



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CENTRO DE GEOCIENCIAS

**EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA
E INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO COATÁN, CHIAPAS.**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

LEONARDO NIÑO ESTRADA

TUTOR: DRA. LUCIA CAPRA PEDOL (CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM)

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

DR. LORENZO BORSELLI (UASLP)

DRA. ANA MARÍA LIZETH CABALLERO GARCÍA. (FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM)

DR. PIERRE LACAN. (CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM)

DRA. ESPERANZA MUÑOZ SALINAS (INSTITUTO DE GEOLOGÍA)

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, NOVIEMBRE DEL 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Declaración al código de ética en la UNAM

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría.

Todas las citas de o referencias a la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.



Niño Estrada Leonardo

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi padre, madre, hermanos y Nuria, quienes me han impulsado a siempre mejorar y con quienes siempre contaré.

Agradecimientos

Extiendo un agradecimiento a la Dra. Lucia Capra Pedol por sus enseñanzas, paciencia y motivación para siempre mejorar mi perfil profesional, sin todo su apoyo no habría sido posible este trabajo. También agradezco a mi madre y hermanos cuyas enseñanzas en la vida me ha motivado a ser una gran persona, a mi padre quien mostró un interés en mi superación profesional a lo largo de la maestría y a Nuria por su comprensión y alegría, que siempre han sido motivo de superación personal y profesional.

Le doy un sincero agradecimiento a la Dra. Azalea Ortiz Rodríguez quien me brindó información indispensable para la realización de figuras en el trabajo de tesis, así como también por su atención e interés durante la realización del mismo.

Me es grato agradecer a todos mis compañeros maestros, quienes con su sabiduría y consejos han impulsado mi superación profesional, y finalmente agradezco a CONACYT que me brindó una beca a través del Programa Nacional de Posgrados de Calidad, la cual me permitió tener un sustento durante los dos años de maestría, así como también a su proyecto “Problemas nacionales 360” a cargo de la Dra. Lucia Capra, el cual apoyó económicamente a la realización de la tesis.

INDICE

Resumen.....	12
Capítulo 1. Introducción.....	14
1.1 Área de estudio.....	14
1.2 Justificación.....	16
1.3 Hipótesis.....	16
1.4 Objetivos.....	17
Capítulo 2. Geomorfología.....	18
2.1 Topografía de la zona de estudio.....	18
2.2 Elementos estructurales.....	20
2.3 Hidrología de la cuenca del río Coatán.....	22
2.4 Curvatura y exposición en la cuenca del río Coatán.....	24
2.5 Uso de suelo en la cuenca del río Coatán.....	29
Capítulo 3. Geología.....	33
3.1 Geología regional de la zona de estudio.....	33
3.1.1 <i>Estratigrafía del Complejo Volcánico Tacaná</i>	36
Capítulo 4. Análisis de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.....	42
4.1 Inventario de deslizamientos en la cuenca del río Coatán.....	42
4.2. Factores determinantes en la ocurrencia de procesos de remoción en masa.....	43
4.3 Análisis de clasificación por máxima similitud.....	46
4.4 Resultados del análisis de clasificación por máxima similitud.....	48
Capítulo 5. Análisis de lluvia.....	51
5.1 Introducción.....	51

5.2 Metodología.....	51
5.2.1 Datos de lluvia y parámetros estadístico.....	52
5.2.2 Cálculo de probabilidades de excedencia (P_x).....	52
5.2.3 Gráfica de Probabilidades y periodos de retorno.....	52
5.3 Estaciones meteorológicas en la cuenca Coatán.....	54
5.4 Resultados.....	55
5.4.1 Análisis anual de lluvias.....	55
5.4.2 Análisis de eventos extremos.....	66
Capítulo 6. Simulaciones de escenarios de lluvias y evaluación de la susceptibilidad a inundación en la ciudad de Tapachula.....	69
6.1 Metodología.....	69
6.2 Fundamento de operación del programa FLO 2D.....	69
6.3 Datos de entrada.....	74
6.4 Simulaciones en la planicie de inundación.....	77
6.5 Mapa de susceptibilidad a inundaciones.....	81
Capítulo 7. Resultados generales y discusión	84
Capítulo 8. Conclusión.....	89
Capítulo 9. Bibliografía.....	91

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación del volcán Tacaná, modificado de Arce et al., (2012).....	15
Figura 2.1 Topografía del complejo volcánico Tacaná, con sus respectivos perfiles topográficos, en los cuales se indica los cambios en la pendiente en las porciones norte y sur, así como también la variación en altura y ancho de las barrancas en la zona erosiva del volcán.....	18
Figura 2.2 Mapa de pendientes del área de estudio, como se puede apreciar existen una disminución desde la cima del volcán hasta la ciudad de Tapachula, mientras que es variable hacia el norte del CVT, en parte influenciados por la existencia de las paredes de las calderas antiguas.....	19
Figura 2.3 A) Elementos estructurales de la zona de estudio, en el cual se puede apreciar los sistemas de fallas laterales y normales, estas últimas delimitan el graben de Tacaná, las calderas de colapso se localizan en la parte norte del CVT. B) Perfil topográfico del graben de Tacaná, delimitados por las fallas río Coatán y río Suchiate.....	21
Figura 2.4 Acumulación de agua dentro de la cuenca del río Coatán, la escala indica la cantidad de celdas que fluyen hacia ese punto.....	23
Figura 2.5 Hidrología de la zona de estudio, en el cual se muestra la delimitación de la cuenca del río Coatán y los ríos principales.....	25
Figura 2.6A Curvatura de la cuenca del río Coatán, la imagen se puede apreciar que existe una dominancia de las partes cóncavas. CVT: Complejo Volcánico Tacaná.....	26
Figura 2.6 B) Acercamiento de la figura 2.6.A, en esta imagen se aprecia con más claridad la curvatura del terreno, siendo los valles y las pendientes los que mayormente representan las partes cóncavas y las cimas las que representan las partes convexas.....	27
Figura 2.7A Mapa de orientación o exposición de la cuenca del río Coatán. CVT: Complejo Volcánico Tacaná.....	28
Figura 2.7B Acercamiento a la figura 2.7A, en el que se muestra a mayor detalle la orientación de las laderas.....	29
Figura 2.8 Curvas de reflectancia de los tipos de uso de suelo. Línea Rosa: Suelo desnudos, línea amarilla: Pastizales, línea morada: Cuerpos de agua, línea verde: Vegetación natural.....	30
Figura 2.9 Uso de Suelo dentro de la cuenca del río Coatán, como se puede apreciar hay una dominancia de la vegetación natural dentro de la cuenca del río. CVT: Complejo Volcánico Tacaná.....	31

Figura 3.1 Afloramientos de intrusivos terciarios de composición granítica, en la figura 3.1A se muestra el granito fresco, mientras que en la figura 3.1B se muestra altamente alterado, una gran cantidad de deslizamientos ocurren en este tipo de litologías.....	34
Figura 3.2 ejemplo de derrumbes típicos en una de las paredes de la caldera Chanjale, a un costado de los caminos, las paredes alcanzan hasta 70 metros de espesor.....	35
Figura 3.3 Columna estratigráfica simplificada del Complejo Volcánico Tacaná (CVT), tomado y editado de García-Palomo et al., (2006).....	38
Figura 3.4 Mapa geológico general del Complejo Volcánico Tacaná (CVT) en la porción norte y centro de la cuenca del río Coatán, Modificado de Macías (2005) y García-Palomo et al., (2006).....	39
Figura 3.5 Edificios volcánicos que conforman el CVT.....	40
Figura 4.1 Inventario de deslizamientos en la cuenca del río Coatán, también se muestran los caminos de terracería y su ubicación cercana respecto a los sitios de deslizamientos, mayormente en la porción norte y noroeste del CVT.....	42
Figura 4.2 Metodología del análisis de procesos de remoción en masa, los mapas temáticos corresponden a las figuras de pendientes, orientaciones, acumulación de flujos, geología, uso de suelo, curvatura de las laderas y caminos.....	43
Figura 4.3 Deslizamientos ocurridos en los laterales de los caminos de terracería, siendo este un factor que promueve los PRM. El contorno en rojo indica el área de deslizamiento y en amarillo el camino de carretera.....	44
Figura 4.4 Análisis de frecuencia de los factores que promueven la ocurrencia de PRM, en rojo se muestran los factores más dominantes y en amarillo se muestra los factores secundarios de dominancia.....	45
Figura 4.5 Clasificación para máxima similitud por clases igualmente ponderadas, como se puede apreciar, las zonas inestables se encuentran en la parte norte de la cuenca y en el centro en la porción cercana al límite con Guatemala.....	49
Figura 4.6 Clasificación para máxima similitud por clases diferentemente ponderadas, en este caso se dio mayor peso a las clases que presentan una mayor cantidad de celdas ocupando en los sitios con deslizamientos, por lo que la geología tiene un peso mayor a todas las demás clases.....	50
Figura 5.1 Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas del SMN, respecto a la cuenca del río Coatán y la ciudad de Tapachula, como se puede apreciar a pesar de que existe una gran cantidad de estaciones cercanas a la cuenca, muchas de estas no cuentan con datos históricos (más de 30 años) del registro de lluvias, de las 3 estaciones seleccionadas se tomó una para aguas arriba de la cuenca, y dos en el aluvial, uno en porción intermedia y otro en la ciudad de Tapachula.....	54
Figura 5.2 Histograma de precipitaciones de 42 años, ocurridos en el intervalo de 1961 a 2010, en rojo se indica los niveles de precipitación para el año 2005.....	55

Figura 5.3 Histograma de precipitaciones de 44 años, ocurridos en el intervalo de 1961 a 2010, en rojo se indica los niveles de precipitación para el año 2005.....	55
Figura 5.4 Histograma de precipitaciones de 54 años, ocurridos en el intervalo de 1952 a 2007, en rojo se indica los niveles de precipitación para el año 2005.....	56
Figura 5.5 Ojiva de porcentajes de la estación Finca Chicharras, como se puede apreciar la gran mayoría de los datos se encuentran entre los 3500 y 4500 mm/año, mientras que los niveles de lluvia fuera de este intervalo son más escasos.....	57
Figura 5.6 Grafica de probabilidades (probabilístico vs normal) de la estación finca chicharras. Los asteriscos indican los valores de lluvia y la línea sólida es la recta de mejor ajuste, con un coeficiente de correlación R^2 de 0.98.....	58
Figura 5.7 Gráfica de Probabilidades de ocurrencia calculada con los datos de lluvia anuales en la estación Finca Chicharras, como se puede apreciar la probabilidad de que la lluvia del año 2005 sea superada dentro de un intervalo de 1 año es de 37%, mientras que en uno de 5 años es de 90%.....	59
Figura 5.8 Ojiva de porcentajes de la estación Malpaso.....	60
Figura 5.9 Grafica de probabilidades (probabilístico vs normal) de la estación Malpaso, en el que se muestra que los valores de los datos de lluvia (asteriscos) son concordantes con la recta de ajuste (línea sólida). Se calculó un coeficiente de correlación R^2 de 0.99.....	61
Figura 5.10 Gráfica de Probabilidades de ocurrencia calculada con los datos de lluvia anuales en la estación Malpaso. La probabilidad de que la lluvia del año 2005 sea superada dentro de un intervalo de 1 año es de 4%, mientras que en los intervalos de 10 y 20 años es de 36% y 60% respectivamente.....	62
Figura 5.11 Ojiva de porcentajes de la estación Tapachula, en la imagen se muestra que la mayoría de los niveles de precipitación oscilan entre 1700 y 2700 mm/año, los valores fuera de este rango son poco comunes.....	63
Figura 5.12 Grafica de probabilidades (probabilístico vs normal) de la estación Tapachula, en el que se muestra que los valores de los datos de lluvia son concordantes con la recta de ajuste la cual se calculó un coeficiente de correlación de 0.99.....	63
Figura 5.13 Gráfica de Probabilidades de ocurrencia calculada con los datos de lluvia anuales en la estación Tapachula. La probabilidad de que la lluvia del año 2005 sea superada dentro de un intervalo de 1 año es de 5%, para un intervalo de 10 años es 42% para uno de 20 años es 67%.....	64
Figura 5.14 Periodos de retorno para diferentes umbrales diferentes porciones de la cuenca del río Coatán, como se puede apreciar, los niveles de lluvia son diferentes en las 3 porciones de la cuenca para un periodo de retorno definido, siendo mayor en la porción norte de la cuenca.....	65
Figura 5.15 Gráfica probabilística vs normal, de eventos extremos en la estación finca chicharras teniendo un coeficiente de correlación de 0.93.....	67

Figura 5.16 Gráfica de Probabilidades de ocurrencia calculada con los niveles de lluvia en 24 horas en la estación Finca Chicharras. La probabilidad de que la lluvia del año 04/10/2005 sea superada dentro de un intervalo de 1 año es de 5%, para un intervalo de 10 años es 41% para uno de 20 años es 66%.....	68
Figura 6.1 Metodología para el análisis de susceptibilidad a inundaciones, la simulación de lluvia por el arribo del huracán Stan comprende los días tres al 6 de octubre del 2005, los niveles de precipitación de 100 mm, 200 mm y 242 mm corresponden a periodos de retorno de 1.5, 10 y 50 años respectivamente.....	70
Figura 6.2 Malla representativa de un área de inundación, en el cual se ejemplifican los cuadrantes a través de los cuales se calculan las descargas.....	72
Figura 6.3 Cuenca superior del río Coatán, en la cual se realizó la simulación de lluvias para determinar la descarga que tiene en la porción baja de la cuenca, la cual es susceptible a inundaciones, se muestran también los hidrogramas para lluvias de 100 y 200 mm (B) 242 mm (C) y huracán Stan (D).....	76
Figura 6.4 Curvas de descarga en la porción baja de la cuenca para los escenarios de lluvia de 100mm (A) 200 mm (B), 242 mm (C) y el huracán Stan (D) , las descargas muestran un patrón en el cual hay un pico máximo de descarga, Las descargas se muestran en cm/s (eje Y) y tiempo (eje X).....	77
Figura 6.5 Simulaciones numéricas de flujos en la cuenca baja del río Coatán, en el que se muestra la zona de inundación con profundidades ante eventos de precipitación de 100 mm (A) y (B) 200 mm.....	78
Figura 6.6 puente colgante en la comunidad del progreso creado posteriormente al impacto del huracán Stan, la profundidad medida en este punto fue de 7 metros aproximadamente.....	79
Figura 6.7 Simulaciones numéricas de flujos en la cuenca baja del río Coatán, en el que se muestra la zona de inundación con profundidades ante eventos de precipitación de 242 mm (A) y (B) del huracán Stan (674 mm). En las figuras C y D se muestra un acercamiento a la zona de inundación obtenida con base en la imagen de <i>google Earth</i>	80
Figura 6.8 Mapa de susceptibilidad a inundaciones de la ciudad de Tapachula con profundidades del flujo.....	82
Figura 6.9 Mapa de susceptibilidad a inundaciones, donde se muestra el área de inundación en la ciudad de Tapachula.....	83

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipos de uso de suelo en la cuenca del río Coatán.....	30
Tabla 4.1 Resultados de la clasificación por máxima similitud, expresados en porcentaje de confiabilidad y en el número de sitios de deslizamientos observados que fueron clasificados como estables e inestables.....	48
Tabla 5.1 Datos de lluvia estación Finca Chicharras.....	57
Tabla 5.2 Periodos de retorno para diferentes cantidades de lluvia, estación Finca Chicharras...	59
Tabla 5.3 Datos de lluvia estación Malpaso.....	60
Tabla 5.4 Periodos de retorno para diferentes cantidades de lluvia, estación Malpaso.....	61
Tabla 5.5 Datos de lluvia estación Tapachula.....	62
Tabla 5.6 Periodos de retorno para diferentes cantidades de lluvia, estación Tapachula.....	64
Tabla 5.7 Niveles máximos de precipitación por día, en los años de 1970 a 2006. Estación Finca Chicharras.....	66
Tabla 5.8 Periodos de retorno para eventos extremos, Estación Finca Chicharras.....	68
Tabla 6.1 Valores empíricos para el coeficiente de Manning. Tomado de COE, HEC-1 Manual, 1990 y COE, Technical Engineering and Design Guide, No. 19, 1997.....	74

Resumen

La cuenca del río Coatán se desarrolla entre la República de Guatemala y México, en el Estado de Chiapas. En el 2005 dicha zona fue expuesta a inundaciones con daños severos a la ciudad de Tapachula por el paso del Huracán Stan. Por su geomorfología y geología, esta zona se encuentra expuesta a constantes eventos de inundación y procesos de remoción en masa, favorecidos mayormente por las intensas precipitaciones que ocurren durante la temporada de huracanes. El objetivo del presente trabajo es el estudio de los factores que favorecen la ocurrencia de procesos de remoción en masa e inundación en la cuenca del río Coatán, para la obtención de mapas de susceptibilidad que servirán de base para la toma de medidas de mitigación por parte de las autoridades de Protección Civil y así limitar la pérdida de vidas humanas y de materiales durante la ocurrencia de estos eventos.

El presente trabajo se enfoca en dos estudios principales: 1) análisis de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa (PRM) y 2) análisis de la susceptibilidad a inundaciones a lo largo del río Coatán. Para el estudio de la susceptibilidad a PRM se realizó un análisis multivariado, para la definición de los factores morfológicos, geológicos y de uso de suelo que controlan en mayor medida la ocurrencia de PRM. El análisis se realizó con base en la identificación de más de 800 deslizamientos posterior al paso del Huracán Stan. Para el análisis de la susceptibilidad a inundación, se analizó el registro histórico de tres estaciones de lluvia localizadas en la cuenca del río Coatán para definir los tiempos de retorno de lluvia extrema. Con base en el análisis de lluvia, se definieron tres diferentes escenarios de lluvia con periodo de retornos de 1, 10 y 46 años que fueron utilizados para las simulaciones de lluvia/escorrentía para la definición de las posibles zonas de inundación.

Los resultados muestran que los factores que favorecen mayormente a la formación de procesos de remoción en masa son el cambio de uso de suelo y la litología de la zona de estudio. En particular, la litología que corresponde con el intrusivo terciario y el suelo desnudo son los factores que en mayor medida promueven la inestabilidad de ladera. El mapa de susceptibilidad realizado muestra la zonas más susceptibles a PRM con un grado de confiabilidad del 72%. Por otro lado, las simulaciones numéricas para la definición de las zonas susceptibles a inundación en la cuenca baja del río Coatán, muestran que eventos de precipitaciones extremos (lluvias de más de 200 mm con duraciones de más de 12 horas) pueden producir inundaciones en la ciudad de Tapachula, la

cual se extiende en el abanico aluvial del río. Por tales motivos es importante que se tomen medidas de mitigación como diques, barreras o estructuras que contengan los flujos a lo largo del cauce del río, así como también proporcionar indicaciones a la población ante eventos de esta naturaleza.

Capítulo 1. Introducción

Los ciclones tropicales son uno de los fenómenos naturales que han incrementado su ocurrencia debido al cambio climático antropogénico; estos fenómenos tienen un efecto mayor en las zonas tropicales en las cuales tienen una mayor incidencia e impacto. En tiempos recientes el territorio mexicano ha sido afectado por el paso de varios huracanes, con pérdidas económicas y humanas relevantes, como lo son el caso del huracán Mitch (Guiney y Lawrance 2000), Wilma (García-Arróliga et al., 2006), Ingrid (Appendini et al., 2014; Beven 2014) y Manuel (Pasch y Zelinsky 2014; Appendini et al., 2014). Los eventos antes mencionados y las consecuencias son justificación para realizar un estudio dirigido en definir el impacto de la ocurrencia de este tipo de fenómeno natural, para poder mitigar los efectos en las poblaciones expuestas, particularmente en las zonas con líneas de costa. El Estado de Chiapas se encuentra en constante peligro por inundaciones durante la temporada de ciclones tropicales debido a la cercanía que se encuentra con el océano Pacífico y el mar Caribe, en los cuales es común que arriben huracanes generando daños importantes.

La ciudad de Tapachula, es el segundo centro poblacional más grande del Estado de Chiapas, la cual durante su historia reciente (últimos 50 años) ha presentado eventos de inundaciones como resultado de la excesiva acumulación de agua proveniente de la región al norte de la ciudad, en la cual el río Coatán tiene su origen.

Considerando el grado de daños y pérdidas causadas en la ciudad de Tapachula por las inundaciones ocurridas en eventos pasados, se plantea un estudio integral que contemple 1) la definición de los factores que promueven los procesos de remoción en masa a lo largo de la cuenca del río Coatán. 2) determinar las zonas en la ciudad de Tapachula más susceptibles a inundación a través de la aplicación de modelos numéricos

1.1 Área de estudio

El Complejo Volcánico Tacaná (CVT) es un estratovolcán de tipo complejo, considerado como volcán activo en estado de quietud. Se ubica en el sureste de México, en el límite entre México y Guatemala, y representa el límite norte del arco volcánico centroamericano (figura 1.1), el cual surge de manera paralela a lo largo de la costa centro-americana, como producto de la subducción

de la placa de Cocos por debajo de la placa del Caribe (García-Palomo et al; 2006., Arce et al., 2012)

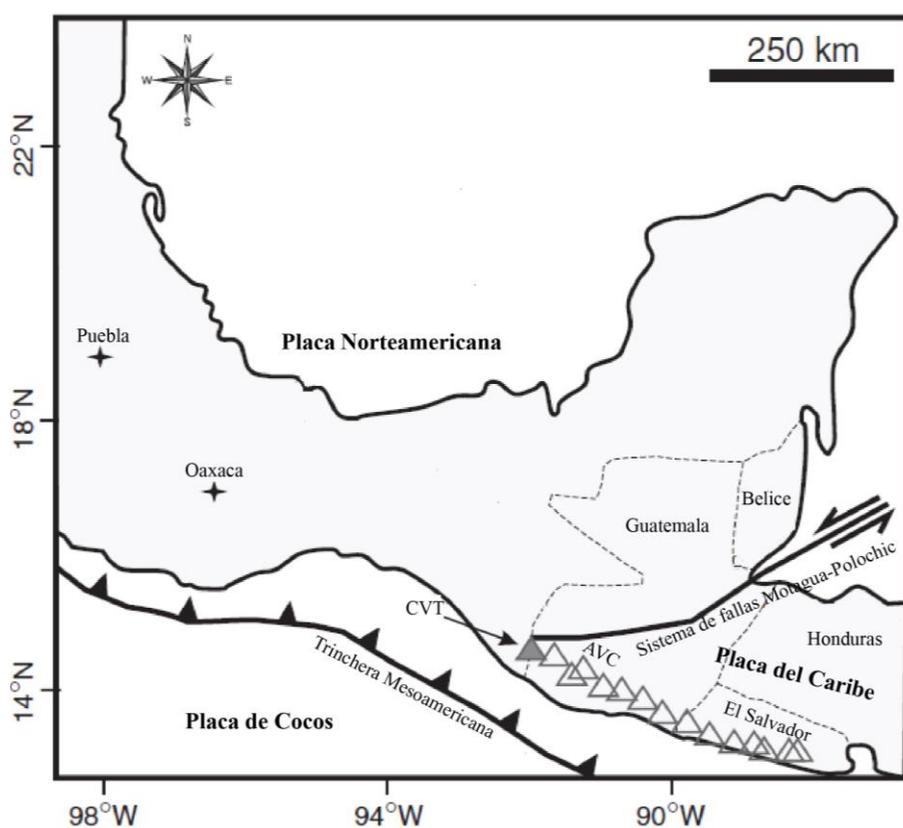


Figura 1.1) Ubicación del volcán Tacaná, modificado de Arce et al., (2012). Abreviaturas:

CVT: Complejo Volcánico Tacaná, AVC: Arco Volcánico Centroamericano

Uno de los centros poblacionales que destacan en las áreas aledañas al CVT, es la ciudad de Tapachula situada al sureste del Estado de Chiapas, a una distancia de aproximadamente 30 km del volcán y 10 km de distancia de la frontera con Guatemala. La ciudad ha sido gravemente afectada por eventos de inundación derivado de los altos niveles de precipitación durante la temporada de huracanes (Murcia y Macías, 2009; García-Arróliga et al., 2006). Como producto de las inundaciones ha habido una gran cantidad de pérdidas humanas y económicas, las cuales se han visto incrementadas en gran medida debido a que una parte importante del crecimiento urbano de la ciudad se ha dado sobre el abanico aluvial del río Coatán (Vázquez-Sánchez et al., 2009), incrementando de manera importante la susceptibilidad a inundaciones.

Uno de los eventos que recientemente ha provocado importantes daños ocurrió en el 2005 por el paso del huracán Stan acompañado por altos niveles de precipitación en la región alta del río

Coatán, generando deslizamientos e inundaciones a lo largo del cauce. Las consecuencias de esa inundación en el Estado de Chiapas fueron un total de 86 muertos y 162,570 personas damnificadas, 32,514 viviendas dañadas y pérdidas por alrededor de 15,031 millones de pesos (García-Arróliga et al., 2006). Además de este evento cada temporada de lluvia se verifican procesos de remoción en masa con la formación de flujos de escombros a lo largo de los drenajes que alimentan el río Coatán y que atraviesan el oeste de la ciudad de Tapachula.

1.2 Justificación

La ciudad de Tapachula actualmente no cuenta con un mapa a detalle de susceptibilidad a procesos de inundación a nivel urbano, solamente se cuenta con un atlas a nivel de estado. La realización del presente proyecto permitirá realizar un mapa de susceptibilidad mismo que podrá servir para mejorar el plan de crecimiento urbano, así como la propuesta de medidas de mitigación. Cabe destacar que el presente proyecto se enmarca en el proyecto aprobado en la convocatoria de Problemas Nacionales 2015 sobre el estudio de “Desastres asociado a eventos hidrometeorológicos en volcanes activos mexicanos”, incluyendo al Volcán Tacaná, en colaboración con la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas y con las autoridades de protección civil del Estado.

1.3 Hipótesis

En la cuenca del río Coatán es común la formación de deslizamientos en las laderas a lo largo del cauce del río, posteriormente los sedimentos son fácilmente removilizados, formando flujos de escombros que al llegar a la desembocadura del valle, depositan una gran carga sedimentaria. Con base en el registro histórico de la lluvia registrada en el área de estudio y considerando los eventos que han provocado la formación de flujos de escombros e inundaciones hacia la ciudad de Tapachula, es posible definir los factores que promueven la ocurrencia de dichos procesos y reproducir diferentes escenarios para la identificación de zona con mayor probabilidad a ser afectada.

1.4 Objetivos

- Realización de una base de datos espacial con la delimitación de las zonas que han sido susceptibles a procesos de remoción en masa durante el paso del huracán Stan.

- Análisis de los factores que favorecieron la ocurrencia de procesos de remoción en masa en la cuenca alta del río Coatán.
- Mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa (PRM) con base en un análisis multivariado.
- Análisis del registro histórico de lluvia para la definición de eventos extremos y su recurrencia.
- Definición de posibles escenarios con base en diferentes umbrales de lluvia.
- Modelado numérico con el código FLO-2D (O'Brien et al., 1993) para definir las zonas de posible inundación con base en los diferentes escenarios establecidos.
- Realización de un mapa de susceptibilidad a inundación para la ciudad de Tapachula.

Capítulo 2. Geomorfología

2.1 Topografía de la zona de estudio

El análisis morfológico del área de estudio se hizo utilizando un Modelo Digital de Elevaciones con 12.5 m de resolución elaborada partir de imágenes radar ALOS (disponible en la página de la NASA <https://search.asf.alaska.edu/>). Los mapas fueron elaborados en ARCGIS 10.1 utilizando las herramientas incluidas en el conjunto *Spatial Analysis Tools*.

El relieve en la zona de estudio varía notablemente en la porción norte y sur del volcán, estas diferencias se denotan mayormente por el cambio en las litologías que afloran en cada una de las zonas y también por los elementos estructurales que se desarrollan en cada uno de los sectores. En la sección norte afloran rocas cristalinas del basamento, así como también por la presencia de paredes de las antiguas calderas. Mientras que en la porción sur afloran mayormente depósitos

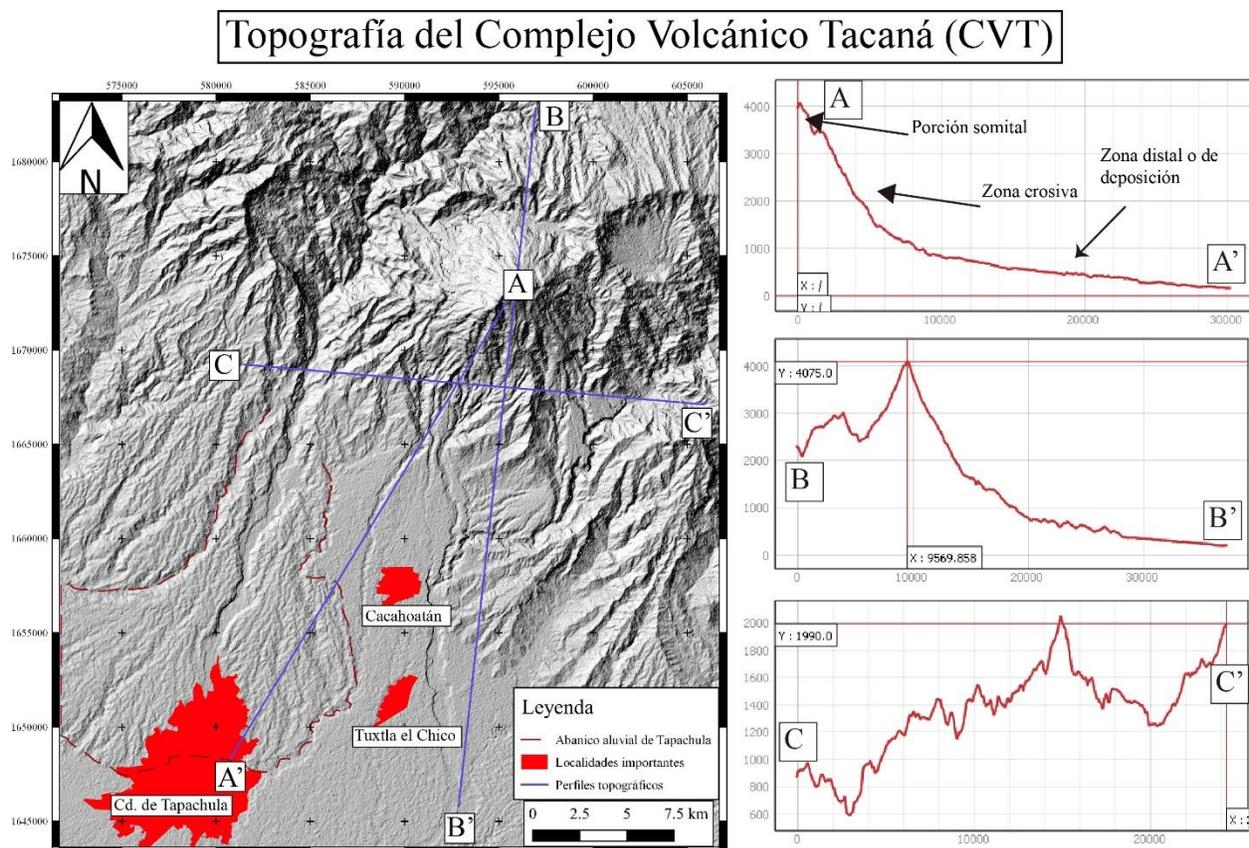


figura 2.1) Topografía del Complejo Volcánico Tacaná, con sus respectivos perfiles topográficos, en los cuales se indica los cambios en la pendiente en las porciones norte y sur, así como también la variación en altura y ancho de las barrancas en la zona erosiva del volcán.

