



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO.**

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS.

MAESTRÍA EN METALURGIA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES.

**“CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA MATRIZ DEL FLUJO
DE DETRITOS DE 1959 EN EL POBLADO DE MINATITLÁN”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN METALURGIA Y
CIENCIAS DE LOS MATERIALES.**

**PRESENTA:
ING. SILVINO GARCÍA ÁVILA.**

**ASESOR:
DR. ELEAZAR ARREYGUE ROCHA.**

MORELIA, MICHOACÁN. DICIEMBRE DEL 2008.



Agradecimientos.

A Dios.

Por darme la oportunidad de haber concluido una faceta más en la vida y nunca olvidarme, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente contigo todo sin ti nada.

A mis padres.

Por haberme brindado su apoyo incondicional para la conclusión de esta maestría, gracias por todo pero principalmente por ser mis padres y estar conmigo en todo momento, los quiero mucho.

A mi esposa Kerenia Miranda Franco.

Gracias por ser parte de mi vida y por tu apoyo incondicional en las buenas como en las malas, te quiero mucho, nunca lo olvides.

A mis hermanos.

Que en todo momento me han expresado su apoyo.

Al Dr. J. Eleazar Arreygue Rocha.

Por brindarme apoyo, paciencia, confianza y disponibilidad de tiempo, para la elaboración de este trabajo, que sin su valiosa ayuda no hubiera sido posible llevar a cabo la terminación de esta tesis, gracias por todo.

Al Dr. K. Guillermo Carrés Garcidueñas, Dra. Sandra I. Bribiesca Vázquez, Dr. Carlos Chávez Negrete, Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, Dr. Jorge Alarcón Ibarra, por su tiempo dedicado en la revisión del presente trabajo.

Y por último le quiero dedicar este trabajo a mi hijo Emmanuel, quien ha llegado a llenar mi vida de alegría.

ÍNDICE.

Resumen	viii
Introducción	1
Justificación	3
Objetivos	5
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	6
1.1.- Deslizamientos catastróficos de los últimos años	6
1.2.- Ejemplos de peligros presentados por abanicos aluviales a nivel internacional:	8
1.2.1.- El desastre del Nevado del Ruiz	8
1.2.2.- El desastre de Venezuela ocasionado por flujos detríticos e inundaciones repentinas	9
1.2.3.-Flujos de detritos del 3 de mayo de 2002 en Caleta Buill, Comuna de Chaiten, X Región, Chile	11
1.3.- Ejemplos de peligros presentados por abanicos aluviales a nivel nacional	14
1.3.1.-Flujo de detritos del Cerro Pelón municipio de Celaya, Guanajuato	14
1.3.2.- Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla	15
1.3.3.- Movimiento complejo en Acapulco, Guerrero	16
1.3.4.- Flujo de lodo en la Colonia Aurora, Teziutlán, Puebla	18
1.4.- Antecedentes del lugar de estudio	20
1.4.1.- El desastre en Minatitlán, Colima causado por flujos de detritos en el año de 1959	20
1.5.- Cronología de huracanes en el estado de Colima	23

CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS	31
2.1.- Definición de movimientos en masa	31
2.2.- Tipos de materiales	31
2.3.- Clasificación de los movimientos en masa	32
2.3.1.- Desprendimientos o caídas de bloques	32
2.3.2.- Vuelcos o volcamientos	33
2.3.3.- Deslizamientos	35
2.3.4.- Expansión lateral	36
2.3.5.- Flujos	37
2.3.6.- Avalanchas	42
2.4.- Abanicos aluviales	42
2.5.- Velocidad del movimiento	43
2.6.- Movimientos post-falla	45
2.7.- Longitud de recorrido del movimiento	46
2.8.- Evolución o proceso de falla	47
2.9.- Reología de flujos de detritos	50
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.	58
3.1.- Geomorfología	59
3.2.- Geotecnia	60
3.2.1.- Muestreo	60
3.2.2.- Distribución granulométrica	61
3.2.3.- Coeficientes granulométricos	63
3.2.4.- Límites de consistencia	64
3.2.5.- Clasificación del suelo	66
3.2.6.- Densidad de sólidos	67
3.2.7.- Corte directo	67
3.2.8.- Coeficiente de Permeabilidad	70
3.3.- Caracterización mineralógica	71
3.3.1.- Difracción de rayos X	71
3.3.2.- Microscopía electrónica de barrido	73

CAPÍTULO 4. RESULTADOS	74
4.1.- Localización	74
4.2.- Geología	78
4.3.- Geomorfología	80
4.4.- Geotecnia	85
4.4.1.- Pesos volumétricos y Humedad natural del lugar	85
4.4.2.- Densidad de sólidos y relación de vacíos del lugar	86
4.4.3.- Granulometrías	86
4.4.3.1.- Granulometría por medio de mallas	87
4.4.3.2.- Granulometría de la parte fina (partículas menores a 0.074 mm)	90
4.4.4.- Coeficientes granulométricos	92
4.4.5.- Límites de consistencia	93
4.4.6.- Clasificación de la matriz de acuerdo con el SUCS	94
4.4.7.- Corte directo	95
4.4.8.- Coeficiente de permeabilidad	96
4.5.- Caracterización mineralógica	97
4.5.1.- Difracción de rayos X	97
4.5.2.- Microscopía electrónica de barrido	99
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	101
Propuestas	103
Bibliografía	104
Anexos	108

LISTA DE FIGURAS.

Figura A.- Destrucción de las viviendas por el paso del ciclón de 1959 (Padilla, 2006).	4
Figura 1.1.- Armero después de la tragedia (www. Wikipedia.com).	9
Figura 1.2.- Imagen del evento de flujos de detritos en Vargas, Venezuela, 1999 (USGS, 2002).	11
Figura 1.3.- Perfil esquemático del flujo de detritos del 3 de mayo de 2002 en Caleta Buill (Fernández y Arenas, 2002).	13
Figura 1.4.- Variación en la pendiente de la ladera. Con línea punteada se señala la posición original del material removido; asimismo, el área de depósito sobre la parte plana. En la parte superior izquierda se esquematiza la zona de aporte de bloques rocosos (Gutiérrez y Soto, 2003).	14
Figura 1.5.- Imagen de los flujos de lodo y escombros en la ciudad de Acapulco (CENAPRED 2001).	17
Figura 1.6.- Flujo de lodo en la Colonia Aurora, Teziutlán, Puebla. (CENAPRED 2001).	19
Figura 1.7.- Destrucción de las viviendas por el paso del flujo de detritos de 1959 (Arreygue y Cortés, 2007).	21
Figura 1.8.- Avalancha de bloques y lodo que destruyó al poblado de Minatitlán, Colima (Arreygue y Cortés, 2007).	23
Figura 2.1. Mecanismos de desprendimiento y colapso (Corominas y García Yagüe, 1997).	33
Figura 2.2.- Mecanismos de vuelco o volcamientos (Corominas y García Yagüe, 1997)	34
Figura 2.3.- Tipos de deslizamiento.	35
Figura 2.4.- Expansiones laterales. Arriba: por fluencia y extrusión del material subyacente. Abajo: por licuefacción (arcillas rápidas). Según Corominas y García Yagüe (1997).	37
Figura 2.5.- Flujos de diferentes velocidades (Suárez, 2001).	40
Figura 2.6.- Aspecto de un flujo hiperconcentrado, donde se aprecia la consistencia que presenta este tipo de flujos (www. Wikipedia.com).	52

Figura 3.1.- Metodología de investigación empleada en la caracterización del depósito del flujo de detritos.	59
Figura 3.2.- Sitios de toma de muestras.	61
Figura 3.3.- A la izquierda se muestra un conjunto de mallas para la determinación de granulometría de la parte gruesa de la muestra. A la derecha se muestra una imagen del analizador de tamaño de partícula Coulter LS 100Q, que se utilizó para la determinación de la granulometría de la parte fina.	62
Figura 3.4.- Esquematización de la prueba de corte directo.	68
Figura 3.5.- Gráfica ilustrativa de la envolvente de falla.	69
Figura 3.6.- Equipo de corte directo.	70
Figura 3.7.- Imagen del difractómetro SIEMENS-5000, del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas.	72
Figura 4.1.- Localización de la zona en estudio.	74
Figura 4.2.- Esquematización de la secuencia estratigráfica de la ladera occidental del cerro los Copales, al SE de Minatitlán. (Corona y Alencaster, 1995).	79
Figura 4.3.- Parte de la carta geológica de la localidad de Minatitlán, Colima: E13B33 (INEGI, 2002).	79
Figura 4.4.- Interpretación geomorfológica: 1 arroyos; 2 río principal; 3 línea divisoria de aguas; 4 circos de erosión; 5 cimas; 6 falla normal; 7 abanicos aluviales; 8 planicie de inundación (aluvial); 9 domo riolítico; 10 líneas de perfil (A-A' y B-B') (Corona-Esquivel et al., 2002).	80
Figura 4.5.- Carta topográfica E13B33 (INEGI, 2004), en donde se localiza la población de Minatitlán, Colima, y se muestra la delimitación de la cuenca causante del flujo de detritos.	81
Figura 4.6.- Modelo sombreado con el avenamiento de la cuenca de Minatitlán, en rojo se observa el área del circo de erosión y en café claro el área del flujo de detritos de 1959 y en verde se observa la silueta del poblado.	82
Figura 4.7.- Perfil de la topografía del cauce principal del Río Bonete.	82
Figura 4.8.- Modelo digital de elevaciones de la cuenca de Minatitlán, el rectángulo encierra la zona de estudio.	83
Figura 4.9.- Mapa de pendientes de la región de Minatitlán, Colima, a partir del MDE.	84

Figura 4.10.- Gráfica de distribución granulométrica de la muestra 3, flujo de detritos “Minatitlán.	88
Figura 4.11.- Granulometría de las muestras de la zona superior del flujo de detritos de “Minatitlán”.	89
Figura 4.12.- Granulometría de las muestras de la zona intermedia del flujo de detritos de “Minatitlán”.	89
Figura 4.13.- Distribución granulométrica de la parte fina de las muestras de la zona superior del flujo de detritos de “Minatitlán”.	90
Figura 4.14.- Distribución granulométrica de la parte fina de las muestras de la zona intermedia del flujo de detritos de “Minatitlán”.	91
Figura 4.15.- Difractograma de la composición mineralógica de la matriz de la parte inicial del depósito del flujo de detritos de Minatitlán, Colima.	98
Figura 4.16.- Difractograma de la composición mineralógica de la matriz de la parte intermedia del depósito del flujo de detritos de Minatitlán, Colima.	98
Figura 4.17.- Micrografías con resolución de 500X.	99
Figura 4.18.- Micrografías con resolución de 5000X.	100

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1.1.- Los deslizamientos más catastróficos de los últimos años tomada de Ortiz, 2005 y complementada en este trabajo.	7
Tabla 1.2.- Lista de los huracanes registrados hasta el año 2000, que han afectado al estado de Colima (Padilla, 2006).	30
Tabla 2.1.- Escala de velocidades de los movimientos de ladera (Suárez, 2001).	44
Tabla 3.1.- Valores típicos del ángulo de fricción interno para arenas.	70
Tabla 3.2.- Valores del coeficiente de permeabilidad para diferentes tipos de suelo.	71
Tabla 4.1.- Pesos volumétricos y humedad natural.	85
Tabla 4.2.- Densidad de sólidos y relación de vacíos del lugar.	86
Tabla 4.3.- Granulometría de la muestra 3, flujo de detritos “Minatitlán”.	87
Tabla 4.4.- Resumen de la granulometría de las muestras utilizando los dos métodos anteriores.	92

Tabla 4.5.- Resultados del cálculo de los coeficientes granulométricos.	93
Tabla 4.6.- Resultados obtenidos para los límites de consistencia.	94
Tabla 4.7.- Resultados obtenidos para la clasificación de suelos en base al SUCS.	95
Tabla 4.8.- Resultados de la prueba de corte directo.	96
Tabla 4.9.- Coeficiente de permeabilidad calculado de la prueba de consolidación.	97
Tabla 4.10.- Coeficiente de permeabilidad calculado con los datos de las granulometrías.	97

RESUMEN

Los deslizamientos en masa se encuentran entre los peligros naturales más destructivos de nuestro planeta, lo cual representa una de las mayores amenazas para la vida y bienes materiales de la población. Cada año estos desastres ocasionan numerosas víctimas, heridos y damnificados, así como cuantiosas pérdidas económicas.

En 1959 el centro del país sufrió una de las precipitaciones más abundantes, registrándose una serie de flujos de detritos principalmente en la zona de Minatitlán, Colima. Los nuevos asentamientos de esta población se encuentran sobre los depósitos de estos flujos, por lo que se consideran zonas de alto riesgo. El flujo de detritos ocurrido se debió a la saturación de la capa de suelo a consecuencia de lluvias abundantes. En caso de que nuevamente se presenten lluvias abundantes, existe la probabilidad de que otros sectores de la ladera sean afectados de manera similar, ya que el área del circo de erosión presenta pendientes superiores al ángulo de fricción interna del material. Este tipo de fenómenos ocurre prácticamente de forma repentina por lo que no es posible alertar y llevar a cabo una evacuación oportuna.

En la cuenca de estudio, la erosión más activa tiene un área de aproximadamente $3'416,520 \text{ m}^2$, la cual es favorecida por las elevadas pendientes de la zona. El área calculada del flujo de detritos es de $2'582,820 \text{ m}^2$, con un volumen aproximado de $2'066,256 \text{ m}^3$.

Los resultados obtenidos del estudio geotécnico, para los materiales transportados, corresponden a gravas y arenas con finos limosos de baja compresibilidad, con muy poca presencia de arcilla, de acuerdo a la clasificación propuesta por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Los valores referentes al ángulo de fricción interna y cohesión, varían entre 58.35 a 38.21° y 0 a 7.14 KN/ m^2 respectivamente.

Por medio de la difracción de rayos X se observaron tres fases, siendo la principal la Albita, la segunda fase presente es el cuarzo y en tercer lugar se presentó la Montmorillonita.

INTRODUCCIÓN.

Los procesos de remoción de masa son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año; sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control (Suárez. D. J. 2001).

En diversos estudios de inestabilidad de laderas se menciona que las zonas montañosas que presentan un talud con un grado de inclinación alto, son muy susceptibles a sufrir problemas de flujos de detritos, cuando se presentan lluvias intensas.

El año de 1959 en México fue un período con bastantes eventos climáticos registrándose nueve eventos entre huracanes y ciclones, de los cuales cinco llegaron a las costas del Pacífico. En 1959 el país sufrió una de las precipitaciones más abundantes registrándose una serie de flujos de detritos en la zona de Minatitlán, Colima. Los nuevos asentamientos de estas poblaciones se encuentran sobre los depósitos de estos flujos, por lo que se consideran zonas de alto riesgo (Arreygue y Cortés, 2007).

La investigación de un proceso de remoción de masas, consiste en obtener toda la información posible sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales que permitan realizar un diagnóstico de los problemas lo más preciso posible y un diseño efectivo de solución. El propósito de la

presente investigación es realizar un estudio de las características físicas y mecánicas de los flujos de detritos para conocer cuáles son los parámetros básicos que afectan la estabilidad.

Cuando se estudia un fenómeno complejo, como los procesos de remoción de masas, es necesario identificar y caracterizar los distintos tipos de comportamiento y clasificarlos adecuadamente. Una incorrecta clasificación del fenómeno, puede tener como consecuencia que las soluciones adoptadas para estabilizarla sean ineficaces y a veces, contraproducentes. Para ello en la literatura se encuentran varios sistemas de clasificación, pero teniendo en cuenta su aceptación y uso internacional, se llegó a la conclusión de adoptar el propuesto por Varnes (1958 y 1978). El cual fue actualizado por Cruden y Varnes en el “Special Report 247” del Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996).

JUSTIFICACIÓN.

Los deslizamientos en masa se encuentran entre los peligros naturales más destructivos de nuestro planeta, lo cual representa una de las mayores amenazas para la vida y bienes materiales de la población. En nuestro país a este tipo de fenómenos sólo se le presta importancia cuando ya el problema se presentó, no se tiene la cultura de prevención por parte de nuestras autoridades, por lo que este estudio tiene como finalidad la de aportar datos importantes para las autoridades de protección civil del peligro inminente en el que se encuentra esta localidad.

Cada año estos desastres ocasionan numerosas víctimas, heridos y damnificados, así como cuantiosas pérdidas económicas. El conocimiento de las características de los deslizamiento en masa, hace que este tipo de fenómenos puedan ser predecibles, por lo tanto los estudios realizados podrán definir las zonas amenazadas y la magnitud del proceso, para que de esta forma se puedan tomar medidas precautorias. Además tomando en cuenta que este tipo de fenómeno ya se presentó con anterioridad en esta zona de estudio, en el año de 1959, dando como resultado la destrucción de dos terceras partes del poblado de Minatitlán por lo que fue declarada zona de desastre total: se estimaron 200 viviendas destruidas y 350 personas muertas y desaparecidas, además de pérdidas materiales y animales considerables (Arreygue y Cortés, 2007), el resultado del desastre en las viviendas, se puede observar en la Figura A.



Figura A.- Destrucción de las viviendas por el paso del ciclón de 1959 (Padilla, 2006).

Por lo anterior y en base a la literatura se ha visto que este tipo de fenómenos es más susceptible a presentarse en zonas en las que ya han sido afectadas con anterioridad, por lo que se justifica este tipo de estudios, ya que el peligro que se presenta en este sitio de estudio es evidente.

OBJETIVOS.

- Identificar el tipo de los flujos de detrito que se presentan en el abanico aluvial del área de estudio, para conocer el grado de peligro que puede amenazar a los habitantes que se localizan en esta cuenca.
- Caracterizar desde un punto de vista geotécnico el comportamiento de los materiales involucrados en los flujos de detritos, realizando pruebas de Mecánica de Suelos, Difracción de Rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido.
- Realizar mapas de pendientes del lugar, lo cual nos dará una idea del peligro, relativo y/o absoluto, y del riesgo para los centros urbanos del área en estudio.
- Evaluar la posibilidad de realizar obras de prevención para la protección de las zonas expuestas al riesgo de caída o volcamiento de bloques o de flujos de detritos, provocados por lluvias excepcionales o huracanes.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

Grandes poblaciones se han construido en suelos de abanicos aluviales, como Los Ángeles, California; Salt Lake City, Utah; Denver, Colorado; Nápoles, Italia; Vargas, Venezuela, etc. En escalas de tiempo que abarcan miles de años, los abanicos aluviales son zonas dinámicas de mucha actividad geomorfológica. Los flujos detríticos y las inundaciones repentinas ocurren episódicamente en ambientes como éstos, y ponen en gran riesgo a muchas comunidades durante eventos de lluvia intensa y prolongada. Aunque los científicos están mejorando constantemente su capacidad de entender y delinear áreas de alto peligro natural, la expansión de la población y el aumento en la construcción de viviendas en estos sitios, han aumentado más que nunca el número de personas en riesgo. Por lo tanto, analizar el peligro que representan los flujos detríticos y las inundaciones repentinas es un aspecto de suma importancia (USGS, 2002).

1.1.- Deslizamientos catastróficos de los últimos años.

La tabla 1.1, se muestra una recopilación de deslizamientos catastróficos de los últimos años, en ella se describe el año, el lugar y el tipo de movimiento, así como también define el fenómeno que propició el movimiento, el volumen del material removido por dicho movimiento, y por último marca el impacto que ocasionó a la población en número de muertes y daños materiales. Como se puede apreciar el deslizamiento de tierra que sufrió la localidad de Ningxia, China, es por mucho la más catastrófica en cuanto a número de muertes se refiere y como se puede ver la causa generadora fue un sismo de magnitud desconocida.

Año	País (Estado)	Tipo de movimiento	Mecanismo disparador	Vol. De material (Km ³)	Impacto
1911	URSS (Tadzhik)	Deslizamiento de roca	Sismo M=7.4	2.0	54 muertes, formación de un dique en el río Murgab
1919	Indonesia (Java)	Lahar	Erupción del volcán Kalut	0.185	5,110 muertes, 104 villas destruidas.
1920	China (Ningxia)	Deslizamiento de tierra	Sismo M=desconocida	Desconocido	100,000 muertes, muchas villas destruidas
1921	URSS (Kazakh)	Flujo de detritos	Nieve	Desconocido	500 muertes
1933	China (Sichuan)	Deslizamiento de tierra y Flujo de detritos	Sismo M=7.5	0.15	6,800 muertes por los deslizamientos y 2,500 por flujo de detritos, 130,000 casas destruidas
1949	URSS (Tadzhik)	Deslizamiento de roca	Sismo M=7.5	Desconocido	12,000-20,000 muertos o desaparecidos
1953	Japón (Wakayama)	Deslizamiento de tierra y Flujo de detritos	Fuerte lluvia	Desconocido	460 entre muertos y desaparecidos, 4,772 casas destruidas
1953	Japón (Kyoto)	Deslizamiento de tierra y Flujo de detritos	Fuerte lluvia	Desconocido	336 entre muertos y desaparecidos, 5,122 casas destruidas
1958	Japón (Shizuoka)	Deslizamiento de tierra y Flujo de detritos	Fuerte lluvia	Desconocido	1,094 entre muertos y desaparecidos, 19,754 casas destruidas
1959	México (Minatitlán)	Flujo de detritos	Huracán	2.06	350 entre muertos y desaparecidos, 200 casas destruidas
1962	Perú (Ancash)	Avalancha de detritos del nevado de Huascarán	Desconocido	0.013	4,000-5,000 muertes, muchas villas destruidas, velocidad del deslizamiento 170 km/hr
1963	Italia (Friuli-Venecia-Grulia)	Deslizamiento de roca en reserva de Vaiont	Desconocido	0.25	2,000 muertes, daños por US\$200,000,000
1964	Estados Unidos (Alaska)	Deslizamiento de tierra	Sismo M=9.4	Desconocido	Daños estimados en US\$280,000,000, en la ciudad de Anchorage, Valdez, Whittier y Seward
1965	China (Yunnan)	Deslizamiento de roca	Desconocido	0.45	444 muertes
1966	Brasil (Rio de Janeiro)	Caidos, avalanchas y Flujo de detritos	Fuerte lluvia	Desconocido	1000 muertos por deslizamientos y flujos de detritos
1967	Brasil (serra das Aranas)	Caidos, avalanchas y Flujo de detritos	Fuerte lluvia	Desconocido	1700 muertos por deslizamientos y flujos de detritos
1970	Perú (Ancash)	Avalancha de detritos	Sismo M=7.7	0.05-0.1	18,000 muertes, Yungay totalmente destruida y Ranrahirca parcialmente; velocidad 280 km/hr
1974	Perú (Huancavelica)	Deslizamiento de roca avalancha de detritos	Lluvia y erosión fluvial	1.6	450 muertes, velocidad de la avalancha de detritos de 140 km/hr
1980	Estados Unidos (Washington)	Deslizamiento de roca avalancha de detritos Monte Santa Helena	Erupción del Monte Sta. Helena	2.8	Deslizamiento más grande de la historia, solo 5-10 muertes; velocidad de 180 km/hr, 23 km recorridos por la avalancha y 95 km por el flujo
1983	Estados Unidos (Utah)	Deslizamiento de detritos	Fuerte lluvia y nieve	0.021	Destrucción de infraestructura valorada en US\$600,000,000
1983	China (Gansu)	Deslizamiento de tierra	Desconocido	0.035	237 muertes, 4 villas sepultadas y dos lagos llenos con material
1985	Colombia (Tolima)	Flujos de detritos de Nevado Ruiz	Erupción del nevado de Ruiz	Desconocido	4 pueblos y villas destruidas, el flujo mato más de 20,000 en la ciudad de Armero
1986	Nueva Britania (Nueva Guinea)	Deslizamiento de roca avalancha de detritos	Sismo M=7.1	0.2	Villa de Bairaman destruida, el evento provoco la formación de un dique que almaceno 500 millones de m ³ , provocando un flujo de detritos.
1987	Ecuador (Napó)	Deslizamiento de tierra	Sismo M=6.1 y M=6.9	0.075-0.11	1000 muertes, pérdidas económicas de US\$1000,000,000
1994	Colombia (Cauca)	Deslizamiento de tierra	Sismo M=6.4	0.025	271 muertes y 1,700 desaparecidos
2001	El Salvador	Deslizamiento de tierra	Sismo M=7.6	Desconocido	400 muertos e incalculables daños materiales

Tabla 1.1.- Deslizamientos catastróficos de los últimos años tomada de Ortiz, 2005 y complementada en este trabajo.

1.2.- Ejemplos de peligros presentados por abanicos aluviales a nivel internacional:

1.2.1.- El desastre del Nevado del Ruiz

El Nevado del Ruiz es un estrato-volcán ubicado en el municipio de Villamaría en el sector septentrional de los Andes, en la Cordillera Central de Colombia, entre los departamentos de Caldas y Tolima, y entre los valles del Magdalena y del Cauca. Su cumbre alcanza una altitud de 5321 metros sobre el nivel del mar.

El 13 de noviembre de 1985 el V. Nevado del Ruiz erupcionó y los Flujos piroclásticos que fundieron su manto glaciar generaron varios flujos de lodo, estas corrientes de lodo y las anteriores, avanzaron cuesta abajo hasta encontrar los principales poblados localizados donde los ríos encuentran sus valles de salida, alcanzando en su recorrido distancias entre 70 y 100 km.

Viviendas campesinas y pequeñas poblaciones rurales, además del poblado de Armero, fueron devastados por estos eventos a su paso. La población de Armero fue la más afectada al quedar completamente arrasada y morir cerca de 21000 de sus 25000 habitantes. En la figura 1.1, se puede apreciar el poblado de Armero después del desastre; también perdieron la vida otros 3000 habitantes en otros lugares y pequeños poblados. Los flujos de lodo causaron, además, 5000 heridos y la destrucción de unas 5000 viviendas en ésta, que fue la segunda erupción volcánica más devastadora en el siglo XX, después de la erupción del Monte Pelado en 1902 ([www. Wikipedia.com](http://www.Wikipedia.com)).



Figura 1.1.- Armero después de la tragedia (www. Wikipedia.com).

1.2.2.- El desastre de Venezuela ocasionado por flujos detríticos e inundaciones repentinas

Cientos de miles de personas viven en una estrecha área costera al norte de Caracas, Venezuela, en el estado de Vargas. La población, localizada en la base de una serie de montañas empinadas de elevaciones mayores de 2000 metros, es altamente vulnerable a deslizamientos generados por episodios de lluvias excepcionales. Un período húmedo inusual en diciembre de 1999 incluyó una acumulación de 200 milímetros de lluvia a lo largo de la costa del Caribe del 2 al 3 de diciembre, seguida por 911 milímetros de lluvia del 14 al 16 de diciembre de 1999.

Las lluvias provocaron miles de flujos detríticos y otros tipos de deslizamientos en las montañas costeras y laderas. Estos deslizamientos se fusionaron y se transformaron en flujos detríticos de gran magnitud que se

movieron rápidamente a través de cañones estrechos y empinados hasta los abanicos aluviales. Los residentes, cuyos hogares estaban en los abanicos aluviales, describieron múltiples inundaciones y flujos detríticos que comenzaron en la tarde y en la noche del 15 de diciembre, continuando hasta el mediodía del día 16 de diciembre. Los deslizamientos (mayormente flujos detríticos) y las inundaciones repentinas a lo largo de la zona costera norteña del estado de Vargas y otros estados aledaños del norte de Venezuela, ocasionaron la muerte a un estimado de 19,000 personas, causaron un sinnúmero de daños a propiedades, y cambiaron la morfología de las laderas de las montañas, así como de los ríos y los abanicos aluviales.

El agente principal de destrucción fue una combinación de flujos detríticos que movieron rocas enormes e inundaciones repentinas que transportaron concentraciones de sedimento extremadamente altas. En casi todos los abanicos aluviales a lo largo de la costa de Vargas, los ríos socavaron canales nuevos en las superficies de algunos de los abanicos a profundidades de varios metros y enormes cantidades de sedimento nuevo fueron depositados en las superficies de los abanicos. A través de grandes segmentos de abanicos aluviales al este de Maiquetía, se depositaron capas de hasta varios metros de espesor de sedimento y detritos, incluso enormes rocas de un diámetro tan grande como 10 metros. Cientos de casas, puentes y otras estructuras sufrieron daños o fueron destruidas, como se puede observar en la Figura 1.2. El daño total en Vargas fue estimado en \$1.9 billones de dólares (USGS, 2002).



Figura 1.2.- Imagen del evento de flujos de detritos en Vargas, Venezuela, 1999 (USGS, 2002).

