

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Posgrados

**SIG aplicado a la zonificación por amenaza de inundación en la cuenca del río
Polochic, Alta Verapaz, Guatemala**

Luis Osmundo Torres Sam

**Richard Resl, Ph.D.(c)
Director del Trabajo de Titulación**

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Magister en Sistemas de Información Geográfica

Quito, diciembre de 2015

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE POSGRADOS

HOJA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**SIG aplicado a la zonificación por amenaza de inundación en la cuenca del río Polochic,
Alta Verapaz, Guatemala**

Luis Osmundo Torres Sam

Firmas

Richard Resl, Ph.D.(c)

Director del Trabajo de Titulación

Diana María Contreras Mojica, Ph.D.

Miembro del Comité de Tesis

Richard Resl, Ph.D.(c)

Director del Programa de Maestría en
Sistemas de Información Geográfica

Stella de la Torre, Ph.D.

Decano del Colegio de Ciencias Biológicas y
Ambientales

Hugo Burgos, Ph.D.

Decano del Colegio de Posgrados

Quito, diciembre de 2015

© Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

Nombre:

Luis Osmundo Torres Sam

Código de estudiante:

00107208

Pasaporte:

235170086

Lugar, Fecha

Quito, diciembre 2015

DEDICATORIA

A Dios

Mi fortaleza de vida.

A mi Abuelita

Jesús Aldana de Sam (QEPD)

Gracias por cuidarme, la tengo en mi corazón.

A mi Papá

Víctor Osmundo Torres Milla (QEPD).

Mantengo el legado que me dejaste y hasta esa constelación sideral comparto esta meta contigo.

AGRADECIMIENTOS

Ph.D. Diana Contreras Mojica, Asesora de Tesis, por las valiosas sugerencias para la redacción del Informe Final. Esto me permitió comprender que el conocimiento e investigación forman parte de mi vida.

Ingeniera Gabriela Ramón, Tutora de Promoción, por el tiempo dedicado para orientarme en la etapa de estudios y realización de Tesis.

A los Profesores del Programa de Maestría, especialmente a los Ingenieros Ph.D. Rafael Beltrán y Ph. D. Pablo Cabrera Barona por los consejos para culminar esta etapa y aprender cada día de SIG.

A todo el personal académico y administrativo de Unigis América Latina y Universidad San Francisco de Quito por el nivel de profesionalismo mostrado a lo largo del Programa de Maestría en SIG.

A la Sección de Climatología del INSIVUMEH (Guatemala), especialmente al Director Eddy Sánchez Benneth, por proporcionar datos climáticos del norte de Guatemala.

A los Ingenieros Estuardo Lira y Kenset Rosales por la facilitación de datos geográficos útiles en el desarrollo de la Tesis.

Al Ingeniero Agrónomo Darío Pacay por compartir conocimientos SIG a lo largo de estos últimos años.

Resumen

Las inundaciones son el tipo de fenómeno natural que más afecta al planeta. En Guatemala, las inundaciones cubren amplias áreas en temporada de lluvias durante los meses de Mayo a Octubre, principalmente en las Vertientes Caribe y Pacífico. Los efectos suelen ser devastadores y se manifiestan a través de la pérdida de vidas y daños a la infraestructura vial, zonas residenciales y fincas. La cuenca Polochic se ubica en la Vertiente Caribe, drena hacia el Lago de Izabal, el más grande del país, algunas poblaciones se localizan a lo largo del río Polochic. Se utilizaron sensores remotos SR y sistemas de información geográfica (SIG) para el procesamiento y análisis de datos, entre estos: Pendiente, altura topográfica, geomorfología, uso actual de la tierra. Se utilizó la imagen Landsat 8 OLI/TIRS para conocer el uso actual de la tierra. La obtención de datos de precipitaciones de los años 1990-2013 fue importante para establecer precipitaciones máximas y períodos de retorno para varios períodos de tiempo; de esto la mayor incidencia de inundaciones se refleja entre 5. 10 y 15 años. Esto ayudó también a la interpretación y modelación hidrológica con alto grado de precisión para definir zonas de inundación. La geodatabase consiste en: Modelo de elevación digital DEM, geología, precipitaciones, curvas de nivel y tipo de suelo. La utilización del DEM fue importante para el modelado 2D y 3D, asimismo, la revisión de imágenes satelitales a través de Earth Explorer, utilizando los sensores L8 OLI/TIRS y L8 OLI/TIRS Pre-WRS-2, que fueron útiles para el trazo de áreas inundables. De los factores considerados, la altura topográfica es la más predominante y sirvió de base para establecer las zonas de amenaza por inundación. El uso de Arcgis 10.1 fue importante en el procesamiento de geodatabases y la clasificación supervisada de imágenes satelitales