Exageración vertical: perfil A) 3:1, B) 4:1 C) 10:1

piroclásticos derivados de las antiguas erupciones, así como también se da el desarrollo de amplios abanicos aluviales (García-Palomo et al., 2006) (ver Capítulo 3). El denominado Complejo Volcánico Tacaná (CVT) es conformado por los centros eruptivos Chichuj y Tacaná, y los domos Santo Domingo y Plan de las Ardillas (figura 3.5) cuyas secuencias fueron descritas ampliamente por García-Palomo et al., 2006. El CVT tiene una altura de poco más de 3,000 m respecto a los valles aluviales, y poco más de 1,300 m respecto al norte del volcán. Debido a estas diferencias en altura, el cambio de la pendiente del CVT es asimétrico en cada una de las direcciones, como se puede apreciar en la figura 2.1. En dirección hacia el norte del edificio volcánico se presentan

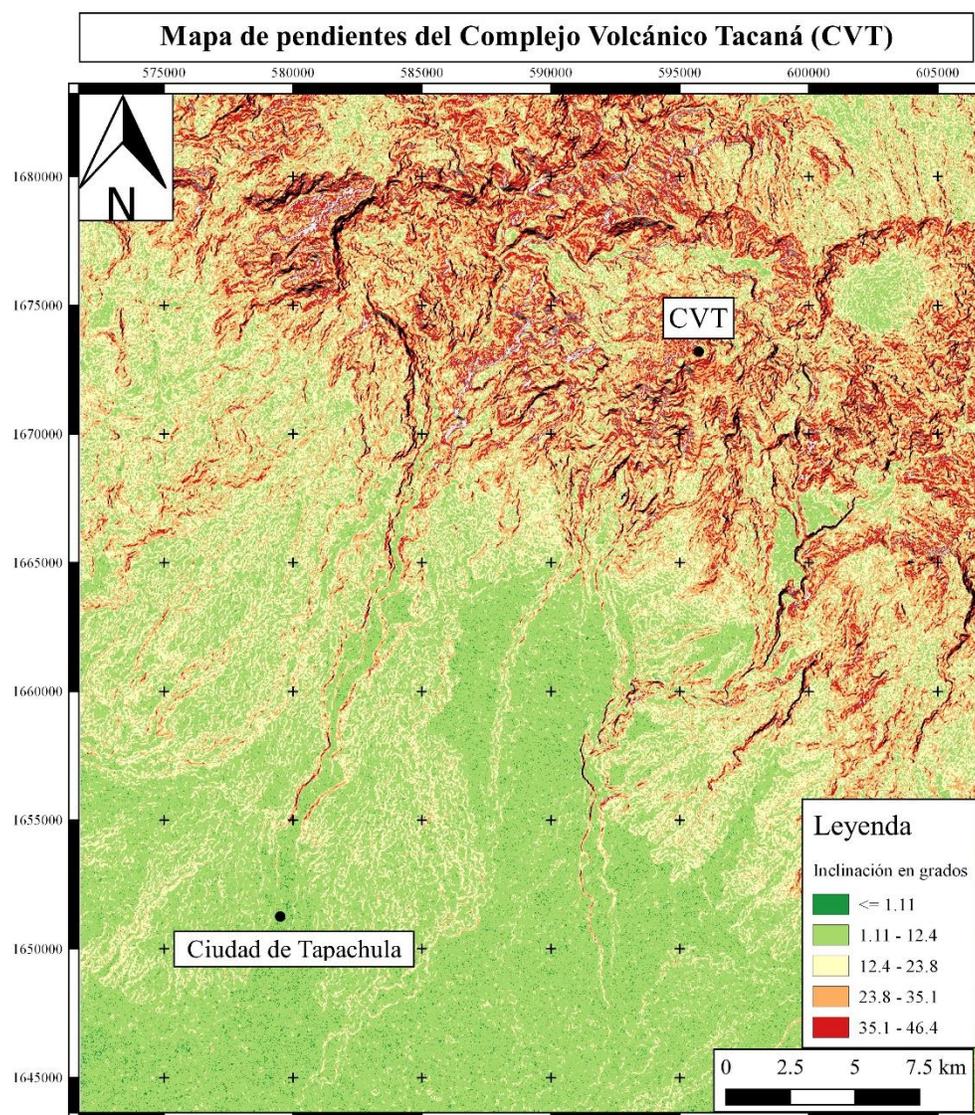


Figura 2.2 Mapa de pendientes del área de estudio, como se puede apreciar existen una disminución desde la cima del volcán hasta la ciudad de Tapachula, mientras que es variable hacia el norte del CVT, en parte influenciados por la existencia de las paredes de las calderas antiguas.

cambios de elevación abruptos y variables, mientras que en dirección hacia el sur hay una disminución gradual en la inclinación, yendo de poco más de 40° hasta 1° (figura 2.2).

Las barrancas desarrolladas en la porción sur del CVT, presentan elevaciones variables y formas asimétricas (figura 2.1). Las barrancas convergen hacia el cauce del río Coatán, desarrollando una amplia cantidad de abanicos aluviales. El presente estudio se centra en el abanico de Tapachula, el cual es el resultado de la deposición de una gran cantidad de sedimentos del río Coatán, originados por la escorrentía proveniente de los altos topográficos del CVT.

2.2 Elementos estructurales

Dentro de la zona de estudio los elementos estructurales más notables son los relictos de las antiguas calderas generadas durante la evolución del CVT, así como también los sistemas de fallas que se desarrollan en las cercanías del volcán (figura 2.3).

Durante el Plioceno tardío y el Pleistoceno se emplazaron tres calderas de colapso en la porción norte de lo que actualmente es el CVT (figura 2.3), estas calderas fueron nombradas San Rafael (2 Ma) Chanjale (1 Ma) y Sibinal (sin edad definida) (García-Palomo et al., 2006). La caldera de San Rafael es la de mayores dimensiones y aflora en la porción norte del CVT, donde mayormente se pueden distinguir sus paredes; es una estructura discontinua y tiene un diámetro estimado de 9 km (García-Palomo et al., 2006). La caldera Chanjale aflora hacia la porción oeste del CVT y posee un cráter abierto hacia el este, cortado por el cauce del río Coatán; esta caldera tiene un diámetro aproximado de 6.5 km. Por último, la caldera Sibinal aflora al este del CVT, la apertura tiene una dirección hacia el sur y tiene un diámetro estimado de 4.8 km.

Los sistemas de fallas que se desarrollan en el área de estudio son un sistema de fallas lateral izquierdo y un sistema de fallas normales con dirección NE-SW identificado por García-Palomo et al. (2006).

El sistema de fallas lateral izquierdo aflora en la porción norte y noroeste del CVT, y es representado principalmente por las fallas Motagua y La soledad (Carta geológico Minera Huixtla SGM 2005), las cuales pertenecen al sistema de fallas Motagua-Polochic (Guzman-Speziale 1989,

Authemayou et al., 2011); dicho sistema de fallas se encuentra activo desde el Cenozoico tardío (Authemayou et al., 2011) y representa el límite entre la placa del Caribe y la Norteamericana.

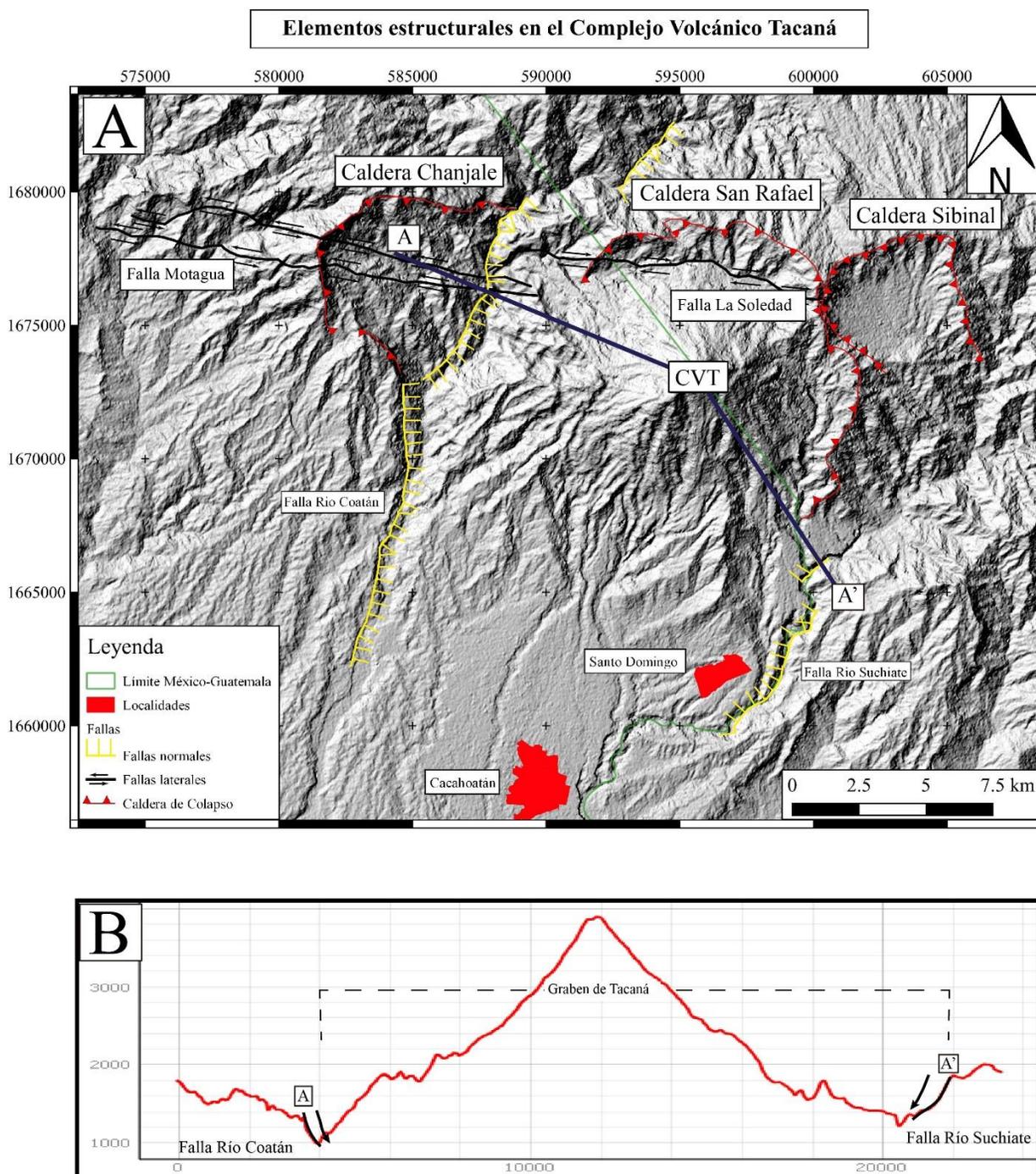


Figura 2.3) A) Elementos estructurales de la zona de estudio, en el cual se pueden apreciar los sistemas de fallas laterales y normales, estas últimas delimitan el graben de Tacaná, las calderas de colapso se localizan en la parte norte del CVT. B) Perfil topográfico del graben de Tacaná, delimitados por las fallas río Coatán y río Suchiate. Exageración vertical 3.75:1

El sistema de fallas normales tienen una dirección noreste-suroeste y se encuentran alineadas a las estructuras volcánicas que conforman el CVT; dicho sistema de fallas se encuentra representado mayormente por las fallas río Coatán y río Suchiate (García-Palomo et al., 2006) las cuales delimitan el graben de Tacaná sobre el cual se ha emplazado el CVT (figura 2.3.A).

Las fallas normales cortan las rocas cristalinas del basamento y las rocas piroclásticas derivadas de las erupciones caldéricas, sin embargo, no cortan a las unidades más jóvenes del Pleistoceno-Holoceno, las cuales conforman el actual CVT, por lo cual se ha determinado que este sistema de fallas se encontró activo posterior al emplazamiento de las calderas (Pleistoceno medio-tardío) pero anterior a la formación del CVT (Holoceno) (García-Palomo et al., 2006).

El graben de Tacaná ha tenido una influencia en el emplazamiento de las estructuras del complejo volcánico, como lo son el volcán Chanjale, Tacaná, y los domos Plan de las Ardillas y San Antonio, debido a que estas estructuras se encuentran alineadas al sistema de Fallas NE-SW.

2.3 Hidrología de la cuenca del río Coatán

La topografía del CVT no presenta una configuración típica de un estratovolcán, así como también de acuerdo a los perfiles topográficos y el mapa de pendientes (figura 2.1 y 2.2), la topografía muestra inclinaciones más pronunciadas al sur del volcán, en el cual se ubica la mayor cantidad de poblados, tanto rurales como urbanos que en su conjunto representan más de 300,000 habitantes (INEGI 2016). Por consiguiente es importante definir cuáles son las zonas de acumulación y los cauces mayores que se presentan en el sur de la zona de estudio, así como también definir las posibles zonas de inundación.

En la figura 2.4 se muestran las zonas de acumulación, en el cual los valores indican la cantidad de celdas que fluyen hacia ese punto, por lo que los valores representan las zonas hacia las cuales el agua pluvial y fluvial se acumulan en mayor cantidad.

En la figura 2.5 se observa que el río Coatán es uno de los drenajes principales de la zona de estudio, hacia el cual drenan los drenajes secundarios del valle principal. El río Coatán se forma

en la República de Guatemala y sigue su cauce hacia el sur, incorporando arroyos formados dentro del CVT.

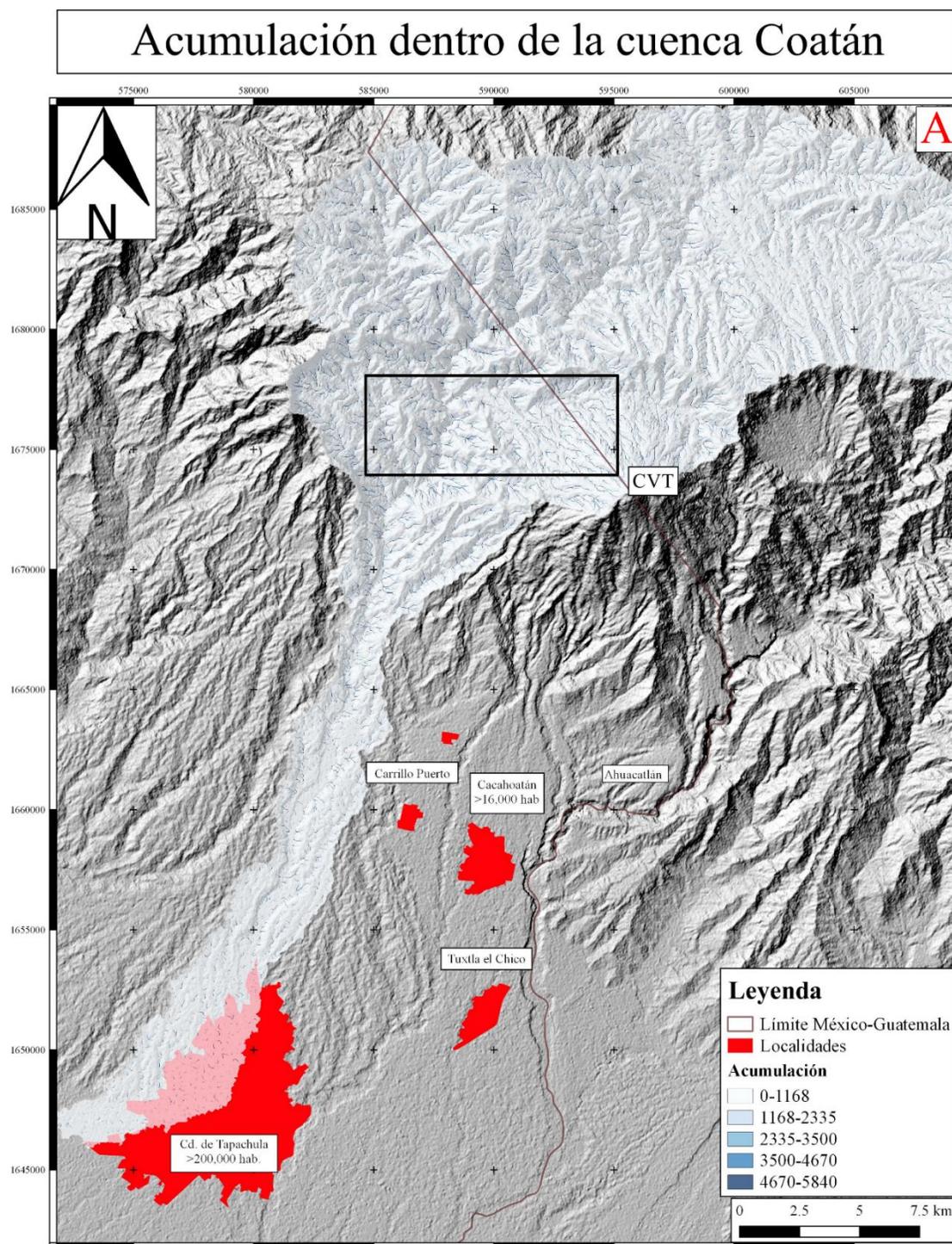


Figura 2.4 Mapa de acumulación de la cuenca del Río Coatán, la escala indica la cantidad de celdas que drenan hacia ese punto.

El río Coatán atraviesa los costados de la antigua caldera de Chanjale, y posteriormente desciende por la ladera atravesando la zona de la falla río Coatán. El cauce del río llega hasta la planicie de la zona de estudio, la cual corresponde a la zona de inundación en las cercanías de la ciudad de Tapachula. La cuenca del río Coatán cubre un área de 451 km² y su forma es muy irregular siendo muy estrecha en la zona de mayores inclinaciones, motivo por el cual la acumulación incrementa notablemente hacia las porciones inferiores del río Coatán, generando flujos de grandes descargas.

El río Suchiate es otro de los drenajes importantes de la zona de estudio y que representan la línea divisoria entre Guatemala y México. Se origina en las cercanías del volcán Tacaná y de las Calderas Sibinal y San Rafael, posteriormente desciende hacia el SE en donde atraviesa a los bordes de algunas zonas pobladas, las cuales cuentan con algunos miles de habitantes, siendo Cacaohatán el poblado más grande con más de 16,000 habitantes (INEGI, 2016).

Por último, existe un río de menor orden, que es el río Cahoacán; de la misma manera que los otros ríos, se forma en las cercanías del CVT y drena hacia la porción sur atravesando al este la ciudad de Tapachula, prácticamente en el límite del área urbana.

2.4 Curvatura y exposición en la cuenca del río Coatán

La curvatura y exposición de las laderas (orientación de las laderas) son uno de los factores que intervienen en la formación de PRM. La curvatura de las laderas en ocasiones también es un factor que interviene en la formación de deslizamientos, ya que según sean cóncavas o convexas pueden representar una zona de acumulación de flujos y sedimentos o bien ser más susceptibles a ser erosionados.

La clasificación de curvatura se limitó a definir si el terreno es cóncavo o convexo (figura 2.6A) siendo la zona convexa representada mayormente por las cimas de las laderas, mientras que las partes cóncavas corresponden a las cuencas que corresponden a las zonas de acumulación de los escurrimientos superficiales.

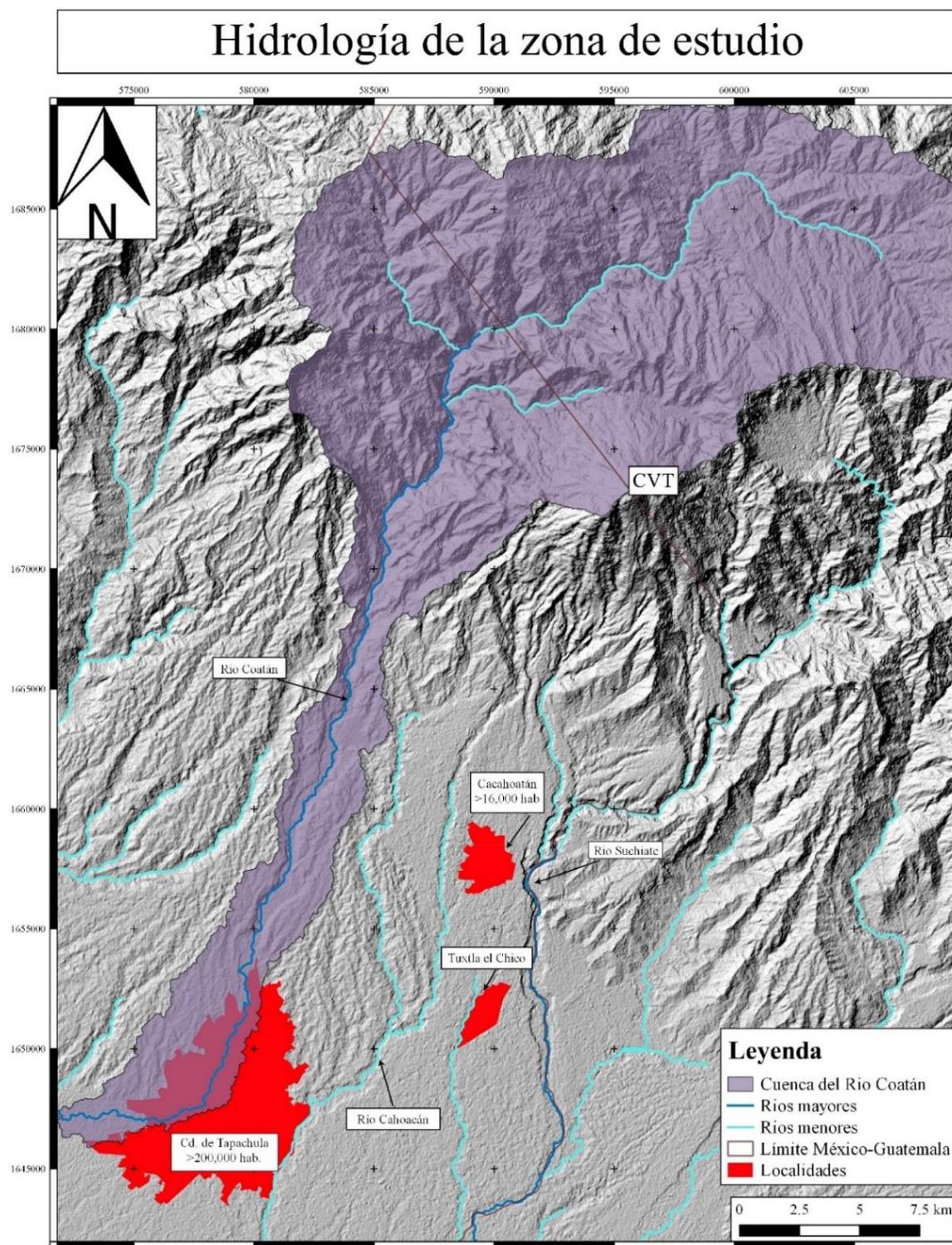


Figura 2.5) Hidrología de la zona de estudio, en el cual se muestra la delimitación de la cuenca del río Coatán y los ríos principales.

En las laderas el intemperismo y el aporte de agua a menudo es mayor en alguna dirección, por lo que si este es el caso en la cuenca, es posible que los PRM se presenten con mayor frecuencia en laderas con una orientación particular. La clasificación de la exposición se limitó a 4 clases, las cuales definen cada una de las direcciones básicas: 0° a 90°, de 90° a 180°, de 180° a 270° y de 270° a 360°. Tanto la exposición, como la orientación, fueron incluidas dentro de los factores que originan los procesos de remoción en masa, el cual será discutido en el capítulo 4.

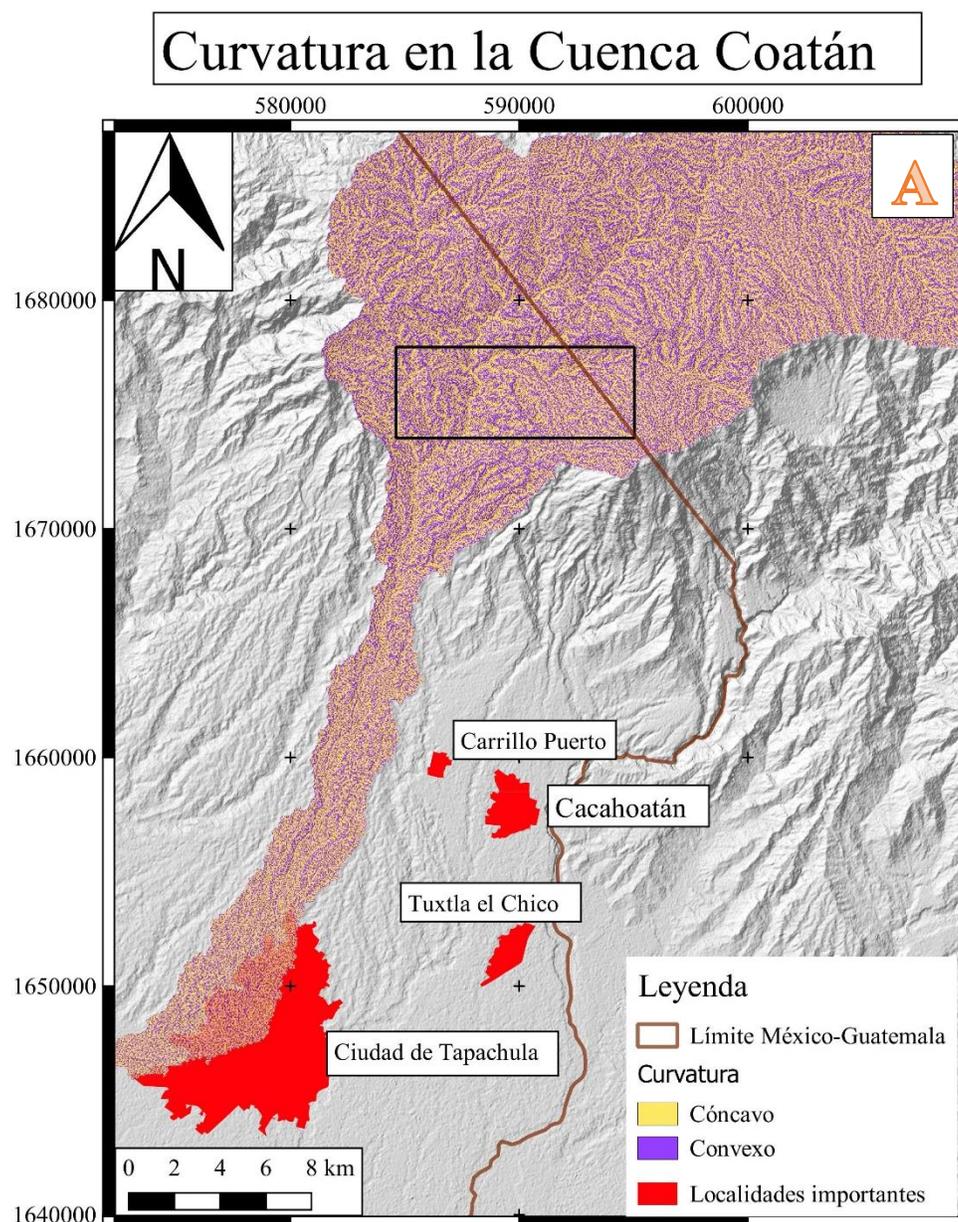


Figura 2.6A) Curvatura de la cuenca del Río Coatán, la imagen se puede apreciar que existe una dominancia de las partes cóncavas. CVT: Complejo Volcánico Tacaná

Se muestra un acercamiento a la zona definida por la figura 2.7b únicamente para mostrar la clasificación que se realizó en ambas figuras.

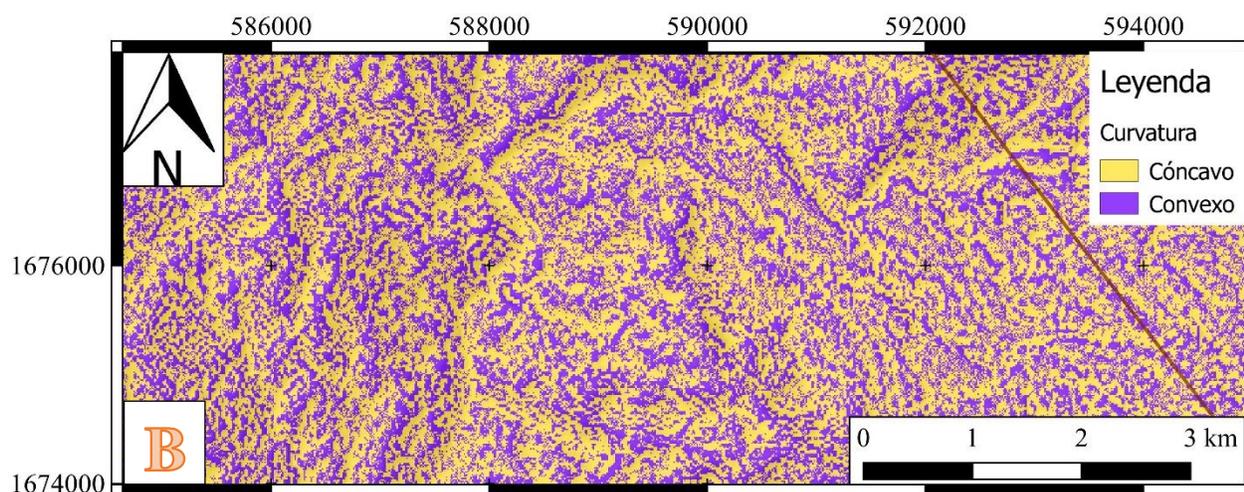


Figura 2.6 B) Acercamiento de la figura 2.6.A, en ésta imagen se aprecia con más claridad la curvatura del terreno, siendo los valles y las pendientes los que mayormente representan las partes cóncavas y las cimas las que representan las partes convexas.

Mapa de Orientaciones en la cuenca Coatán

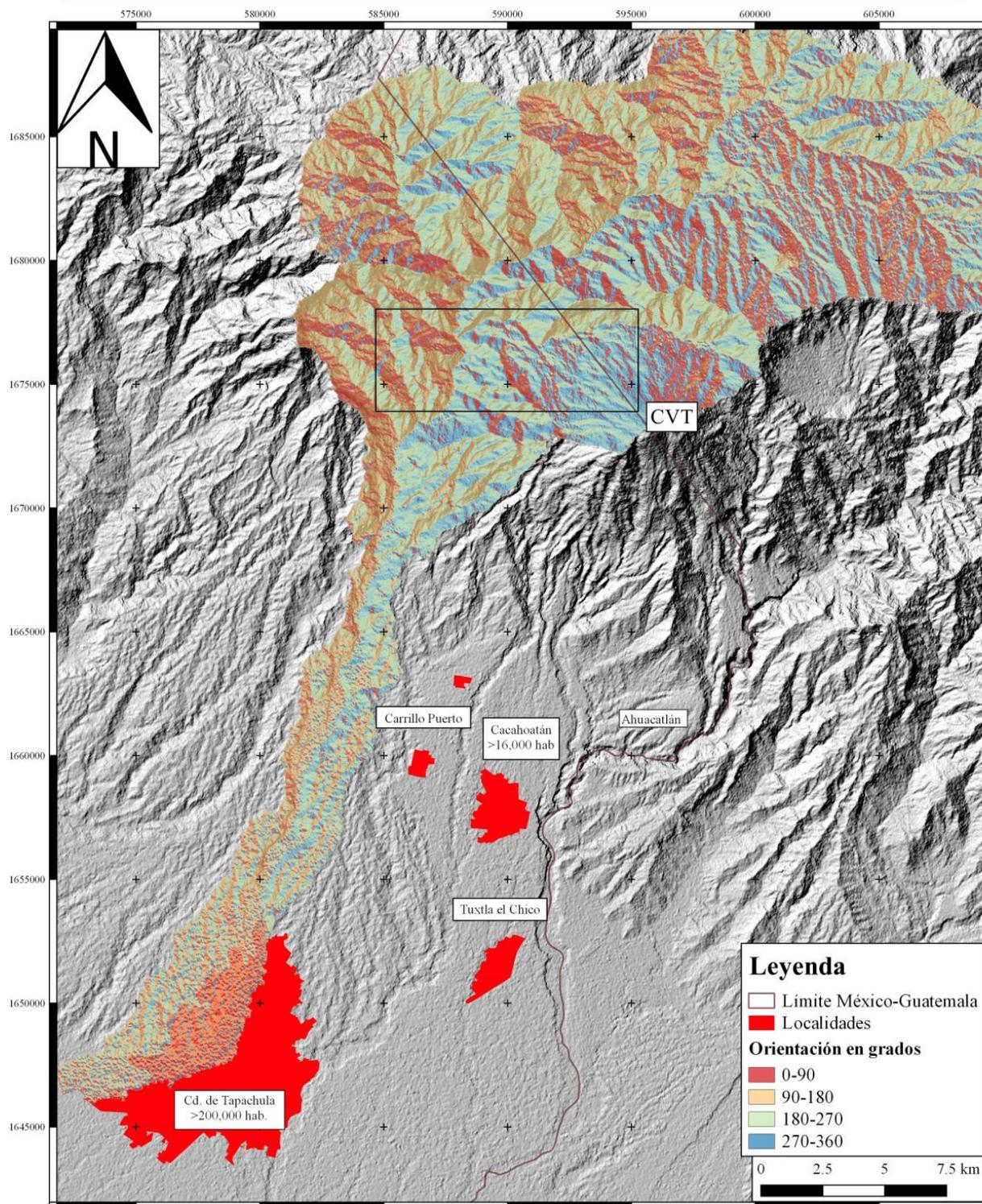


Figura 2.7A) Mapa de orientación o exposición de la cuenca del Río Coatán. CVT: Complejo Volcánico Tacaná

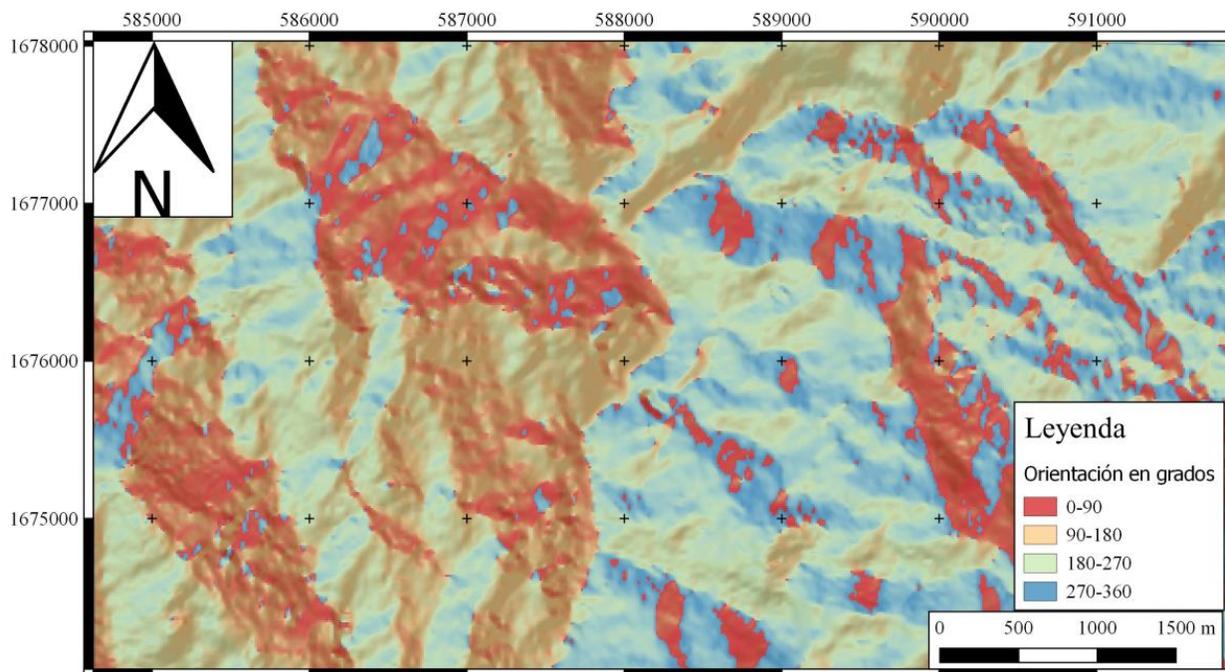


Figura 2.7B) Acercamiento a la figura 2.7A, en el que se muestra a mayor detalle la orientación de las laderas.

