclásticos formaron una columna de aproximadamente 24 km de altura que llegó a la estratósfera; de tales magnitudes fue la columna de ceniza que en tan solo tres semanas circundó la Tierra (Alcántara-Ayala *et al.*, 2013).

La erupción tomó por sorpresa tanto a la población como a la comunidad científica, a pesar de los constantes avisos de la reactivación del volcán (Macías, 2005). Se calcula que más de 2,000 personas perdieron la vida, mientras que 20,000 más fueron evacuadas y reubicadas en nuevos centros de población (Alcántara-Ayala *et al.*, 2013).

c) Sismo de la Ciudad de México en 1985

El 19 de septiembre de 1985 a las 7:17 a.m., frente a las costas de Guerrero y Michoacán, la placa de Cocos subducía a la placa de Norteamérica, dando lugar a un evento sísmico de consecuencias excepcionales en la Ciudad de México, situada a 400 km del epicentro. El registro del sismo señala que tuvo una magnitud (Ms) de 8.1, seguido de varias réplicas, la mayor de las cuales alcanzó 7.5 Ms, que se presentó después de 36 horas (Iglesias *et al.*, 1987).

De acuerdo con datos oficiales expedidos en el IV Informe de Gobierno de Miguel de la Madrid en 1986, presidente de México en aquel tiempo, en el sismo de 1985, se registraron entre 6,000 y 7,000 muertos, aunque tiempo después se mencionan más de 10,000, alrededor de 33,000 damnificados y aproximadamente 412 edificios destruidos y 5,728 que quedaron afectados.

El mayor daño ocurrió en el centro de la ciudad, precisamente donde se localiza la antigua zona lacustre de la Cuenca de México, el sustrato actuó como una gelatina, lo cual intensificó el movimiento telúrico; en ese sitio es donde se encontraban varios centros médicos como el Hospital General de México, el Hospital Juárez, Hospital 1° de Octubre y el conjunto de Centro Médico Nacional, estos y otros edificios sufrieron bastantes daños como para ser desocupados, se perdieron alrededor de 4 500 camas y toda la infraestructura hospitalaria (Cicero *et al.*, 1986).

d) Inundaciones en Tabasco en 2007

Considerado como el desastre del 2007, las inundaciones de Tabasco en el mes de octubre, fueron producto de la relación inseparable de los factores físicos y antropogénicos (Perevochtchikova y Lezama, 2010).

Las inundaciones del 2007 en Tabasco cubrieron el 62% del territorio estatal y cerca del 75% de la población quedó damnificada en 679 localidades de 17 municipios. Éste evento tuvo un gran impacto socioeconómico, tanto en pérdidas y daños a infraestructura (puentes y caminos), en actividades económicas (agrícola e industrial), así como a nivel social (vivienda, salud y educación) y ambiental, sin

embargo, a pesar de las magnitudes del evento no se reportaron pérdidas humanas (Perevochtchikova y Lezama, 2010).

De acuerdo con Perevochtchikova y Lezama (2010), las principales causas de éste desastre, tanto naturales como sociales, son las siguientes:

- Principalmente, las condiciones meteorológicas de los meses octubre-noviembre del 2007, con una lámina de precipitación extrema asociada a los frentes fríos 2 y 4, descargada en las cuencas altas y medias del río Grijalva-Usumacinta, y como consecuencia varias avenidas de los ríos.
- Las características del suelo dificultaron la rápida infiltración del agua, lo que provocó el escurrimiento superficial del mayor volumen de agua hacia la planicie tabasqueña.
- Los cambios de uso de suelo y la nueva morfología del relieve relacionada con la deforestación de la selva tropical, para uso ganadero, industrial y expansión urbana.
- La inestabilidad geológica, reflejada en la actividad tectónica y en la formación de sinclinales y anti-clinales, así como la formación acelerada de fallas geológicas por la actividad petrolera de extracción de crudo, lo que cambió el curso de los ríos de la región, la pérdida de la línea de costa y los hundimientos del territorio.

Como en todo tipo de desastre que repercute en la calidad de vida y seguridad social de la población, es indispensable analizar de manera integral la compleja relación entre los factores naturales y los antropogénicos.

Entre los fenómenos naturales más comunes que se pueden llegar a transformar en desastres para el caso de México, se pueden mencionar a los huracanes, sismos, erupciones volcánicas, sequías, tsunamis. Sin embargo, existen otros fenómenos, los procesos de remoción en masa (PRM), a los cuales no se les ha dado tanta importancia, pero que de manera permanente representan una amenaza para las comunidades, ya que son resultado tanto de factores naturales como antropogénicos (Alcántara-Ayala, 2000).

En el territorio nacional, y desde 1999, las afectaciones por inestabilidad de laderas han sido generadas por la ocurrencia de procesos de remoción en masa, los cuales se han incrementado considerablemente. Dichas amenazas pueden ser desencadenadas por precipitación, actividad sísmica y volcánica. No obstante, en el territorio nacional, la mayor cantidad de desastres asociados con la inestabilidad de laderas han sido desencadenados por precipitación (Bitrán, 2000; Bitrán y Reyes, 2000; Alcántara-Ayala, 2008).

Los deslizamientos provocados por lluvias son frecuentes en regiones como México, donde eventos hidrometeorológicos como ciclones, huracanes, tifones, etc., son recurrentes y por ende, las consecuencias son especialmente devastadores; la mayor parte de ellos que se han producido en las últimas décadas, y han sido inducidos por lluvias extraordinarias (Alcántara-Ayala, 2004; 2008).

1.3 Procesos de Remoción en Masa y tipología

Existen diferentes definiciones relacionadas con la inestabilidad de laderas. Sharpe (1938) definió un deslizamiento (*landslide*) como un movimiento perceptible ladera abajo de una masa relativamente seca de tierra, roca o de una mezcla de ambas, a través de un mecanismo de deslizamiento o desprendimiento. Por otro lado, Skempton y Hutchinson (1969) definieron el término deslizamiento (*landslide*) como un movimiento ladera abajo de masas de suelo o roca, que ocurre en una superficie de cizallamiento en los límites de la masa desplazada. Años más tarde, Cruden y Varnes (1996), se refirieron a este tipo de eventos como el movimiento de una masa de roca, tierra o detritos ladera abajo.

Mecanismos de movimientos	Tipo de material involucrado		
	Tipología	Roca	Derrubios
Caídas o desprendimientos	Caída o desprendimiento de rocas	Caída o desprendimiento de derrubios	Caída o desprendimiento de suelos
Vuelcos o desplomes	Vuelco o desplome de rocas	Vuelco o desplome de derrubios	Vuelco o desplome de suelos
Deslizamiento rotacional simple	Individual Múltiple Sucesivo	Individual Múltiple Sucesivo	Individual Múltiple Sucesivo
Deslizamiento translacional	Deslizamiento de roca en bloque	Deslizamiento de derrubios en bloque	Deslizamiento translacional de suelos
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas	Deslizamientos de derrubios	Coladas de barro
Flujos	Flujos de rocas	Corrientes de derrubios	Flujos de tierra, arena o suelo
Expansiones laterales	Expansiones laterales en rocas	Expansiones laterales en derrubios	Expansiones laterales en suelos
Movimientos complejos	Ejemplo: Alud de rocas	Ejemplo: Flujo deslizante	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras

Tabla 1.1. Clasificación de PRM (Fuente: EPOCH, 1993, a partir de la clasificación de Varnes y Cruden, 1978 y Hutchinson, 1988, en Alcántara-Ayala, 2000).

Los PRM involucran el desplazamiento de distintos tipos de material ladera abajo, por lo que existen diferentes movimientos con una amplia variedad y complejidad. Estos movimientos, se dividen en caídas o desprendimientos (*falls*), vuelcos o desplomes (*topples*), deslizamientos (*slides*), expansiones laterales (*lateral spreading*), flujos (*flows*) y movimientos complejos (*complex movements*) (Alcántara-Ayala, 2000). En la tabla 1.1, se hace un resumen de la clasificación mencionada.

A continuación se mencionan los diferentes tipos de procesos de remoción en masa, con base en la tipología desarrollada por Alcántara-Ayala (2000):

- a) **Caídas o desprendimientos:** son movimientos de caída libre de los materiales constituyentes de una ladera tales como rocas, detritos o suelos. Este movimiento se caracteriza porque se origina en una superficie muy inclinada o vertical, después del desprendimiento del material, éste puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo (Alcántara-Ayala, 2000). La velocidad de estos movimientos puede ser rápida o extremadamente rápida, a excepción de cuando la masa desplazada sufre socavamiento o incisión (Cruden y Varnes, 1996). Este tipo de movimientos se presentan generalmente en laderas mayores a 30° (Lugo, 2011).

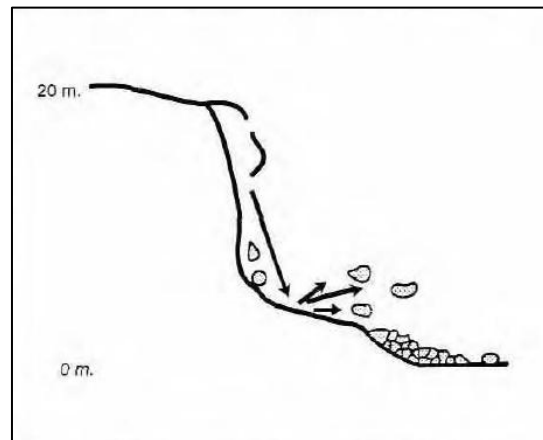


Figura 1.1. Caída o desprendimiento (WP/WLI, 1990, en Alcántara-Ayala, 2000).

- b) **Vuelcos o desplomes:** consisten en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje o pivote determinado por su centro de gravedad (Alcántara-Ayala, 2000). En otras palabras se refiere a la separación de materiales de una ladera a partir de grietas, que se amplían gradualmente, provocando una inestabilidad de bloques cada vez mayor, conduciendo finalmente a su desplome (Lugo, 2011). Su movimiento es hacia adelante por lo cual involucra una inclinación considerable, pero no implica un colapso. Se

presenta en materiales con diaclasas, grietas de tensión o superficies columnares (Alcántara-Ayala, 2000).

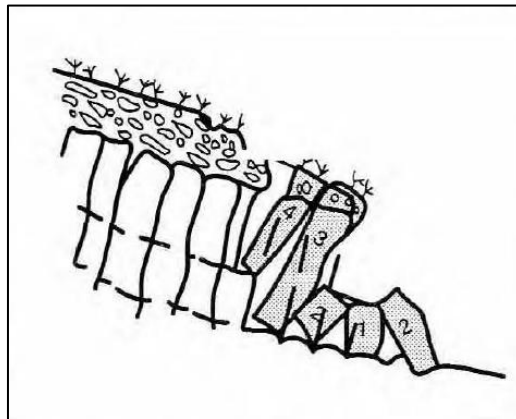


Figura 1.2. Vuelcos o desplomes (WP/WLI, 1990, en Alcántara-Ayala, 2000).

c) Deslizamientos: son movimientos ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, ocurre sobre una superficie de ruptura, la cuál define el tipo de deslizamiento; por lo que las superficies cóncavas se asocian a deslizamientos rotacionales, las superficies semiplanas u onduladas a los movimientos translacionales y por último, las superficies planas a los deslizamientos planos. La primer señal de un posible deslizamiento es la formación de grietas transversales, las cuales se localizan en la zona que ocupará el escarpe principal (Alcántara-Ayala, 2000).

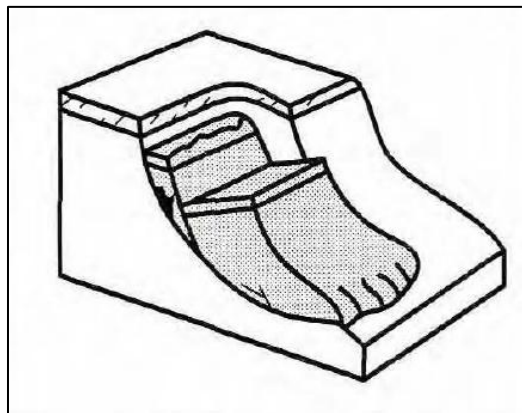


Figura 1.3. Deslizamiento (WP/WLI, 1990, en Alcántara-Ayala, 2000).

d) Flujos: son movimientos donde las superficies de cizalla son muy próximas, de poca duración y difíciles de observar. Su movimiento es muy parecido al de un fluido viscoso porque son espacialmente continuos, su velocidad es

heterogénea y se caracteriza por la formación de lóbulos. Los flujos envuelven todo tipo de material disponible a su alrededor (Alcántara-Ayala, 2000).

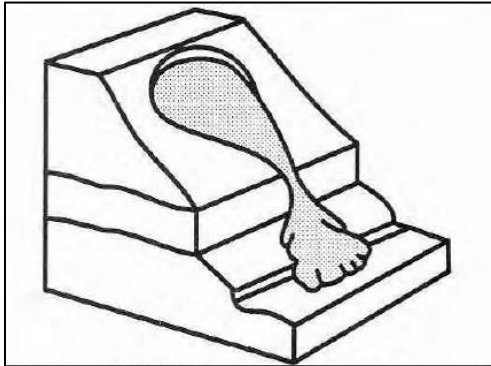


Figura 1.4. Flujo (WP/WLI, 1990, en Alcántara-Ayala, 2000).

- e) **Expansiones laterales:** Estos movimientos ocurren cuando algunos materiales gruesos, como fragmentos de rocas y grava, están contenidos en una matriz de material más fino, son el resultado de la fracturación y expansión de suelos y/o masas de roca compactos, debido a la licuefacción del material subyacente (Alcántara-Ayala, 2000).

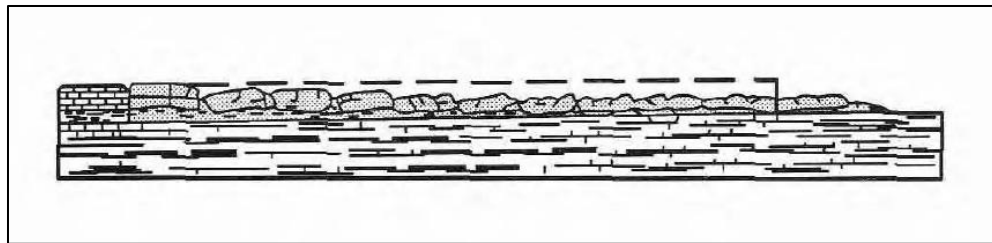


Figura 1.5. Expansiones laterales (WP/WLI, 1990, en Alcántara-Ayala, 2000).

- f) **Movimientos complejos:** es cuando se presentan más de uno de los tipos de PRM anteriormente explicados; ocurren cuando cualquier movimiento inicial se desplaza de una forma y durante su recorrido se transforma en otro al ir ladera abajo, entre los más importantes y comunes están los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes. Lo común es que la morfología resultante sea alargada y estrecha, y el área de depósito tenga un espesor relativamente bajo (Alcántara-Ayala, 2000).

México es principalmente susceptible a deslizamientos de tierra. Los grandes desastres asociados a tales procesos geomorfológicos han tenido lugar sobre todo en los últimos 15 años.

De acuerdo con un trabajo espacio-temporal de la *Base de Datos de Eventos de Emergencia* (EM-DAT, por sus siglas en inglés), realizado con la intención de evaluar los desastres ocurridos entre 1902 hasta el 2007, en México hubo 239 personas que perdieron la vida en nueve desastres asociados a procesos de remoción en masa, en varios estados del país. Por otro lado, los registros históricos analizados por Alcántara-Ayala (2008) sugieren que hubo más de 3,500 muertes asociadas con los deslizamientos de tierra que se produjeron desde 1935 hasta 2006.

La gran diferencia entre estas dos cifras de fallecidos de los mismos eventos y en mismos periodos, se debe a varias razones, de acuerdo con el EM-DAT, para que un desastre sea incluido en la base de datos, es necesario que cumpla con al menos uno de los siguientes requisitos, y en muchos casos no los cumplen:

- 1) 10 o más muertos reportados
- 2) Más de 100 personas reportadas como afectadas
- 3) Declaración de emergencia del estado
- 4) Llamado de asistencia internacional

Dentro de los registros históricos analizados por Alcántara-Ayala (2008), los muertos de los PRM se vinculan con los de las inundaciones y con los de los terremotos, además de que los criterios establecidos por el Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED) a veces no toma en cuenta las cifras de los eventos de pequeño impacto (Alcántara-Ayala, 2010) y que los datos a veces son transgiversados por razones políticas.

1.4 Ejemplos de procesos de remoción en masa en México

A continuación se describen los principales procesos de ladera ocurridos en México, de 1997 hasta la fecha.

a) Movimiento complejo en Acapulco, Guerrero

En 1997 ocurrió uno de los desastres más grandes registrados en México. Los estados de Oaxaca y principalmente Guerrero fueron afectados por inundaciones y deslizamientos, provocados en gran parte por el huracán *Pauline*. Aproximadamente en un periodo de 24 horas la precipitación registrada fue de 411 mm. De acuerdo con datos oficiales, hubo más de 200, 000 habitantes que quedaron sin hogar, 228 muertos y cientos de heridos (Alcántara-Ayala, 2004).

En la madrugada del 9 de octubre de 1997 el huracán *Pauline* provocó uno de los mayores percances registrados en Acapulco, ya que en tan sólo 5 horas las lluvias alcanzaron 400 mm. La inestabilidad de ladera inició con la saturación de los materiales térreos de la parte alta de los cerros, donde la inclinación del terreno era más pronunciada. En esos sitios se presentaron derrumbes locales de laderas e inició un movimiento complejo consistente en deslizamientos y flujos (CENAPRED, 2008).

Debido a las fuertes inclinaciones de las laderas de la parte alta de la ciudad de Acapulco (Figura 1.6), el material producto de los colapsos locales se desplazó pendiente abajo a gran velocidad en forma de flujos de escombros, los cuales se detuvieron en cuanto la pendiente se hizo más suave. El material de los flujos de escombros se acumuló de tal forma que quedaron al frente los fragmentos de roca de mayor tamaño y los de menor tamaño represados por los anteriores (CENAPRED, 2008).



Figura 1.6. Caídas y derrumbes locales en la parte alta de Acapulco (tomado de CENAPRED, 2008).

El resto del material térreo de los depósitos de los flujos de escombros (fragmentos de roca y sedimentos) junto con la gran cantidad de agua de lluvia, continuó su movimiento pendiente abajo con una gran fuerza erosiva que arrastró sedimentos y rocas del lecho de los cauces de los ríos, devastando todo lo que había a su paso, hasta descargar su caudal en la bahía (Figura 1.7) (CENAPRED, 2008).



Figura 1.7. Flujos de lodo y escombros tuvieron un alto potencial destructivo (tomado de CENAPRED, 2008).

b) Deslizamientos en Motozintla de Mendoza, Chiapas

Durante las lluvias extremas de 1998, el sureste de México, principalmente el estado de Chiapas, sufrió las mayores consecuencias causadas por inundaciones y por procesos de remoción en masa, conocidas hasta esa fecha.

Durante el mes de septiembre de 1998, la tormenta tropical *Earl* provocó intensas lluvias en el estado de Chiapas. El municipio de Motozintla de Mendoza fue uno de los lugares más afectados, donde la precipitación alcanzó aproximadamente 205 mm de lluvia en 2 días, cantidad que rebasó la media mensual, de 158.2 mm. Esto provocó que los ríos Allende, La Mina y Xelajú Grande se desbordaran, además de la ocurrencia de varios deslizamientos. Se destruyeron más de 150 casas y varias escuelas, hubo alrededor de 7,000 personas reubicadas y se reportaron 214 muertos (Hernández, 2011).

En octubre del 2005 el huracán *Stan* afectó al municipio de Motozintla. *Stan* entró a México el 2 de octubre, como una tormenta tropical, para el 4 del mismo mes se transformó en Huracán, fue el décimo primer huracán de la temporada de huracanes del 2005 en el Atlántico, y el 5 de octubre se disipó (CENAPRED, 2006).

En el municipio de Motozintla la precipitación continuó por más de tres días y medio, alcanzó 1,300 mm de lluvia (Figura 1.8). De acuerdo con lugareños de la zona, cerca del 70% de la población fue afectada, hubo más de 13,000 damnificados, así como 800 viviendas destruidas y otras parcialmente dañadas, además de 15 personas muertas a causa de un deslizamiento (Hernández, 2011).

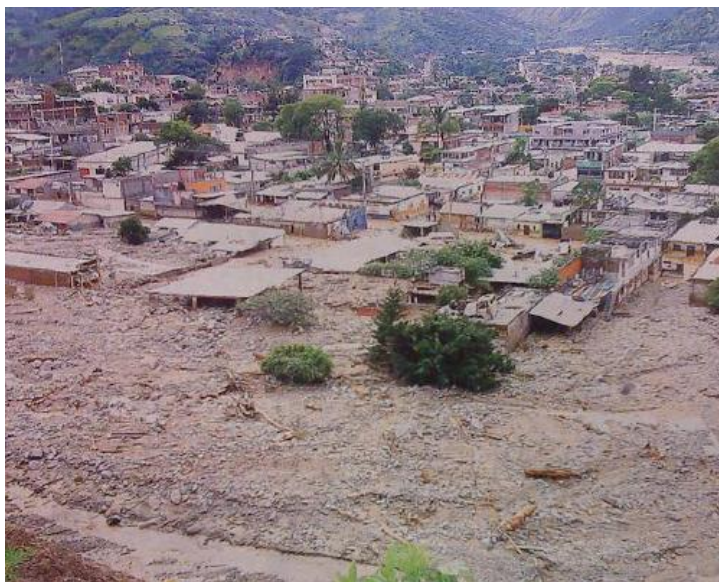


Figura 1.8. Motozintla después del paso de *Stan* (Fuente: El Universal, 7 de octubre, 2005).

La severidad del desastre se vio reflejado en la cantidad de deslizamientos que ocurrieron al margen de las carreteras, ya que para el 21 de Octubre del mismo año, la entrada a Motozintla por carretera aún estaba totalmente cerrada, la única forma de arribo a la ciudad era por helicóptero (La Jornada, 22/10/05).

Los desastres ocurridos en Motozintla en el 2005 fueron mayores que en 1998, el desbordamiento de los ríos y los deslizamientos fueron más intensos y en mayor número; el huracán *Stan* introdujo considerable humedad al territorio nacional especialmente en esa región con altos niveles de vulnerabilidad.

c) Deslizamientos en Pahuatlán, Puebla

La región de la Sierra Norte de Puebla ha sido afectada continuamente por lluvias extraordinarias, las cuales provocan numerosos daños y pérdidas en la región. En 1999, uno de los municipios más afectados fue Pahuatlán, en esa ocasión el daño no fue tan grande en la cabecera municipal, pero sí en las otras comunidades, especialmente las indígenas. En Cueunautla de la Paz, es donde se registraron la mayor cantidad de PRM, además de que varios pobladores fueron evacuados y posteriormente reubicados (Murillo, 2013).

De acuerdo con Murillo (2013), en una superficie de 54.9 km², el porcentaje de área total afectada por PRM fue de 31.7% y se identificaron un total de 577 PRM. Estos se clasificaron de acuerdo a su edad como muy antiguos, antiguos y recientes. Dicha clasificación comprende las siguientes cifras:

- 1) Muy antiguos, los cuales tienen miles de años de antigüedad: 21 PRM
- 2) Antiguos, que son anteriores a 1994: 171 PRM
- 3) Recientes, ocurridos desde 1994: 385 PRM

De estos, un 36% de los PRM recientes ocurrieron en zonas en las que se tienen registros de movimientos de ladera antiguos y muy antiguos, esto pone en evidencia el hecho de que gran porcentaje de los movimientos actuales son reactivación de procesos anteriores (Murillo, 2013).

En el 2005, el huracán *Stan* ocasionó fuertes lluvias en la sierra Norte de Puebla, y con ello se reactivó un deslizamiento en la calle Cinco de Mayo en Pahuatlán, el proceso comenzó a intensificar su movimiento ladera abajo y pronto afectó casas, destruyó dos o tres de ellas, afectó a una decena más; aunado a esto el deslizamiento destruyó la clínica de salud del poblado. Este deslizamiento fue de dinámica lenta, con algunos episodios en los que se incrementó su actividad, aún así no se registraron pérdidas humanas ya que se pudo evacuar con tiempo (Murillo, 2013).

En el 2007, otro movimiento de ladera muy cercano al de la calle Cinco de Mayo (Figura 1.9), hizo que la escuela primaria Leandro Valle fuera evacuada y finalmente abandonada. Este problema ha causado mucha molestia entre la población de Pahuatlán, pues ni las autoridades municipales, estatales y federales han construido una nueva escuela (Murillo, 2013).

En 2010 el problema se intensificó debido a que Protección Civil municipal declaró otra zona de riesgo por PRM en el lugar donde se localizaba la nueva clínica de salud del municipio. Los movimientos de ladera que afectaban a la escuela primaria y a la clínica de salud eran lentos, por lo que las construcciones presentaban tan solo algunas cuarteaduras, lo cual dio la impresión a la población de que el problema se había exagerado (Murillo, 2013).



Figura 1.9. Vista del deslizamiento de la calle Cinco de Mayo (tomada de Murillo, 2013).

4) Deslizamientos en Angangueo, Michoacán

Entre el 5 y 7 de febrero del 2010 las fuertes lluvias originadas por el paso del frente frío número 29 y la quinta tormenta invernal de la temporada, provocaron varios deslizamientos en Michoacán. El principal municipio afectado fue Angangueo con 11 víctimas fatales debido al deslizamiento ocurrido en los cerros Guadalupe y San Pedro; las colonias El Sauz y el Catingón fueron las más perjudicadas. Hubo más de 100 casas afectadas, decenas desaparecieron, otras quedaron bajo árboles, piedras y escombros. El municipio de Ocampo sufrió la pérdida de 10 personas, que quedaron debajo del lodo que dejó el deslizamiento de otro cerro, y dos pérdidas más en Zitácuaro, (La Jornada, 8/02/2010).

Por otro lado, en un estudio realizado en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (Alcántara-Ayala *et al.*, 2011), hace referencia a que hubo 19 víctimas fatales y pérdidas económicas. Los municipios de Angangueo, Ocampo, Tiquicheo de Nicolás Romero, Tuxpan y Tuzantla fueron los que sufrieron más daños, y fue precisamente Angangueo el más afectado.

El episodio regional de deslizamientos incluyó una serie de flujos de escombros, de los cuales 4 fueron los más significativos (Figura 1.10), estos causaron 16 pérdidas humanas, además de daños considerables en caminos, instalaciones eléctricas, y en el sistema de abastecimiento de agua, y por si fuera poco afectó directamente a cultivos, a la ganadería y el turismo (Alcántara-Ayala *et al.*, 2011).



Figura 1.10. Flujos de escombros devastadores (tomado de Alcántara - Ayala *et al.*, 2011).

El área afectada por los flujos de escombros se calculó en 282 km², movilizándolo un total de 697,346 m³ de material, esto se originó en zonas deforestadas, desencadenados por precipitación extrema. La lluvia registrada del 1 al 5 de febrero en la estación meteorológica Laguna de Fresno, fue de 204 mm de lluvia, lo que representa el 30% de precipitación media anual (Alcántara-Ayala *et al.*, 2011).

5) Deslizamientos en Guerrero en 2013

El paso de los huracanes *Ingrid* y *Manuel* por las costas del golfo de México y del Pacífico mexicano, respectivamente, entre los días 12 y 20 de septiembre del 2013, dejó grandes afectaciones en todo el país, particularmente en el estado de Guerrero.

Manuel era un huracán categoría 1, que tocó tierra como Tormenta Tropical (TT) en la costa sur de México, produjo lluvias muy fuertes en varias partes del país, inició el 12 y se disipó 20 de septiembre del 2013 (NOAA, 2014).

Ingrid, un huracán de categoría 1, originado en el Golfo de México, tocó tierra como TT en el NE de México, inició su trayectoria el 12 de septiembre y se disipó el 17 del mismo mes. En combinación con el huracán Manuel, provocó fuertes

lluvias, grandes inundaciones, varios deslizamientos y muchas pérdidas humanas en México (NOAA, 2014).

La combinación de los huracanes Ingrid y Manuel en los días 15 y 16 de septiembre, dejó grandes afectaciones por la costa del Pacífico mexicano en el estado de Guerrero, especialmente en los municipios de Atoyac, Tecpan y Coyuca de Benítez, donde se reportaron personas desaparecidas y más de 30 comunidades incomunicadas.

De acuerdo con un informe del Servicio Meteorológico de México y de Protección Civil, se han atribuido 123 muertes a *Manuel*. Casi todas estas muertes fueron resultado de las fuertes lluvias. Al menos 97 personas perdieron la vida en el estado de Guerrero, muchas de las cuales se produjeron por un deslizamiento de lodo que destruyó la mitad del pueblo de La Pintada.

Además de las pérdidas de vida, muchas personas quedaron incomunicadas. Por medio de helicópteros se logró la comunicación con estos municipios y así el traslado tanto de personas como de víveres, medicina y ropa para las personas afectadas. Además de haber perdido sus hogares, también se perdieron cosechas y ganado (El Universal, 18/09/2013).

De acuerdo con las autoridades locales en el municipio de Ixtapa-Zihuatanejo, hubo 16 mil damnificados, 4,500 turistas varados, además de 6 colonias con inundaciones graves, aproximadamente 4,500 viviendas dañadas, y en la carretera federal Acapulco-Zihuatanejo ocurrieron varios deslizamientos que obstruían el paso (El Universal, 18/09/2013).

Elementos de la Marina y del Ejército Nacional reforzaron la seguridad en la zona Diamante de Acapulco, ya que se dieron problemas de saqueo en diversos comercios. En la capital, Chilpancingo presentó problemas de incomunicación provocado por el desbordamiento del río Huacapa, ahí mismo se registraron 2,400 personas en albergues temporales, mientras que los que se quedaron en sus hogares tuvieron escasez de alimentos, se incrementó el costo de la canasta básica y del servicio de transporte público, ocasionando problemas económicos y alimenticios (El Universal, 18/09/2013).



Figura 1.11. Deslizamiento en autopista del Sol (Fuente: Excelsior, 19 de Septiembre 2013).

El paso del huracán *Manuel* por el litoral Pacífico, en Acapulco, Guerrero, dejó al menos diez viviendas inundadas en la Costa Chica de la entidad, además de varios deslizamientos y desprendimientos de rocas, afectando las comunicaciones terrestres, como las calles y avenidas del puerto de Acapulco (El Universal, 17/09/2013).