1.2.3.-Flujos de detritos del 3 de mayo de 2002 en Caleta Buill, Comuna de Chaitén, X Región, Chile.

El día viernes 3 de mayo de 2002, cerca de las 20:30 horas, se generó un flujo de detritos aproximadamente a 4 km al sur de Caleta Buill en la comuna de Chaitén, X Región. El flujo arrasó con dos viviendas, sepultando a 12 personas. La tragedia motivó a las autoridades regionales y comunales ordenar la evacuación de 6 viviendas y la evaluación del riesgo que corren otras viviendas en la misma zona (Fernández y Arenas, 2002).

- *Descripción del flujo de detritos*

El flujo de detritos se generó por el deslizamiento de una masa de sedimentos glaciares, a una altitud aproximada de 700 m.s.n.m. Este bajó por una pequeña cañada con una pendiente muy pronunciada de entre 35° y 45°, hasta llegar al ápice del abanico aluvial, donde perdió energía por el cambio de pendiente, depositando gran parte del sedimento transportado. El flujo alcanzó la costa para introducirse en el mar por más de 100 m. Recorrió aproximadamente 1.8 km desde el origen hasta la costa, donde presenta un ancho de más de 1 km. El área afectada es de aproximadamente 0.6 km². Los depósitos del flujo, no sumergidos, presentan espesores de entre 8 y 15 metros, siendo mayores en el centro de la zona distal del abanico, cercano a la costa. Estos depósitos están constituidos, principalmente, por bloques de roca de hasta 4 metros de diámetro, gravas y troncos de árboles, inmersos en una matriz areno-arcillosa. El volumen total fue de 5.5 a 6 millones de metros cúbicos, equivalentes a una masa de 10 a 14 millones de toneladas. A su paso, la ola del flujo arrasó con el bosque y erosionó las laderas, provocando algunos deslizamientos laterales. Según estimaciones de terreno, el flujo pudo haber sobrepasado los 50 km/hr en la cañada. Si esta estimación es correcta y por su alta velocidad, la ola del flujo pudo tener un enorme caudal del orden de 60,000 m³/s. Al llegar al ápice del abanico aluvial, el flujo perdió su energía y disminuyó su velocidad, probablemente hasta unos 20 km/hr antes de entrar al mar (Fernández y Arenas, 2002). En la Figura 1.3, se presenta un perfil del flujo que se presentó en la zona descrita anteriormente.

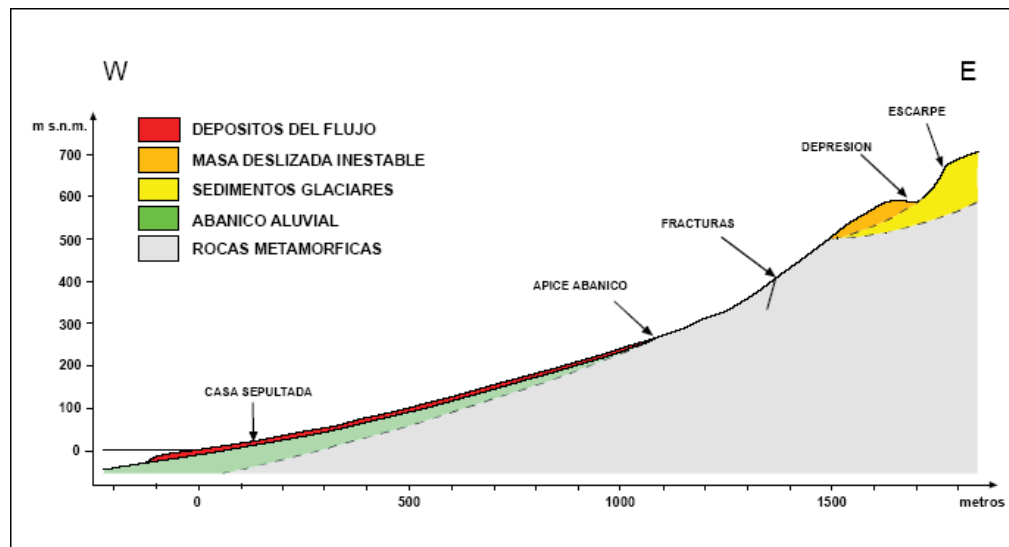


Figura 1.3.- Perfil esquemático del flujo de detritos del 3 de mayo de 2002 en Caleta Buill (Fernández y Arenas, 2002).

- ***Causas generadoras del flujo***

La masa deslizada que dió origen al flujo, provino de una secuencia de sedimentos no consolidados de origen glacial dispuestos sobre rocas metamórficas impermeables en comparación a los sedimentos. Estas rocas forman un estrechamiento de la cañada, el que habría actuado como un embudo, impidiendo el escurrimiento del agua subterránea. Esto habría facilitado la saturación de los sedimentos glaciares, aumentando la presión de poro y disminuyendo los esfuerzos efectivos en el material. Esta situación, junto con la fuerte pendiente de la ladera y la ocurrencia de precipitaciones intensas, condicionó favorablemente la generación del deslizamiento y del flujo de detritos (Fernández y Arenas, 2002).

1.3.- Ejemplos de peligros presentados por abanicos aluviales a nivel nacional

1.3.1.-Flujo de detritos del cerro Pelón municipio de Celaya, Guanajuato

El Cerro Pelón es un cuerpo constituido por rocas ígneas altamente intemperizadas, que presenta en la parte alta una pared con un patrón claro de fracturas en sentido vertical, que da origen a múltiples bloques de gran tamaño, a todo lo largo de la corona del montículo. La ladera afectada se encuentra localizada en $20^{\circ} 27.45'$, latitud Norte, y $100^{\circ} 45.22'$ longitud Oeste. El área afectada presentó, en planta, una forma burdamente triangular, con una longitud sobre la ladera de 100 m y un ancho en la base de 30 m, aproximadamente. La ladera tiene una pendiente de 20° en la parte más cercana a la base del cerro, de 25° en su parte media, y 30° en su parte más alta, figura 1.4. Debido a que la zona no se encuentra poblada, no causo muertes humanas (Gutiérrez y Soto, 2003). En los depósitos observados predominan las gravas y materiales finos, conteniendo numerosos bloques pequeños.

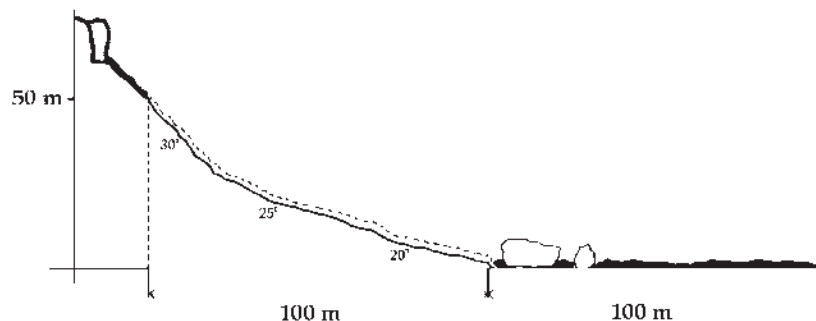


Figura 1.4.- Variación en la pendiente de la ladera. Con línea punteada se señala la posición original del material removido; asimismo, el área de depósito sobre la parte plana. En la parte superior izquierda se esquematiza la zona de aporte de bloques rocosos (Gutiérrez y Soto, 2003).

La capa de suelo en la zona afectada tenía un espesor promedio de 20 cm y sostenía una vegetación predominantemente de arbustos. La capa de suelo presenta muy baja cohesión y es altamente susceptible a la infiltración, el volumen de suelo desplazado mediante el flujo fue de aproximadamente 300 m³ (Gutiérrez y Soto 2003).

- *Naturaleza del fenómeno*

En este caso, el factor determinante para la formación del flujo de detritos fue la saturación del suelo a consecuencia de las lluvias particularmente abundantes registradas en octubre del 2003. La capa de suelo, con muy baja cohesión, aumenta significativamente de peso y pierde fácilmente su consistencia bajo condiciones de alta precipitación pluvial en tiempos relativamente cortos. Los fragmentos de artículos domésticos utilizados en una casa justo en la trayectoria del flujo, así como los restos de animales atrapados, indican que el fenómeno se presentó de manera rápida. El flujo observado en la ladera del Cerro Pelón no tiene relación con actividad tectónica local o regional (Gutiérrez y Soto 2003).

1.3.2.- Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla

A finales del mes de septiembre y durante la primera semana de octubre de 1999, la Sierra Norte de Puebla fue afectada por algunos miles de procesos de remoción en masa. La depresión tropical número 11 ocasionó lluvias abundantes, con picos máximos de 440 mm en 24 horas entre el 4 y 5 de octubre. El poblado de Zapotitlán de Méndez fue afectado por dos distintos tipos de procesos,

deslizamientos superficiales de suelo volcánico y capa vegetal, y deslizamientos profundos de tipo rotacional en lutitas plegadas (Capra y Dávila, 2003).

Capra y colaboradores (2003), llevaron a cabo un estudio recolectando muestras de suelo de la zona, con el fin de determinar sus características granulométricas, tipo de constituyentes y composición mineralógica de las arcillas. Para obtener el espectro granulométrico de las muestras se realizaron análisis de laboratorio por tamizado seco. Los fragmentos más finos (limo y arcilla) se determinaron por vía húmeda. Los resultados obtenidos con cada metodología fueron utilizados conjuntamente para obtener la distribución granulométrica de todo el depósito. Para el análisis de la composición mineralógica de los minerales arcillosos se prepararon muestras para ser analizadas con el difractor de rayos X.

En base al estudio que realizaron llegaron a la conclusión de que este tipo de inestabilidad en esa zona, es principalmente de origen geológico, debido a la profundidad de la superficie de movimiento y a que la inestabilidad de la ladera se debe a la debilidad del macizo rocoso por sus pobres propiedades geotécnicas (Capra y Dávila, 2003).

1.3.3.- Movimiento complejo en Acapulco, Guerrero

Durante la madrugada del día 9 de octubre de 1997, el huracán *Pauline* causó en Acapulco la peor tragedia registrada en su historia. La lluvia alcanzó 400 mm en tan solo cinco horas. Esto ocasionó que el desastre se iniciara con la saturación de los materiales térreos de la parte alta de los cerros, donde la inclinación natural del terreno es más pronunciada y que afortunadamente se

encuentra deshabitada. En esos sitios se presentaron derrumbes locales de las laderas, iniciando un movimiento complejo consistente en caídos y flujos.

Debido a la pendiente pronunciada de esta parte alta de la ciudad, el material producto de dichos colapsos se desplazó pendiente abajo, con gran velocidad, a manera de avalancha. En el primer sitio en donde la pendiente se vuelve más suave, justo antes de entrar a la zona poblada, la avalancha se detuvo. De esta forma, gran parte del material de la avalancha se acumuló, quedando al frente los fragmentos de roca de mayor tamaño y los de menor tamaño represados por los anteriores. Esta forma de depósito de los materiales pétreos es una de las características que permiten identificar en campo a una avalancha. En este sitio, el caudal y su carga de material sólido, consistente en fragmentos de roca de diversos tamaños, sedimentos y agua. A pesar de la gran cantidad de rocas acumuladas en este sitio, el resto de la masa térrea (fragmentos de roca y sedimentos) junto con la gran cantidad de agua de lluvia, continuó su movimiento pendiente abajo con un gran potencial erosivo que arrastró sedimentos y rocas del lecho de los cauces de los ríos, devastando todo lo que había a su paso, figura 1.5.



Figura 1.5.- Imagen de los flujos de lodo y escombros en la ciudad de Acapulco (CENAPRED 2001).

Estos flujos incrementaron notablemente el área hidráulica de dichos cauces, mediante su acción erosiva, medida desde el punto de vista de la masa de material térreo y agua. Además de la gran velocidad con la que se desplazó el flujo, desde la parte alta de la ciudad, prácticamente hasta descargar su caudal en la bahía (CENAPRED, 2001).

1.3.4.- Flujo de lodo en la Colonia Aurora, Teziutlán, Puebla

Las lluvias de octubre de 1999 ocasionaron varios cientos de movimientos de ladera en la Sierra Norte de Puebla. De manera particular, la ciudad de Teziutlán fue noblemente afectada ya que más de cien personas perdieron la vida, muchas quedaron sin hogar y se registraron cuantiosos daños económicos. Teziutlán se encuentra localizado en un área de lomeríos con pendientes variables. La geología del área comprende distintos flujos piroclásticos provenientes de la caldera de los Humeros, de edad cuaternaria que pertenecen al Cinturón Volcánico Transmexicano. Estos materiales, son principalmente tobas y brechas con cementación intermedia. Son rocas blandas de grano fino a medio, aunque también se encuentran estratos con una cantidad considerable de fragmentos rocosos y gravas, empacadas en una matriz fina (Mendoza *et al*, 2000).

Las propiedades mecánicas de los suelos derivados de estos materiales tienen la peculiaridad de tener una alta sensibilidad al secado y variaciones sensibles en su resistencia (Marsal y Mendoza, 1985), lo cual explica la inestabilidad que las laderas presentaron durante este período de lluvias extremo.

- *El flujo de lodo en la Colonia Aurora*

El 5 de octubre de 1999 en la ladera posterior del cementerio municipal, ubicado en la Colonia La Aurora ocurrió un movimiento de ladera que tuvo consecuencias catastróficas. De acuerdo con observaciones de campo hechas inmediatamente después del evento, la masa fallada tuvo un movimiento con componente rotacional en la parte cercana a la corona, y un componente traslacional a lo largo del cuerpo principal (Mendoza *et al.*, 2000), lo cual explica sin lugar a dudas que el movimiento inicial tuvo un mecanismo de deslizamiento y posteriormente se convirtió en flujo, figura 1.6 (CENAPRED, 2001).



Figura 1.6.- Flujo de lodo en la Colonia Aurora, Teziutlán, Puebla. (CENAPRED 2001).

Los muestreos realizados para conocer las propiedades índices de los materiales fallados mostraron que el suelo de esta ladera tenía un contenido natural de agua ligeramente superior al límite líquido, es decir, con una resistencia muy baja. El movimiento de la colonia La Aurora, así como otros procesos de ladera que ocurrieron en Teziutlán y en otras comunidades de la Sierra Norte de Puebla fueron resultado de la saturación del suelo provocado por las lluvias extraordinarias (CENAPRED 2001).

Con base en análisis de campo y de laboratorio, Mendoza *et al.*, (2000), sugieren que al saturarse la ladera disminuyó la cohesión, lo cual para cierta presión en el agua podría causar la inestabilidad.

1.4.- Antecedentes del lugar de estudio

1.4.1.- El desastre en Minatitlán, Colima causado por flujos de detritos en el año de 1959

En 1959 el Cerro de Los Copales localizado del lado este del poblado es una montaña de gran tamaño que se ubica a tres kilómetros del pueblo de Minatitlán, con una elevación máxima de 1700 metros sobre el nivel del mar. La falda del cerro estaba cubierta de diversa vegetación tropical, arbustos y matorrales. En las partes altas del cerro abundaban las coníferas y los árboles propios de los terrenos boscosos.

Las casas y calles se escondían del sol entre la abundante arboleda y sólo el kiosco y el templo destacaban por su altura. El viernes 23 de octubre de 1959 llegaron las primeras nubes a Minatitlán humedeciendo poco a poco el suelo, en

ciertos momentos dejaba de llover, pero al paso de algunas horas continuaba lloviendo. Así estuvo hasta el día 27 de octubre, cuando a las 6:00 a.m. se vió un gran arroyo de lodo con bloques y árboles, que descendían por las calles del poblado con altura promedio de 2 m que en ocasiones tapaban a las casas. Entre todo este flujo de lodo y bloques se podía observar mucha gente que era arrastrada por el arroyo, así como una gran cantidad de animales. En la Figura 1.7, se puede ver como quedó una casa de adobe después del evento (Arreygúe y Cortés, 2007).



Figura 1.7.- Destrucción de las viviendas por el paso del flujo de detritos de 1959 (Arreygúe y Cortés, 2007).

Toda la esorrentía del flujo llegó al caudaloso Río Minatitlán, el cual se encuentra en parte baja y pasa a escasos tres kilómetros de distancia del pueblo. El cauce que inicia como Río Minatitlán, y termina como Río Marabasco en el Océano Pacífico, en donde se encontraron los cuerpos sin vida de muchos minatitlenses, alrededor de 100 cuerpos en el río y en la desembocadura.

La tarde del martes y los dos días siguientes fueron de profunda tristeza para los sobrevivientes. Se dedicaron a labores de rescate y auxilio para los heridos. Hicieron fosas comunes para enterrar a sus parientes. Recolectaron comida con aquellas personas que no fueron dañados por el evento. Los minatitlenses estuvieron incomunicados con las poblaciones vecinas, desde el martes hasta el jueves 29 de octubre. La distancia de Minatitlán a la capital del estado era de 50 kilómetros, pero lo accidentado del camino obligaba a que el recorrido se hiciera en 13 horas a pie.

En la ciudad de Colima se formó un Comité para ayudar a los damnificados del poblado, así mismo se crearon albergues. En el poblado, improvisaron una pista de aterrizaje para que los aviones pudieran suministrar víveres y regresar con los heridos a Colima. Según la SRH el huracán del Pacífico de 1959 fue clasificado en categoría 5, el cual entró a tierra hasta una distancia de 100 km (llegó hasta el Estado de Zacatecas), con vientos superiores a 250 km por hora, además superó en un 300% el promedio de lluvias en 24 horas.

Este evento destruyó dos terceras partes del poblado de Minatitlán por lo que fue declarada zona de desastre total: se estimaron 200 viviendas destruidas y 350 personas muertas y desaparecidas, además de pérdidas materiales y animales considerables, el resultado del desastre se puede observar en la Figura 1.8 (Arreygue y Cortés, 2007).



Figura 1.8.- Avalancha de bloques y lodo que destruyó al poblado de Minatitlán, Colima (Arreygue y Cortés, 2007).

1.5.- Cronología de huracanes en el estado de Colima.

Como ya se mencionó anteriormente el flujo de detritos del poblado de Minatitlán, Colima fue causado por lluvias intensas, provocadas por un huracán. Por lo tanto es importante conocer la cronología de este tipo de fenómenos meteorológicos que se han presentado en el estado de Colima desde 1926 hasta la fecha. A continuación se presenta en la tabla 1.2 una lista de los huracanes registrados hasta el año 2000, que han afectado al estado de Colima.

Año.	Descripción.
1626	Octubre 26. Un ciclón con duración de cinco horas, derriba huertas de cacao, destecha los templos y la mayor parte de las casas de Colima.
1808	Octubre s/f. Mariano de la Madrid reporta desde Cuyutlán el daño ocasionado por un ciclón de gran fuerza.
1812	Octubre 15. Fuertísimo huracán arranca los árboles y destruye las labores en la costa de Colima. El mar se sale de su sitio e inunda los pozos y salitreras de El Real.
1862	Junio 28. Un ciclón destruye el templo parroquial de la ciudad de Colima (hoy catedral). Desde entonces se paso el culto a la capilla del Beaterio, que se llamó Parroquia del Sagrario al crearse la diócesis. El clero encomienda al ingeniero Longines Banda, un nuevo plano de la iglesia con dimensiones majestuosas como la catedral.
1862	Septiembre 17. Fuerte lluvia que duró tres días y tres noches, inundando todas las cementeras y destruyendo la ganadería.
1865	Septiembre 29. Inundación en la ciudad de Colima, al desbordarse los ríos de Colima, el Chiquito y el Manrique, a consecuencias de fuertes lluvias. Causando la destrucción de fincas, árboles y ganado. Maximiliano de Hasburgo envió un donativo de 2 mil pesos para los damnificados.
1865	Septiembre 30. Un ciclón origina inundaciones y desbordamientos en

	la cuenca del río Coahuayana, en la costa y en varias partes de Colima.
1869	Julio 18. Inundación en la ciudad de Colima al desbordarse el río Chiquito, a causa de las fuertes lluvias.
1870	Octubre 4. Perturbación ciclónica pasó a muy corta distancia de nuestras costas, ocasionando el hundimiento del buque estadounidense Puertas de Oro, frente a las costas de Jalisco y Colima, tocando tierra en Colima con vientos fuertes que no ocasionaron daños de consideración.
1878	Agosto 20. Inundación del centro de la ciudad de Colima al desbordarse el río Chiquito, a causa de fuertes lluvias.
1880	Octubre 27. Michoacán y Jalisco fueron invadidos por un violento ciclón que durante ocho horas de duración causó, en Manzanillo, el hundimiento de cuatro grandes embarcaciones que se encontraban ancladas con muchas toneladas de cargamento en la bahía, de entre ellas una estadounidense llamada Wilmington, que descargaba la rielería traída de los Estados Unidos para la construcción de la vía de manzanillo-Armería. Igualmente todas las naves de menor tamaño quedaron hundidas, calculándose en más de un millón de dólares las pérdidas.
1881	Enero 25. Las lluvias, vientos y heladas que caen durante cinco días, causan inundaciones y daños considerables en varios lugares de Colima y estados circunvecinos.

1881	Octubre 27. Un ciclón azota la costa del estado de Colima y afecta también el poblado de Minatitlán.
1881	Noviembre 27. Un ciclón causa pérdidas humanas y materiales en Manzanillo.
1886	Octubre 19. Un ciclón entró en Manzanillo a eso de las seis de la tarde con toda su fuerza. Treinta y seis horas duró la furia del meteoro, haciendo subir el agua a un metro de altura en la tierra.
1889	Octubre 19. Torrencial lluvia de tres días en el estado de Colima. El río Armería arrastra parte del puente del ferrocarril.
1890	Octubre 22. Una fuerte tempestad echa a pique embarcaciones en el puerto de Manzanillo, ocasionando serios daños materiales a la población.
1906	Octubre 2. Inundación del barrio El Manrique de la ciudad de Colima a consecuencia de las fuertes lluvias, dañando la vía férrea. En El Remate, Colima, pereciendo veinticinco personas sepultadas.
1906	Octubre 4. Un ciclón causa inundaciones y daños considerables a la agricultura y ganadería en los municipios de Coquimatlán, Tecomán, Armería y Manzanillo.
1906	Octubre 6. Fuertes lluvias originan inundaciones y pérdidas materiales en la zona costera del estado de Colima.

1930	Octubre 21. Un ciclón azota las costas de Michoacán. En esa región se le recuerda como el “año de la tromba”.
1932	Agosto 29. Un ciclón azota las costas de Michoacán y se interna hasta las partes altas de la Sierra Madre del Sur: Arteaga, Aguililla, Coalcomán, Aquila y Villa Victoria, llegando a la zona costera de Colima.
1935	Septiembre 27. Un ciclón causa enormes pérdidas materiales en las costas de Colima y Michoacán.
1942	Octubre 4. Un ciclón azota las costas del estado de Colima y causa daños, especialmente en la zona de Cuyutlán, Colima.
1944	Agosto 27. Un ciclón causa daños materiales en la costa de Colima.
1954	Septiembre 30. Un ciclón azota las costas colimenses y causa daños a la agricultura.
1955	Octubre 15. Una perturbación ciclónica provoca una elevada precipitación pluvial, con una creciente impetuosa del río Colima que causa daños materiales a las construcciones que han invadido su cauce. El día 18, el ciclón provoca daños considerables a las vías de comunicación en el estado.
1955	Octubre 16. Una continua y pertinaz precipitación pluvial, con duración de tres días, concentrada en la zona norte del estado de

	<p>Colima y el sur de Jalisco, originó en la parte alta del volcán de fuego un alud de lodo, maderas y enormes rocas, que arrasó la plaza, mercado, escuela e iglesia de Atenquique, Jalisco, causando la muerte de veintitrés personas. Esa lluvia ocasionó el desbordamiento de los arroyos y ríos afluentes del Armería y Coahuayana. Los puentes de la ciudad de Colima funcionaron a su máxima capacidad estando a punto de provocar una catástrofe, debido a los árboles y construcciones que invadieron el cauce del río.</p>
1959	<p>Octubre 27. Un fuerte ciclón azota las costas de Colima y origina mil muertos (300 en Minatitlán) y cuantiosos daños materiales, particularmente en Manzanillo, que estuvo en el ojo del ciclón. Se registraron vientos de hasta 250 kilómetros por hora.</p>
1975	<p>Abril 30. En el estado de Colima, se levantaron fuertes marejadas que provocaron pánico en los habitantes de la zona costera y causaron daños a las instalaciones turísticas de Boca de Apiza, Pascuales y El Paraíso.</p>
1982	<p>Noviembre. Una prolongada lluvia de cuatro días, ocasiona derrumbes en los cerros del puerto de Manzanillo, los derrumbes causaron la muerte de veinticuatro personas, muchos heridos y destrucción de sus modestas viviendas.</p>
1983	<p>Mayo 28. El huracán “Adolfo”, azota violentamente el puerto de Manzanillo, durante varias horas.</p>

1984	Agosto 5. El arroyo Pereyra se desborda a causa de las fuertes lluvias y provoca cuantiosos daños materiales a las viviendas que han invadido su cauce.
1985	Noviembre 19. Un fenómeno meteorológico provoca una extraordinaria precipitación, concentrada en un área de 6 km ² ; causó daños materiales en el municipio de Coahuayana. Los vecinos del poblado El ojo de Agua, observaron previamente un brusco enfriamiento de la atmósfera, lo que fue una culebra de agua.
1986	Julio 6. Una precipitación pluvial extraordinaria de gran intensidad durante más de una hora, en la parte norte del municipio, provocó que el río Colima creciera, arrastrando árboles e inundando viviendas por la calle Manuel Álvarez, causando cuantiosas pérdidas materiales. La SARH, estimó el caudal en cien metros cúbicos por segundo.
1986	Julio 24. Una borrasca y granizada azotan la ciudad de Colima. Fuertes vientos huracanados derribaron varios árboles y destecharon algunas viviendas.
1987	Julio 24. El huracán “Eugene” causa cuantiosos daños en los cultivos de la costa del estado de Colima.
1991	Agosto 18. El huracán “Ignacio” afecta las costas de Colima.
1992	Octubre 5. El huracán “Virgil” toca las costas de Colima.

1992	Octubre 10. El huracán “Winifred” ocasiona inundaciones en Cuyutlán, Colima.
1993	Julio 9. El huracán “Calvin” sorprende a pobladores del estado de Oaxaca, Guerrero, Colima, Jalisco, Nayarit, Sinaloa y Baja California.
1996	Junio 27. El huracán “Alma” toca las costas de Colima y Michoacán.
1996	Septiembre 14. El huracán “Fausto” inunda calles de Cuyutlán, Colima.
1996	Octubre 4. El huracán “Hernán” causa daños en Cuyutlán, Colima.
1999	Septiembre 9. El huracán “Grez” se pasea por las costas del pacífico y sorprenden sus fuertes vientos.
2000	Septiembre 22. El huracán “Norman” trae grandes lluvias al estado de Colima.

Tabla 1.2.- Lista de los huracanes registrados hasta el año 2000, que han afectado al estado de Colima (Padilla, 2006).

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS BÁSICOS

2.1.- Definición de movimientos en masa

Los movimientos en masa son procesos de la Geodinámica Externa, los cuales modifican las diferentes formas del terreno. Los deslizamientos, a su vez, son la principal manifestación de los movimientos en masa. Los deslizamientos, como todos los movimientos en masa, involucran el movimiento, pendiente abajo, de los materiales que componen la ladera, bajo la influencia de la gravedad y pueden ser disparados por lluvias, sismos y actividad humana (Corominas, 1998).

2.2.- Tipos de materiales

En todas las clasificaciones existentes sin excepción, la naturaleza de los materiales involucrados es uno de los parámetros utilizados. Tanto Varnes (1978) como Hutchinson (1988) distinguen entre substrato rocoso, detritos y tierra. Mientras que el concepto de substrato rocoso no ofrece dudas, la distinción entre detritos y tierra no es evidente, especialmente cuando consideramos los movimientos de flujo. Ambos son suelos desde el punto de vista ingenieril. Los detritos consisten en un suelo de composición granulométrica gruesa, es decir, formado mayoritariamente por gravas y bloques mientras que la tierra tiene un contenido importante de finos, es decir, limos y arcillas. En otras palabras, se trata de la distinción entre materiales cohesivos (tierra) y no cohesivos (detritos).

Cruden y Varnes (1996) consideran *detritos* a un suelo que contiene una proporción significativa, entre el 20 y el 80% de partículas de diámetro mayor a 2 mm mientras que *tierra* contiene el 80% o más de partículas de diámetro menor a 2 mm (límite superior del tamaño arena). En este último caso, cuando el contenido de limo y arcilla es el mayoritario de la fracción fina, lo consideran *barro* (Corominas 1998).