2.5 Uso de suelo en la cuenca del río Coatán

La vegetación y el uso de suelo son factores determinantes en el análisis del peligro por deslizamientos e inundaciones, debido a que según sean las condiciones del terreno ocurrirá una mayor filtración, o retención del agua pluvial y fluvial. La ausencia y degradación de la vegetación (comúnmente por cambio de uso de suelo) puede favorecer la inestabilidad de laderas, generando procesos de remoción en masa.

Para identificar el uso de suelo dentro de la cuenca del río Coatán, se seleccionó un conjunto de imágenes de *Google Earth* de febrero del 2006. Se agruparon en total 118 imágenes satelitales, para generar un mosaico de la cuenca, con resolución de 2 m, en el cual se puede apreciar algunos detalles, como áreas urbanas, cultivos, carreteras, sitios de deslizamientos entre otros rasgos geográficos y geomorfológicos.

Posteriormente se empleó el *Software* ENVI, para definir el uso de suelo en el mosaico construido. Se identificaron de manera manual un conjunto de píxeles que coincidieran con un tipo de uso de suelo (tabla 2.1). En total se designaron tres tipos con sus respectivas curvas de reflectancia (figura 2.8). Los tipos de suelo definidos son: 1) suelos desnudos 2) vegetación natural 3) zonas de

pastizal, en estos últimos se incluyen los pastizales antropogénicos (césped) y las zonas agrícolas. Adicional a esto también se identificaron los cuerpos de agua.

Tabla 2.1 Tipos de uso de suelo en la cuenca del río Coatán

Uso de suelo	Regiones de interés (ROI) Interpretados	Píxeles comprendidos en las ROI de interpretación
1. Suelos desnudos	46	29978
2. Vegetación natural	36	433140
3. Cuerpos de agua	7	1107
4. Pastizales	46	114913

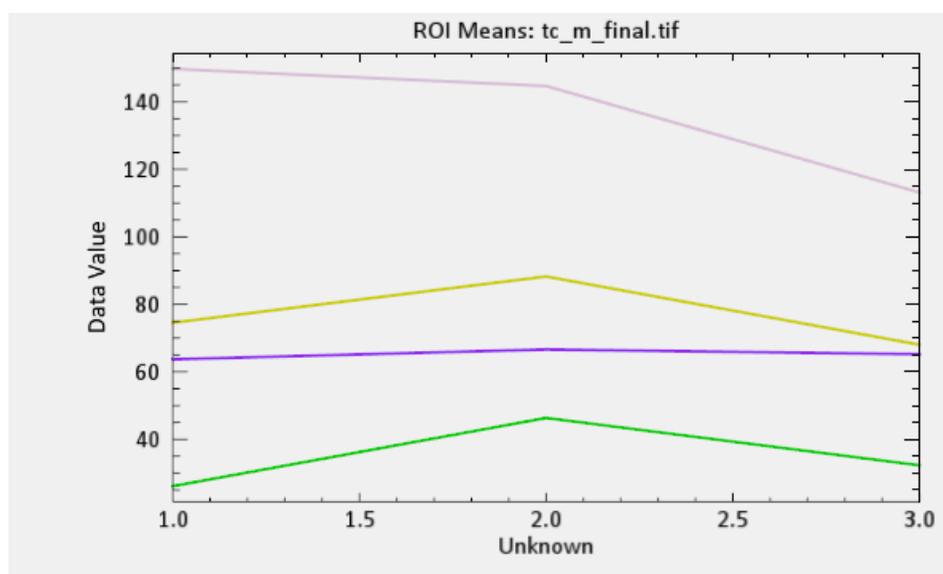


Figura 2.8) Curvas de reflectancia de los tipos de uso de suelo. Línea Rosa: Suelo desnudos, línea amarilla: Pastizales, línea morada: Cuerpos de agua, línea verde: Vegetación natural

Finalmente, se segmentó la imagen utilizando la herramienta *Maximum Likelihood Classification* disponible en el menú de Clasificación Supervisada del programa ENVI, y posteriormente se validaron los resultados por medio de Matrices de Confusión con una precisión del 90.2% , (figura 2.9).

En total se estimaron 231 km² de áreas de vegetación natural siendo el más dominante en el área de estudio, los pastizales y las áreas agrícolas son la segunda más abundante con un área de 100 km² y los suelos desnudos representan únicamente 62.3 km² de la cuenca.

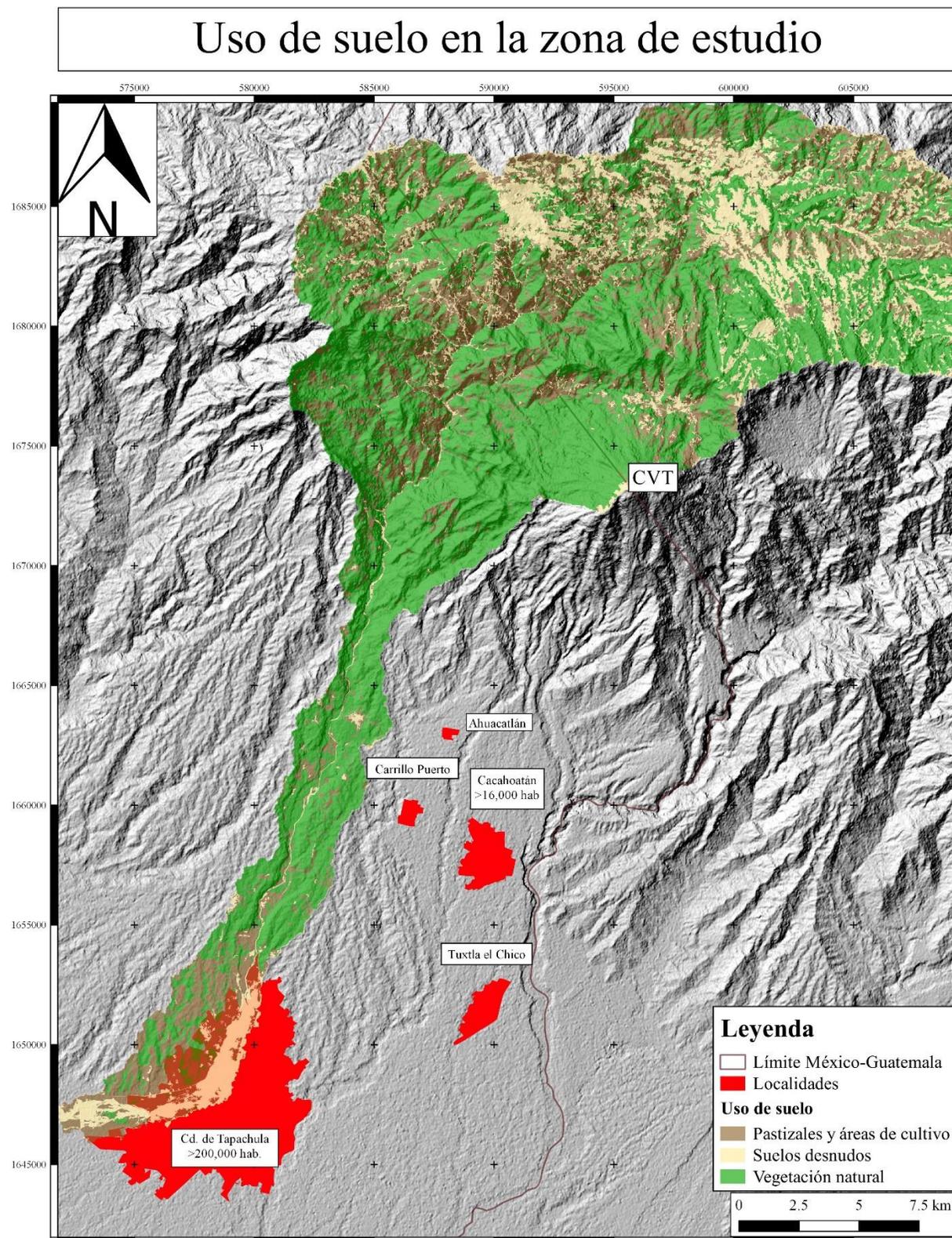


Figura 2.9) Uso de Suelo dentro de la cuenca del Rio Coatán, como se puede apreciar hay una dominancia de la vegetación natural dentro de la cuenca del rio. CVT: Complejo Volcánico Tacaná

Para mejorar la definición de los usos de suelo, se consultaron las cartas de uso de suelo D15-2 y D15-5 de INEGI 2015. De acuerdo a estas fuentes la vegetación en las cercanías del CVT es bosque mesófilo de montaña y en menor medida bosque de pino. En la porción norte de la cuenca, además de esta vegetación, también existe una zona destinada a la agricultura de temporada. Por otro lado, en la porción media de la cuenca, en las cercanías a los poblados Unión Juárez, Cacahoatán, y Ahuacatlán, el uso de suelo es mayormente agrícola temporal (con dependencia de las lluvias para el riego) y con cultivos permanentes; así mismo existe una región más reducida que corresponde a pastizales cultivados en las cercanías a las áreas urbanas. En las colindancias del sur de la cuenca del río Coatán, en las cercanías a la ciudad de Tapachula existen grandes áreas destinadas al uso agrícola de diferentes tipos, tanto permanentes como anuales, así como también los que dependen de lluvias de temporada y en menor medida los que cuentan con un sistema de riego artificial (INEGI 2015).

Capítulo 3. Geología

3.1 Geología regional de la zona de estudio

La geología de la zona de estudio ha sido descrita en los artículos de Böse (1902,1903), De-la Cruz y Hernández (1985), Saucedo-Giron y Esquivias (1988), Macías et al., (2000), Macías (2005) y García-Palomo et al., (2006). En los trabajos antes mencionados se caracterizan las principales unidades estratigráficas y rasgos estructurales que conforman el basamento del CVT, siendo este último el rasgo geológico que más destaca dentro de la cuenca del río Coatán.

La estratigrafía de la zona de estudio se puede agrupar en 3 grupos principales (figura 3.3), los cuales yendo, desde el más antiguo al más joven, corresponden a las rocas del basamento representadas por rocas metamórficas (esquistos y gneis) de edades del Cretácico temprano. El basamento fue intrusionado posteriormente por rocas graníticas en dos pulsos, el primero durante el Eoceno tardío-Oligoceno temprano y el segundo durante el Mioceno medio (García-Palomo et al., 2006).

El segundo grupo comprende las unidades derivadas de la formación de las calderas San Rafael (2Ma), Chanjale (1Ma.), y Sibinal sin edad definida (García-Palomo et al., 2006). Sobreyaciendo a las unidades caldéricas, se encuentra el grupo de rocas que comprende los depósitos volcanoclásticos recientes, derivados de la formación del CVT (de ~0.8 Ma al reciente), el cual incluye depósitos de caída, depósitos de corrientes piroclásticas de densidad (CPDs) y depósitos derivados de procesos gravitacionales como avalanchas de escombros, lahares y flujos de escombros (García-Palomo et al., 2006).

El basamento de la zona de estudio es de edades mesozoicas (García-Palomo et al., 2006, Macías 2005) y es compuesto por gneis, esquistos y rocas metavolcánicas de edades correspondientes al Cretácico inferior (García-Palomo et al., 2006).

Las rocas mesozoicas fueron intrusionadas en dos etapas diferentes por magmas de composición granodiorítica y tonalítica (Mugica, 1987, García-Palomo et al., 2006). El primer pulso ocurrió durante el Eoceno tardío-Oligoceno temprano (35 Ma-29 Ma), y el segundo durante el Mioceno medio (20 Ma-13 Ma).

Los intrusivos son una de las litologías que afloran mayormente en la zona de estudio (figura 3.1 y 3.4) particularmente en la porción norte de la zona de estudio. Las rocas graníticas se presentan como rocas frescas, aunque también como rocas altamente alteradas y fragmentadas a tamaños finos debido al intemperismo.



Figura 3.1) Afloramientos de intrusivos terciarios de composición granítica, en la figura 3.1A se muestra el granito fresco, mientras que en la figura 3.1B se muestra altamente alterado, una gran cantidad de deslizamientos ocurren en éste tipo de litologías.

Sobreyaciendo a las rocas del basamento se encuentran las secuencias derivadas de erupciones caldéricas (figura 3.3 y figura 3.4). La caldera más antigua es la de San Rafael (2Ma); las paredes de esta antigua caldera se encuentran al norte del CVT con una apertura hacia el sur, y en su cercanía se encuentran mejor expuestos los depósitos de la secuencia San Rafael (CSr, figura 3.4). Las erupciones de la caldera dieron origen a una secuencia compuesta por una ignimbrita basal de coloración verde característica, una serie de coladas de lavas de composición andesíticas y depósitos de avalanchas de escombros (García-Palomo et al., 2006).

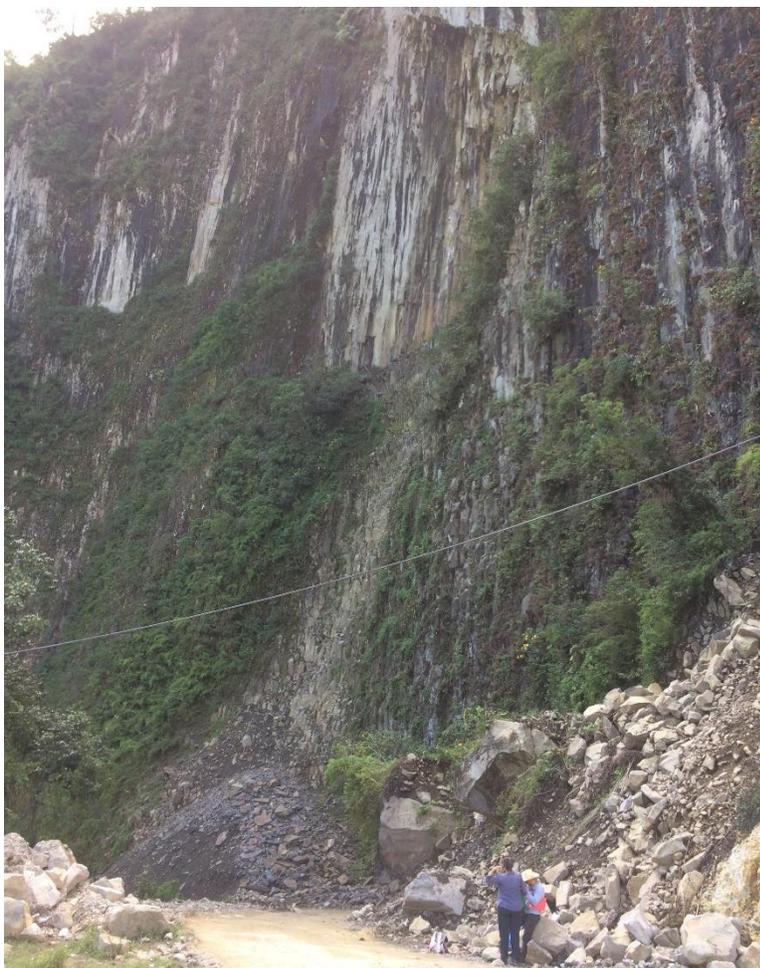


Figura 3.2) ejemplo de derrumbes típicos en una de las paredes de la caldera Chanjale, a un costado de los caminos, las paredes alcanzan hasta 70 metros de espesor.

Sobre los depósitos de la caldera San Rafael se encuentran los depósitos de la caldera Chanjale la cual se encuentra en el oeste del CVT y posee un cráter abierto hacia el este (figura 3.2 y 3.4). La secuencia Chanjale (CCh, figura 3.4) comprende una secuencia de lavas andesíticas, depósitos de ignimbrita (CPDs) y depósitos de flujos de escombros. Los depósitos de ignimbrita son característicos por tener una coloración blanca con alteraciones hacia el color café, con minerales de plagioclasa, cuarzo y ferromagnesianos; las CPDs consisten en flujos de bloques y ceniza principalmente. El espesor total de la secuencia se estima en 200 m (García-Palomo et al., 2006).

Las paredes de la caldera Chanjale afloran con grandes espesores en la porción noroeste de la zona de estudio. Las unidades de lavas también han generado una gran cantidad de PRM de tipo vuelco y derrumbes (figura 3.2) los cuales en ocasiones obstruyen los caminos.

Por último, la caldera Sibinal aflora al este del CVT con una apertura hacia el sur. La secuencia Sibinal (CS, figura 3.4) dio origen a una gran cantidad de flujos de lava de composiciones andesíticas, así como también a varios depósitos volcanoclásticos entre los cuales se han encontrado depósitos de caída y depósitos de flujos de escombros (García-Palomo et al., 2006). Aunque no está bien definido el tiempo durante el cual se encontró activa la caldera Sibinal, se fechó uno de los depósitos de caída derivados de esta actividad en 32,000 años A.C. y fue

nombrada como Caída de Pómez Sibinal (García-Palomo et al., 2006), motivo por el cual se asume que la secuencia Sibinal es más joven que la Chanjale y San Rafael. En la secuencia Sibinal no se han descrito depósitos de ignimbrita asociados a la caldera, y se sugiere que la estructura semicircular pudiera estar relacionada con colapsos gravitacionales (García-Palomo et al., 2006).

Los depósitos volcanoclásticos derivados de la formación del CVT conforman el tercer paquete de rocas de la zona de estudio (figura 3.3 y figura 3.4), el emplazamiento del CVT moderno ocurrió durante el Pleistoceno Tardío-Holoceno (García-Palomo et al., 2006) en el cual se formaron los volcanes Chichuj, Tacaná y los domos Santo Domingo y Plan de las Ardillas (figuras 3.3 y 3.5)

3.1.1 Estratigrafía del Complejo Volcánico Tacaná

La secuencia más antigua que conforma el CVT moderno es la secuencia Chichuj (SCh, figura 3.4), estos depósitos se encuentran mayormente expuestos hacia el sector este del CVT, y también se muestra una estructura de colapso con vista hacia el oeste. Los depósitos derivados de la actividad del volcán Chichuj incluyen flujos de lava andesíticas con xenolitos incrustados, depósitos de avalanchas y depósitos de corrientes piroclásticas de densidad, representados tanto por flujos de pómez y ceniza como flujos de bloques y ceniza.

La secuencia Tacaná (ST, figura 3.4) aflora sobre la secuencia Chichuj, y se han identificado más de 10 unidades que la conforman, entre las cuales se encuentran coladas de lava, avalanchas de escombros, corrientes piroclásticas de densidad densas y diluidas, depósitos de caída y lahares.

La unidad más antigua de la secuencia Tacaná es un depósito de flujo de bloques y ceniza, expuesto en el sur del volcán, el depósito es masivo y conformado por bloques de lava andesítica de color gris y rojas en menor medida embebidos en una matriz de ceniza. De acuerdo a Espíndola et al., (1989) la edad de este depósito es de 42,000 años, con base en fragmentos de carbón encontrados en el depósito.

En el noroeste del CVT aflora el depósito de avalancha de escombros Agua Caliente (Macías et al., 2004), el cual cubre un área de 6 km² y se estimó un volumen de aproximadamente 1km³, teniendo espesores máximos de hasta 200 m en las cercanías con el río Coatán (figura 3.4), la edad de este depósito fue estimada en 26,340 +910/-820 años de acuerdo a un fechamiento realizado en un fragmento de carbón encontrado en un depósito de flujo de escombros que suprayace el depósito de avalancha. (García-Palomo et al., 2006).

En el norte del volcán, la secuencia Tacaná se encuentra representada por varias unidades de flujo de bloques y cenizas de composiciones andesíticas soportadas por una matriz de ceniza, mientras que en el E-NE del volcán la secuencia Tacaná es más variable, aflorando depósitos de caída de pómez, intercalados con corrientes piroclásticas de densidad densas y diluidas.

Las edades de los depósitos de la secuencia Tacaná oscilan entre los 32,290 y 16,530 (Mora et al., 2004, García-Palomo et al., 2006), indicando que en este tiempo, la actividad volcánica fue caracterizada por erupciones explosivas de gran magnitud y colapsos del edificio volcánico.

Los depósitos de la secuencia Plan de las Ardillas (PSAr, figura 3.4) son de composiciones andesíticas y textura porfídica. La secuencia se encuentra conformada por un domo central y dos coladas de lava (García-Palomo et al., 2006) las cuales afloran en los flancos noroeste y suroeste del volcán San Antonio y Tacaná.

La secuencia San Antonio (SSAN, figura 3.4) está compuesta por coladas de lava de composición basáltica-andesítica y algunas corrientes piroclásticas de densidad (García-Palomo et al., 2006), entre los cuales destaca el flujo piroclástico Mixcun en el flanco sur del CVT (figura 3.4); este es un depósito de bloques y ceniza, compuesto por bloques de composiciones andesíticas embebidos en una matriz de ceniza.

El flujo Mixcun fue estudiado ampliamente por Macías et al., (2000) los cuales estimaron un volumen mínimo de 0.12 km^3 , un área de cobertura de al menos 25 km^2 , así como también una edad de 1950 A.C. Debido a lo reciente de este evento los autores concluyen que este pudo haber afectado la expansión de los centros poblacionales de los habitantes prehispánicos.

Existen registros de erupciones en el CVT en el tiempo histórico, de las que destacan una ocurrida en 1949 y otra en 1986; en la erupción del 22 de diciembre de 1949 los pobladores de la zona observaron columnas blancas provenientes del volcán, con posterior caída de ceniza, esta erupción fue posterior a un sismo ocurrido el mismo día en el volcán Tacaná (Macías 2005).

Después de 36 años de inactividad del volcán, en diciembre de 1985 en las cercanías del volcán se comenzaron a presentar una serie de sismos, los cuales produjeron daños a las poblaciones cercanas al volcán y continuaron incrementado en frecuencia hasta mayo de 1986 (Macías 2005). Finalmente el 8 de mayo cuando se presentaba una frecuencia muy alta de sismos por día, ocurrió una erupción que dio origen a una columna de 1 km de altura, la cual estaba compuesta

mayormente por vapor de agua y con déficit de componentes magmáticos, posterior a este evento los sismos disminuyeron notablemente (De-la Cruz et al., 1989, Martini et al., 1987).

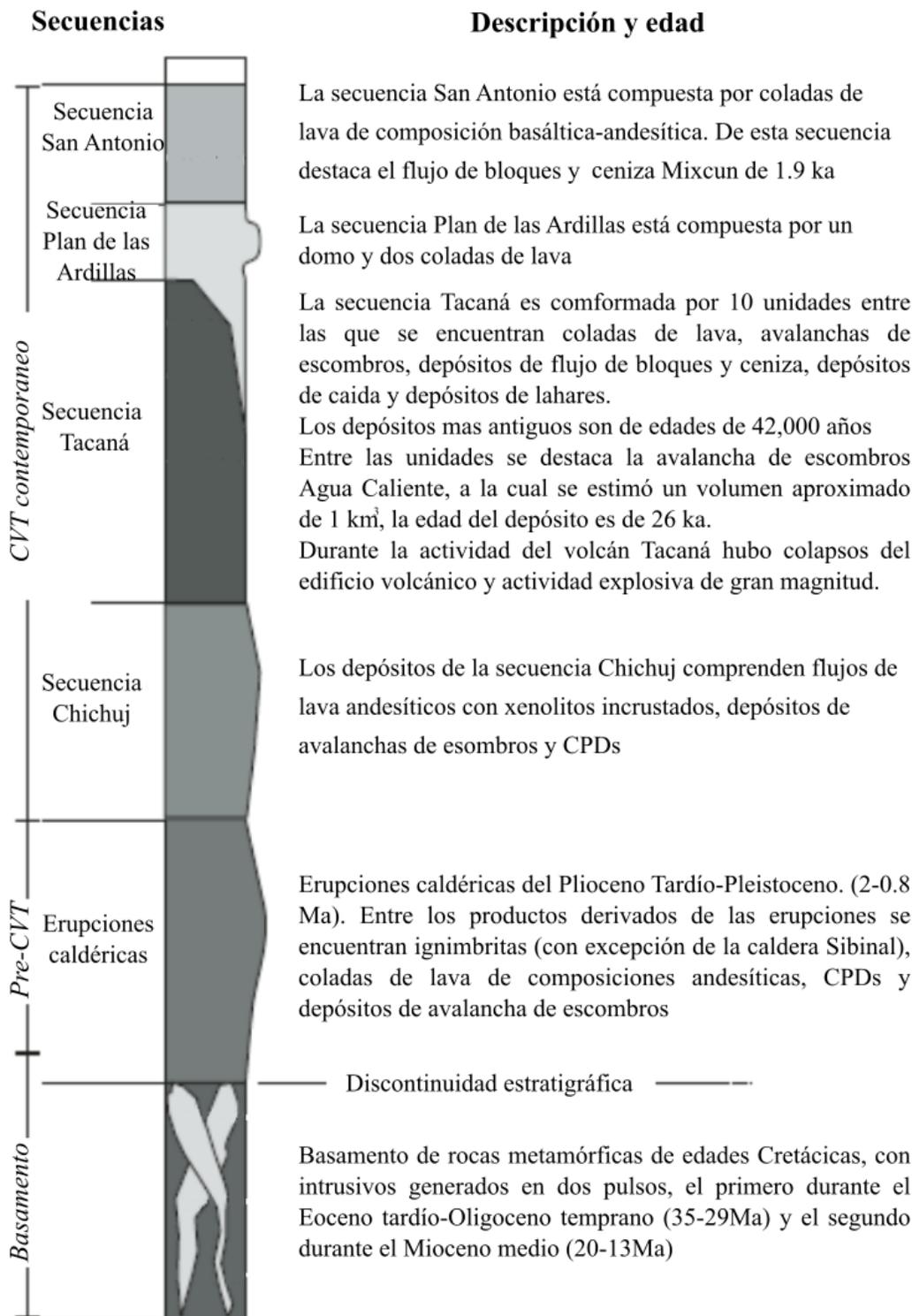


Figura 3.3) Columna estratigráfica simplificada del Complejo Volcánico Tacaná (CVT), tomado y editado de García-Palomo et al., (2006)

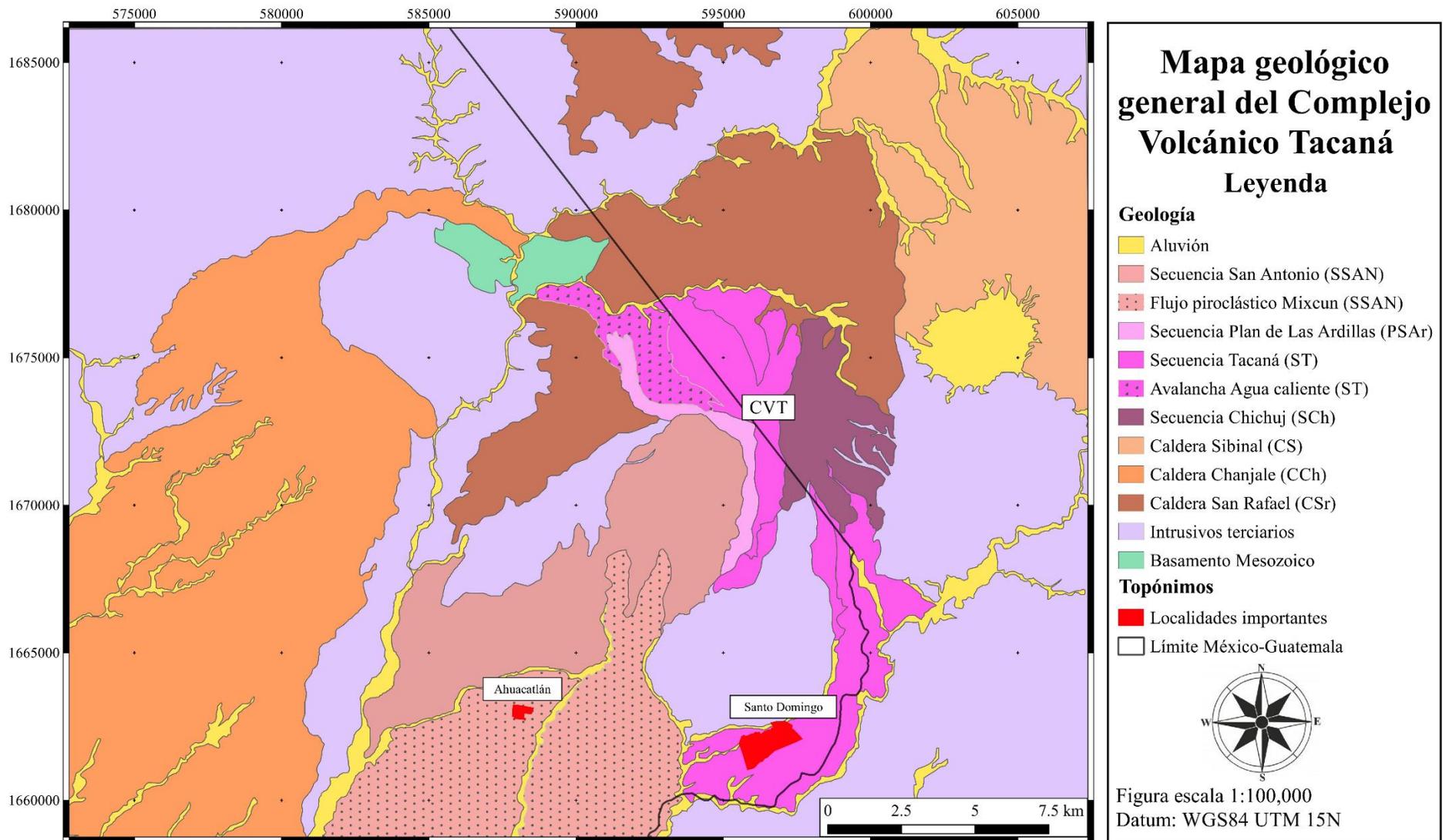


Figura 3.4) Mapa geológico general del Complejo Volcánico Tacaná (CVT) en la porción norte y centro de la cuenca del río Coatán, Modificado de Macías (2005) y García-Palomo et al., (2006)

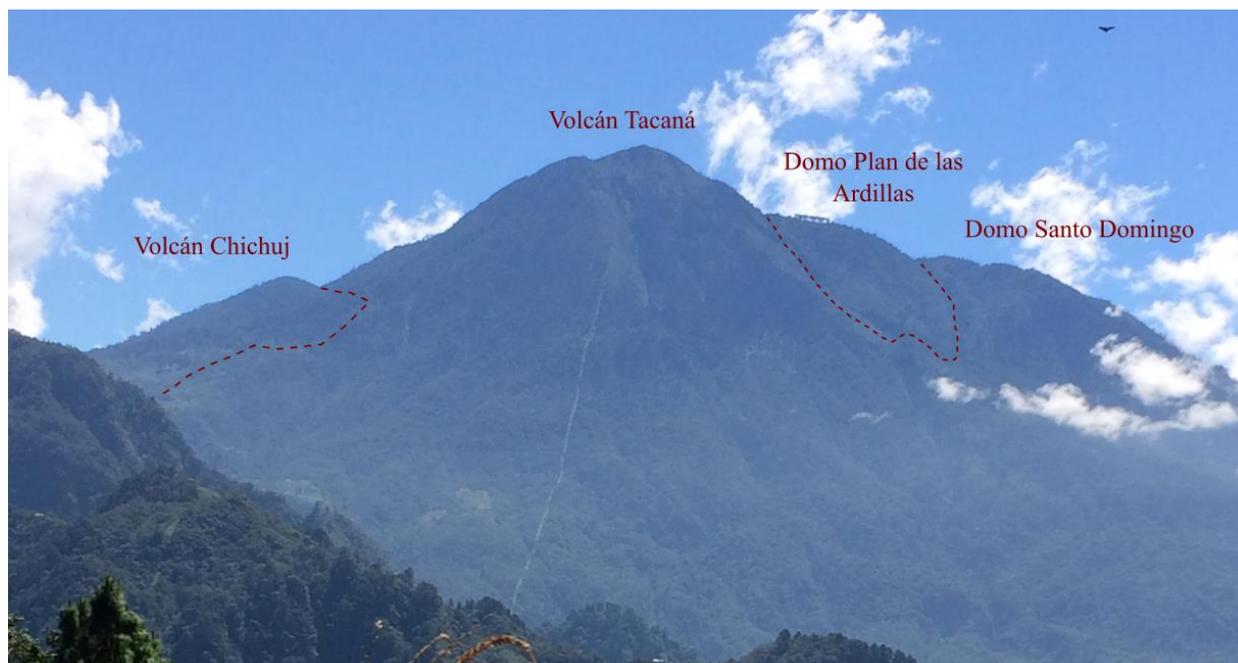


Figura 3.5) Edificios volcánicos que conforman el CVT

Capítulo 4. Análisis de susceptibilidad a procesos de remoción en masa

4.1 Inventario de deslizamientos en la cuenca del río Coatán

Durante octubre del 2005 el sureste de la república mexicana fue afectado por el arribo del Huracán Stan (1 al 4 de octubre) y por el Huracán Wilma (21 al 24 de octubre) siendo el primero el que generó una mayor cantidad de precipitación en la cuenca del río Coatán y teniendo como resultado una gran cantidad de PRM. Se realizó un inventario de deslizamientos con base en el mosaico que se generó para definir el uso del suelo en el inciso 2.5 del presente trabajo. Se identificaron en total 873 deslizamientos en el área de la cuenca perteneciente a México y las áreas cercanas al límite entre México y Guatemala (figura 4.1), limitándose únicamente a esta área la zona de estudio para el análisis de PRM. La mayoría de estos deslizamientos tiene una distancia de desplazamiento pequeña (alrededor entre los 100 m). Los 873 deslizamientos identificados cubrieron un área poco mayor a 3 km², y el área promedio para cada uno fue de 4,430m². Para su identificación en el mapa, se colocó un punto en el escarpe principal del deslizamiento, el cual representa la zona de ruptura inicial que le dio origen.