Palabras claves: Cuenca Polochic, amenazas naturales, inundaciones, precipitaciones, uso de la tierra, sensores remotos.

Abstract

Floods are the type of natural phenomenon that mainly affects the planet. In Guatemala, floods cover large areas in rainfall season from May to October, mainly in the Caribbean and Pacific Slopes. The effects are often devastating and manifest through the loss of life and damage to road infrastructure, residential areas and farms. The Polochic basin is located in the Caribbean slope, drains into Lake Izabal, the largest in the country, several populations are located along the Polochic river. Remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS) were used for processing and data analysis, among these: slope, topographic height, geomorphology and land use. Image Landsat 8 OLI / TIRS was used to determine the current land use. Obtaining data from the years 1990-2013 rainfall was important to establish maximum rainfall and return periods for various periods of time; most incidence in flooding is reflected by 5, 10 y 15 years. This also helped to interpretation and hydrological modeling with high accuracy to define flood zones. The geodatabase consists of: digital elevation model DEM, geology, rainfall, contour lines for each 100 meters, and soil type. The use of DEM was important for 2D and 3D modeling also, the review of satellite imagery through Earth Explorer, L8 using sensors OLI / L8 OLI and TIRS / TIRS Pre - WRS-2, that were useful to trace flooding zones. Among the considered factors, topographic height is the most prevalent and it is the basis for establishing the flood hazard areas. Use of Arcgis 10.1 was important in the processing of geodatabases and supervised classification of satellite images.

Key words: Polochic watershed, hazards, floods, rainfalls, land use, remote sensing.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
TABLA DE ACRONIMOS	13
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. ANTECEDENTES.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	16
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	17
1.5 JUSTIFICACIÓN	18
1.6 ALCANCE.....	19
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
2.1 AMENAZAS NATURALES Y SIG.....	20
2.2 MODELO HIDROLÓGICO	22
2.4 SENSORES REMOTOS	23
2.4.1 <i>Adquisición de datos</i>	25
2.4.2 <i>Procesamiento de datos</i>	26
2.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	26
2.6 ANÁLISIS DE DATOS GEOGRÁFICOS	27
2.7 MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (DEM).....	28
2.8 ANÁLISIS DEM PARA INUNDACIONES	29
2.9 INTERPOLACIÓN GEOESTADÍSTICA	30
2.10 ANÁLISIS SIG E HIDROLOGÍA.....	31
3. METODOLOGÍA.....	33
3.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	33
3.2 GEOGRAFÍA FÍSICA	36
3.2.1 <i>Suelos</i>	36
3.2.2 <i>Vegetación</i>	38
3.2.3 <i>Bosque muy húmedo subtropical cálido bmh-S (c)</i>	39
3.2.4 <i>Bosque pluvial subtropical</i>	39
3.3 MARCO GEOLÓGICO.....	40
3.3.1 <i>Geología Regional</i>	40
3.3.2 <i>Sistema de falla Polochic-Motagua</i>	41
3.3.3 <i>Geología local (Grupo Santa Rosa)</i>	43
3.4 EVALUACIÓN GEOMORFOLÓGICA	46
3.5 CLIMA	49