Capítulo II. Inestabilidad de ladera en Teziutlán, Puebla

2.1 Caracterización de la zona de estudio

El municipio de Teziutlán se encuentra entre los paralelos 19°46' y 19°58' latitud Norte y los meridianos 97°19' y 97°25' longitud Oeste. Al NE del estado de Puebla, en el sector SE de la Sierra Norte de Puebla, que es la transición de 3 provincias fisiográficas: la Sierra Madre Oriental, la Faja Volcánica Transmexicana y la Planicie Costera del Golfo de México (Figura 2.1). Posee una extensión territorial de 92.6 km².

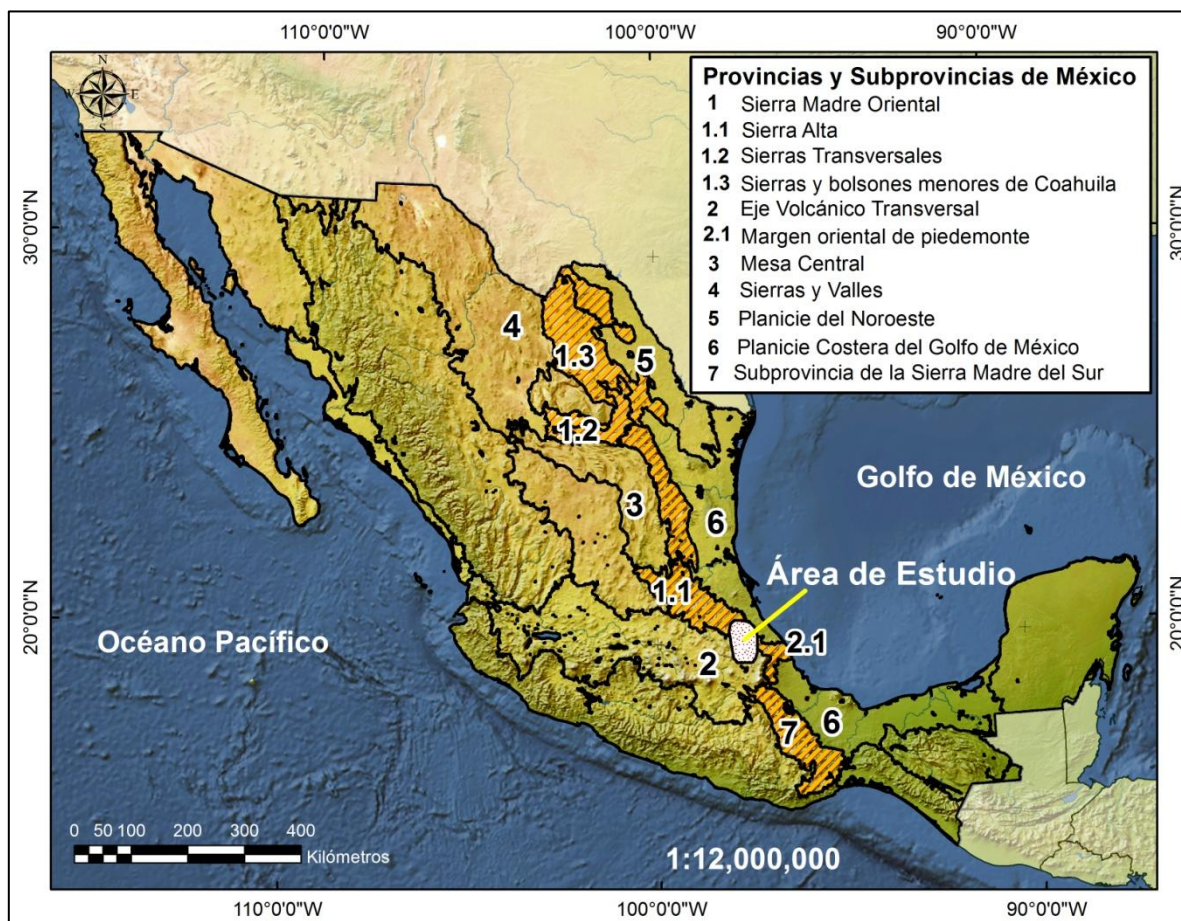


Figura 2.1. Localización de la Sierra Norte de Puebla en el país (Modificado con base en Raisz, 1961; Quiñones, 1987; y Lugo y Córdova, 1995; tomado de Lugo *et al.*, 2005. Datos tomados de INEGI, 2015).

La Sierra Norte de Puebla representa el extremo sur de la provincia geológica y geomorfológica de la Sierra Madre Oriental, que se divide en tres niveles altitudinales principales; éstos se diferencian principalmente por la disección del

relieve y están controlados por la geología, estos son: 1) la ladera superior que va aproximadamente de los 1000 a los 2000 msnm, se divide en 3 subprovincias: meridional, central y septentrional, cuyas diferencias son el tipo de rocas expuestas, la disección del relieve en cuanto a densidad y profundidad y la dinámica actual; 2) la ladera inferior que va de los 400 a los 1000 msnm, en este nivel los valles fluviales disminuyen en cantidad y en profundidad; y por último, 3) la premontaña que va de los 200 a los 400 msnm (Lugo *et al.*, 2005).

La Faja Volcánica Transmexicana tiene características geológicas y altitudinales que permiten la división en tres unidades de segundo orden: 1) Tlaxco-Tulancingo, con altitudes que oscilan entre los 2000 y los 2400 msnm, predominando rocas volcánicas precuaternarias, lavas y piroclastos, muy resistentes a la erosión; 2) Libres, que va de los 2000 a los 2500 msnm, la principal característica que presenta es la poderosa erosión remontante, que deja en evidencia rocas mesozoicas sedimentarias plegadas; y 3) Los Humeros, donde se presentan las mayores alturas, de entre los 2000 a los 2800 msnm, presenta una cobertura volcánica cuaternaria, sin consolidación, proveniente de la caldera del mismo nombre (Lugo *et al.*, 2005).

La provincia de la Planicie Costera del Golfo de México, se caracteriza por la presencia de elevaciones mayores con dirección al oriente que se convierte en elevaciones menores, es decir, el relieve se suaviza y consiste en lomeríos bajos que constituyen el Piedemonte, con una estructura monoclinial y conformada por rocas sedimentarias del Paleógeno-Neógeno, con algunas conjugaciones locales con rocas volcánicas cuaternarias (Lugo *et al.*, 2005).

En la tabla 2.1, se hace un resumen de las unidades geológicas principales.

Unidades geomorfológicas principales			
Primer orden	Segundo orden	Tercer orden	Altitud (m)*
I. Sierra Madre Oriental	1) Ladera Superior	<ul style="list-style-type: none"> • Meridional • Central • Septentrional 	2000 – 1000
	2) Ladera Inferior		1000 – 400
	3) Premontaña		400 – 200
II. Faja Volcánica Transmexicana	1) Tlaxco-Tulancingo		2000 – 2400
	2) Libres		2000 – 2500
	3) Los Humeros		2000 – 2800
III. Planicie Costera del Golfo de México	Piedemonte		< 400

*Se indican los valores aproximados de altitud mínima y máxima

Tabla 2.1. Clasificación general de relieve de la Sierra Norte de Puebla (tomado y modificado de Lugo *et al.*, 2005).

El relieve de Teziutlán es montañoso; se caracteriza por un descenso en la altitud en forma de rampa en dirección S-N. La altura oscila entre los 300 y 2 280 msnm.

La geología (Figura 2.2), se caracteriza por un basamento conformado por rocas metamórficas de esquisto de la formación Chillis, datadas en el Pérmico Inferior, afloran en las porciones norte y noroeste del municipio de Teziutlán, en el distrito minero de Aire Libre (SGM, 2011).

El material sedimentario se encuentra en los macizos montañosos que rodean al municipio de Teziutlán. Entre ellos podemos encontrar caliza con nódulos y algunas bandas de pedregal negro y de estratigrafía media a gruesa, lutita y arenisca (SGM, 2011).

El tipo geológico que más abunda es ígneo, se relaciona con la actividad efusiva y explosiva proveniente de la caldera de Los Humeros. Sobreyace discordantemente a la secuencia sedimentaria de la Sierra Madre Oriental, la formación Andesita Teziutlán, constituida por andesita, andesita-basáltica y basalto (SGM, 2011). La presencia de materiales de caída como ignimbrita, pumicita, pómez, toba, ceniza y lapilli, cubren al sustrato rocoso de andesita-basalto (Ferriz, 1984). Los materiales de caída se distribuyen a lo largo de todo el municipio (Figura 2.3).

Los materiales de la actividad explosiva tienen un arreglo, disposición y grosor muy heterogéneo. El basalto y la andesita sólo quedan al descubierto en los lechos de los ríos, ya que todo el demás material ha sido removido.



Figura 2.3. Ejemplos de la geología de Teziutlán (Elaboración propia).

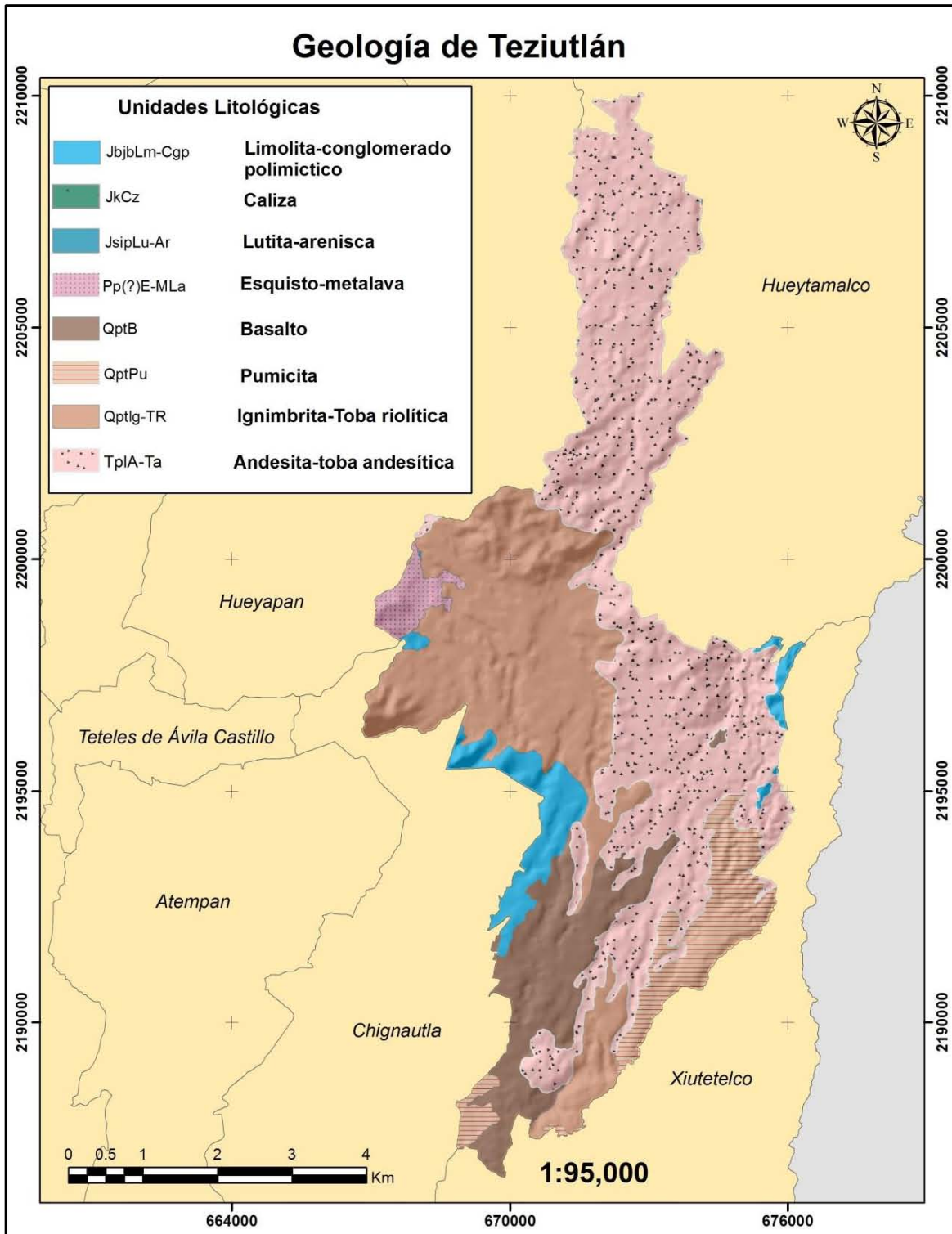


Figura 2.2. Geología de Teziutlán (Con base en SGM, 2011).

El clima de la zona es templado húmedo con lluvias todo el año, con una precipitación media anual de 1 593 mm; la temperatura varía de entre 13.1°C en enero y 18.6°C en mayo (García, 1981). El municipio pertenece a dos cuencas hidrológicas; al norte y oeste a la del río Tecolutla, mientras que al sur y este a la del río Nautla, ambas desembocan en el golfo de México. El suelo que predomina es el andosol por su origen volcánico con alta capacidad de retención de agua y nutrientes, mientras que la vegetación al norte y noreste del municipio es de tipo bosque mesófilo de montaña y bosque de encino. En el sur y suroeste la vegetación es de tipo bosque de coníferas, con ejemplares como el ocote, encino, el pino colorado, el liquidámbar, el jaboncillo y también algunos árboles frutales como pera, aguacate y durazno; las zonas bajas y urbanas han sido fuertemente deforestadas por lo que han perdido su vegetación original (INEGI, 2010).

Teziutlán colinda con los municipios de Hueytamalco al NE, Xiutetelco al SE, con Hueyapan al NW y finalmente al SW con Chignautla (Figura 2.4).

La población de Teziutlán para el año de 2010 era de aproximadamente de 92,246 habitantes (INEGI, 2010). La migración rural-urbana, es decir de algunos municipios aledaños tanto del norte de Puebla como de Veracruz hacia Teziutlán, dio como resultado un rápido crecimiento de asentamientos humanos irregulares sobre laderas de suelos inestables. Esto aunado a la pobreza y construcciones inadecuadas, incrementa la probabilidad de que existan un número importante de procesos gravitacionales que puedan afectar a la población. Especialmente dichos movimientos pueden ser desencadenados por precipitaciones extraordinarias o sismicidad (Bitrán, 2000).

2.2 Inestabilidad de laderas: antecedentes históricos

La ocurrencia de PRM en México se remonta a tiempos geológicos e históricos. Sin embargo, debido a que con mayor frecuencia se originaban en sitios inhabitados, no afectaban a poblaciones vulnerables expuestas, y por ende, no ocurrían desastres. Desde hace poco más de 15 años, éstos fenómenos se han incrementado en zonas urbanas, por el crecimiento de la población, así como por el incremento de lluvias extraordinarias y de larga duración; lo cual ha originado miles de deslizamientos, que afectan tanto a sus habitantes como a vialidades e infraestructura.

En la Sierra Norte de Puebla, la influencia de los huracanes que propician lluvias extraordinarias, las cuales pueden desencadenar procesos de ladera se han observado desde hace varias décadas. Entre ellos cabe destacar los huracanes

Hilda en 1955, Janet en 1955, Beulah en 1957, Fifi en 1974, Diana en 1990 y Gert en 1993 (Alcántara-Ayala, 2004).

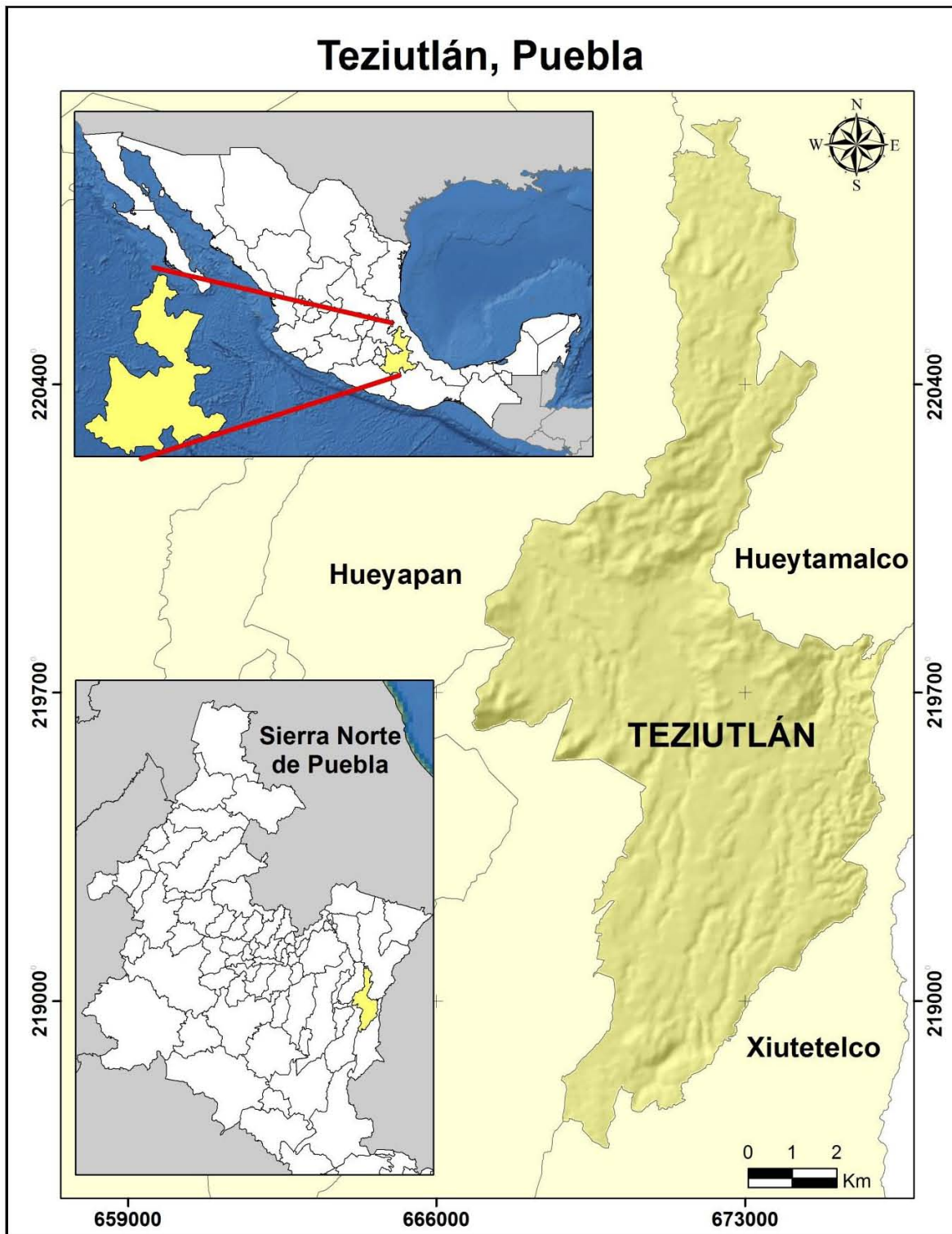


Figura 2.4. Localización de Teziutlán, Puebla. (Con base en INEGI, 2015).

Particularmente en Teziutlán, entre los antecedentes de lluvias extraordinarias que han afectado al municipio se encuentran las de septiembre de 1944. Estas fueron provocadas por una perturbación tropical e involucraron más del 50% del volumen de precipitación media diaria en la región. En esa época Teziutlán estaba poco poblado y con poca infraestructura carretera, por lo que no hubo grandes daños (Lugo *et al.*, 2005). Otras se debieron a huracanes como *Hilda*, que de acuerdo con Carrillo *et al.* (2002) fue uno de los más destructivos en México en el siglo XX, así como los huracanes *Beulah*, *Fifi*, *Diana* y *Gert*, anteriormente mencionados.

2.3 Desastre de 1999

En los primeros días del mes de octubre de 1999, se presentaron lluvias extraordinarias como resultado de la depresión tropical número 11(DT. 11), proveniente del Golfo de México, los días 4 y 5. Cabe mencionar que durante la última semana de septiembre se habían registrado lluvias considerables, por lo que en el suelo había un alto grado de saturación de agua, y fácilmente se generaron una infinidad de procesos de remoción en masa, varios de ellos movimientos complejos, con mecanismos de deslizamientos y flujos, además de inundaciones, en la Sierra Norte de Puebla (Lugo *et al.*, 2005).

De acuerdo con Lugo *et al.* (2005), el desastre de 1999 fue un evento que involucró miles de procesos de caída, deslizamientos y flujos, de características muy singulares y único en la historia geomorfológica de México en el siglo XX. Su magnitud fue tal, que no se tienen referencias de eventos parecidos a nivel mundial, donde lluvias extraordinarias en tan solo tres días hayan este tipo de desastres en una zona particular.

El desastre de 1999 fue catalogado como el de mayor impacto en México durante esa década, debido al número de muertos y por las pérdidas económicas. De acuerdo con Bitrán *et al.* (2000), hubo 263 víctimas fatales y casi 1.5 millones de personas afectadas en la Sierra Norte de Puebla, la mayoría pertenecientes a Teziutlán. Hubo daños en la infraestructura carretera, transporte, vivienda, salud, educación y agricultura. Se calcula que los daños sobrepasaban los 450 millones de dólares (Bitrán, 2000).

De acuerdo con el reporte del Servicio Meteorológico Nacional (1999, actualizado en 2009), se menciona que el día 4 de octubre de 1999 por la tarde, se formó en el Golfo de México la DT. 11, por cuyos efectos se le considera como el ciclón tropical que causó la mayor cantidad de daños en México para la temporada 99. A pesar de que su centro no tocó tierra firme directamente, su cercanía, desplazamiento e interacción con un sistema frontal, además del factor orográfico,

ocasionaron lluvias torrenciales con las consecuentes inundaciones y deslizamientos.

La formación de la DT.11 (Figura 2.5), se inició aproximadamente a 90 km al Noreste de Coatzacoalcos, Veracruz, en el sur del Golfo de México, con vientos máximos sostenidos de 55 km/h, permaneció “semiesticionada” hasta la mañana siguiente. El 5 de octubre, la DT-11 comenzó a desplazarse lentamente, y se localizó a 150 km al Norte de Coatzacoalcos. Al final del día se ubicó a 135 km al E-NE de Veracruz, nuevamente como “semiesticionada” y con la misma fuerza de vientos. Durante las primeras horas de la madrugada del 6 de octubre, la DT-11 se mantuvo con la misma fuerza “semiesticionada” frente a las costas de Veracruz. Por la tarde, como resultado de la interacción con el frente frío No. 5, la DT-11 se degradó a una línea de vaguada, cuando se encontraba a 240 km al N-NW de Veracruz, (SMN, 1999, actualizado 1999).

La DT-11 favoreció la entrada de humedad con importantes precipitaciones hacia las costas e interior del país, con un registro de lluvia máxima puntual en 24 horas de 420.0 mm en Tenango, Puebla. (Octubre 4), 382 mm en La Laguna, Puebla. (Octubre 5), de 212,2 mm en Martínez de la Torre, Veracruz. (Octubre 5), y de 102 mm en la Presa La Esperanza, Hidalgo (Octubre 6) (SMN, 1999, actualizado 2009).

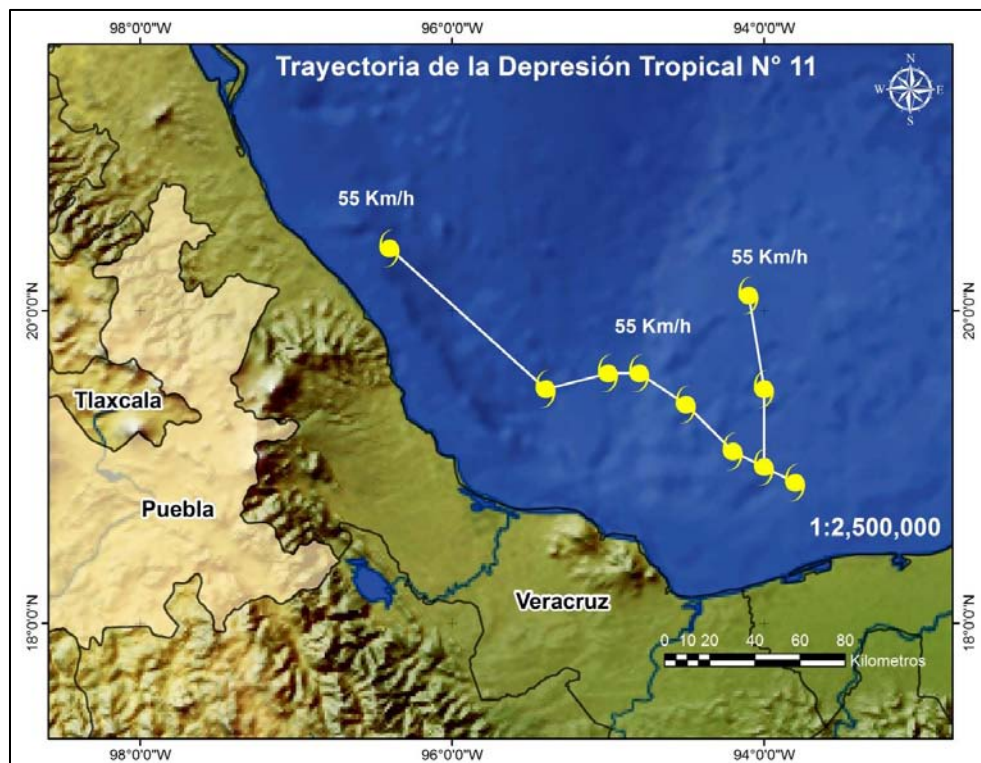


Figura 2.5. Trayectoria de la DT-11 (Con base en NOAA, 2015).

El total de municipios afectados por estas lluvias fueron 81, pero los que tuvieron consecuencias mayores fueron 41, entre ellos, Apulco, Chignahuapan, Cuetzalan, Huauchinango, Necaxa, Pahuatlán, Tetela, Teziutlán, Tlatlauquitepec, Totomoxtla, Patla, Zacapoaxtla, Zacatlán, Zapotitlán de Méndez y Zaragoza (Alcántara-Ayala, 2004; Bitrán, 2000).

De acuerdo con Alcántara-Ayala (2004), en Teziutlán la precipitación acumulada sumó, en tan solo 4 días, 743 mm, cuando la media anual es de 1 593 mm; es decir, que del 3 al 6 de Octubre llovió el 50% de lo que normalmente llueve al año. Con estos datos es evidente la importancia de la precipitación como factor desencadenante en la inestabilidad de laderas.

De acuerdo con información obtenida de una base de datos creada por CONAGUA y el SMN, con todas las estaciones climatológicas de la República Mexicana sobre datos atmosféricos históricos y actuales, se realizó un gráfico (Figura 2.6), en donde se observa la precipitación diaria y acumulada desde el día 27 de septiembre hasta el 6 de octubre, utilizando la información de la estación 21074 de San Juan Acateno (CFE).

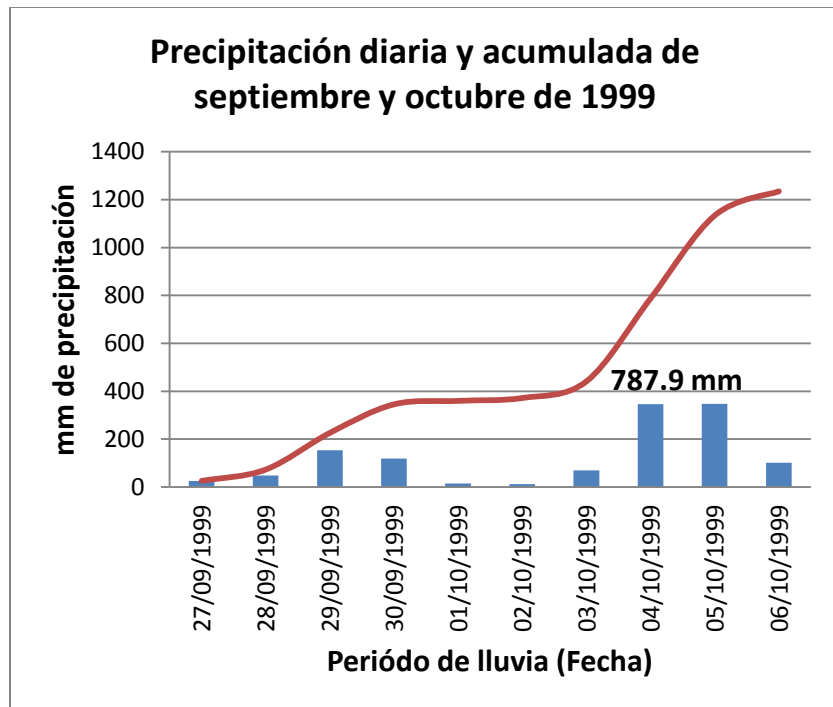


Figura 2.6. Precipitación diaria y acumulada (27 de septiembre al 6 de octubre) (Con base en CNA-SMN-SCDI, San Juan Acateno CFE)

En la figura 2.6 se aprecia que la precipitación acumulada del día 27 de septiembre hasta el 4 de octubre, este último, el día que ocurrieron más deslizamientos y los más devastadores, sumó 787.9 mm de lluvia, lo que pone de manifiesto que el suelo ya presentaba una gran saturación de humedad. Ello desencadenó una cantidad de procesos gravitacionales considerables, debido a que el suelo no podía retener mayor cantidad de agua en los días venideros.

Aunado a todos los fenómenos meteorológicos, también hay que considerar que el suelo de la región presentaba una fuerte erosión provocada por la deforestación y el cambio del uso del suelo, actividades que han aumentado en los últimos 35 años. Tanto el desarrollo de la actividad forestal como el de la agropecuaria han contribuido al intenso proceso erosivo del terreno, y a incrementar la susceptibilidad a procesos de remoción en masa (Bitrán, 2000).

De acuerdo con datos que publicó el periódico La Jornada de Oriente en su artículo *Lo natural del desastre de octubre de 1999*, en el municipio se afectaron 263 casas, 218 ha de cultivo, 1,158 damnificados, 55 escuelas y un conjunto de daños más (Fernández *et al.*, 2009).

En la cabecera municipal de Teziutlán las colonias afectadas fueron La Gloria, Siete Sabios, Campo Verde, Juárez, Xoloco y La Aurora.

El proceso de ladera de mayor impacto ocurrió en la colonia Aurora; 130 personas fueron sepultadas por los materiales. El deslizamiento (Figura 2.7) ocurrió en una ladera de aproximadamente 23°, compuesta por materiales derivados de ignimbrita, en cuya cima se encuentra el panteón municipal Margarita Maza de Juárez. De acuerdo con los habitantes del lugar, había una barda que delimitaba al cementerio con la colonia, la cual retenía el agua de lluvia y que poco a poco se filtraba por una grieta que originó la superficie del deslizamiento. El proceso inició como rotacional en la corona y traslacional en el cuerpo principal, posteriormente se convirtió en flujo (Flores, 2002). Aunque se generó una superficie de ruptura poco profunda, se removieron aproximadamente 7,500 m³ en forma de flujo de suelos, arrasando con todo lo que había a su paso (Mendoza *et al.*, 2002).