En este capítulo se presenta la metodología (figura 4.2) y resultados (figura 4.5 y 4.6) de un análisis multivariado para la identificación de las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia a PRM con base en los mapas de pendientes, orientaciones, curvatura, geología, acumulación de flujo y uso de suelo (variables independientes), los cuales fueron descritos en los capítulos 2 y 3 de la presente tesis. Aunado a eso, es importante considerar que los cortes carreteros son otro factor importante que puede favorecer los PRM. Con base en las imágenes satelitales, se pudo identificar que una gran cantidad de deslizamientos ubicados en la zona de estudio ocurrieron en las cercanías a los caminos de tierra (figuras 4.1 y 4.3), los cuales intercomunican los poblados en la cercanía al volcán Tacaná y a la ciudad de Tapachula, por lo cual este factor será uno de los parámetros a considerar en el análisis multivariado de PRM. Con base al mapa de inventario, fue posible establecer cuáles de las variables independientes son las que mayormente condicionan la ocurrencia de los PRM, y así definir el mapa de susceptibilidad a PRM en la cuenca del río Coatán.

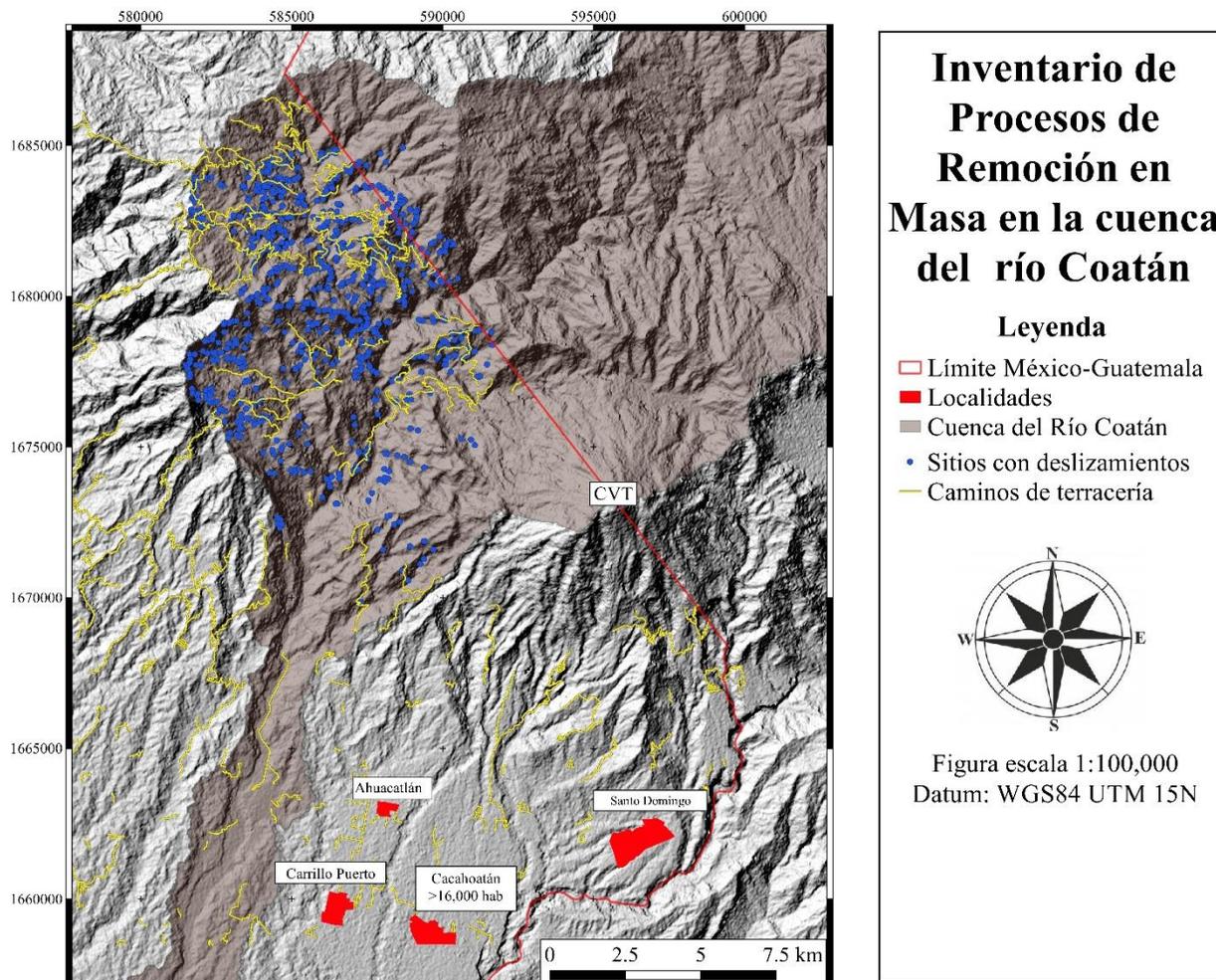


Figura 4.1) Inventario de deslizamientos en la cuenca del Río Coatlán, también se muestran los caminos de terracería y su ubicación cercana respecto a los sitios de deslizamientos, mayormente en la porción norte y noroeste del CVT.

4.2. Factores determinantes en la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

Con base en la identificación de los sitios en los cuales ocurrieron deslizamientos durante el evento de altas precipitaciones del 2005, y con los mapas que contemplan las variables para el análisis multivariado (pendientes, orientaciones, uso de suelo, etc.), se definieron los valores de las variables independientes en cada uno de los puntos donde ocurrieron los deslizamientos, para identificar cuáles son los factores más repetitivos y por consiguiente dominantes en la formación de PRM.

Los resultados del análisis se muestran en la figura 4.4, en donde se muestra el histograma de frecuencias para toda el área de estudio. Con base en esta figura se puede identificar que los factores más dominantes son la geología, el uso de suelo, acumulación y la pendiente.

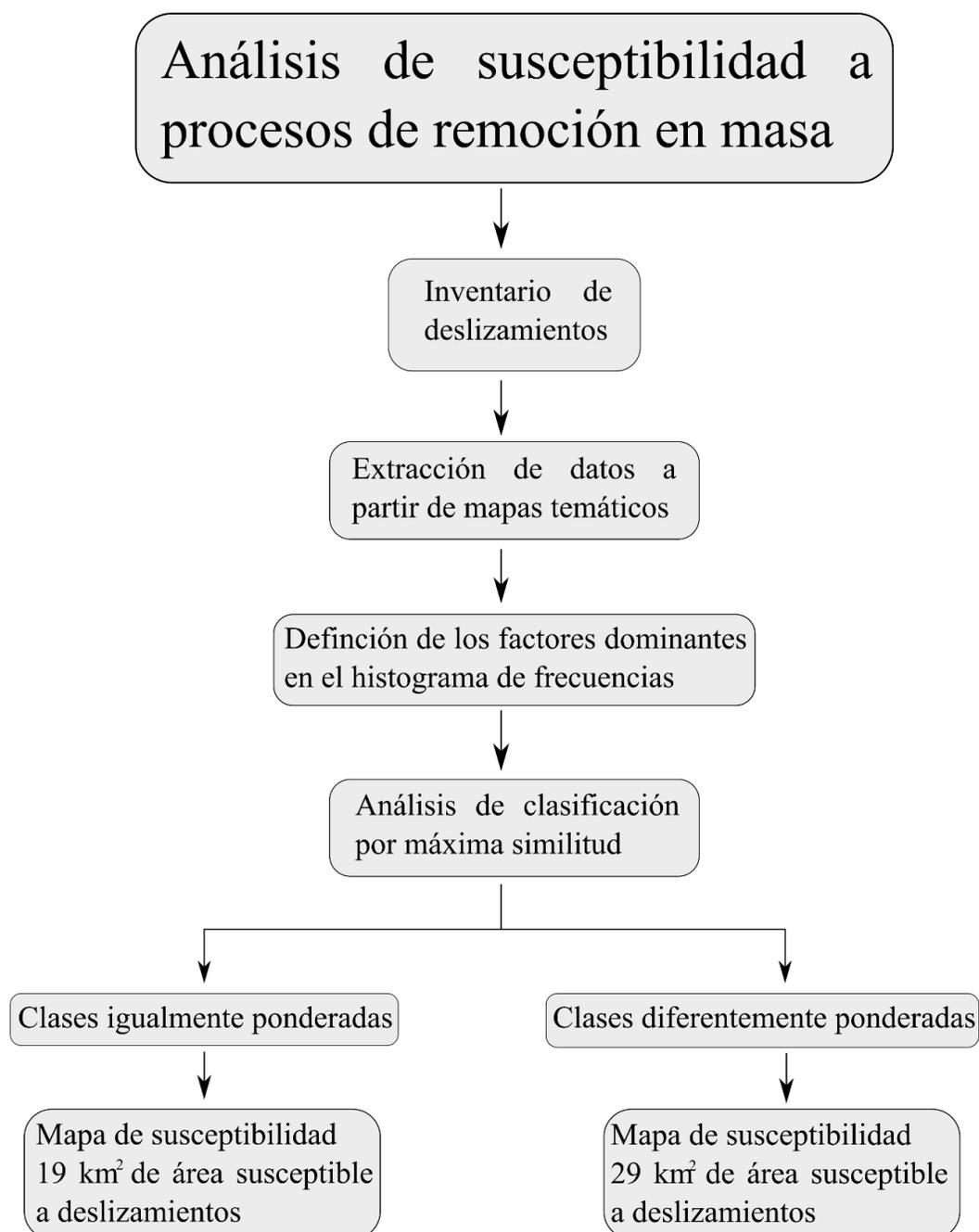


Figura 4.2) Metodología del análisis de procesos de remoción en masa, los mapas temáticos corresponden a las figuras de pendientes, orientaciones, acumulación de flujos, geología, uso de suelo, curvatura de las laderas y caminos

De acuerdo al análisis, muy pocos deslizamientos ocurren en zonas donde atraviesan caminos (cerca del 6%), lo cual se debe a que por la amplia extensión del área de estudio la zona de caminos representa una porción muy pequeña de la cuenca, sin embargo en la mayoría de las zonas con caminos de terracería, es común que se presenten PRM (figura 4.2).

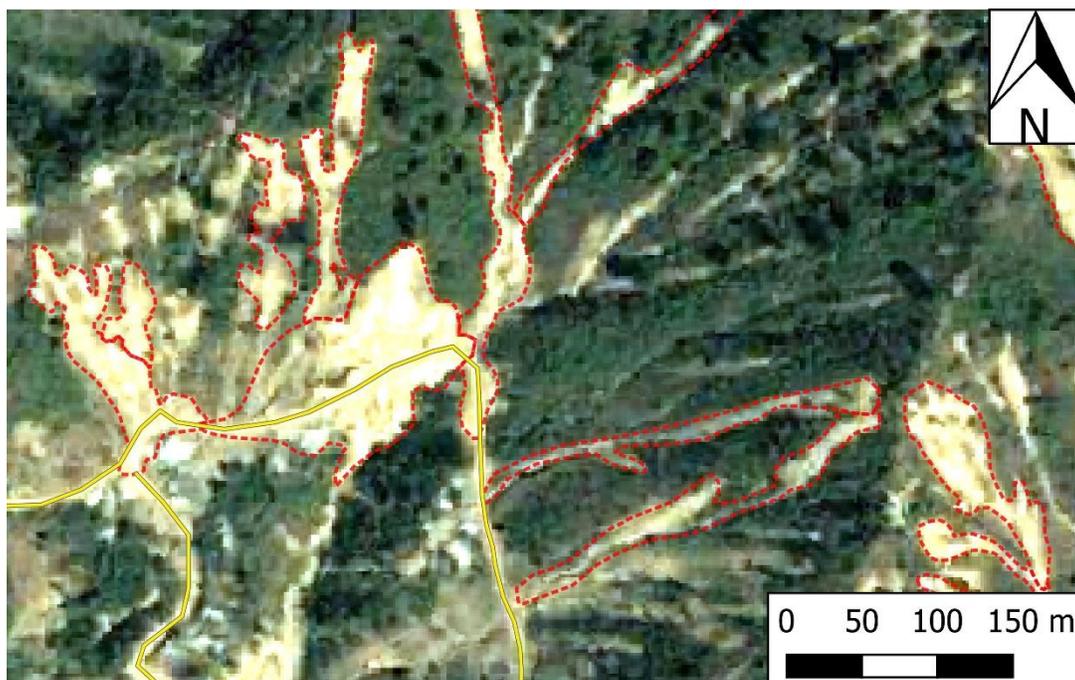


Figura 4.3) Deslizamientos ocurridos en los laterales de los caminos de terracería, siendo éste un factor que promueve los PRM. El contorno en rojo indica el área de deslizamiento y en amarillo el camino de carretera.

La acumulación de flujo muestra un dominio en la ocurrencia de PRM, ya que de acuerdo al histograma la mayoría de los deslizamientos (80%) ocurren en las zonas de baja acumulación, que corresponden a las zonas de las cabeceras de las microcuencas.

La mayoría de los PRM ocurrieron en las zonas donde afloran los intrusivos terciarios (73%), por lo cual la litología si es un factor determinante en la ocurrencia de PRM. En cuanto al uso de suelo solamente el 13% de los deslizamientos ocurrieron en zonas donde hay vegetación natural, mientras que el 87% de los deslizamientos se registraron en suelos desnudos y suelos de uso agrícola.

En cuanto al factor pendiente, la mayoría de PRM ocurre en laderas con pendientes entre 15° y 45° donde el material granular constantemente se está removilizando, generando deslizamientos.

Las pendientes mayores a 45° corresponden a paredes subverticales constituidas por derrames de lava asociados a las calderas, donde la mayoría de PRM que se presentan son del tipo de caída de bloques (figura 3.2) es de destacar que en estos valores de pendientes el material granular ya ha sido removilizado

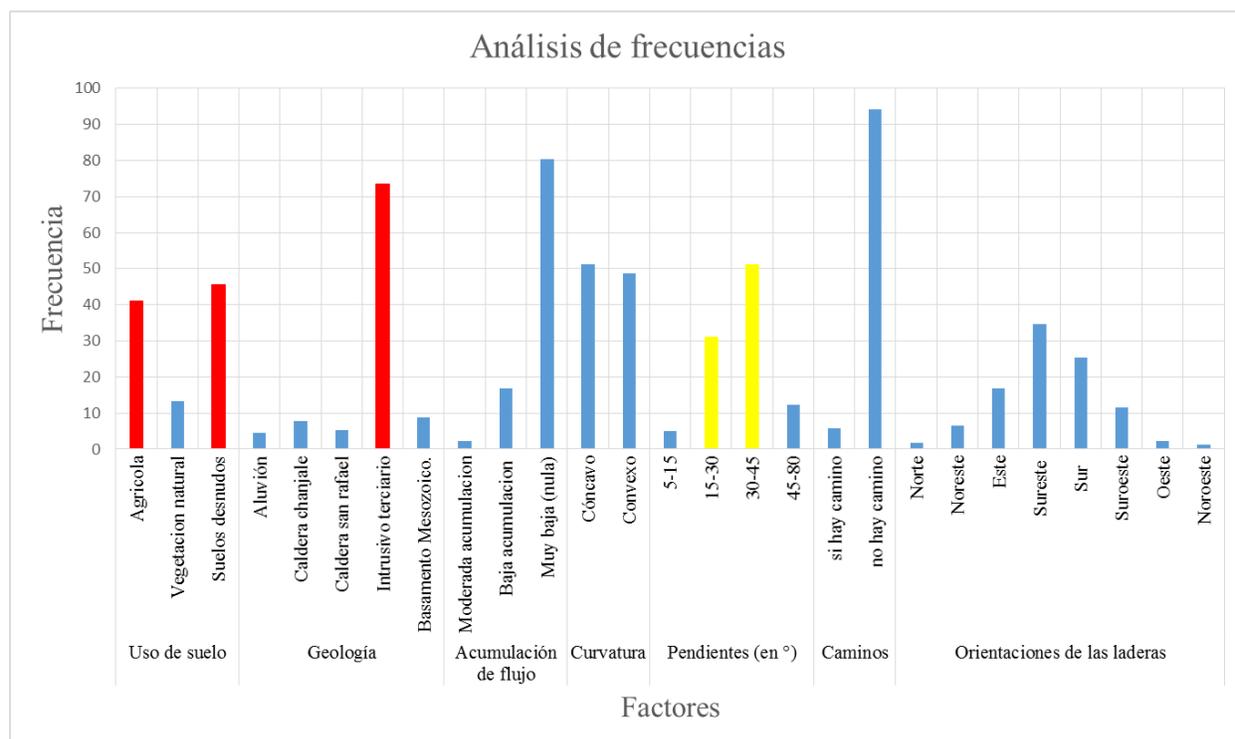


Figura 4.4) Análisis de frecuencia de los factores que promueven la ocurrencia de PRM, en rojo se muestran los factores más dominantes y en amarillo se muestra los factores secundarios de dominancia.

4.3 Análisis de clasificación por máxima similitud

El uso de la herramienta de clasificación por máxima similitud (*ArcMap 10.3*), consiste en agrupar y definir zonas con las mismas características dentro de una región de estudio. Por lo que en este caso, es posible definir cuáles son las zonas susceptibles a procesos de remoción en masa y cuáles no con base en el inventario de deslizamientos, el cual permitió definir la combinación de factores que mayormente promueven la ocurrencia de los PRM.

El uso de la clasificación por máxima similitud a través de SIG ha sido aplicado para diferentes propósitos en geología como lo son la definición de unidades litológicas y geomorfológicas (Verbovšek y Popit 2018), áreas de deslizamientos (Kim y Kim 2018), entre otras aplicaciones,

por lo que el uso de estas clasificaciones ha sido respaldado y constatado para diversos estudios como una de las herramientas que agilizan mayormente el trabajo de clasificación de áreas con las mismas características. Una de las ventajas que se obtiene de emplear esta metodología es que los resultados pueden ser representados en SIG a través de figuras que muestren la distribución espacial de las zonas clasificadas.

Para realizar una clasificación por máxima similitud, es necesario primeramente definir las variables que intervendrán dentro de la clasificación: variables independientes, que corresponden a los mapas temáticos, y las variables dependientes, es decir los puntos en donde se observaron PRM y un número equivalente en donde no han sido observados. Al cruzar esta información, se obtiene una firma espectral que identifica por cada variable independiente, las clases en donde sí ocurren PRM y donde no. Finalmente, con base en la firma espectral, será posible definir cuáles son las zonas en donde se repiten en mayor medida las condiciones que favorecen (o no) la ocurrencia de un PRM y así obtener un mapa de susceptibilidad.

Es importante hacer notar que la clasificación por máxima similitud puede ejecutarse de dos maneras, uno en el que se considera todas las variables independientes con el mismo grado de influencia (clases igualmente ponderadas), sin que ninguna de ellas tenga un mayor peso dentro de la clasificación y uno segundo, en el que tendrán un mayor peso las clases de las variables que se presentan con mayor frecuencia (clases diferentemente ponderadas). Cuando la clasificación se realiza por este método se designa una probabilidad a priori al número de celdas que contiene cada clase, respecto al número total de celdas en el archivo. Por ejemplo, si una clase tiene el doble de celdas que otra, el peso de cada muestra en su clasificación será del doble.

Para la clasificación por máxima similitud se utilizaron los *raster* de los mapas de pendientes, caminos, orientaciones, curvaturas de las laderas, uso de suelo y geología. Se optó por no emplearse el mapa de acumulaciones debido a que en el análisis alteraba los resultados por tendencia negativa (valores más bajos, presencia de deslizamientos). Para el mapa de puntos se utilizaron los 873 sitios de PRM dentro de la zona de estudio, y adicional a esto se agregaron 480 puntos aleatorios dentro de la cuenca, en los cuales no se presentaron PRM, para que la firma espectral tomara en cuenta las características que presentan los sitios donde ocurrieron los deslizamientos y donde no ocurrieron. Con base en estos resultados se realizó la clasificación por máxima similitud con la obtención de un archivo tipo *raster* que clasifica la zona de estudio con

los valores 1 y 0, los valores 1 indican zonas susceptibles a PRM y los valores 0 zonas no susceptibles a PRM.

La herramienta de clasificación de máxima similitud asume que una muestra de las clases tiene una distribución normal y por consiguiente las clases dentro de las que fueron categorizadas son definidos por la media y la matriz de covarianza. El proceso de clasificación consiste en los siguientes pasos:

- 1) Calcular la firma espectral con base en la media y la matriz de covarianza para las variables de entrada (*raster*), en cada uno de las celdas donde se presentaron deslizamientos
- 2) ejecutar la clasificación de máxima similitud, en el cual se compara la firma espectral (parámetros estadísticos) con todos los valores de las celdas de los raster. Con base en esta comparación se define cual es la probabilidad estadística de cada celda al pertenecer a una de las clases.
- 3) al ejecutar el algoritmo de clasificación por máxima similitud, se especifica si dicha clasificación es con clases igualmente ponderadas o diferentemente ponderadas

4.4 Resultados del análisis de clasificación por máxima similitud

El análisis de clasificación por máxima similitud se realizó en la parte norte y central de la cuenca, en un área de 137 km² el cual contempla el área en el cual ocurrieron los 873 deslizamientos. El resultado de la clasificación que considera cada una de las variables con el mismo peso (clases igualmente ponderadas) definió un área de 19km² como inestable o susceptible a procesos de remoción en masa, y un área de 118 km² con condiciones estables (figura 4.5). Se puede apreciar en la figura 4.5 que la mayoría de las zonas de inestabilidad se encuentran en el centro y norte de la cuenca, en el cual afloran los depósitos de intrusivos terciarios.

En el mapa de deslizamientos con ponderación mayor a las clases con mayor frecuencia (clases diferentemente ponderadas) se calculó un área de 29 km² con condiciones de inestabilidad y un área de 108 km² con condiciones estables (figura 4.6). Los resultados son bastantes similares a la clasificación con ponderación igual para las clases, sin embargo el análisis con ponderación mayor para las clases más dominantes (figura 4.6) incrementa el área de susceptibilidad.

Los resultados entre ambas metodologías son muy similares, sin embargo, la metodología de clasificación por clases diferentemente ponderadas muestra mejores resultados en la porción oeste de la cuenca, ya que en esta zona existe una gran cantidad de deslizamientos (figura 4.1) los cuales no tienen correspondencia en el mapa de susceptibilidad obtenido con la metodología por clases igualmente ponderadas. Lo mismo se observa en las porciones norte y Noreste (cercano al límite con Guatemala). Al definir una mayor área susceptible en estas porciones de la cuenca, las áreas susceptibles incrementan de 19 a 29 km². En la tabla 4.1 se muestran los resultados de la clasificación por máxima similitud para ambas pruebas, los cuales muestran que para las clases igualmente ponderadas de los 873 sitios con deslizamientos, 519 coincidieron con la zona susceptible a deslizamientos (59%), mientras que por el método de clases diferentemente ponderadas coincidieron 630 (72%), por lo que el análisis ponderado arroja un mapa de susceptibilidad con mayor confiabilidad. En el capítulo de discusión se analizarán con más detalles los resultados obtenidos.

Tabla 4.1 Resultados de la clasificación por máxima similitud, expresados en porcentaje de confiabilidad y en el número de sitios de deslizamientos observados que fueron clasificados como estables e inestables

Clasificación por máxima similitud					
igualmente ponderadas			diferentemente ponderadas		
inestables	estables	total	inestables	estables	total
519 sitios	354 sitios	873	630 sitios	243 sitios	873
59%	41%	100%	72%	28%	100%

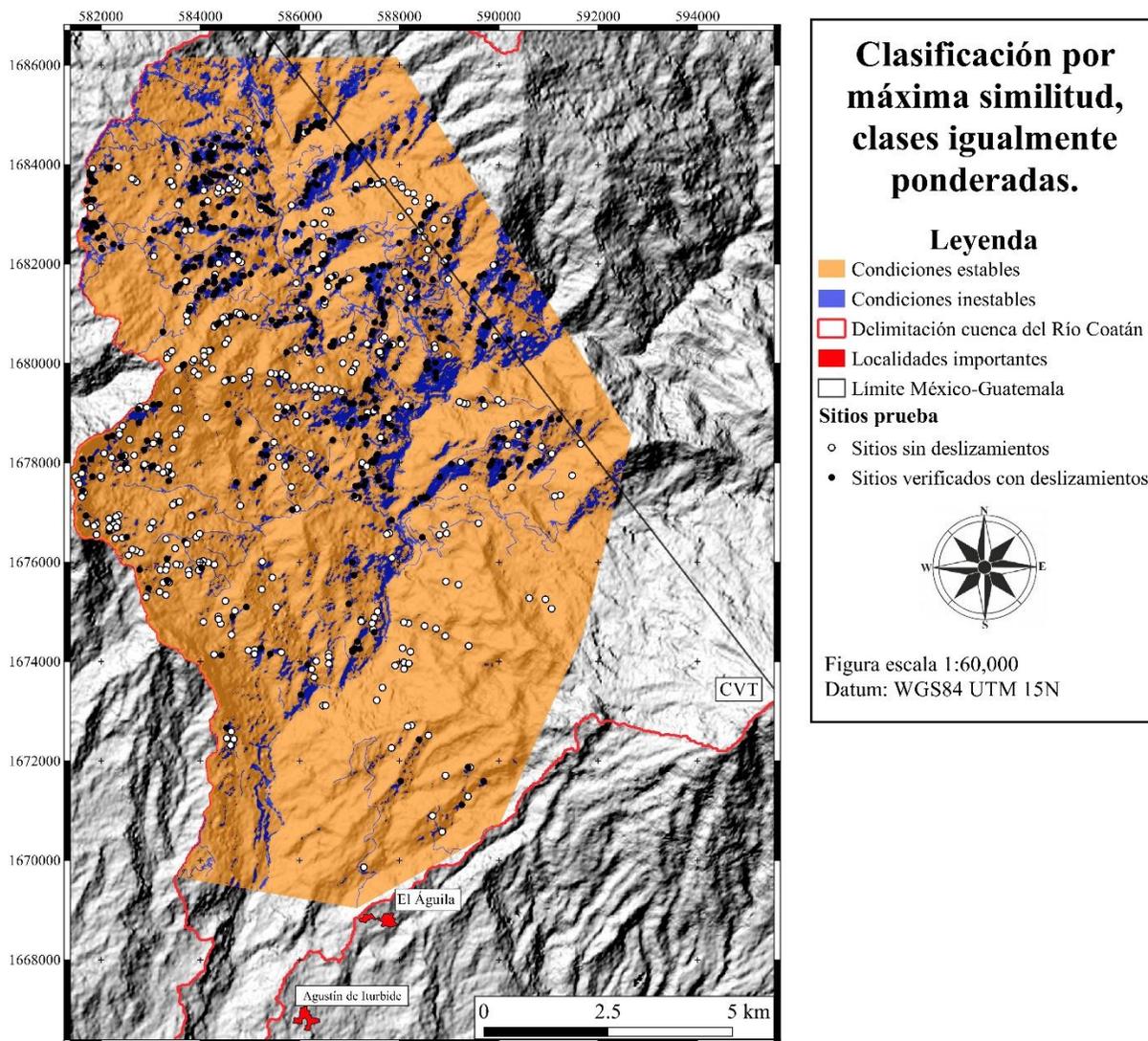


Figura 4.5) Clasificación para máxima similitud por clases igualmente ponderadas, como se puede apreciar, las zonas inestables se encuentran en la parte norte de la cuenca y en el centro en la porción cercana al límite con Guatemala.

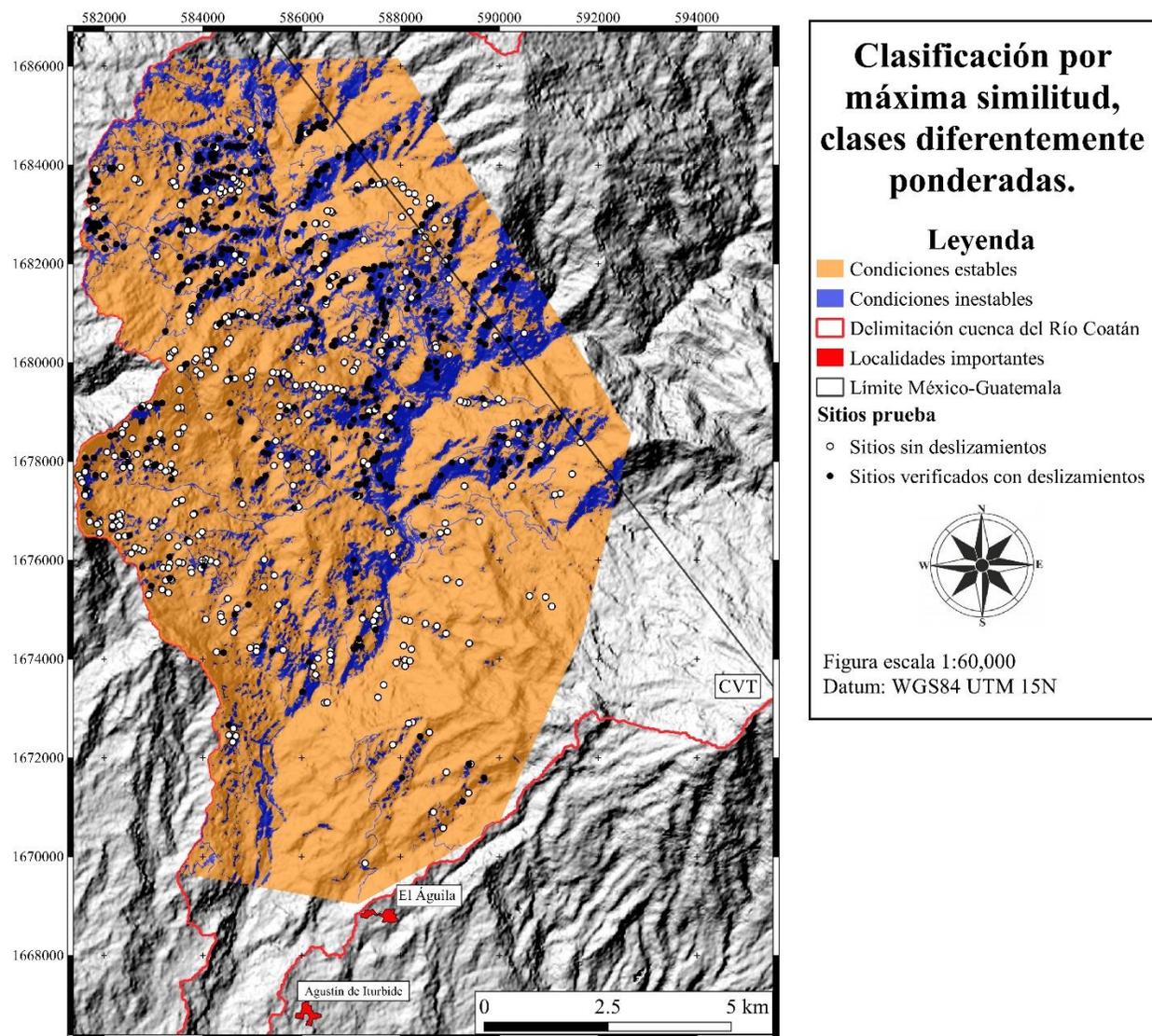


Figura 4.6) Clasificación para máxima similitud por clases diferentemente ponderadas, en éste caso se dio mayor peso a las clases que presentan una mayor cantidad de celdas ocupando en los sitios con deslizamientos, por lo que la geología tiene un peso mayor a todas las demás clases.