3. 6 DATOS DISPONIBLES.....	50
3.6.1 <i>Uso de SIG y Sensores Remotos.....</i>	51
3.6.2 <i>Reconocimiento de campo.....</i>	52
3.7 INFORME FINAL.....	52
4. RESULTADOS	54
4.1 DISEÑO DEL CÁLCULO MÁXIMO DE LLUVIAS	54
4.2 DISEÑO DE LA ESTIMACIÓN DE LLUVIAS.....	56
4.3 PRECIPITACIONES Y PERÍODOS DE RETORNO.....	61
4.4 ZONAS DE INUNDACIÓN	63
4.6 USO ACTUAL DE LA TIERRA	66
4.7 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA.....	68
4.7.1 <i>Paisaje kárstico.....</i>	73
4.7.2 <i>ZONA DE FLUVIO KARST.....</i>	74
4.7.3 <i>Zona de montaña.....</i>	76
4.8 ANÁLISIS DE AMENAZAS	78
4.9 ANÁLISIS DE IMÁGENES	79
4.10 RÍO POLOCHIC.....	80
4.11 EVALUACIÓN DE AMENAZAS NATURALES.....	81
4.12 INUNDACIONES	82
4.13 <i>Crecimiento demográfico.....</i>	85
4.14 <i>Modelamiento de la cuenca.....</i>	85
4.15 FOTOGRAFÍAS.....	88
5. CONCLUSIONES.....	91
6. BIBLIOGRAFÍA.....	92

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma de metodología.....	35
Figura 2. Formas y diferentes escalas con procesos endógenos y exógenos.....	47
Figura 3. Caracterización geomorfológica 2D de la Cuenca Polochic	72
Figura 4. Cambios de cobertura forestal Cuenca Polochic.....	79
Figura 5. Meandros en Cuenca Polochic.....	81

INDICE DE MAPAS

Mapa 1. Localización del área	34
Mapa 2. Suelos de Cuenca Polochic	38
Mapa 3. Marco tectónico para el Caribe	41
Mapa 4. Geología de la Cuenca Polochic.....	49
Mapa 5. Zonas inundables Este y Oeste	66
Mapa 6. Uso actual de la tierra, clasificación supervisada.....	68
Mapa 7. Modelo de elevación digital Cuenca Polochic.....	70
Mapa 8. Pendiente en Cuenca Polochic.	77
Mapa 9. Área susceptible a inundación Cuenca Polochic	87

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos disponibles para la investigación.	50
Tabla 2. Datos de precipitación de estación Panzós 1990-2013.....	57
Tabla 3. Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel, Estación Panzós 1990-2013.	58
Tabla 4. Cálculo de variables probabilísticas y precipitaciones diarias máximas probables, Períodos de Retorno, Estación Panzós 1990-2013.	58
Tabla 5. Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración de 24 horas, Estación Panzós 1990-2013.	59
Tabla 6. Precipitaciones máximas para diferentes tipos de duración de lluvias, Estación Panzós 1990-2013.	59
Tabla 7. Intensidades de lluvia a partir de precipitaciones diarias, según duración y frecuencia, estación Panzós 1990-2013.	59
Tabla 8. Datos de precipitación Estación Papalhá, 1990-2010.....	60
Tabla 9. Distribución de probabilidades pluviométricas a través de Gumbel, Estación Papalhá 1990-2010.	60
Tabla 10. Cálculo de variables probabilísticas, precipitaciones diarias máximas probables, Períodos de Retorno Estación Papalhá 1990-2010.....	61
Tabla 11. Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas.....	61
Tabla 12. Precipitaciones máximas para diferentes tipos de duración de lluvias, Estación Papalhá 1990-2010.....	61
Tabla 13. Tipología de paisaje kárstico.....	74
Tabla 14. Nivel de amenaza en la región.....	78

TABLA DE ACRONIMOS

CONRED	Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres de Guatemala.
DEM	Modelo de elevación digital.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala.
SIG	Sistemas de información Geográficos.
SR	Sensores Remotos.
SEGEPLAN	Secretaría General de Planificación de Guatemala.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de sistemas de información geográfica(SIG) y sensores remotos (SR) para el monitoreo de amenazas naturales constituyen una herramienta esencial en el procesamiento y análisis de información geográfica. La versatilidad en el uso y representación a través de mapas temáticos ayudan a establecer una mejor perspectiva acerca de la problemática relacionada en una zona o región determinada.