Fuera de la cabecera, pero aún dentro del municipio hubo más colonias afectadas, entre ellas Aire Libre, Atoluca, Francia, Mezcalcuautla, San Sebastián, Xoloateno y Xoloatl (Flores, 2002). La administración de Protección Civil municipal reportó más de 1200 viviendas afectadas y unas 500 casas con pérdida total.

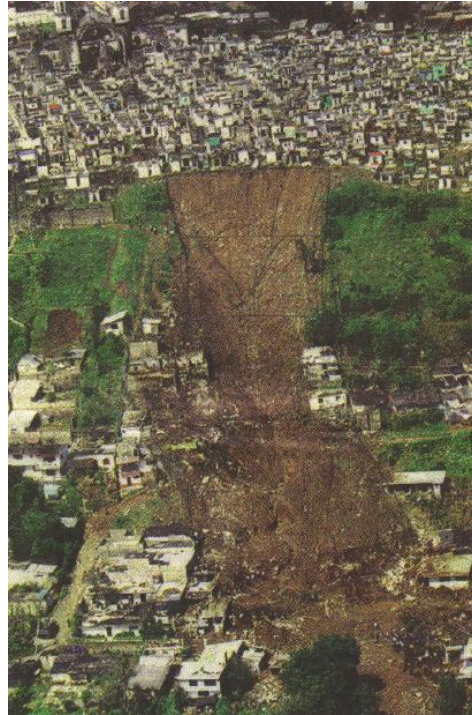


Figura 2.7. Deslizamiento y flujo de la colonia Aurora, Teziutlán, Puebla, 5 de octubre de 1999 (tomado de Mendoza *et al.*, 2002).



Figura 2.8. Deslizamiento de la colonia La Aurora, donde hubo mayor cantidad de víctimas fatales (Foto Rafael García Otero / Archivo de La Jornada de Oriente, 2009).

2.4 Lluvias del 2005

En el año 2005, las lluvias más intensas que afectaron la parte Norte del estado de Puebla fueron provocadas por la Tormenta Tropical *José* y el huracán *Stan*, las cuales repercutieron en gran medida en Teziutlán y dieron origen a algunos deslizamientos.

a) Tormenta Tropical *José*

Por la mañana del día 22 de agosto cerca de las 11 horas, la undécima depresión tropical de la temporada se internó en el Sur del Golfo de México. A las 17 horas, el sistema se desarrolló a Tormenta Tropical, con la designación de “*José*”, su centro se localizó a 90 km al Este-Noreste de Veracruz, Veracruz, con vientos máximos sostenidos de 85 km/h y rachas de 100 km/h. En el aviso número 4 de las 18 horas, se modificó la zona de alerta, ahora de Río Lagartos hasta Cabo Rojo (CONAGUA, 2005).

Justo a la medianoche del 22 al 23 de agosto, *José* tocó tierra en las inmediaciones de Vega de Alatorre, Veracruz, 80 km al Nor-Noroeste del puerto de Veracruz. Con vientos máximos sostenidos de 85 km/h, rachas de 100 km/h y una presión mínima de 1001 hPa.

José se debilitó a depresión tropical cerca de las 7:00 h, cuando su centro se encontraba en la parte central del estado de Puebla, a 50 km al Suroeste de Teziutlán y a 145 km al Este de la Ciudad de México, con vientos máximos sostenidos de 55 km/h y rachas de 75 km/h. Este fenómeno dio como resultado lluvias de fuertes a intensas a lo largo de su recorrido. *José* continuó avanzando con menor fuerza por los estados de Tlaxcala, el norte del Distrito Federal y Estado de México (CONAGUA, 2005).

A lo largo de su trayecto (Figura 2.9), la TT *José* afectó con precipitaciones intensas y vientos fuertes principalmente a los estados de Veracruz y Puebla, en donde se registraron importantes daños materiales, inundaciones y procesos gravitacionales (CONAGUA, 2005).

En la figura 2.10, se observa un mapa de precipitación del día 23 de agosto, en donde se muestran las zonas de los estados con los mayores registros de lluvia (en color rojo); el norte de Veracruz y el norte de Puebla. Los registros de lluvia máxima puntual acumulada en 24 horas del 22 al 23 de agosto fueron de 255.0 mm en Mizantla, Veracruz y de 155.9 mm en Cuetzalan, Puebla. Posteriormente la TT *José* cruzó el centro del país; afectó la región con lluvias persistentes (CONAGUA, 2005).



Figura 2.9. Trayectoria de la Tormenta Tropical “José” (Con base en NOAA, 2005).

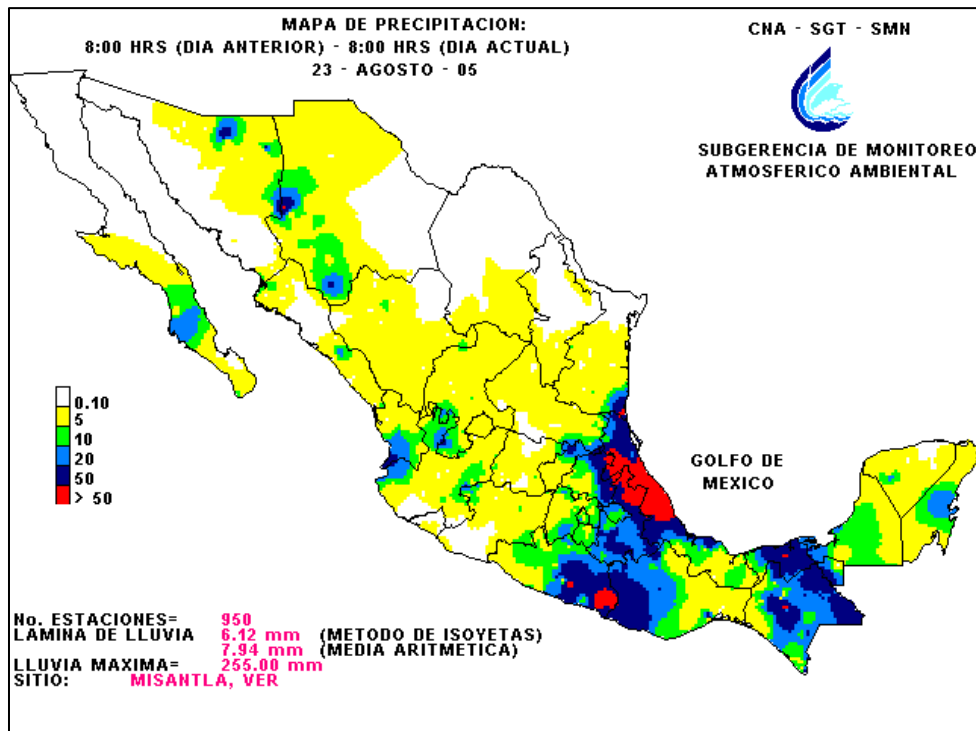


Figura 2.10. Mapa de México de la precipitación relacionada por la Tormenta Tropical José (Fuente: CONAGUA, 2005).

b) Huracán *Stan*

En la mañana del 1° de octubre, se formó la Depresión Tropical No. 20 del Océano Atlántico, a una distancia aproximada de 180 km al SE de Cozumel, Quintana Roo. La DT-20 siguió su desplazamiento hacia el W – NW con vientos máximos sostenidos de 55 km/h (CONAGUA, 2005).

Cuando la DT-20 (Figura 2.11), se encontraba a unos 20 km al E de la costa de Quintana Roo, se desarrolló a Tormenta Tropical designada con el nombre “*Stan*”, con vientos máximos sostenidos de 75 km/h y rachas de 90 km/h. La TT *Stan* tocó la costa de Quintana Roo, aproximadamente a las 7:00 a.m. del día 2. Durante el transcurso del mismo día *Stan* cruzó la Península de Yucatán con trayectoria hacia el W – NW, al avanzar sobre tierra empezó a perder fuerza, por lo que al final del día regresó a la categoría de DT con vientos máximos sostenidos de 55 km/h (CONAGUA, 2005).

En las primeras horas del día 3 de octubre, la DT *Stan* salió al Golfo de México y recuperó energía, de nuevo se transformó en TT, con vientos máximos sostenidos de 65 km/h y rachas de 85 km/h. Durante el resto del día *Stan* mantuvo su desplazamiento hacia el W, aumentó gradualmente la fuerza de sus vientos y afectó a los estados del litoral del Golfo (CONAGUA, 2005).

En la madrugada del 4 de octubre, se reportó que la TT *Stan* se había intensificado a huracán de categoría I, cuando se encontraba a 75 km al N de Coatzacoalcos, Veracruz, con vientos máximos sostenidos de 130 km/h y rachas de 155 km/h. *Stan* siguió su trayectoria rumbo a las costas de Veracruz, al tocar tierra empezó a perder fuerza y así, unas horas más tarde, se degradó a TT (CONAGUA, 2005).

Por la noche del día 4, al cruzar la Sierra de la parte N de Oaxaca, la TT *Stan* se debilitó a DT. Finalmente en la madrugada del 5 de octubre, después de haber avanzado sobre la región montañosa, la DT se disipó a una distancia de 60 km al W – SW de la ciudad de Oaxaca (CONAGUA, 2005).

Las bandas nubosas de *Stan* dieron lugar a lluvias intensas que afectaron a los estados de Veracruz, Puebla, Oaxaca y Quintana Roo con inundaciones, procesos de remoción y daños materiales importantes (CONAGUA, 2005). Tras el paso del huracán *Stan*, se reportaron 80 pérdidas humanas entre los estados de Veracruz, Oaxaca y Chiapas (NOOA, 2005).

El Gobierno del Estado de Puebla, mediante el oficio número SGD/671/05 con fecha del 4 de octubre del año 2005, solicitó a la Secretaría de Gobernación a través de la Coordinación General de Protección Civil, mediante la opinión del

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), la emisión de la Declaratoria de Emergencia para 41 municipios de la entidad, entre ellos Teziutlán, por la presencia del huracán Stan (Diario Oficial de la Federación, 2005).

Finalmente con fecha del 5 de octubre del 2005, se emitió un Boletín de Prensa número 236/05, mediante el cual la Coordinación General de Protección Civil declaró en emergencia a los 41 municipios, afectados por la presencia de la Tormenta Tropical Stan, con lo que se activaron los recursos del Fondo Revolvente del FONDEN para dar atención inmediata a la población damnificada (Diario Oficial de la Federación, 2005).



Figura 2.11. Trayectoria del Huracán "Stan" (Con base en NOAA, 2005)

2.5 Lluvias del 2013

En el 2013, las lluvias más intensas que afectaron la parte Norte del estado de Puebla fueron provocadas por las Tormentas Tropicales *Barry* y *Fernand*, las

cuales repercutieron en gran medida en Teziutlán y en menor medida por los huracanes *Ingrid* y *Manuel*, éstos provocaron varios procesos de remoción.

a) Tormenta Tropical *Barry*

El día 17 de junio por la mañana se formó la Depresión Tropical No. 2 de la temporada en el Océano Atlántico, a 95 km al E de Monkey River Town, Belice y a 265 km al sureste de Chetumal, Quintana Roo, con vientos máximos sostenidos de 55 km/h y con un desplazamiento hacia el W-NW (CONAGUA, 2013).

La DT-2 continuó su trayecto sobre el territorio de Belice, Guatemala, Sur de Campeche y NE de Tabasco, con vientos de 45 km/h, misma fuerza que mantuvo hasta la noche del 18 de junio, hasta que salió a mar en la Sonda de Campeche, empezó a recuperar fuerza hasta llegar a 55 km/h con rachas de 75 km/h (CONAGUA, 2013).

La DT-2 siguió su trayecto hacia el W con rumbo hacia la costa de Veracruz y el día 19 de junio aproximadamente a las 13:45 p.m., como resultado de las condiciones favorables que encontró en el Golfo de México, se transformó en Tormenta Tropical denominada “Barry” (Figura 2.12), con vientos máximos sostenidos de 65 km/h, con rachas de hasta 85 km/h, a una distancia de 115 km al E-NE de Veracruz (CONAGUA, 2013).

Mientras se acercaba a la costa de Veracruz, Barry aumentaba gradualmente de fuerza y así, a las 7:00 p.m., a unos 85 km al E-NE de la ciudad de Veracruz, alcanzó su mayor fuerza, con vientos máximos sostenidos de 75 km/h y rachas de 95 km/h. El día 20 de junio a las 7:00 a.m., Barry tocó tierra y empezó a debilitarse y a las 4:00 p.m. se ubicó a 30 km al E-NE de Jalapa, Veracruz, con vientos de 65 km/h, fuerza que mantuvo hasta la tarde del mismo día, cuando se degradó a Depresión Tropical, con vientos de 55 km/h y rachas de 75 km/h a 45 km al SW de Teziutlán, Puebla (CONAGUA, 2013).

Finalmente, después de cruzar la barrera montañosa de la Sierra Madre Oriental, el día 20 de junio a las 10:00 p.m., la DT *Barry* se debilitó a una baja presión para su posterior disipación (CONAGUA, 2013).

Durante su periodo de evolución, *Barry* afectó diversos municipios con precipitaciones importantes que superaban los 100 mm, entre ellos se encuentran: Tenochtitlan, Veracruz con 160 mm y Teziutlán, Puebla con 140 mm el día 19 de junio; Misantla, Veracruz con 372 mm y Xicotepéc de Juárez, Puebla con 224 mm para el día 20 de junio (CONAGUA, 2013). Se registraron varios deslizamientos en Puebla (NOAA, 2013).

El 20 de junio la Secretaría General de Gobierno (SGG), a través de la Dirección General de Protección Civil Estatal (DGPCE), confirmó que debido a la lluvia provocada por la Tormenta Tropical "Barry" se produjo un deslizamiento de pequeñas dimensiones en la carretera federal Puebla-Teziutlán. El titular de Protección Civil Estatal, Jesús Morales, indicó que se registró sobre la vía federal, a la altura del kilómetro 129. La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) trabajó en conjunto con la DGPCE para retirar el escombro que obstruía el carril, no se registraron pérdidas humanas ni materiales, solo el contratiempo de la obstrucción de la vía (Síntesis Puebla, 20/06/2013).



Figura 2.12. Trayectoria de la Tormenta Tropical "Barry" (Con base en NOAA, 2013).

b) Tormenta Tropical *Fernand*

El 25 de agosto, por la tarde, se formó la Depresión Tropical No. 6 de la temporada en el Océano Atlántico a 80 km al E-NE de la ciudad de Veracruz, con vientos máximos sostenidos de 55 km/h, rachas de 75 km/h y se desplazó hacia el W a 19 km/h (CONAGUA, 2013).

La DT-6 tuvo una rápida evolución, a las 5:30 p.m. y a unos 45 km al E de Veracruz, se desarrolló a Tormenta Tropical denominada “*Fernand*”, con vientos máximos sostenidos de 75 km/h y rachas de 95 km/h, sus bandas nubosas afectaron las costas de Tabasco, Veracruz y Tamaulipas (CONAGUA, 2013).

La TT *Fernand* (Figura 2.13), siguió su trayectoria hacia el W y después al W-NW, a las 10:00 p.m. el centro del sistema se encontraba a 10 km al N de Veracruz, ya con 85 km/h y rachas de hasta 100 km/h. A las 11:45 p.m. tocó tierra, y como resultado de la fricción con el terreno, empezó a debilitarse y a las 4:00 a.m. del día 26 ya se encontraba a 100 km al NW de Veracruz, con vientos de 75 km/h. Continuó su desplazamiento sobre el territorio de Veracruz, en la zona montañosa *Fernand* perdió aún más fuerza y así a las 10:00 a.m. se degradó a Depresión Tropical con vientos de 55 km/h y rachas de 75 km/h (CONAGUA, 2013).

Finalmente el día 26 de agosto, por la tarde, mientras se desplazaba sobre el estado de Hidalgo, la DT *Fernand* se debilitó a una baja presión a una distancia de 60 km al N-NE de la ciudad de Pachuca, Hidalgo (CONAGUA, 2013).

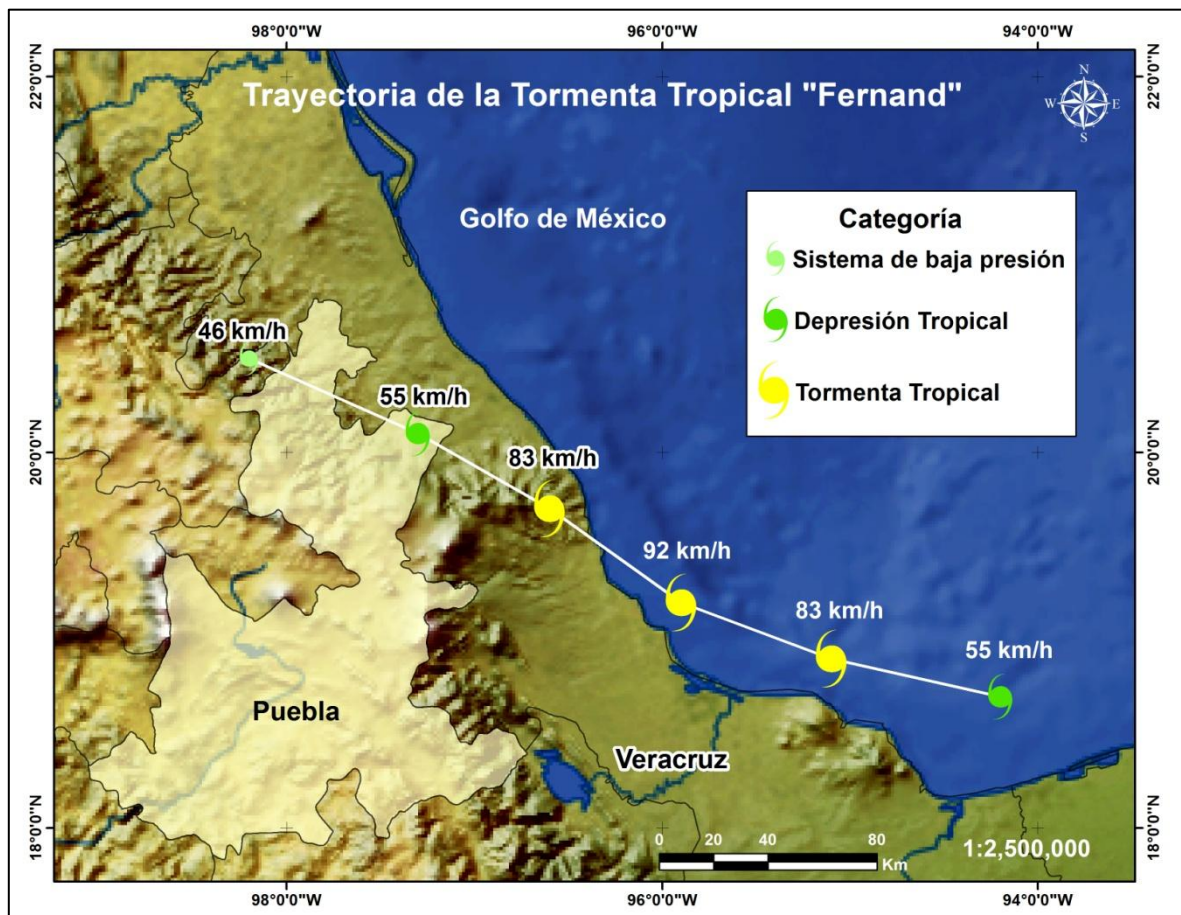


Figura 2.13. Trayectoria de la Tormenta Tropical "Fernand" (Con base en NOAA, 2013).

El 26 de agosto, la dirección de Protección Civil de Teziutlán reportó al menos tres deslizamientos y varias inundaciones por las fuertes ráfagas de viento durante las primeras horas de la Tormenta Tropical *Fernand*, la cual se desplazó del centro de Veracruz al norte del estado de Puebla, afectó sólo parte del territorio poblano (Puebla Noticias, 26/08/2013).

Mauricio Guillen Cantú, director en turno de Protección Civil de Teziutlán, indicó que en el Barrio de Francia se reportó un deslizamiento de tierra, lo mismo que en la privada 15 de Marzo, correspondiente al barrio de Xoloco, donde pequeñas cantidades de tierra cayeron en los patios de las casas, mismos que se atendieron en el momento sin que se reportaran heridos o casas dañadas. El tercer deslizamiento se presentó en la comunidad “La Legua” hacia San Miguel Capulines por la carretera federal a Nautla, donde se registró un proceso gravitacional de magnitud considerable, por lo que maquinaria pesada tuvo que quitar el material removido para abrir camino (Puebla Noticias, 26/08/2013).

c) Huracanes *Manuel e Ingrid*

México tiene la escasa posibilidad de que dos Ciclones tropicales afecten al país de manera simultánea, uno por el océano Pacífico y el otro por el océano Atlántico. Sin embargo, esto ocurrió en 2013 con el caso de los huracanes *Manuel* e *Ingrid*. Mientras el primero afectó la costa Sur y occidente de México en el Pacífico, *Ingrid* descargó su energía en los estados de Veracruz, Puebla y Tamaulipas, por el Golfo de México. Dicha situación que no ocurría desde el año de 1958, cuando dos tormentas tropicales afectaron al mismo tiempo el país (CONAGUA, 2013).

Como resultado de la interacción simultánea de estos dos huracanes, *Manuel* e *Ingrid*, se introdujo bastante humedad al territorio nacional en un periodo corto de tiempo, lo que trajo consigo muchos problemas de inundación, procesos gravitacionales y pérdidas humanas y materiales (NOAA, 2013). El huracán que afectó a Puebla fue *Ingrid*, por la cercanía de su trayectoria.

Las lluvias ocurridas durante el fin de semana del 15 de septiembre, por el paso de *Ingrid*, provocaron un deslizamiento que dejó bloqueada por más de dos horas la carretera Teziutlán – Nautla (Figura 2.14), donde alrededor de 600 automovilistas quedaron varados el mismo lapso de tiempo, luego de que el alud tapara por completo la vía de comunicación (Municipios Puebla, 15/09/2013).

Luego de recibir el reporte del percance, los cuerpos de Protección Civil y Policía Estatal y Federal realizaron las labores de limpieza que duraron aproximadamente dos horas, mientras los automovilistas esperaban la apertura del acceso carretero. Gracias a los trabajos a marchas forzadas, fue hasta la tarde del sábado que lograron abrir un solo carril de la vía para dar paso a los automovilistas. Cabe mencionar que se presentaron varios deslizamientos al interior del municipio de Teziutlán (Municipios Puebla, 15/09/2013).



Figura 2.14. Bloqueo por deslizamiento en la carretera a Teziutlán – Nautla, (Fuente: Municipios Puebla, 2013).

El 14 de Noviembre, más de 15 personas de la calle Mineral en la comunidad de Aire Libre, perteneciente a la junta auxiliar de Mexcalcuautla, en Teziutlán, fueron trasladadas al albergue municipal, luego de que un deslizamiento sepultara sus viviendas, tras las constantes lluvias que se registraron en el mes. Los afectados relatan que alrededor de las 5:00 a.m. se escuchó un estruendo y vieron como el lodo cubría parte de sus casas, tres horas después se registró un segundo movimiento en masa que terminó por sepultar las 7 casas (Intolerancia Diario, 14/11/2013).

El alcalde interino de Teziutlán, Carlos Aguilar Muñoz precisó, de acuerdo a los datos obtenidos por personal de la dirección de Protección Civil municipal, que se registraron 130 mm de precipitación, lo que provocó el derrumbe. A su vez, mencionó que se reportaron otros dos deslizamientos en el barrio de Xoloco y en

San Pedro Xoloco, además, se mantuvo acordonado el boulevard Bicentenario debido a que es una zona de riesgo por los constantes procesos gravitacionales que se registran en época de lluvias (Intolerancia Diario, 14/11/2013).

En la tabla 2.2, se sintetiza toda la información sobre los deslizamientos ocurridos, mencionados con anterioridad.

Tipología	Fecha	Lugar	Fenómeno	Consecuencia	Fuente
Mov. complejo	05/10/99	La Aurora, Teziutlán	DT-11	110-130 pérdidas humanas	CONAGUA
Deslizamientos	23/08/05	Veracruz y Puebla	TT José	Daños materiales, inundaciones	CONAGUA
Deslizamientos	04/10/05	Veracruz, Puebla y Oaxaca	Huracán Stan	80 pérdidas humanas	NOOA
Deslizamiento	20/06/13	Car. federal Puebla-Teziutlán, km 129	TT Barry	Obstrucción vial	Síntesis Puebla
Deslizamientos (3)	26/08/13	Barrio de Francia; privada 15 de Marzo, Xoloco; La legua, San Miguel Capulines	TT Fernanad	Pérdidas materiales	Puebla noticias
Deslizamiento	15/09/13	Carr. Teziutlán-Nautla	Huracanes Ingrid y Manuel	600 automóviles varados	Municipios Puebla
Deslizamientos (3)	14/11/13	Calle Mineral, Aire Libre; Xoloco y San Pedro Xoloco		7 casa sepultas	Intolerancia diario

Tabla 2.2. Cuadro resumen sobre los deslizamientos ocurridos.

Capítulo III. Técnicas empleadas

3.1 Percepción remota

La teledetección, también conocida como percepción u observación remota, es aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales; la observación remota, engloba desde el proceso para obtener la imagen hasta su posterior tratamiento e interpretación (Chuvieco, 2008).

Como se observa en la Figura 3.1, entre la superficie terrestre y el sensor del satélite existe una relación energética, bien puede ser por energía solar o por un haz energético artificial, a su vez éste haz recibido debe ser guardado en el mismo satélite o en el receptor en tierra, para su posterior tratamiento e interpretación determinada (Chuvieco, 2008).

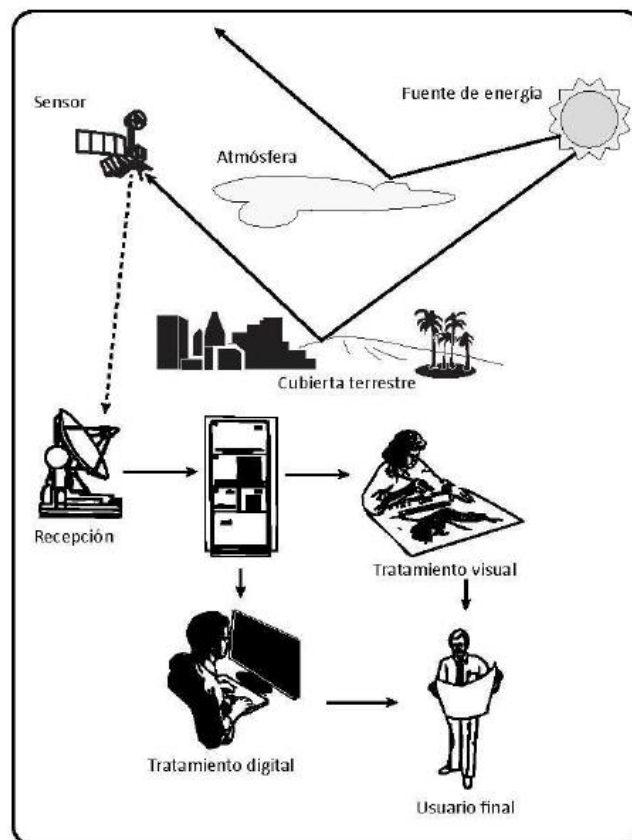


Figura 3.1. Elementos de un sistema de teledetección (Chuvieco. 2008).

Aunque no lo parezca, los seres humanos están muy familiarizados con la teledetección, basándose en la percepción visual que proporciona mucha de la

información que los rodea. Sin embargo, los ojos como sensores, tienen muchas limitaciones, entre ellas la sensibilidad a sólo el rango del espectro visible del campo electromagnético, así como la incapacidad para formar un registro permanente de lo que observamos. Debido a estas limitantes, los seres humanos han desarrollado continuamente medios tecnológicos para aumentar la capacidad de ver y guardar las características físicas del entorno (Levin, 1999).

Existen varios tipos de sensores remotos y cada uno está diseñado con un propósito específico, este puede ser para resolución espectral, resolución espacial o resolución temporal. Lo anterior depende de la tarea a la que estén destinados (Levin, 1999).

De acuerdo con Levin (1999), en las últimas décadas, la tecnología de la teledetección ha avanzado en los siguientes tres campos:

- 1) Usos predominantemente militares, con una variedad de aplicaciones de análisis ambientales relativos a la Tierra, el océano y la atmósfera.
- 2) A partir de sistemas fotográficos de sensores que convierten la energía de muchas partes del espectro electromagnético en señales electrónicas.
- 3) En aeronaves y en plataformas de satélite.

Hay muchas aplicaciones de la percepción remota en diferentes campos, en el caso de la presente tesis, es para el estudio de las formas del relieve, estructuras y a los procesos que modifican la corteza terrestre, ya sean naturales o antrópicos.

Se puede realizar la fotointerpretación a partir de fotografías aéreas y de imágenes de satélite.

a) Fotografías aéreas

La fotografía aérea es una representación confiable de la superficie terrestre del preciso momento en que fue capturada, tomada desde una aeronave (de ahí su nombre), la cual contiene información variada y útil para diversas ciencias de la Tierra, con lo que se pueden generar modelos y productos para aumentar el conocimiento del territorio. Es el principal insumo en la elaboración de cartografía topográfica, catastral, de riesgos, de ordenamiento territorial, etc. además de otros productos relacionados con el análisis del entorno geográfico (INEGI, 2015).

De acuerdo con Colwell (1952), la interpretación de las fotografías aéreas consiste en “el acto de examinar las imágenes fotográficas de los objetos, con el fin de identificarlos y deducir su significación”. Por otro lado, Whitmore (1952), en el ámbito de la *American Society of Photogrammetry*, se refiere a la fotointerpretación tanto en el sentido de la determinación, así como de la

descripción de la naturaleza y de los objetos que aparecen en las imágenes fotográficas.

De acuerdo con Basterra (2011), los elementos o parámetros que componen a las fotografías aéreas y que son fundamentales e inciden directa o indirectamente sobre la evaluación e interpretación de las fotografías aéreas son los siguientes:

- a) **Escala:** Al igual que en una carta topográfica, la escala de las fotos se define como la relación entre la distancia “d” que existe entre dos puntos cualquiera (A – B) en una foto, y lo que representa dicho segmento en la realidad “D”. En otras palabras, es la relación entre el tamaño de la imagen con la distancia del terreno y es una función entre la altitud de vuelo y la distancia focal de la cámara.

$$E = \frac{d}{D} = 1:5000 = \frac{1}{5000}$$

$$Escala = \frac{Altitud\ de\ vuelo}{Distancia\ focal}$$

- b) **Altura de vuelo (H):** Distancia que existe entre el centro de proyección y el plano del terreno al momento de la exposición (Figura 3.2).
- c) **Distancia focal (f):** Distancia que existe entre el foco de la lente y el negativo de la película (Figura 3.2).
- d) **Eje óptico:** Línea ideal que pasa por el centro de la cámara y es perpendicular al negativo de la película. En el caso de las fotografías verticales es coincidente con la vertical del lugar (Figura 3.2).
- e) **Nadir (N):** Punto situado verticalmente debajo del centro de proyección, sobre el terreno. Es evidente que si la fotografía es perfectamente vertical el nadir coincide con el punto central (Figura 3.2).
- f) **Marcas fiduciales o fieles:** Son marcas de distinta configuración, ubicadas en los bordes o esquinas de las fotos, muy importantes porque su intersección determina el punto principal (Pp) de la fotografía (Figura 3.3).
- g) **Punto central o principal (Pp):** Es la proyección ortogonal del centro de proyección sobre el plano de la fotografía. Corresponde al centro geométrico de la fotografía (Figura 3.3).