Capítulo 5. Análisis de lluvia

5.1 Introducción

El análisis de precipitaciones en el área de estudio permitió determinar los niveles de lluvia (mm/año) que han ocurrido en tiempos históricos, con el fin de identificar el promedio de precipitaciones y los años en los cuales ocurrieron eventos de precipitación más extremos. En particular, se analizó la precipitación a lo largo de los últimos 50 años, para definir los periodos de retornos de eventos similares a los huracanes Stan y Wilma que se presentaron en la región en el 2005 y que provocaron ingentes daños. Uno de los parámetros más importantes que se definen con el análisis de lluvia es el periodo de retorno (T_x) de un evento hidrometeorológico mayor, el cual indica un número de años en el cual se espera que ocurra una determinada cantidad de lluvia.

Por otro lado el análisis de precipitación permite determinar cuáles han sido los valores máximos de lluvia acumulada registrados en el periodo definido, para la realización de simulaciones numéricas de eventos de lluvia/escorrentía y la definición de las zonas susceptibles a inundación. En la presente tesis se empleará el código FLO-2D (O'Brien et al., 1993) para la simulación de áreas de inundación ante eventos de precipitación (capítulo 6)

5.2 Metodología

El objetivo principal del análisis de lluvias consiste en realizar un inventario histórico de los registros de lluvia y determinar los periodos de retorno. Para un correcto análisis de lluvias es necesario contar con una serie de tiempo extensa que incluya los datos de precipitación de al menos 30 años (Raes 2004). Estos datos permiten de calcular un promedio y desviación estándar, los cuales son parámetros que permiten describir la confiabilidad de los datos de la lluvia.

La metodología consiste en los siguientes pasos

- Extracción de los datos de lluvia y determinación de parámetros estadísticos
- Cálculo de las probabilidades de excedencia (P_x)
- Realización de la gráfica de probabilidades, obtención de la línea de ajuste y cálculo de periodos de retorno (T_x)
- Determinar la probabilidad de ocurrencia dentro de un periodo de años definido (P_N)

5.2.1 Datos de lluvia y parámetros estadísticos

En México, las estaciones hidrometeorológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) almacenan datos de la cantidad de lluvia por día, mes y año. Las estaciones hidrometeorológicas se encuentran distribuidas a lo largo de la República Mexicana incluyendo el Estado de Chiapas. Es importante mencionar que en ocasiones los datos se encuentran incompletos, habiendo datos de días, meses o años que no han sido reportados, sin embargo si fue posible generar una base de datos que contemple al menos 42 años, el cual es un tiempo aceptable, considerando que 30 años es el mínimo necesario para el análisis de frecuencias (Raes 2004)

Una vez enlistados los niveles de precipitación, se calculan la media y la desviación estándar, para definir la representatividad de los datos analizados con respecto a la variabilidad de los mismos en el periodo analizado. Entre menor sea el valor de la desviación estándar, menor variabilidad tendrán los datos, y el promedio será más representativo en el conjunto.

5.2.2 Cálculo de probabilidades de excedencia (P_x)

Los datos presentados en mm/año son ordenados de mayor a menor y se le asigna una posición numérica (Tablas 5.1, 5.3 y 5.5). La posición de los datos determinará la probabilidad de un nivel de lluvia a ser superado, dicho valor se representa en fracción acumulativa (de 0 a 1) o como un porcentaje acumulado (0-100%); por lo que los niveles bajos de precipitación tendrán una probabilidad mayor de ser excedida cada año, mientras que las lluvias grandes será menos probable que sean superadas.

En el presente análisis de lluvias, las probabilidades de excedencia se calcularon a partir de la distribución de Weibull (1939). La distribución es descrita por la ecuación (5.1) donde r representa la posición numérica del dato, y n el número total de datos.

$$\text{Distribución de Weibull: } P_x = \frac{r}{(n+1)} * 100 \quad (\text{Ec. 5.1})$$

5.2.3 Gráfica de Probabilidades y periodos de retorno

En una gráfica de probabilidades se representan los valores de probabilidades en el eje Y y los niveles de lluvia en el eje X. Cuando los ejes tienen una escala lineal, los datos forman una curva con forma de S, la cual se le conoce como ojiva de porcentaje (figura 5.5, 5.8 y 5.11). Con base en

la gráfica se puede asumir que existen muy pocos datos con valores de precipitación altos y muy bajos, mientras que la mayoría se encuentra cercano al valor promedio.

Cuando en la ojiva de porcentaje el eje Y se convierte a una escala probabilística, los datos tienden a alinearse en una recta (figura 5.6, 5.9 y 5.12), lo cual permite definir si la distribución se asemeja a una normal o no (Raes 2004). Posteriormente, con los datos graficados, se puede obtener una recta ajustada y determinar el coeficiente de correlación R^2 , de tal manera que si el número se aproxima a 1, la recta se encontrará bien ajustada; un valor aceptable de R^2 es aquel que se encuentra cercano o mayor a 0.98 (Raes 2004).

El periodo de retorno (T_x) se define de acuerdo a la ecuación 5.2 (Raes 2004), cuando la probabilidad de excedencia se especifica en decimales (0-1).

$$T_x = \frac{1}{P_x} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Es posible calcular el periodo de retorno por un valor de lluvia dado, con base en la recta ajustada, derivada de la gráfica de probabilidades (Ec. 5.3). P_x es la probabilidad de excedencia, m es la pendiente de la recta, x es el nivel de lluvia en mm y P_0 es la ordenada al origen o la probabilidad teórica cero.

$$P_x = mx + P_0 \quad (\text{Ec. 5.3})$$

El mismo procedimiento se puede aplicar para estimar los periodos de retorno de eventos de precipitación extremos (mm/día), registrándose el día de mayor precipitación en todo un año, posteriormente se calculan las probabilidades de excedencia y periodos de retorno con el mismo método que se aplica con datos anuales de precipitación.

Con los periodos de retorno definidos, es también posible calcular las probabilidades de ocurrencia de una lluvia determinada, dentro un intervalo de tiempo, empleándose la ecuación 5.4. Donde P_x es la probabilidad de excedencia expresada en decimales y N es el número de años para el cual se desea calcular la probabilidad de excedencia.

$$P_N = 1 - (1 - P_x)^N \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Con ésta ecuación se calcularon las probabilidades de ocurrencia en intervalos de 1, 5, 10 y 20 años para lluvias anuales, y para eventos extremos se calcularon también 50 y 100 años.

5.3 Estaciones meteorológicas en la cuenca Coatán

En el presente trabajo se seleccionaron 3 estaciones que contaban con al menos datos de 42 años, que incluyeran los datos de precipitación del 2005. Con base en estos requisitos, se analizó una estación que se encontrara aguas arriba de la cuenca (estación Finca Chicharras) una en las cercanías al cauce del río Coatán (estación Malpaso) y una en la ciudad de Tapachula (Estación Tapachula).

La estación Finca Chicharras, que se encuentra a aproximadamente 2 km de la cuenca del río Coatán, cuenta con 42 años de registro. La estación de Malpaso se encuentra dentro de la cuenca del río Coatán, en la porción norte del abanico aluvial de Tapachula, a aproximadamente 6 km de distancia de la ciudad de Tapachula, y cuenta con 44 años de registro. La estación Tapachula se encuentra dentro de la ciudad de Tapachula y cuenta con 54 años de registro histórico.

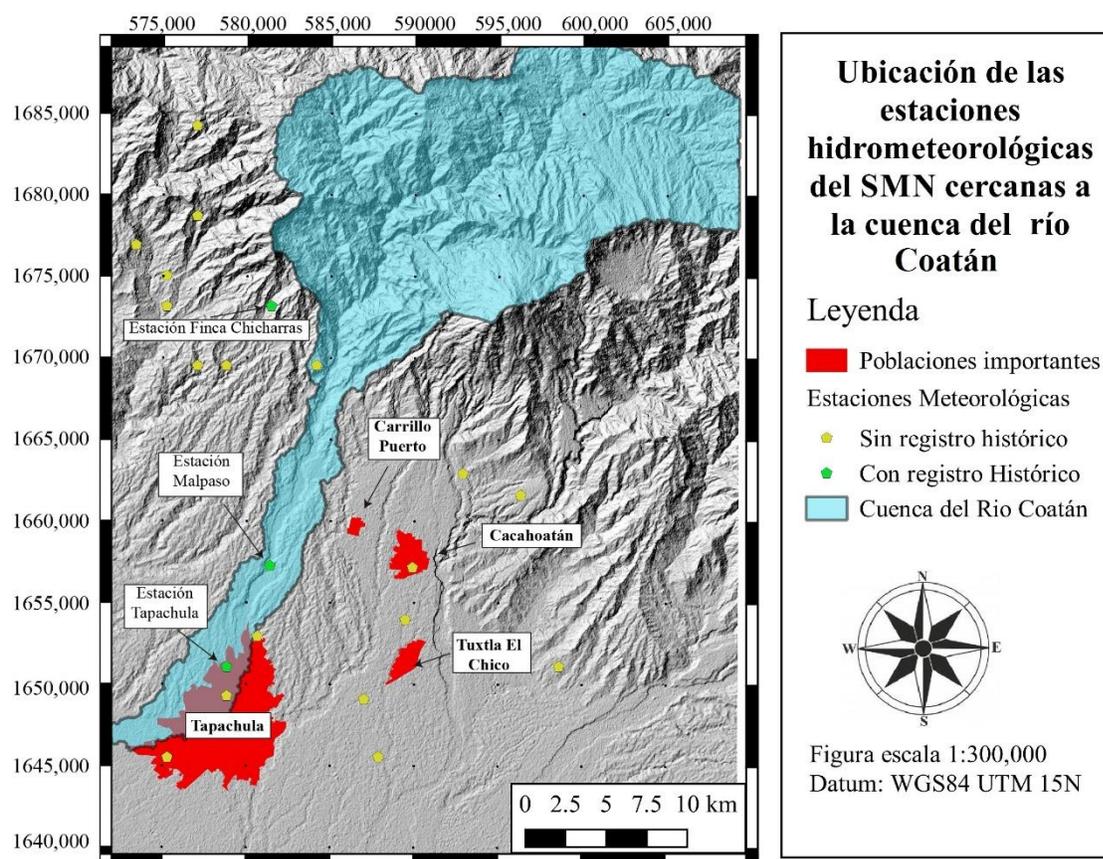


Figura 5.1) Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas del SMN, respecto a la cuenca del río Coatán y la ciudad de Tapachula, como se puede apreciar a pesar de que existe una gran cantidad de estaciones cercanas a la cuenca, muchas de estas no cuentan con datos históricos (más de 30 años) del registro de lluvias, de las 3 estaciones seleccionadas se tomó una para aguas arriba de la cuenca, y dos en el aluvial, uno en porción intermedia y otro en la ciudad de Tapachula.

5.4 Resultados

5.4.1 Análisis anual de lluvias

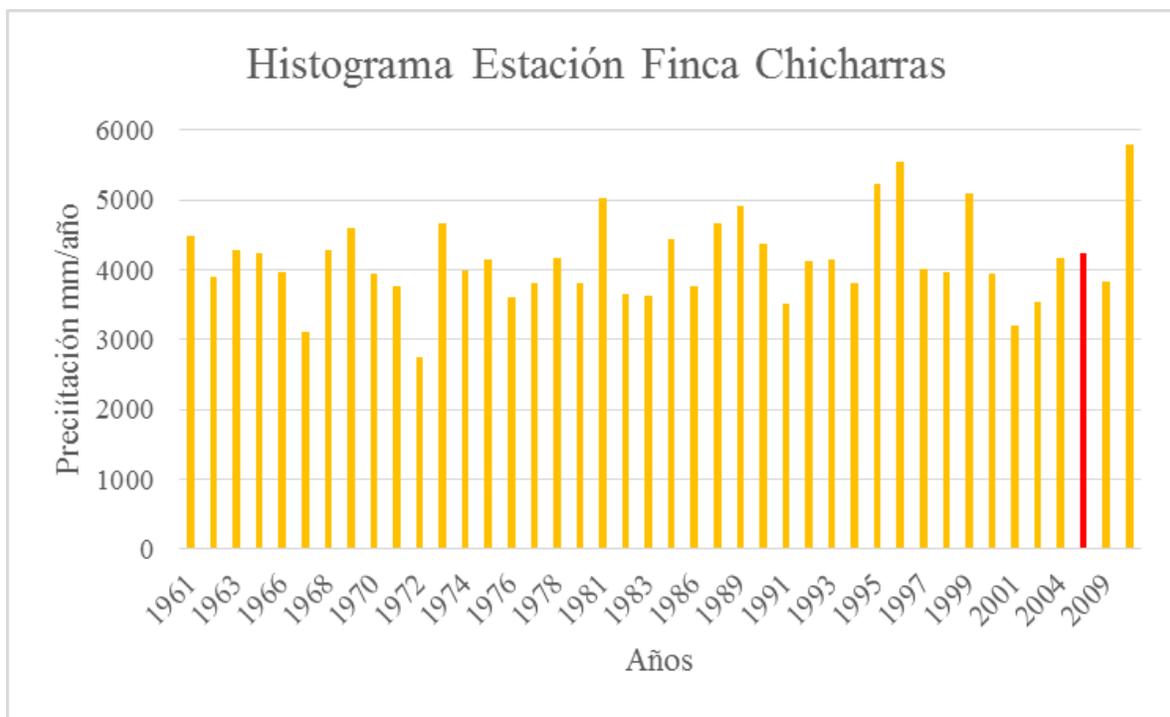


Figura 5.2) Histograma de precipitaciones de 42 años, ocurridos en el intervalo de 1961 a 2010, en rojo se indica los niveles de precipitación para el año 2005.

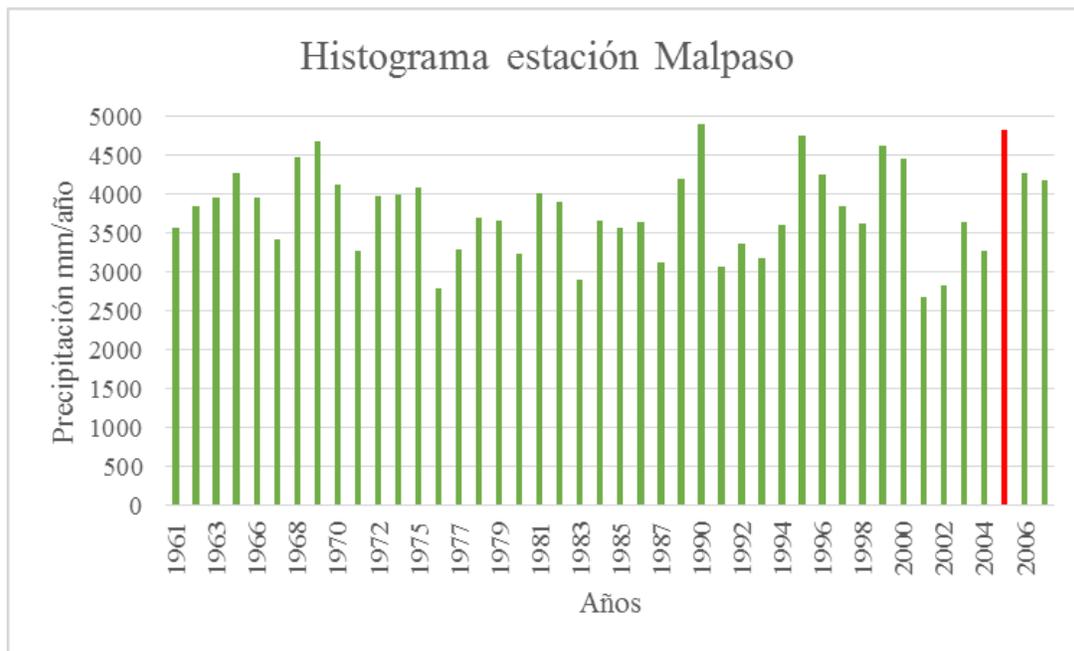


Figura 5.3) Histograma de precipitaciones de 44 años, ocurridos en el intervalo de 1961 a 2010, en rojo se indica los niveles de precipitación para el año 2005.

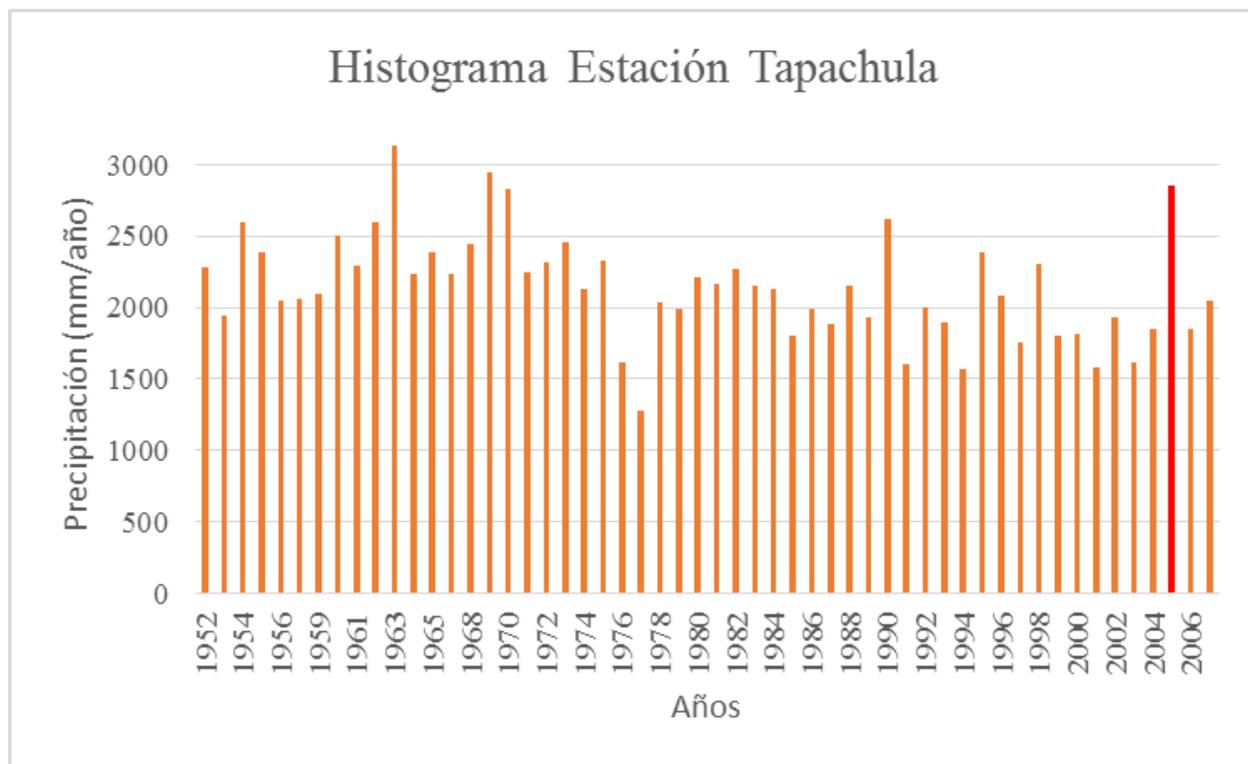


Figura 5.4) Histograma de precipitaciones de 54 años, ocurridos en el intervalo de 1952 a 2007, en rojo se indica los niveles de precipitación para el año 2005.

Con base en la metodología descrita en el inciso 5.2, se realizaron los histogramas de los registros de niveles de lluvias anuales para cada una de las 3 estaciones (figuras 5.2, 5.3 y 5.4).

Los datos de las estaciones Fincha Chicharras, Malpaso y Tapachula se muestran en las tablas 5.1, 5.3 y 5.5 respectivamente ordenados en orden descendente, con su respectiva probabilidad de excedencia en un año calculada de acuerdo a la distribución de Weibull (Ec. 5.1).

Con los datos de las tablas 5.1, 5.3 y 5.5 se realizaron las gráficas de probabilidades, tanto en escala normal vs normal, como probabilístico vs normal. Como se puede apreciar en todos los casos, los datos se ajustan a una recta con pendiente negativa, demostrando que los datos se distribuyen de manera normal. El cálculo de los coeficientes de correlación (R^2) para la estación Finca Chicharras es de 0.98, para la estación Malpaso de 0.99 y para la estación Tapachula es de 0.99., lo que indica un ajuste muy aceptable. Finalmente se calcularon los periodos de retorno para diferentes umbrales de niveles de precipitación (tablas 5.2, 5.4 y 5.6) y sus probabilidades de ocurrencia para 1, 5, 10 y 20 años (figuras 5.7, 5.10, 5.13)

Tabla 5.1 Datos de lluvia estación Finca Chicharras.

lluvia (mm/año)	ranking	Px (Weibull)	lluvia (mm/año)	ranking	Px (Weibull)
5801	1	2.33	4009	22	51.16
5533	2	4.65	3983	23	53.49
5237	3	6.98	3974	24	55.81
5092	4	9.30	3957	25	58.14
5016	5	11.63	3951	26	60.47
4903	6	13.95	3945	27	62.79
4672	7	16.28	3896	28	65.12
4667	8	18.60	3835	29	67.44
4598	9	20.93	3811	30	69.77
4490	10	23.26	3811	31	72.09
4435	11	25.58	3798	32	74.42
4364	12	27.91	3757	33	76.74
4278	13	30.23	3751	34	79.07
4274	14	32.56	3659	35	81.40
4242	15	34.88	3621	36	83.72
4231	16	37.21	3605	37	86.05
4178	17	39.53	3546	38	88.37
4173	18	41.86	3505	39	90.70
4138	19	44.19	3204	40	93.02
4135	20	46.51	3105	41	95.35
4122	21	48.84	2758	42	97.67
promedio	4144.29				
desviación estandar	616.99				

La casilla marcada gris, indica la precipitación del 2005.

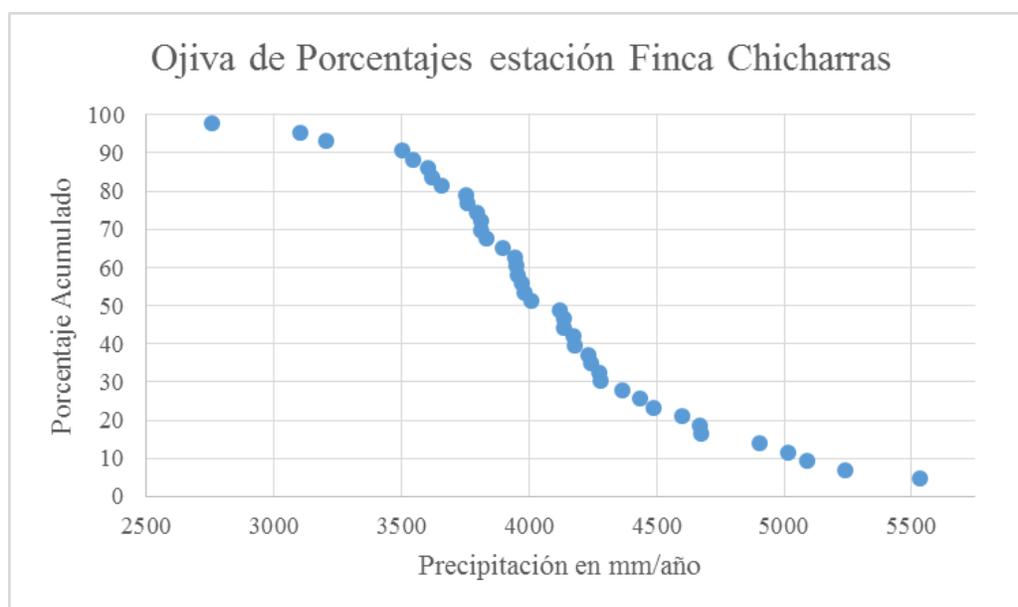


Figura 5.5) Ojiva de porcentajes de la estación Finca Chicharras, como se puede apreciar la gran mayoría de los datos se encuentran entre los 3500 y 4500 mm/año, mientras que los niveles de lluvia fuera de este intervalo son más escasos.

Gráfica de Probabilidades Estación Finca Chicharras.

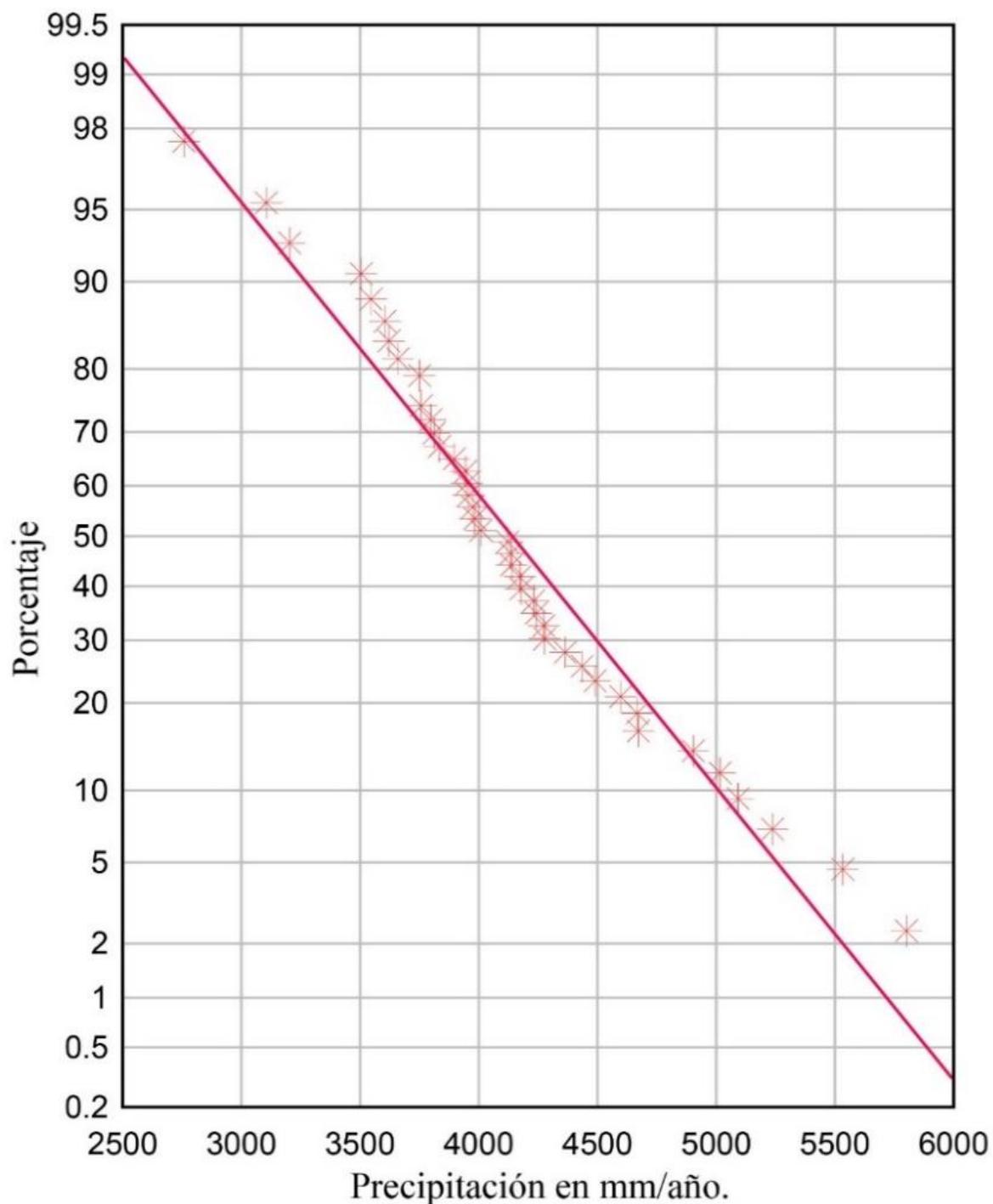


Figura 5.6 Gráfica de probabilidades (probabilístico vs normal) de la estación finca chicharras.

Los asteriscos indican los valores de lluvia y la línea sólida es la recta de mejor ajuste, con un coeficiente de correlación R^2 de 0.98

Tabla 5.2 Periodos de retorno para diferentes cantidades de lluvia, estación Finca Chicharras

Periodos de retorno Estación Finca Chicharras		
nivel de lluvia (mm/año)	Probabilidad de excedencia (Px)	Periodo de retorno (Tx) años
3000	0.9537	1.0485
3500	0.8274	1.2086
4000	0.5819	1.7185
4500	0.2979	3.3568
5000	0.1024	9.7656
5500	0.0224	44.6429

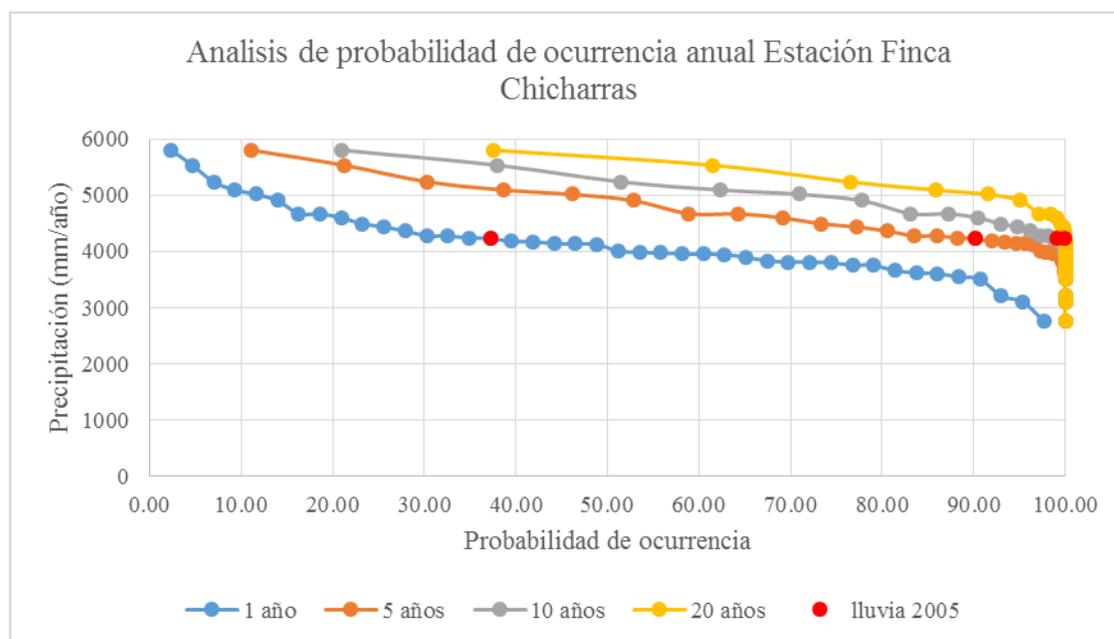


Figura 5.7) Gráfica de Probabilidades de ocurrencia calculada con los datos de lluvia anuales en la estación Finca Chicharras, como se puede apreciar la probabilidad de que la lluvia del año 2005 sea superada dentro de un intervalo de 1 año es de 37%, mientras que en uno de 5 años es de 90%.

Tabla 5.3 Datos de lluvia estación Malpaso

lluvia (mm/año)	ranking	Px (Weibull)	lluvia (mm/año)	ranking	Px (Weibull)
4915	1	2.222	3698	23	51.111
4835	2	4.444	3666	24	53.333
4757	3	6.667	3663	25	55.556
4677	4	8.889	3653	26	57.778
4629	5	11.111	3640	27	60.000
4477	6	13.333	3626	28	62.222
4453	7	15.556	3604	29	64.444
4281	8	17.778	3576	30	66.667
4268	9	20.000	3574	31	68.889
4250	10	22.222	3416	32	71.111
4205	11	24.444	3363	33	73.333
4184	12	26.667	3300	34	75.556
4121	13	28.889	3284	35	77.778
4089	14	31.111	3279	36	80.000
4017	15	33.333	3240	37	82.222
4000	16	35.556	3180	38	84.444
3976	17	37.778	3128	39	86.667
3970	18	40.000	3072	40	88.889
3968	19	42.222	2901	41	91.111
3898	20	44.444	2823	42	93.333
3856	21	46.667	2793	43	95.556
3849	22	48.889	2684	44	97.778
promedio	3791.77				
desviación estándar	570.63				

La casilla marcada gris, indica la precipitación del 2005.