2.3.- Clasificación de los movimientos en masa

Según Corominas (1998), las clasificaciones de movimientos de ladera más aceptadas se basan en las características cinemáticas de los movimientos, es decir, en los mecanismos de propagación. Para identificar el mecanismo actuante es necesario acudir a detalladas observaciones geomorfológicas, geométricas y al análisis de los desplazamientos en superficie y en profundidad. Raras veces se dispone de toda esta información y la identificación del mecanismo se realiza casi exclusivamente a partir de la forma de la masa movida.

Todas las clasificaciones coinciden en la existencia de, al menos, cinco mecanismos principales que son: caídas de bloques, vuelcos, deslizamientos (rotacional y traslacional), expansiones laterales y flujos.

2.3.1.- Desprendimientos o caídas de bloques

Representa la disgregación rápida de un volumen de material litológico a lo largo de una superficie, en caída libre. Por lo general se pueden dividir en:

- *Desprendimientos:*

Disgregación de suelo o roca fracturada y existe un descenso súbito con

fragmentación de material a lo largo de una ladera de fuerte pendiente (Figura 2.1)

- *Caídas:*

Disgregación generalmente de roca, que forma en la base un depósito caótico de material grueso, como se observa en la figura 2.1.

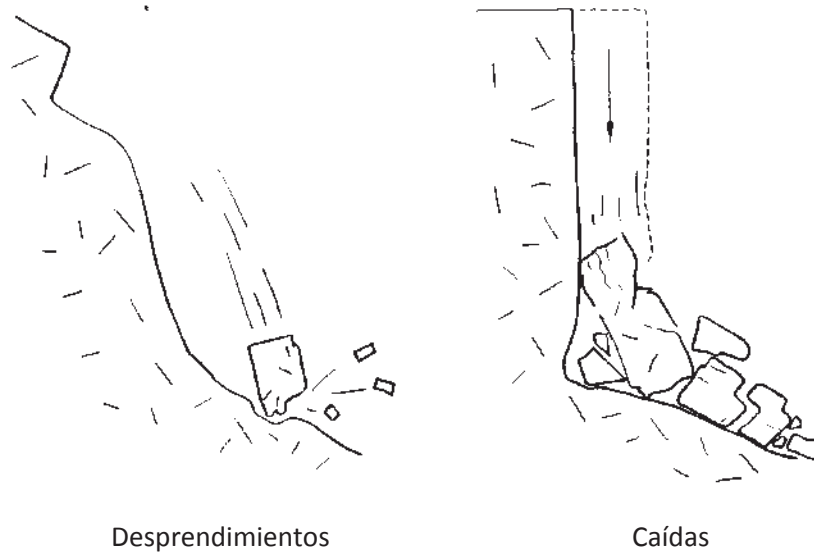


Figura 2.1. Mecanismos de desprendimiento y colapso (Corominas y García Yagüe, 1997).

2.3.2.- Vuelcos o volcamientos

Es la rotación hacia adelante y hacia el exterior de la ladera, de una masa de suelo o roca alrededor de un eje situado por debajo de su centro de gravedad. La fuerza desestabilizadora es la gravedad así como el empuje ejercido por el terreno adyacente o los fluidos (agua o hielo) en las grietas. Dentro del mecanismo de vuelco pueden distinguirse dos procesos:

- *Vuelco por flexión*

Tiene lugar en rocas con un sistema preferente de discontinuidades, formando vigas semicontinuas en voladizo (Goodman y Bray, 1976), lo anterior se puede observar en la figura 2.2.

- *Desplome*

La parte movida cae con un movimiento brusco de giro, al menos inicial, apoyado en su base externa. Estos movimientos se producen en bordes acantilados rocosos o de materiales areno-arcillosos compactados. Si la ladera es empinada, las roturas por vuelco pueden transformarse en caídas, figura 2.2.

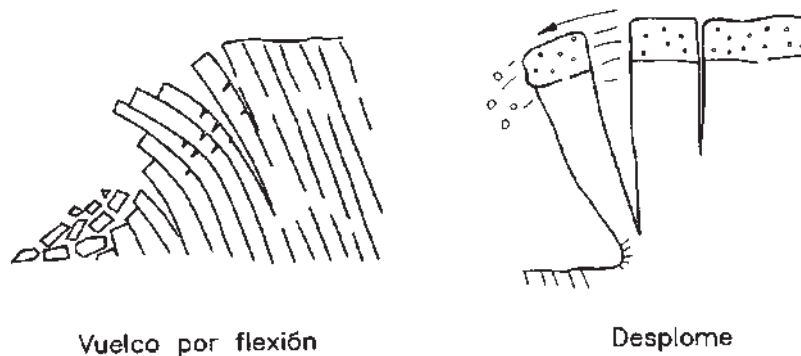
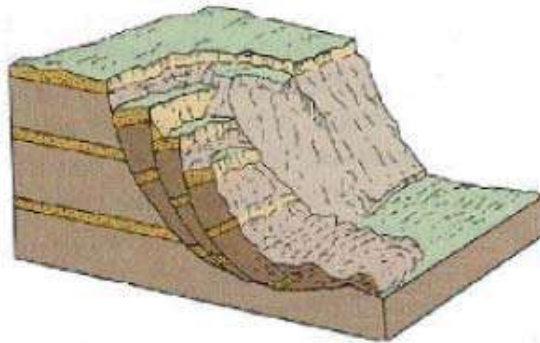


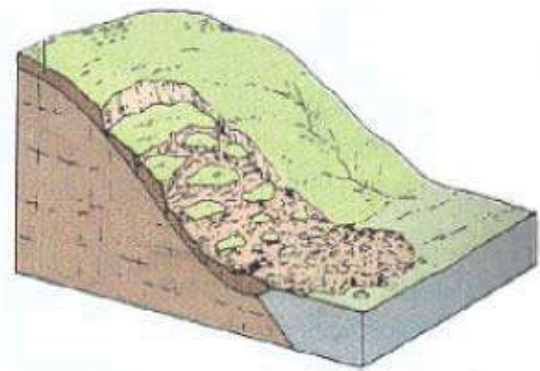
Figura 2.2.- Mecanismos de vuelco o volcamientos (Corominas y García Yagüe, 1997)

2.3.3.- Deslizamientos

Es un desplazamiento lateral abajo de una masa de suelo o roca, que tiene lugar predominantemente sobre una o más superficies de rotura, o zonas relativamente delgadas con intensa deformación de cizalla. Elementos característicos de este tipo de movimiento son la presencia de superficies de rotura definidas y la preservación a grandes rasgos de la forma de la masa desplazada (Corominas 1998).



Deslizamientos rotacionales



Deslizamientos traslacionales

Figura 2.3.- Tipos de deslizamiento.

- *Deslizamientos rotacionales*

La rotura se produce a lo largo de una superficie curvilínea y cóncava. El terreno experimenta un giro según un eje situado por encima del centro de gravedad de la masa deslizada. Los deslizamientos rotacionales, una vez producidos, son susceptibles de reactivación (Figura 2.3).

- *Deslizamientos traslacionales*

Tiene lugar a lo largo de una superficie de rotura plana u ondulada. La masa deslizada puede proseguir por la ladera. Los componentes de la masa desplazada se mueven a la misma velocidad y siguen trayectorias paralelas. A medida que un deslizamiento traslacional progresa puede romperse, en particular si aumenta la velocidad. Entonces, la masa disgregada deviene un flujo (Figura 2.3).

2.3.4.- Expansión lateral

La separación lateral se define como una extensión de una masa cohesiva de suelo o roca, combinada con la subsidencia del material fracturado en un material subyacente más blando. La superficie de ruptura no es una superficie de corte intenso y el proceso es el producto de la licuefacción o flujo del material más blando (Cruden y Varnes,1996), como se puede apreciar en la figura 2.4.

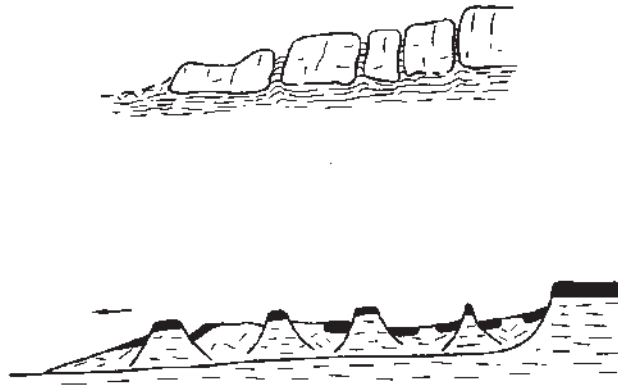


Figura 2.4.- Expansiones laterales. Arriba: por fluencia y extrusión del material subyacente. Abajo: por licuefacción (arcillas rápidas). Según Corominas y García Yagüe (1997).

2.3.5.- Flujos

En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos y los puede haber de roca, de detritos (residuos) o de suelo o tierra. Los flujos muy lentos o extremadamente lentos pueden asimilarse en ocasiones, a los fenómenos de reptación y la diferencia consiste en que en los flujos existe una superficie fácilmente identificable de separación entre el material que se mueve y el subyacente, mientras en la reptación la velocidad del movimiento disminuye al profundizarse en el perfil, sin que exista una superficie definida de rotura.

La ocurrencia de flujos está generalmente, relacionada con la saturación de los materiales subsuperficiales. Algunos suelos absorben agua muy fácilmente cuando son alterados, fracturados o agrietados por un deslizamiento inicial y esta

saturación conduce a la formación de un flujo. Algunos flujos pueden resultar de la alteración de suelos muy sensitivos tales como sedimentos no consolidados (Suárez, 2001).

- ***Flujo en roca***

Los movimientos de flujo en roca comprenden las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas. La distribución de velocidades puede simular la de líquidos viscosos. Este tipo de movimiento ocurre con mucha frecuencia en zonas tropicales de alta montaña y poca vegetación, especialmente en la cordillera de los Andes.

Se observa la relación de estos flujos con perfiles de meteorización poco profundos en los cuales las fallas están generalmente, relacionadas con cambios de esfuerzos ocasionados por la filtración momentánea del agua en las primeras horas después de una lluvia fuerte. Las pendientes de estos taludes son comúnmente muy empinadas (más de 45°).

Su ocurrencia es mayor en rocas ígneas y metamórficas muy fracturadas y pueden estar precedidos por fenómenos de inclinación. Estos flujos tienden a ser ligeramente húmedos y su velocidad tiende a ser rápida a muy rápida (Suárez, 2001).

- ***Flujo de detritos***

Son movimientos rápidos de material detrítico en el que predomina la fracción gruesa, es decir, arenas, gravas y bloques. El contenido de agua es elevado y la fracción sólida puede llegar a constituir el 80% en peso de la masa en movimiento. La corriente puede bajar tanto por laderas abiertas como canalizada por canales o cañadas del terreno dando lugar a morfologías diferentes. Debido a la baja cohesión de sus componentes, se desparrama en la parte inferior de las laderas sin generar un depósito de forma específica, pero cuando se canaliza por barrancos suelen dar lugar a conos de deyección (Corominas, 1998).

Por lo general, un flujo de rocas termina en un flujo de detritos. Los materiales se van triturando por el mismo proceso de flujo y se puede observar una diferencia importante de tamaños entre la cabeza y el pie del movimiento. El movimiento de los flujos de detritos puede ser activado por las lluvias, debido a la pérdida de resistencia por la disminución de la succión al saturarse el material o por el desarrollo de fuerzas debidas al movimiento del agua subterránea (Collins y Znidarcic, 1997).

Los daños causados por los flujos de detritos abarcan áreas relativamente grandes. El flujo típico de detritos es una ola larga de materiales sólidos y líquidos entremezclados, que se mueve en forma constante a través de un canal con algunas olas menores superimpuestas que se mueven a velocidades superiores a aquellas del flujo mismo. Cuando el canal es más pequeño que el flujo, se forman olas horizontales o depósitos laterales a los lados del canal (Suárez, 2001).

Según el USGS (2002) los flujos detríticos son deslizamientos de tierra de movimiento rápido que ocurren en una gran variedad de ambientes. Por lo

general, se componen de agua y material, principalmente arena, grava y piedras, pero, también pueden incluir árboles, automóviles, edificios pequeños y otros materiales fabricados por el ser humano. Usualmente, los flujos detríticos tienen la consistencia del concreto húmedo y se mueven a velocidades superiores a 16 metros por segundo (Figura 2.5).

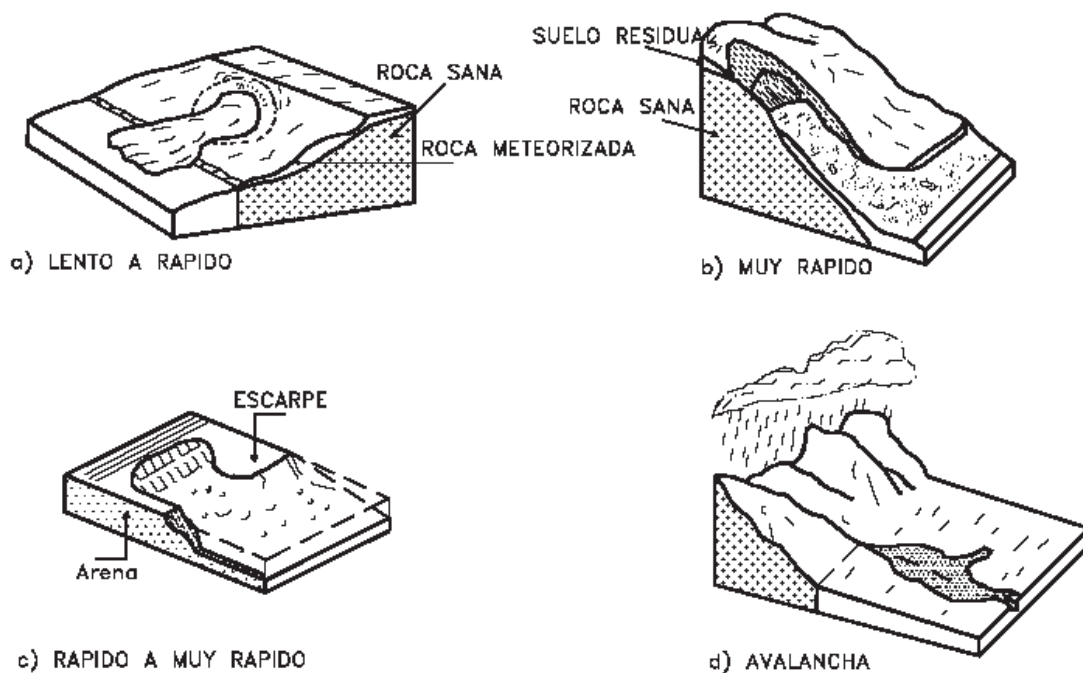


Figura 2.5.- Flujos de diferentes velocidades (Suárez, 2001).

- ***Flujo de suelo***

Los flujos de suelo también pueden ser secos y más lentos de acuerdo a la humedad y pendiente de la zona de ocurrencia. En zonas de alta montaña y desérticas ocurren flujos muy secos, por lo general pequeños pero de velocidades altas (Suárez, 2001).

- ***Flujos de lodo***

Dentro de los flujos de tierra están los “flujos de lodo”, en los cuales los materiales de suelo son muy finos y las humedades muy altas y ya se puede hablar de viscosidad propiamente dicha, llegándose al punto de suelos suspendidos en agua. Los flujos de lodo poseen fuerzas destructoras grandes que dependen de su caudal y velocidad.

Un flujo de lodo posee tres unidades morfológicas: un origen que generalmente es un deslizamiento, un camino o canal de flujo y finalmente una zona de acumulación. El origen consiste en una serie de escarpes de falla o deslizamientos de rotación o translación, el camino o canal es generalmente un área estrecha, recta o una serie de canales a través del cual fluye el material viscoso, el ancho, profundidad y pendiente del camino del flujo varía de acuerdo a las condiciones topográficas y morfológicas (Suárez, 2001).

2.3.6.- Avalanchas

Movilización de grandes masas de tierra, fragmentos de rocas o derrubios a gran velocidad, en ocasiones, superiores a los 50 m/s. Su gran velocidad ha sugerido la existencia de otros mecanismos como el flujo granular turbulento, el desplazamiento sobre colchones de aire o la transferencia de momentos entre las partículas en movimiento. Igual que ocurre con los desprendimientos, el relieve es el que condiciona que la rotura de grandes volúmenes de roca o suelos derive hacia una avalancha o se mantenga como un deslizamiento o una corriente (Corominas 1998).

2.4.- Abanicos aluviales.

Los abanicos aluviales son formaciones terrestres de inclinación leve en forma de cono o abanico, creadas en el transcurso de miles a millones de años, por la deposición de sedimentos erosionados en la base de las cordilleras de las montañas. Los abanicos aluviales pueden ser altamente activos, donde las inundaciones y los flujos detríticos pueden ocurrir por episodios en cualquier punto de la superficie del abanico. Otros abanicos aluviales son menos activos, donde el levantamiento y el asentamiento tectónicos han canalizado los flujos de manera tal que gran parte del abanico no se afecta durante las inundaciones.

Los peligros naturales principales en los abanicos aluviales son las inundaciones y los flujos detríticos generados mayormente por eventos de lluvia intensa y prolongada. Las inundaciones en los abanicos aluviales, por lo general, ocurren con poco o ningún aviso; se mueven a gran velocidad y tienen una gran capacidad de transportar sedimento. Las inundaciones repentinas y los flujos

detríticos en los abanicos aluviales, por lo general, son llanos, pero pueden ocurrir súbitamente (sin tiempo para emitir avisos), moverse a gran velocidad, y transportar enormes cantidades de sedimentos y detritos.

Las inundaciones en abanicos aluviales comienzan normalmente en el ápice hidrográfico, que es el punto más alto donde el flujo puede confinarse por los valles de montañas, y luego se extiende como inundación de gran amplitud (aunque no necesariamente profunda), flujos detríticos o múltiples canales. Estas inundaciones se caracterizan por la energía que poseen, suficiente para transportar sedimento grueso incluso en áreas llanas. El depósito abrupto de sedimento o detritos durante una inundación puede alterar sustancialmente las condiciones hidráulicas y crear nuevos canales de flujo con direcciones inciertas. La incertidumbre ante el riesgo de deslizamientos puede ser mayor por la deposición de sedimentos en un canal de un abanico aluvial, lo cual conduciría a la rápida inundación de un canal que se considere muy grande como para inundarse. Esta incertidumbre es lo que hace que los eventos de flujos detríticos e inundaciones en abanicos aluviales sean extremadamente peligrosos (USGS, 2002).

2.5.- Velocidad del movimiento.

La velocidad con que se mueven los deslizamientos varía mucho dependiendo del tipo de movimiento (caídos, deslizamientos o flujos), así como de la inclinación del terreno y de la cantidad de agua. Los caídos de bloques y los flujos pueden alcanzar grandes velocidades. Sin embargo, los flujos son más importantes ya que generalmente involucran una gran cantidad de material el

cual cubre áreas extensas. Los flujos están formados por grandes volúmenes de agua, así como también de distintos materiales térreos. Mientras más agua tiene, mayor será su velocidad. De la misma manera, mientras más inclinada es la ladera, mayor será la movilidad de los materiales inestables. Es necesario conocer la velocidad de los movimientos porque esto nos permite saber cuál es el posible impacto en las zonas habitadas o donde exista alguna obra de infraestructura.

Para identificar el grado de peligro de un problema de inestabilidad de laderas, debemos partir del hecho que mientras mayor sea la velocidad del movimiento, mayor será su potencial destructivo (Tabla 2.1) (CENAPRED, 2001).

Velocidad	Descripción de la velocidad.	Naturaleza del impacto
> 5m/s	Extremadamente rápido	Catástrofe de gran violencia
3m/min - 5m/s	Muy rápido	Perdidas de algunas vidas, gran destrucción.
1.8 m/hora - 3m/min	Rápido	Posible escape y evacuación, estructuras, posesiones y equipos destruidos.
13 m/mes - 1.8 m/hora	Moderado	Estructuras poco sensibles pueden sobrevivir.
1.6 m/año - 13 m/mes	Lento	Carreteras y estructuras poco sensibles pueden sobrevivir a través de trabajo de mantenimiento constante
16 mm/año - 1.6 m/año	Muy lento	Algunas estructuras permanentes no son dañadas y sufren agrietamiento por el movimiento, pueden ser reparadas.
< 16 mm/año	Extremadamente lento	No hay daño a las estructuras construidas con criterios de ingeniería formales.

Tabla 2.1.- Escala de velocidades de los movimientos de ladera (Suárez, 2001).

2.6.- Movimientos post-falla.

Los movimientos post-falla son movimientos en los cuales la energía inicial es máxima y va disminuyendo progresivamente. La energía del movimiento se disipa con el rompimiento, remoldeo o desaceleración por fricción del movimiento inicial. En el caso de un material perfectamente elastoplástico o dúctil, la energía potencial se disipa por fricción. La energía tiene tres componentes principales:

a. Energía Potencial

La cual se determina por las características geométricas y de localización del talud en el momento de la falla. Es importante determinar el valor de la energía potencial al final de la falla y su evolución posterior para poder predecir el comportamiento del movimiento. Esta energía potencial se convierte en energía cinética a medida que se produce aceleración del movimiento y esta energía cinética se disipa a otros tipos de energías al disminuirse la velocidad.

b. Energía Friccionante

Depende del comportamiento esfuerzo - deformación del suelo. En la práctica la energía de fricción es difícil de evaluar debido a que se disipa no solamente a lo largo de una superficie de falla definida, sino a lo largo de una gran cantidad de superficies dentro de la masa deslizada.

c. Energía de Remoldeo o Desmoronamiento

En suelos residuales no saturados y en rocas la energía de remoldeo disipa buena parte de la energía potencial o cinética; sin embargo, en la literatura existe muy poca documentación sobre el tema. Se conoce que los flujos de roca y detritos alcanzan distancias superiores cuando no se desmoronan y frenan rápidamente en el caso de desmoronamiento. En el caso de arcillas, la energía de remoldeo puede considerarse proporcional a la resistencia al corte no drenado y al índice de plasticidad de la arcilla. Entre menos resistente el material, la energía de remoldeo es menor y por lo tanto, la disipación de energía cinética se produce a una velocidad menor aumentándose la longitud de recorrido del movimiento. En suelos no cohesivos la energía de remoldeo es muy pequeña pero la energía de fricción posee valores mucho más altos.

2.7.- Longitud de recorrido del movimiento.

Cuando la energía potencial de la falla se transforma en energía cinética en un porcentaje importante, la distancia de recorrido puede adquirir una dimensión relativamente grande. Se han obtenido relaciones entre el volumen de la masa fallada y la longitud de recorrido para avalanchas en roca y flujos de arcilla pudiéndose realizar las siguientes observaciones:

- La relación entre el volumen de falla y la distancia de recorrido depende del nivel de humedad o saturación de los materiales.
- La distancia de recorrido generalmente, aumenta con el volumen de la masa fallada.
- La energía y la longitud de recorrido aumenta con la altura del deslizamiento.

- La relación $\log(\text{longitud}) - \log(\text{volumen})$ es esencialmente lineal y con los datos limitados que existen se ha propuesto una pendiente de 0.16 entre los dos valores (Suárez, 2001).

Debe tenerse en cuenta que una vez ocurrida la falla, el movimiento posterior es de tal característica que no se aplican los principios de la mecánica de suelos o rocas y el comportamiento se describe mejor en términos de conceptos de mecánicas de fluidos integrados en un modelo viscoplástico, como el desarrollado para flujos rápidos y avalanchas por Hungr (1995).

El elemento energía debe también tenerse en cuenta. La energía producida por un evento sísmico puede generar energías cinéticas superiores a las de un evento estático (Suárez, 2001).

2.8.- Evolución o proceso de falla.

La ocurrencia de una falla obedece a un proceso, el cual comprende una gran cantidad de factores que incluyen:

1.- Condiciones originales del talud (Susceptibilidad a los deslizamientos)

La topografía, geología y características de los materiales y perfiles, condiciones ambientales generales, cobertura vegetal, etc. Estas condiciones determinan una susceptibilidad al deterioro, a la acción de los factores detonantes y al fallamiento.

2.- Factores de deterioro (Modificación lenta de las condiciones originales)

El resultado es una disminución en la resistencia al cortante del material.

1. Falla progresiva por expansión o fisuración, deformación al cortante, inclinación, desmoronamiento, etc.
2. Descomposición por desecación, reducción de la cohesión, lavado y remoción de los cementantes, disolución, etc.
3. Erosión interna.

3. Factores detonantes (Activación del movimiento)

El resultado de los factores detonantes es un aumento en los esfuerzos de cortante. Estos esfuerzos aumentan a lo largo de la superficie de falla hasta que ocurre el movimiento. En el fenómeno de detonación actúan una serie compleja de procesos los cuales en ocasiones, se traslapan con los factores de deterioro:

a. Procesos Geomorfológicos y físicos

- La tectónica y Geotectónica, producen esfuerzos e inducen deformaciones, las cuales son muy difíciles de evaluar o medir.
- La erosión, genera cambios topográficos que inducen esfuerzos en el talud.
- La sedimentación.
- La lluvia, la cual produce modificaciones en la humedad y presión de poro afectando la resistencia del suelo.

- Las inundaciones, al producir saturación repentina, presiones de poro y erosión.
- Los sismos, los cuales pueden producir fracturación, remoldeo, aumento de presión de poro y consiguiente, disminución en la resistencia del suelo, licuación y generación de fuerzas de tipo dinámico sobre las masas de talud.
- Las erupciones volcánicas, las cuales además del efecto vibratorio, generan cambios en temperatura y la disposición de materiales sobre el talud.
- La expansión de los suelos, etc.

b. Procesos antrópicos

- Las excavaciones o cortes que modifican la topografía original del terreno.
- Las excavaciones subterráneas (túneles), las cuales afectan la estructura y condiciones de esfuerzos del suelo encima de ellos.
- Los rellenos o depósitos de materiales sobre el talud, disposición de residuos, etc.
- La irrigación que facilita la infiltración y los cambios de humedad y presión de poros.
- Las fugas de agua de las redes de servicios.
- El mantenimiento inadecuado de sistemas de drenaje y subdrenaje.
- La deforestación que produce cambios hidrológicos y afecta la resistencia del suelo, al eliminar el refuerzo de las raíces.

- Las vibraciones artificiales, tránsito de vehículos, vibraciones de maquinaria, detonaciones de explosivos, etc., las cuales generan fuerzas dinámicas y deterioro de la estructura de los materiales.
- La disminución repentina del nivel de agua como en el caso del desembalse de una presa (Suárez, 2001).

2.9.- Reología de flujos de detritos.

El tema de los flujos densos ha sido analizado desde diferentes disciplinas, entre las que se destacan, la geología y la hidráulica. Aún dentro de cada una de ellas existe un amplio espectro de enfoques y definiciones, muchas veces contrapuestos (Mainali, 1994).

En términos generales, se aprecia que los enfoques de las dos especialidades mencionadas para el tratamiento de los procesos de transporte por flujos densos y de sus productos han seguido caminos paralelos, encontrándose muy escasos puntos de convergencia. Los motivos de ello quizá puedan deberse a que los geólogos hacen hincapié en los productos (sedimentos, depósitos) a los que conducen estos procesos, mientras que los ingenieros prestan mucha mayor atención a las cuestiones hidrológicas y reológicas, es decir al funcionamiento de estos mecanismos de transporte en masa (Spalletti et al., 2002).

También desde la hidráulica los flujos de barro y de detritos han sido estudiados por un gran número de autores, y desde diferentes puntos de vista: observaciones de campo, características del flujo, comportamiento de los materiales, composición, etc. A pesar de ello, no hay todavía un acuerdo en la

bibliografía específica del tema en lo que hace a una clasificación única y aceptada de este tipo de eventos. Resulta destacable además que diferentes términos pueden ser usados para describir el mismo fenómeno, dependiendo de la formación científica de los autores (Coussot, 1996).

Este universo de definiciones, interpretaciones y caracterizaciones de los flujos densos, hace dificultosa la tarea de adoptar definiciones, sin tomar partido por alguna de las escuelas o de algún autor (Brea y Spalletti, 2003).

- *La reología vista desde el aspecto hidráulico*

Teniendo en cuenta, que en situaciones normales de flujos cargados de sedimentos, estos son transportados por el flujo, teniendo poca influencia en el comportamiento del mismo. En otras situaciones, la presencia de muy grandes cantidades de partículas de sedimentos es de tal magnitud que influye notablemente en la mezcla, cambiando las propiedades del fluido y del comportamiento del flujo. A los flujos de estas características se les denomina flujos hiperconcentrados (figura 2.6). (Wan, Wang, 1994).