El acceso a información geográfica se facilitó en los últimos 15 años en Guatemala, principalmente, después de los acuerdos de paz que se firmaron el 29 de Diciembre de 1996. Previo a esto, la información era restringida con el argumento de secreto militar, en tiempos del conflicto armado interno que se extendió entre los años 1960-1996. Ahora, existe relativa facilidad en la obtención de geodatabases, que incluye desde mapas topográficos hasta fotografías aéreas e imágenes satelitales en *googleearth* y otros geoservidores, en los cuales se puede apreciar de manera preliminar áreas de interés para diversos fines, entre estos: Medio ambiente, gestión de riesgo y planificación territorial.

Las amenazas naturales forman parte de una realidad que afecta considerablemente amplias regiones del país. Las inundaciones suceden en los meses de Mayo a Octubre, asimismo, se tiene referencia del Huracán Mitch en Octubre de 1998 que afectó considerablemente el territorio guatemalteco y sobretodo la Cuenca Polochic.

La cuenca Polochic cubre una amplia extensión de terreno de 2876 km², en ella se asientan los Municipios de Tamahú, Tukurú, La Tinta y Panzós, del Departamento de Alta Verapaz, asimismo, El Estor que pertenece a Izabal; sitio donde desemboca en el Lago de Izabal. En

esta región también se localizan comunidades rurales (aldeas, caseríos). La valoración de los impactos de inundaciones resulta en la comprensión de la geodinámica de la cuenca, a lo cual se agrega la depredación ambiental, sobretodo por el cambio de uso de suelo a través de agricultura intensiva e invasiones de tierras.

El análisis de amenazas naturales se enfocó en inundaciones al considerar los siguientes factores: Pendiente, altura topográfica, geomorfología y uso actual de la tierra. Por consiguiente, bajo la perspectiva de identificar las áreas de amenaza y definir líneas de acción específica orientadas a la resiliencia, el uso del SIG y SR constituye una herramienta vital para la representación a través de mapas temáticos.

1.1. Antecedentes

Las inundaciones se constituyen en las amenazas naturales más frecuentes en el planeta, cuyos efectos son devastadores, ocasionando la pérdida de vidas y cuantiosos daños materiales. Las zonas aledañas a las márgenes de ríos y con baja altura topográfica son las más afectadas. La utilización de SIG y SR contribuyen al análisis y visualización de datos geográficos e imágenes, lo que también conlleva el modelo de elevación digital (DEM) y análisis hidrológico como direcciones de flujo para establecer las redes de drenaje primarias y secundarias, identificación de microcuencas y el modelamiento 2D y 3D.

Por la posición geográfica, Guatemala es un país altamente afectado por fenómenos naturales. El 31 de Octubre de 1998 el Huracán Mitch azotó la mayor parte del territorio, causando inundaciones y deslizamientos, mientras que el Huracán Stan en Octubre 2005, perjudicó de igual manera la parte central y sur del país. La pérdida de vidas; así como, los

daños a la infraestructura fueron cuantiosos; lo que representa aún más, el retroceso en el desarrollo del país.

Las inundaciones en la Cuenca Polochic son eventos que se repiten cada año, lo que a su vez, resulta en la poca resiliencia de Comunidades localizadas a lo largo del río. Existe poca investigación específica en el área caso de estudio, por lo que, la generación de información es importante para conocer la dinámica de la Cuenca. Dentro de los municipios más afectados están: Tucurú, La Tinta y Panzós.

La cuantificación económica de daños realizada en el año 2005 después del Huracán Stan describe lo siguiente: 39 comunidades afectadas, valor de estudios \$868,400.00, valor de obras de mitigación \$2,105,000, obras realizadas para reconstrucción \$15,780,473, población beneficiada 181,035 habitantes. (SEGEPLAN, 2006)

Las pérdidas económicas son altas, mientras no haya soluciones adecuadas los daños a la infraestructura no habrá una inversión en proyectos de desarrollo integral que incidan en la sustentabilidad sostenible y los gastos solo serán paliativos sin soluciones de fondo.