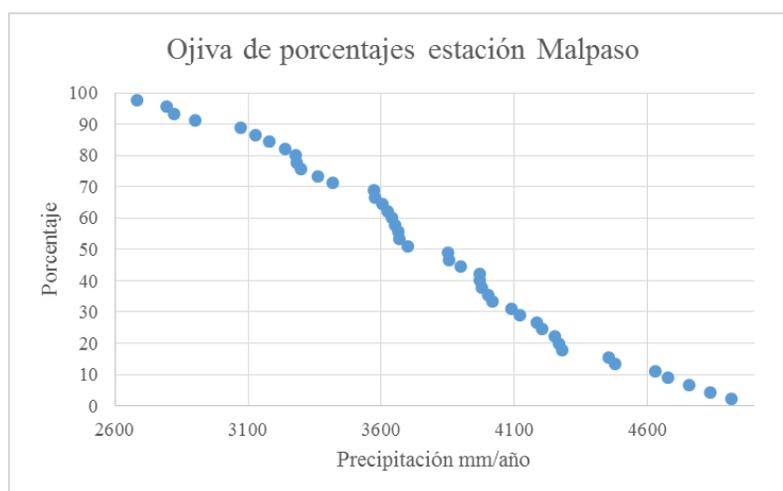


Figura 5.8) Ojiva de porcentajes de la estación Malpaso

Gráfica de Probabilidades Estación Malpaso

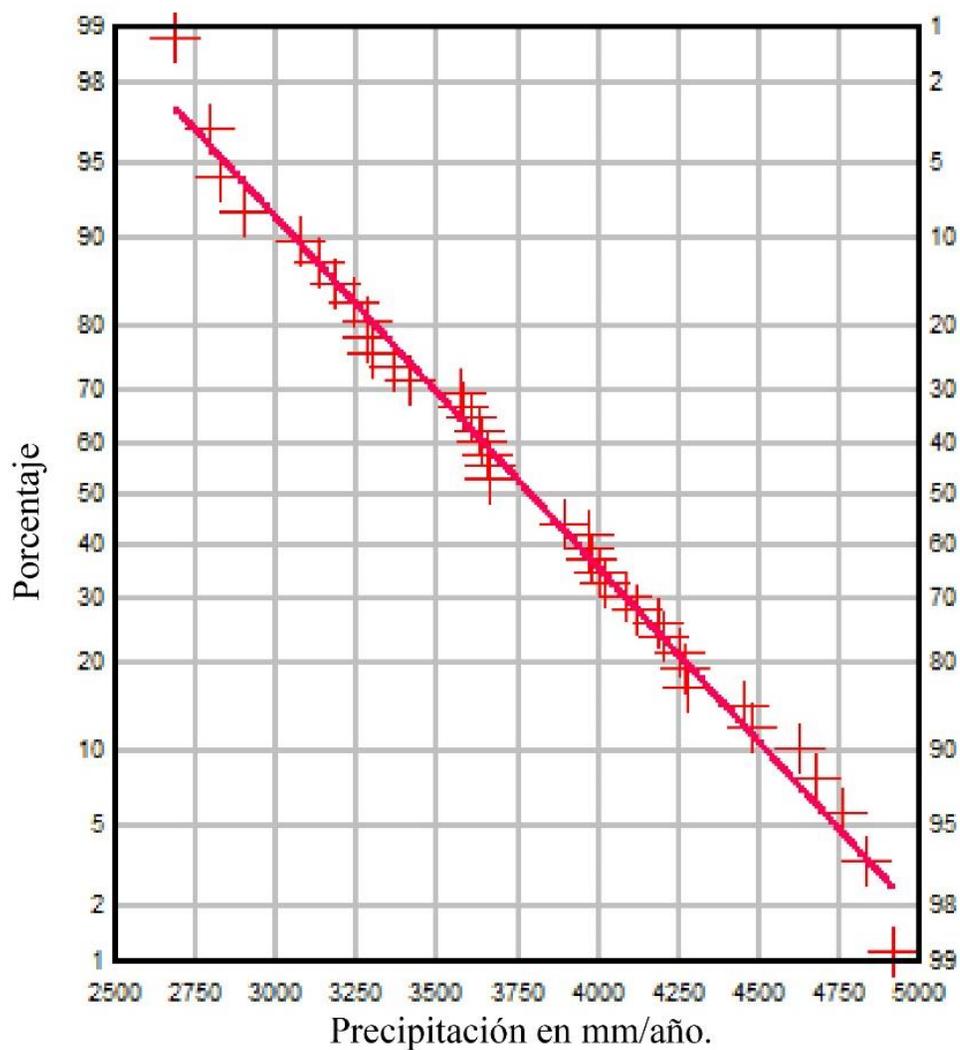


Figura 5.9)

Grafica de probabilidades (probabilístico vs normal) de la estación Malpaso, en el que se muestra que los valores de los datos de lluvia (asteriscos) son concordantes con la recta de ajuste (línea sólida).

Tabla 5.4 Periodos de retorno para diferentes cantidades de lluvia, estación Malpaso

Periodos de retorno Estación Malpaso		
nivel de lluvia (mm/año)	Probabilidad de excedencia (Px)	Periodo de retorno (Tx) años
2700	0.9912	1.0089
3140	0.8715	1.1474
3580	0.6439	1.5530
4020	0.346	2.8902
4460	0.1228	8.1433
4900	0.027	37.0370

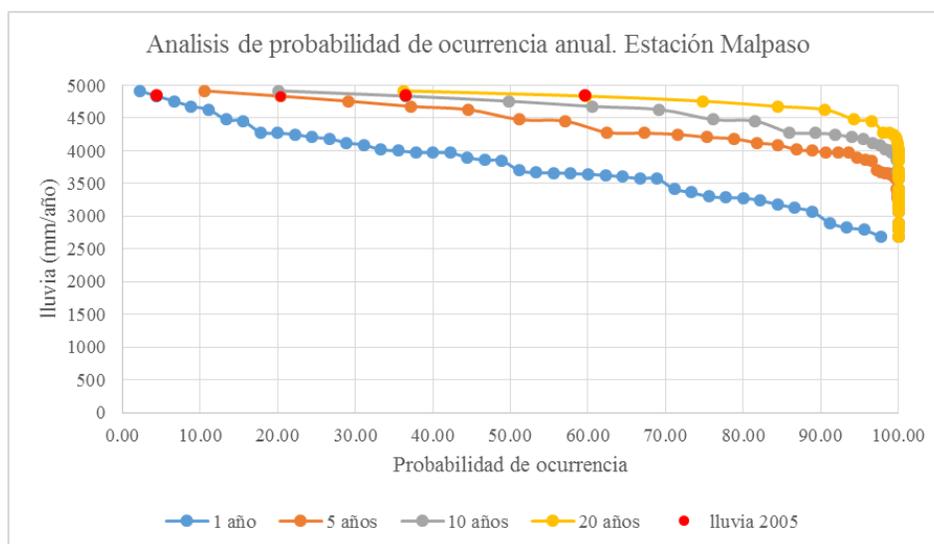


Figura 5.10) Gráfica de Probabilidades de ocurrencia calculada con los datos de lluvia anuales en la estación Malpaso. La probabilidad de que la lluvia del año 2005 sea superada dentro de un intervalo de 1 año es de 4%, mientras que en los intervalos de 10 y 20 años es de 36% y 60% respectivamente

Tabla 5.5 Datos de lluvia estación Tapachula

lluvia (mm/año)	Ranking	Px (Weibull)	lluvia (mm/año)	Ranking	Px (Weibull)
3136	1	1.82	2132	28	50.91
2945	2	3.64	2090	29	52.73
2853	3	5.45	2079	30	54.55
2834	4	7.27	2063	31	56.36
2620	5	9.09	2051	32	58.18
2598	6	10.91	2042	33	60.00
2594	7	12.73	2036	34	61.82
2507	8	14.55	1996	35	63.64
2458	9	16.36	1989	36	65.45
2444	10	18.18	1985	37	67.27
2390	11	20.00	1942	38	69.09
2385	12	21.82	1936	39	70.91
2381	13	23.64	1926	40	72.73
2322	14	25.45	1898	41	74.55
2312	15	27.27	1887	42	76.36
2306	16	29.09	1850	43	78.18
2288	17	30.91	1848	44	80.00
2278	18	32.73	1810	45	81.82
2272	19	34.55	1805	46	83.64
2241	20	36.36	1803	47	85.45
2239	21	38.18	1753	48	87.27
2229	22	40.00	1615	49	89.09
2214	23	41.82	1614	50	90.91
2167	24	43.64	1603	51	92.73
2153	25	45.45	1578	52	94.55
2147	26	47.27	1566	53	96.36
2133	27	49.09	1277	54	98.18
promedio	2141.11		La casilla marcada gris, indica la precipitación del		
desviación estandar	363.54				

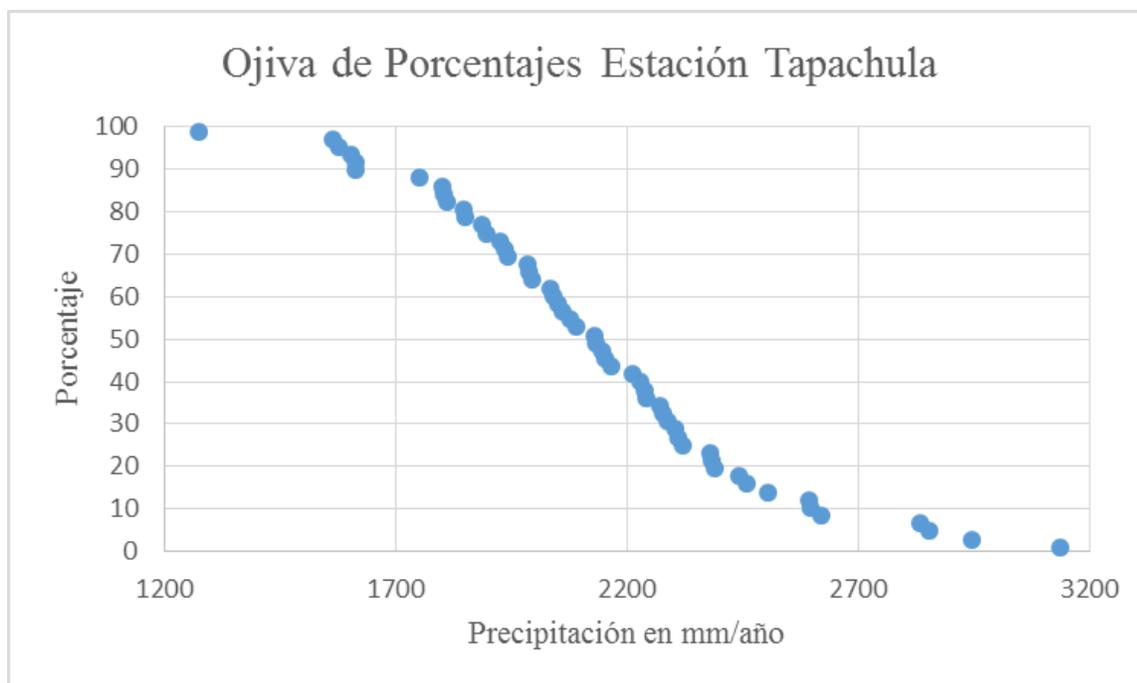


Figura 5.11) Ojiva de porcentajes de la estación Tapachula, en la imagen se muestra que la mayoría de los niveles de precipitación oscilan entre 1700 y 2700 mm/año, los valores fuera de este rango son poco comunes.

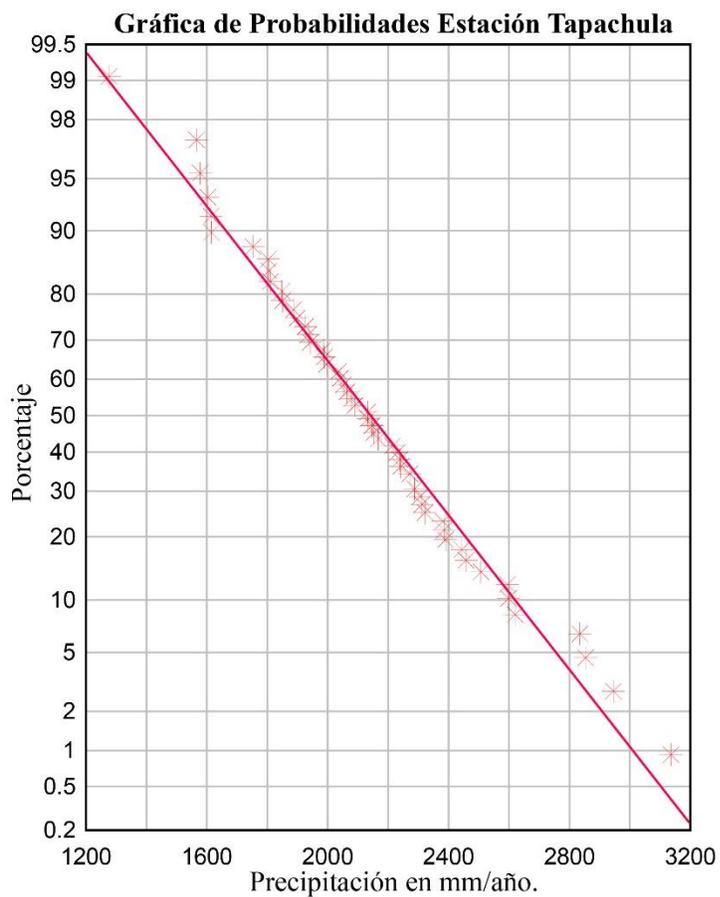


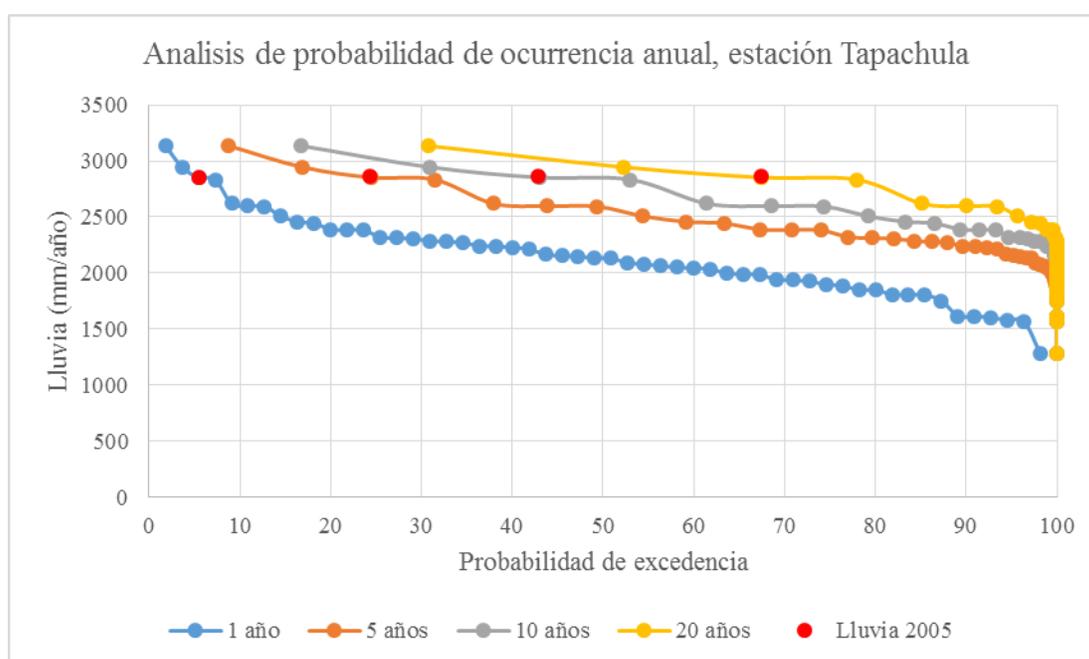
Figura 5.12)

Gráfica de probabilidades (probabilístico vs normal) de la estación Tapachula, en el que se muestra que los valores de los datos de lluvia son concordantes con la recta de ajuste.

Se calculó un coeficiente de correlación de 0.99

Tabla 5.6 Periodos de retorno para diferentes cantidades de lluvia, estación Tapachula

Periodos de retorno Estación Tapachula		
nivel de lluvia (mm/año)	Probabilidad de excedencia (Px)	Periodo de retorno (Tx) años
1250	0.9915	1.0086
1600	0.9267	1.0791
1950	0.6933	1.4424
2300	0.3357	2.9789
2650	0.0865	11.5607
3000	0.0107	93.4579



De acuerdo a los histogramas y las tablas se concluye que los datos muestran una mayor precipitación en la porción superior de la cuenca (figura 5.14), ya que en la zona aguas arriba de la cuenca (Estación Finca Chicharras) las precipitaciones máximas son de 5,000 mm/año con un promedio de 4,144 mm/año, mientras que en la estación de Malpaso (porción intermedia de la cuenca) los niveles máximos son de 4,900 mm/año con promedio de 3,791 mm/año y en la estación Tapachula (zona de aluvial) los niveles máximos son de 3,196 mm/año con media de 2141 mm/año.

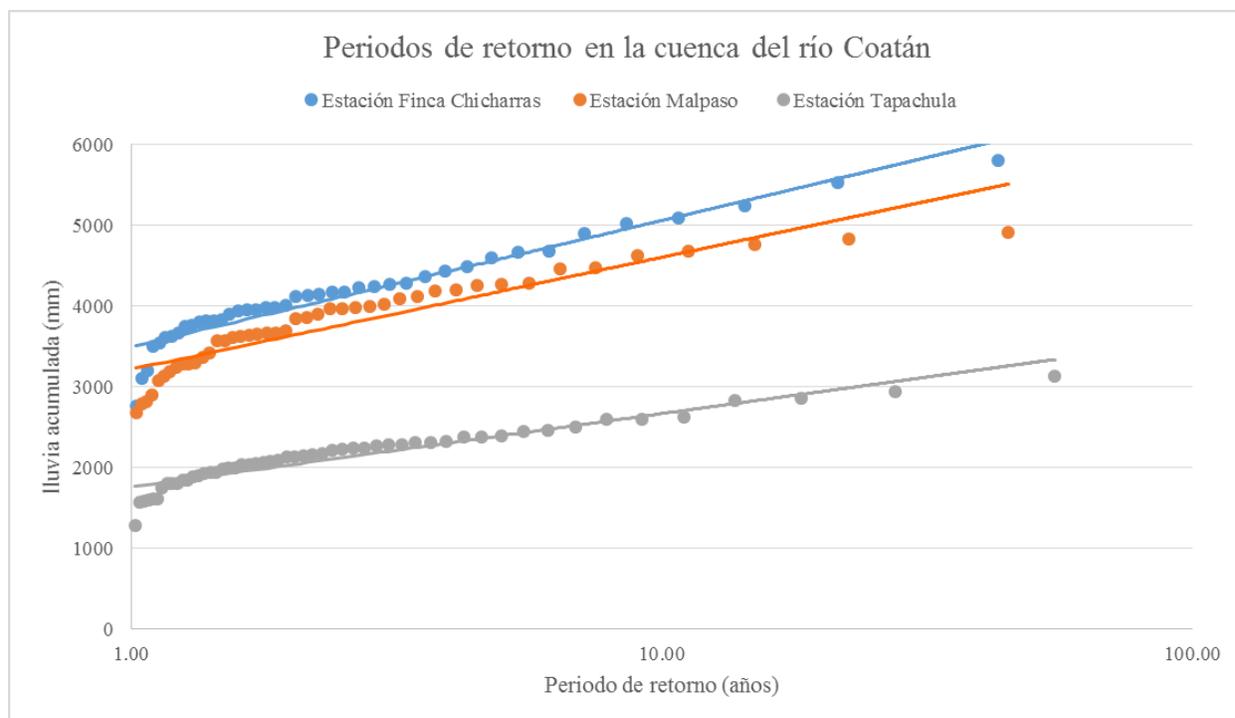


Figura 5.14) Periodos de retorno para diferentes umbrales diferentes porciones de la cuenca del Río Coatán, como se puede apreciar, los niveles de lluvia son diferentes en las 3 porciones de la cuenca para un periodo de retorno definido, siendo mayor en la porción norte de la cuenca.

Con base en el análisis histórico de las lluvias se observa que en la estación Finca Chicharras la precipitación del 2005 es la décimo sexta en los 42 años de registro, mientras que en la estación de Malpaso ubicada en la porción media de la cuenca, es la segunda mayor en los 44 años de registro y en la ciudad de Tapachula es la tercera de mayor nivel en los 54 años de registro. Por lo anterior, los niveles de precipitación del 2005 en la parte norte de la cuenca no son tan altos relativos al registro histórico, mientras que en las porciones medias de la Cuencas del río Coatán y en la ciudad de Tapachula, los niveles registrados en el 2005 han sido uno de los más grandes en el registro histórico reciente. Los periodos de retorno calculados con la ecuación de la recta ajustada para las lluvias del 2005 son: en la porción norte de la cuenca (estación Finca Chicharras) de 2.23 años, para la porción media de la cuenca (estación Malpaso) de 28.65 años y para la ciudad de Tapachula es de 35 años.

5.4.2 Análisis de eventos extremos

Se realizó el análisis de recurrencia de eventos extremos, el cual consiste en definir el día de mayor cantidad de lluvia (24 horas) en el año, para posteriormente calcular la probabilidad de excedencia con la distribución de Weibull (tabla 5.7). Con base en esto es posible calcular nuevamente los periodos de retorno a partir de la ecuación 5.2. Los periodos de retorno para eventos extremos se realizaron con los datos de la estación Finca Chicharras, que es la estación más representativa para la porción de recarga de la cuenca, en los años de 1970 a 2006. En la tabla 5.7 se muestran los datos de precipitación y las probabilidades de excedencia, mientras que en la figura 5.15 se muestra el gráfico de probabilidades probabilístico vs normal con la recta de ajuste. En la tabla 5.8 se reportan los periodos de retorno esperados para ciertos umbrales de niveles de precipitación, los cuales se calculan a partir de la recta de ajuste. En la figura 5.16 se muestra la gráfica de probabilidades de ocurrencia calculados para 1, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

Tabla 5.7 Niveles máximos de precipitación por día, en los años de 1970 a 2006. Estación Finca Chicharras

precipitación (mm/día)	ranking	Px Weibull	precipitación (mm/día)	Ranking	Px Weibull
246.3	1	2.63	117	20	52.63
242	2	5.26	115.8	21	55.26
240	3	7.89	114	22	57.89
226	4	10.53	113.5	23	60.53
185.5	5	13.16	110	24	63.16
185	6	15.79	110	25	65.79
157	7	18.42	107.6	26	68.42
156	8	21.05	107	27	71.05
153	9	23.68	103.5	28	73.68
146	10	26.32	103	29	76.32
140	11	28.95	100	30	78.95
140	12	31.58	100	31	81.58
135	13	34.21	87.8	32	84.21
133.5	14	36.84	82.5	33	86.84
125.5	15	39.47	80	34	89.47
123.5	16	42.11	80	35	92.11
122.4	17	44.74	75	36	94.74
122	18	47.37	73.7	37	97.37
120	19	50.00			
promedio	131.33				
desviación estandar	46.33				

La casilla marcada gris, indica la precipitación del 4 de octubre del 2005.

Con base en la recta de ajuste en escala probabilística (figura 5.15), se calculó el periodo de retorno para la lluvia del 4 de octubre del 2005 (242 mm) en 46 años.

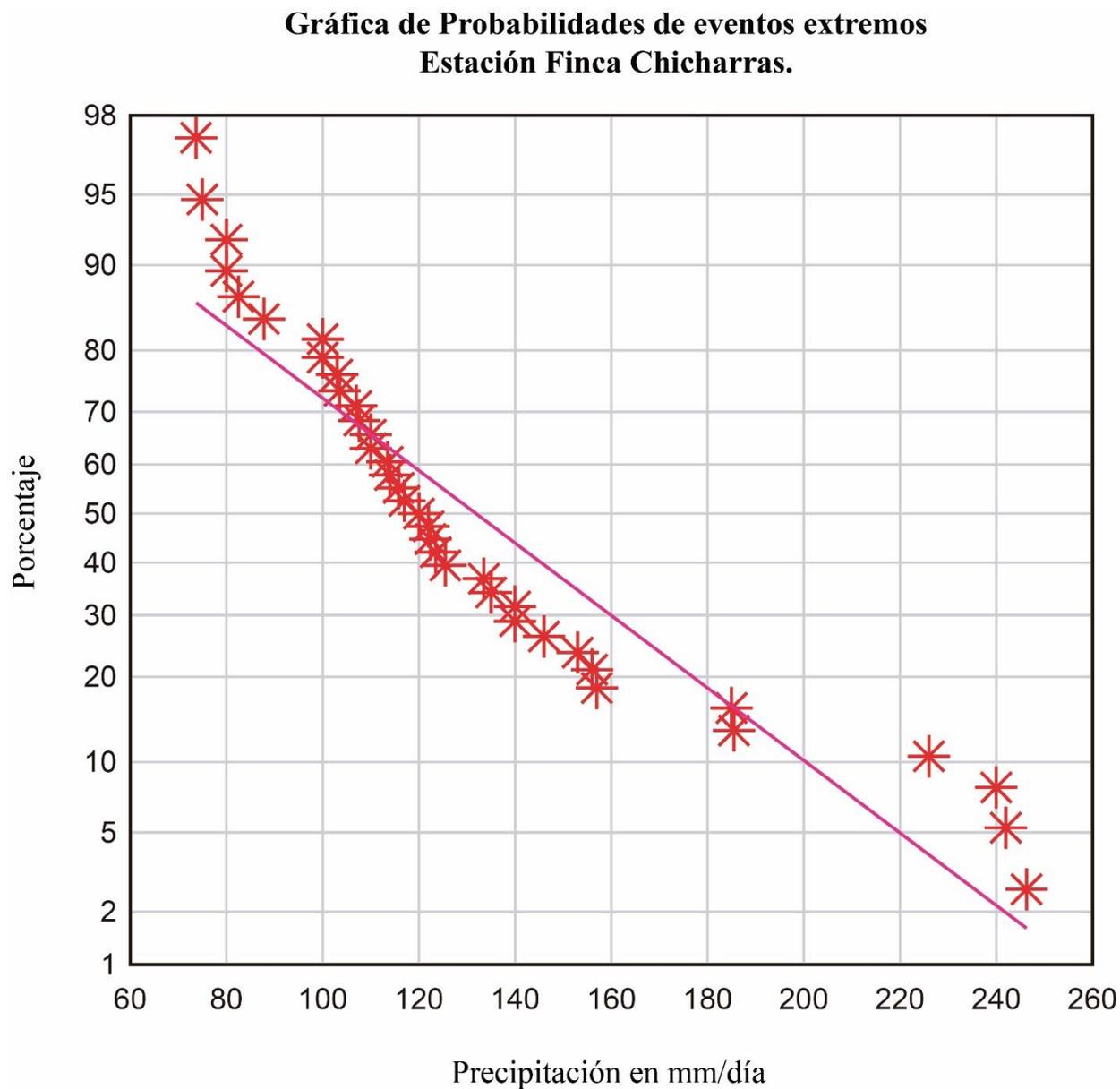


Figura 5.15) Gráfica probabilística vs normal, de eventos extremos en la estación finca chicharras teniendo un coeficiente de correlación de 0.93

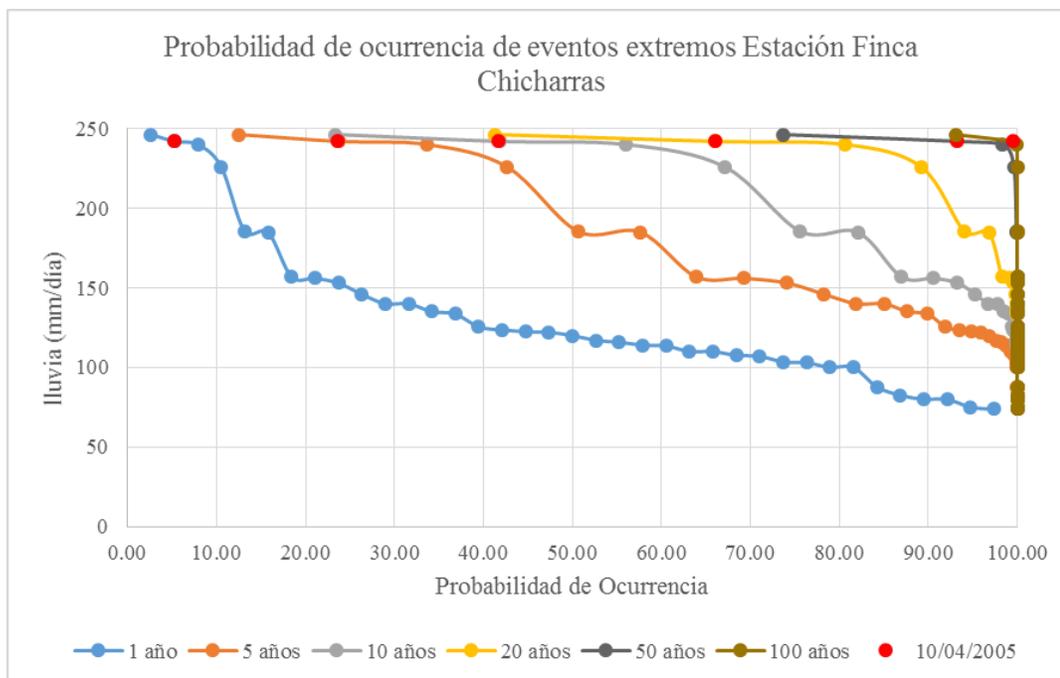


Figura 5.16) Gráfica de Probabilidades de ocurrencia calculada con los niveles de lluvia en 24 horas en la estación Finca Chicharras. La probabilidad de que la lluvia del año 04/10/2005 sea superada dentro de un intervalo de 1 año es de 5%, para un intervalo de 10 años es 41% para uno de 20 años es 66%, y para uno de 50 y 100 años es de 73% y 93%.

Los datos de precipitación anuales muestran que los niveles de precipitación varían a lo largo de la cuenca, siendo mayor en la porción aguas arriba y menor en la zona aguas abajo (aluvial de Tapachula). Los periodos de retorno para las lluvias del 2005 son de 28.6 años para la estación Malpaso y de 35 años para Tapachula, sin embargo con base en el análisis de eventos extremos, se concluye que los niveles de lluvia del 4 de octubre del 2005 son poco comunes, teniendo un periodo de retorno de 46 años. Sin embargo, es importante notar que el periodo de retorno disminuye a casi 10 años para un evento de 200 mm, solamente 40 mm inferior al evento extremo del 4 de octubre del 2005. Con base en los niveles de precipitación obtenidos, es posible definir un escenario de lluvias para la realización de simulaciones numéricas y así definir las zonas de inundación ante un evento poco común como el de 2005.

Tabla 5.8) Periodos de retorno para eventos extremos, Estación Finca Chicharras

Periodos de retorno eventos extremos estación Finca Chicharras		
nivel de lluvia (mm/día)	Probabilidad de excedencia (Px)	Periodo de retorno (Tx) años
80	0.8337	1.1995
120	0.5877	1.7015
160	0.2995	3.3389
200	0.1014	9.8619
240	0.0216	46.2963

Capítulo 6. Simulaciones de escenarios de lluvias y evaluación de la susceptibilidad a inundación en la ciudad de Tapachula.

6.1 Metodología

Para la determinación de las zonas de inundación en la cuenca del río Coatán, se empleó el *software* FLO 2D, herramienta computacional que permite simular varios procesos hidrológicos, incluyendo infiltración/escurrimiento de lluvia así como procesos superficiales de escurrimiento de agua, y agua con carga de sedimentos. En particular, en el presente trabajo se procedió a simular diferentes escenarios de lluvia para definir las posibles descargas de la cuenca hidrográfica alta del río Coatán, para después utilizar las descargas obtenidas para definir las zonas de posible inundación en la cuenca baja hasta la población de Tapachula. .

La metodología utilizada se presenta en la figura 6.1. Con base en el análisis estadístico de la lluvia, se definieron cuatro escenarios principales: Evento Huracán Stan (674 mm acumulados en 3 días), así como eventos con periodos de retorno de 10 años (200 mm), 1.5 años (100 mm) y la lluvia del cuatro de octubre del 2005 (242 mm), la cual ha sido la lluvia de mayor intensidad en los últimos 40 años registrada en la estación Finca Chicharras y que tiene un periodo de retorno de más de 20 años. Las precipitaciones se simularon en la cuenca alta del río Coatán, y la curva de descarga se determinó en la sección de la barranca en donde se forma el canal principal que descarga hacia la ciudad de Tapachula.

Posteriormente, con las curvas de descarga obtenidas con los diferentes escenarios de lluvia, se simularon flujos de agua en el canal principal para definir las zonas de inundación. Con los resultados obtenidos se generó el mapa de amenaza a inundación. En este se incluyen las áreas urbanas y agrícolas, así como también las infraestructuras que pudieran resultar dañadas por eventos de inundación con las características anteriormente mencionadas.