Figura 2.6.- Aspecto de un flujo hiperconcentrado, donde se aprecia la consistencia que presenta este tipo de flujos (www. Wikipedia.com).

En el marco de los flujos hiperconcentrados de sedimentos, los flujos densos pueden clasificarse en tres tipos: inundaciones o crecidas de barro, flujos de barro y flujos de detritos (Julien y Leon, 2000). Se diferencian entre sí en los procesos físicos involucrados en cada uno de ellos, que son función de la reología de la mezcla agua-sedimento. El volumen y las propiedades de la matriz del fluido (mezcla agua-sedimento) gobiernan la hidráulica del flujo, su desplazamiento y la deposición de los sedimentos. Las propiedades dependen de la concentración de sedimentos, de la distribución granulométrica y del contenido de arcillas (Brea et al, 2004).

Las inundaciones o crecidas de barro son típicamente hiperconcentraciones de partículas no cohesivas, que presentan un comportamiento muy fluido para un rango de concentraciones de sedimento en volumen (C_v) de hasta un 40 %. Los flujos de barro, por su parte, se caracterizan por una concentración de limos y

arcillas, lo suficientemente alta como para cambiar las propiedades de la matriz del fluido, favoreciendo el transporte de grandes tamaños de material. De este modo, los flujos de barro se comportan como una masa fluida muy viscosa, que a altas concentraciones es capaz de transportar en superficie piedras de gran tamaño. La concentración de sedimentos en volumen (C_v) de la matriz del fluido en flujos de barro, está en un rango entre el 45 y el 55 %. Los flujos de barro presentan altas viscosidades y esfuerzos de cedencia, pudiendo viajar grandes distancias en pendientes moderadas a bajas velocidades, para depositarse en forma lobular en los abanicos aluviales (Brea y Spalletti, 2003).

Dentro de los flujos hiperconcentrados de sedimentos, el comportamiento reológico involucra la interacción de diversos y complejos procesos físicos. Las partículas sólidas pueden chocar, rozar, rotar y vibrar en el desarrollo del movimiento.

Los cuatro elementos clave en el intercambio de momento de un flujo hiperconcentrado de sedimentos son: la viscosidad de la matriz de fluido, la turbulencia, la fricción entre partículas y la colisión entre las mismas. La cohesión entre las partículas finas de sedimentos controla el comportamiento no newtoniano de la matriz de fluido. Esta cohesión contribuye al esfuerzo de cedencia, que debe ser excedido por una tensión aplicada para iniciar el movimiento del fluido (Brea et al, 2004).

Para grandes tasas de corte, como puede ocurrir en abanicos aluviales empinados, pueden generarse esfuerzos turbulentos. Una componente adicional del esfuerzo de corte, la dispersiva, aparece en flujos turbulentos por la colisión de las partículas de sedimento bajo grandes tasas de deformación. Los esfuerzos dispersivos altos ocurren cuando las partículas más grandes de sedimento

dominan el flujo y el porcentaje de partículas cohesivas es pequeño. A muy altas concentraciones de sedimentos finos, el impacto turbulento y dispersivo entre partículas es suprimido, y el flujo se aproximará a uno laminar. La concentración de sedimentos puede variar drásticamente en un mismo evento de crecida, alternándose el dominio de las tensiones viscosas y turbulentas, produciendo flujos pulsantes (Spalletti et al., 2002).

Los flujos de detritos se componen de una mezcla de materiales clásticos, incluyendo grandes piedras, troncos, etc. Donde la colisión lubricada entre las partículas es el mecanismo dominante de disipación de energía.

Además de la definición de cada uno de los tres tipos de flujos densos presentada, que resulta función del mecanismo preponderante de disipación de la energía en el traslado de los mismos, existen descripciones basadas en otras características. En opinión de Brea y Spalletti (2002), las definiciones presentadas permiten comprender el fenómeno de los flujos densos, y su análisis a partir de su comportamiento reológico (Brea et al, 2004).

- *Consideraciones desde la geología*

Dentro de esta ciencia, las clasificaciones sobre movimientos de remoción en masa, reconocen los deslizamientos, los flujos (lentos o imperceptibles y rápidos o perceptibles) y la subsidencia, siendo importantes en este caso los dos primeros. La diferencia estriba en que mientras que en los deslizamientos no hay deformación interna en la masa que se desplaza, en los flujos sí la hay, tratándose de fluidos viscosos o plásticos. En lo que hace a los flujos el ordenamiento en tres términos, se hace fundamentalmente sobre la base del contenido de agua

involucrada en el desplazamiento, de modo tal que al aumentar la cantidad de agua se tendrá necesariamente que pasar desde un flujo en masa rápido a un flujo de carácter newtoniano, denominado de diversas maneras, todas válidas: flujo gravitacional de fluidos, flujo friccional, etc. (Brea y Spalletti, 2002).

Más modernamente a los flujos en masa se les denomina flujos gravitacionales de sedimentos, flujos de sedimentos inducidos por la gravedad, o simplemente flujos gravitacionales (Brea et al, 2004). En ellos la gravedad que actúa sobre las partículas sedimentarias es la que produce el desplazamiento del fluido. Algo similar dicen Lewis y McConchie (1994): los materiales se mueven debido a que la aceleración gravitacional actúa directamente sobre las partículas más que sobre el medio que las rodea, ellas finalmente se depositan cuando la componente que actúa pendiente abajo de dicha aceleración es menor que la resistencia friccional al movimiento. Pueden aparecer en cualquier ambiente sedimentario en el que existe una pendiente, una acumulación inestable de sedimentos y un mecanismo disparador.

En los ambientes subaéreos son los flujos densos o movimientos de remoción en masa rápidos más importantes, tanto por su frecuencia como por su poder destructivo. En la literatura geológica clásica el término más divulgado era el de flujo de barro (mud flow). Con el correr del tiempo, comenzó a tener mucho más difusión y aceptación, llamándole flujo de detrito (debris flow). Hoy en día existe cierta confusión, ya que para algunos autores ambos términos son sinónimos, para otros “casi” sinónimos y para otros, involucran a movimientos en masa singularmente diferentes (Brea et al, 2004).

La denominación “flujos de barro” está muy arraigada en la literatura geológica, representa a movimientos de masas de detritos que se originan en

canales preexistentes cuando se produce aporte súbito de aguas a una zona en la que hay materiales en exceso como para ser puestos en movimiento (Sharpe, 1960). Una de sus características es que son desplazamientos en los que la masa posee en material fango, el que aunque no necesariamente predominante dota a la masa de propiedades específicas y un comportamiento especial.

Friedman y Sanders (1978), indican que un flujo de detritos es más una masa plástica que un fluido Newtoniano y que se produce cuando hay una cantidad de sedimento suficiente como para que se incremente la viscosidad y densidad de la masa. Por su parte, Middleton y Southard (1984), destacan que en los flujos de detrito subaéreos la mezcla de agua y sedimento tiene propiedades que los aproximan a un plástico ideal. El rasgo más peculiar de estos flujos es la presencia de una matriz de grano fino que cumple dos funciones importantes:

- a) imparte una alta viscosidad a la masa, la que mantiene el flujo en condiciones laminares.
- b) la matriz tiene una elevada cohesión y suficiente resistencia para sostener a los clastos mayores en el flujo.

Clastos del tamaño de bloques pueden entonces ser transportados incluso por flujos que se desplazan en forma relativamente lenta. Estos clastos mayores no se concentran necesariamente cerca de la base del flujo e incluso ellos pueden aparecer como proyecciones que sobresalen de la matriz en el tope del flujo siempre que la fuerza de gravedad que actúa sobre ellos no supere la resistencia de la matriz presente entre los clastos.

Allen (1985), indica que el flujo de detrito es un desplazamiento gravitacional de lento a rápido de material detrítico mezclado con una cantidad igual o subordinada de agua, sobre una pendiente moderada a baja. La mayoría de los flujos de detritos se caracterizan por ser elongados y angostos en planta, pero que cambian a mantos con geometría de lóbulo cuando circulan por áreas no canalizadas.

Para McLane (1995), flujo de detrito y flujo de barro son sinónimos que definen a un movimiento pendiente abajo de materiales lubricados por agua intergranular. Para Friedman y Sanders (1978), flujo de detrito y flujo de barro son “casi” sinónimos, señalando que un flujo de barro es un flujo de detritos en el que el fango es dominante; contiene más de 25 % de partículas arcillosas, y uno de los rasgos que lo distinguen es su capacidad para transportar grandes bloques, gracias a la alta densidad efectiva de la mezcla de agua y fango.

Para Lewis y McConchie (1994), el flujo de detritos es un tipo de flujo gravitacional de sedimentos que puede tener mecanismos de soporte de granos múltiples y en los cuales hay gradaciones a otros tipos de flujos gravitacionales. La mayoría contienen agua intersticial cuando se desplazan, pero otros pueden incluso tener aire. Lo importante es que la mayoría de los flujos de detritos poseen una fase continua y una fase dispersa. La fase continua es normalmente agua con arcillas y posiblemente otros componentes sedimentarios que se comporta como un plástico de baja viscosidad antes que como un fluido como el agua. Esta fase continua es la que soporta a la otra fase dispersa compuesta por individuos mayores que pueden ir desde arenas hasta gravas con bloques, en las que pueden aparecer clastos de gran tamaño, desde decenas a centenares de metros de longitud (Brea et al, 2004).

CAPÍTULO 3.

METODOLOGÍA.

La metodología es una sucesión de pasos que toman en cuenta todos los aspectos que intervienen en la realización de un trabajo de investigación hasta su terminación. Para la caracterización de los materiales involucrados en el flujo de detritos de la localidad de Minatitlán en el Estado de Colima, fue necesario estudiar la geología, la morfología del lugar, realizar estudios geotécnicos y conocer la composición mineralógica de los materiales.

Para la determinación de las propiedades geotécnicas, fue necesario primeramente la obtención de muestras del depósito del flujo, para posteriormente aplicarles las pruebas de laboratorio correspondientes. Las pruebas de mecánica de suelos utilizadas para la caracterización fueron: granulometrías, límites de consistencia (límite líquido y límite plástico), clasificación de suelos de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, peso específico relativo, corte directo para la obtención de la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo, y con la ayuda de la prueba de consolidación, se determinó el coeficiente de permeabilidad. La caracterización mineralógica del depósito se realizó por medio de estudios de Difracción de Rayos X y Microscopia Electrónica de Barrido.

Además, de lo anterior fue necesario realizar una búsqueda bibliográfica extensa y detallada, para lograr una mejor comprensión del problema y que nos sirviera como base teórica para la presente investigación. En la Figura 3.1 se muestra en forma esquemática la metodología empleada para esta investigación.

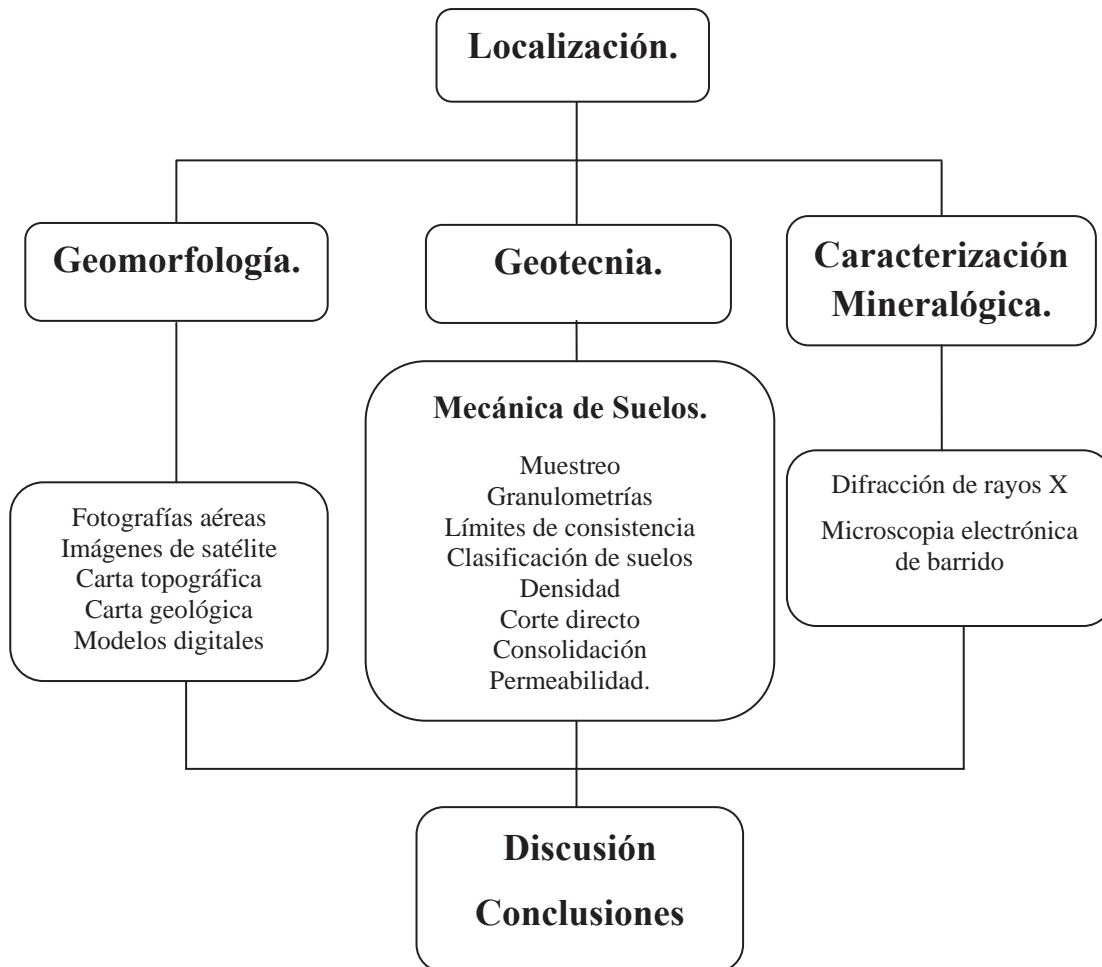


Figura 3.1.- Metodología de investigación empleada en la caracterización del depósito del flujo de detritos.

3.1.- Geomorfología.

La geología fue obtenida de un estudio realizado por Corona-Esquivel et al, (2000), en donde se muestra un perfil de la secuencia estratigráfica de la ladera del cerro los copales y también se presenta la sección de estudio de la carta

geológica de INEGI (E13B33). Para el estudio morfológico se utilizaron imágenes de satélite, fotografías aéreas y la información proporcionada por el propio INEGI (carta topográfica digital), con lo cual se pudo delimitar y calcular el área del flujo de detritos y del circo de erosión. Se realizaron modelos digitales de elevaciones, modelos sombreados y mapas de pendientes en el sistema de información geográfica Ilwis 30.

3.2.- Geotecnia

3.2.1.- Muestreo.

El muestreo consiste en la obtención de porciones representativas del material que se quiere analizar. En este caso la toma de muestras se realizó primeramente seleccionando los lugares de muestreo, para lo cual se delimitó el área que fue afectada por el flujo de detritos, con ayuda de las imágenes que se tenían del desastre y se tomó la decisión de muestrear al inicio y en la parte intermedia del depósito del flujo, como se muestra en la Figura 3.2. Una vez seleccionados los lugares de muestreo, se realizó una excavación con una profundidad aproximada de 50 cm, con un diámetro de unos 80 cm; enseguida se tomó la muestra representativa para la realización de las pruebas de laboratorio, llenando bolsas de plástico con el material y sellándolas para la conservación de su humedad natural. Las muestras fueron aproximadamente de 3 kg, lo cual se consideró suficiente para la realización de todas las pruebas que se pretendían hacer.

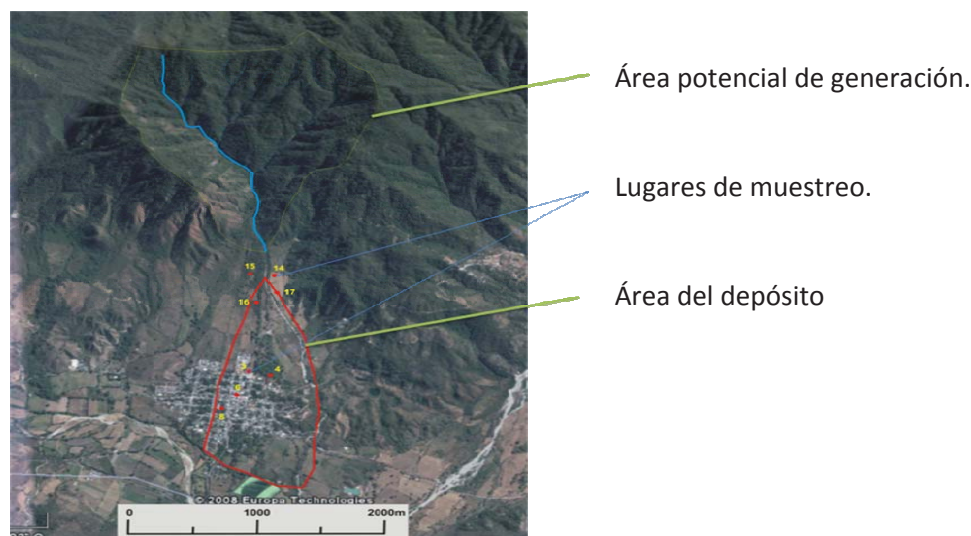


Figura 3.2.- Sitios de toma de muestras.

3.2.2.- Distribución granulométrica

Las características físicas y propiedades mecánicas de un suelo granular dependen principalmente de la distribución del tamaño de sus partículas, lo que permite su clasificación, representada usualmente con la curva de gradación o distribución de tamaños de las partículas. Los análisis granulométricos se realizaron por medio de cribado en malla para partículas superiores a 0.074 mm y la granulometría por medio del analizador de tamaño de partícula Coulter LS 100Q para tamaños iguales o inferiores a 0.074 mm, el cual tiene un rango de medición de 0.1 a 900 micras. El análisis de las muestras se hizo en estado seco. En la Figura 3.3, se muestran imágenes de los equipos empleados para la realización de la granulometría.



Figura 3.3.- A la izquierda se muestra un conjunto de mallas para la determinación de granulometría de la parte gruesa de la muestra. A la derecha se muestra una imagen del analizador de tamaño de partícula Coulter LS 100Q, que se utilizó para la determinación de la granulometría de la parte fina.

La clasificación para los grupos granulométricos a emplear para la distribución de porcentaje de tamaño de partícula, son aquellos establecidos por el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), los cuales se describen a continuación:

- Grava.- material con tamaño de grano de 76.2 mm a 4.76 mm. En condiciones no saturadas, no retienen el agua por la inactividad de su superficie y los grandes espacios entre sus partículas.
- Arena.- son partículas con diámetros comprendidos entre 4.76 mm y 0.074 mm. Cuando estas son mezcladas con agua, no se forman agregados continuos, sino que las partículas sólidas se separan entre sí con facilidad.
- Limo.- Partículas de diámetros entre 0.074 mm a 0.002 mm de diámetro. Retiene el agua mejor que los tamaños anteriores.
- Arcilla.- Son partículas con tamaños menores a los limos (<0.002 mm). Están formados principalmente por minerales silicatos aluminosos que les permiten

una elevada capacidad de retención de agua, por lo que son generalmente los materiales más problemáticos.

Gradación

La forma de la curva de gradación refleja la variación de los tamaños de las partículas en el material. Si un suelo contiene proporciones aproximadamente iguales de todos los tamaños, se describe como bien graduado, y se caracteriza por tener una curva relativamente suave que cubre un amplio rango de tamaños. Por lo contrario un suelo mal graduado, presenta una alta porción de partículas comprendidas en una banda de tamaños estrecha, la curva se caracteriza por tener una parte casi vertical, o bien el suelo contiene partículas pequeñas y grandes pero con ausencia de partículas intermedias.

3.2.3.- Coeficientes granulométricos

Debido a que cada persona puede interpretar de diferentes formas una misma curva de gradación, existen coeficientes, que nos ayudan para la correcta clasificación de un suelo en base a su distribución granulométrica.

Coefficiente de uniformidad.- Es la relación que existe entre el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa el 60% del material y el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa el 10%.

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

Si $C_u < 5$ = El suelo tiene una granulometría uniforme.

Si $5 < C_u < 20$ = el suelo es poco uniforme.

Si $C_u > 20$ = Suelo bien graduado.

Cuanto más uniforme es la granulometría de un suelo, más uniforme es el tamaño de sus huecos, menores densidades alcanzará, más fácilmente será erosionado, etc.

Coefficiente de curvatura.- Está definido como la relación entre el cuadrado del diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa el 30% y el producto de los diámetros correspondientes al tamiz por el que pasa el 10% y el 60% respectivamente:

$$C_c = D_{30}^2 / (D_{10} * D_{60})$$

Si el C_c queda entre 1 y 3, la muestra se considera bien graduada.

Contenido de finos.- Es el porcentaje de suelo que pasa el tamiz # 200. Este porcentaje indica la proporción de limos y arcillas que contiene la muestra de suelo analizado, y está relacionado con la posibilidad de retención de agua. Cuanto mayor sea el contenido de finos, mayor será la dificultad de expulsión de agua bajo esfuerzos.

3.2.4.- Límites de consistencia

La plasticidad es la propiedad que presentan los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin fracturarse. Por medio de ella se puede inferir en el

comportamiento de los suelos, y se utilizan principalmente para la identificación y clasificación de los suelos. Las arcillas presentan esta propiedad en grado variable. Para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de consistencia. Para su realización, se siguió lo escrito en la norma M-MMP-1-07/03 de la SCT. Los límites de consistencia se pueden definir como siguen:

- **Límite líquido**

Se define como el contenido de humedad expresado en porciento con respecto al peso de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico, y es cuando el suelo adquiere una resistencia al corte de 25 g/cm^2 . Se determina pasando una muestra de suelo por la malla No. 40 y agregándole agua a dicha muestra, se revuelve hasta obtener una mezcla uniforme, se coloca un poco de mezcla con una espátula en la copa de Casa grande de aproximadamente 1 cm de espesor y se le realiza una abertura con un ranurador. Una vez hecha la ranura se prosigue a accionar la copa a razón de dos golpes por segundo, hasta que se cierre la ranura. Se repite lo anterior para varios contenidos de humedad y se grafican los resultados, el límite líquido se toma como el contenido de humedad correspondiente a 25 golpes, las graficas se muestran en el anexo 2.

- **Límite plástico**

Se define como el contenido de humedad expresado en porciento con respecto al peso seco de la muestra, secada al horno, con el cual el suelo cambia del estado plástico al semisólido. Se determina realizando un rodillito de mezcla de suelo que al alcanzar los 3mm de diámetro se rompe, y por consiguiente se determina el contenido de humedad para el cual se rompen los rodillos en dicho diámetro. Los suelos que no pueden rodillarse con ningún contenido de humedad

se consideran como no plásticos, y en este caso el índice plástico se dice que es igual a cero. La muestra de suelo que se use para esta prueba deberá de ser pasada primeramente por la malla No. 40.

- **Índice plástico**

El índice plástico se calcula como la diferencia que existe entre el límite líquido y el límite plástico.

3.2.5.- Clasificación del suelo

Dada la gran variedad de suelos que se presentan en la naturaleza, la Mecánica de Suelos ha desarrollado métodos de clasificación de los mismos. Para conocer el tipo de suelo que se presenta en la zona de estudio, se llevó a cabo la clasificación de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). El sistema divide a los suelos en dos grandes fracciones: la gruesa, formada por partículas mayores que la malla No. 200 (0.074 mm) y menores que la malla de 3” (7.62 cm) y la fina formada por las partículas que pasan la malla No. 200. A sí un suelo se considera grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en la malla No. 200, y fino si mas del 50% de sus partículas son menores a dicha malla. (Crespo, 2000)

Suelos de partículas gruesas.- En los suelos gruesos se tienen las gravas (G) y las arenas (S), las cuales se separan por medio de la malla No. 4, de tal modo que un suelo pertenece al grupo de las gravas si más del 50% de su fracción gruesa

(retenido en la malla 200) no pasa la malla No. 4, y pertenece al grupo de las arenas en caso contrario.

Suelos finos.- La clasificación de los materiales considerados como suelos finos en los que entran los limos y las arcillas, se realiza mediante pruebas índices, las cuales permiten estimar algunas de las propiedades físicas y mecánicas del material.

3.2.6.- Densidad de sólidos

La densidad de sólidos o peso específico relativo de un suelo se determinó según la metodología descrita por la norma M-MMP-1-07/03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la cual nos permite conocer la relación masa-volumen. La densidad de sólidos es la relación del peso de un volumen determinado de partículas de la muestra del suelo, al peso de un volumen igual al agua destilada a temperatura de 4 °C.

3.2.7.- Corte directo

El ensayo de corte directo consiste en hacer deslizar una porción de suelo, respecto a otra a lo largo de un plano de falla predeterminado mediante la acción de una fuerza de corte horizontal incrementada, mientras se aplica una carga normal al plano del movimiento. La finalidad de los ensayos de corte, es determinar los parámetros de resistencia, cohesión (c), y ángulo de fricción interno (ϕ). Para conocer estos parámetros de resistencias en laboratorio se uso el

aparato de corte directo, en una caja de sección circular dividida horizontalmente en dos mitades. Dentro de ella se colocó la muestra de suelo con piedras porosas en ambos extremos, se aplicó una carga vertical normal (P_v) y luego una carga horizontal de corte (P_h) creciente, que originó el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra (Figura 3.4).

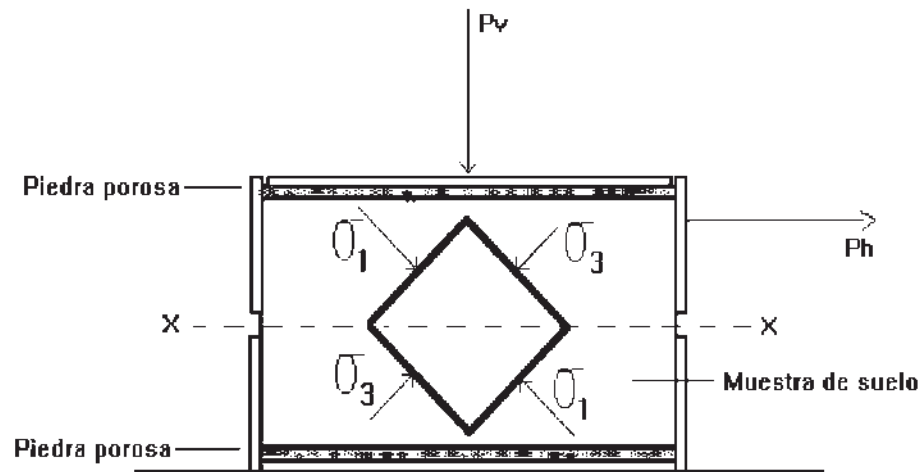


Figura 3.4.- Esquemización de la prueba de corte directo.

El ensayo induce la falla a través de un plano determinado. Sobre este plano de falla actúan dos esfuerzos:

- un esfuerzo normal (σ_n), aplicado externamente debido a la carga vertical (P_v).
- un esfuerzo cortante (τ), debido a la aplicación de la carga horizontal.

Estos esfuerzos se calculan dividiendo las respectivas fuerzas por el área (A) de la muestra o de la caja de corte debiendo satisfacer la ecuación de Coulomb:

$$\tau = c + \sigma_n * \text{Tg}(\varphi)$$

Según esta ecuación la resistencia al corte depende de la cohesión (c) y la fricción interna del suelo (ϕ). Al aplicar la fuerza horizontal, se van midiendo las deformaciones y con estos valores es posible graficar el esfuerzo de corte (τ), en función de la deformación (ϵ) en el plano de esta tensión de corte. De la gráfica es posible tomar el punto máximo del esfuerzo de corte como la resistencia al corte del suelo. Los valores de τ se llevan a un gráfico en función del esfuerzo normal (σ_n), obteniendo la recta intrínseca (Figura 3.5), donde τ va como ordenada y σ_n como abscisa. El ángulo que forma esta recta con el eje horizontal es el ángulo de fricción interna ϕ y el intercepto con el eje τ , la cohesión c .

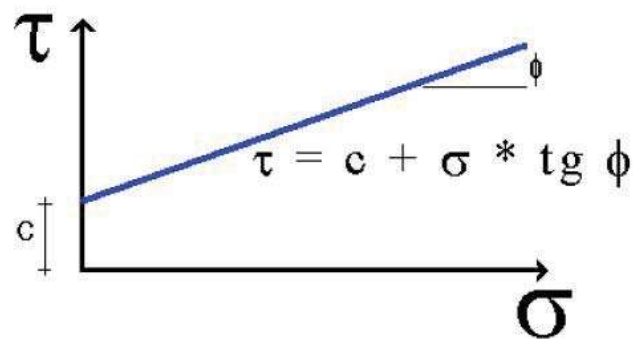


Figura 3.5.- Gráfica ilustrativa de la envolvente de falla.