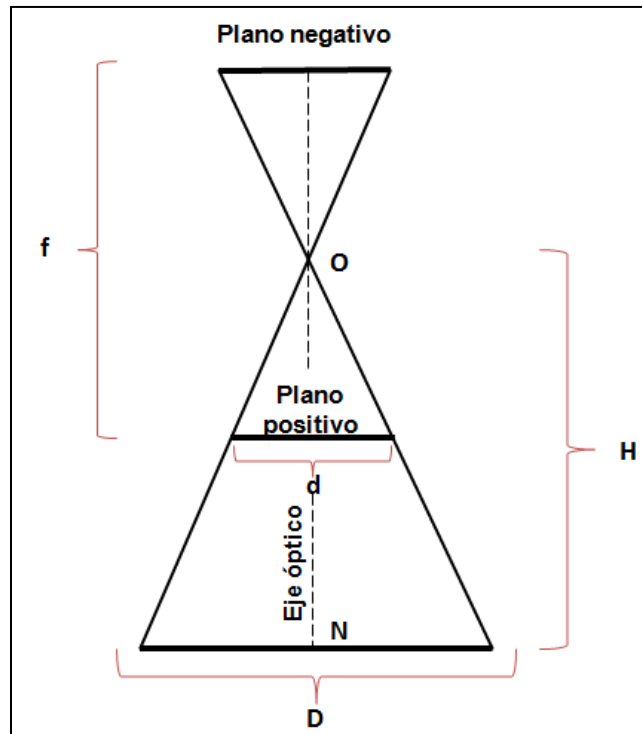


Figura 3.2. Elementos principales de una fotografía aérea (Modificado de Basterra, 2011).

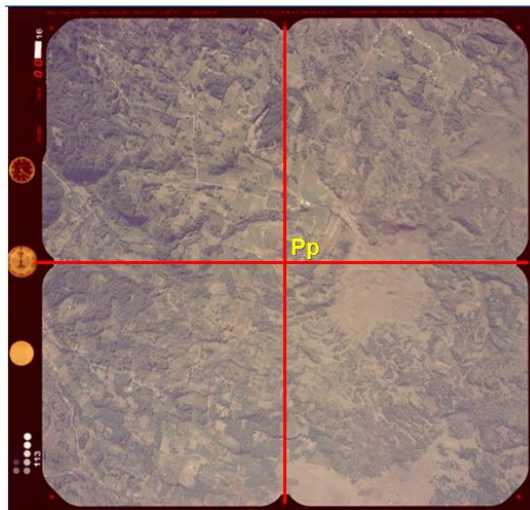


Figura 3.3. Marcas fiduciales y punto central (Con base en INEGI, 2007).

h) Punto transferido (Ppjt): Son los mismos puntos que se observan en fotografías consecutivas o puntos homólogos (Figura 3.4).

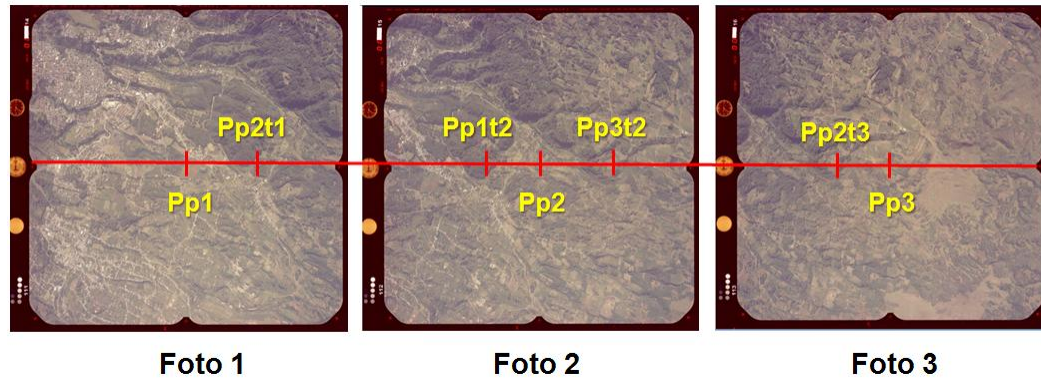


Figura 3.4. Puntos transferidos (Con base en INEGI, 2007)

- i) **Desviación:** La desviación es la razón de porque puede no coincidir el eje óptico con la vertical del lugar; se debe principalmente a dos causas: el cabeceo del avión al momento de la exposición, o la inclinación de las alas o alabeo (Figura 3.5).

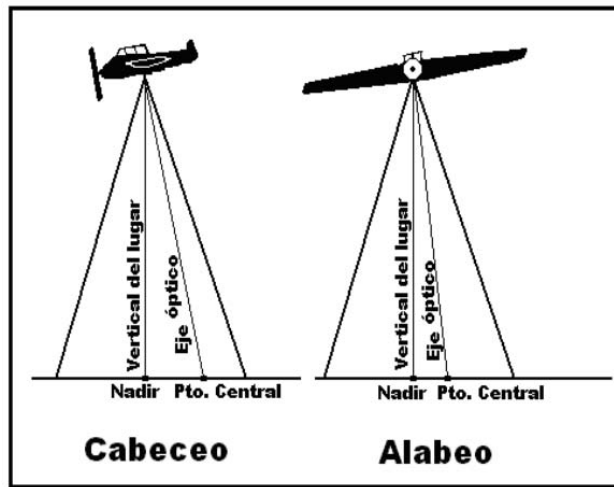


Figura 3.5. Desviación del avión (Fuente: Basterra, 2011).

- j) **Línea de vuelo:** Es una línea continua que une los puntos principales de las fotos sucesivas de vuelo. Rara vez resulta recta ya que el rumbo del avión es modificado por acción del viento (Figura 3.6).
- k) **Rumbo:** Es la dirección que sigue el avión para la toma de las fotografías, normalmente para las tomas fotográficas de una región el rumbo es N-S o E-W, aunque puede cambiar en función de las características del terreno o del estudio que se realice.

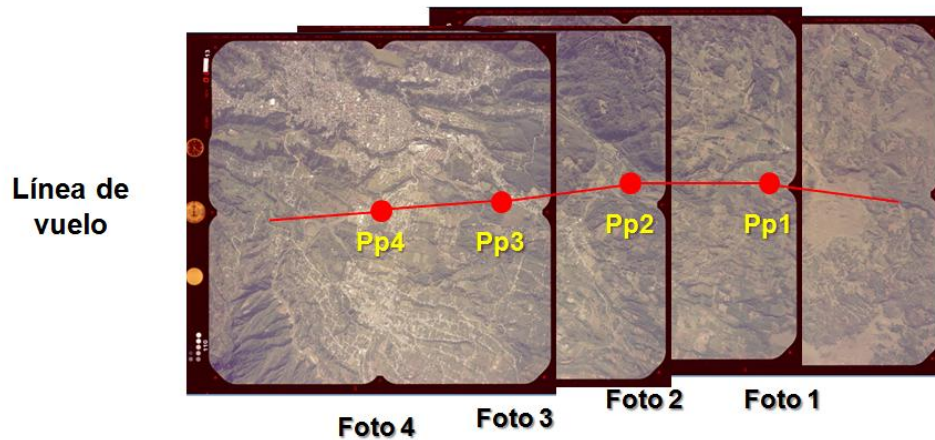


Figura 3.6. Línea de vuelo (Con base en INEGI, 2007).

- l) **Banda:** Se denomina así a cada pasada que realiza el avión durante la toma de las fotografías necesarias para cubrir la zona.
- m) **Recubrimiento longitudinal:** Para lograr la visión en tres dimensiones o visión estereoscópica es necesario que entre tomas sucesivas exista un solape del 60% (de entre el 55% al 75%), es decir que exista una parte del terreno observable en ambas fotografías sucesivas (Figura 3.7 a)).
- n) **Recubrimiento lateral:** También es necesario un solape lateral que debe ser del 25% (de entre el 10% y el 30%), es útil a la hora de realizar mosaicos fotogramétricos (Figura 3.7 b)).

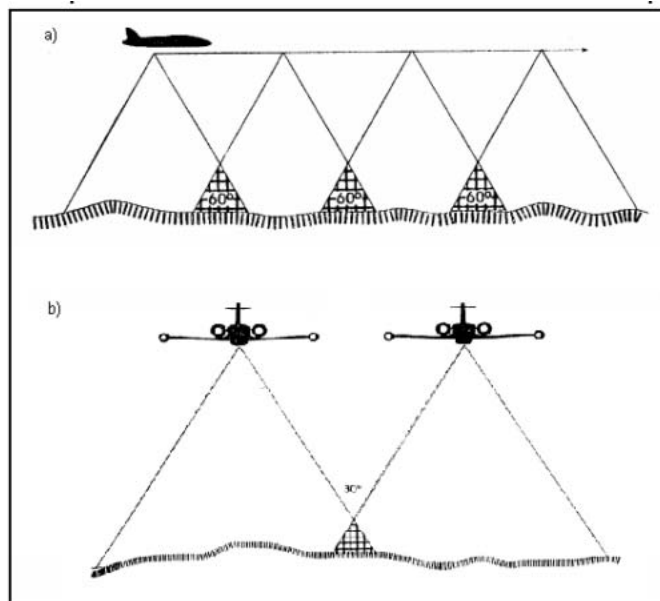


Figura 3.7. a) Recubrimiento longitudinal; b) Recubrimiento lateral (Basterra, 2011).

Tipos de fotos

Blanco y negro

La principal ventaja de las fotografías aéreas en blanco y negro o la fotografía pancromática es su bajo costo, a menudo una fracción del coste de fotos a color (Prost, 2013).

Las unidades dentro de una fotografía, se distinguen principalmente en función del tono (claro u oscuro) y de la textura (suave, aborregado, rugoso, etc.). La capacidad de distinguir estructuras no se ve comprometida por la ausencia del color en las fotos, sin embargo, la diferencia entre tipos de vegetación es difícil de distinguir (Prost, 2013).

Con el avance de la tecnología, las fotografías en blanco y negro han quedado en gran medida obsoletas (Prost, 2013).

A color

Una pequeña desventaja de las fotos de color es su costo relativo en comparación con las blanco y negro, esto se debe considerar en función de los beneficios de las fotos de color (Prost, 2013).

La posibilidad de reconocer unidades geológicas en áreas donde la estratigrafía es conocida, así como de poder interpretar unidades litológicas en áreas donde no existe información, son de las principales ventajas del uso de las fotos de color. La fotointerpretación se mejora en cuanto a la nitidez, la claridad y resulta ser una gran ventaja en la identificación de la vegetación (Prost, 2013).

Derivado del avance tecnológico, hoy en día las fotografías a color tienen un formato digital, por lo cual pueden ser manipuladas y vistas con facilidad en computadora (Prost, 2013).

A partir de los primeros usos de la fotografía aérea, la teledetección ha sido reconocida como una valiosa herramienta para visualizar, analizar, caracterizar y tomar decisiones acerca del medio ambiente (Levin, 1999).

b) Imagen de satélite

Una imagen de satélite es una abstracción visual de los rasgos físicos que refleja la superficie terrestre, capturados por el sensor de un satélite artificial, los datos son enviados a una estación en Tierra para ser procesados, guardados y almacenados ya como imágenes, con lo que es posible incrementar el conocimiento de las características de la Tierra, en una gran cantidad de escalas (INEGI, 2015).



Figura 3.8. Imagen de satélite de Google Earth (Fuente: Google Earth, 2015).

Después inicia la fase de interpretación y análisis. La imagen procesada se interpreta, visual y/o digitalmente o electrónicamente, para extraer información sobre el objetivo que fue iluminado/capturado en ese instante (Canada Centre for Remote Sensing, 2014).

Por último, queda la fase de la aplicación, es decir, se llega a la tarea final del proceso de detección remota, es decir, cuando se aplica la información que se puede extraer de las imágenes sobre el objetivo, a fin de comprender mejor, revelar alguna información nueva o ayudar en la solución de un problema particular (Canada Centre for Remote Sensing, 2014).

La información adquirida de estas imágenes de la superficie de la Tierra, en particular las características y medidas de un fenómeno u objeto, no está en contacto físico o íntimo con el usuario final, ya que se considera como una utilización del material a distancia (Levin, 1999).

Tipos de imágenes de satélite

En la actualidad existen varios tipos de plataformas de imágenes de satélite de muy alta resolución, son de uso comercial, privado o público, de gran resolución espacial que se mide en cm.

De acuerdo con GEOIMAGE (2015), algunas de las principales plataformas que se han desarrollado en las últimas décadas, son las que se mencionan a continuación:

- **SPOT:** Satellite Pour l'Observation de la Terre, por sus siglas en francés, existen las versiones SPOT 1, 2, 3 y 4, que son satélites de alta resolución puestos en órbita en 1986, 1990, 1993 y 1998 respectivamente, son operados y pertenecen a Airbus Defence & Space, recogían imágenes con resolución de 10 m por pixel.



Figura 3.9. Ejemplo de imagen de satélite SPOT 4 (Fuente: www.geoimage.com.au).

- **IKONOS:** Fue el primer satélite comercial de muy alta resolución del mundo, lanzado exitosamente el 24 de septiembre de 1999 por Space Imaging, así comenzó una nueva era en la teledetección, ofreciendo imágenes de la Tierra a 1 m de resolución.



Figura 3.10. Ejemplo de imagen satelital IKONOS (Fuente: www.geoimage.com.au).

- **Quickbird:** Fue el primer satélite de una constelación de naves espaciales de la empresa DigitalGlobe, lanzado el 18 de octubre del 2001, ofrecía imágenes de la Tierra a una resolución de 0.61 m por pixel, fue dado de baja el 27 de enero del 2015.

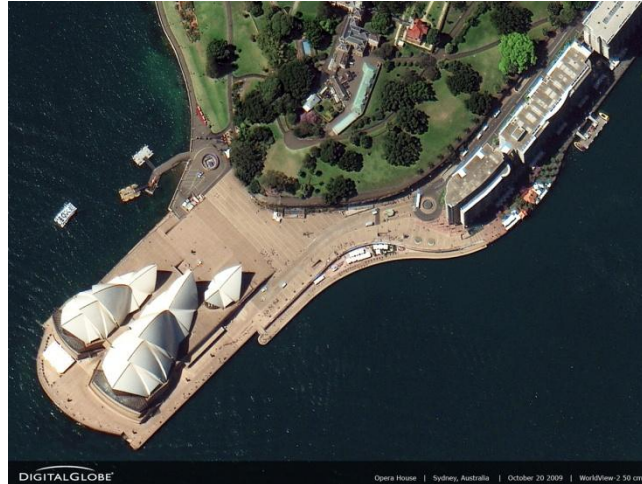


Figura 3.11. Ejemplo de imagen satelital Quickbird (Fuente: www.geoimage.com.au).

- **Pléiades:** Fue diseñado por el programa franco-italiano ORFEO entre el 2001 y el 2003, es un sistema de observación óptica que consta de dos satélites idénticos que ofrecen productos de color a una resolución de 50 cm por pixel.



Figura 3.12. Ejemplo de imagen de satélite Pléiades (Fuente: www.geoimage.com.au).

- **WorldView 1:** Se puso en órbita en septiembre del 2007, es propiedad y es operado por DigitalGlobe. Utiliza un sistema de imagen pancromática, cuenta con una resolución de medio metro. Opera a una altitud de 496 km y es capaz de recorrer hasta 750,000 km² por día.



Figura 3.13. Ejemplo de imagen de satélite WorldView 1 (Fuente: www.geoimage.com.au).

- **GeoEye 1:** Fue lanzado en 2008, es propiedad y es operado por DigitalGlobe, es un satélite de muy alta resolución, las imágenes obtenidas son a 0.41 m por pixel de resolución. Este satélite puede rotar en todas direcciones, con precisión robótica para una mejor resolución.



Figura 3.14. Ejemplo de imagen de satélite GeoEye 1 (Fuente: www.geoimage.com.au).

- **WorldView 2:** Fue lanzado al espacio el 8 de octubre del 2009 pero oficialmente fue puesto en funcionamiento el 6 de enero del 2010. Este satélite es capaz de recorrer hasta 975,000 km² por día. A comparación de su versión anterior, este satélite captura imágenes de alta resolución con 8 bandas espectrales, en lugar de 4. Lo que ofrece un mejor análisis de teledetección de vegetación, ambientes costeros, agricultura, geología y muchos más.

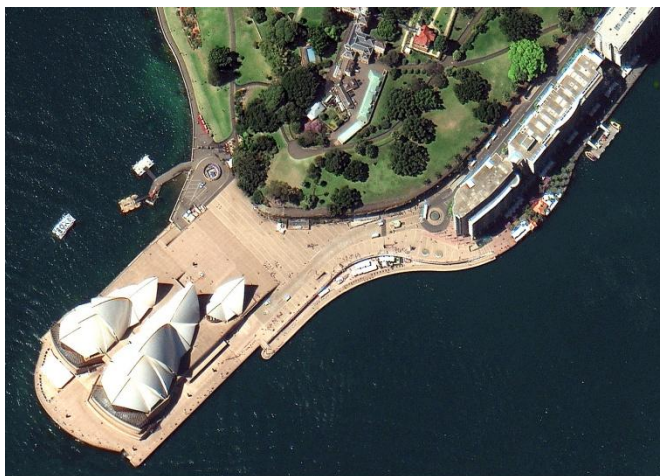


Figura 3.15. Ejemplo de imagen de satélite WorldView 2 (Fuente: www.geoimage.com.au).

- **WorldView 3:** El 13 de agosto del 2014 se puso en marcha, lanzado y operado desde la Base de la Fuerza Aérea de Vandenberg, California. Ofrece precisión, agilidad, capacidad y diversidad espectral sin igual, ya que opera con 16 bandas multiespectrales.



Figura 3.16. Ejemplo de imagen de satélite WorldView 3 (Fuente: www.geoimage.com.au).

En la tabla 3.1, se hace un resumen de las diferentes resoluciones de las diversas plataformas que existen sobre imágenes la superficie terrestre.

Satélite	Año de lanzamiento	Numero de bandas (Pan/Ms)*	Resolución (Pan/Ms)*
SPOT 1, 2 y 3	1986, 1990 y 1993	Pan – 1 Ms – 3	Pan – 10 m Ms – 20 m
SPOT 4	1998	Pan – 1 Ms – 4	Pan – 10 m Ms – 20 m
IKONOS	1999	Pan – 1 Ms – 4	Pan - 82 cm Ms - 3.2 m
Quickbird	2001	Pan – 1 Ms – 4	Pan – 61 cm Ms – 2.44 m
SPOT 5	2002	Pan – 1 Ms – 4	Pan – 2.5 m Ms – 10 m
Pléiades	2001-2003	Pan – 1 Ms – 4	Pan – 0.5 m Ms – 2 m
WorldView-1	2007	Pan – 1	Pan – 0.46 m
GeoEye-1	2008	Pan – 1 Ms – 4	Pan – 0.41 m Ms – 2.0 m
WorldView-2	2009	Pan – 1 Ms – 8	Pan – 50 cm Ms – 2 m
SPOT 6 Y 7	2012 y 2014	Pan – 1 Ms – 4	Pan – 1.5 m Ms – 6 m
Landsat 8	2013	Pan – 1 Ms – 8	Pan – 15 m Ms – 30 m
WorldView-3	2014	Pan – 1 Ms – 16	Pan – 31 cm Ms – 1.24 m

*Pancromáticas (Pan) y Multiespectrales (Ms)

Tabla 3.1. Resoluciones de las imágenes de diversas plataformas (Fuente: www.geoimage.com.au).

3.2 Sistemas de Posicionamiento Global - GPS

El GPS (Global Positioning System), es decir el Sistema de Posicionamiento Global, es un proceso utilizado para establecer una posición en cualquier punto del globo terrestre (Zogg, 2002).

De acuerdo con Zogg (2002), y como se observa en la Figura 3.17, los dos valores que se pueden determinar en cualquier lugar de la Tierra son los siguientes:

- 1) La localización, es decir longitud, latitud y altura con coordenadas exactas, con un rango de error de entre 20 m y aproximadamente 1 mm.
- 2) El tiempo, de acuerdo con el UTC (Tiempo Universal Coordinado) con una precisión de 60 nanosegundos a aproximadamente 5ns.

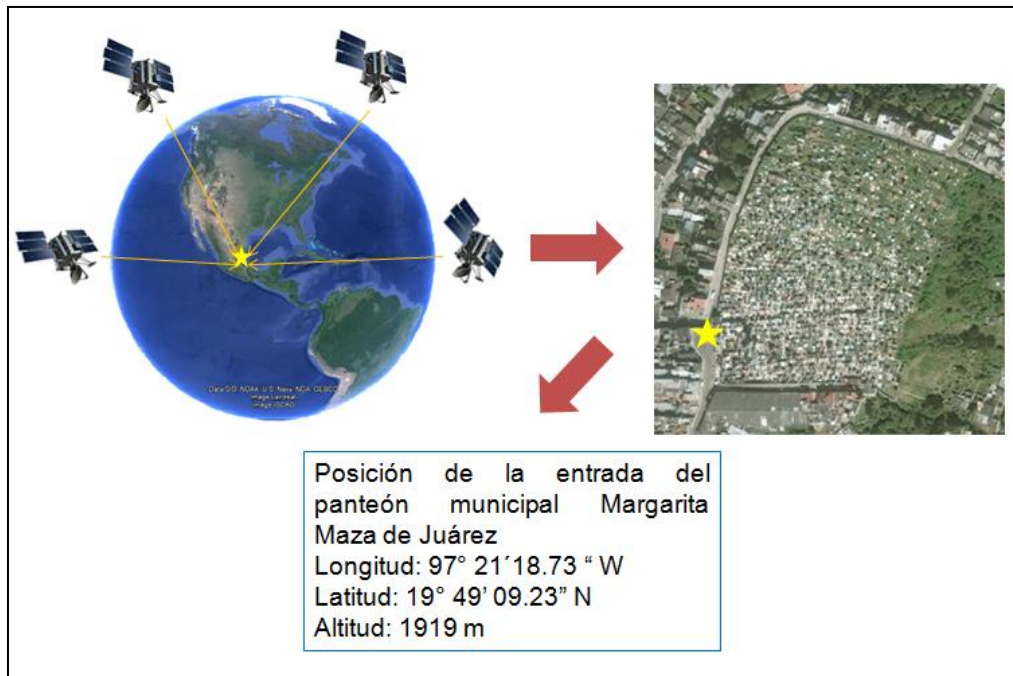


Figura 3.17. Posicionamiento de un punto sobre el globo terrestre (Modificado de Zogg, 2002).

Los receptores GPS tienen diferentes usos, entre los cuales se pueden mencionar el posicionamiento, la localización, la navegación, la topografía y la determinación del tiempo y se emplean tanto para particulares (por ejemplo, en actividades de ocio, como senderismo, vuelos en globo, esquí etc.), como por empresas privadas o gubernamentales (para la topografía, la determinación del tiempo atmosférico, navegación, control de vehículos, etc.) (Zogg, 2002).

El GPS (la descripción completa es: NAVigation System with Timing And Ranging Global Positioning System, NAVSTAR-GPS) fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, puede ser utilizado tanto por civiles como por personal militar. La señal civil SPS (Servicio de Posicionamiento Standard) puede ser utilizada libremente por el público en general, mientras que la señal militar PPS (Servicio de Posicionamiento Preciso), sólo puede ser utilizada por las agencias gubernamentales autorizadas (Zogg, 2002).

El primer satélite fue puesto en órbita el 22 de febrero de 1978 y actualmente hay 28 operando alrededor de la Tierra a una altura de 20.180 km en 6 planos orbitales diferentes. Sus órbitas están inclinadas a 55° con respecto al Ecuador, por lo que se garantiza que por lo menos 4 satélites están en comunicación por radio con cualquier tipo de GPS (Figura 3.18). Este es el número ideal de satélites para corregir la posición exacta del punto de interés. Cada satélite orbita la Tierra en aproximadamente 12 horas y tiene cuatro relojes atómicos a bordo, para obtener la hora exacta (Zogg, 2002).

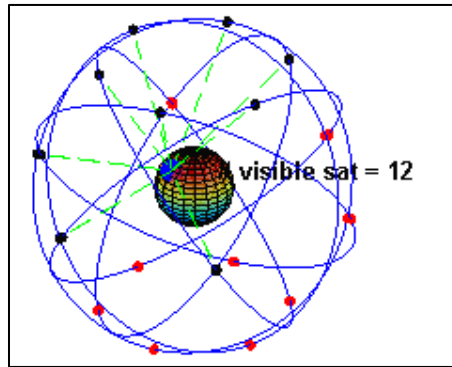


Figura 3.18. Satélites en órbita del GPS (Fuente: <http://www.max4systems.com/tecnologia.html>).

De acuerdo con Rizos (1999), y como se observa en la Figura 3.19, el sistema GPS consta de tres segmentos o interfaces, los cuales se mencionan a continuación:

- 1) Segmento Espacial o satelital: comprende los satélites y las señales transmitidas.
- 2) Segmento de Control o Terrestre: son las instalaciones en Tierra que llevan a cabo las tareas del seguimiento de los satélites, los cálculos orbitales, telemetría y control diario del segmento espacial.
- 3) Segmento del Usuario: toda la gama de aplicaciones para equipos y técnicas computacionales que están disponibles para las personas.

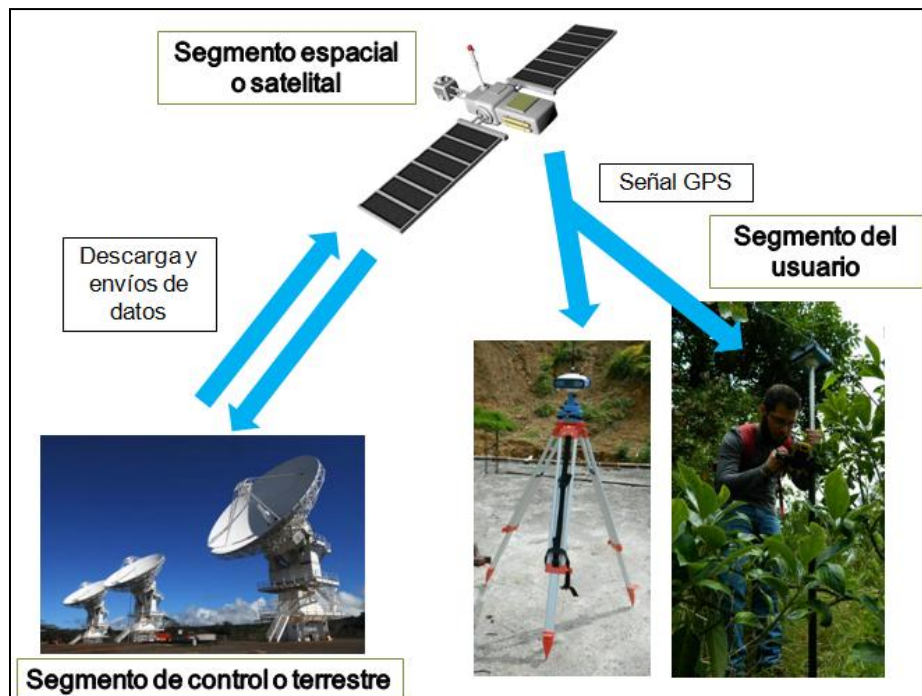


Figura 3.19. Segmentos del GPS.

Ventajas y desventajas

En la tabla 3.2, se hace referencia a las ventajas y desventajas del uso de los GPS, con base en las experiencias adquiridas durante trabajo de campo.

Ventajas	Desventajas
Velocidad para un levantamiento de puntos	Interferencia por estrato arbóreo
Precisión alta con error de 1-2 m	Tiempo atmosférico adverso
Constante y continua descarga de datos	Interferencia por edificios o cuerpos de agua
Manejable, manipulable y trasportable	Falla en los satélites o en el receptor
Resistente a golpes, caídas y agua	Costo

Tabla 3.2. Ventajas y desventajas del uso del GPS.

3.3 Sistemas de Información Geográficas

Los Sistemas de Información Geográfica, también conocidos como SIG's, son sistemas de gestión de bases de datos que facilitan el almacenamiento, recuperación, manipulación y análisis de datos espaciales y temporales, para su posterior exhibición en forma de mapas, tablas y figuras (Wright, 1997).

En otras palabras, un SIG es un sistema informático específicamente diseñado para almacenar, recuperar y analizar información geográficamente referenciada. El término SIG es difícil de definir, ya que significa diferentes cosas para diferentes disciplinas. Algunas veces se define por sus partes, por las características de las aplicaciones o por lo que el sistema puede hacer (Wright, 1997).

Los SIG están constituidos por subsistemas que permiten ingresar, almacenar, editar y analizar datos geográficos, todo ello con el objetivo de convertir datos en información útil para la toma de decisiones. El elemento principal de un SIG es su capacidad analítica, para su posterior síntesis cartográfica, es decir, los SIG permiten presentar la información en forma de mapas y en bases de datos (Bocco, Sin año).

En un sentido amplio, cualquier información que se refiere a una ubicación en la superficie terrestre, puede ser considerada como información geográfica. Puesta en práctica ésta definición cubre casi todo lo que existe en la Tierra, por lo que es más útil sólo considerar la información que contiene una problemática a tratar (Gregory y Ell, 2007).

Los datos de los censos son también considerados como información geográfica, porque consisten en estadísticas y bases de datos sobre lugares claramente delimitados de la superficie terrestre, como regiones, estados, municipios, distritos, colonias etc. (Gregory y Ell, 2007). De igual manera, los indicadores tanto naturales, sociales, económicos, políticos y culturales, así como los monumentos históricos, textos, dibujos o fotografías entran en el rubro de información geográfica.

Un SIG depende principalmente del concepto de localización, esto es la posición de los datos geográficos, con respecto a un sistema de coordenadas conocidas (latitud y longitud), sus atributos y sus interrelaciones espaciales (Wright, 1997).