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo general.

Identificar zonas de amenaza por inundación en la cuenca del río Polochic, departamento de Alta Verapaz, Guatemala.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Desarrollar una metodología que considere los factores físico-naturales y socio-ambientales que inciden en la ocurrencia de inundaciones.
- Analizar las zonas de inundación de la Cuenca Polochic.
- Definir medidas de mitigación adecuadas para la región.

1.3 Preguntas de investigación

- Que tipos de metodologías podrían utilizarse para la evaluación de los factores físico-naturales y socio-ambientales que inciden en la ocurrencia de inundaciones?
- Cuáles son las áreas con mayor amenaza de inundación en la Cuenca Polochic?
- Qué medidas de mitigación se requieren para la región?

1.4 Hipótesis

La falta de un plan de ordenamiento territorial ocasiona el asentamiento de poblaciones a lo largo de las márgenes del río Polochic; lo que altera el ecosistema y aumenta el nivel de amenaza por inundaciones.

1.5 Justificación

La cuenca Polochic es una región relativamente poco estudiada desde el punto de vista académico, la documentación disponible es escasa, por lo que al considerar los problemas relacionados a inundaciones se requiere disponer de herramientas que ayuden a mejorar el procesamiento y análisis de datos. El uso de SIG y SR permite el análisis, revisión e interpretación de información e imágenes satelitales. Esto brinda la capacidad del estudio de las características geológicas, estructurales y ambientales.

Desde el punto de vista práctico SEGEPLAN desarrolló mapas a nivel regional y nacional de zonas de amenazas naturales. No obstante, falta realizar trabajo a detalle desde el punto de vista geográfico, lo que permitirá visualizar y hacer la verificación en campo de zonas susceptibles. La cantidad de información a procesar es extensa y además en constante cambio al considerar poblaciones y ecosistemas. Esta región es desde hace más de medio siglo una zona productiva agrícola, ganadera y minera; a lo que se agrega que no posee un ordenamiento territorial definido.

Apoyar en la toma de decisiones a nivel municipal y regional requiere de la revisión e interpretación de datos geográficos y ambientales que permitan valorar el nivel de seguridad de zonas poblacionales y biodiversidad. La alteración en el ciclo normal en la dinámica de la cuenca, incide negativamente en el desarrollo sostenible de la región.

1.6 Alcance

La investigación se enfoca en la utilización de SIG y SR. El procesamiento de la información existente: Geología, tipo de suelo e hidrología; permite disponer de elementos para establecer el nivel de amenaza en la cuenca. El diagnóstico de la geoinformación permitirá realizar el procesamiento de datos de manera cualitativa y cuantitativa, lo que permitirá establecer precisión en el análisis y presentación de mapas.

Otro aspecto importante consiste en considerar la degradación de los recursos naturales que se manifiesta por el cambio de uso de suelo de regiones que anteriormente estaban comprendidas de bosque primario, y que ahora están convertidas en zonas agrícolas de uso intensivo.

El estudio se circunscribe a la Cuenca del río Polochic, la cual está limitada al norte y sur por las Sierras de Chamá y Las Minas respectivamente. Esta última es el área protegida más grande de la región y colinda con las Bocas del Polochic, que corresponde a la desembocadura del río hacia el Lago de Izabal. Bajo estos parámetros, las consideraciones acerca de la protección a la biodiversidad toman un papel importante en las consideraciones acerca del ordenamiento territorial de la región.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Varias regiones del mundo están expuestas a amenazas naturales, cada una con características espaciales. De hecho, el planeta experimenta un incremento en el impacto durante las últimas décadas. Dentro de las causas principales están los fenómenos hidrometeorológicos, que se relacionan al cambio climático y con ello el incremento en la vulnerabilidad de las poblaciones. La observación de la tierra y uso de SIG, se han vuelto una manera integral de evaluar, que se traduce en una mayor eficiencia para el análisis, desde una visión global hasta llegar a lo específico. Cada nivel cuenta con objetivos propios, factores ambientales, eventos desencadenantes datos espaciales y elementos de riesgo. El análisis de varios tipos de amenazas: Deslizamientos, erupciones volcánicas, sequías, inundaciones e incendios forestales; dan lugar a definir líneas de acción específicas, para lograr el monitoreo y establecimiento de medidas de contingencia acordes a la realidad que representan (Van Westen, 2011).