La realización de las pruebas de corte directo se llevó a cabo según lo descrito en la norma española UNE 103401, para ensayos del tipo consolidado-drenado. El ensayo se hizo para tres probetas de cada muestra de suelo, sometida cada una de ellas a un esfuerzo normal diferente. En la Figura 3.6, muestra el equipo de corte directo utilizado para la realización de las pruebas. En la tabla 3.1, se muestran algunos valores típicos del ángulo de fricción interno para arenas.



Figura 3.6.- Equipo de corte directo.

Tipo de arena	Suelta	Compacta
Uniforme con partículas redondeadas	27°	35°
Bien graduada con partículas angulosas	33°	45°

Tabla 3.1.- Valores típicos del ángulo de fricción interno para arenas (Márquez, 2006).

3.2.8.- Coeficiente de Permeabilidad

El flujo de agua a través de medios porosos, está gobernado por la ley de Darcy para suelos de grano fino. El valor del coeficiente de permeabilidad, nos indica la mayor o menor facilidad con que el agua fluye a través del suelo. Para la determinación del coeficiente de permeabilidad se aplicaron dos métodos indirectos, uno a partir de los datos de la etapa de consolidación que se lleva a

cabo en la prueba de corte directo según lo descrito por Badillo (2000), y el otro calculado con los datos de las granulometrías con la ecuación siguiente propuesta por Moulton (1980). En la tabla 3.2, se muestran algunos valores orientativos del coeficiente de permeabilidad, para diferentes tipos de suelo.

$$k = \frac{6.214 \times 10^5 (D_{10})^{1.478} (n)^{6.654}}{(P_{200})^{0.597}} \quad (\text{ft/día})$$

Donde: D_{10} = Diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa el 10%.
 n = Porosidad
 P_{200} = Material que pasa la malla 200

Fórmula para calcular el coeficiente de permeabilidad por medio de la granulometría.

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava media a gruesa	$> 10^{-1}$
Arena gruesa a fina	10^{-1} a 10^{-3}
Arena fina, arena limosa	10^{-3} a 10^{-5}
Limo, limo arcilloso, arcilla limosa	10^{-4} a 10^{-6}
Arcillas	$< 10^{-7}$

Tabla 3.2.- Valores del coeficiente de permeabilidad para diferentes tipos de suelo (Márquez, 2006).

3.3.- Caracterización mineralógica

Para realizar la caracterización mineralógica de la matriz del flujo de detritos y conocer el tipo de arcilla que se presenta, se recurrió a la aplicación de las técnicas de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, como se explica a continuación:

3.3.1.- Difracción de rayos X

Para la difracción de rayos X se utilizó un difractómetro SIEMENS-5000 (Figura 3.7), utilizando $\text{Cu K}\alpha$, con una longitud de onda de 1.5406 \AA y trabajando a 25 KV, 25 mA con una velocidad de barrido de 0.6 seg.

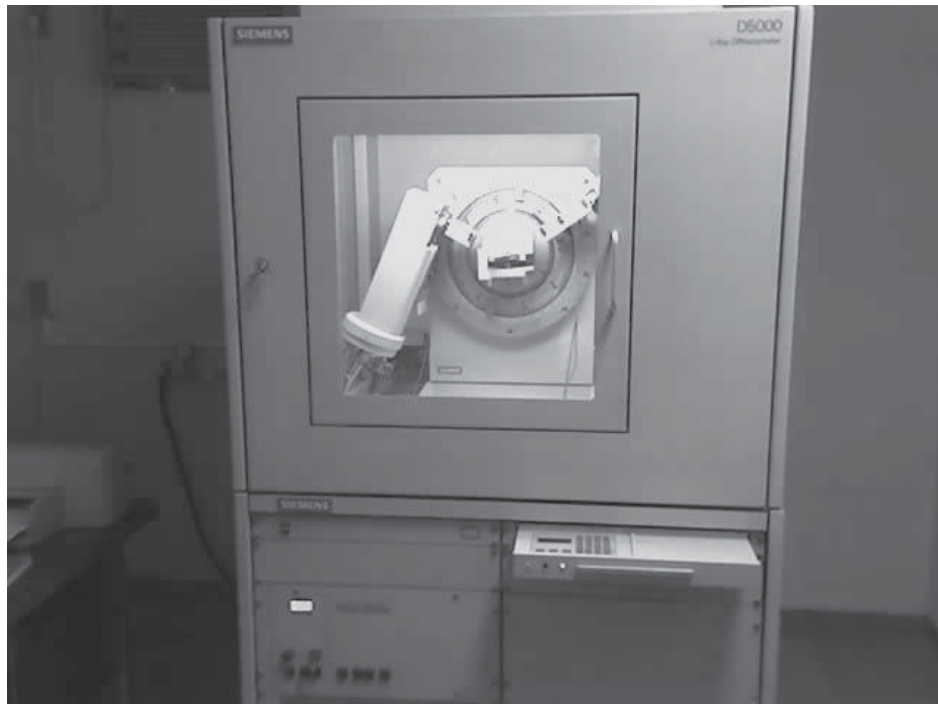


Figura 3.7.- Imagen del difractómetro SIEMENS-5000, del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas.

Las muestras analizadas fueron las mismas utilizadas para las demás pruebas geotécnicas, analizando un total de ocho especímenes. Para la preparación de la muestra se recurrió a cribar la parte del material fino obtenido de la prueba de granulometría, por la malla No. 400, para obtener una muestra de polvo de partículas menores a 40 micras, ya que el método utilizado para la difracción de rayos X fue el método de polvos, el cual nos permite analizar muestras de sustancias policristalinas (Ostroumov, 1999).

La identificación de las fases presentes se logró a través de la comparación del difractograma obtenido con la base de datos del programa MATCH, el cual es un software especializado para la identificación de fases de difractogramas.

3.3.2.- Microscopia electrónica de barrido

El análisis realizado por microscopia electrónica de barrido, nos ayudó en la determinación de la forma de las partículas menores a 74 micras, así como también en la observación de partículas de arcillas, lo cual corroboraría lo obtenido con el analizador de tamaño de partícula y difracción de rayos X.

El análisis consistió en la observación de granos de la parte fina de la matriz, con diámetros menores a 74 micras, provenientes del material que pasó la malla No. 200 del análisis granulométrico, los cuales fueron barridos en diferentes resoluciones, utilizando un Microscopio Electrónico JEOL 6400, dotado con un espectrómetro de energía dispersiva NORAN-EDS.

Una vez concluidos los estudios y pruebas antes mencionadas, podremos conocer mejor el problema al que se enfrenta el lugar de estudio, y así poder llegar a una mejor solución del mismo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1.- Localización

El Estado de Colima es el tercer estado más pequeño de México. Colinda con Jalisco al norte, Michoacán al este, y al occidente con el Océano Pacífico. Su superficie es de 5,455 km², con una línea de costa de 157 kilómetros. Minatitlán se localiza a 55 kilómetros de Colima; limita al sur con los municipios de Manzanillo y Coquimatlán; al oriente con Villa de Álvarez y Cómala; al poniente con el Estado de Jalisco. Se encuentra entre los paralelos 19° 23' latitud norte, y a 104° 03' de longitud oeste. Tiene una altura promedio de 740 metros sobre el nivel del mar, con una extensión territorial de 215 Kilómetros cuadrados (Figura.4.1).



Figura 4.1.- Localización de la zona en estudio.

- **Orografía**

Se ubica el municipio enclavado en la Sierra Madre Occidental, por lo que es montañoso, y se encuentra dividido por tres secciones orográficas definidas: la primera, al noroeste, está ubicada entre los Ríos Minatitlán y Ayutitlán, es una cordillera formada por los cerros el Chapulín, Chanquiahutl y El Prieto; la segunda, en la parte central del municipio, entre el Río Minatitlán y el Arroyo de San Palmar, formada por los cerros de Copales, Juanillos, Agua Fría y El Peón; y la tercera, al norte, se encuentra formada por el Cerro Grande.

- **Hidrografía**

El municipio se encuentra en la región hidrológica denominada "Costa de Jalisco", que se concreta a dos sistemas: uno es el Río Minatitlán de corriente perenne, que nace en la falda este del Cerro del Zapote, de donde parte hacia el sur para desembocar en el Océano Pacífico. Los principales afluentes del río son: Los Arroyos, Las Truchas, Los Cuates, El Gato, Copales, Las Pesadas y El Limoncito.

El otro sistema lo forma el arroyo del Cañón, que posteriormente se une al San Palmar para desembocar en el Río Armería (principal río del estado de Colima y que desemboca en el mar); ambas afluentes tienen su corriente de norte a sur en el municipio.

- **Clima**

En la mayor parte del municipio predomina el clima cálido subhúmedo, con lluvias en verano principalmente; registra una temperatura media anual de 23°C y una precipitación pluvial media de 1,674.5 milímetros anuales.

- **Principales Ecosistemas**

Flora

Dada la estructura orográfica del municipio, la vegetación es variada y boscosa, predominan en las partes bajas los arbustos y los matorrales. Actualmente se están aprovechando las zonas para plantíos de algunos frutos como: mango, guanábana y lima. En la parte alta existe higuera, zapotillo, otate pino, en el Cerro Grande abunda el encino.

Fauna

La fauna está formada por jaguar, onza puma, tigrillo, jabalí, coyote, mapache, tejón, zorra, armadillo, venado, conejo, ardilla e iguana.

- **Recursos Naturales**

Existe una mina, la cual en 1996 alcanzó un volumen de producción que ascendió a 3'096,389 toneladas de hierro.

- **Evolución Demográfica**

El total de población según el censo de 1995, asciende a 8,321, esto representa el 1.70% del total de la población estatal, y su densidad es de 38.77 habitantes por kilómetro cuadrado.

Se estimó que para el año 2000 la población sería de 8,780, y para los años 2005 y 2010, ascienda a 9,215 y 9,596 respectivamente (INEGI, 1998).

- **Vivienda**

De acuerdo a los datos del II Censo de Población y Vivienda del 2005 el municipio cuenta con 1,875 viviendas de las cuales 1,857 son particulares.

- **Vías de Comunicación**

La carretera federal Manzanillo-Minatitlán, que cruza al municipio de sur a norte, y la carretera Minatitlán-Villa de Álvarez-Colima representan las principales comunicaciones terrestres que enlazan a Minatitlán con Manzanillo y Colima. Con las demás localidades hay comunicación por medio de brechas y caminos rurales (INEGI, 1998).

4.2.-Geología

La localidad de Minatitlán está rodeada de montañas de composición compleja, donde se conjugan las rocas intrusivas del Cretácico Tardío-Terciario temprano, con un conjunto volcano-sedimentario marino que incluye andesitas, lutitas, calizas y conglomerados. El río ha formado un valle montañoso que aprovecha las zonas de debilidad (contactos litológicos, fracturas y fallas) (Corona-Esquivel, et al., 2002).

La población fue construida sobre un cono de depósito de flujos de detritos diferentes (Arreygue y Cortes, 2007). Dentro del área quedan expuestas rocas de origen sedimentario marino, volcanogénico marino y sedimentario continental del Cretácico Medio Tardío, que forma parte de la secuencia descrita en la región como formación Tepalcatepec (Pimentel, 1980). En el área de Minatitlán el espesor de esta unidad sedimentaria es de aproximadamente 600 m y la forman principalmente una alternancia de calizas, calizas arcillosas, limolitas, areniscas y conglomerados (Figura 4.2) (Corona y Alencaster, 1995). Además de las rocas de origen sedimentario, afloran profusamente intrusivos, cuya composición varía de diorita a sienita de Edad Maestrichtiano (Cretácico Tardío) al Paleoceno (Pantoja, 1983). En la figura 4.3, se muestra la parte de la zona de estudio de la carta geológica del INEGI.

La estructura geológica es de rocas plegadas y en bloques levantados y basculados por los cuerpos intrusivos. Estos constituyen las dos sierras principales que limitan el valle de Minatitlán. El patrón principal de fracturas y fallas es NE y otro secundario es NW (Corona-Esquivel et al., 2002).

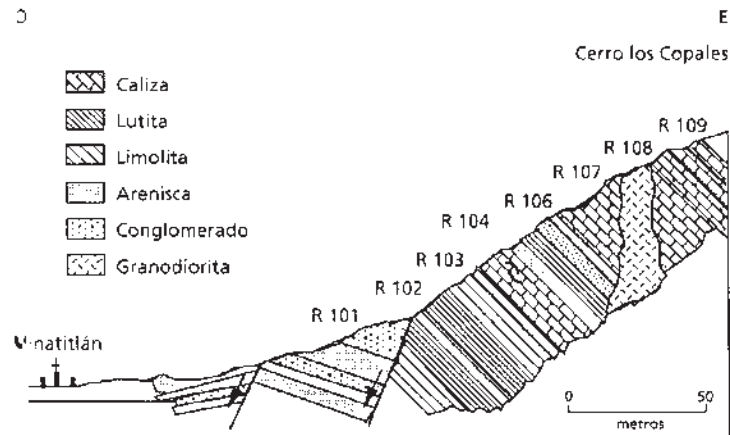


Figura 4.2.- Esquematación de la secuencia estratigráfica de la ladera occidental del cerro los Copales, al SE de Minatitlán. (Corona y Alencaster, 1995).

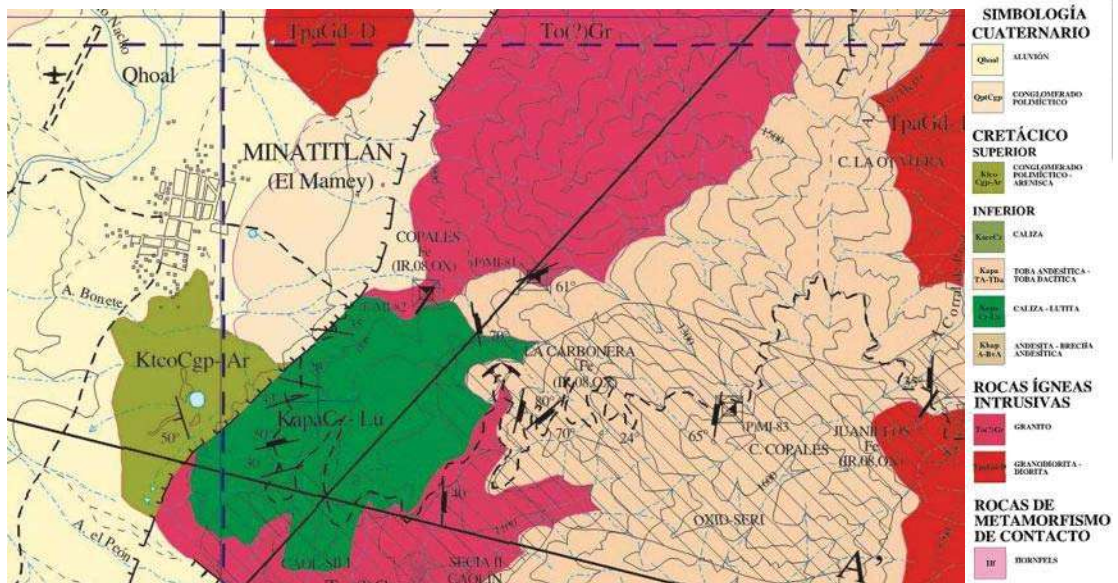


Figura 4.3.- Parte de la carta geológica de la localidad de Minatitlán, Colima: E13B33 (INEGI, 2002).

4.3.- Geomorfología

Minatitlán se localiza en la parte baja de una depresión, sobre un abanico aluvial, en una región de tectónica activa, lo que se reconoce en las erupciones frecuentes del volcán de Colima y en las montañas con estructuras en bloque. Estas características condicionan una vigorosa erosión que se manifiesta en una densa red fluvial, en circos de erosión, valles montañosos profundos y otros rasgos (Figura 4.4) (Corona-Esquivel et al., 2002).

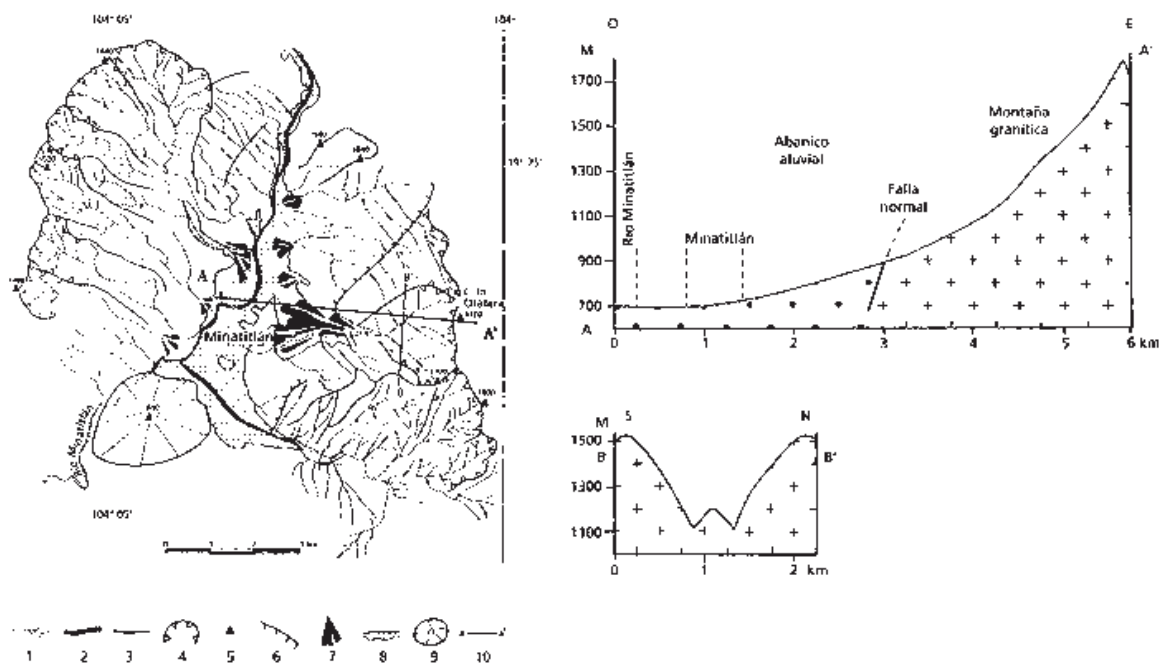


Figura 4.4.- Interpretación geomorfológica: 1 arroyos; 2 río principal; 3 línea divisoria de aguas; 4 circos de erosión; 5 cimas; 6 falla normal; 7 abanicos aluviales; 8 planicie de inundación (aluvial); 9 domo riolítico; 10 líneas de perfil (A-A' y B-B') (Corona-Esquivel et al., 2002).

De acuerdo a la hidrografía de la zona, Minatitlán se encuentra en la región hidrológica denominada "Costa de Jalisco". La cuenca hidrográfica de Minatitlán tiene una superficie de 6.08 km², donde nace el arroyo El Bonete con una longitud de 4.91 km, y una jerarquía del tercer orden, el cual tiene una pendiente promedio de 18.45° en la parte del circo de erosión y de 3.19° en la parte del depósito (Figura 4.7). El área de la cuenca se delimitó con ayuda de la carta topográfica de la zona (Figura 4.5). La erosión más activa se produce en el circo (parte alta de la cuenca), entre los cerros La Otatera (1680 m) y Los Copales (1820 m) con un área de aproximadamente 3'416,520 m². El área calculada del flujo de detritos es de 2'582,820 m², con un volumen aproximado de 2'066,256 m³ (Figura 4.6). Se aprecia también zonas con pendientes entre 20° a 50° en la zona de aporte, lo cual es un factor determinante en la formación de flujos de detritos, lo cual se puede observar en la figura 4.9.



Figura 4.5.- Carta topográfica E13B33 (INEGI, 2004), en donde se localiza la población de Minatitlán, Colima, y se muestra la delimitación de la cuenca causante del flujo de detritos.

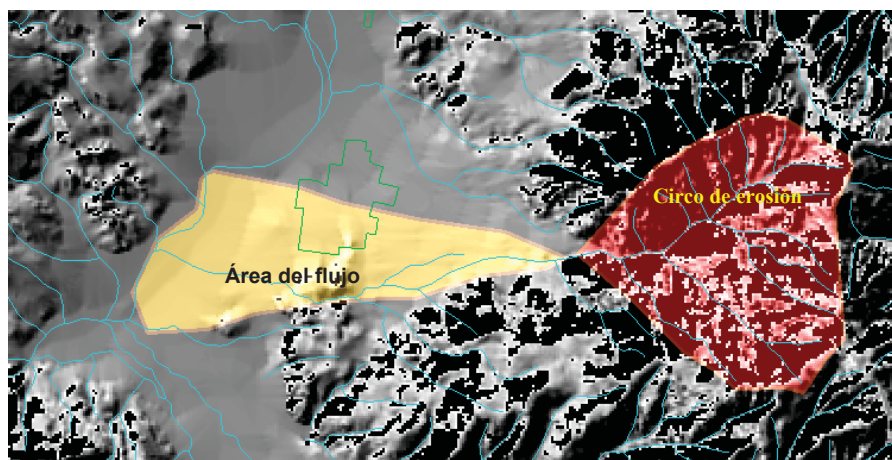


Figura 4.6.- Modelo sombreado con el avenamiento de la cuenca de Minatitlán, en rojo se observa el área del circo de erosión y en café claro el área del flujo de detritos de 1959 y en verde se observa la silueta del poblado.

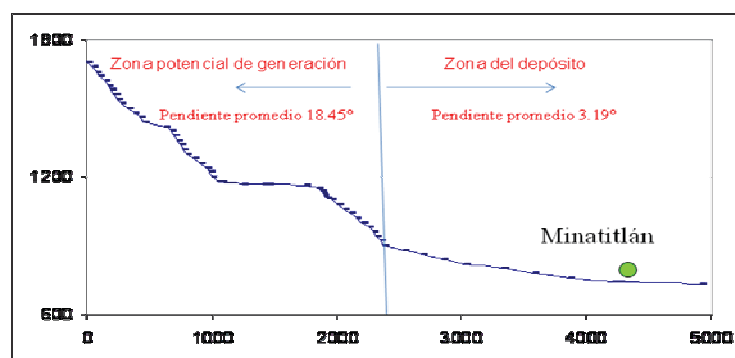


Figura 4.7.- Perfil de la topografía del cauce principal del Río Bonete.

Con ayuda de la carta digital topográfica de la zona de estudio, se pudo realizar el modelo digital de elevaciones (Figura 4.8), en el programa ILWIS 3.4, en el se puede apreciar los grandes cambios de elevaciones en el área del circo de erosión, así como también se observa la forma del abanico aluvial delimitado por cambios de pendientes pequeños.

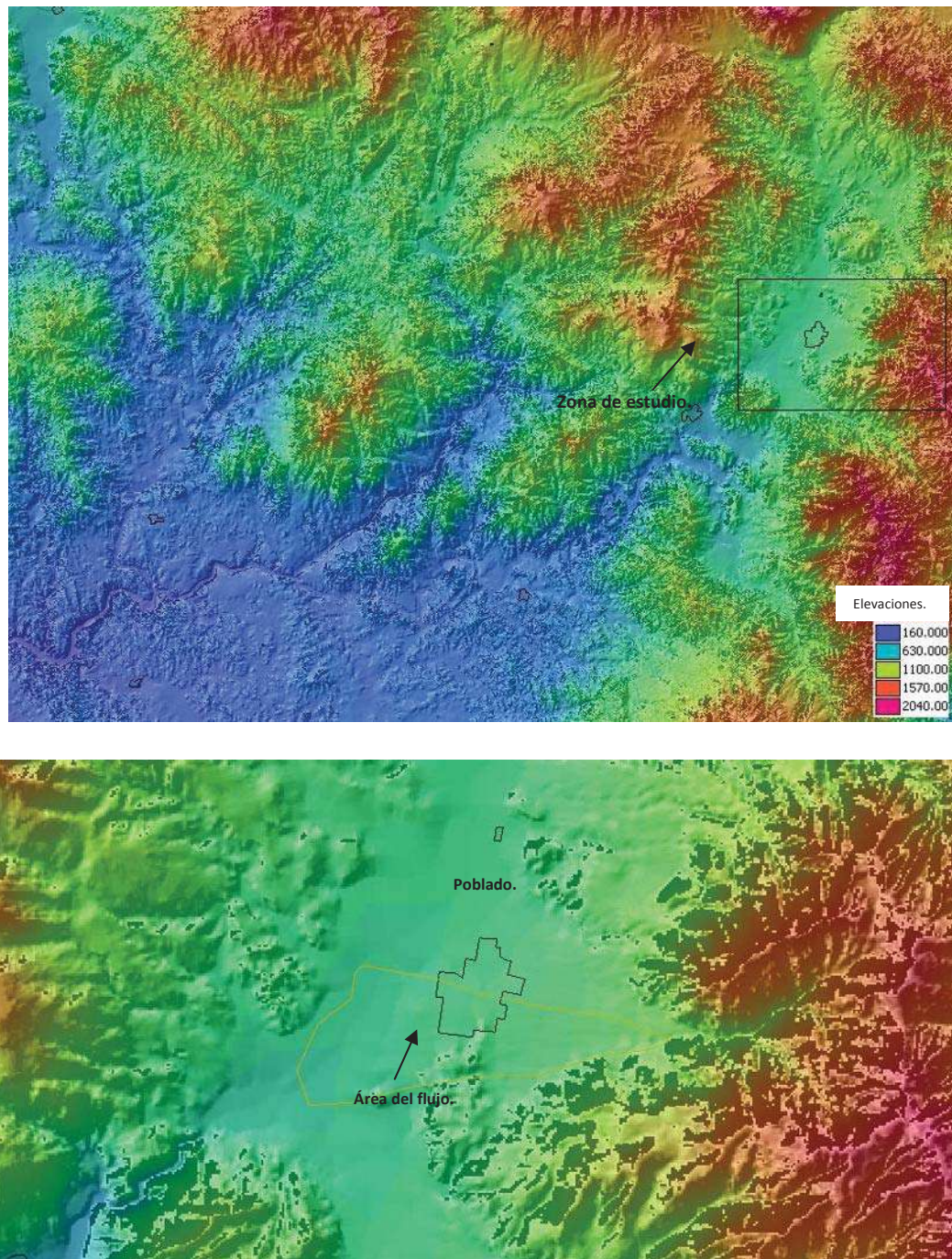


Figura 4.8.- Modelo digital de elevaciones de la cuenca de Minatitlán, el rectángulo encierra la zona de estudio.