De acuerdo con Wright (1997), la información necesaria para cualquier característica geográfica tiene cuatro componentes principales:

- 1) Su posición geográfica, es decir, donde está.
- 2) Sus atributos, qué es y cómo es.
- 3) Sus relaciones espaciales, su relación con otras características espaciales
- 4) El tiempo, cuando la condición o característica lo hizo existir.

3.3.1 Componentes de los SIG's

De acuerdo con Buckey (1997), un SIG cuenta con una serie de componentes que se combinan para hacer que el sistema funcione, a continuación se mencionan los componentes esenciales:

- a) **Hardware:** se refiere a todas las partes físicas del sistema operativo, estos pueden ser eléctricos, electrónicos, electromecánicos y mecánicos. En otras palabras se refiere al conjunto de los componentes que integran la parte material de una computadora.
- b) **Software:** son los programas que proporcionan las funciones y herramientas necesarias para almacenar, analizar y desplegar la información geográfica.
- c) **Datos:** es quizá el componente más importante, pueden ser tanto geográficos como tabulares, públicos como privados, generales como particulares, etc. Todos almacenados en la memoria del software.
- d) **Usuarios:** van desde personas comunes hasta técnicos especialistas que diseñan y mantienen el software. La interacción de estas dos personas es fundamental para el uso exitoso y la aplicación correcta de la tecnología

SIG, ya que tiene un valor limitado sin las personas que gestionan el sistema y lo desarrollan para su aplicación al mundo real.

- e) **Metodología:** Un correcto uso del SIG requiere de las reglas de implementación y aplicación, que son los modelos y las prácticas operativas de cada sistema.

3.3.2 Tipos de SIG

En los siguientes apartados se hará referencia a los principales programas de SIG, con los que se trabaja en México:

- **ArcGIS:** es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los SIG, producido y comercializado por ESRI. Bajo el nombre de ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. ArcGIS Desktop, la versión de escritorio, es una de las más utilizadas, incluyendo en sus últimas ediciones las herramientas ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcScene y ArcGlobe (ESRI, 2015).

De acuerdo con ESRI (2015), algunas de las principales herramientas de ArcGIS son:

- *Spatial Analyst:* Proporciona una amplia posibilidad de recursos relacionados con el análisis espacial de datos. Esta herramienta permite obtener información nueva de los datos existentes, hallar ubicaciones adecuadas, realizar análisis a distancia, identificar la mejor ruta existente entre dos puntos, realizar análisis estadísticos e interpolar valores de datos para un área de estudio determinada.
- *3D Analyst:* la extensión proporciona herramientas para la creación, visualización y análisis de datos SIG en un contexto tridimensional.



Figura 3.20. Logo de ArcGIS (Fuente: <http://www.arcgis.com/features/>)

- **GRASS:** Geographic Resources Analyst Support System, por sus siglas en inglés, es un software SIG bajo la licencia GPL. Puede soportar información tanto raster como vectorial y posee herramientas de procesamiento digital de imágenes. Está disponible principalmente para plataformas UNI (GNU/Linux),

aunque existe un proyecto paralelo denominado winGRASS GIS, que es basada en el sistema operativo Microsoft Windows (OSGeo, 2015).



Figura 3.21. Logo de GRASS GIS (Fuente: <https://grass.osgeo.org/>)

- **gvSIG:** Es un proyecto de desarrollo de SIG en software libre, fue impulsado por el gobierno regional de la Comunidad Valenciana (Generalidad Valenciana) de España, de ahí su abreviatura gvSIG. Es un programa informático para el manejo de información geográfica con precisión cartográfica que se distribuye bajo la licencia GNU GPL v3. Permite acceder a información vectorial y rasterizada así como a servidores de mapas (gvSIG, 2009).



Figura 3.22. Logo de gvSIG (Fuente: <http://www.gvsig.com/es>).

- **ILWIS:** Integrated Land and Water Information System, por sus siglas en ingles, es un SIG y software de percepción remota para el manejo de información geográfica vectorial y raster. Las características de ILWIS incluye digitalización, edición, análisis y representación de geodatos así como la producción de mapas de calida (ILWIS, 2010).



Figura 3.23. Logo de ILWIS (Fuente: <http://www.ilwis.org/>)

3.4 Fotointerpretación

La interpretación o el análisis de imágenes es el proceso de visualización de imágenes y de atribuir sentido a lo que se ve. El análisis implica el reconocimiento de patrones, con base en la experiencia en el campo y la formación previa, a lo que se le denomina “ojo calibrado” (Prost, 2013).

En Geomorfología, la fotointerpretación puede ser entendida como el análisis de fotografías aéreas o, más recientemente, en imágenes de satélite, y es la mejor técnica tradicional para la identificación de los procesos que dan origen al relieve (Ardizzone *et al.*, 2002).

Para realizar un buen análisis estereoscópico tanto de fotografías aéreas como de imágenes de satélite, se necesita la identificación y comprobación en campo de los procesos identificados en las fotos o imágenes (Ardizzone *et al.*, 2002).

Para la interpretación de las fotografías e imágenes, es necesario ocupar algunos instrumentos, estos pueden ser estereoscopios físicos y digitales. Estos permiten la vista en tercera dimensión.

a) Estereoscopios físicos

Los estereoscopios permiten la visualización tridimensional de la superficie de la Tierra captada en fotografías aéreas y son una herramienta que proporciona un mejor análisis de las imágenes del relieve. Con el uso de la exageración vertical, se pueden reconocer laderas de muy poca pendiente, que de otro modo no sería evidente, ya que sin el uso de la visión estéreo, sería difícil determinar si se trata de un valle o una cresta (Prost, 2013).

Existen estereoscopios de espejos y de bolsillo (Figura 3.24), ambos requieren del paralelaje para la visualización estereoscópica, es decir el desplazamiento

aparente de un objeto como resultado de verlo desde dos ángulos diferentes. Esto se consigue con la sucesión de fotografías aéreas, que se solapan de acuerdo con la trayectoria de vuelo, 60% de manera longitudinal y 10% – 20% lateral (Prost, 2013).

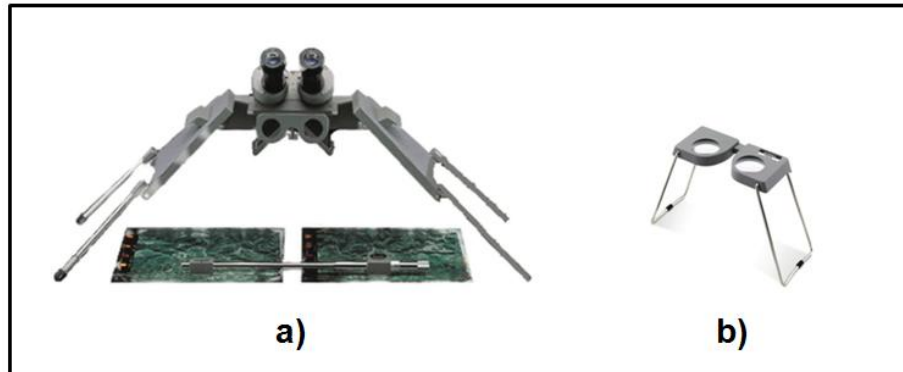


Figura 3.24. a) Estereoscopio de espejos; b) Estereoscopio de bolsillo (Modificado de Prost, 2013).

Los estereoscopios de espejos son grandes y voluminosos, pero permiten al usuario ver la totalidad del área de superposición sin mover las fotos. En cambio los estereoscopios de bolsillo por ser compactos son convenientes para el trabajo de campo, sin embargo, esto requiere que se doblen las fotos y que haya un desplazamiento continuo, ya que no cubren toda la zona de solapamiento. Combinado con lentes de aumento, proporcionan un máximo detalle con un mínimo de tensión en el ojo (Prost, 2013).

b) Estereoscopios digitales

Vivimos en un mundo tridimensional, por lo que desde los últimos dos siglos se ha intentado representar la visión con profundidad, principalmente con las fotografías aéreas y recientemente con el avance de la tecnología digital, se trabaja con imágenes gráficas en computadora (PLANAR, 2008).

La estereoscopía digital ayuda a tener una visualización más rápida, más precisa, cómoda e interpretaciones más agradables de la superficie de la Tierra, aunque tiene diversas aplicaciones (PLANAR, 2008).

De acuerdo con PLANAR (2008), la visualización estereoscópica digital es útil para las siguientes aplicaciones:

- Fotogrametría y teledetección
- Análisis de imágenes geoespaciales
- Modelado geofísico
- Modelado molecular

- Video juegos
- Exploración de petróleo y gas
- Arquitectura y diseño mecánico
- Videografía
- Imágenes médicas
- Simulación quirúrgica
- Enseñanza de anatomía humana

Es necesario contar con fotografías aéreas e imágenes de satélite en versión digital, ya que a partir de éstos materiales a muy alta resolución se pueden obtener modelos estereoscópicos 3D, que son perfectos en la identificación de procesos de ladera y cartográfica de PRM (Alkevli y Encanoglu, 2011).



Figura 3.25. Ejemplo de estereoscopio digital (Fuente: PLANAR, 2008).

3.5 Uso del PLANAR StereoMirror

El sistema utilizado en este trabajo es el StereoMirror (Figura 3.26), consiste en dos monitores, uno arriba del otro a 110° de distancia angular, cuyas imágenes se interceptan en un cristal polarizado que está colocado en medio de los dos monitores, bisecando el ángulo de 110° . La imagen de monitor inferior pasa a través de la parte inferior del cristal a 0° y la imagen del monitor superior se refleja en la parte superior del cristal a 90° . El cristal tiene una cubierta reflejante en su parte superior y una cubierta anti reflejante en la inferior, eso evita que haya doble reflectancia y se tengan más de dos imágenes. El usuario utiliza un par de lentes polarizados que hacen que éste solo vea con su ojo derecho una de las imágenes que se conjuntan en el cristal, en este caso la imagen del monitor inferior, y con su

ojo izquierdo la imagen del monitor superior. Esto hace que el cerebro lea las dos imágenes simultáneamente y las interprete como una sola en 3D (PLANAR, 2008).

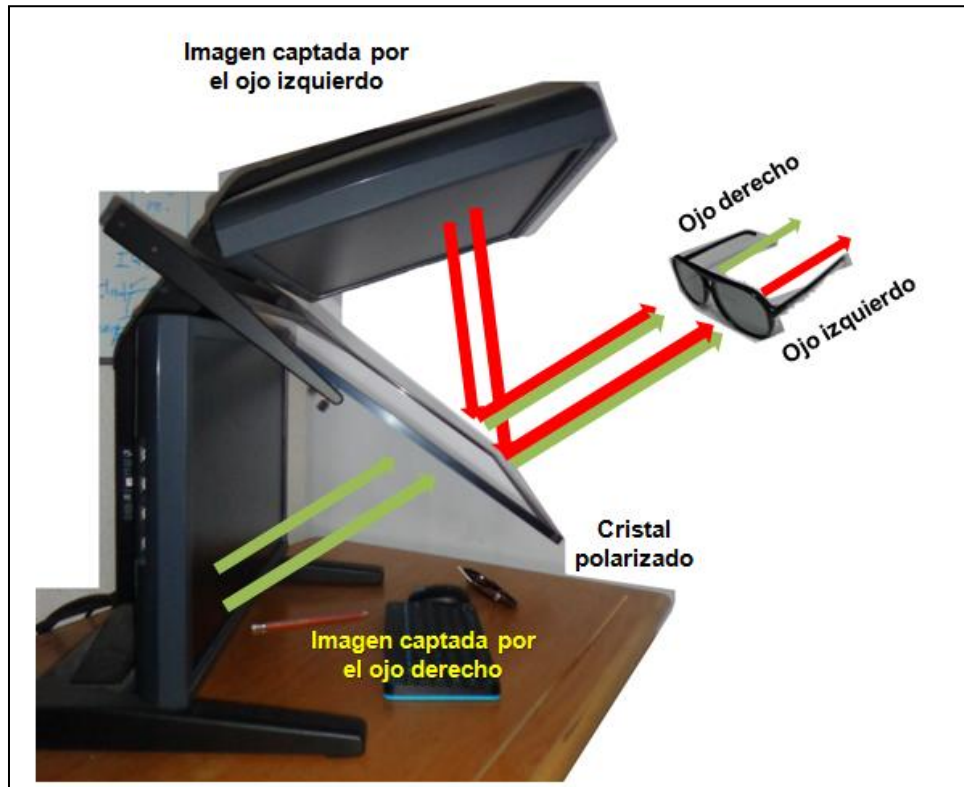


Figura 3.26. Sistema Planar StereoMirror (Modificado de PLANAR, 2008).

El sistema del estereoscopio digital StereoMirror, se basa en el principio de la estereopsis, es decir, el fenómeno que permite a los seres humanos observar en tercera dimensión, ya que la imagen que percibe cada retina tiene una disparidad binocular; esto es cuando dos imágenes muy similares se perciben desde ángulos distintos, y son procesadas por el cerebro como una sola imagen en 3D, cuando esto ocurre se le conoce como efecto estereoscópico (ERDAS, 2009).

De igual manera, cuando se tienen dos fotografías aéreas de un área común tomadas desde dos ángulos diferentes también ocurre la estereopsis y el efecto estereoscópico. Cuando se observa el mundo físico desde dos imágenes distintas, (derecha e izquierda) el cerebro automáticamente percibe la variación de profundidad entre los objetos que se representan en ambas imágenes, se crea la sensación de diversas alturas, así como objetos más cercanos y más alejados (ERDAS, 2009).

Cuando el cerebro percibe estas dos imágenes como una sola en 3D se dice que se ha creado un estéreo-modelo. Este modo de percibir permite una visión constante en 3D (ERDAS, 2009).

Capítulo IV. Materiales y Metodología

4.1 Materiales

Para la elaboración del presente trabajo se necesitaron los siguientes materiales:

- Fotografías aéreas
- Imágenes de satélite
- GPS
- PLANAR
- SIG

a) Fotografías aéreas

Las fotos aéreas que se utilizaron fueron de cuatro vuelos aéreos de años diferentes, el primero de 1942 del IGg, el segundo de 1956 de ICA (Figura 4.1), los últimos dos de 1999 y del 2007 de INEGI (Figura 4.2), de las cuales se hicieron mosaicos aéreos para poder utilizarlos en el PLANAR.

Son 4 fotografías de 1942 a una escala de 1:20,000, sólo cubren la parte sur de Teziutlán. Con tan solo 4 fotografías de 1956, se cubre todo el municipio ya que son a una escala de 1:50,000. Las del año 1999 son 44 fotos, a una escala muy grande de 1:6,000. Derivado de los años de la toma aún se encuentran en blanco y negro y en versión impresa, mientras que, las del 2007 son 33 fotos las cuales cubren todo Teziutlán ya que son a una escala de 1:20 000, éstas proporcionan mayor detalle, además de ser a color y en versión digital.

En la tabla 4.1, se hace un resumen de los datos de las fotos aéreas empleadas.

Fecha	Número de fotos	Escala	Topo de Película
1942	4	1:20,000	Blanco y negro
1956	4	1:50,000	Blanco y negro
1999	44	1:1,600	Blanco y negro
2007	33	1:20,000	Color

Tabla 4.1. Características de las fotografías aéreas utilizadas.

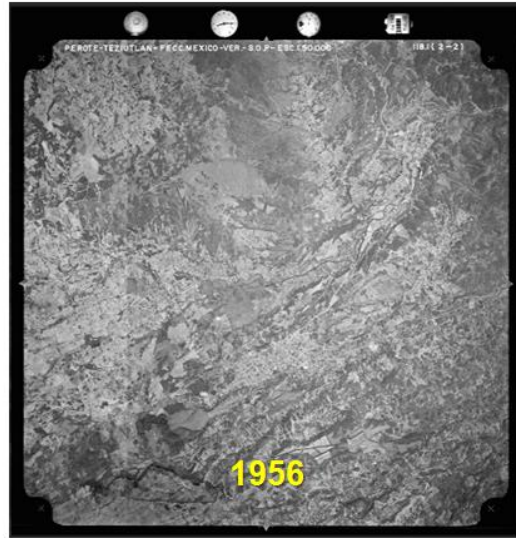
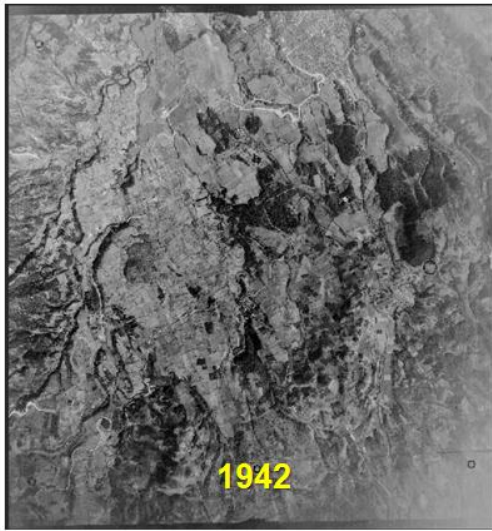


Figura 4.1. Ejemplo de fotos aéreas utilizadas de 1942 y 1956 (Elaboración propia Fuente: IGg, 1942; ICA, 1956).

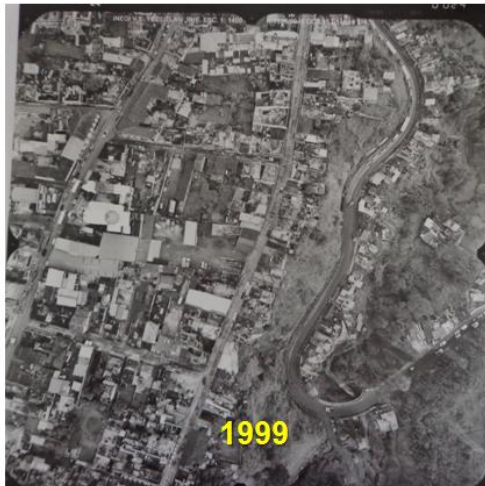


Figura 4.2. Ejemplo de fotos aéreas utilizadas de 1999 y 2007 (Elaboración propia Fuente: INEGI, 1999 y 2007).

b) Imágenes de satélite

LANDSAT 7

Las imágenes que se utilizaron fueron de 1999, cuentan con 5 bandas, 1 pancromática y 4 multiespectrales, a una resolución 30 m (Figura 4.3).

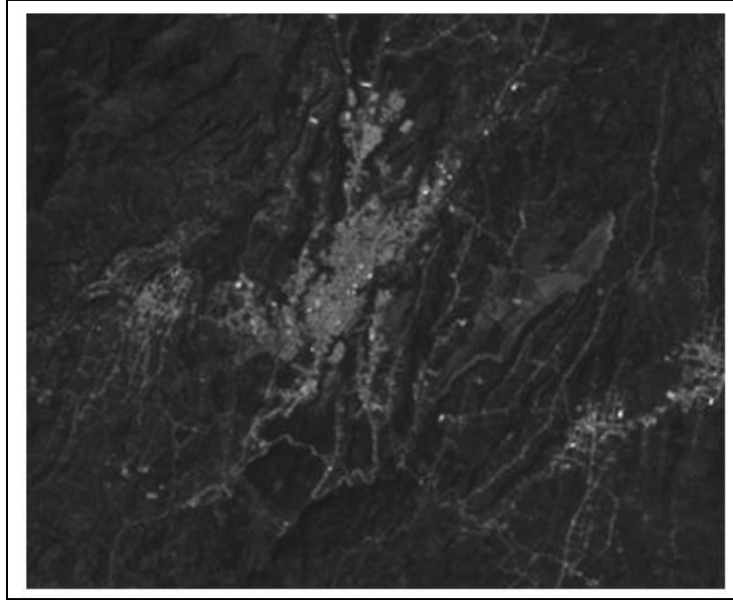


Figura 4.3. Ejemplo de imagen satelital LANDSAT 7 (Fuente: USGS, 1999).

SPOT 5

Las imágenes satelitales que se utilizaron fueron del 2007, con 5 bandas, 1 pancromática y 4 multiespectrales, con una resolución de 10 m (Figura 4.4).

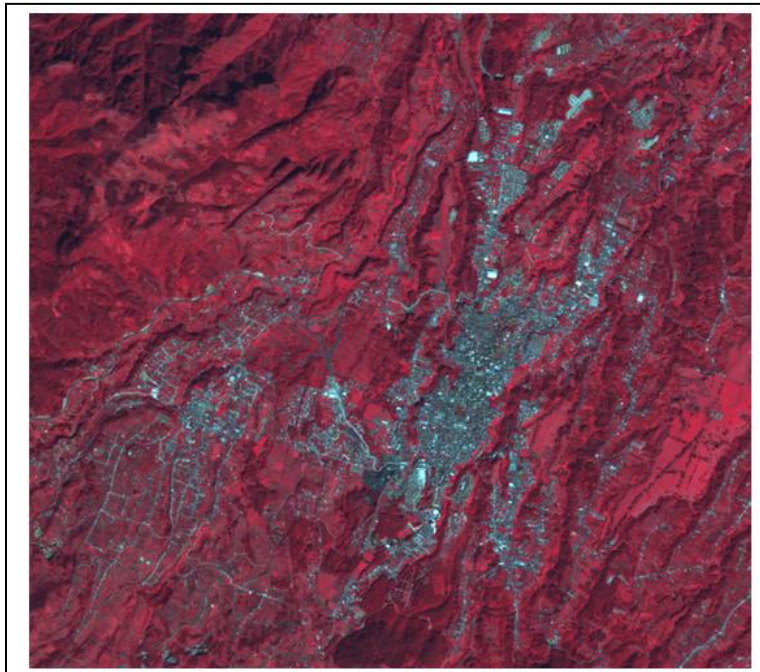


Figura 4.4. Ejemplo de imagen satelital SPOT 5 (Fuente: ERMEX, 2007).

Google Earth

Las imágenes de satélite utilizadas fueron de Google Earth de los años 2003, 2004, 2006, 2011 y 2012, ya que no había imágenes satelitales disponibles para todos los años que cubrieran Teziutlán (Figura 4.5).

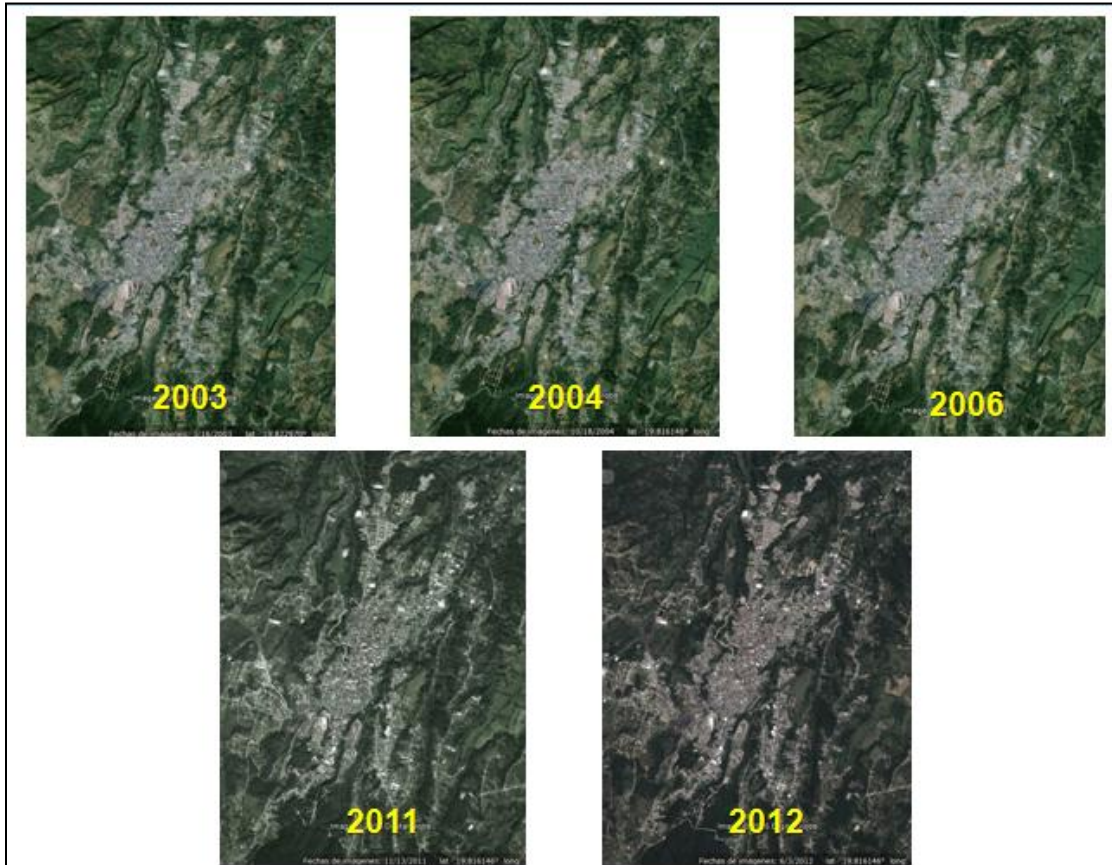


Figura 4.5. Imágenes de satélite utilizadas (Con base en Google Earth).

c) GPS

Para fines de este trabajo se utilizó el GPS STAR S86T, de la serie SOUTH de los productos RTK (Figura 4.6), dividido en GPS Base y GPS Rover (móvil). Estos son de tecnología avanzada y de innovación continua, ya que este GPS ofrece una buena precisión y fiabilidad, hace que el trabajo de topografía sea más fácil y simple.

Las principales características de éste GPS son: capacidad de memoria interna 64 Mb, 220 canales, muticable con interface de USB para la conexión más rápida a una PC, Bluetooth de 2.4 GHz con una alcance de 50 m, Tamaño: Altura 154 mm x 154 mm x 88 mm, Peso: 1,2 Kg con batería interna, resistente al agua, polvo, golpes y a la vibración.



Figura 4.6. GPS STAR S86T.

d) PLANAR

Para crear los polígonos de los deslizamientos sobre los mosaicos estereoscópicos de las fotografías aéreas fue necesario el uso del PLANAR Stereomirror PX2611W (Figura 4.7), para lograr la visión tridimensional del relieve y facilitar el trazo.



Figura 4.7. PLANAR Stereomirror PX2611W.

e) SIG

El sistema de información geográfica que se empleó para el trabajo fue Arc GIS 10, con el cual se digitalizaron los polígonos de los deslizamientos para su posterior cartografía.

4.2 Metodología

a) Búsqueda de referencias bibliográficas

El trabajo comenzó con la búsqueda y recopilación de información bibliográfica, hemerográfica, mesográfica y cartográfica de los diversos temas de interés de ésta tesis; desde información general de desastres en el continente americano y en México hasta particular del área de estudio, sobre la Sierra Norte de Puebla y Teziutlán, Puebla

La recopilación de información sirvió para la redacción de los tres primeros capítulos. A lo largo de la investigación se trabajó con un orden de escalas temporales y espaciales. En el primer capítulo se trataron los principales desastres en América y México, para después aterrizar en el tema de los procesos de remoción en masa con los ejemplos más significativos a nivel nacional.

En el capítulo II se centró el trabajo en el municipio de Teziutlán, Puebla, el cual se abordó desde los primeros registros de afectación por procesos gravitacionales del municipio hasta años recientes, mientras que en el tercer capítulo se describe las técnicas empleadas necesarias para realizar el inventario de los procesos de ladera.

b) Creación de Modelos 3D

Para realizar la interpretación de las fotografías aéreas, así como la creación de los modelos 3D, con los que se trabajó en el PLANAR, fueron necesarias diversas tareas.

Las fotografías aéreas de 1942, 1956 y 1999 se encontraban en formato impreso, por lo cual fue necesario escanearlas a la mayor resolución posible para que no perdieran detalle alguno, en este caso 1200 puntos por pulgada (1200 dpi). Las fotos aéreas del 2007 fueron adquiridas en versión digital.

En el caso de las 33 fotografías del 2007, que se componían de 4 líneas de vuelo, fue necesario rotar dos de ellas 180° para que todas quedaran orientadas en el

mismo sentido, ya que en la versión digital mantenían la misma orientación que la cámara fotográfica con las que habían sido capturadas.

Una vez en versión digital y bien orientadas las fotografías, el siguiente paso fue la construcción de los modelos tridimensionales, para lo cual fue utilizado el software *ERDAS Imagine*, en su módulo *Leica Photogrammetry Suite* (LPS), con el cual se crea un bloque de fotos orientado, es decir un archivo que contiene los pares estereoscópicos con sus datos de georreferencia.

Dentro del módulo LPS, se ingresan las fotografías y se les asignan algunos valores que pide el sistema conocidos como datos interiores de las fotos, tales como altura de vuelo, distancia focal, coordenadas del punto central de cada una de las fotos.

Una vez hecho lo anterior, automáticamente el sistema acomoda las imágenes de manera preliminar y las muestra en una vista previa, como se muestra en la Figura 4.8.

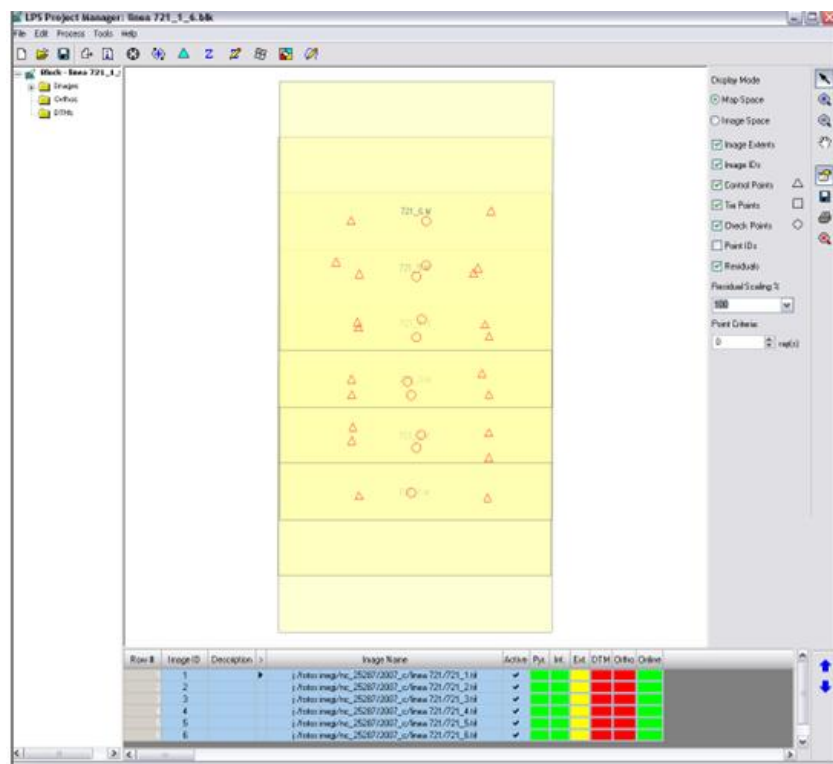


Figura 4.8. Alineación automática de las fotos en el LPS.