2.1 Amenazas naturales y SIG

Dentro de las amenazas naturales, las inundaciones ocurren cuando el exceso de caudal afecta la capacidad de transporte en canales de ríos, lagos, lagunas, reservorios, red de drenaje, presas y otros cuerpos de agua. Las inundaciones son eventos naturales y recurrentes que afectan planicies y zonas residenciales, sobretodo al considerar el aumento en precipitaciones.

Los mapas de inundación muestran el potencial de extensión espacial para escenarios de amenaza y pueden analizarse de manera cuantitativa y cualitativa. La evaluación de amenaza tiene la finalidad de identificar la probabilidad de ocurrencia a mediano o largo plazo de un evento; así como, su intensidad en las zonas indicadas. Para su representación, usualmente, es suficiente presentar una clasificación que va desde: Muy alta, alta, media, baja a muy baja.

La evaluación de amenaza por inundación también involucra el conocimiento local, datos hidrológicos, meteorológicos y geomorfológicos. A esto se agrega el reconocimiento de campo. Esto estará en relación directa con las medidas de mitigación, asignación de recursos, pronóstico de inundaciones, consideraciones ambientales y de uso de la tierra.

La capacidad de transformar datos geográficos en geodatabases, permite también la transformación a través de las diferentes aplicaciones. Así también, el DEM permite crear el TIN y así visualizar en 2D y 3D. La utilidad que esto representa, se refleja en la relativa facilidad en visualizar rasgos geomorfológicos y estructurales.

Getahun, y Gebre, S. (2015) analizan la amenaza de inundación y el mapeo en la cuenca del Río Awash, Etiopía. Dentro de los factores de generación están: Pendiente, elevación, precipitaciones, densidad de drenaje y tipo de suelo. Lo que permitió trazar las zonas de amenaza por inundación utilizando el análisis multicriterio y SIG, dando como resultado el mapa de amenaza. Además se utilizó el modelo HEC-RAS junto con Arcgis 10.1 para el análisis hidrológico.

EL-Magged, A. (2014) plantea que las amenazas naturales representan la tendencia a la integración de SIG y sensores remotos, lo cual ayuda a visualizar las dimensiones de los problemas. El desarrollo de modelos orientados a inundaciones rápidas difiere en precisión para predecirlos, lo que dependerá del cálculo para precipitaciones rápidas. Específicamente, para el análisis de inundaciones, esto se obtiene a través del modelo de elevación digital (DEM); así como, el análisis hidrológico que incluye la dirección de flujo, identificación de cuencas hidrográficas y divisiones entre microcuencas, extracción de redes primaria y secundaria de drenaje. Además, varios análisis hidrológicos pueden ser realizados a través de SIG.

2.2 Modelo hidrológico

Es importante establecer un modelo que permita visualizar los sitios inundables durante la época de lluvias. Identificar las zonas de recarga es importante debido a que desde ahí se puede valorar la importancia en la preservación de zonas boscosas, la cantidad de precipitaciones a lo largo de la cuenca y como estas inciden en la ocurrencia de inundaciones.

La predicción de las principales corrientes de agua es otro factor a ser considerado a través del establecimiento del patrón de drenaje; asimismo, la consideración de las microcuencas, de tal manera que a través de éstas se puedan identificar aquellas que tienen más aporte.

2.4 Sensores remotos

La utilización de sensores remotos es de importancia en el monitoreo de amenazas naturales. El incremento de fenómenos en la última década evidencia la problemática existente, de lo cual, el estudio de las diferentes regiones del planeta brinda una mayor perspectiva en comprender la dinámica de eventos meteorológicos y factores relacionados.