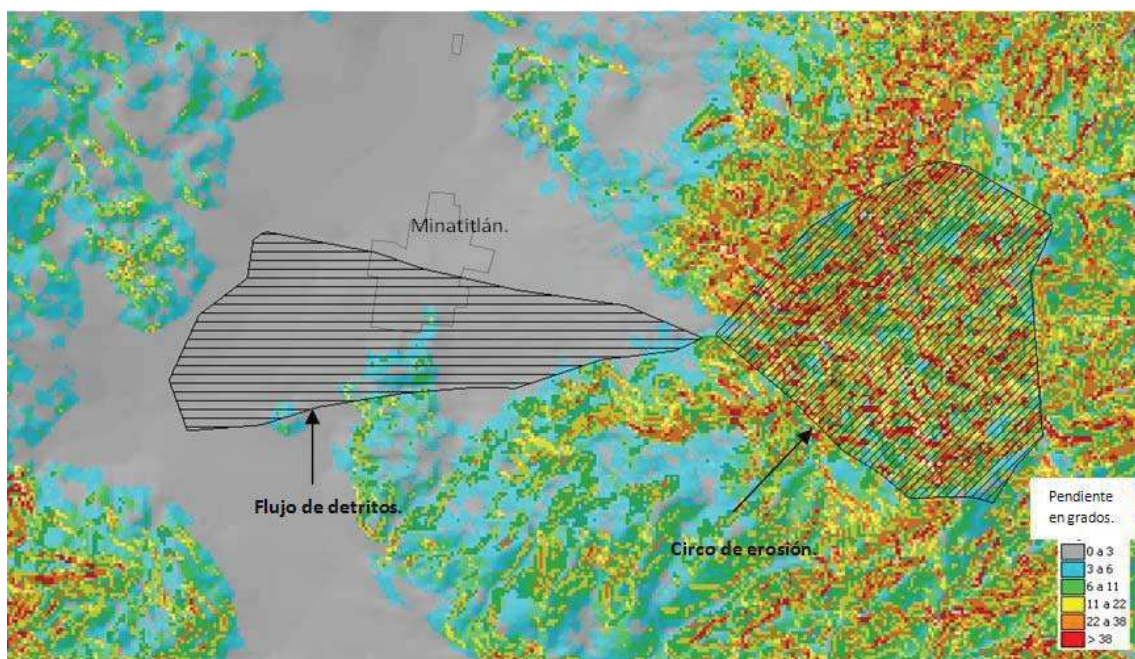
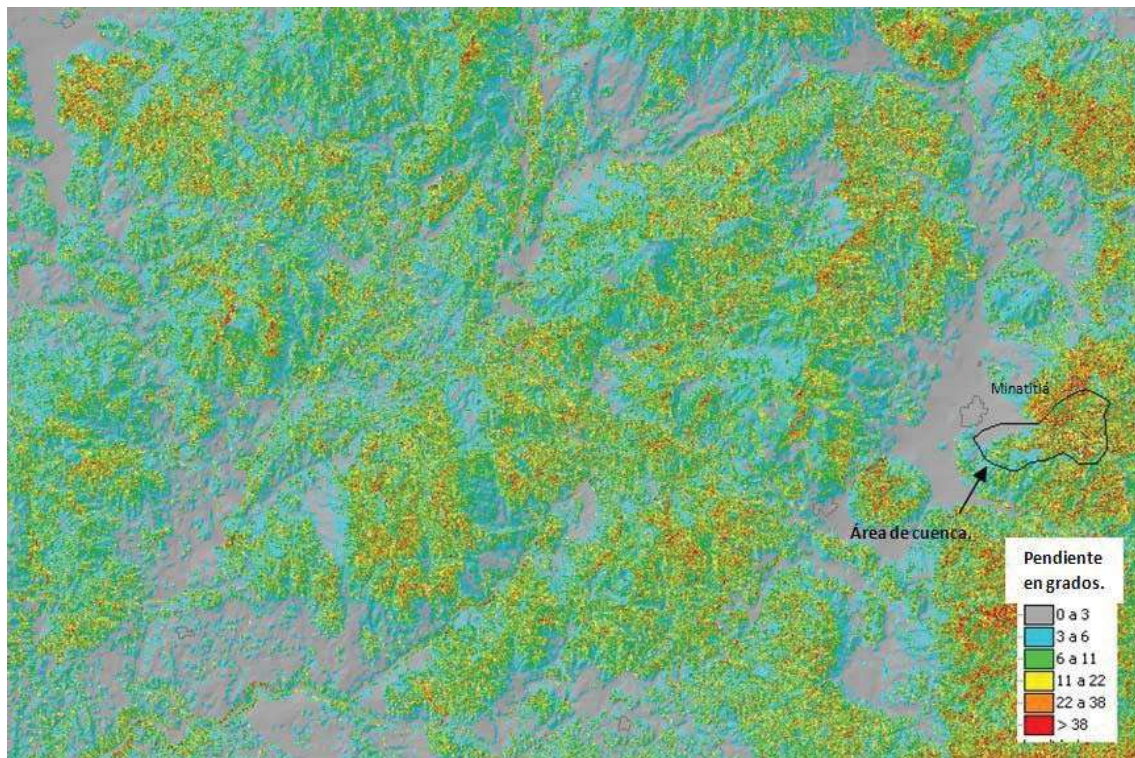


Figura 4.9.- Mapa de pendientes de la región de Minatitlán, Colima, a partir del MDE.

Con ayuda del modelo digital de elevaciones se llevó a cabo la elaboración de un mapa de pendientes, con el fin de conocer el grado de inclinación que presentan las laderas en el lugar de estudio, ya que pendientes elevadas son un factor importante en la generación de procesos de remoción en masa.

El mapa de pendientes se muestra en la Figura 4.9, con valores de pendientes agrupados en seis clases; Plana (0° - 3°), Ligeramente inclinada (3° - 6°), Inclinadas (6° - 11°), Moderadamente inclinadas (11° - 22°), Muy inclinadas (22° - 38°), Escarpada ($>38^{\circ}$).

4.4.- Geotecnia

Las pruebas de mecánica de suelos realizadas para el estudio geotécnico de la matriz del flujo de detritos de la localidad de Minatitlán, Colima, se presentan a continuación:

4.4.1.- Pesos volumétricos y Humedad natural del lugar

No. Muestra	P.V.H. kg/m ³	Humedad %
M3	1382.54	4.88
M4	1302.05	4.65
M6	1306.98	9.52
M8	1333.80	8.70
M14	1316.44	7.67
M15	1266.05	4.70
M16	1342.49	8.89
M17	1297.02	6.82

Tabla 4.1.- Pesos volumétricos y humedad natural.

Como puede apreciarse en la tabla 4.1, los valores correspondientes a los pesos volumétricos del material, van desde 1266.05 kg/m³ hasta 1382.54 kg/m³, y de 4.88 a 9.52 % de humedad natural.

4.4.2.- Densidad de sólidos y relación de vacíos del lugar.

No. Muestra	Densidad	Porosidad %
M3	2.597	0.970
M4	2.503	1.012
M6	2.604	1.182
M8	2.604	1.122
M14	2.558	1.092
M15	2.516	1.081
M16	2.604	1.112
M17	2.527	1.081

Tabla 4. 2.- Densidad de sólidos y relación de vacíos del lugar.

La densidad se determinó para poder calcular la relación de vacíos del material, con lo cual se conoce el grado de compactación que se tiene en el lugar. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 4.2, los cuales en lo que se refiere a densidad son congruentes con las densidades teóricas de los minerales encontrados por medio de difracción de rayos X, y en cuanto a la relación de vacíos se puede decir que el material esta poco compactado.

4.4.3.- Granulometrías

El análisis granulométrico se realizó con la finalidad de conocer la gradación de la matriz del flujo de detritos y poder tener una primera idea del comportamiento ingenieril que podría tener el tipo de material, para

posteriormente tener datos para la clasificación del tipo de suelo. Como ya se mencionó anteriormente los análisis granulométricos se realizaron por medio de cribado en malla para partículas superiores a 0.074 mm y la granulometría por medio del analizador de tamaño de partícula Coulter LS 100Q para tamaños iguales o inferiores a 0.074 mm.

4.4.3.1.- Granulometría por medio de mallas

El formato utilizado para el cálculo de la granulometría se presenta para el primer sitio de muestreo en la Tabla 4.3.

Malla No.	Abertura mm.	Peso suelo retenido gr.	Porcentaje retenido parcial %.	Porcentaje que pasa %.
2"	50.80	0	0.00	100.00
1 1/2"	36.10	0	0.00	100.00
1"	25.40	0	0.00	100.00
3/4"	19.05	35	2.99	97.01
1/2"	12.70	90	7.69	89.32
3/8"	9.52	45	3.85	85.47
No. 4	4.76	100	8.55	76.92
10	2.00	96.0	8.21	68.72
20	0.840	80.7	6.90	61.82
40	0.420	85.0	7.26	54.56
60	0.250	106.5	9.10	45.45
100	0.149	143.6	12.27	33.18
200	0.074	176.5	15.09	18.09
Pasa 200		211.7	18.09	
Suma.		1170	100.00	

Tabla 4.3.- Granulometría de la muestra 3, flujo de detritos "Minatitlán".

Con los datos obtenidos de las tablas se procedió a construir las curvas granulométricas, en la Figura 4.10, se muestra la curva correspondiente a la

granulometría de la muestra 3, y posteriormente se presentan las curvas granulométricas agrupadas en grupos de muestras.

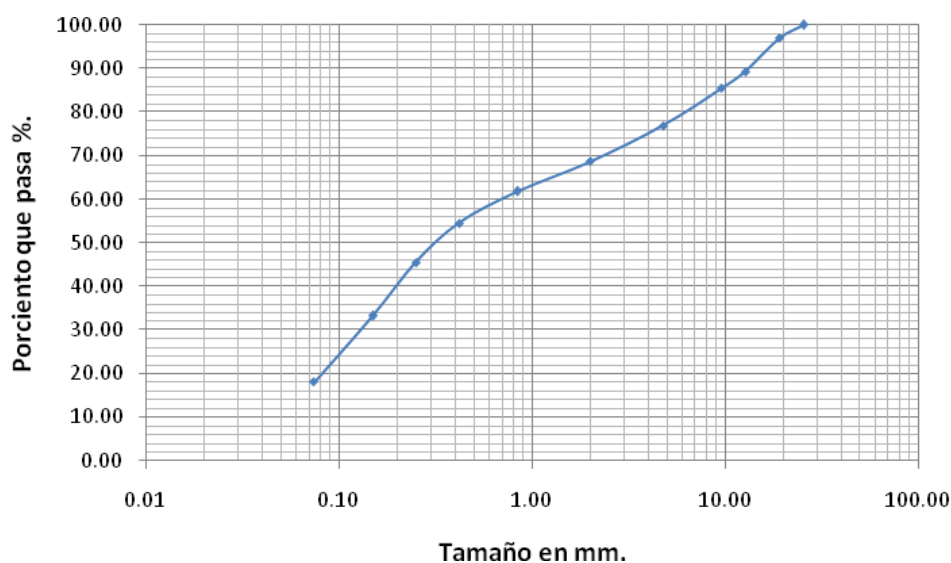


Figura 4.10.- Gráfica de distribución granulométrica de la muestra 3, flujo de detritos "Minatitlán."

En las Figuras 4.11 y 4.12, se presentan los resultados obtenidos de los análisis granulométricos divididos de acuerdo al lugar de muestreo, en dos partes, primeramente las muestras que se tomaron en la parte superior del flujo, es decir pegado al cerro (figura 4.11), y finalmente las que se localizan en la parte intermedia (figura 4.12).

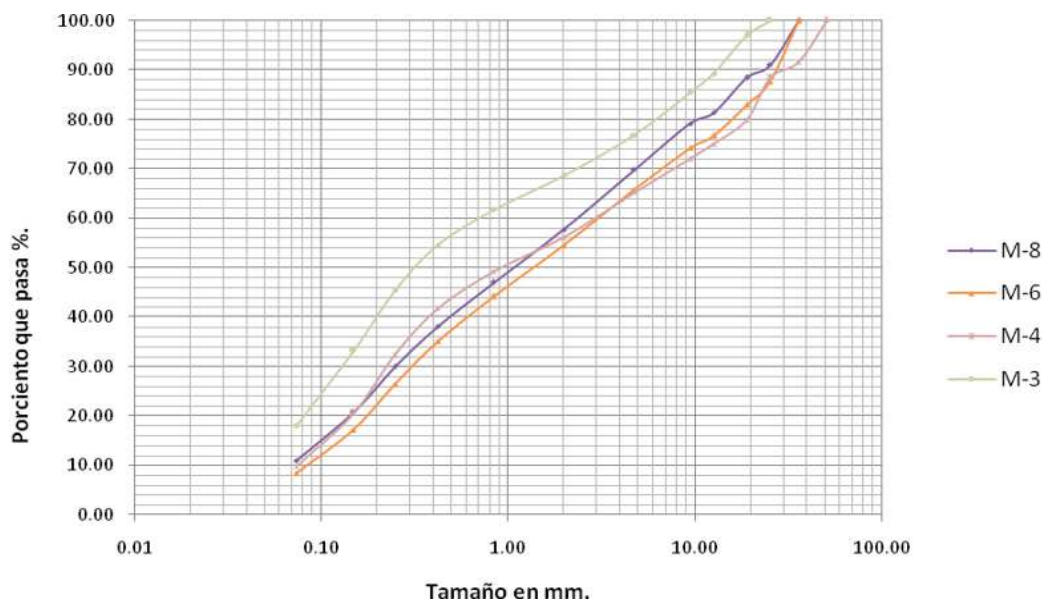


Figura 4.11.- Granulometría de las muestras de la zona superior del flujo de detritos de “Minatitlán”.

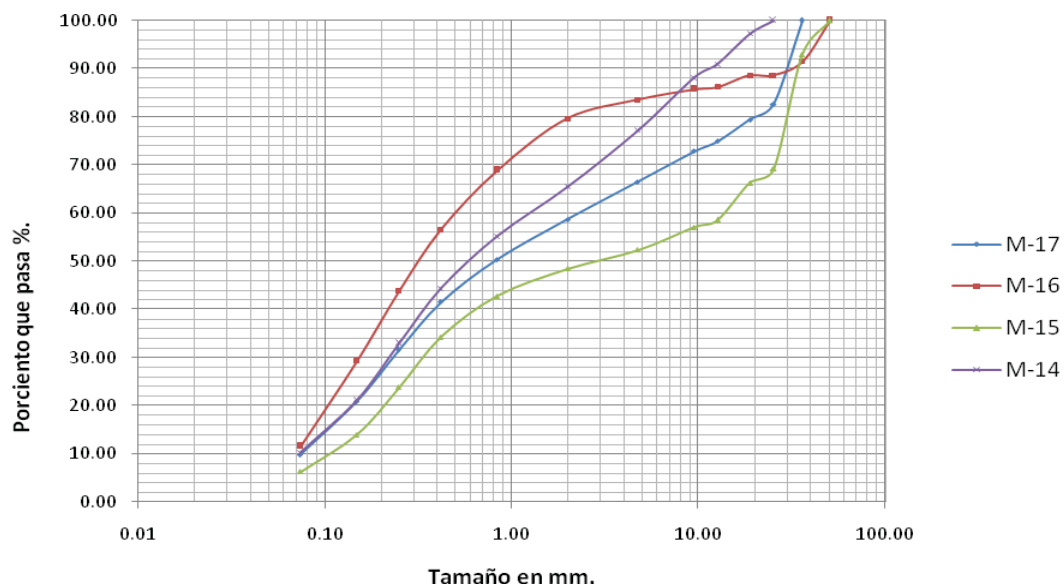


Figura 4.12.- Granulometría de las muestras de la zona intermedia del flujo de detritos de “Minatitlán”.

Como se puede observar en las Figuras 4.11 y 4.12, las curvas granulométricas de los resultados obtenidos son muy parecidas entre sí, en cada grupo de muestra, pero se observa que en el grupo de la parte inicial (Figura 4.11) es donde se tiene mayor parecido en la distribución granulométrica, por lo que se puede decir que la depositación en la parte alta fue más homogénea que en la parte intermedia. La distribución granulométrica observada en las gráficas parece ser buena, lo cual debe ser corroborado con la ayuda de los coeficientes granulométricos, ya que una mala granulometría tiene como consecuencia una mayor infiltración.

4.4.3.2.- Granulometría de la parte fina (partículas menores a 0.074 mm)

Para conocer el porcentaje de arcillas y de limos que contenían las muestras se realizó un análisis con ayuda del analizador de partículas, el cual nos arrojó los resultados que se observan en las Figuras 4.13 y 4.14.

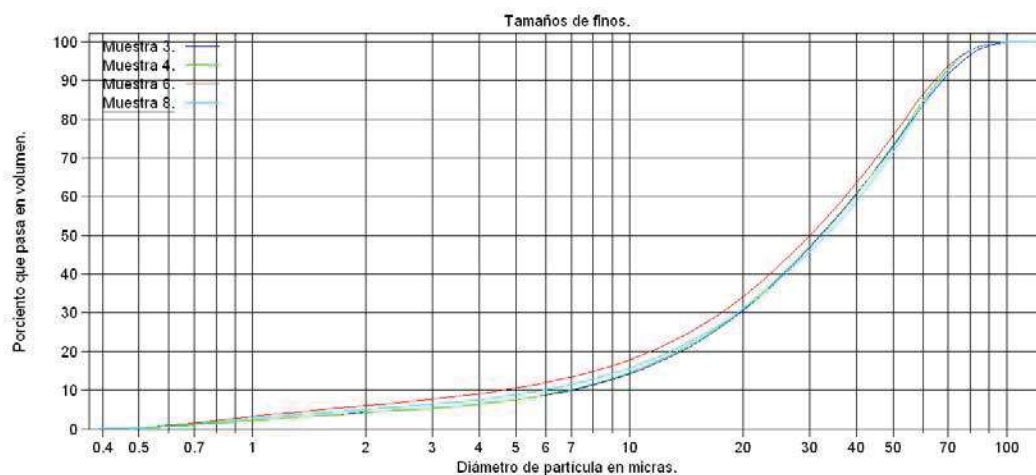


Figura 4.13.- Distribución granulométrica de la parte fina de las muestras de la zona superior del flujo de detritos de "Minatitlán".

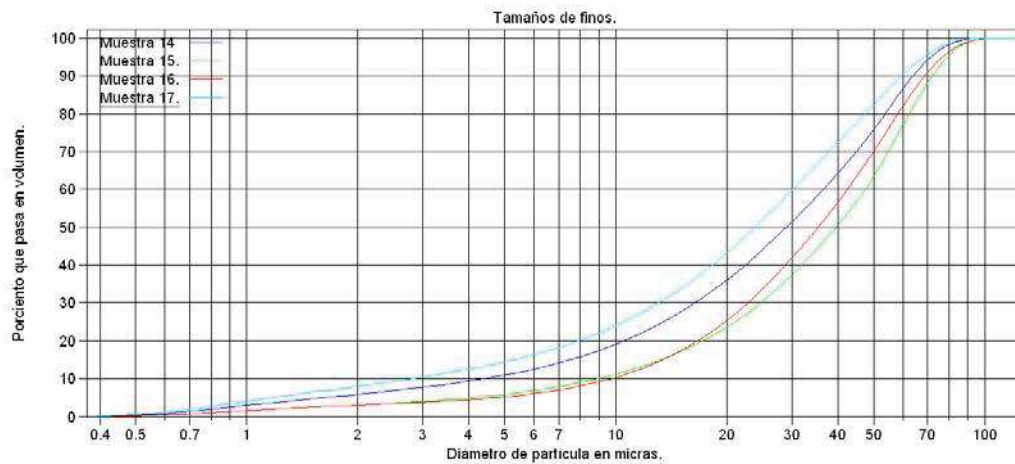


Figura 4.14.- Distribución granulométrica de la parte fina de las muestras de la zona intermedia del flujo de detritos de “Minatitlán”.

Como puede verse el contenido de arcilla es muy pequeño con respecto al total de la muestra, tomando en cuenta que las gráficas nos muestran la distribución de tamaños de la parte de la muestra que pasó la malla No. 200, el porcentaje de tamaños menores a 2 micras (arcillas), se aprecia mejor en las gráficas que se muestran en el anexo 1.

En la Tabla 4.4, se presenta un resumen de la granulometría de las muestras expresadas en porcentaje de cada tipo de suelo, en base a los resultados obtenidos de las pruebas de cribado por mallas y el determinador de tamaño de partícula.

No. Muestra	Granulometría			
	G %	S %	Limo %	Arcilla %
M3	23.08	58.83	17.32	0.77
M4	34.80	55.37	9.42	0.41
M6	34.23	57.36	7.90	0.51
M8	30.11	58.89	10.44	0.56
M14	22.73	66.93	9.74	0.61
M15	47.64	46.10	6.07	0.19
M16	16.40	72.08	11.17	0.35
M17	33.43	56.75	9.03	0.78

Tabla 4.4.- Resumen de la granulometría de las muestras utilizando los dos métodos anteriores.

Como puede observarse en la Tabla 4.4, el tipo de material que más predomina en casi todas las muestras, corresponde a la arena, en segundo lugar predominan las gravas, en tercer lugar se encuentran los limos y por último las arcillas. La clasificación del tipo de suelo en general, se realizará más adelante con ayuda de la clasificación del SUCS.

4.4.4.- Coeficientes granulométricos

En el inciso 3.1.3 del capítulo 3, se definió la forma en la que se calculan los coeficientes granulométricos y los rangos de sus valores, los cuales determinan si una muestra de suelo está bien graduada o mal graduada. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.5.

No. Muestra	Cu	Cc
M3	18.25	0.58
M4	39.63	0.21
M6	38.39	0.35
M8	36.00	0.35
M14	19.71	0.50
M15	126.36	0.08
M16	8.43	0.65
M17	33.06	0.31

Tabla 4.5.- Resultados del cálculo de los coeficientes granulométricos.

Como se puede observar en la Tabla 4.5 los valores del coeficiente de uniformidad (Cu) para las muestras 4, 6, 8, 15 y 17 es mayor a 20, por lo que se puede decir que en base al coeficiente de uniformidad las muestras quedan clasificadas como suelo bien graduado, sin embargo como se puede observar los valores obtenidos para el coeficiente de curvatura (Cc) en todas las muestras es menor a 1, por lo que se clasificarían como suelos mal graduados.

4.4.5.- Límites de consistencia

La determinación de los límites de consistencia se llevó a cabo para conocer la plasticidad que presenta la parte fina de las muestras, y poder realizar posteriormente la clasificación del tipo de suelo. En la Tabla 4.6 se presentan los resultados obtenidos del análisis y en el anexo 2 se pueden observar los resultados a detalle de los límites de plasticidad.

No. Muestra	Límites Consistencia (fracción fina)		
	LL %	LP %	CL %
M3	24.31	Nulo	1.25
M4	20.53	Nulo	1.35
M6	25.56	Nulo	3.37
M8	26.43	Nulo	3.92
M14	22.78	Nulo	2.93
M15	30.70	Nulo	0.99
M16	31.29	Nulo	0.99
M17	26.05	Nulo	3.97

Tabla 4.6.- Resultados obtenidos para los límites de consistencia.

Como se puede observar los resultados que se obtuvieron, nos indican que se trata de un suelo con poca plasticidad, por lo que se infiere que el contenido de arcilla en las muestras es muy pequeño, lo cual concuerda con los resultados obtenidos del analizador de tamaño de partícula, los cuales arrojaron que el porcentaje de arcilla en las muestras era muy bajo.

4.4.6.- Clasificación de la matriz de acuerdo con el SUCS

La clasificación de suelos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos se realizó con ayuda de los valores obtenidos anteriormente de granulometrías, coeficientes granulométricos y límites de consistencia. A continuación se presentan los resultados obtenidos para todas las muestras:

No. Muestra	Clasificación
M3	SM
M4	SP-SM
M6	SP-SM
M8	SP-SM
M14	SP-SM
M15	GP-GM
M16	SP-SM
M17	SP-SM

SM: Arena limosa.

SP-SM: Arena limosa mal graduada.

GP-GM: Grava limosa mal graduada.

Tabla 4.7.- Resultados obtenidos para la clasificación de suelos en base al SUCS.

Como se puede apreciar en la Tabla 4.7, la clasificación del tipo de suelo de acuerdo al SUCS, corresponde en la mayoría de las muestras a una arena limosa mal graduada, con grava, con partículas gruesas redondeadas o subangulosas, con finos no plásticos de baja resistencia en estado seco.

4.4.7.- Corte directo

La prueba de corte directo nos permite conocer los parámetros de resistencia del suelo al esfuerzo cortante (Ángulo de fricción interna y Cohesión), lo cual es un dato muy importante para conocer el grado de reposo de los materiales para soportar cargas horizontales y verticales, así como también influye en la estabilidad de taludes. Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

No. Muestra	Cohesión, C (KN/m ²)	Ángulo de fricción interna Ø, (°)
M3	1.76	42.45
M4	3.29	55.59
M6	0	52.42
M8	8.1	41.79
M14	0	55.59
M15	0	58.35
M16	7.14	38.21
M17	6.99	40.61

Tabla 4.8.- Resultados de la prueba de corte directo.

En la tabla 4.8, se pueden observar los valores del ángulo de fricción interna, los cuales varían entre 58.35 a 38.21° y su cohesión va desde 0 a 7.14 KN/ m², respectivamente, los cuales son acordes al tipo de suelo presente como se puede observar en la tabla 3.1 del capítulo 3. Las gráficas de la envolvente de Coulomb para cada muestra se presentan en el anexo 3.

4.4.8.- Coeficiente de permeabilidad

Los resultados obtenidos para el coeficiente de permeabilidad y calculados indirectamente de la prueba de consolidación se presentan en la Tabla 4.9, dividiéndolos en base a la carga de consolidación aplicada en la prueba de corte directo. En la tabla 4.10 se muestran los resultados del coeficiente de permeabilidad calculados a partir de la granulometría del material. Como se puede observar los resultados obtenidos nos indican que el flujo del agua a través de este tipo de materia es rápido lo cual es un factor detonante en la inestabilidad

del material ya que el agua infiltrada aumenta la presión de poro lo que provoca una disminución en la resistencia del material.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8
Presión	K	K	K	K	K	K	K	K
kg/cm2	cm/seg	cm/seg	cm/seg	cm/seg	cm/seg	cm/seg	cm/seg	cm/seg
0.15	6.83E-04	4.05E-04	1.75E-04	1.16E-03	1.21E-03	6.91E-05	1.33E-04	5.50E-05
0.3	4.96E-04	1.80E-04	8.25E-04	1.47E-04	1.55E-04	4.35E-04	6.63E-04	5.87E-04
0.5	4.59E-04	8.81E-05	3.44E-04	6.99E-04	9.97E-05	1.31E-04	5.02E-04	3.49E-04
Promedio	5.46E-04	2.24E-04	4.48E-04	6.69E-04	4.88E-04	2.12E-04	4.33E-04	3.30E-04

Tabla 4.9.- Coeficiente de permeabilidad calculado de la prueba de consolidación.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8
K cm/seg	2.99E-03	1.38E-02	2.82E-02	1.48E-02	1.41E-02	3.60E-02	1.22E-02	1.56E-02

Tabla 4.10.- Coeficiente de permeabilidad calculado con los datos de las granulometrías.

4.5.- Caracterización mineralógica

4.5.1.- Difracción de rayos X

Al analizar las ocho muestra por éste método y que se utilizaron para las pruebas geotécnicas, se comprobó que la composición mineralógica es prácticamente la misma en todos los casos, ya que los difractogramas obtenidos resultaron muy similares entre sí, dando por resultado la misma composición mineralógica, lo cual apunta a que el material del flujo de detritos proviene de la misma fuente. Debido a lo anterior, solo se presentarán dos difractogramas enseguida; uno de las muestras obtenidas al inicio del depósito del flujo y otro de las muestras de la parte intermedia del depósito (Figura 4.15 y 4.16).

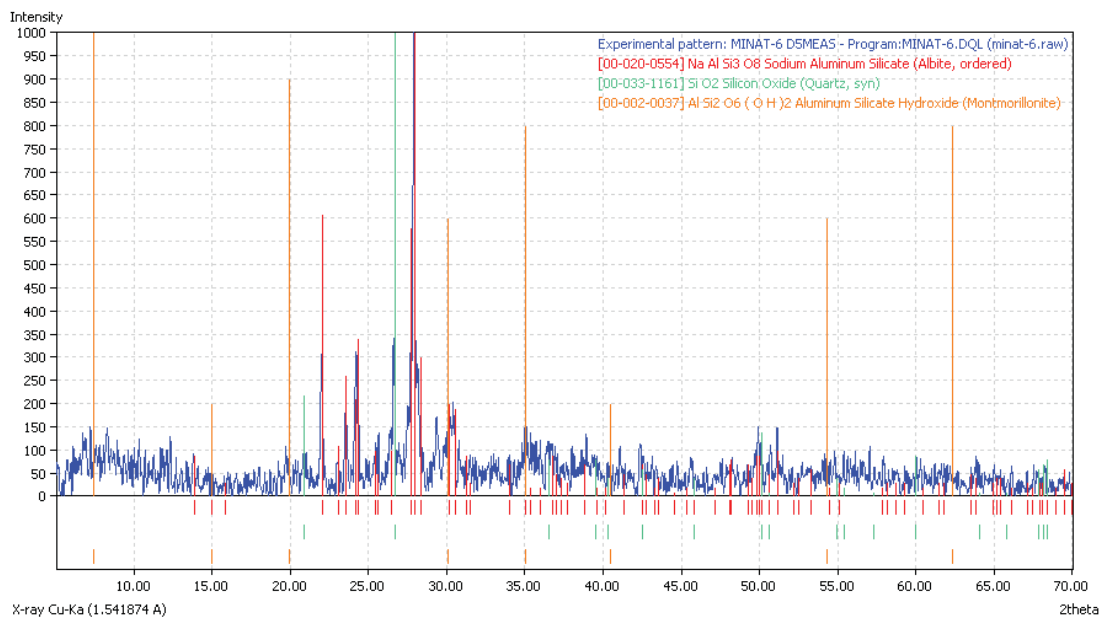


Figura 4.15.- Difractograma de la composición mineralógica de la matriz de la parte inicial del depósito del flujo de detritos de Minatitlán, Colima.