Para poder georreferenciar el bloque, el sistema pide puntos de control, por lo cual fue necesario ingresar puntos con coordenadas conocidas dentro de las fotos,

éstos tomados de Google Earth, de tal manera que cada punto quedara en dos fotos contiguas, haciendo que empalmaran para poder unir las.

Hecho lo anterior, el sistema requiere de *tie points* o puntos de unión, que son pixeles iguales que reconoce automáticamente el sistema en fotografías consecutivas. En la Figura 4.9, se observan los puntos de control y los *tie points*.



Figura 4.9. Puntos de control y *tie points*.

Una vez georreferenciado el bloque, es necesaria una triangulación, la cual se da de manera automática por el sistema, mediante la cual se conoce la ubicación de un punto en el modelo 3D.

En la Figura 4.10, se observa el bloque ya triangulado, es decir las fotografías fueron modificadas por el sistema de tal manera que se deforman un poco para poder realizar la estereoscopia.

El bloque orientado resultante se utilizó para crear el modelo tridimensional, en el software *ArcGIS 10*, con la herramienta *Stereo Analyst*, con la cual es posible la representación visual en 3D de las fotos.

Una vez en *ArcGIS 10*, se importa el proyecto creado en *ERDAS Imagine*, tal como se observa en la Figura 4.11.

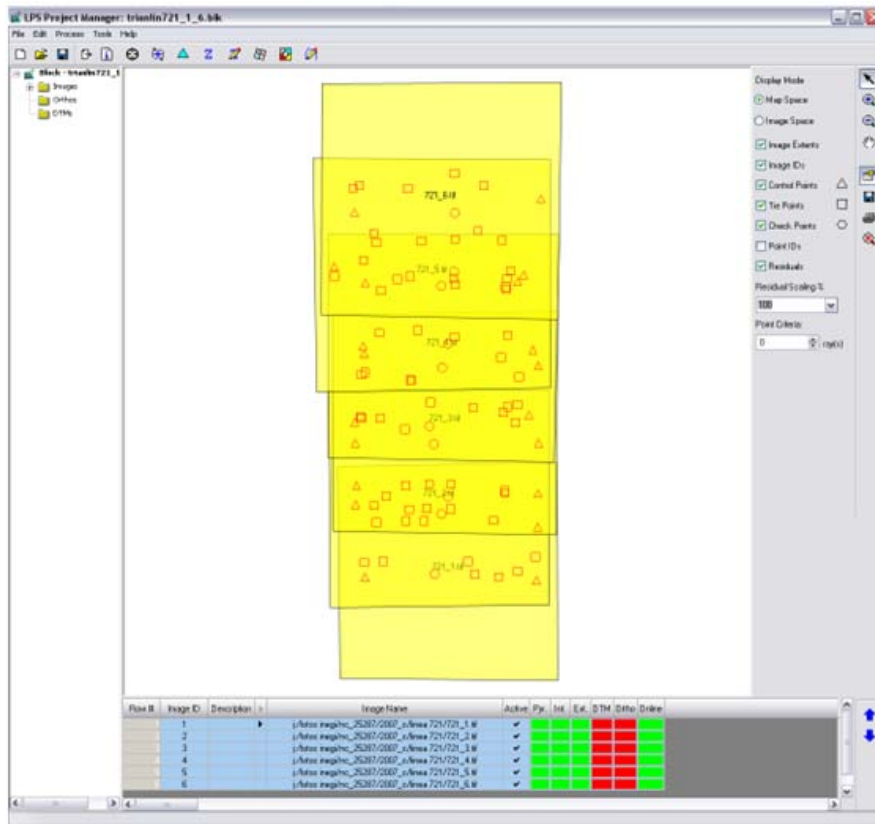


Figura 4.10. Triangulación del modelo orientado.

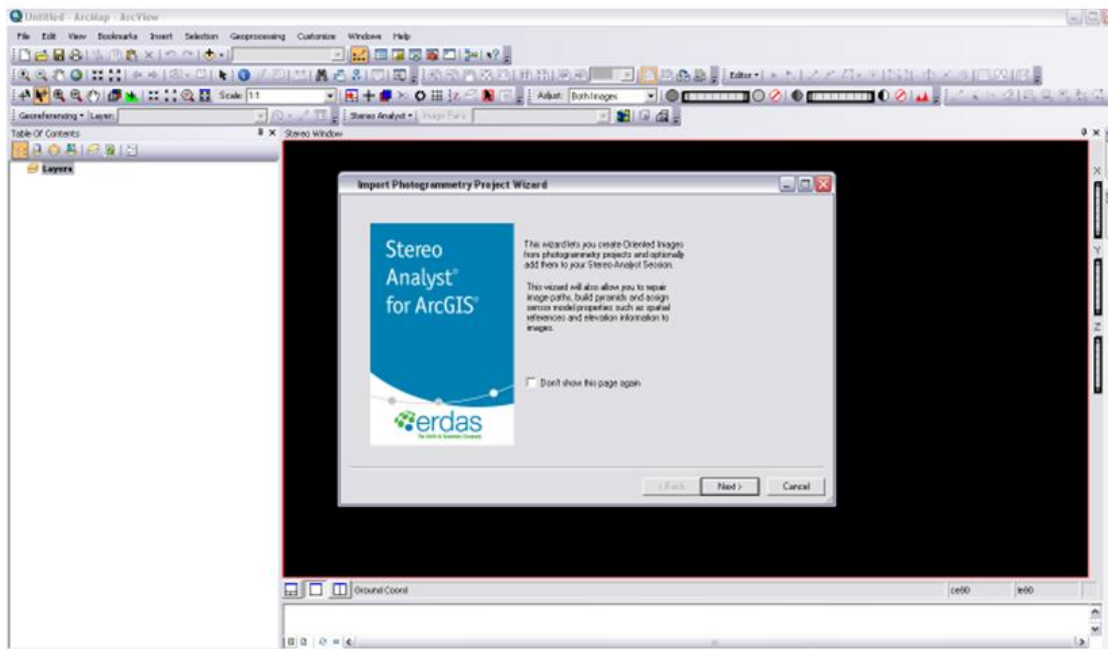


Figura 42.11. Importación del bloque orientado a ArcGIS.

Es necesario verificar que todos los campos estén correctos, es decir que los datos interiores de las fotos, los puntos de control, los puntos de unión y la triangulación no tengan problema alguno. Estos se verifican al estar todos los recuadros de color verde, como se observa en la Figura 4.12.

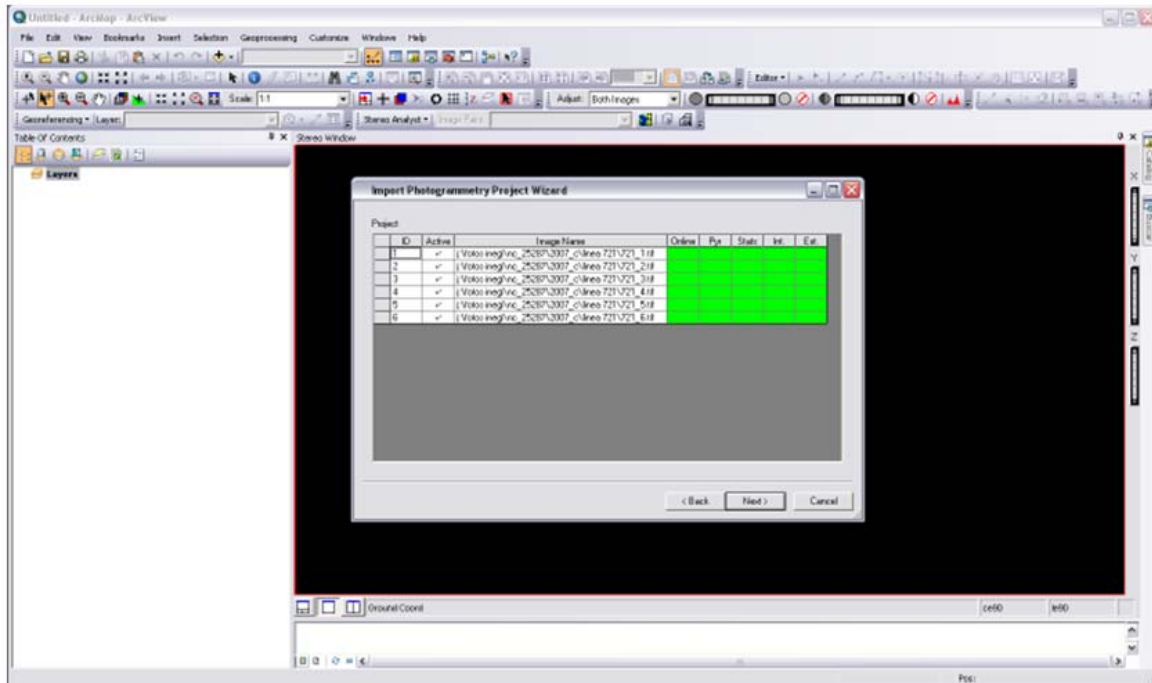


Figura 4.12. Campos correctos en la importación del bloque orientado.

La herramienta *Stereo Analyst* permite la visión en tercera dimensión del bloque de fotografías aéreas, como se observa con la Figura 4.13.

Con todos los pasos anteriores realizados fue posible dar inicio al trabajo estereoscópico y de interpretación sobre las fotografías aéreas, para ello se utilizó el PLANAR.

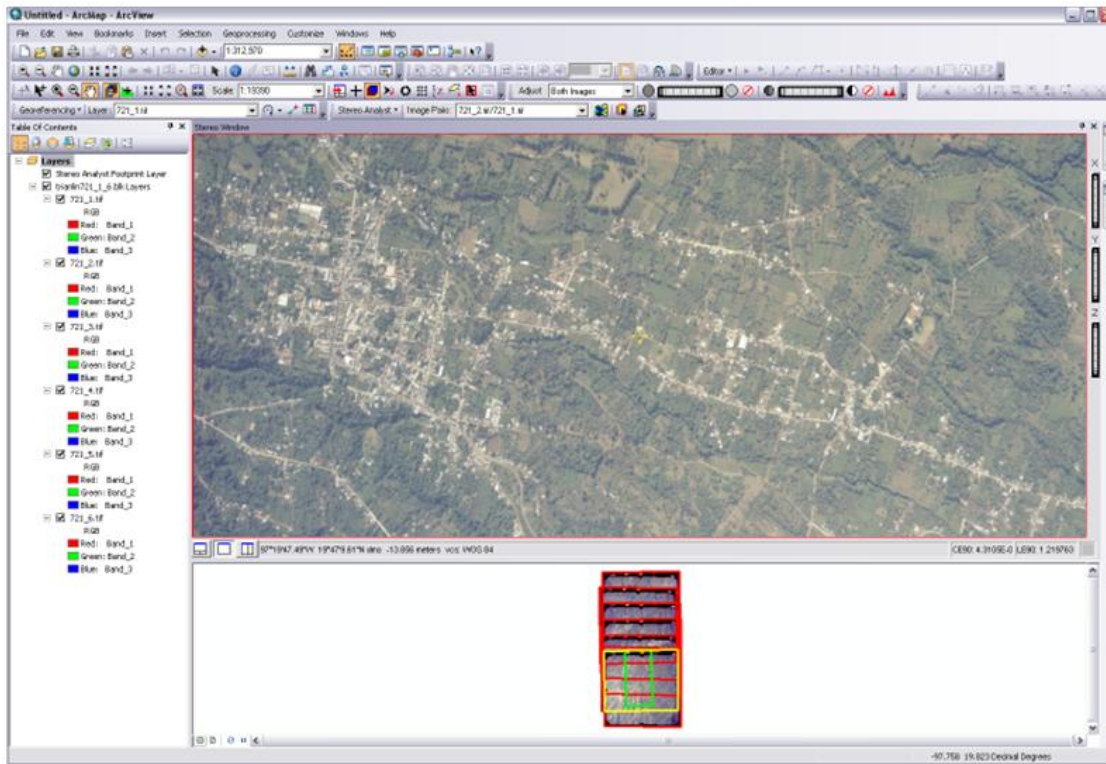


Figura 4.13. Visión 3D del bloque de fotografías aéreas en Stereo Analyst.

c) Análisis de Imágenes de Satélite

El análisis de las imágenes satelitales se realizó con el programa de Google Earth, se utilizaron desde las imágenes más antiguas hasta las más recientes; las primeras disponibles eran las del año 2003 y las más recientes del año 2012.

El material disponible que se utilizó, que corresponde al municipio de Teziutlán, incluyó las imágenes de los años 2003, 2004, 2006, 2011 y 2012.

Las imágenes de satélite fueron utilizadas para la identificación de procesos de remoción en masa. El análisis se realizó mediante la visión 2D y 3D, es decir, en dos dimensiones o en plano cuando la resolución de la imagen era bastante buena, así como en tres dimensiones, ya que el software ofrece la posibilidad de exagerar la altura mediante la utilización de un Modelo Digital de Elevación de 30 m.

Google Earth permite trazar polígonos que automáticamente se georreferencian y que se pueden guardar en formato KML para su posterior exportación y uso en el software de ArcGIS 10, por lo que no fue necesario realizar la correspondiente georreferenciación.

Se comenzó el trabajo con las imágenes del 2003. En ellas se identificaron procesos de ladera, con la herramienta de creación de polígono, en cada uno se trazó desde el escarpe, después por los límites de los flancos y por último por el depósito del proceso (Figura 4.14). Para una mejor organización se hizo una carpeta de cada año de las imágenes satelitales, donde se guardaban los polígonos correspondientes de cada año. Se hizo lo mismo para cada uno de los años de las imágenes.

Para la identificación de procesos gravitacionales, las principales características utilizadas fueron el color, la textura y la forma, es decir estas propiedades ayudaban a identificar la discontinuidad de la cobertura del suelo. Los procesos gravitacionales recientes son más fáciles de reconocer, ya que muestran al descubierto el suelo original.



Figura 4.14. Identificación de PRM en imagen de satélite de Google Earth 2003, barranca de la colonia San Andrés, Teziutlán (Con base en Google Earth 2003).

El análisis de las imágenes satelitales de la plataforma de Google Earth implicó ventajas y desventajas; éstas se incluyen en la tabla 4.2.

Ventajas	Desventajas
Interface sencilla, trazos rápidos y fluidos	Resolución baja en años 2003, 2004 y 2006
Creación de polígonos georreferenciados automáticamente	No hay cobertura total de la zona de estudio en años consecutivos
Exageración de la altura, para una mejor visualización	No es posible descargar imágenes georreferenciadas
Posibilidad de exportar archivo kml. al programa ArcGIS 10	Nubosidad
Software gratis	

Tabla 4.2. Ventajas y desventajas de utilizar Google Earth.

d) Fotointerpretación

Una vez creados los mosaicos de las fotografías aéreas para la visión del modelo tridimensional, se utilizó el estereoscopio digital Planar StereroMirror, con el software de ArcGIS 10.

Se comenzó con el trabajo de interpretación de las formas del relieve características de los PRM, es decir, con la identificación de procesos gravitacionales, para su posterior cartografía.

Directamente desde la vista 3D de la herramienta Stereo Analyst de ArcGIS, se pueden trazar vectores (shp) de puntos, líneas o polígonos, igual que como se hace en su visión en 2D, solo que con un cursor flotante, el cual permite trazar dentro de las coordenadas X, Y y Z.

Para identificar los procesos gravitacionales en el estereoscopio digital Stereo-Mirror, se utilizan los mismos criterios para la identificación geomorfológica de métodos tradicionales (ERDAS, 2009).

Cuando ocurre un PRM, la superficie cambia, deja una cicatriz distintiva que depende del tipo de proceso que se da y a la magnitud del mismo. De acuerdo con Fiorucci *et al.* (2011), los principales criterios para identificar procesos gravitacionales son forma, tamaño, tono, textura, patrón sombras, topografía y ambiente. Todos ellos bastantes útiles, pero el principal criterio es la forma (Ardizzone *et al.*, 2011).

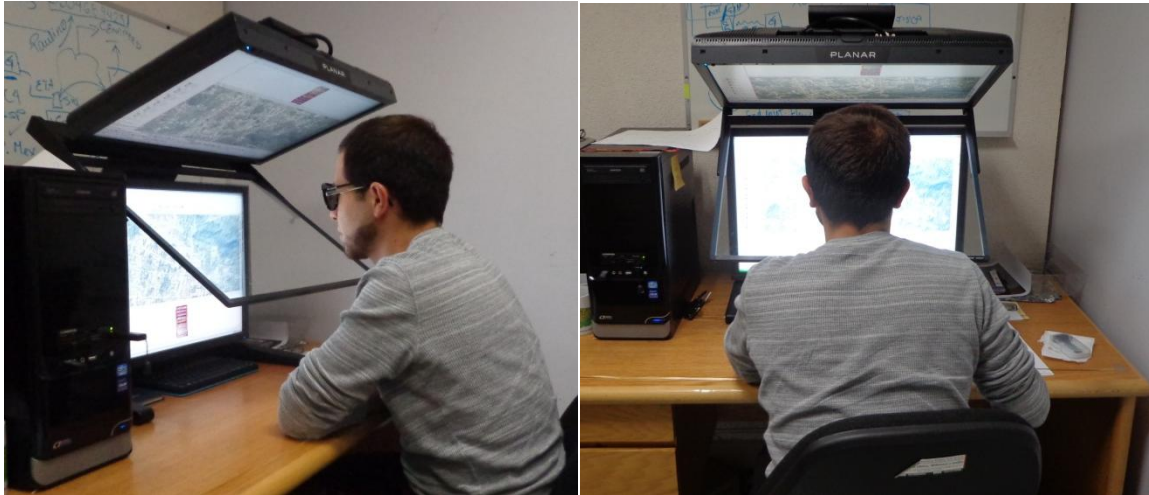


Figura 4.15. Ejemplo del uso del PLANAR para la fotointerpretación (Fuente: propia).

El principal rasgo para identificar y cartografiar PRM en las fotografías aéreas e imágenes de satélite, es el escarpe, que es el atributo morfológico más fácil de reconocer, ya que muestra una superficie con un aparente cambio en la cobertura del suelo. La resolución espacial de las fotografías e imágenes es muy importante para poder identificar éste rasgo (Fiorucci *et al.*, 2011)

Además de identificar los procesos, se cuantificaron y se definió la tipología de los mismos, es decir, si eran caídas, vuelcos, deslizamientos, flujos o movimientos complejos, definidos y explicados en el capítulo II.

Los polígonos de los procesos gravitacionales identificados, se georreferencian automáticamente en la plataforma SIG utilizada. Posteriormente fueron digitalizados y cartografiados

Tal como se observa en la Figura 4.16, el método de análisis tanto de las fotografías aéreas como de las imágenes de satélite, fue prácticamente el mismo, sólo que se utilizaron diferentes softwares. Primero se identificó, después se analizó y por último se interpretó lo que se observó. Se realizó el polígono de cada uno de los PRM identificados, para su posterior digitalización y cartografía.

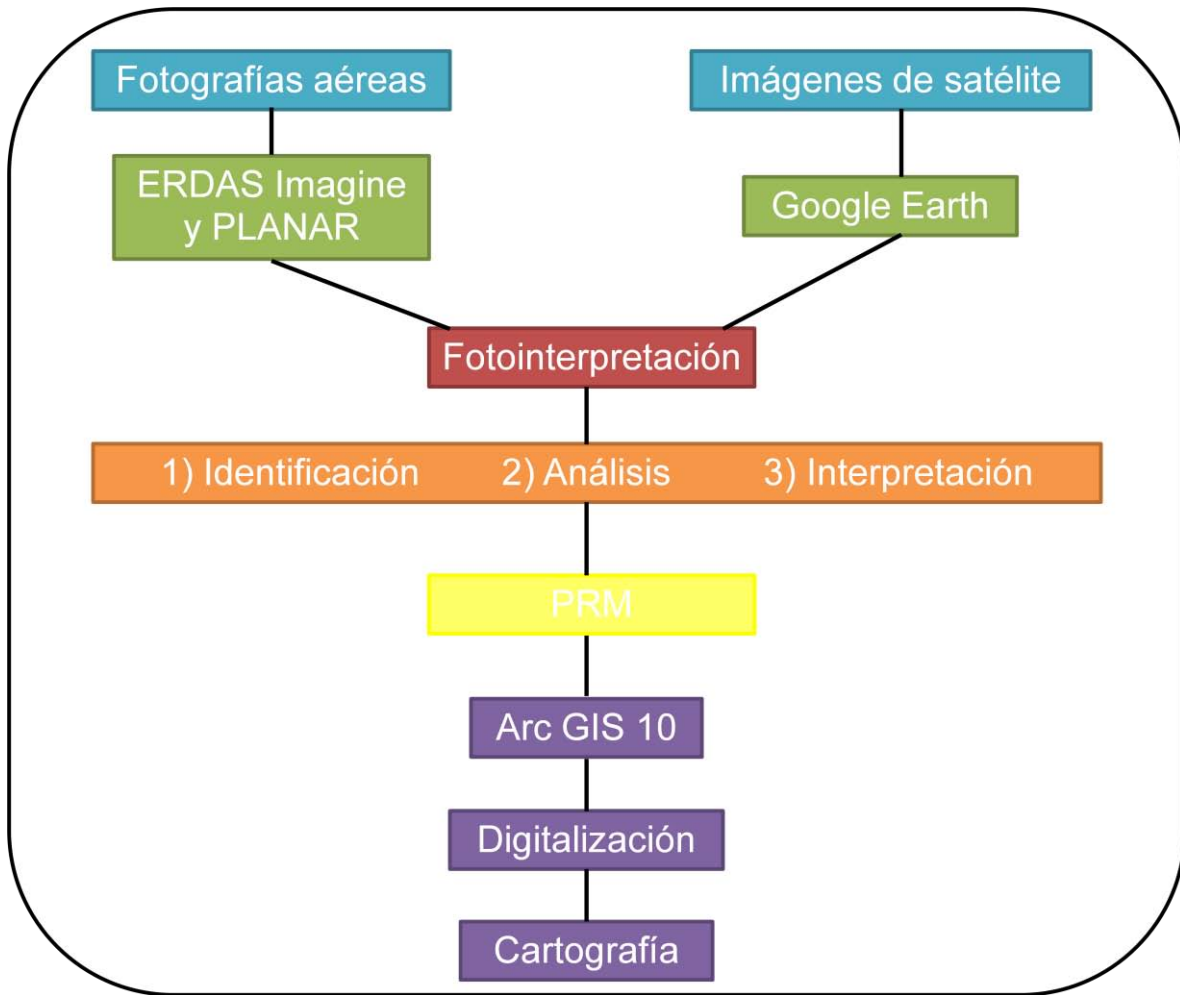


Figura 4.16. Diagrama de la metodología utilizada en la identificación de PRM.

e) Trabajo de campo

Se realizaron dos salidas de trabajo de campo. La primera se realizó del 7 al 16 de diciembre del 2014 y la segunda del 10 al 17 de mayo del 2015.

Los principales objetivos fueron contabilizar los procesos gravitacionales recientes, es decir que mostraban a simple vista sus rasgos característicos y que aún no habían sido cubiertos por vegetación, además de corroborar los procesos de ladera identificados en fotografías aéreas e imágenes de satélite.

El trabajo de campo también permitió obtener información general y específica de algunos deslizamientos, así como información empírica de los habitantes de Teziutlán, Puebla, sobre la ocurrencia de los PRM.

En un principio se realizaron recorridos aleatorios por todo el municipio para conocer y familiarizarnos con la zona de estudio, después fueron recorridos organizados, con un itinerario semanal con las colonias por visitar y con los propósitos particulares diarios.

Durante las salidas a campo se identificó la ubicación puntual de los PRM, con ayuda del GPS STAR S86T (Figura 4.17). En cada proceso de ladera se hizo el levantamiento de un punto, con datos de longitud, latitud y altura, con un error menor a 1 m.



Figura 4.17. Levantamiento de punto en el deslizamiento de la colonia La Aurora, Teziutlán, Puebla.



Figura 4.18. Levantamiento de punto en la desviación a Huehueimico.

Se visitaron las colonias que actualmente presentan inestabilidad de laderas, como Juárez, La Aurora, Mirtos, La Gloria, 7 Sabios, Xoloco, San Andrés, Ávila Camacho y el circuito Bicentenario (Figura 4.20). Además se platicó con algunos de los pobladores sobre sus experiencias en eventos pasados, principalmente con lo ocurrido en octubre de 1999, en las colonias La Aurora, Juárez y Ayotzingo.

En las visitas a campo además de identificar nuevos procesos gravitacionales, se corroboró la información de los PRM identificados por percepción remota.

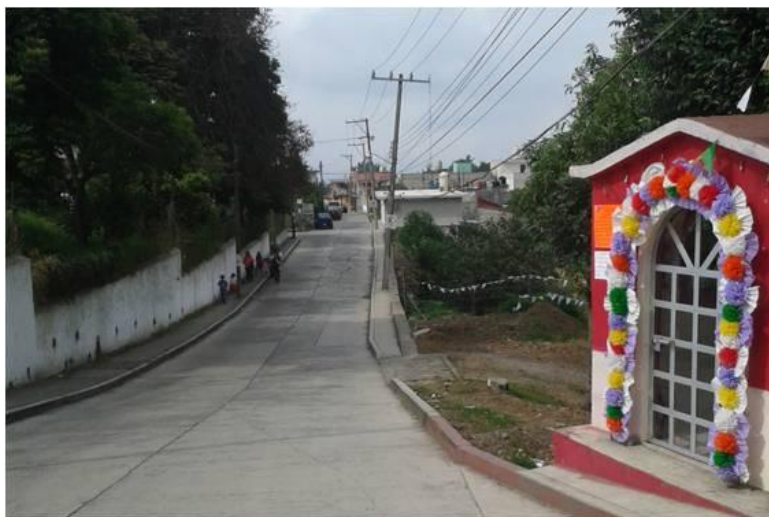


Figura 4.19. Síntoma de inestabilidad de laderas: inclinación de postes, colonia Ávila Camacho.

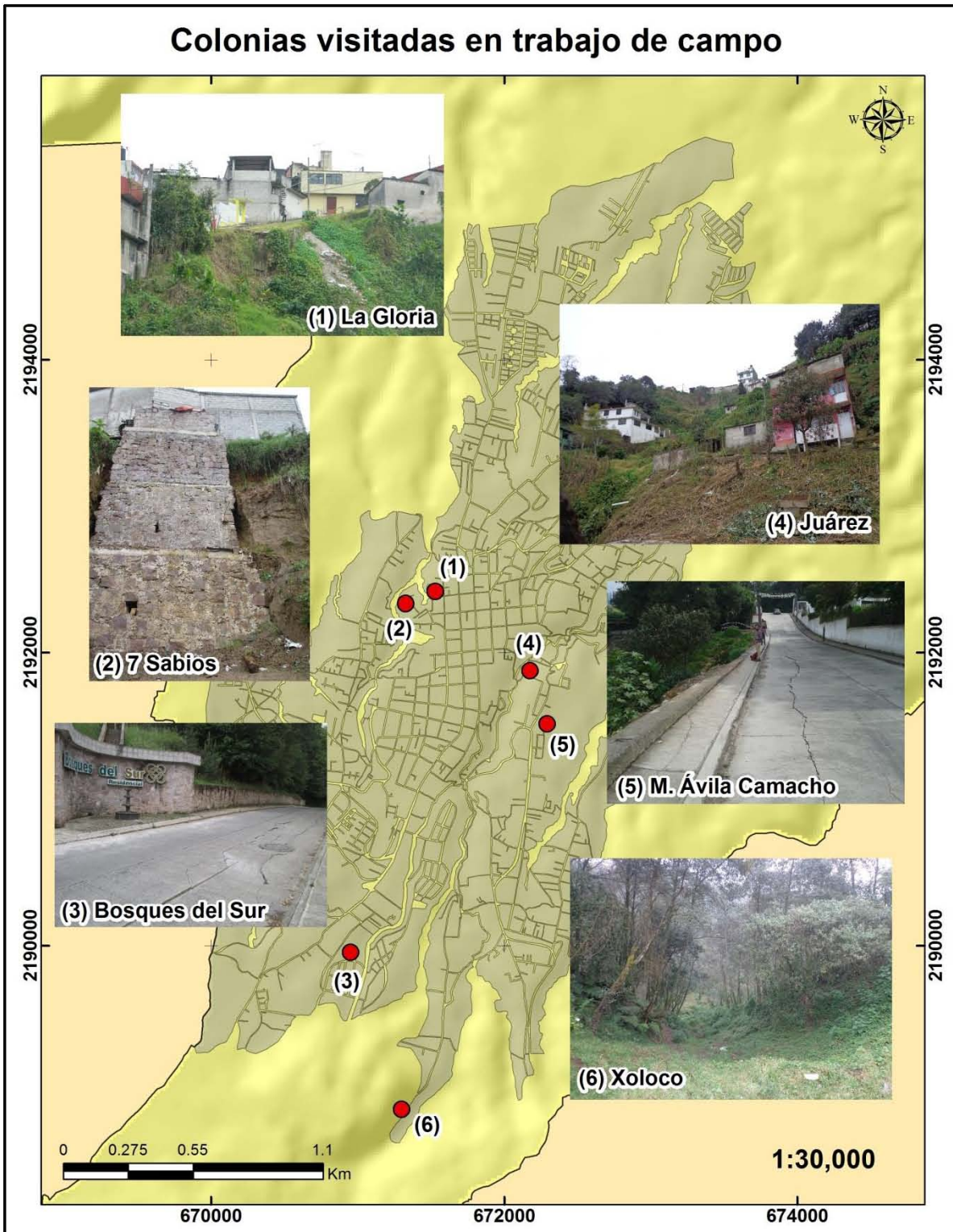


Figura 4.20. Colonias visitadas en trabajo de campo (Con base en INEGI,2015).



Figura 4.21. Casas abandonadas en la ladera de la colonia Juárez, Teziutlán.



Figura 4.22. Colonia La Gloria sobre circo de erosión.

Capítulo V. Caracterización de la distribución espacial de los PRM

5.1 Análisis espacial

La cabecera municipal de Teziutlán, Puebla, cuenta con un área total 13.72 km², en la cual con apoyo de la fotointerpretación se identificaron 243 procesos de remoción en masa (PRM). El 1.7% de la superficie de la cabecera, es el área que cubren todos los PRM identificados. El PRM de mayor superficie es de 20,421 m², mientras que el de menor dimensión es de 31 m². En la tabla 5.1, se muestran datos estadísticos obtenidos del inventario.