6.2 Fundamento de operación del programa FLO 2D

FLO 2D es un programa que permite la simulación de escurrimientos superficiales en topografías reales, con diferentes condiciones iniciales que pudieran dar origen a inundaciones como lo son lluvias, flujos con cargas de sedimentos, ruptura de represamientos, desborde de canales, flujos superficiales, entre otros. Además de la superficie topográfica, las simulaciones pueden realizarse

tomando en cuenta elementos como lo son edificios o zonas de obstrucción e inclusive diques, los cuales pueden servir para simular su efectividad ante posibles eventos de inundación. Por tales motivos FLO 2D es uno de los códigos más empleados para la simulación de flujos superficiales

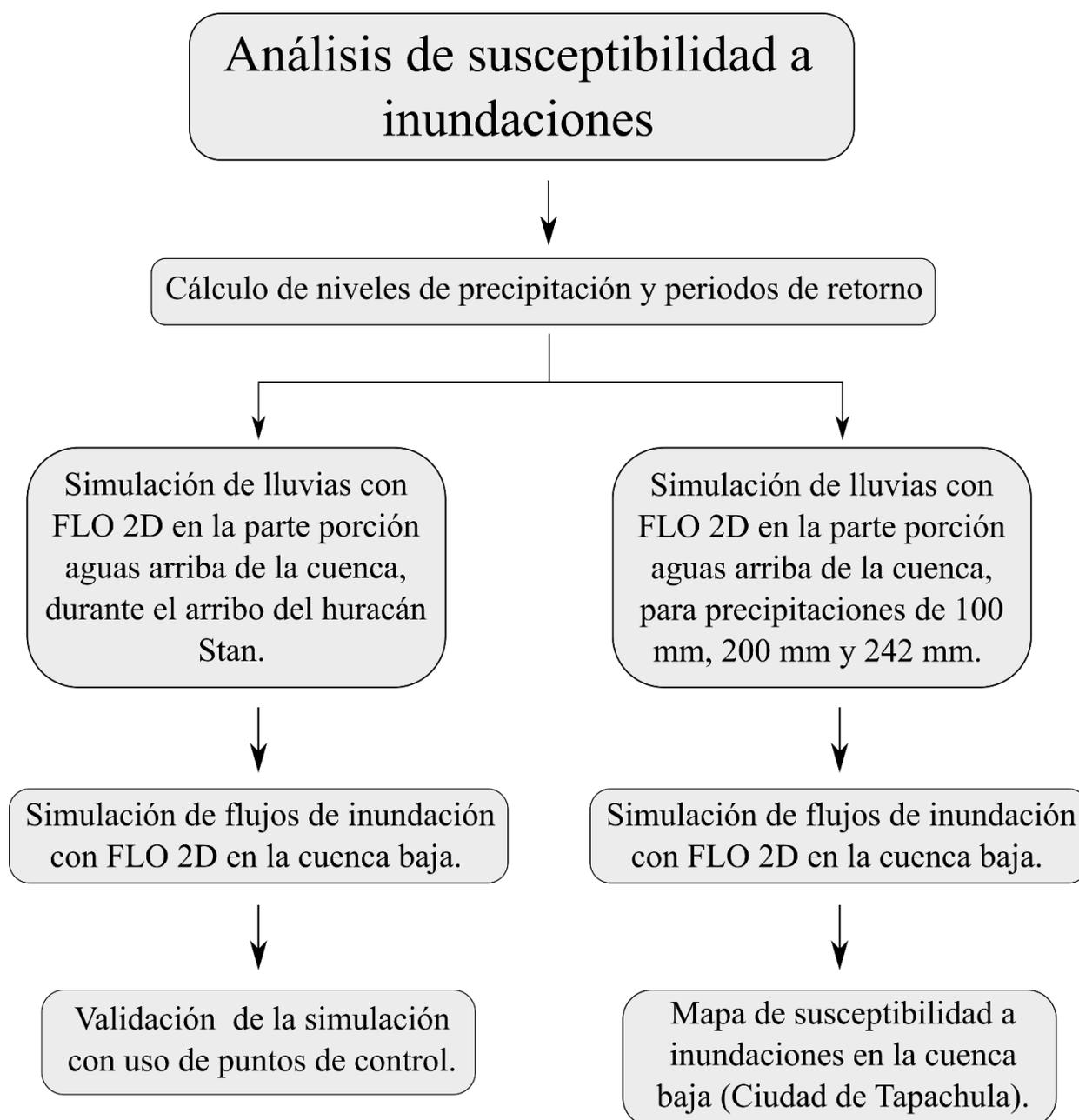


Figura 6.1) metodología para el análisis de susceptibilidad a inundaciones, la simulación de lluvia por el arribo del huracán Stan comprende los días 3 al 6 de octubre del 2005, los niveles de precipitación de 100 mm, 200 mm y 242 mm corresponden a periodos de retorno de 1.5, 10 y 50 años respectivamente.

así como también para la evaluación del peligro y mitigación ante diversos escenarios de inundaciones.

FLO 2D simula los flujos a lo largo de una superficie topográfica, dividida en un conjunto de elementos cuadrados que conforman la malla computacional. El programa se basa sobre el modelo de flujo somero, considerando las ecuaciones constitutivas de continuidad y movimiento en un esquema de diferencias finitas centrales, considerando la conservación de volumen; dichas ecuaciones (ecuaciones 6.1 y 6.2) se resuelven en las ocho direcciones principales (norte, noreste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste). Las ecuaciones de movimiento y continuidad se ejecutan a través de cada uno de los bordes de los elementos de la malla en una dirección en un tiempo específico, las ecuaciones se resuelven de manera independiente unas de otras (O'Brien 2011)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{dhv}{\partial x} = j \quad \text{Ec. 6.1)}$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v \partial v}{g \partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad \text{Ec. 6.2)}$$

La ecuación 6.1 representa la ecuación de continuidad en forma diferencial en donde h representa la profundidad del fluido (en metros), y v es la velocidad promedio en profundidad del fluido en una de las ocho direcciones (m/s), mientras que j representa el volumen del fluido. La ecuación de movimiento (ecuación 6.2) se describe en términos adimensionales a partir de la pendiente de fricción o fuerza de fricción (variable dependiente) mientras que las variables independientes son la aceleración local ($\frac{\partial v}{g \partial t}$) donde g es la aceleración de la gravedad y t es el tiempo, la aceleración convectiva ($\frac{v \partial v}{g \partial x}$), S_0 la pendiente del canal (expresada en grados) y el gradiente de presión ($\frac{\partial h}{\partial x}$).

FLO 2D resuelve las ecuaciones y calcula la descarga en cada una de las celdas en cada uno de los intervalos de tiempos especificados (i), los pasos para la resolución son los siguientes (O'Brien 2011):

1) se asigna a cada uno de los elementos de la malla la pendiente, la rugosidad (número de manning).

2) Se asigna la profundidad del flujo a partir del volumen inicial definido en una de las celdas (d_x^i), el cual surge a partir de una curva hidrográfica, un volumen de entrada “*inflow*” entre otras formas; con base en este primer valor de la profundidad del flujo se estima el siguiente valor (d_x^{i+1}) para cada uno de las ocho celdas con las que colinda la celda, promediando ambos elementos de la malla

$$d_x^{i+1} = d_x^i + d_{x+1}^i \quad \text{Ec. 6.3}$$

3) A partir de la ecuación de movimiento, se realiza un primer cálculo de la velocidad, la cual se emplea como base para resolver la ecuación de movimiento por el método de Newton-Raphson.

4) Se calcula la descarga en el borde de cada uno de los elementos al multiplicar la velocidad por el área transversal del terreno.

5) El incremento en la descarga se calcula a partir de la sumatoria de las descargas en las ocho direcciones (ecuación 6.4 y figura 6.2).

$$\sum Q_X^{i+1} = Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{NE} + Q_{SE} + Q_{SW} + Q_{NW} \quad \text{Ec. 6.4}$$

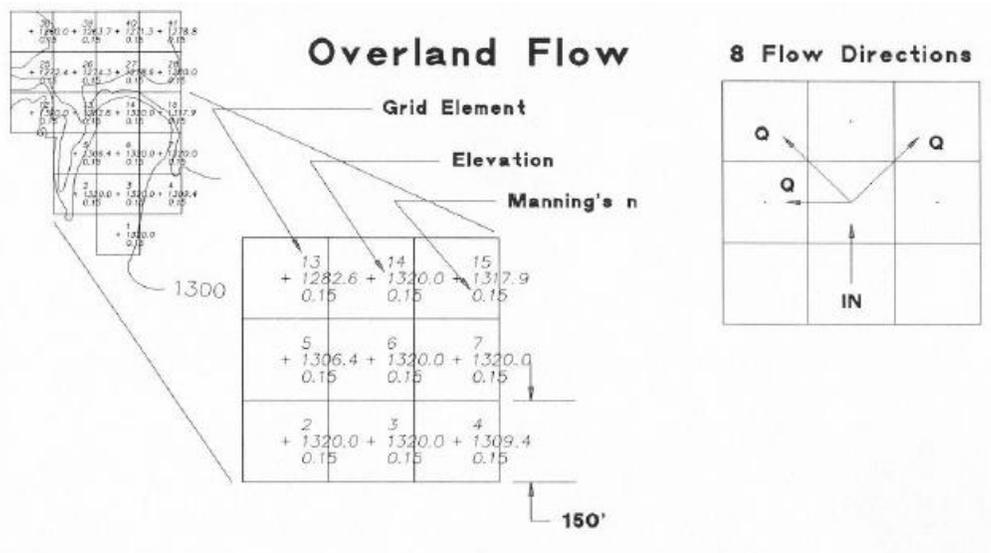


Figura 6.2) Malla representativa de un área de inundación, en el cual se ejemplifican los cuadrantes a través de los cuales se calculan las descargas.

Para mejorar el modelo numérico, es necesario que en el programa se especifiquen los siguientes valores para tener una perspectiva más realista.

Curva hidrográfica: Una curva hidrográfica permite representar la variación en el tiempo de la lluvia o de un flujo de agua. En el caso de un evento de lluvia, las variaciones en la tendencia de la curva se relacionan con cambios en la intensidad, y en caso de un flujo, en el cambio de la descarga. Para la construcción de la curva se pueden utilizar valores medidos con métodos directos (estación de lluvia o sensor sísmico en caso de un flujo), indirectos a través de ecuaciones empíricas (Rickenmann 1999) o curvas teóricas para eventos de lluvias característicos (Capra et. al., 2018).

Numero de Manning: La resistencia a fluir para los flujos simulados en FLO-2D depende de la rugosidad de la superficie topográfica, misma que va a depender del tipo de substrato natural o antrópico (vegetación, suelo, concreto, etc.). Para definir este valor, FLO 2D emplea el coeficiente de Manning, el cual ha sido calculado para diferentes substratos de manera empírica, por lo que para su especificación en el modelo numérico se pueden consultar tablas de referencias, como se muestra en la tabla 6.1 (O'Brien and Julien, 1988).

Número de Froude: El número de Froude es una cantidad adimensional que representa la relación entre las fuerzas inerciales y las gravitacionales, como se muestra en las ecuaciones 6.5 y 6.6, donde ρ es la densidad del fluido, L la longitud del canal por el cual fluye el flujo y v es la velocidad del mismo. Este parámetro define el régimen del flujo: supercrítico, crítico o subcrítico, cuando el valor es mayor a 1 se considera un flujo supercrítico, y menor a 1 se considera subcrítico.

$$\frac{|\text{fuerza neta del fluido}|}{|\text{peso del fluido}|} \sim \frac{\rho L^2 v^2}{\rho L^3 g} = \frac{v^2}{Lg} \quad \text{Ec. 6.5)}$$

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{Lg}} \quad \text{Ec. 6.6)}$$

Los resultados de las simulaciones son visualizados con Mapper ++, el cual permite la extracción de los datos en formato shapefile para su posterior análisis en un sistema de información geográfica. En el presente trabajo se utilizó el programa libre QGis.

Tabla 6.1) Valores empíricos para el coeficiente de Manning. Tomado de COE, HEC-1 Manual, 1990 y COE, Technical Engineering and Design Guide, No. 19, 1997

superficie	Número de manning
césped denso	0.17-0.8
vegetación densa	0.17-0.48
arbustos, pastizales, lecho boscoso	0.3-0.4
césped ordinario	0.2-0.4
superficies ásperas con poco césped	0.2-0.3
vegetación limitada	0.05-0.13
áreas agrícolas ordinarias	0.06-0.22
áreas agrícolas con cobertura vegetal	0.17-0.47
asfalto y concreto	0.02-0.05

6.3 Datos de entrada

Para realizar las simulaciones numéricas es necesario definir los parámetros de entrada. En el presente trabajo, se simularon escenarios de lluvia para definir la curva de descarga de la cuenca alta, y posteriormente, a partir de dichas curvas, simular las zonas de inundación en la porción inferior de la cuenca.

El primer parámetro de entrada es la topografía y el tamaño de la malla computacional. La resolución de ambas será de acuerdo a la extensión de la región de estudio. La cuenca del río Coatán tiene una superficie de 451 km². Las simulaciones fueron realizadas en una computadora de escritorio de capacidades limitadas, por lo que las simulaciones se ejecutaron con un DEM de 30 m y con una malla con la misma resolución.

- Simulaciones lluvia/escurrencimiento

Para simular el proceso de lluvia/escurrencimiento (*rain/runoff*) es necesario ingresar una curva que defina la variación de lluvia en el tiempo, y el valor de la lluvia total acumulada. Este parámetro de entrada se obtuvo a partir del análisis de los periodos de retorno (Capítulo 5), empleándose los datos de la estación Finca Chicharras debido a que es la estación más cercana a la porción alta de la cuenca. Con base en el análisis realizado, se escogieron los siguientes escenarios: 1) Huracán Stan, con una acumulación de 674 mm en el intervalo del 3 al 5 de octubre del 2005 acumulados en 96 horas y un tiempo total de simulación de 100 horas; 2) 100 mm (periodo de retorno 1.4 años) y 200 mm (periodo de retorno de 10 años) distribuidas en 12 horas con un tiempo total de

simulación de 18 horas cada una, 3) lluvia de 242 mm acumulados en 28 horas, valor que corresponde al máximo de lluvia registrado en los últimos 40 años (periodo de retorno de 46 años) con una duración de simulación de 36 horas.

La lluvia es introducida como parámetro en el código a través de la curva de descarga (porcentaje acumulado vs tiempo). Los datos disponibles de la estación Finca Chicharras son valores acumulados por día, lo que limita definir la distribución e intensidad de la lluvia durante el evento hidrometeorológico. Por lo que en el presente estudio las curvas hidrográficas fueron definidas tomando las curvas de referencias definidas con base en los eventos de los huracanes Manuel y Patricia (Capra et. al., 2018), cuyo comportamiento fue muy similar aun cuando la cantidad de lluvia acumulada fue diferente. La curva fue ajustada a la duración del evento asociado al Huracán Stan y a los otros escenarios (figura 6.3).

Finalmente, se definieron unos puntos de salida (*outflow*) hacia la parte terminal de la cuenca para calcular la descarga de salida (Figura 6.4) y se realizaron las gráficas de la descarga en estos puntos (descarga vs tiempo). Esas curvas fueron posteriormente utilizadas como parámetro de entrada para simular los flujos de agua en la porción baja de la cuenca para así determinar las zonas de inundación. No se simularon flujos con carga de sedimentos (flujos hiperconcentrados) ya que durante este tipo de eventos dominan procesos fluviales únicamente con transporte de carga en el fondo del canal y no en suspensión.

Es importante destacar que en el modelo de lluvia/escorrentía no se consideró un modelo de infiltración ni evapotranspiración. Se realizaron pruebas considerando el mapa de uso de suelos, y asignando un valor de Número de Curva (Chong y Teng 1986, Grimaldi et al., 2013) a cada categoría como parámetro global para el cálculo de la infiltración. La simulación no se realizó con éxito, posiblemente debido al elevado número de polígonos por cada uso de suelo, y a la extensión de la cuenca alta del río Coatán. Como consecuencia, las curvas de descarga obtenidas a partir de la simulación de lluvia/escorrentía podrían estar sobre estimadas durante las primeras horas del evento, sin embargo una vez saturado el suelo, el comportamiento de las curvas no sería muy diferente.

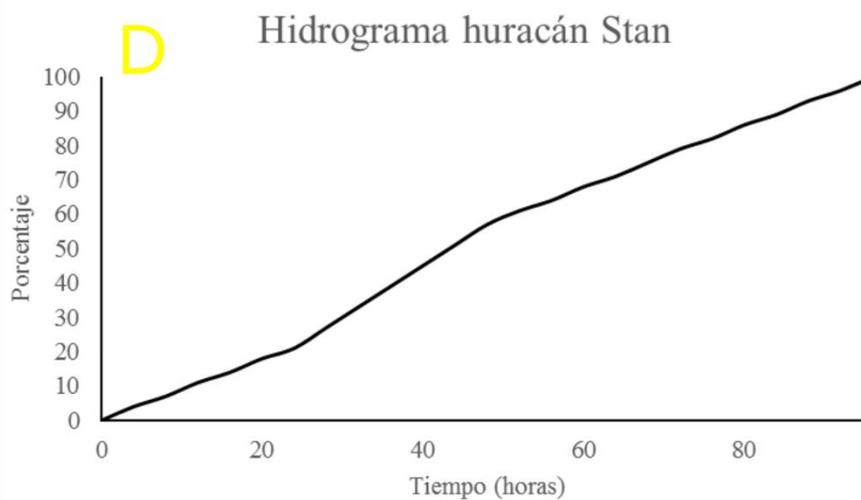
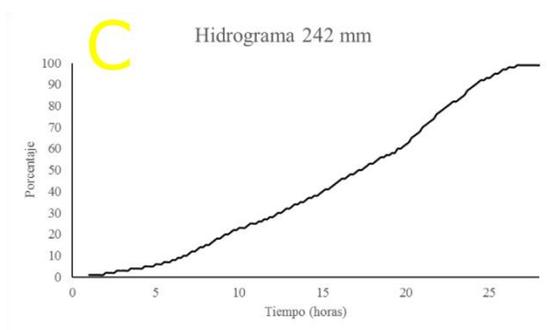
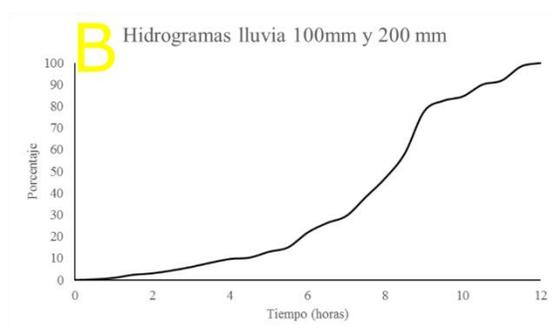
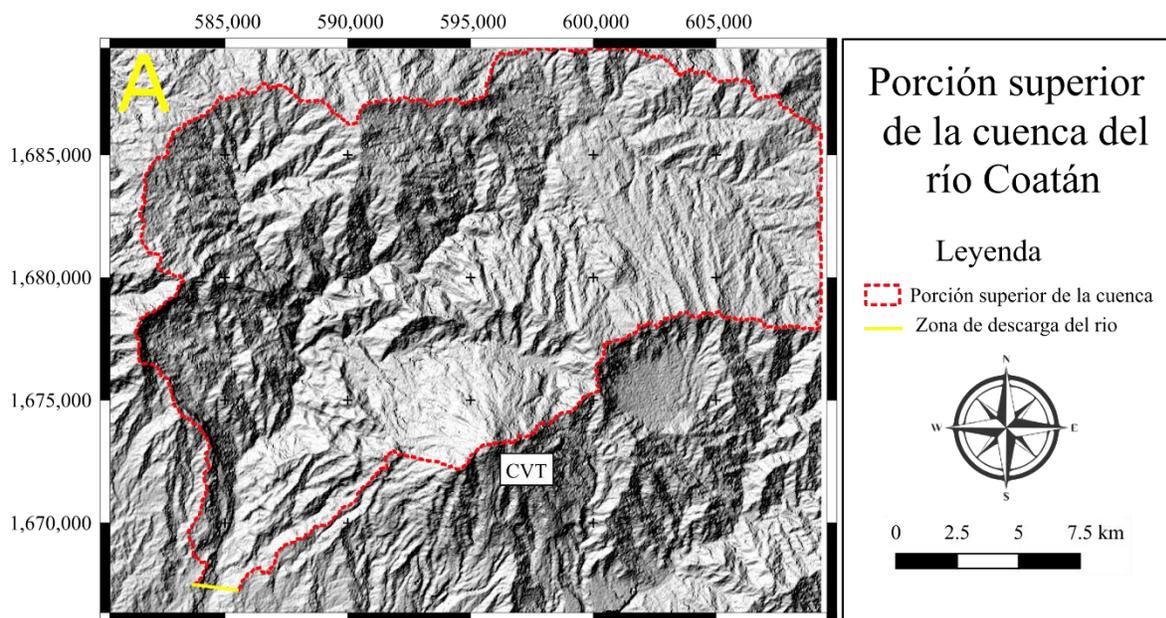


Figura 6.3) Cuenca superior del río Coatán, en la cual se realizó la simulación de lluvias para determinar la descarga que tiene en la porción baja de la cuenca, la cual es susceptible a inundaciones, se muestran también los hidrogramas para lluvias de 100 y 200 mm (B) 242 mm (C) y huracán Stan (D).

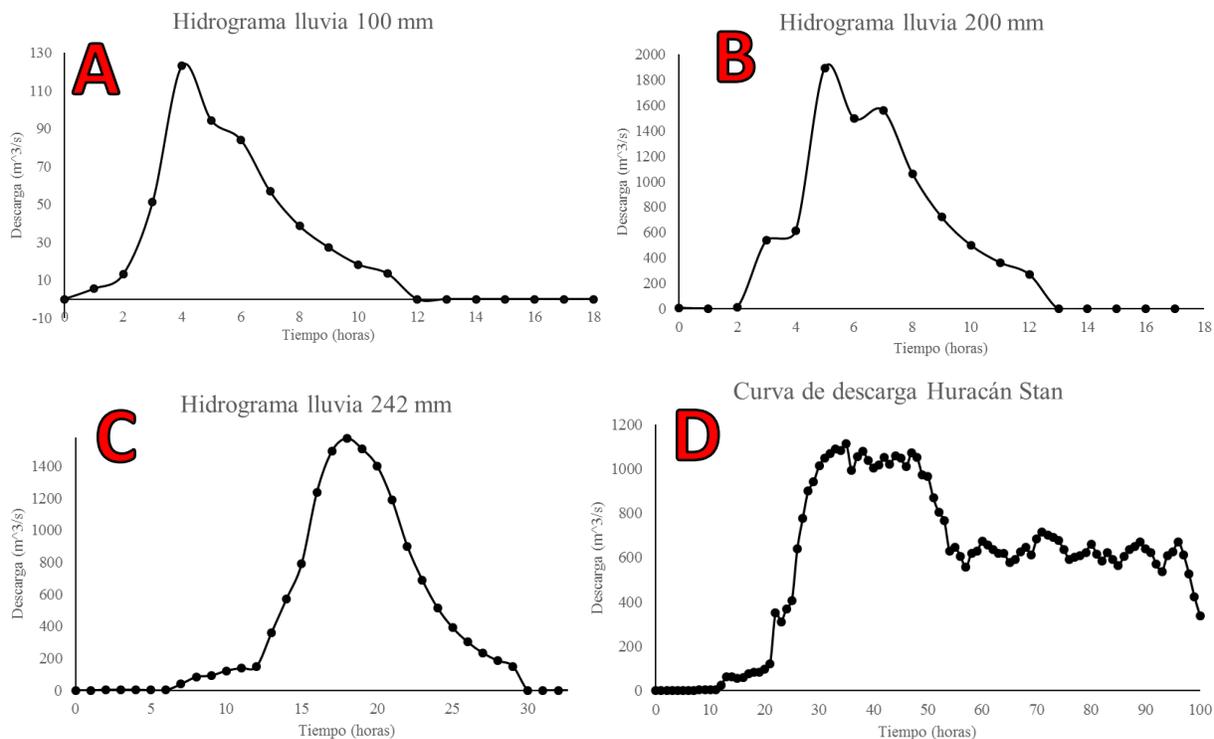


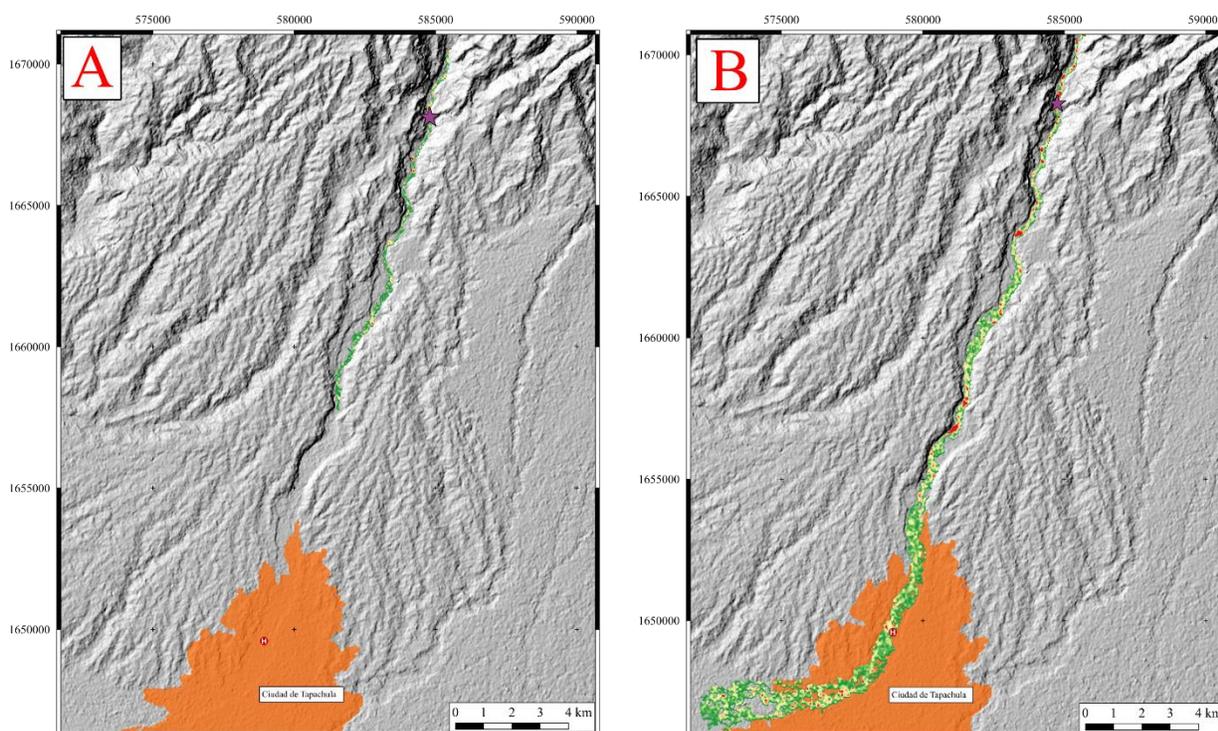
Figura 6.4) Curvas de descarga en la porción baja de la cuenca para los escenarios de lluvia de 100mm (A) 200 mm (B), 242 mm (C) y el huracán Stan (D) , las descargas muestran un patrón en el cual hay un pico máximo de descarga, Las descargas se muestran en cm/s (eje Y) y tiempo (eje X).

6.4 Simulaciones en la planicie de inundación

Los resultados de las simulaciones para definir las zonas de inundación según los diferentes escenarios de lluvias se muestran en la figuras 6.5 y 6.7. Para el escenario menor, con 100 mm de lluvia acumulados en 12 horas, el flujo simulado no alcanza inundar la ciudad de Tapachula. Este escenario tiene un periodo de retorno de 1.4 años por lo que representa un evento ordinario que no provocaría inundaciones en la zona urbanas.

Las simulaciones de 200 mm y 242 mm acumulados en 18 horas (figura 6.5b, y 6.7a respectivamente) muestran una distribución espacial similar, en ambos eventos los flujos simulados pueden generar daños considerables en la ciudad de Tapachula en las porciones laterales del río, en donde el flujo podría alcanzar profundidades de más de 5 metros. Estos espesores podrían dañar los puentes y las instalaciones eléctricas que cruzan el río Coatán.

Una de las características que destacan estas simulaciones es la presencia de zonas aisladas en medio del cauce del río que no consiguen ser inundadas (figura 6.7, 6.8 y 6.9). Estas zonas corresponden con las terrazas aluviales descritas ampliamente por Murcia y Macías (2009), que se presentan mayormente en las porciones del abanico aluvial de Tapachula (figura 6.7); la altura de estas terrazas con respecto al nivel del lecho del río en algunas regiones consiguen alcanzar más de 10 metros, motivo por el cual el flujo no es lo suficientemente grande para inundar dichas porciones.



Leyenda

Profundidad del flujo (m)

0-2.5

5-7.5

>10

2.5-5

7.5-10

Ciudad de Tapachula

IMSS

Puente el Progreso



Figura 6.5) Simulaciones numéricas de flujos en la cuenca baja del río Coatlán, en el que se muestra la zona de inundación con profundidades ante eventos de precipitación de 100 mm (A) y (B) 200 mm.

Los flujos simulados derivados de la precipitación del huracán Stan (figura 6.7b), tienen una distribución espacial similar a los flujos de 200 y 242 mm de precipitación, (incluyendo los vacíos del abanico aluvial) con ligeras variaciones en los niveles máximos de la profundidad del flujo,

por lo que se concluye que el área total inundada en la ciudad de Tapachula es similar a partir de niveles de precipitación mayores a 200 mm y hasta los valores máximos históricos (242 mm). Este comportamiento se atribuye a que a partir de estos valores, el flujo de agua desborda siempre del canal principal y se esparce sobre una superficie no confinada de acuerdo a la pendiente. Este comportamiento es característico de inundaciones en zonas de planicie. Posiblemente la diferencia se observaría si se hiciera el dominio computacional más grande hacia la desembocadura del río Coatán en el océano Pacífico.

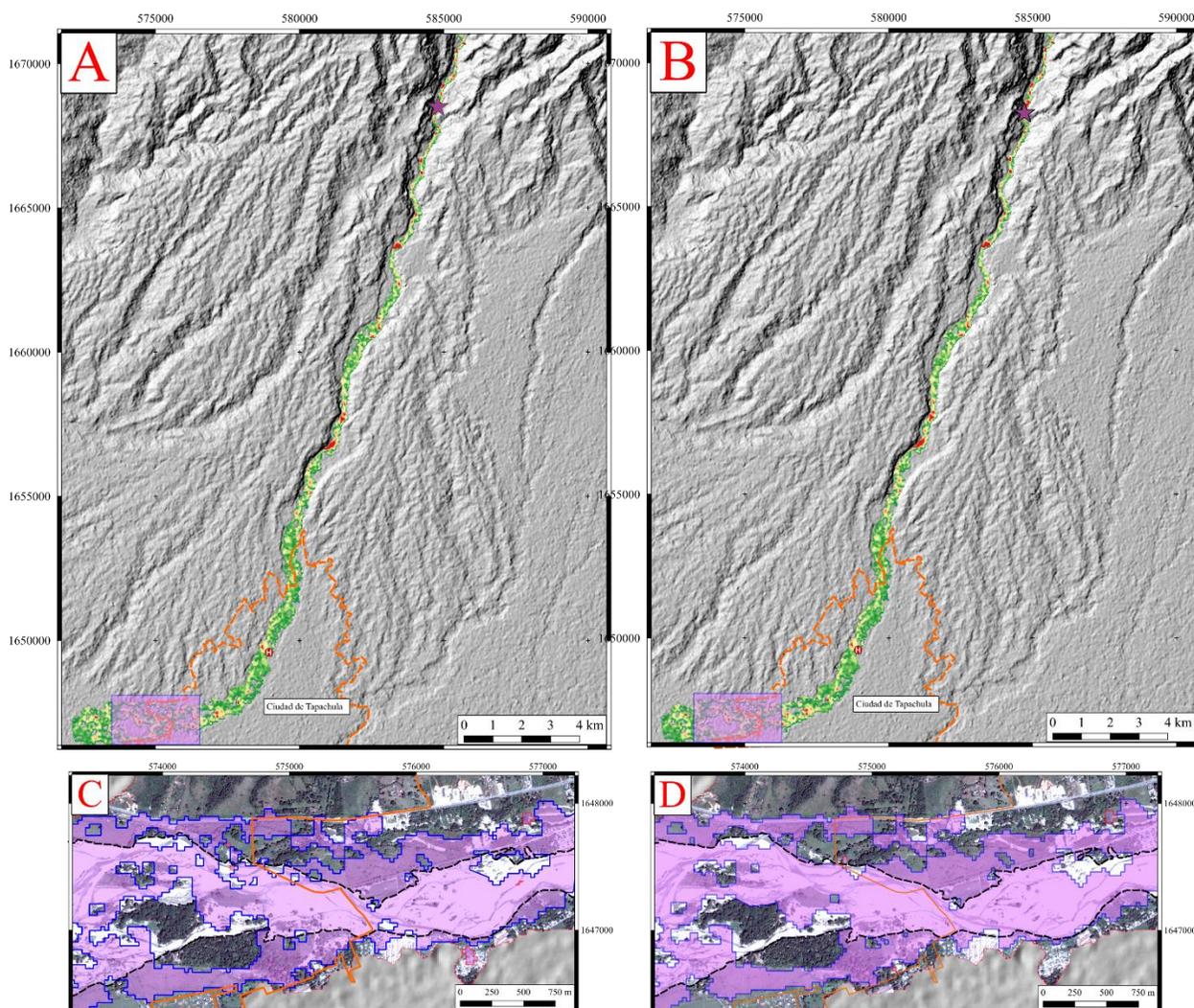
La validación de la simulación de flujos del huracán Stan se basó en la comparación de los niveles de flujo en ciertos puntos de control a lo largo del cauce, particularmente en el puente cercano al poblado “El Progreso” (a una distancia aproximada de 1 km del poblado) y en el hospital IMSS de la ciudad de Tapachula, el cual se encontraba en la zona del abanico aluvial y fue destruido en su mayoría por el arribo del flujo (Informe del CENAPRED García-Arróliga et al., 2006). En el puente “El Progreso” (figura 6.6) el flujo simulado tuvo una profundidad de 7 metros mientras que el observado durante el



Figura 6.6) puente colgante en la comunidad del progreso creado posteriormente al impacto del huracán Stan, la profundidad medida en éste punto fue de 7 metros aproximadamente

evento fue de 8 m aproximadamente, ya que el puente quedó dañado por el mismo. En la zona del IMSS la profundidad del flujo simulado tuvo una profundidad de 2.8 metros, mientras que el ocurrido en octubre del 2005, fue estimado en 3 metros, debido a que consiguió cubrir todo el primer piso del hospital (Informe del CENAPRED García-Arróliga et al., 2006). Además de estos puntos de control un rasgo con el cual se pueden validar las simulaciones es el contorno de la zona de inundación a lo largo del cauce del río identificado en el mosaico generado con las imágenes de *google* al comparar las zonas de inundación simuladas y el contorno derivado del evento Stan

se puede cotejar que efectivamente las zonas de inundación son bastante similares (figura 6.7C y 6.7D).