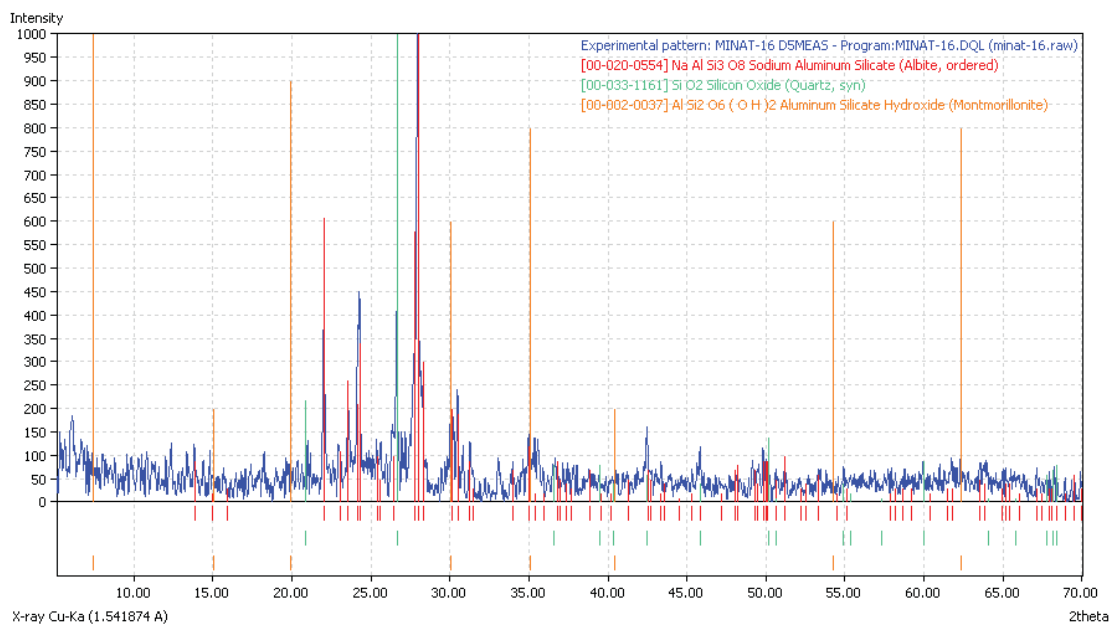


Figura 4.16.- Difractograma de la composición mineralógica de la matriz de la parte intermedia del depósito del flujo de detritos de Minatitlán, Colima.

En todos los difractogramas el componente principal que se presenta es la Albita, que es un silicato aluminico de calcio y sodio ($\text{Na Al Si}_3 \text{O}_8$), la segunda fase que se tiene es el Cuarzo (Si O_2), que es un óxido de silicio, y como tercer lugar se presentó la Montmorillonita [$\text{Al Si}_2 \text{O}_6 (\text{O H})_2$], que es un mineral arcilloso con la propiedad de absorber gran cantidad de agua entre sus capas.

4.5.2.- Microscopía electrónica de barrido

El análisis con este método nos permite observar la morfología de la parte fina de la matriz del flujo en estudio, la cual fue analizada por medio del microscopio electrónico de barrido. En la Figura 4.17, la cual es un par de micrografías con resolución de 500X, se puede observar la forma de los granos, la cual va de angulosa a subangulosa, lo que significa que no hubo mucha fricción entre los granos o que estos no fueron muy trabajados durante su transporte. En la imagen del lado izquierdo se pueden observar algunos granos alargados, los cuales podríamos decir que se trata de cristales de cuarzo, lo cual confirma lo encontrado por medio de la difracción de rayos X.

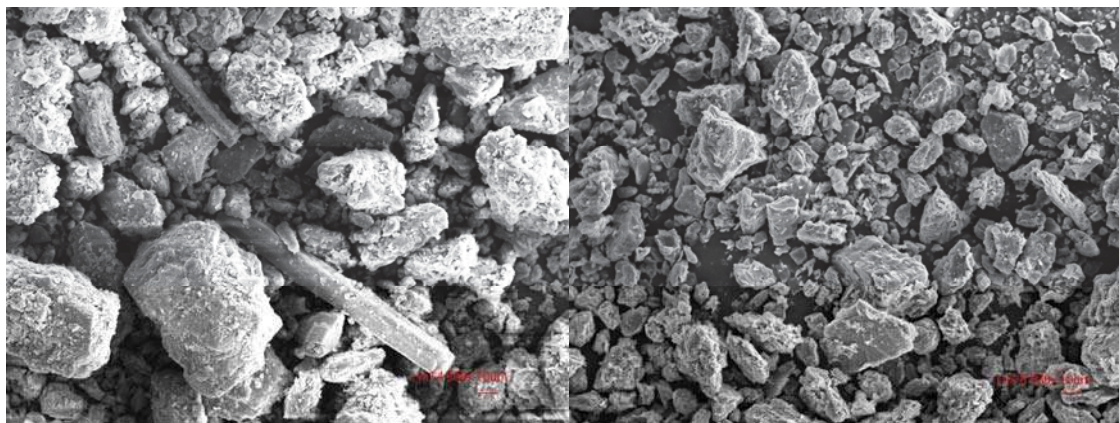


Figura 4.17.- Micrografías con resolución de 500X.

En la Figura 4.18, se tiene un par de micrografías con una resolución de 5000X, la cual nos ayudó para observar la forma de los agregados de arcillas, los cuales se presentan en forma de hojuelas, lo que es una forma típica de las arcillas. La aplicación de ésta técnica nos ha permitido confirmar la presencia de la arcilla en la matriz del flujo de 1959.

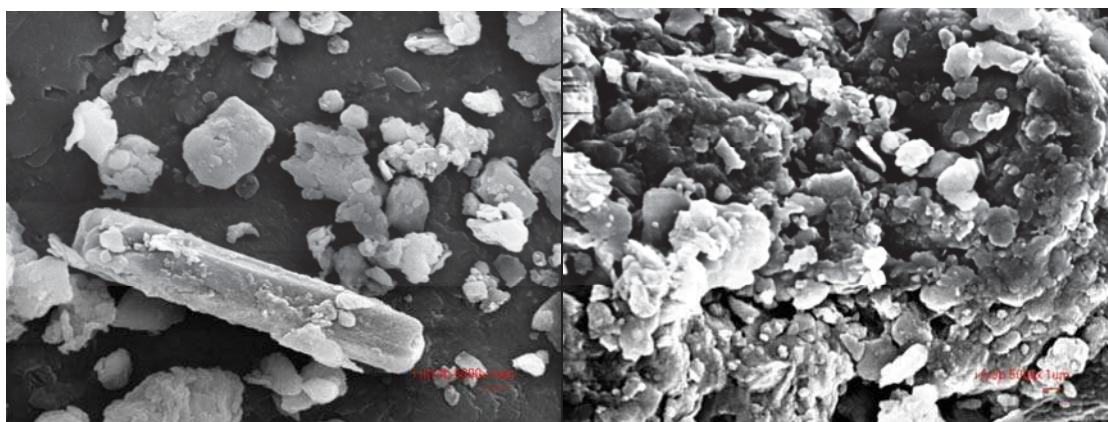


Figura 4.18.- Micrografías con resolución de 5000X.

En la imagen de la izquierda se puede observar un fragmento alargado el cual corresponde a un mineral de cuarzo, mientras en la imagen de la derecha se puede observar una gran cantidad de agregados de arcillas, lo cual nos reafirma lo encontrado por medio de difracción de rayos X.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En el año de 1959 el poblado de Minatitlán fue azotado por precipitaciones intensas producto de un huracán, las cuales originaron la formación de un flujo de detritos, cuyo depósito se extiende sobre un área de 2'582,820 m², formando un volumen estimado de dos millones de m³, donde el circo de erosión que lo alimentó se calculó en aproximadamente 3'416,520 m². Este gran evento dejó una gran destrucción en el poblado, destruyendo la mitad del poblado y la otra mitad quedó muy dañada.

El área de la cuenca hidrográfica de Minatitlán tiene una superficie de 6.08 km². Al realizar el mapa de pendientes se pudo observar las elevadas pendientes que se presentan dentro del circo de erosión, lo cual es un factor detonante en la formación de este tipo de fenómenos naturales.

Al realizar el estudio de mecánica de suelos se encontró que el tipo de material de la matriz del flujo según el SUCS, correspondía a una arena limosa mal graduada con grava, con partículas gruesas subangulosas, con finos no plásticos de baja resistencia en estado seco. Éstas son fuertemente erosionables por la acción de las corrientes de agua, lo cual teniendo en cuenta el origen del evento fue un factor determinante en la formación del flujo.

Como se pudo observar en los resultados del coeficiente de permeabilidad el agua fluye de manera rápida a través de este tipo de material saturando rápidamente la capa superficial del suelo provocando una disminución en la resistencia del suelo por aumento en la presión de poro, lo cual conjugado con

las elevadas pendientes que se presentan en la zona de erosión puede provocar el deslizamiento de dicha capa, tomando en cuenta que dichas pendientes sobrepasan el ángulo de fricción interno calculado con la prueba de corte directo.

Debido a que la cantidad de arcilla encontrada en el depósito resultó ser muy poca, se puede decir que no jugó un papel muy importante en el origen y comportamiento del flujo de detritos.

Este evento destruyó gran parte de la población de Minatitlán, en el año de 1959, no fue algo nuevo, ya que el abanico formado por corrientes de flujos previos ya existía, por el tamaño del circo de erosión que lo alimenta y la forma del relieve, se puede decir que en el pasado han ocurrido muchos fenómenos semejantes y que la posibilidad de que este tipo de fenómeno se vuelva a presentar es sin duda eminente. El periodo de retorno no se sabe a ciencia cierta, pero el caso es que una población asentada sobre depósitos de ésta índole, es una población que esta expuesta a que este tipo de fenómenos se repita de nuevo y esto representa un peligro muy grande para toda la población.

Propuestas

Después de haber analizado todos los resultados y haber observado imágenes de satélite y fotografías aéreas, podemos decir que la mejor forma de ayudar a los habitantes de esta población es con las siguientes sugerencias:

- 1.- A través de las autoridades Municipales y con apoyo de Protección Civil concientizar a la población acerca del peligro eminente al que están expuestos. Además, buscar vías de evacuación del poblado, en caso de ser necesario.
- 2.- Concienciar a las autoridades que deben contar con un plan de crecimiento de la población, en el cual deben de estar indicadas las zonas potencialmente a riesgo. Esto evitará la construcción de nuevas viviendas en zonas de peligro y evitará las tragedias humanas.
- 3.- Hacer campañas de prevención como la realización periódica del desazolve del cauce principal del arroyo el Bonete, a través del Municipio y los pobladores.
- 4.- Realizar la construcción de obras de protección en las márgenes del arroyo Bonete, como pudiera ser un muro desviador, el cual ayudaría a desviar el flujo en un caso de avenida.
- 5.- Estar capacitando periódicamente a todos los habitantes de Minatitlán sobre el peligro que representa este tipo de fenómenos, con la finalidad de que hagan conciencia y estén preparados para cualquier eventualidad que se presente.

Bibliografía

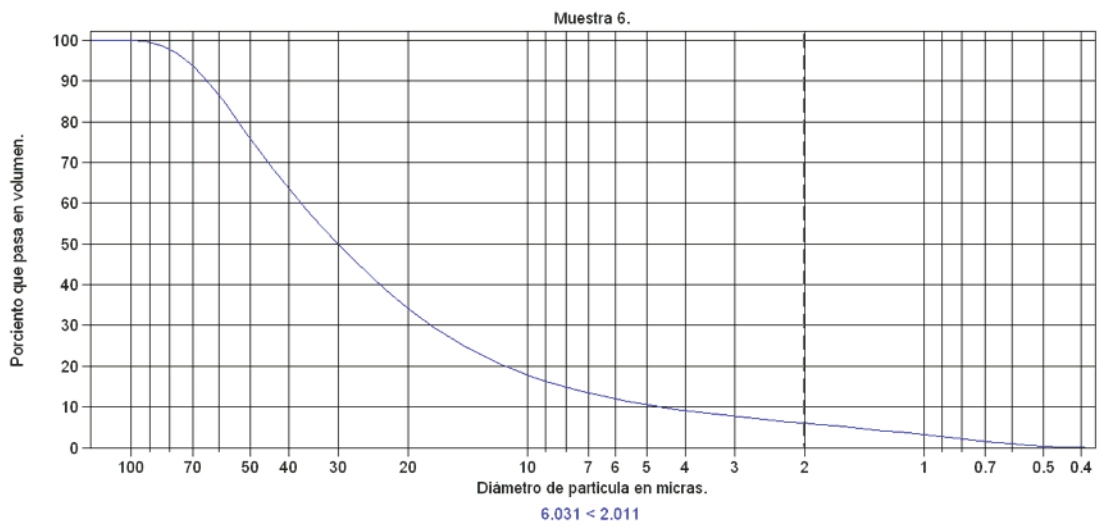
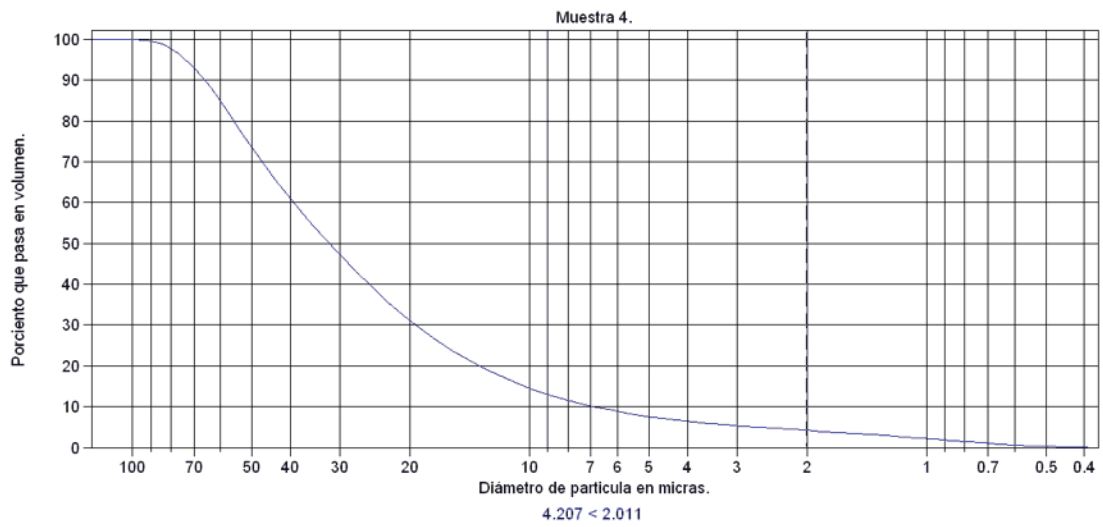
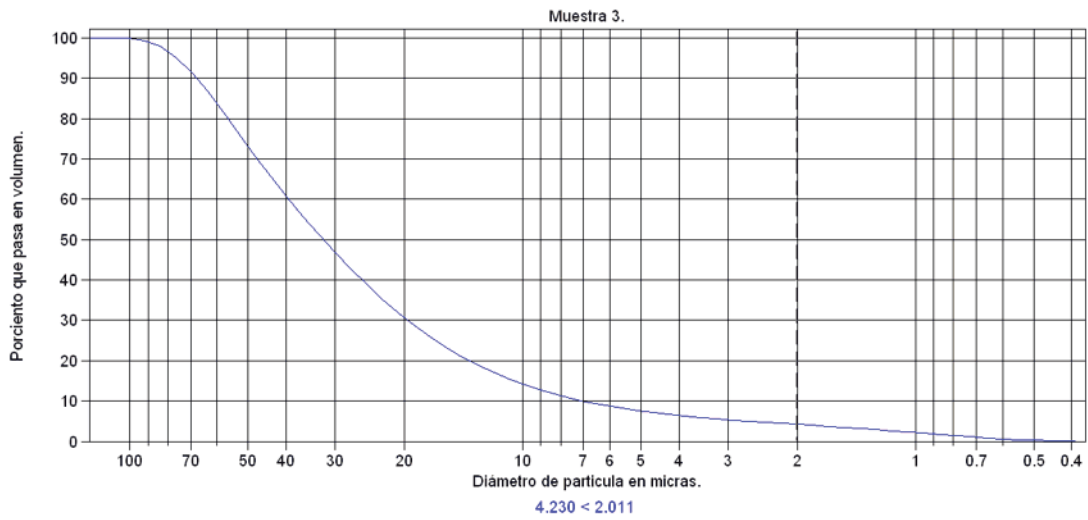
- Allen J.R.L. (1985). "Principles of Physical Sedimentology". Allen & Unwin, 272 pp. London.
- Arreygue Rocha E. y Cortés Cortés A. (2007). "La catástrofe del ciclón de 1959 en los poblados de Minatitlán y Zacualpan, Colima, México". 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007.
- Brea J.D. y Spalletti P.D. (2003). "Flujos densos e hidráulica de ríos". Nuevas tendencias en Hidráulica de Ríos. Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Buenos Aires. Argentina. ISBN 987-20109-1-9.
- Brea J.D. Spalletti L., Hopwood H.J y Spalletti P. (2004). "Conceptos y aplicaciones sobre flujos densos en la hidráulica de ríos". Ingeniería del agua vol. 12 · Nº 3 septiembre 2005.
- Capra L., Lugo H.J y Dávila H.N (2003). "Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento". Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 20, núm. 2, 2003, p. 95-106.
- CENAPRED (2001). Centro Nacional de Prevención de Desastres "Inestabilidad de laderas" serie fascículos. 2a. edición, diciembre 2001.
- Collins B., Znidarcic D. (1997). "Triggering Mechanisms of Rainfall Induced Debris Flows". II Simposio Panamericano de Deslizamientos, Río de Janeiro .pp. 277-286.
- Corominas J. (1998). "Tipos de Rotura en Laderas y Taludes". Apuntes para la carrera de Ingeniería Geológica en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Corominas J. y García Yagüe, A. (1997). "Terminología de los movimientos de ladera". IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. Vol. 3: 1051-1072.
- Corona-Esquivel R. y G. Alencaster-Ibarra (1995), "Rudist from de Peña Colorada iron Mine and la Minita sulfide deposit, states of Colima and

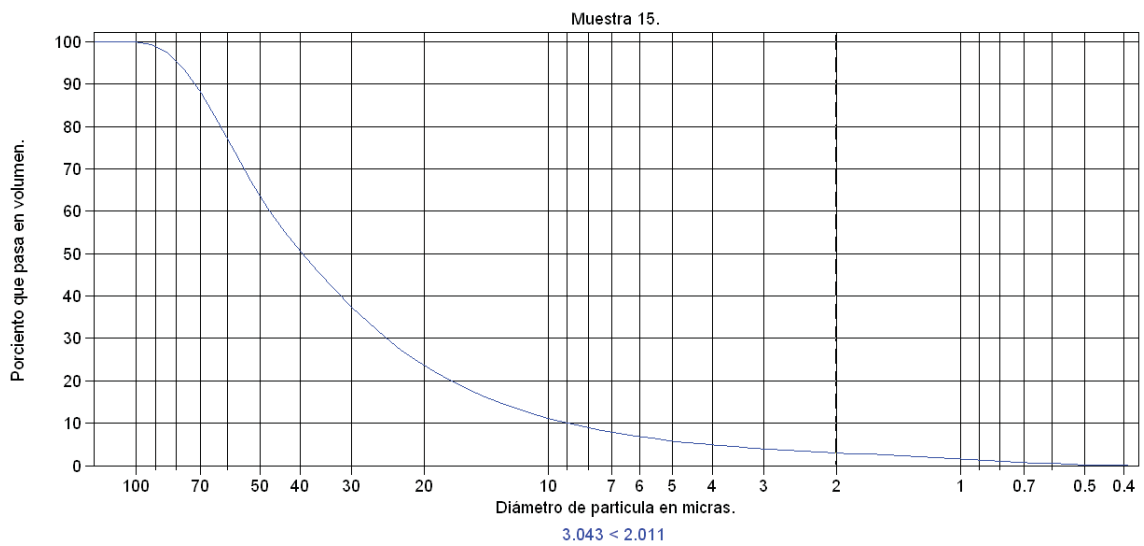
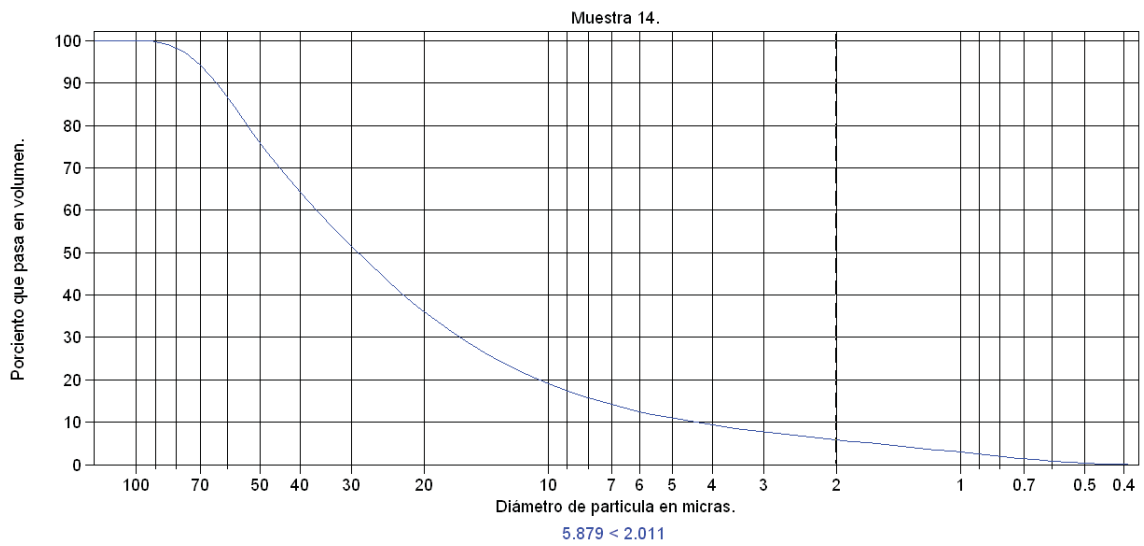
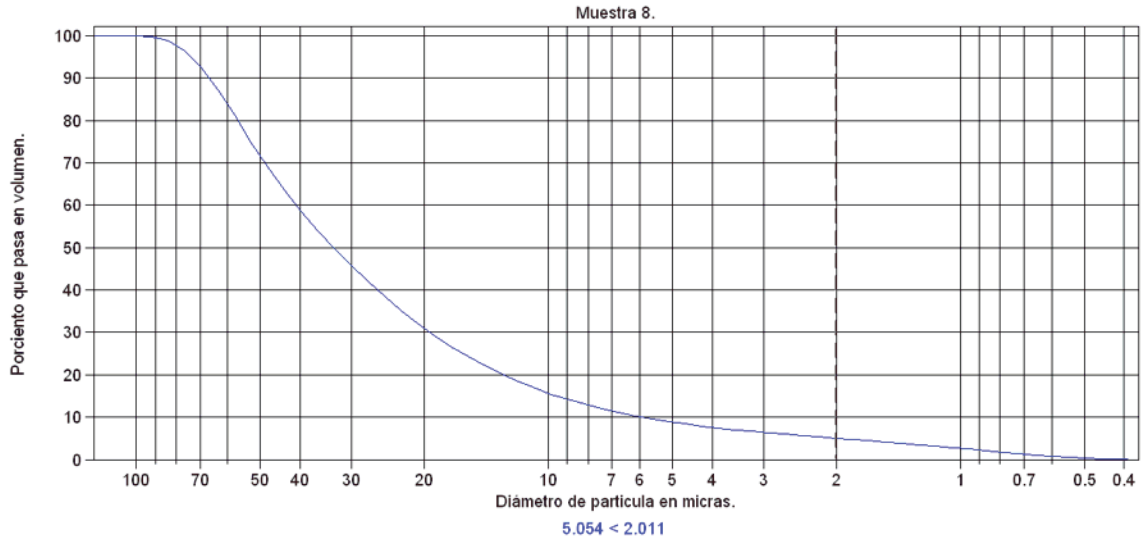
- Michoacán SW Mexico”, Instituto de Geología de la UNAM, revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 12 (2): 185-190.
- Corona-Esquivel R. Mancilla-Figueroa H. M., Chávez-Galván R. y Lugo-Hubp, J. (2002). “El desastre de Minatitlán, Colima Mexico, del martes 27 de octubre de 1959”. Desastres Naturales en América Latina, fondo de cultura económica: 413-427.
- Coussot P. y Meunier M. (1996). “Recognition, classification and mechanical description of debris flows”. Earth Science Reviews 40, 209-227. Elsevier Science.B.V.
- Crespo Villalaz C. (2000). “Mecánica de suelos y cimentaciones”, Editorial Limusa, cuarta edición, Mexico D.F.
- Cruden D. M. y Varnes D.J. (1996). “Landslide types and processes”. In A. K. Turner y R.L. Schuster (Editores): Landslides. Investigation and mitigation. Transportation Research Board Special Report 247. National Academy Press. Washington D.C. pp. 36-75
- Fernández J y Arenas M. (2002). “Flujos de detritos del 3 de mayo de 2002 en Caleta Buill, Comuna de Chaiten, X Region, Chile”. Simposio Internacional de Geología Ambiental para Planificación del Uso del Territorio, Puerto Varas, 4-6 Noviembre 2002.
- Friedman G.M. & Sanders J.E. (1978). “Principles of Sedimentology”. John Wiley & Sons, New York. 792 pp.
- García-Amaro E. (1988). “Modificaciones al sistema de clasificación de Koepen”, edición privada, México.
- Goodman R.E. y Bray J.W. (1976). “Toppling of rock slopes”. Proceedings Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes. Boulder, CO. ASCE. Vol. 2: 201-234.
- Gutiérrez M. y Soto P. 2003. “Inestabilidad de suelos en la ladera del cerro Pelón municipio de Celaya, Guanajuato” CENAPRED.
- Hungr O. (1995). “A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches”. Canadian Geot. J., pp. 610-623.