Variable	Total
Área de la cabecera municipal (km ²)	13.72
Número total de PRM	243
Superficie de la cabecera afectada (km ²)	0.234
% de la superficie de la cabecera afectada	1.7
Densidad de PRM (#PRM/km ²)	17.71
Superficie del PRM más pequeño (m ²)	31
Superficie del PRM más grande (m ²)	20,421
Promedio de superficie de PRM (m ²)	964

Tabla 5.1. Datos generales del inventario.

Dentro del inventario, se tomaron en cuenta los PRM localizados a 500 m a la redonda de la cabecera municipal, ya que el límite de la zona urbana es muy tajante y es necesario tomar en cuenta estos procesos por que afectan en gran medida a la sociedad de Teziutlán. Los PRM y su impacto no tienen límites territoriales.

De los 243 PRM identificados, el 65.8% ocurrieron en el año 1999 y el 11.95% en el 2007. Cabe mencionar que 1999 y 2007 son los años con los que más fotografías aéreas fue posible contar, además de tener una mayor escala y mejor resolución.

En los años de 1942 y 1956, también se encontraron numerosos procesos gravitacionales, 23 y 19 PRM, que representan un 9.5% y un 7.85% respectivamente para cada año. En la tabla 5.2, se muestra el número de PRM identificados por año y su respectivo porcentaje con respecto al total. Así mismo, se hace referencia al número de procesos.

Año	No. de PRM identificados	%
1942	23	9.5
1956	19	7.85
1999	160	65.8
2003	5	2.1
2004	2	0.8
2007	29	11.95
2011	1	0.4
2012	1	0.4
2014	2	0.8
2015	1	0.4
Total	243	100

Tabla 5.2. Número de PRM identificados por año.

En la tabla 5.3, se muestra la cantidad de PRM identificados en los distintos documentos consultados. El haber utilizado la mayor cantidad de fuentes disponibles, permitió encontrar procesos gravitacionales que no eran evidentes en algunos de ellos.

El 57.62% de los PRM, fueron identificados en fotografías aéreas. De éstos, 98 procesos fueron identificados en fotografías de INEGI. En las imágenes de satélite se registraron 41.13% del total de los PRM; en las tipo LANDSAT, fue posible identificar 72 casos.

Documento consultado	No. de PRM identificados	%
Fotografías aéreas – IGg	23	9.5
Fotografías aéreas – ICA	19	7.8
Fotografías aéreas – INEGI	98	40.32
LANDSAT	72	29.62
Google Earth	9	3.70
SPOT	19	7.81
Campo	3	1.25
Total	243	100

Tabla 5.3. Número de PRM identificados en documentos consultados.

Durante los recorridos de campo del 2014 y 2015, se identificaron varios PRM, pero la gran mayoría ya habían sido registrados en fotografías o imágenes satelitales de años precedentes, es decir, eran reactivaciones de procesos anteriores. Por esta razón, se puede visualizar que durante los recorridos de campo solo fue posible registrar 3 nuevos procesos. Sin embargo, la identificación

de todos los PRM fue esencial para validar la información derivada del trabajo de gabinete.

Todos los PRM identificados fueron representados cartográficamente a una escala de 1: 27,000, sobre el área política de la cabecera municipal y sobre un modelo sombreado. El mapa de la distribución espacial de los PRM se muestra en la Figura 5.1.

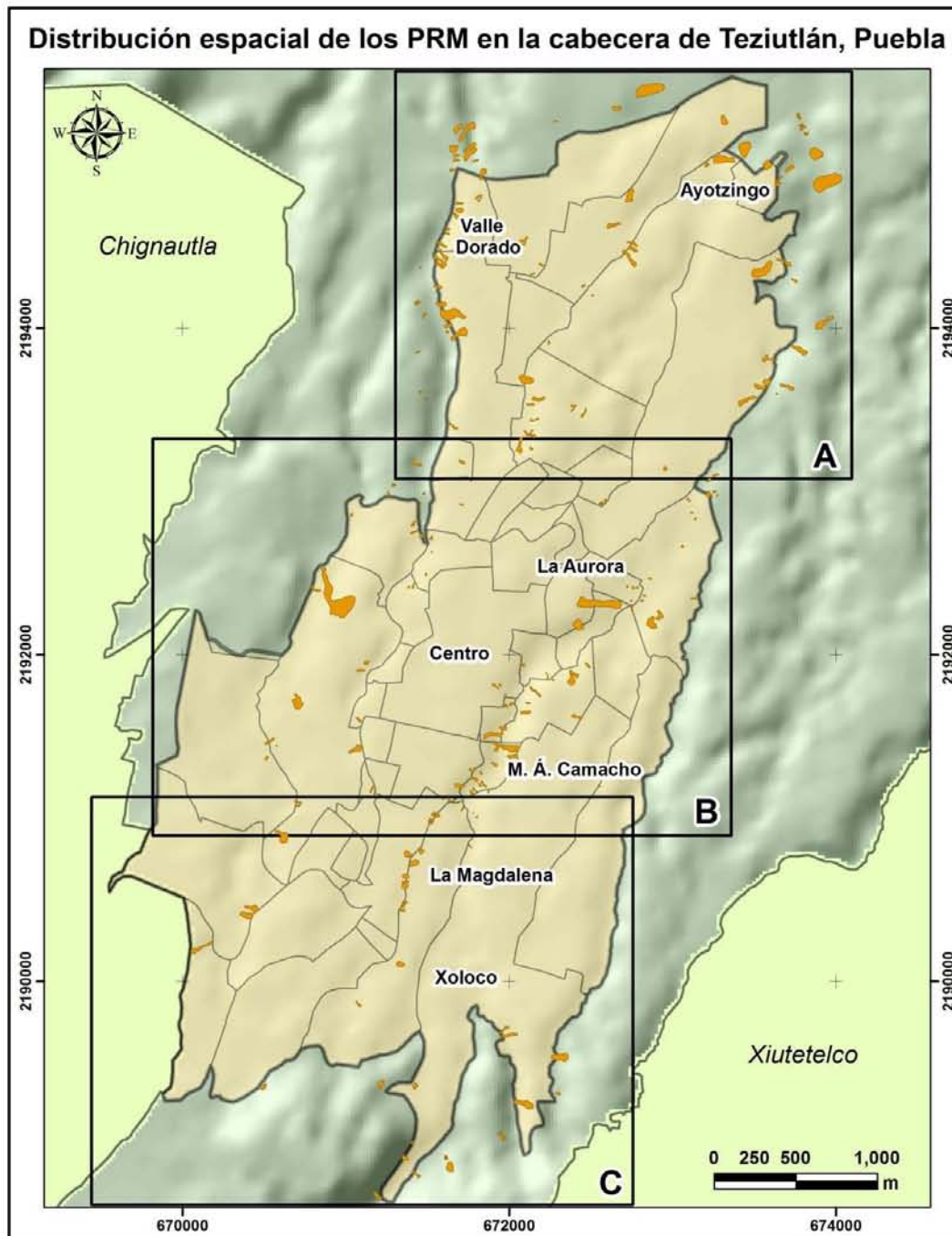


Figura 5.1. Mapa de la distribución espacial de los PRM.

Para una mejor representación cartográfica, el mapa general de la distribución espacial de los PRM se dividió en tres cuadrantes, ya que la escala empleada no permite apreciar los polígonos de los PRM, mismos que se representan con las letras A, B y C. Los nombres que se les asignaron a los cuadrantes son los siguientes:

- 1) A: Cuadrante Ayotzingo
- 2) B: Cuadrante La Aurora – Río Ixticpan
- 3) C: Cuadrante Xoloco

En todos los mapas de los sectores la capa de la cabecera municipal se encuentra sobre un modelo sombreado del terreno, para poder apreciar las formas más representativas de la superficie. Sobre la cabecera municipal se colocó una capa de las manzanas de las colonias, para su mejor ubicación. También se colocaron las curvas de nivel del relieve, a una equidistancia de 20 m.

a) Cuadrante Ayotzingo

La Figura 5.2, es el mapa de la parte Norte de la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla, a una escala de 1: 14,000. Cabe mencionar que, el nombre asignado a este cuadrante está relacionado con el hecho de que la colonia Ayotzingo, fue creada como espacio de reubicación de las personas afectadas por el desastre de 1999.

En el Sector Norte se contabilizaron 99 PRM, lo que representa un 40.75% del total de procesos identificados.

En el mapa de la Figura 5.2, se aprecia que la distribución de los PRM, representados con polígonos de color marrón, es principalmente en pendientes pronunciadas, como en las de los barrancos de los ríos. El límite de la división política de las colonias, sigue la forma de los barrancos, es por ello que los PRM tienen la característica de presentarse en las orillas de las colonias, como es el caso de las colonias Ayotzingo, Valle Dorado, Ahuateno y Chignaulingo. En cambio en el centro de las colonias la pendiente del terreno es prácticamente subhorizontal.

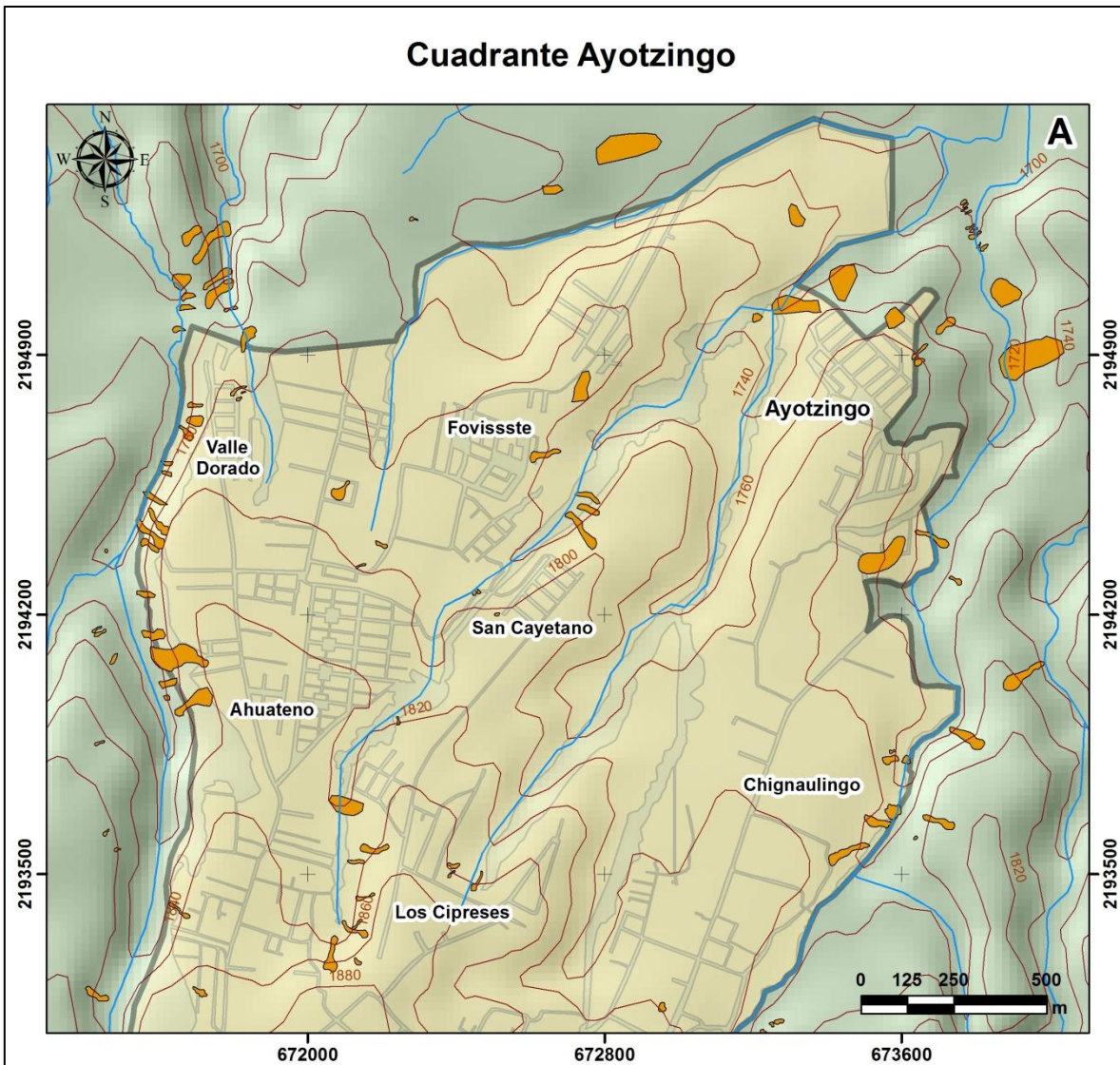


Figura 5.2. Mapa: Cuadrante Ayotzingo.

Al NE se encuentra Ayotzingo, que es una de las colonias más afectadas por la ocurrencia de PRM, se identificaron 15 que representan un 15.15% del cuadrante N y un 6.17% del total. Cabe mencionar que todos los PRM se encuentran en los alrededores de la colonia y los procesos son anteriores a la construcción de la unidad habitacional. Actualmente la colonia no se ha visto afectada, pero no se descarta una posible reactivación de los mismos.

La colonia de Valle Dorado ubicada al NW del mapa, es donde se identificaron la mayor cantidad de procesos, 19 PRM, lo que representa un 19.2% del cuadrante N y el 7.8% de los 243 en toda la cabecera municipal. Todos los PRM ocurrieron en la barranca contigua a la colonia, no en la colonia misma.

El barrio de Ahuateno al W y Chignaulingo al E, también son de las colonias donde se localizaron mayor cantidad de PRM, 19 y 18 respectivamente. Cabe destacar que debido a la representación cartográfica, los polígonos de los PRM quedan divididos en los cuadrantes del norte y del centro. Otras colonias con menor presencia de PRM son Fovissste al N con 5, San Cayetano al centro con 10 y Los Cipreses al Sur con 8 procesos de ladera.

b) Cuadrante La Aurora – Río Ixticpan

En la Figura 5.3, se presenta el mapa de la porción centro de la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla, a una escala de 1: 13,500. El nombre que se le asignó a este sector es por la magnitud y representatividad del desastre de 1999 ocurrido en La Aurora, además de la frecuente ocurrencia de PRM en las colonias que se encuentran sobre las barrancas del río Ixticpan.

En el cuadrante La Aurora – Río Ixticpan, se contabilizaron la mayor cantidad de procesos de ladera, 106 PRM, lo que representa un 43.62% del total de los procesos identificados.

En la parte superior del mapa, hay una franja con un achurado de líneas rojas, la cual indica que los procesos de ladera dentro de esa área, ya han sido contabilizados en el sector superior. En esta franja se empalman los 2 cuadrantes respectivos.

La porción centro es donde se encuentra el grueso de la población de Teziutlán. La mayoría asentada sobre la zona más plana del municipio, que es la colonia Centro, se podría decir que es la colonia con menos inestabilidad de laderas. A sus alrededores se encuentran gran cantidad de colonias sobre laderas bastante inclinadas y sitios en los que ocurren en mayor grado los PRM.

Al E de la colonia Centro se encuentra La Aurora, en donde ocurrió el mayor desastre de 1999, referido en el capítulo II, es el proceso que se observa con facilidad detrás del cementerio municipal. El conteo señala que dentro de ésta colonia se identificaron 7 PRM, lo que representa un 6.6% en el cuadrante central y un 2.88% con respecto al total.

Cuadrante La Aurora - Río Ixticpan

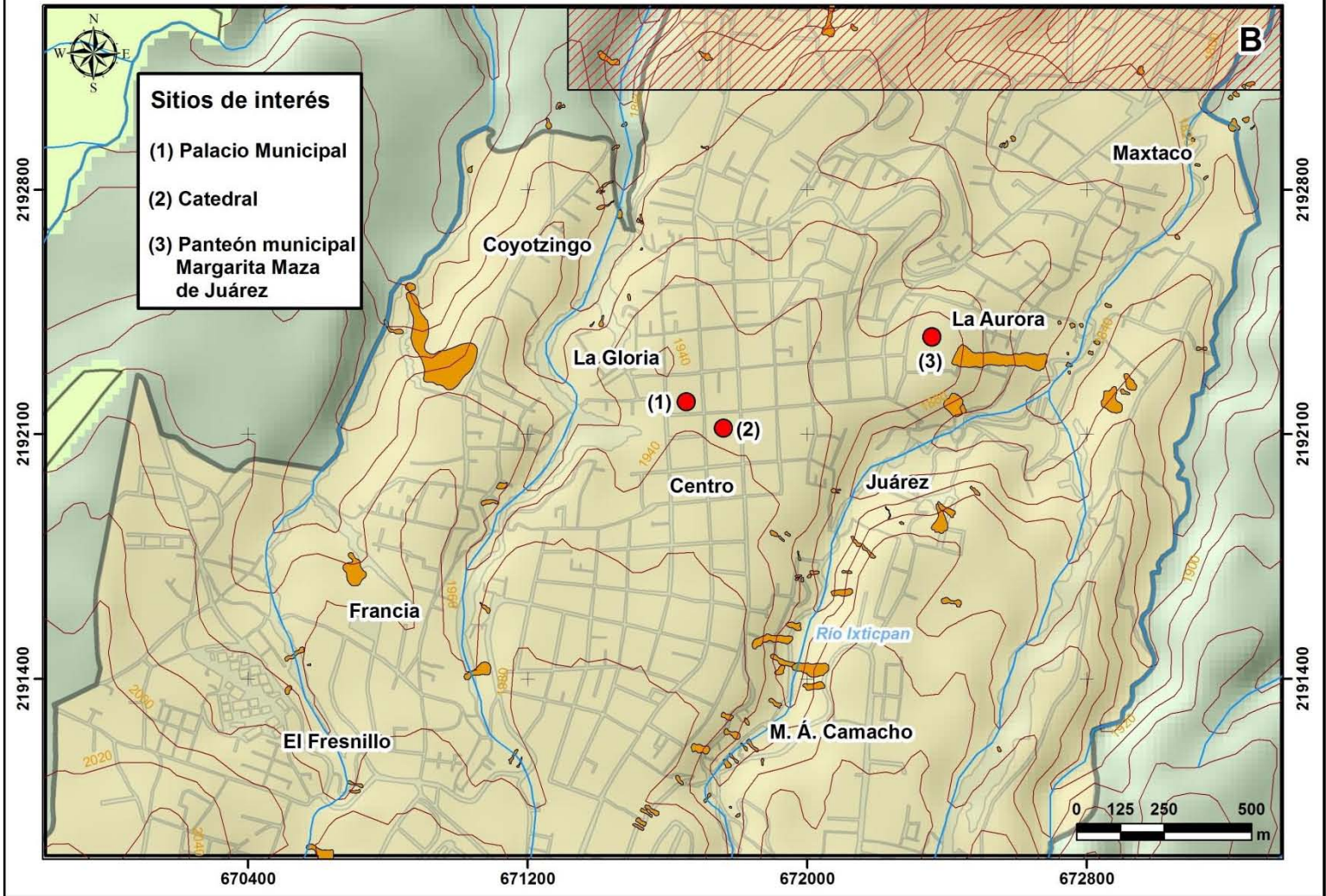


Figura 5.3. Mapa: Cuadrante La Aurora – Río Ixticpan.

Al SE de la colonia Centro se encuentran las colonias Juárez y Manuel Ávila Camacho (Figura 5.4), que son unas de las más afectadas a nivel de cabecera con respecto a su tamaño. Estas colonias se encuentran prácticamente sobre las laderas de los barrancos del río Ixticpan; 7 y 11 son los PRM identificados respectivamente.

En la colonia Francia al SW, se localizaron 12 PRM, que representan un 11.3% del cuadrante y un 4.9 a nivel cabecera. En ésta colonia se identificaron gran cantidad de PRM ya que es más grande en cuanto a área, con respecto a la Juárez. En ésta misma colonia, se localiza el PRM de mayor área de toda la cabecera municipal, identificado en fotografías de 1942, con una superficie de 20,421 m².

Otras colonias con menor ocurrencia de PRM son La Gloria al W del Centro y El Fresnillo al SW, con 2 y 1 respectivamente.



Figura 5.4. Colonias afectadas por PRM.

c) Cuadrante Xoloco

El mapa de la porción sur de la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla, a una escala de 1: 13,000 se presenta en la figura 5.5. Su nombre se debe a la cantidad de procesos identificados en el barrio de Xoloco.

En el Cuadrante Xoloco se contabilizaron la menor cantidad de procesos, 38 PRM, lo que representa un 15.63% de los 243 registrados.

De igual manera que en el sector anterior, se encuentra la franja con el achurado de líneas rojas en la parte superior.

En el extremo sur de la cabecera municipal, se localiza el 65.8% de los PRM, dentro del barrio de Xoloco; ahí se identificaron 25 procesos que representan el 10.3% del total.

Al norte del barrio de Xoloco se encuentran las colonias El Pinal y La Magdalena, en cada una de ellas se encuentran 9 PRM, distribuidos en la barranca W. Cada colonia representa un 3.7% del total.

Otras colonias con menor ocurrencia de procesos gravitacionales son La Garita al SW con 1 y Santa Rosa al NW con 2.

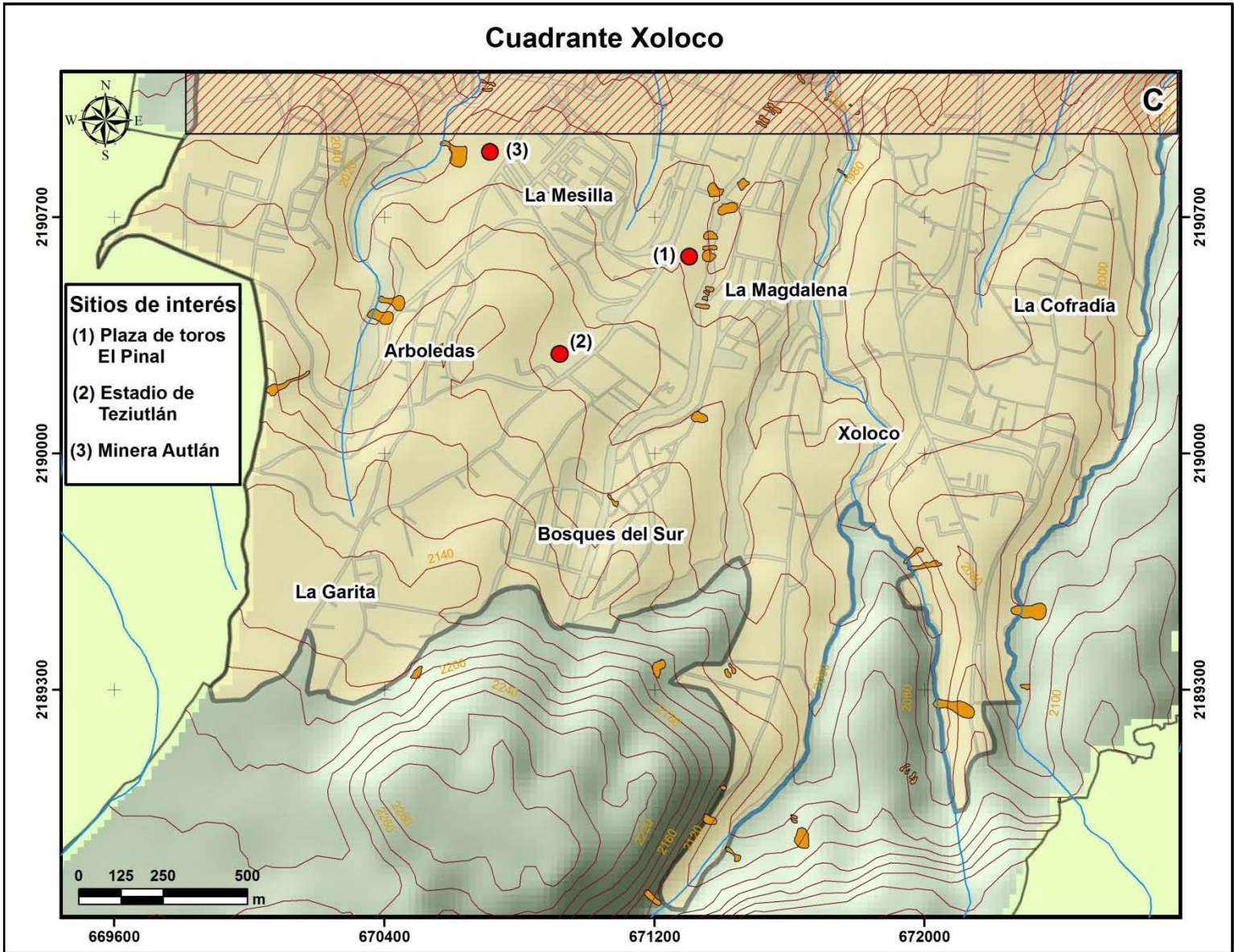


Figura 5.5. Mapa: Cuadrante Xoloco.

De manera adicional, se hizo una rosa de los vientos (Figura 5.6), para conocer de manera detallada la distribución espacial de los PRM, la cual se colocó en el centro de la cabecera municipal (coincidió con la colonia Centro). Se procuró que quedaran todas las colonias y PRM dentro del círculo, posteriormente se hizo el conteo de la cantidad de PRM que se encontraban en cada uno de los 8 puntos cardinales.

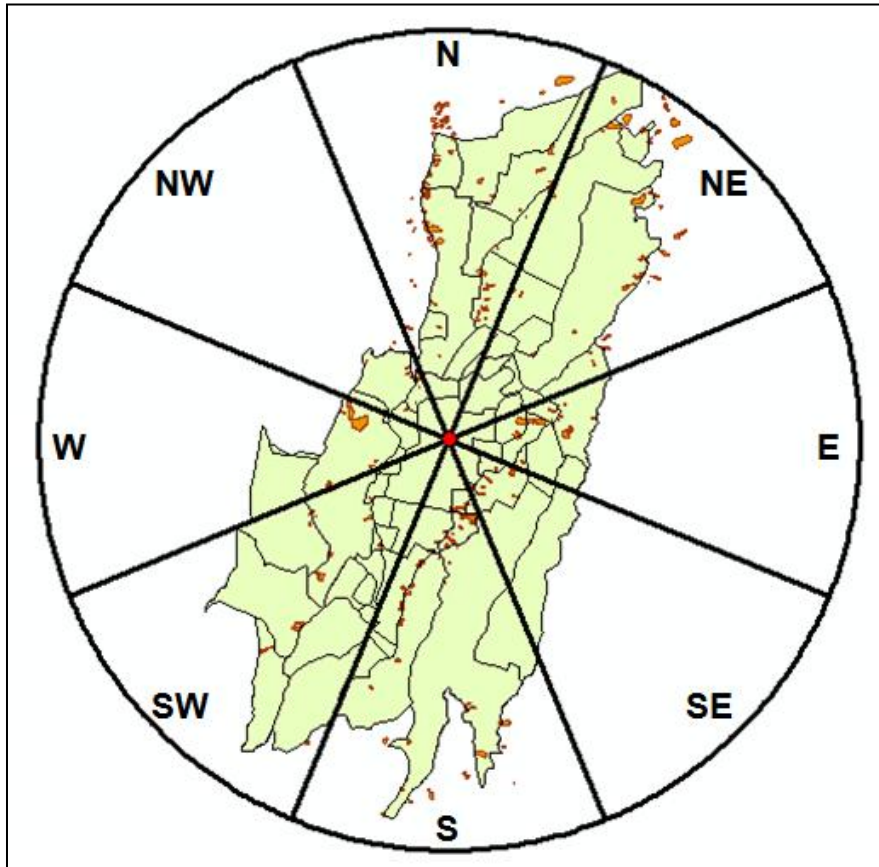


Figura 5.6. Rosa de los vientos utilizada.

La distribución espacial de los PRM se caracteriza por que al N se encuentran 63 procesos, que representan el 26% de todos los identificados, mientras que en el NE hay 50 procesos, que son el 20.5%. Al E hay 18 y al SE 14 PRM que representan el 7.5% y el 5.7%, respectivamente, del total.

Al S de la cabecera municipal se identificaron 61 procesos de ladera, lo que representa el 25% del total. En la porción SW y W es donde se encontraron la menor cantidad de procesos gravitacionales, 14 que son el 5.7% y 6 con tan sólo el 2.5%, respectivamente. Por último, al NW se contabilizaron 17 PRM, que representan el 7% restante.

En la tabla 5.4, se hace un resumen del número de PRM y su respectivo porcentaje, por punto cardinal.

Sector	No. de PRM identificados	%
Norte	63	26
Noreste	50	20.5
Este	18	7.5
Sureste	14	5.7
Sur	61	25
Suroeste	14	5.7
Oeste	6	2.5
Noroeste	17	7
Total	243	100

Tabla 5.4. Número de PRM por punto cardinal.

5.2 Tipología

Para identificar los tipos de procesos de remoción en masa en el inventario, se utilizó la clasificación de Alcántara-Ayala (2000), referida en el capítulo II. De acuerdo con esa tipología, se agruparon los siguientes procesos:

- Caídas
 - Rocas
 - Suelo
- Deslizamientos
 - Rotacionales
 - Traslacionales
- Flujos
 - Lodo
 - Detritos
- Movimientos complejos

Los resultados obtenidos, muestran que los flujos de lodo son los que más se presentaron a lo largo del tiempo, se identificaron un total de 72, distribuidos por toda la cabecera municipal, lo que representa un 29.6% del total de los PRM.

Se localizaron 45 deslizamientos traslacionales, por lo que es el segundo grupo con mayor número de procesos. Representan un 18.6% con respecto al total de la cabecera. El tercer grupo con mayor número de casos es el de los flujos de detritos, con 41 procesos, con un 17%.

La tabla 5.5, muestra un resumen del número de procesos identificados por cada tipo de PRM, además de su respectivo porcentaje con respecto a los 243 inventariados.

Tipología	No. de procesos identificados	%
Caída de rocas	5	2
Caída de suelo	25	10.2
Deslizamientos rotacionales	27	11.1
Deslizamientos traslacionales	45	18.6
Flujos de lodos	72	29.6
Flujos de detritos	41	17
Movimientos complejos	28	11.5
Total	243	100

Tabla 5.5. Número de PRM por tipología.

En el gráfico de la Figura 5.7, muestra el porcentaje de los diferentes tipos de PRM que se localizaron.