Profundidad del flujo (m)



Leyenda

-  Ciudad de Tapachula
-  Área de inundación simulada
-  Área de inundación del evento Stan 2005
-  IMSS
-  Puente el Progreso



Figura 6.7) Simulaciones numéricas de flujos en la cuenca baja del río Coatán, en el que se muestra la zona de inundación con profundidades ante eventos de precipitación de 242 mm (A) y (B) del huracán Stan (674 mm). En las figuras C y D se muestra un acercamiento a la zona de inundación obtenida con base en la imagen de *Google Earth*.

6.5 Mapa de susceptibilidad a inundaciones

Con base en los resultados se generó el mapa de susceptibilidad a inundaciones en el cual se indican las zonas vulnerables ante el arribo de flujos derivados de precipitaciones que superen los 200 mm de precipitación y que tendrían un periodo de retorno de 10 años. El mapa incluye los principales elementos de infraestructura dentro de la ciudad de Tapachula y los alrededores, así como también se incluyen las áreas de cultivo a lo largo del cauce del río Coatán.

Se presenta un mapa que delimita el contorno de la zona máxima de inundación (figura 6.8), y un segundo mapa en donde se indican las posibles profundidades del flujo en la ciudad de Tapachula (figura 6.9). Con base en estas figuras se puede identificar que a lo largo del río, el flujo es confinado debido a la presencia de terrazas laterales de más de 20 m de espesor. Por el contrario, cuando el río desemboca en el abanico aluvial, el flujo se desconfinan y se expande lateralmente. Se nota como la zona de inundación es asimétrica, variando a lo ancho del canal. En algunas porciones la zona de inundación alcanza una distancia de hasta 300 metros a partir del borde del cauce del río Coatán, por lo que todas las construcciones que se encuentren dentro de este rango son susceptibles a ser inundadas, incluyendo el hospital IMSS y centros comerciales.

Con base en las figuras 6.8 y 6.9 se identifica que uno de las afectaciones mayores ante eventos de inundación ocurre en los puentes que cruzan el río Coatán, para comunicar la sección este y oeste de la ciudad. En ambas porciones de la ciudad existen autopistas importantes que conectan hacia otros estados de la República Mexicana y Centroamérica (Autopista Federal 200), inclusive las vías férreas pasan a través de uno de los puentes, el cual fue derrumbado en las inundaciones del 2005 (Murcia y Macías 2009). Por estos motivos los puentes son una de las infraestructuras que en caso de ser afectados pudieran tener consecuencias graves de manera económica y social.

Las líneas de transmisión eléctrica son otro rasgo de infraestructura que pudiera ser afectado en caso de ocurrencia de eventos de inundación similares a los ocurridos en el 2005, debido a que estas cruzan el río o se encuentran en los bordes de este. Su afectación dejaría en desabasto de energía eléctrica a numerosas comunidades.

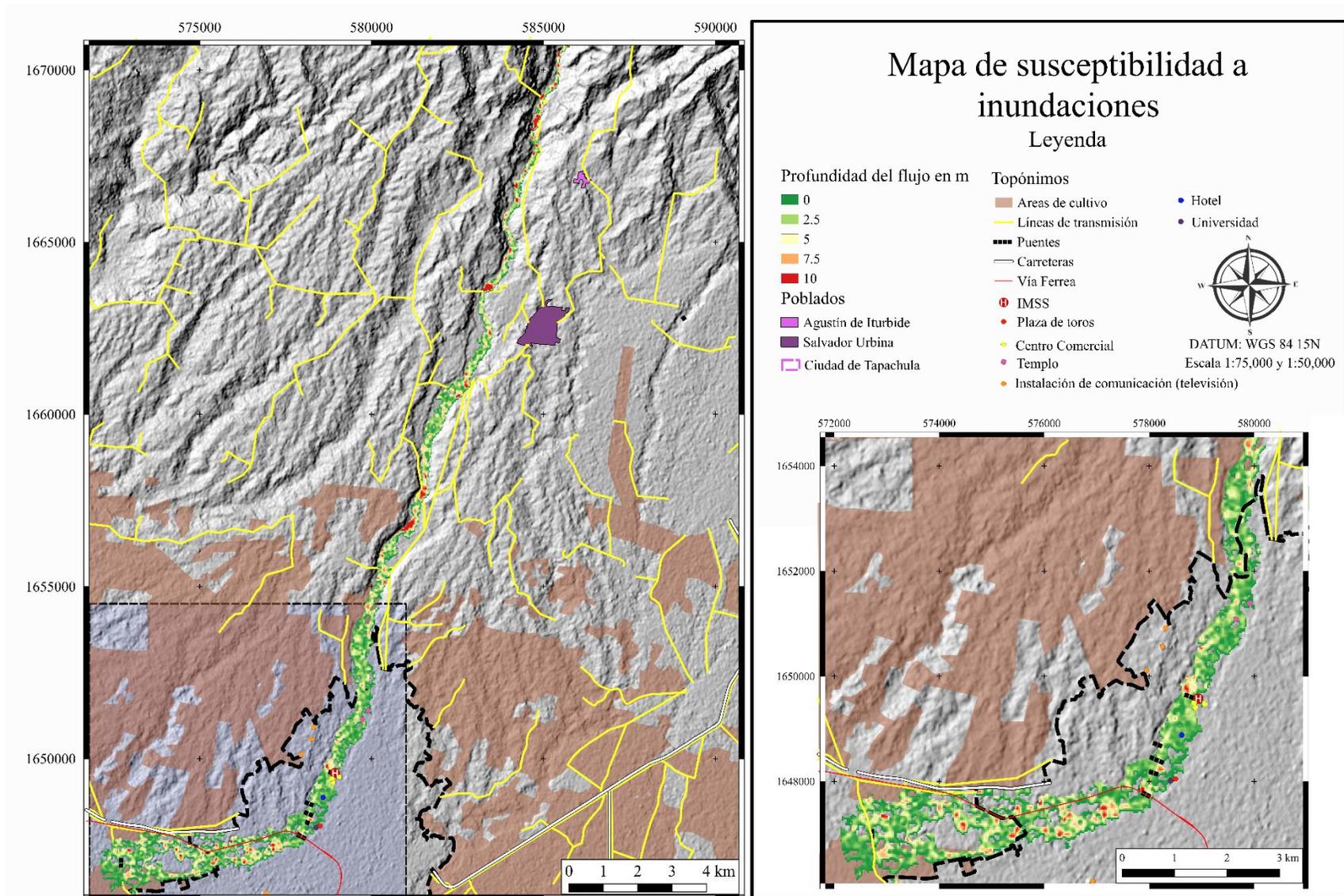


Figura 6.8) Mapa de susceptibilidad a inundaciones de la ciudad de Tapachula con profundidades del flujo

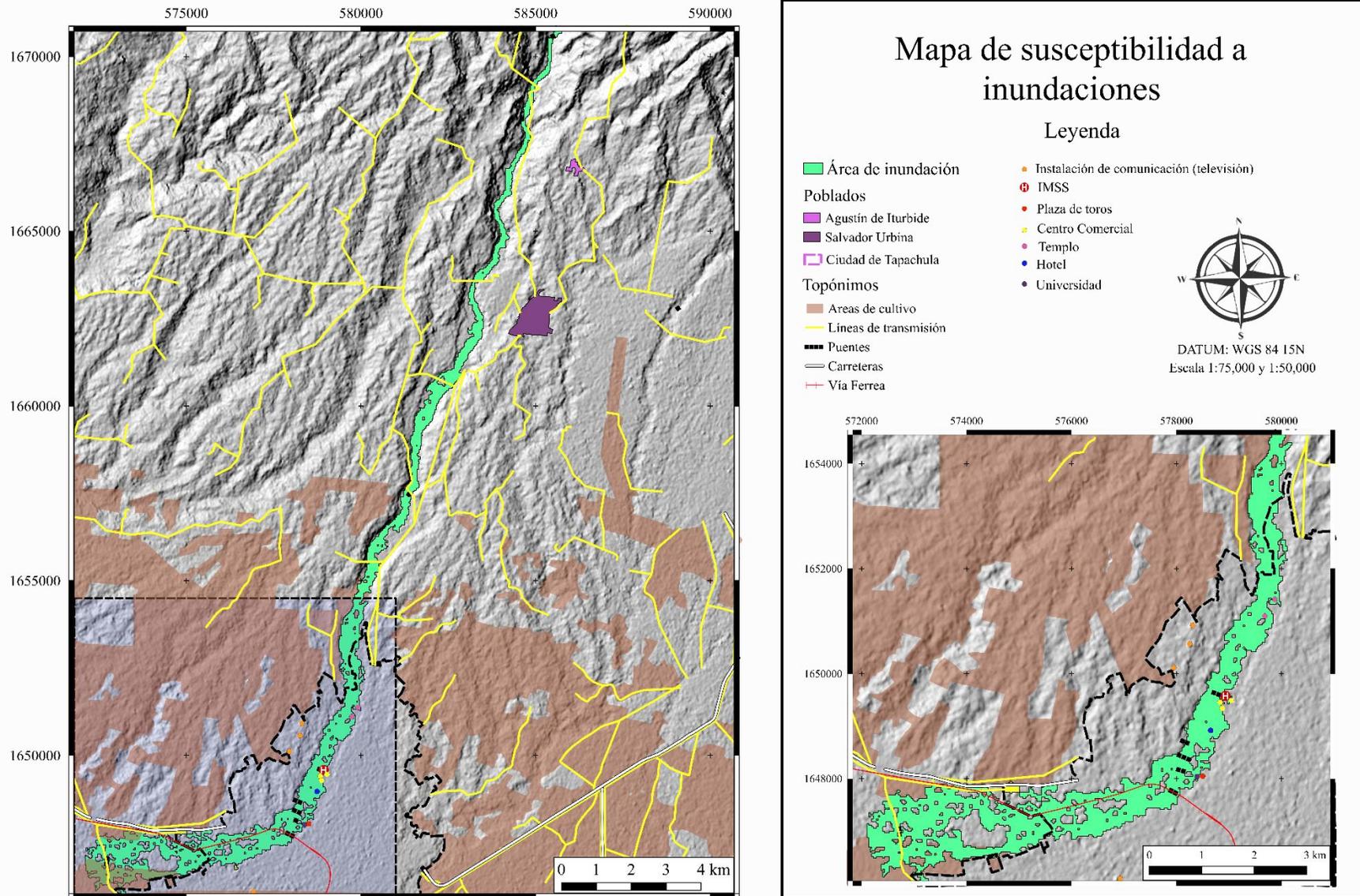


Figura 6.9) Mapa de susceptibilidad a inundaciones, donde se muestra el área de inundación en la ciudad de Tapachula

Capítulo 7. Resultados generales y discusión

El desarrollo de los SIG ha mejorado enormemente las posibilidades de modelar los peligros naturales con diferentes enfoques. Los diferentes procedimientos de evaluación del peligro por procesos de remoción en masa pueden clasificarse en dos grupos principales: métodos cualitativos y cuantitativos. Los métodos cualitativos incluyen el mapeo geomorfológico y los enfoques heurísticos o basados en índices (ponderación de diferentes capas temáticas). Estos métodos son muy flexibles sin embargo el principal inconveniente es que implican un gran nivel de subjetividad, por lo que los mapas producidos por diferentes investigadores pueden ser muy diferentes (Guzzetti et al., 1999). Por otro lado, los métodos cuantitativos incluyen modelos estadísticos, así como modelos numéricos basados sobre el cálculo preciso de diferentes propiedades, como por ejemplo el límite de estabilidad de una ladera. En particular, los modelos estadísticos, como el análisis multivariado, se basan en el análisis de los deslizamientos observados y un conjunto de variables que potencialmente pueden considerarse factores de inestabilidad. Si se proporcionan variables de entrada suficientemente buenas, el modelado estadístico puede determinar con éxito el peligro a PRM en un área determinada King & Zeng (2001).

Para la definición de las variables de entrada, se pueden utilizar diferentes metodologías dependiendo de la disponibilidad de datos, acceso al área de trabajo, extensión del área de afectación, entre otros. En particular, dependiendo de la extensión del área de interés, será la escala a la cual se realizará el trabajo y la metodología utilizada. Debido a la gran extensión de la cuenca del río Coatán (450 km²), el presente trabajo se realizó a una escala que no siempre permitió que la observación de campo se viera reflejada en el mapa o en el resultado de las simulaciones. Por ejemplo, la información geológica fue extraída de un mapa a escala de 1:100,000; la resolución del DEM utilizado para la obtención de los mapas temáticos morfológico fue de 12.5 m; el mapa de inventario de deslizamiento se realizó con imágenes de 2 m de resolución y finalmente las simulaciones de inundación se realizaron con una malla computacional de 30 m. Por lo anterior, con los resultados obtenidos en el presente trabajo se obtuvo un mapa de susceptibilidad a PRM con una resolución final de 12.5m, y un mapa de susceptibilidad a inundación con una resolución final de 30 m, y que podrán servir de base para trabajos futuros que se realicen a mayor resolución en las zonas de mayor amenaza.

La metodología del presente trabajo consistió en tres etapas principales:

- Análisis multivariado para la definición de las zonas susceptibles a procesos de remoción en masa. Los parámetros de entrada fueron obtenidos a partir de datos previamente publicados, como el mapa geológico (García-Palomo et al., 2006), el análisis de un DEM de 12.5 m de resolución y una imagen de *Google Earth* de la cual se definió el catálogo de deslizamientos y se obtuvo el mapa de uso de suelo. De este análisis se obtuvo el mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.
- Análisis del registro históricos de lluvia de los últimos 60 años para definir periodo de retornos de eventos extremos.
- Simulaciones numéricas de lluvia-escorrentía en la cuenca alta del río Coatán para definir curvas de descargas de la cuenca para eventos extremos y posteriormente simulación de inundación hacia el abanico aluvial de la cuenca para la obtención del mapa de susceptibilidad a inundaciones.

Con base en el análisis aquí realizado se ha determinado que el uso de suelo y la geología son los parámetros que controlan en mayor medida las zonas de susceptibilidad a deslizamientos; en particular, las zonas con mayor probabilidad a sufrir procesos de remoción en masa resultaron ser las áreas donde el suelo es empleado para fines agrícolas o simplemente no presentan vegetación densa, así como también en las zonas donde afloran los intrusivos terciarios los cuales a menudo se encuentran altamente fracturados y alterados.

Algunos agentes secundarios que intervienen en la formación de PRM son las pendientes, las orientaciones de las laderas y la existencia de caminos. Es de particular interés hacer notar que los deslizamientos ocurren principalmente en laderas con pendientes entre los 15° y 45° , debido a que en estas condiciones el material granular suelto o parcialmente suelto es removido constantemente, mientras que en las laderas mayores a 45° y de hasta casi 90° ya no existe material granular susceptible a ser removido, por lo que el PRM dominante en estas laderas es la caída de bloques y vuelcos (figura 3.2).

La clasificación de zonas susceptibles a procesos de remoción en masa realizada por el algoritmo de clasificación por máxima similitud, presenta una exactitud aceptable con más del 70% para clases diferentemente ponderadas y 59% para las igualmente ponderadas. El modelo no consigue tener una exactitud del 100% debido a que una gran cantidad de factores incluidos en el análisis no tienen una tendencia lo suficientemente evidente para su clasificación. Por otro lado, también

la resolución del DEM utilizado (12.5m) limita la exactitud del análisis, ya que el valor de las variables independientes es promediado sobre un área que a veces es mayor de la extensión de la cicatriz del deslizamiento.

Además del uso de suelo y de la geología, los demás factores que controlan la estabilidad de ladera en la cuenca alta del río Coatán son:

1. Escarpes producidos de manera antropogénica por la construcción de caminos.
2. Pendientes que superen los 15° de inclinación.
3. Laderas con orientaciones sur y sureste, que corresponden a las que reciben mayor humedad desde el Pacífico.

Del análisis de lluvias se ha definido que los niveles anuales promedios varían notablemente a lo largo de la cuenca, siendo los niveles mayores en la porción de aguas arriba (4,100 mm) y disminuyendo hacia la zona de aguas abajo (2,700 mm), por tales motivos los niveles máximos de precipitaciones diarios ocurren en la zona superior de la cuenca, con valores que han llegado a sobrepasar los 200 mm por día.

Los periodos de retorno para lluvias de 200 mm son mayores a 10 años y, en caso de ocurrencia de eventos de este tipo, existe una gran probabilidad de que los flujos atraviesen la ciudad de Tapachula causando inundaciones derivados del desborde del río Coatán.

Con base en el análisis de lluvias se puede determinar que eventos de precipitaciones similares a los ocurridos durante el huracán Stan tienen probabilidades de ocurrencia de 41% en 10 años y 66% en 20 años, por lo cual no debe de subestimar la ocurrencia de estos eventos.

Con base en el análisis de los periodos de retorno de las lluvias, se definieron posibles escenarios que fueron simulados en la cuenca alta del río Coatán. Estos fueron de 100 mm, 200 mm 242 mm y el evento del Huracán Stan (674 mm en 3 días). Considerando la resolución de los datos de lluvia (lluvia acumulada por día) y la extensión de la cuenca, para la realización de las simulaciones se hicieron las siguientes simplificaciones:

- Debido a que las estaciones de lluvia utilizada proporcionan únicamente el valor de lluvia acumulada por día, para poder ingresar la curva de distribución de los diferentes eventos de lluvia, se utilizaron curvas calculadas por eventos de huracanes (Patricia y Manuel

Capra et. al., 2018) que tuvieron un comportamiento muy similar, típico de este tipo de evento hidrometeorológicos

- En las simulaciones de lluvia/escorrentía, no fue posible incluir el cálculo de infiltración, debido a dificultades en el cálculo por el elevado número de polígonos por cada uno de los 4 tipos de uso de suelo calculado. Se considera que el no incluir la infiltración se tenga una sobre estimación del escurrimiento superficial únicamente en las primeras horas del evento.

Como resultado de las simulaciones de lluvia/escorrentía se obtuvieron las curvas de descarga para cada escenario, con base en las cuales se definieron los límites de inundación en la zona urbana de Tapachula. El escenario que corresponde a la acumulación de 100 mm en 12 horas representa lluvias ordinarias, ya que tienen periodos de retorno de 1.4 años. Dichos eventos no generan una condición de peligro a inundaciones en la ciudad de Tapachula; mientras que los escenarios con acumulación de lluvias mayores a 200 mm implican un arribo de los flujos a la zona urbana de Tapachula con una expansión lateral en la zona del abanico aluvial. La extensión de la zona de inundación permanece constante a partir de los 200 mm de lluvia acumulada, solo se observan diferencias en las profundidades máximas de los flujos. Por ejemplo en el IMSS, la máxima profundidad de los flujos simulados es de 4.1 m para la simulación del huracán Stan, 4.5 m para la lluvia de 242 mm, y 4.6 m para la lluvia de 200 mm. Mientras que en el puente el Progreso la máxima profundidad de los flujos simulados es de 7 m para la simulación del huracán Stan, 8 m para la lluvia de 242 mm, y 8.6 m para la lluvia de 200 mm.

El mapa de susceptibilidad a inundación fue definido con base en la simulación de 200 mm en un intervalo de 12 horas. La zona inundada se extiende sobre un área de 12.29 km² de los cuales 7.4 km² se encuentran en la zona del abanico aluvial. Con base en el mapa de susceptibilidad a inundaciones y los trabajos previamente realizados por Murcia y Macías (2009), y García-Arróliga et al. (CENAPRED, 2006). el proceso de inundación observado es característico de un abanico aluvial (Amora et. al., 2016), con flujos que desbordan de los canales y se extienden lateralmente incrementando considerablemente el área de inundación y dejando sin inundar únicamente las áreas que corresponden a terrazas aluviales y zonas limitadas por barras de canal.

Con base en el mapa de susceptibilidad a inundación, es posible hacer una evaluación de las zonas más susceptibles a ser afectadas. En particular, en los últimos 20 años, la ciudad de Tapachula ha

crecido hacia las cercanías del cauce del río, en donde de acuerdo a las simulaciones se pueden alcanzar niveles de profundidad del flujo cercanos a 3 metros.

Se observa además, que las zonas con mayor susceptibilidad a ser inundadas corresponden a inmuebles e infraestructura de gran importancia social y económica, como lo son los hospitales, centros comerciales, negocios locales, así como puentes que intercomunican la sección este y oeste de la ciudad de Tapachula e inclusive la porción sureste de la República Mexicana con el resto del país, por lo que las medidas de mitigación son necesarias para evitar el desborde e incremento del nivel del río en temporadas de huracanes.

Capítulo 8. Conclusión

Con base en los resultados expuestos, se han definido las zonas susceptibles a PRM e inundaciones en la cuenca del río Coatán. Ambos fenómenos se asocian a eventos de precipitaciones extremas, aunque el primero es característico por presentarse en la porción de aguas arriba de la cuenca, por un conjunto de factores que favorecen su ocurrencia, como la litología, el uso de suelo, las pendientes y orientaciones de las laderas principalmente. Por otro lado, el agua captada en la cuenca alta del río Coatán provoca inundaciones en las zonas aluviales, con importante afectación en las zonas de llanura.

Con base en los resultados del análisis de PRM se pudo realizar el mapa de susceptibilidad a PRM en la cuenca alta del río Coatán, el cual muestra que los deslizamientos son característicos por presentarse en suelos sin vegetación y sustrato rocoso derivado del intrusivo terciario. Otros factores que también tienen una relevancia importante son las orientaciones de las laderas (mayormente hacia el sur y sureste) y las pendientes (mayores a 30°).

Las acciones encaminadas a la mitigación de estos procesos deben dirigirse a los factores más dominantes en la ocurrencia de deslizamientos, particularmente en el cambio de uso de suelo, las acciones deben incluir una reforestación de las zonas de suelos desnudos y agrícolas, o conservación de la vegetación natural. Además de esto se debe procurar no realizar cortes de carreteras cuando existan laderas con elevadas inclinaciones (mayores a 15°) o las laderas estén inclinadas hacia el sur y sureste.

Con base en las simulaciones numéricas se generó el mapa de susceptibilidad a inundaciones; de este análisis se concluye que no existen cambios notables en las zonas de inundación cuando se han alcanzado niveles de lluvia mayores a 200 mm/día, lo cual se debe a que el flujo al desconfinarsse pierde parte importante de su velocidad, y se esparce a lo largo del abanico aluvial.

La zona susceptible a inundaciones es limitada de manera importante por las terrazas fluviales, las cuales sirven como barrera topográfica. La ocurrencia de estos fenómenos implicaría la pérdida de viviendas, e instalaciones en general en las orillas del cauce del río, así como también en los puentes los cuales son esenciales para mantener la comunicación de la ciudad con el resto de la república y Centroamérica.

Es importante recalcar que la ocurrencia de eventos de precipitaciones intensas similares a los de 2005, no son casos aislados ya que de acuerdo a los análisis expuestos en este trabajo es posible que vuelvan a ocurrir cuando se sobrepasa los 200 mm/día; dicho umbral tiene un periodo de retorno de 10 años, por lo que las medidas de mitigación tanto para inundaciones y PRM deben de contemplar estos tiempos de recurrencia.

Las zonas cercanas al cauce del río Coatán son mayormente susceptibles a inundaciones, particularmente en los primeros 300 metros de distancia del cauce; dentro de este rango se encuentran centros comerciales, hospitales y locales comerciales los cuales representan inmuebles de altos costos, por tales motivos en la medida de lo posible estos deben reubicarse en zonas más periféricas de la ciudad. Una de las medidas de mitigación que también podrían ser aplicadas para la disminución de pérdidas de inmuebles es la construcción de diques y barreras que disminuyan la velocidad de los flujos descendentes y que limiten el desborde del río.

Uno de los alcances esperados del presente trabajo es que los mapas de susceptibilidad a PRM e inundaciones puedan ser empleados por las autoridades competentes de protección civil en Tapachula, para aplicar medidas de mitigación ya sea de tipo informativas o de implementación de infraestructuras.

La metodología expuesta en este trabajo demuestra la viabilidad de realizar un estudio de susceptibilidad a PRM a través de métodos indirectos y apoyada mayormente con una amplia base de datos históricos de lluvia, un DEM y recursos en línea de bajo costo e inclusive gratuitos, con resultados claros y explicativos. Por tales motivos esta metodología puede ser aplicada en otros casos de estudio que presenten condiciones similares.

Capítulo 9. Bibliografía

Appendini, C.M., Rafael Meza, P., Pedrozo-Acuña, A., Raga, G.B., Farfán, L.M., 2014. Storm Surge Estimation Due to the Incidence of Simultaneous Tropical Cyclones in Mexico, In: Proceedings 31st Conference on Hurricane and Tropical Meteorology. American Meteorological Society, San Diego.

Authemayou C., Brocard G., Teyssier C., Simon-Labric T., Gutiérrez-Orrego A., Cacao-Chiquín E. N., Morán-Ical S., 2011, The Caribbean-North America-Cocos Triple Junction and the dynamics of the Polochic-Motagua fault systems: Pull-up and zipper models, *Tectonics*, v.30 doi: 10.1029/2010TC002814

Beven, J.L., 2014. Hurricane Ingrid, National Hurricane Center Tropical Cyclone Report.

Böse, E., 1902, Breve noticia sobre el estado actual del Volcán Tacaná, Chiapas: *Memorias y Revista de la Sociedad Científica “Antonio Alzate”*, 18, 266-270.

Böse, E., 1903, Los temblores de Zanatepec, Oaxaca a fines de septiembre de 1902 y el estado actual del Volcán de Tacaná: *Parergones del Instituto Geológico de México*, 1(1), 25 p.

Capra L., Coviello V., Borselli L., Márquez-Ramírez V., Arámbula-Mendoza R., 2018 Hydrological control of large hurricane-induced lahars: evidence from rainfall-runoff modeling, seismic and video monitoring: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 18, p. 781–794.

Chong, S. K. and Teng, T. M. 1986.: Relationship between the runoff curve number and hydrologic soil properties, *J. Hydrol.*, v. 84, p. 1–7,

De-la Cruz, V., Hernández, R., 1985, Estudio geológico a semidetalle de la zona geotérmica del volcán Tacaná, Chiapas: México, Comisión Federal de Electricidad, Reporte interno, 41/85, 28 p.

De-la Cruz-Reyna, S., Armienta, M.A., Zamora, V., Juárez, F., 1989, Chemical changes in spring waters at Tacaná Volcano, Chiapas, México: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 38, 345-353.

Espíndola, J.M., Medina, F.M., and De los Ríos, M., 1989, A C-14 age determination in the Tacaná volcano (Chiapas, Mexico): *Geofísica Internacional*, v. 28, p. 123–128.

García-Arroliga N., Marín-Cambrais. R., Méndez-Estrada K., Bitrán-Bitrán D., 2006 Características e Impacto Socioeconómico de los Huracanes “Stan” y “Wilma” en la República Mexicana en el 2005 Mexico City: Secretaría de Gobernación and Centro Nacional de Prevención de Desastres

García-Palomo A., Macías J.L., Arce, J.L., Mora J.C., Hughes, S., Saucedo R., Espíndola J.M., Escobar R., Layer, P., 2006. Geological Evolution of the Tacaná Volcanic Complex, México–Guatemala. In: Rose, W.I. (Ed.), Volcanic Hazards in Central America: GSA Special Paper, 412, pp. 39–58.

Grimaldi, S., Petroselli, A., and Romano, N. 2013: Green-Ampt Curve- Number mixed procedure as an empirical tool for rainfall-runoff modelling in small and ungauged basins, Hydrol. Process., v. 27, p. 1253–1264.

Guiney J. L., Lawrence. M. B., 2000. Preliminary report Hurricane Mitch 22 october- 05 november 1998. National Hurricane Center.

Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M. & Reichenbach P. 1999, Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy, Geomorphology , v. 31 p.181-216.

Guzmán-Speziale, M., Pennington, W.D., and Matumoto, T., 1989, The triple junction of the North America, Cocos, and Caribbean Plates: Seismicity and tectonics: Tectonics, v. 8, p. 981–999.

Hazen, A. 1930. Flood flow, a study of frequencies and magnitudes. John Wiley and Sons, INC. New York

INEGI, Conjunto de datos vectoriales 1:50,000, serie III, D15B43, Pavincul 2016

INEGI, Conjunto de datos vectoriales 1:50,000, serie III, D15B53, Tapachula, 2016

INEGI, Carta del uso de suelo y vegetación 1:250,000, serie V, Huixtla D15-2, 2015

J.L. Arce a., J.L. Macías., J.E. Gardner., E. Rangel., 2012., Reconstruction of the Sibinal Pumice, an andesitic Plinian eruption at Tacaná Volcanic Complex, Mexico–Guatemala, Journal of Volcanology and Geothermal Research 217-218 p.39–55

Kim. J., Kim. H., 2018, Analysis of 2016 Minamiaso landslides using remote sensing and geographic information system, *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 12(3),

King G. & Zeng L. 2001, Logistic regression in rare events data, *Political analysis*, v. 9(2) p.137-163.

Macías, J.L., Espíndola, J.M., García-Palomo, A., Scott, K.M., Hughes, S., Mora, J.C., 2000, Late Holocene Peléan style eruption at Tacaná Volcano, México–Guatemala: Past, present, and future hazards: *Geological Society of America Bulletin*, 112 (8), 1234-1249.

Macías, J.L., Arce, J.L., Mora, J.C., and García-Palomo, A., 2004, The Agua Caliente Debris Avalanche deposit a northwestern sector collapse of Tacaná volcano, México-Guatemala: International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI) General Assembly 2004, Pucón, Chile, November 14–19, Symposium 11a-03.

Macías-Vázquez, J.L, Capra-Pedol, L., 2005, Los volcanes y sus amenazas: México, D.F., Secretaria de Educación Pública, Fondo de Cultura Económica, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, *La Ciencia para todos*, 210, 159 p.

Macías J. L., Murcia H. F., 2009, Registro geológico de inundaciones recurrentes e inundación del 4 de octubre de 2005 en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 26, núm. 1, 2009, p. 1-17

Martíni, M., Capaccioni, B., Giannini, L., 1987, Ripresa dell'attività sismica e fumarolica al Vulcano di Tacana (Chiapas, Messico) dopo un quarantennio di quiescenza: *Bollettino del Gruppo Nazionale per la Vulcanologia*, 467-470.

Meschede, M., and Frisch, W., 1998, A plate-tectonic model for the Mesozoic and early Cenozoic history of the Caribbean plate: *Tectonophysics*, v. 296, p. 269–291, doi: 10.1016/S0040-1951(98)00157-7.

Mooser, F., Meyer-Abich, H., McBirney, A. R., 1958, Catalogue of the active volcanoes of the world including solfara fields. Part VI Central America: Napoli International Volcanology Association, p.1-36.

Mora, J.C., Macías, J.L., García-Palomo, A., Espíndola, J.M., Manetti, P., and Vaselli, O., 2004, Petrology and geochemistry of the Tacaná Volcanic Complex, Mexico-Guatemala: Evidence for the last 40 000 yr of activity: *Geofísica Internacional*, v. 43, p. 331–359.

Mugica-Mondragón, R., 1987, Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas en el Macizo de Chiapas: México, Instituto Mexicano del Petróleo, Informe interno, C-2009, p. 47

O'Brien, J., Julien, P., and Fullerton, W., 1993, Two-dimensional water flood and mudflow simulation: *J. Hydraul. Eng.-ASCE*, v. 119, p. 244-261.

O'Brien, J. FLO-2D Reference manual, version 2009. 2011.

Pasch R. J., Zelinsky D. A., National Hurricane Center tropical cyclone report.

Raes Dirk. 2004, Frequency analysis of rainfall data. Katholieke Universiteit Leuven. Department of Earth and Environmental Sciences Celestijnenlaan 200E, BE-3001 Leuven, Belgium.

Rickenmann D., 1999 Empirical relationships for debris flows, *Natural Hazards*, V. 47 p. 47-77

Saucedo-Girón, R., Esquivias, H., 1988, Evaluación del riesgo volcánico en el área del Volcán Tacaná, Chiapas: México, D.F., Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Tesis profesional, 142 p

Servicio Geológico Mexicano, Carta Geológica Minera Huixtla D15-2, 1:250,000, Chiapas, 2005.

Snedecor, G.W. and Cochran, W.G. 1980. *Statistical methods*. Iowa State university press, USA. 507 pp.

Vásquez-Sánchez, M. A., Espíritu-Tlatempa, G., Morales-Iglesia, H., Montoya-Gómez, G., Navarrete-Gutiérrez, D. A., 2009, Riesgo por inundaciones en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México (investigación para su ordenamiento ecológico y desarrollo urbano), *La Gestión del Riesgo Urbano en América Latina: Recopilación de Artículos / Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres*, p. 143-158.

Verbovšek. T., Popit T., 2018., GIS-assisted classification of litho-geomorphological units using Maximum Likelihood Classification, Vipava Valley, SW Slovenia: *Landslides*, v. 15, p. 1415–1424.

Weibull, W. 1939. A statistical study of the strength of material. Ing. Vetenskaps Akad. Handl. (Stockholm) Vol. 151, pp. 15