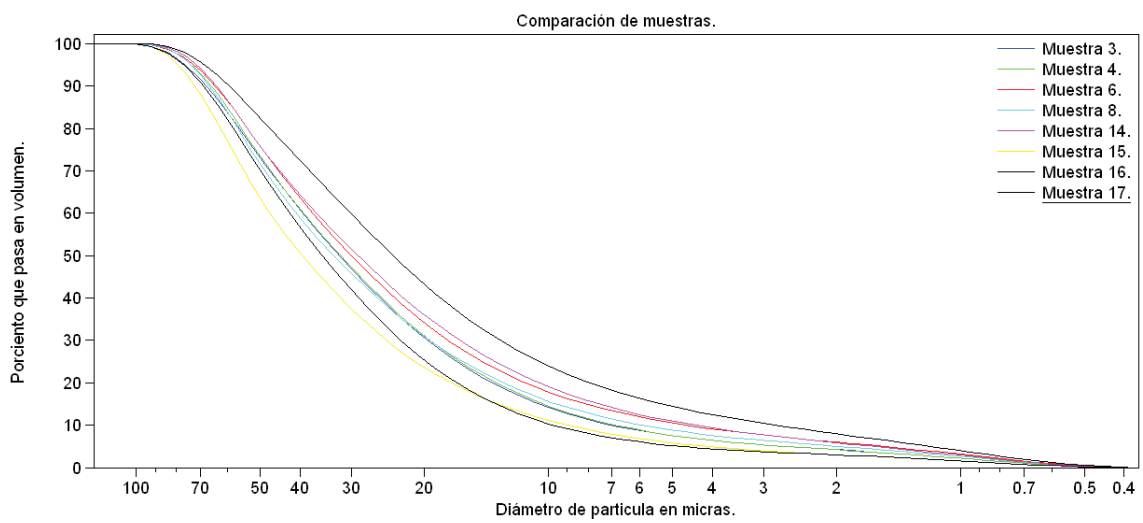
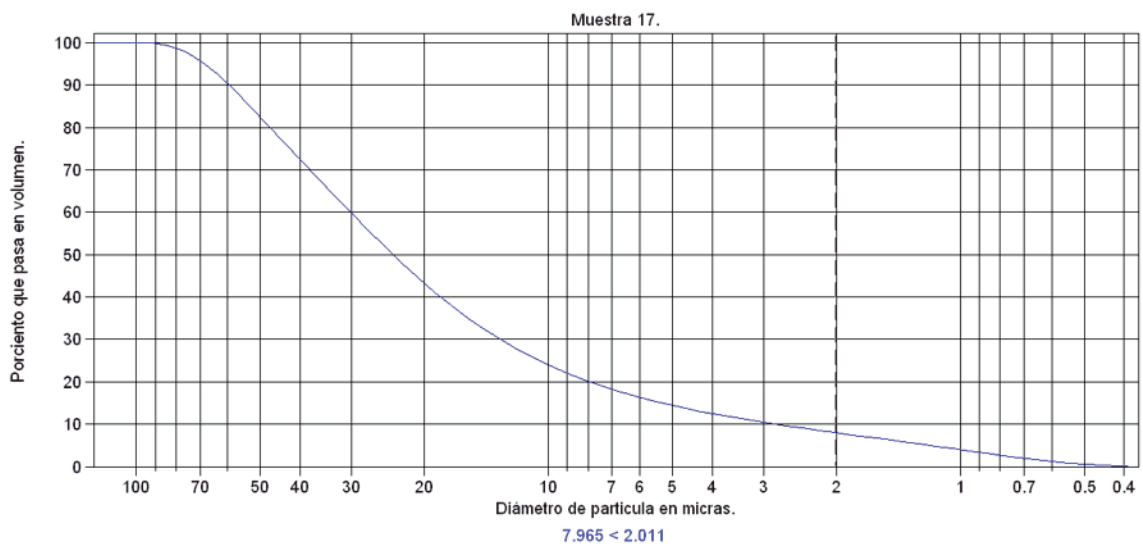
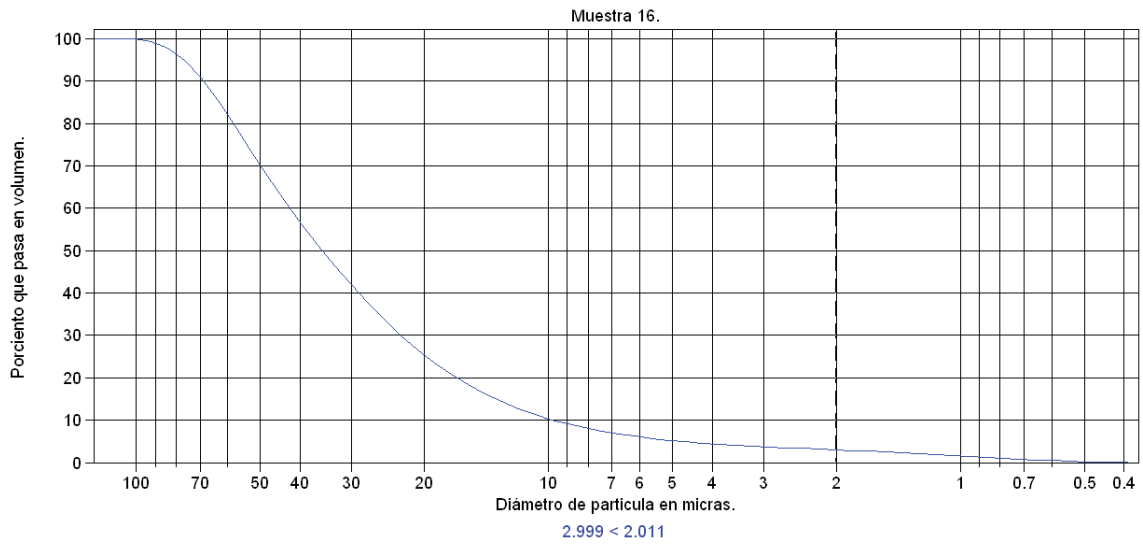
- Hutchinson J.N. (1988). "Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology". In Ch. Bonnard (Ed.): Landslides. Proceedings 5th International Conference on Landslides. Lausanne. Vol. 1: 3-35.
- INEGI (1998). Anuario Estadístico del Estado de Colima, 1998.
- INEGI (2002) Carta geológica de la localidad de Minatitlán, Colima: E13B33, escala 1: 50,000.
- INEGI (2004) Carta topográfica de la localidad de Minatitlán, Colima: E13B33, escala 1: 50,000.
- Juárez Badillo y Rico Rodríguez (2000). "Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos" (tomo 1). Ed. Limusa, Tercera edición, México.
- Julien P. y León, C. (2000). "Mud floods, mudflows and debris flows. Classification, rheology and structural design". Jornadas de Investigación JIFI 2000: the debris flow disaster of december 1999 in Venezuela.
- Lewis, D.W. & Mcconchie, D. (1994). "Practical Sedimentology." Chapman & Hall, 213 pp. New York.
- Mainali A. y Rajaratman, N. (1994). "Experimental study of debris flow". Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol 120. No.1. Discussion by P.Coussot and M.Meunier in Journal of Hyd. Eng. ASCE. May 1995.
- Márquez, J. J. (2006). "Mecánica de suelos y estudios geotécnicos en obras de ingeniería". Master en Ingeniería del agua sostenible, mayo 2006.
- Marsal R.J. y Mendoza M.J. (1985). Cambios en las propiedades geotécnicas de algunos suelos trópico residuales debido al tratamiento previo a su ensaye, Publicación No. 48, CFE, México.
- Mclane M. (1995). "Sedimentology". Oxford University Press, 423 pp. Oxford.
- Mendoza M.J., Noriega I. y Domínguez L. (2000). Deslizamientos de laderas en Teziutlán, Pue., provocados por las lluvias intensas de octubre de 1999. SEGOB, CENAPRED.

- Middleton G.V. & Southard J.B. (1984). "Mechanics of Sediment Movement". Lecture Notes, Short Course 3, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa. 401 pp.
- Ortiz Hurtado H. J. (2005). "Estudio de las propiedades físicas de los materiales involucrados en una avalancha de rocas, caso: Volcán el Estribo, Pátzcuaro, Michoacán". Tesis para obtener el título de Maestro en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, U.M.S.N.H, Morelia, México.
- Ostroumov F. M. (1999). "Técnicas analíticas en la investigación de minerales", U.M.S.N.H, departamento de Geología y Mineralogía.
- Padilla Lozoya R. (2006), El huracán del 59, Historia del desastre y reconstrucción de Minatitlán, Colima, CONACULTA Editores. pp 43-61.
- Pantoja-Alor J. (1983), "Geocronometría del magnetismo Cretácico- Terciario de la Sierra Madre del Sur", Boletín de la sociedad Geológica Mexicana.
- Pimentel, R. A. (1980), "Prospecto Soyatlán de Adentro", IGPR-191, PEMEX, informe técnico, inédito.
- Sharpe C.F.S. (1960). "Landslides and related phenomena." Columbia University Press, New York. 138 pp.
- Spalletti L., Brea J.D. y Spalletti P. (2002): "Contribución al ordenamiento conceptual geológico-hidráulico de flujos densos". Seminario sobre flujos densos en áreas de montaña San Salvador de Jujuy. Argentina.
- Suárez D. J. (2001). "Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales" Editorial: Universidad Industrial de Santander, UIS.
- USGS, (2002). "Peligros naturales en los abanicos aluviales: el desastre ocasionado por flujos detríticos e inundaciones repentinas en Venezuela" boletín informativo, Abril 2002.
- Varnes D.J. (1978). "Slope movement types and processes". In R.L. Schuster y R. J. Krizek (Eds.) Landslides: analysis and control. Transportation Research Board. Special report 176: 11-33
- WAN Z. y WANG, Z., (1994). "Hyperconcentrated Flow". IAHR Monograph Series. A.A.Balkema.

Anexo 1.
Curvas granulométricas de la parte fina.

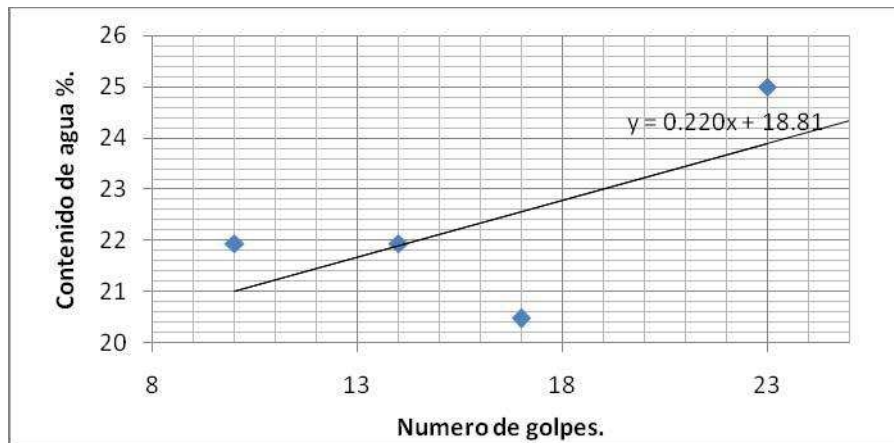




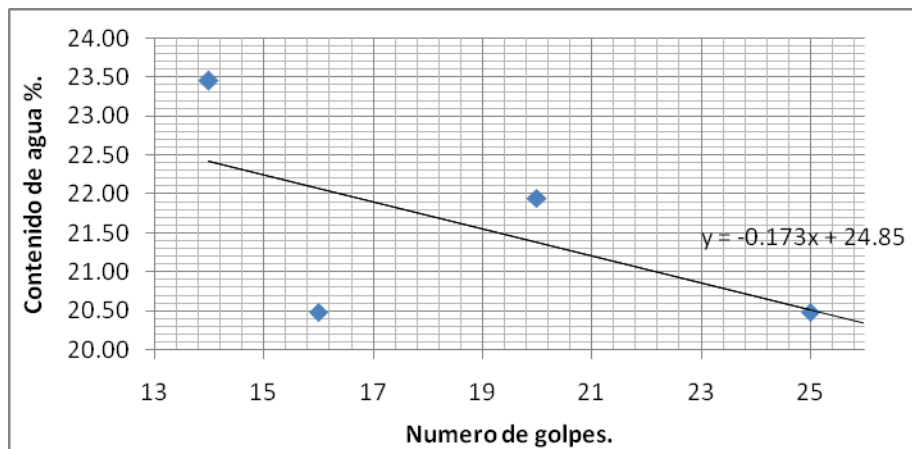


Anexo 2.
Graficas de la prueba del límite liquido.

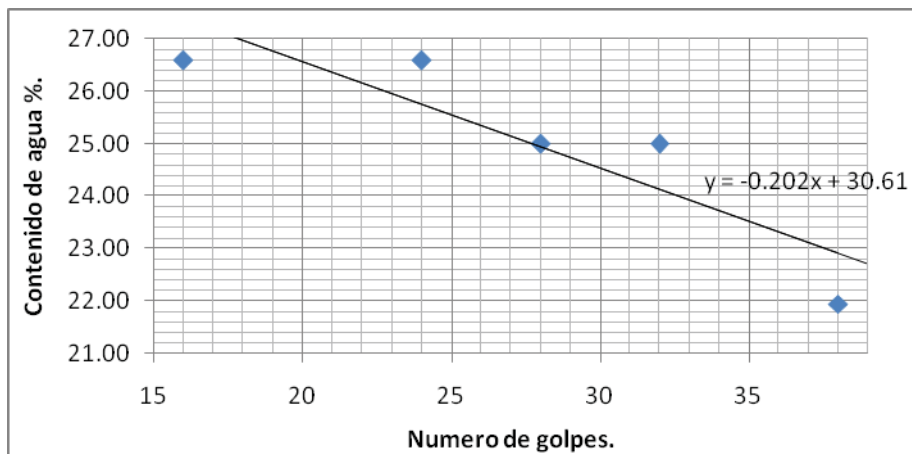
Muestra 3



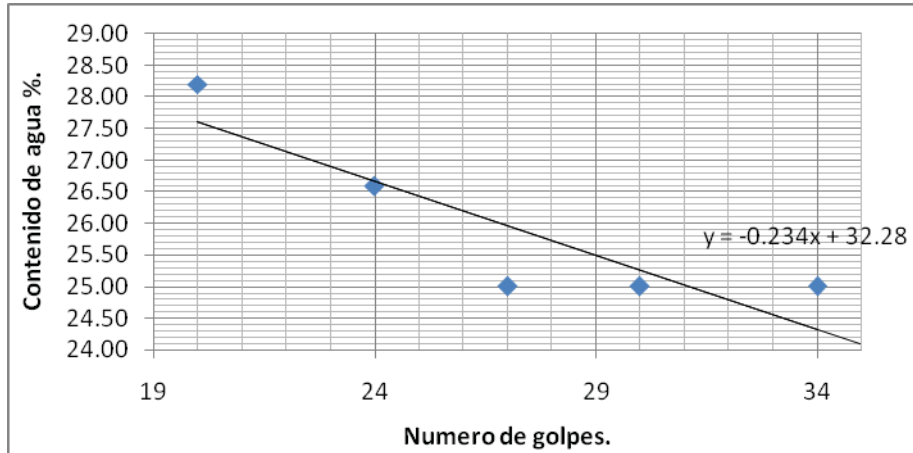
Muestra 4



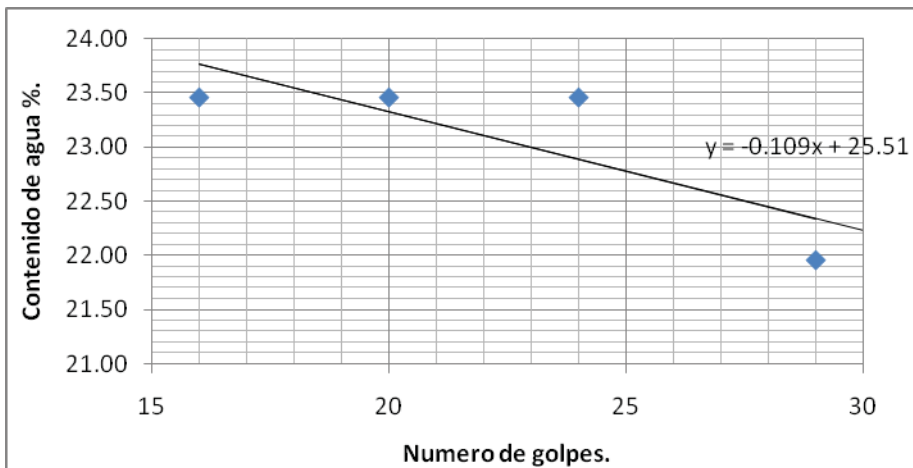
Muestra 6



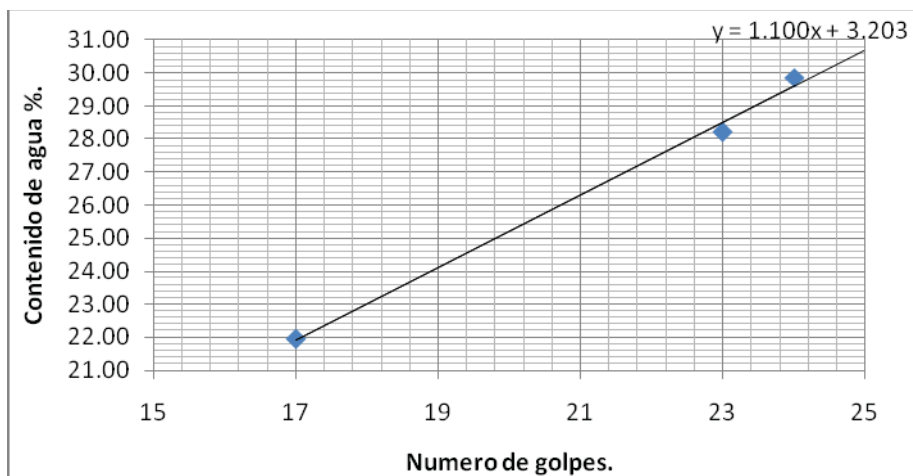
Muestra 8



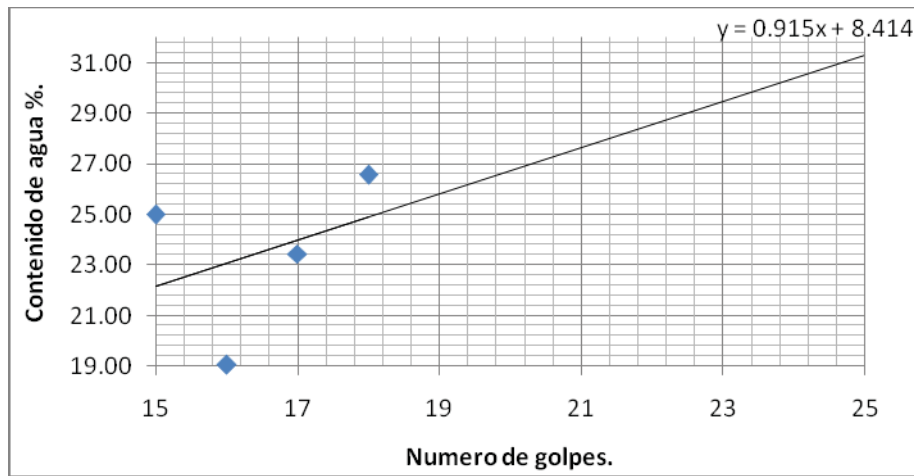
Muestra 14



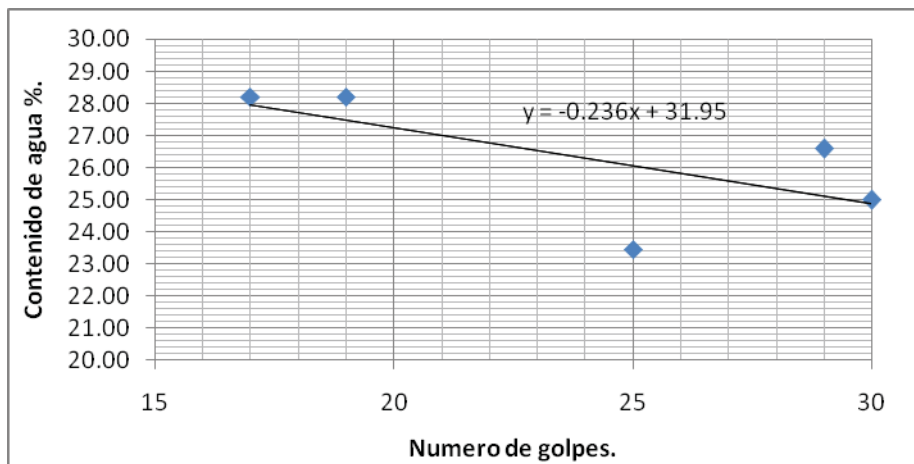
Muestra 15



Muestra 16

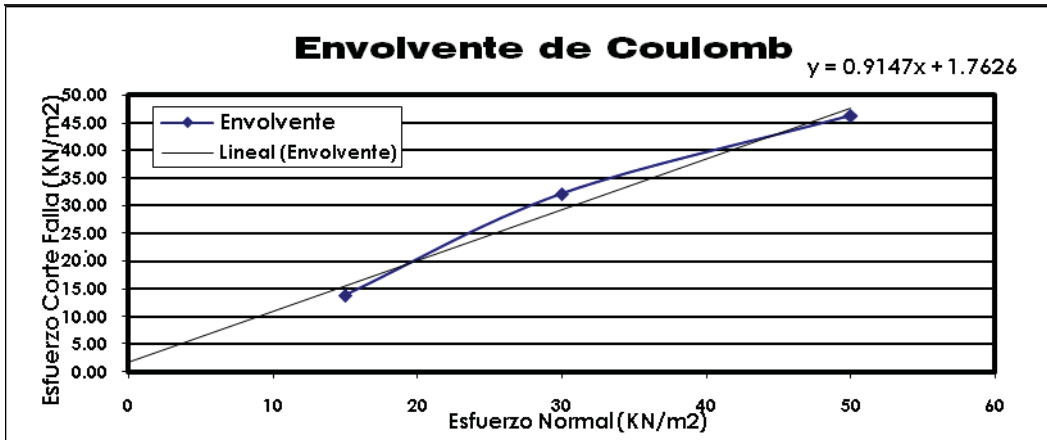


Muestra 17

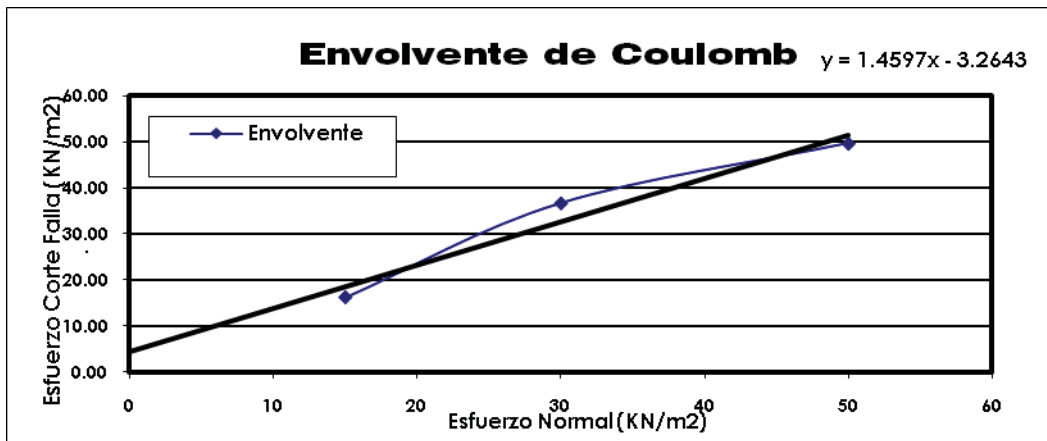


Anexo 3.
Graficas de la prueba de corte directo.

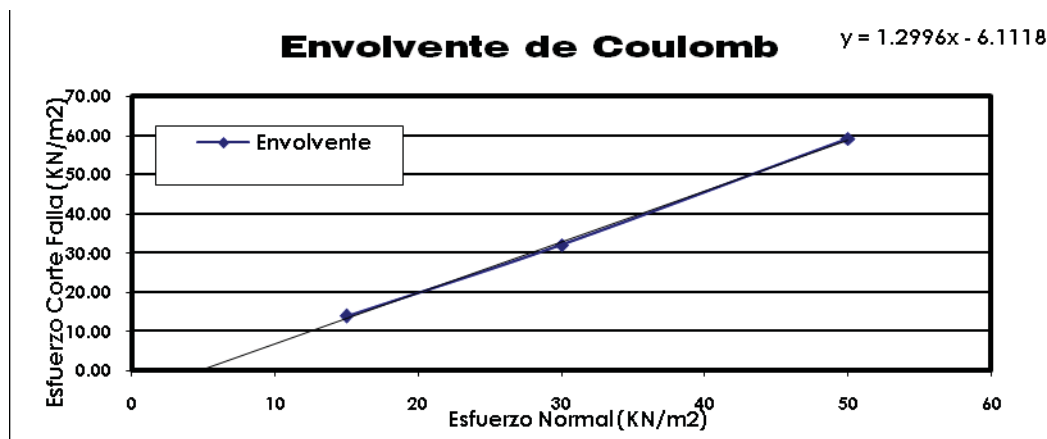
Muestra 3



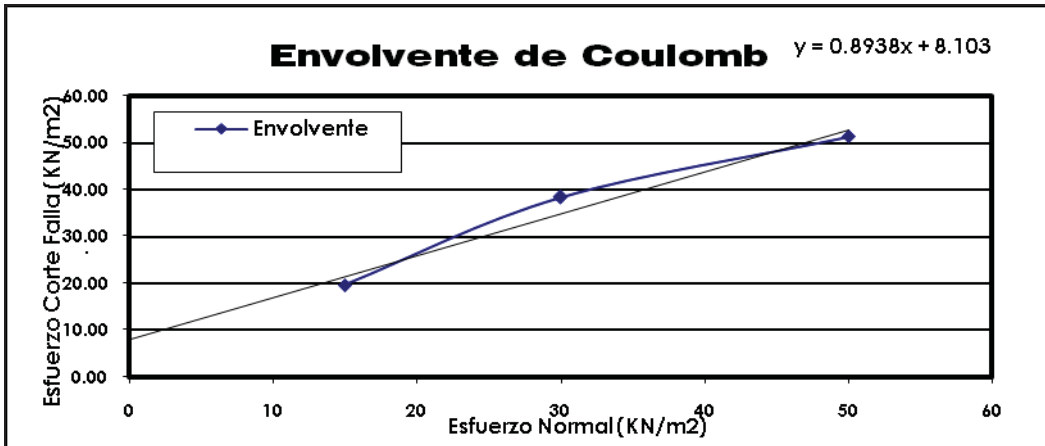
Muestra 4



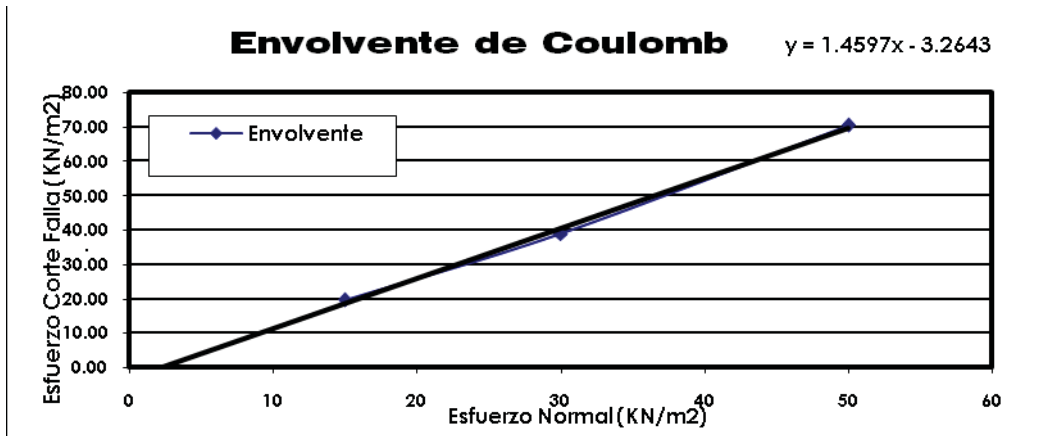
Muestra 6



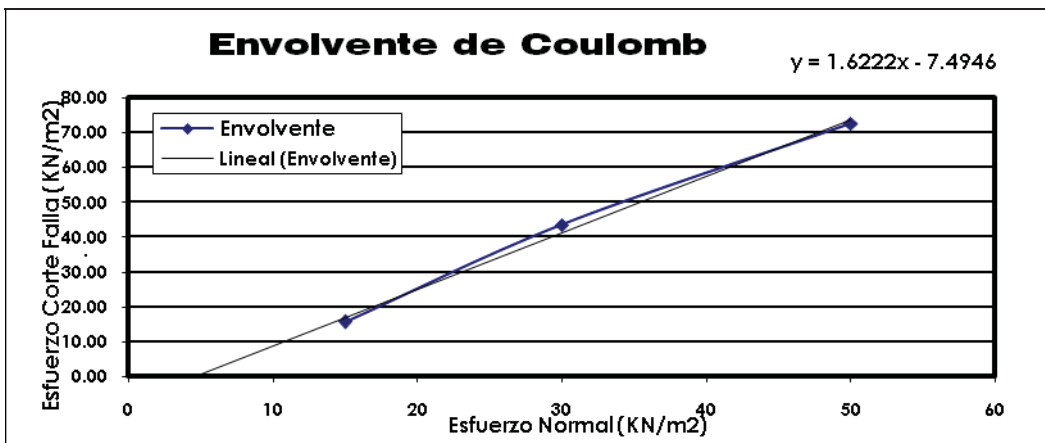
Muestra 8



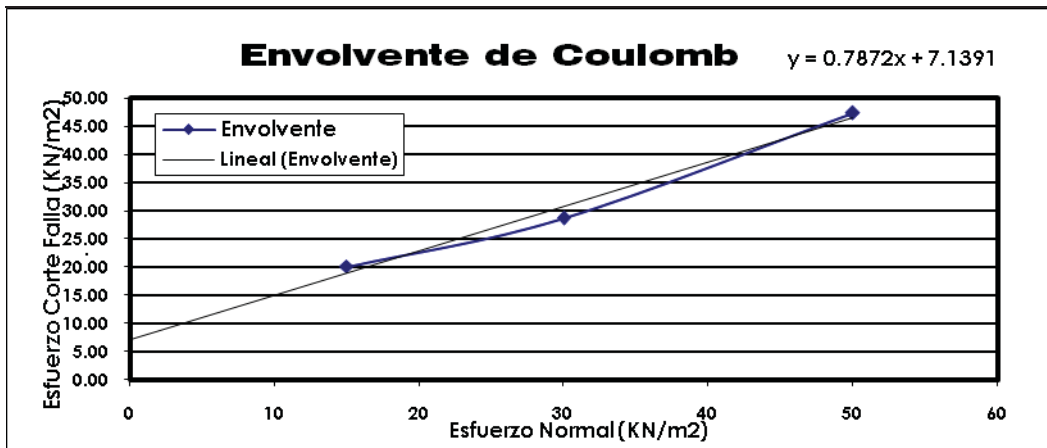
Muestra 14



Muestra 15



Muestra 16



Muestra 17