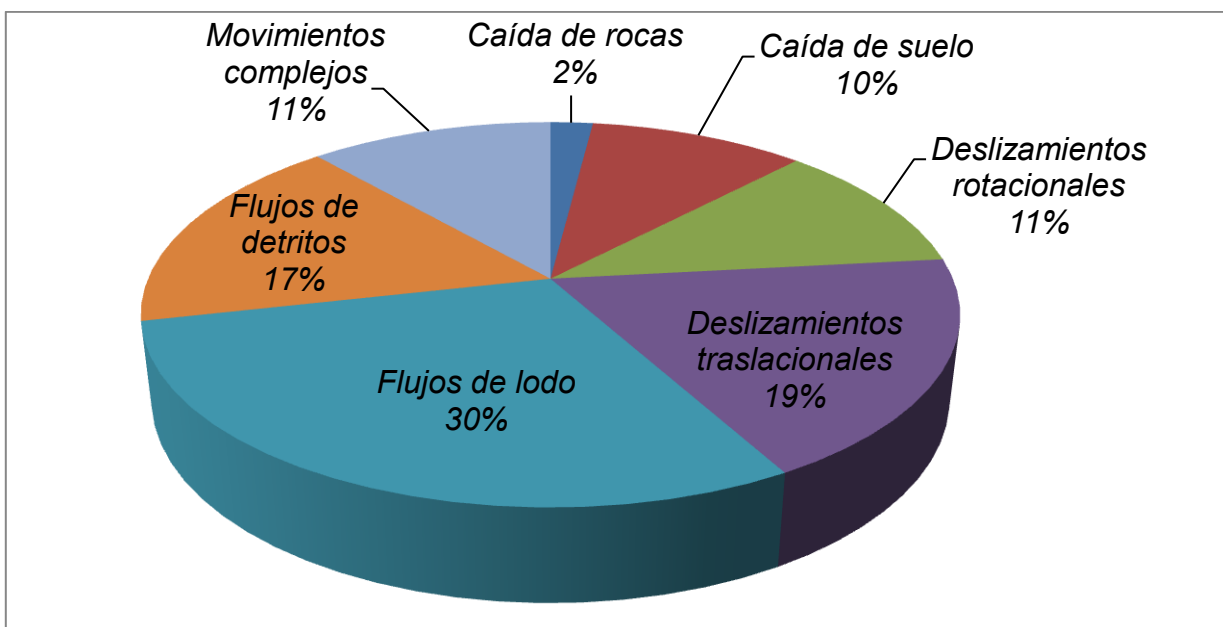


Figura 5.7. Porcentaje de los PRM por tipología.

En el año 1999, se identificaron la mayor cantidad de procesos, un total de 160. Lo anterior fue resultado de la cantidad de humedad que descargaron la DT-11 y el Frente Frío No. 5.

De igual modo, para el año de 1999, se identificaron 46 flujos de lodo, 36 deslizamientos traslacionales, 31 flujos de detritos, 24 caídas de suelo, 15 movimientos complejos y 8 deslizamientos rotacionales.

En el año del 2007, también se localizaron numerosos procesos, de los cuales 7 son deslizamientos rotacionales, 5 deslizamientos traslacionales, 5 flujos de lodo, 5 de detritos, 4 caídas de rocas, 2 movimientos complejos y 1 caída de suelos. Lo que dio un total de 29 PRM.

A partir de las imágenes de 1942 se identificaron 9 movimientos complejos, 7 flujos de lodo y 3 de detritos, también 3 deslizamientos rotacionales y 1 traslacional, lo que da un total de 23 PRM registrados.

5.3 Impacto de los PRM sobre la población

La ocurrencia de los PRM provoca un desastre siempre y cuando éstos afecten a la población expuesta. Teziutlán se ha visto afectado desde hace muchos años por la inestabilidad de laderas, principalmente en la cabecera municipal, ya que es ahí donde se encuentra la mayoría de la población y los materiales formadores de las laderas son poco resistentes.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el inventario, las principales colonias afectadas son el Barrio de Xoloco con 25 procesos registrados, mientras que el Barrio de Ahuateno y Valle Dorado registran 19 procesos cada uno.

Las colonias en donde hay menos registros de procesos, son las que no presentan fuertes pendientes, y que la mayoría de su superficie es semiplana. Algunos ejemplos de estos casos son el Centro, El Fresnillo, Vista Hermosa, San Rafael.

En el gráfico de la Figura 5.8, se muestra de mayor a menor, el número de casos registrados por colonia de la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla.

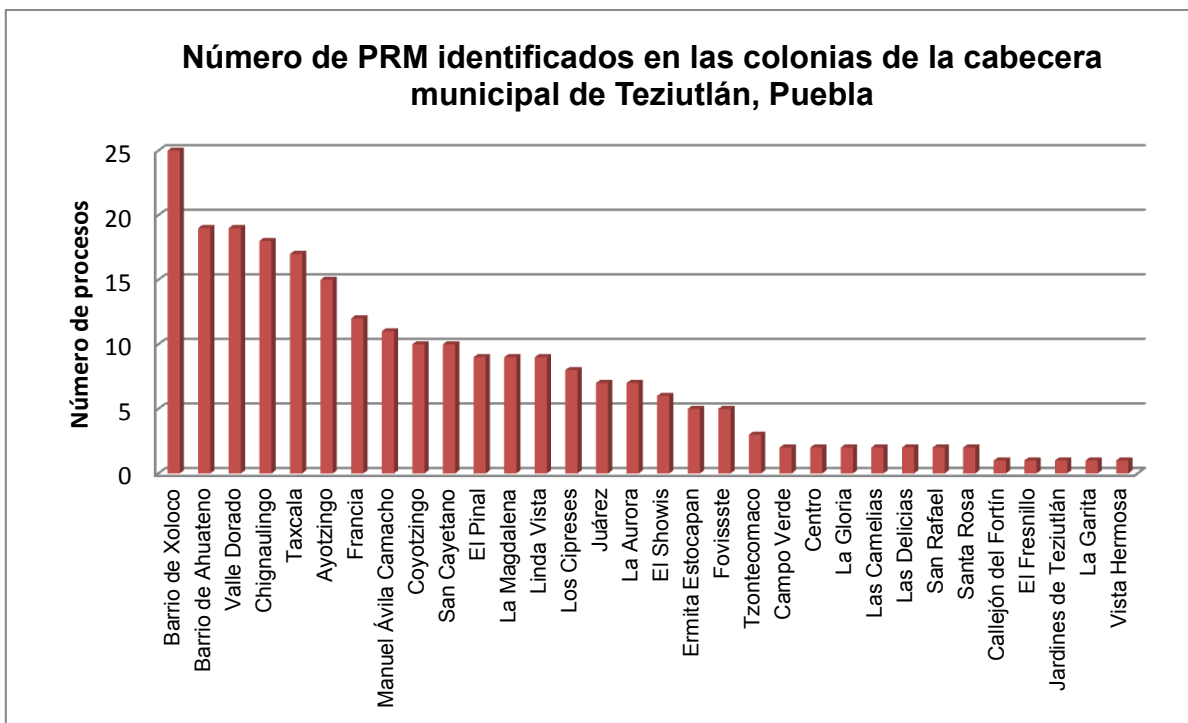


Figura 5.8. Gráfico del número de PRM identificados por colonia de la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla.

Para que un desastre ocurra, se necesita la estrecha relación entre las amenazas y condiciones socioeconómicas inapropiadas de una sociedad, en otras palabras, ser vulnerable a sufrir daños, tanto pérdidas materiales como humanas. Es por ello que las condiciones sociales juegan un papel muy importante, ya que la vulnerabilidad determina el nivel de riesgo de la población y en consecuencia la magnitud del desastre.

De manera adicional al análisis espacial de los PRM, se realizó un mapa en donde se relaciona el número de ocurrencia con el grado de marginación, de las colonias de la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla (CONAPO, 2010) (Figura 5.9).

La marginación es definida como un fenómeno multidimensional y estructural originado por el modelo de la producción económica expresado en la desigual distribución del progreso. La marginación se asocia a la carencia de oportunidades sociales y a la ausencia de capacidades para adquirirlas o generarlas, así como también a limitaciones e inaccesibilidad a bienes y servicios fundamentales para el bienestar. Los indicadores socioeconómicos que abarca el índice de marginación son la educación, vivienda, distribución de la población e ingresos. Usualmente la marginación se clasifica en 5 grados, lo cuales son *Muy Alto*, *Alto*, *Medio*, *Bajo* y *Muy Bajo* (CONAPO, 2010).

En la cabecera municipal, los grados de marginación existentes son *Alto*, *Medio* y *Bajo*. Las colonias con *Alto grado* de marginación se encuentran en la periferia de la zona urbana, mientras que aquellas situadas en el nivel *Bajo* se encuentran al centro de la cabecera. Las colonias con los grados de marginación Media se encuentran entre las dos zonas anteriormente mencionadas. Es importante señalar que el nivel de baja marginación identificado en el centro de la cabecera corresponde a la zona de mayor dinámica económica, donde el comercio y los servicios se concentran.

En el mapa de la Figura 5.9, se aprecia que el mayor número de PRM, representados con círculos azules, coinciden con las colonias de mayor grado de marginación, representadas con color rojo y naranja, éstas se encuentran en los márgenes de la zona urbana y están delimitadas por las barrancas de los ríos de la cabecera. Ejemplo de ello son las colonias de Ayotzingo, Xoloco, Chignaulingo, Taxcala, Valle Dorado, Ahuateno, Coyotzingo, Francia, Juárez, M. Á. Camacho y La Magdalena.

Con dos tonos de verde se representan a las colonias que tienen los menores grados de marginación, de igual forma coinciden con la menor ocurrencia de procesos gravitacionales. El mejor ejemplo es la colonia Centro, que al igual que toda una franja longitudinal en la porción central de la cabecera es la zona con pendientes menores o semiplana.

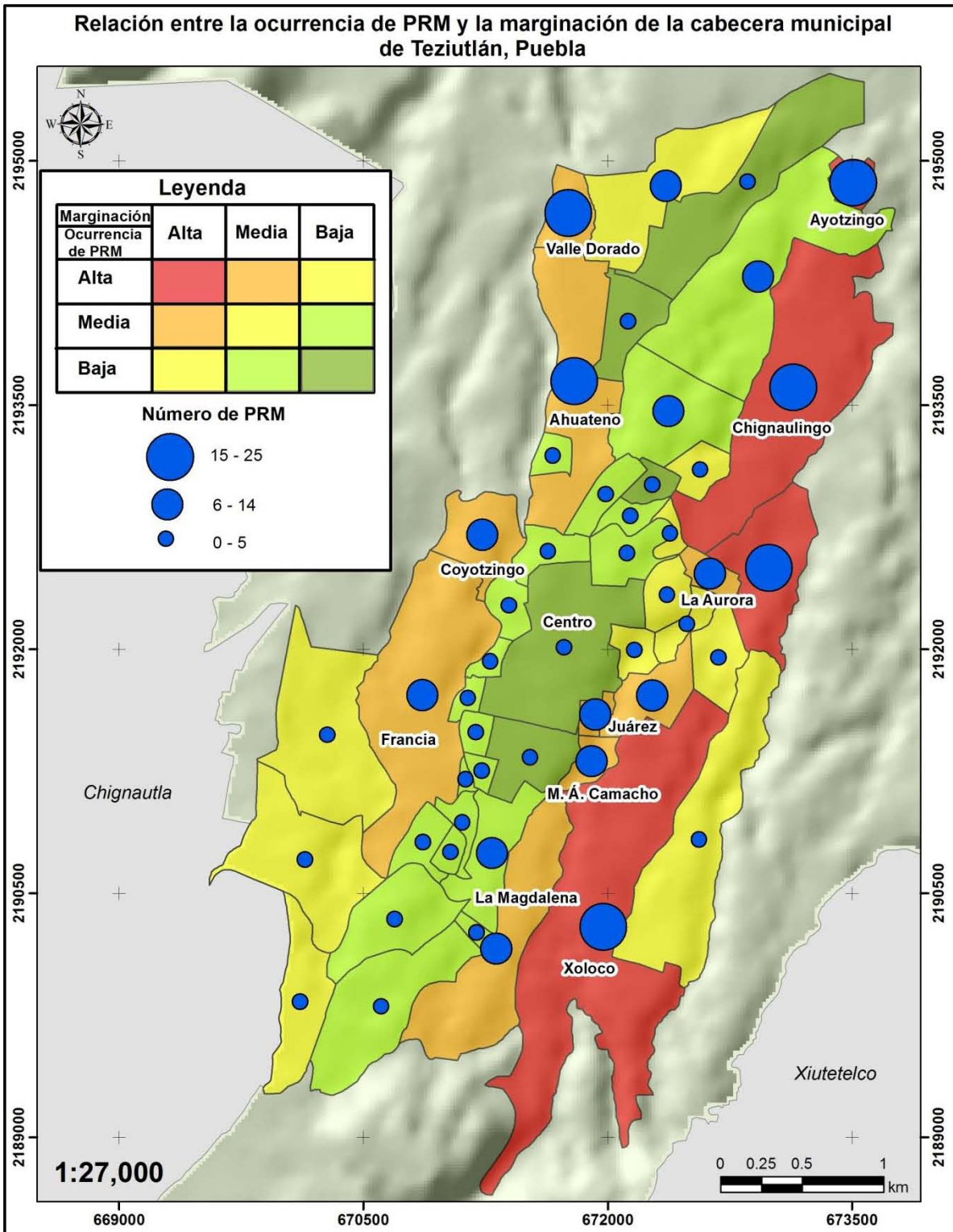


Figura 5.9. Relación entre el número de PRM con el grado de marginación de la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla (Con base en CONAPO, 2010).

Conclusiones

- La Geografía es la ciencia de mayor aptitud para el entendimiento y análisis de los desastres, ya que estudia las interacciones que surgen entre la naturaleza y las sociedades.
- Las actividades realizadas en gabinete y en campo durante este trabajo de investigación, de manera general permitieron caracterizar la distribución espacial de los procesos de remoción en masa en la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla.
- De manera particular fue posible realizar la fotointerpretación de las fotografías aéreas e imágenes de satélite disponibles de la zona de estudio. Ello sirvió de insumo para realizar un inventario de los PRM así como para identificar la tipología de los PRM existentes. Derivado de este inventario se elaboró un mapa general de la distribución espacial de los PRM y tres mapas específicos de la cabecera municipal.
- Los materiales cartográficos, así como el detalle y la escala empleada, la elaboración de figuras, cuadros y diagramas son uno de los principales aportes de la investigación, ya que resumen información de gran importancia de manera didáctica.
- Cabe mencionar que el uso de los sistemas de información geográfica, sistemas de posicionamiento global y la percepción remota, fueron herramientas claves para la elaboración del trabajo, ya que hoy en día la tecnología es de gran ayuda en el procesamiento y almacenamiento de los datos; sin embargo, es necesario realizar trabajo de campo para validar lo obtenido en gabinete.
- Es recomendable que en los trabajos posteriores de la misma zona o tema de estudio, se utilicen imágenes de satélite de diferentes fechas y de mayor resolución, por ejemplo de 30 cm., así como trabajo de campo detallado.
- Las lluvias extraordinarias influyen considerablemente en la inestabilidad de laderas. Los tipos de materiales formadores de las laderas de Teziutlán, Puebla, se saturan de humedad rápidamente, por lo que la mayoría de los procesos de remoción en masa ocurren durante o poco tiempo después de la temporada de lluvias.
- Además de las condiciones atmosféricas extremas, las condiciones socioeconómicas de la cabecera municipal de Teziutlán, juegan un papel muy importante, ya que la vulnerabilidad determina el nivel de riesgo de la población y en consecuencia la magnitud del desastre.
- De acuerdo con el inventario realizado los principales tipos de PRM identificados son 72 flujos de lodo, 45 deslizamientos traslacionales y 41 flujos de detritos, que juntos representan el 65.2% del total localizados. El

34.8% restante lo componen 28 movimientos complejos, 27 deslizamientos rotacionales, 25 caídas de suelo y 5 caídas de rocas.

- Las principales colonias de la cabecera municipal que histórica y actualmente son afectadas por la ocurrencia de PRM son La Aurora, Juárez, M. Á. Camacho, La Gloria, Xoloco, Valle Dorado, Ahuateno, Chignaulingo, Ayotzingo y la Francia. Por lo cual es pertinente que las autoridades correspondientes de la cabecera municipal presten la atención necesaria.
- Las condiciones del entorno socio-ambiental de la cabecera municipal de Teziutlán, Puebla, sugieren que la ocurrencia de procesos de remoción en masa continuará siendo recurrente y afectará a la población. Entre dichos factores cabe resaltar: los materiales formadores de las laderas, la inclinación de las pendientes, las precipitaciones extraordinarias, la pobreza, la marginación, el crecimiento poblacional desorganizado, la falta de planeación territorial, la poca atención por parte de las autoridades. Es necesario atender la situación para evitar la ocurrencia de desastres
- En México no existen muchos trabajos de este tipo. Incluso no existe un inventario a nivel nacional de los procesos gravitacionales. En consecuencia, la creación de éste tipo de inventario puede servir para trabajos posteriores relacionados con la zona o el tema de estudio, además de ser utilizado para fines de prevención de desastres.
- La innovación y aplicabilidad de los temas, técnicas y métodos del presente trabajo son parte importante y fundamental en el tema de los desastres, ya que se utiliza tecnología de vanguardia que muy poco se han utilizado en México. Todo ello representa una buena estrategia para abordar problemas actuales que vive la sociedad mexicana.

Bibliografía

- Alcántara-Ayala. I. (2000), "Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología", Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 41, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-25.
- Alcántara-Ayala. I., (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico.
- Alcántara-Ayala. I., (2008). On the historical account of disastrous landslides in Mexico: The challenge of risk management and disaster prevention. *Advances in Geosciences*. P. (159-164).
- Alcántara.-Ayala. I., (2010). Disasters in Mexico and Central America: a little bit more than a century of natural hazards. Capítulo 4 en *Developments in Earth Surface Processes*, Volume 13. Elsevier. P. (75-97).
- Alcántara-Ayala. I., López. G. J., Garnica. R., (2011). On the landslide event in 2010 in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Anganguero, Michoacán, Mexico. Capítulo Recent Landslides en *Landslides*. P. (263-273).
- Alcántara-Ayala. I., Garnica, P. R. J., Coll-Hurtado, A., Ramos, H. S. G., (2013). La región del volcán Chichón, Chiapas: un espacio potencial para su protección, conservación y desarrollo sustentable. Instituto de Geografía. UNAM. México. 162 p.
- Alkeveli, T., Ercanoglu, M., (2011). Assessment of ASTER satellite images in landslide inventory mapping: Yenice-Gökcebey (Western Black Sea Region, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.
- Ardizzone, F., Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F. and Reichenbach, P., (2002). Uncertainty and errors in landslide mapping and landslide hazard assessment. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 2: 1-2 3-14.
- Ardizzone, F., Fiorucci, F., Santangelo, M., Cardinali, M., Mondini, A., Rossi, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., (2011). Veryhigh resolution stereoscopic

satellite image for landslide mapping. Proceeding of Second World Landslides Forum. Pp. 3-7, Rome, Italy.

- Bitrán, D. (2000), Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana durante 1999. Cuadernos de Investigación, 50, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- Bitrán, D., Reyes, C., (2000). Evaluación del impacto económico de las inundaciones ocurridas en octubre de 1999 en el estado de Puebla. In: Bitrán, D. (Ed.), Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana durante 1999. Cuadernos de Investigación 50, CENAPRED, pp. 161–194.
- Caballero. R. (1998). Los impactos del huracán *Mitch*. Informe preparado para la ECLAC-México.
- Canada Centre for Remote Sensing (2014). Fundamentals of remote sensing. Ed. Canada. Pp. 258.
- Carrillo, M.M., Ruiz-González, J., (2002). El huracán Hilda y la inundación de 1955 en Pánuco y Tampico, noreste de México, en Lugo-Hubp, J., Inbar, M. (eds.), Desastres Naturales en América Latina: México, Fondo de Cultura Económica, 301-314.
- CENAPRED (2006), Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2005. Sistema Nacional de Protección Civil, Volumen 7, Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres Naturales.
- CENAPRED (2008). Inestabilidad de laderas. Secretaría de Gobernación, serie Fascículos. México.
- CEPREDENAC. (1996). Centroamérica en el ojo de la tormenta: Desastres Naturales y posibilidades de acción. Informe en Internet, cuadro N°2.
- Chuvieco, E. (2008). Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia. España. Pp 594.
- Cicero. S. R., Padua. G. A., Rodríguez. M. H., Toledo. B., Yáñez. V. A., (1986). Efectos del terremoto del 19 de septiembre de 1985 en el Hospital

General de la ciudad de México. Algunas consideraciones. Salud Pública. México. 28: 521-526.

- Colwell, R. N. (1952). Photographic interpretation for civil purposes. Manual of Photogrammetry. (Chapter XII), Second Edition, American Society of Photogrammetry, George Banta Publishing Co., Manasha, Wisconsin, Washington, pp. 535-602.
- CONAGUA (2005). Resumen del Huracán “Stan” del Océano Atlántico. Servicio Meteorológico Nacional. México. D. F. p. 4.
- CONAGUA (2005). Resumen de la tormenta tropical “José” del Océano Pacífico. Servicio Meteorológico Nacional. D.F. p. 8.
- CONAGUA (2013). Reseña de la Tormenta Tropical “Barry” del Océano Atlántico. Servicio Meteorológico Nacional. D.F. p. 7.
- CONAGUA (2013). Reseña del huracán “Ingrid” del Océano Atlántico. Servicio Meteorológico Nacional. D.F. p. 9.
- Cruden D. M. y D. J. Varnes (1996), Landslides types and processes, in Turner, A. K. y R. L. Schuster (eds.), Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board. Special Report 247, National Academy Press, Washington D.C., pp. 36-75.
- Dávila. H. N. A., (2003). “Zonificación de peligro por procesos de remoción en masa con base en la aplicación de un análisis estadístico multivariado condicional: La barranca El Calvario, Teziutlán-Puebla”. (Tesis de Licenciatura en Geografía). Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- De Jesús. R. J. C. (2014). Geomorfositos en el volcán Parícutín, Michoacan México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. pp. 129
- ERDAS. (2009). Stereo analyst for Arc GIS. Geographic Imaginary bye ERDAS.
- Ferriz, H., Mahood, G. A., (1984). Eruption Rates and Compositional Trends at Los Hornos Volcanic Center, Puebla, Mexico. Journal of Geophysical Research, Vol. 89, No. B10, P.p. 8511-8524.

- Fiorucci, F., Cardinali, M., Carla, R., Rossi, M., Mondini, A. C., Santurri, L., Ardizzone, F., Guzzetti, F., (2011). Seasonal landslides mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images. *Geomorphology* 129 (1-2), 59-70.
- Flores, L. P., (2002). Inestabilidad de laderas y riesgos asociados en Teziutlán, Puebla. (Tesis de Licenciatura en Geografía). Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- García, E. (1981), Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen, México.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Ezquiél, M. T. y Ferrari, L., (2005). Protogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Temas selectos de la Geología Mexicana, Tomo LVII; 3.* 227-283.
- Gregory, I. N., Ell, P. S. (2007). *Historical GIS. Technologies, Methodologies and Scholarship.* Ed. Cambridge University Press. UK. p.p. 227.
- Guerra Peña, F. (2950). Introducción a la fotogeología, *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, vol. II, núm. 1, México. Pp. 55-70.
- Hernández. M. M. G., (2011). Procesos de remoción en masa en el municipio de Motozintla de Mendoza, Chiapas. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. pp. 123.
- Iglesias. J., Jara. M., Aguilar. J., Mota. O., Terán. A., Gómez. A., Ortega. R., González. E., Guerrero. J. J., Juárez. H., Paniagua. J. P., Sordo. E., (1987). Estudio de las intensidades del sismo del 19 de septiembre en la ciudad de México. UAM, Azcapotzalco. pp. 27.
- Inbar, M., Lugo, J. y Villers, L. (1994). The geomorphological evolution of the Paricutin cone and lava flows, México, 1943-1990. *ELSEVIER, Geomorphology*; 9. 57-76.
- Legislatura LIII - Año II - Período Ordinario - Fecha 19860901 - Número de Diario 3 (L53A2P1oN003F19860901.xml) Núm. Diario:3 encabezado LIII legislatura diario de los debates de la cámara de diputados del congreso de

los Estados Unidos Mexicanos Registrado como artículo de 2a. clase en la Administración de Correos, el 21 de septiembre de 1921 AÑO II México, D. F., lunes 1o. de septiembre de 1986 NÚM. 3.

- Levin, N. (1999). *Fundamentals of Remote Sensing*. Remote Sensing Laboratory, Geography Department, Tel Aviv University, Israel. pp. 225.
- Lugo. H. J., Zamorano. O. J., Capra. L., Inbar. M., Alcántara. A. I., (2005). Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: Causa y efectos. Ed. UNAM. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 22, núm. 2, D.F. México. p. 212-228.
- Lugo. H. J., (2011). *Diccionario geomorfológico*. Ed. UNAM. Instituto de Geografía. México. Pp. 479.
- Lungo. M., Baires, S., (1996). De terremotos, derrumbes e inundados. *Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*. pp. 78.
- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo LVII, Núm. 3, Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, UNAM, México. p. 379-424.
- Macías, J. L. y Capra, L. (2005). *Los volcanes y sus amenazas*. FCE, SEP. CONACYT. México 157 p.
- Martín, U. y Németh, K., (2006). How strombolian is a “Strombolian scoria cone? Some irregularities in scoria cone architecture from the Transmexican Volcanic Belt, near Volcán Ceboruco (México) and Al Haruj (Libya). *Journal of volcanology and Geothermal Research*; 155. 379-424.
- Maskrey. A., (1993). *Los desastres no son naturales*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- Mendoza. L. M. J., Domínguez. M. L., Noriega. R. I., Guevara. O. E., (2002). *Informes Técnicos: Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento*. SEGOB, CENAPRED. México. Pp. 78.

- Murillo. G. F. (2013). Análisis y cartografía de riesgo de desastre por procesos de remoción en masa en el municipio de Pahuatlán, Puebla. Posgrado de Geografía, UNAM. pp. 198.
- NOAA (2006). Tropical Cyclone Report Hurricane Stan. National Hurricane Center. P. 12.
- NOAA (2013). Tropical storm Barry. National Hurricane Center. p. 12.
- NOAA (2013). Hurricane Ingrid. National Hurricane Center. p. 16.
- Ordóñez, E. (1947). El volcán Parícutín. México: Fantasia. 181 p.
- Perevochtchikova, M. y Lezama, T. J. J. (2010). Causas de un desastre: Inundaciones del 2007 en Tabasco, México. *Journal of Latin American Geography*, 9 (2), Centros de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales. El Colegio de México (CEDUA-COLMEX). Pp. 73-98.
- Pioli, L., Erlund, E., Johnson, E., Cashman, K., Wallace, P., Rosi, M. y Delgado, H., (2008). Explosive dynamics of violent strombolian eruptions: the eruption of Parícutín volcano 1943-1952 (México). *Earth and Planetary Science Letters*: 271. Pp. 359-368.
- PLANAR Systems Inc. (2008).SD2620W Stereoscopic Monitor USER'S GUIDE. pp. 24.
- Prost, G. L., (2013). Remote Sensing for Geoscientists: Image Analysis and Integration. CRC Press. 702 p.
- Rizos, C. (1999). Introduction to GPS. University of New South Wales. U.K. pp. 22.
- Rodríguez-Elizarrarás, S., Komorowski, J. C., Jiménez, V. y Siebe, C., (1993). Libro-guía de la excursión geológica al volcán Parícutín, Estado de Michoacan, México. UNAM, Instituto de Geología. México. 47 p.
- Sanahuja. R. H. E. (1999). El daño y la evaluación del riesgo en América Central: Una respuesta metodológica tomando como caso de estudio a Costa Rica. Tesis de Pstgrado, Maestría en Geografía de la Universidad de Costa Rica. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Pp. 119.

- Servicio Geológico Mexicano (2011). Carta Geológica de Teziutlán, Puebla E14-B15
- Sharpe C., F.S. (1938), Landslides and related phenomena, Columbia University Press, New York.
- Skempton, A. W. y J. N. Hutchinson (1969), Stability of natural slopes and embankment foundations. Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. State of Art Volume, México. Pp. 291-340.
- SOUTH CO., Ltd. (Sin año) User Guide. STAR S86T GPS Receiver. pp. 50.
- Whitmore, G. D. (1952). The development of photogrammetry. Manual of Photogrammetry. (Chapter I), American Society of Photogrammetry. George Bantan Publishing co., Menasha, Wisconsin, Washington.
- WPNVLI (1930). A suggested method for reporting a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. 41:5-12.
- Wright, T. (1997). Geographic Information Systems. Ed. Systems Information and Privacy Commissioner /Ontario. Toronto Ontario. p.p. 50.
- Yarza, D. E. (1992). Volcanes de México. UNAM, México, D.F., Instituto de Geografía, 4ª edición. 173 p.
- Zogg, J. M. (2002). GPS Basics. Ed. U-Blox. Switzerland. pp. 94.

Mesografía

- Ávila, E. (2005), “Crece devastación 11 muertos”, 7 de octubre, El Universal
- Covarrubias. A., (2013). “Deja Manuel inundaciones y deslaves en Guerrero”, 17 de septiembre, El Universal.
- Fernández. F. A., Macías. M. J. M., (2009). “Lo natural del desastre de octubre de 1999”. 5 de octubre, La Jornada de Oriente.
- Martínez, E. (2010). “Deslaves han causado 22 muertes en Michoacán; 83 desaparecidos”, 8 de febrero, La Jornada.

- Mondragón. L., (2013). “Se registra deslave en comunidad de Teziutlán”. 14 de noviembre, Intolerancia Diario.
- Notimex. (2013). “Atienden deslave en Atoyac, Guerrero”, 18 de septiembre, El Universal.
- Notimex. (2013). “Lluvias provocan deslave en Teziutlán”. 20 de junio, Síntesis Puebla. (<http://sintesis.mx/articulos/65183/lluviasprovocandeslaveenteziutlan/puebla>).
- Rodríguez. O. O., (2013). “Deslaves y bloqueos temporales provoca Ingrid en Teziutlán”. 15 de septiembre, Municipios Puebla. (<http://municipiospuebla.com.mx/nota/20130915/teziutl%C3%A1n/deslavesybloquestemporalesprovo caingridenteziutl%C3%A1n>).
- Romero. J., (2013). Tres deslaves reporta Protección Civil de Teziutlán por “Fernand”. 26 de agosto, Puebla Noticias. (<http://www.pueblanoticias.com.mx/noticia/tresdeslavesreportaproteccioncivildeteziutlanporfernand40319/>).
- SEGOB. (2005). Diario Oficial de la Federación. 14 de octubre. (http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2095233&fecha=14/10/2005).
- Servicio Meteorológico Nacional (1999). Reporte de la Depresión Tropical No. 11. Actualización 2009. (http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=93:temporada-1999&catid=8).
- Zaldua, J. (2005). “En el soconusco, cuatro días que jamás se olvidaran”, 22 de octubre, La Jornada.

Paginas de internet

- http://bgis.sanbi.org/GIS-primer/page_12.htm
- <http://www.esri.com/>
- <http://www.arcgis.com/features/>
- <https://grass.osgeo.org/>
- <http://www.gvsig.com/>
- <http://www.ilwis.org/>