La evolución en la utilización y actualización de SR se debe a la generación de una nueva tecnología de satélites y aeronaves. La ventaja consiste en que las medidas se realizan a distancia, sin tener contacto físico con el objeto o área de interés. Este tipo de tecnología se puede dividir en las siguientes fases:

- **Fase 1:**Recolección de datos a partir de un sensor montado en una plataforma (satélite o aeronave).
- **Fase 2:**Procesamiento y manejo de datos.
- **Fase 3:**Interpretación que se orienta en la generación de mapas de la superficie de estudio.

El sistema de SR utiliza radiación electromagnética con cuatro componentes: Fuente, interacción con la superficie de la tierra, interacción con la atmósfera y sensor. La fuente de energía electromagnética puede ser natural como la luz del sol que se refleja desde la superficie de la tierra o a través de radar de microondas.

Los satélites más utilizados son: Las series Landsat de Estados Unidos, SPOT de Francia e IRS de India. Estos soportan tipos diferentes de scanners como: Scanner Multiespectral MSS, Thematic Mapper TM, Pancromático PAN, NOAA y NIMBUS, entre los más importantes. Los datos SR pueden ser digitalizados y analizados con herramientas SIG para dar precisión a los

datos de salida; dentro de los campos de aplicación están: Ordenamiento territorial, manejo de recursos naturales, bosques, manejo de vida silvestre, estudios de impacto ambiental, amenazas naturales.

Van Westen (2011) describe los SR, como herramienta indispensable en el monitoreo de amenazas. La posibilidad de evaluar amenazas y riesgos a diferentes escalas, es una manera de representar la utilidad de SR, esto se puede realizar a escala global y a nivel local. Esto lleva ventajas como:

- Definir objetivos particulares de acuerdo a la región.
- Utilización de varios tipos diferentes de sensores y radares.
- Datos ambientales e hidrometereológicos.

Ajinjka, D., et al. (2015) describe la importancia en la utilización de SR y SIG como una metodología apropiada para el monitoreo de inundaciones, el registro de datos y cambios en un área determinada. Los SR tienen la capacidad de detectar y medir una serie de elementos como: Morfología de centros poblados, cantidad, forma, densidad y expansión de zonas urbanas. Además, el uso de SIG ayuda a identificar, localizar y mapear formas diferentes y tipos de geformas; también son útiles en la preparación de mapas temáticos y el monitoreo de cambios en intervalos de tiempo.

2.4.1 Adquisición de datos.

Básicamente, las fotografías aéreas e imágenes satelitales brindan amplia información. El píxel constituye la unidad estructural principal, que se forma a través de la intersección de filas y columnas.

Se consultaron varias fuentes de información: SEGEPLAN, Earth Explorer. Para la descarga de imágenes se seleccionaron aquellas que tuvieran más definición para la identificación de rasgos físicos y naturales.

El-Magded, A. (2014) define a la teledetección como la ciencia que consiste en la adquisición, procesamiento e interpretación de imágenes, provenientes de aviones y satélites. Los sensores remotos proveen una amplia gama de temas: Geología, medio ambiente, cambios ambientales, calentamiento global y amenazas naturales. Estas se obtienen a través de aviones o satélites.

Mialhe, F.; et. al (2014) combinaron la utilización de SR y metodologías para describir el cambio de uso de suelo. La opción del análisis de mosaicos de imágenes permite identificar rasgos, principalmente cambios, lo que da mayor aproximación y exactitud. La ventaja en la utilización de tipos de imágenes satelitales diferentes brinda más alternativas en identificar cambios (Landsat MSS, Landsat TM, Landsat ETM+, y SPOT4) para realizar una clasificación no supervisada y con referenciación en coordenadas UTM. Esto permitió analizar imágenes de los años 1976, 1996 y 2010. También se realizaron consultas y recorridos en el área para obtener información de eventos máximos, además, de las causas que dan origen a estos cambios. Dentro de los parámetros evaluados, la pendiente, es la que interviene en mayor parte para el cambio de uso de suelo.

2.4.2 Procesamiento de datos.

Consiste en la obtención de imágenes para el análisis de acuerdo al enfoque de investigación. Esto incluye también la corrección, definición de imagen; así como, la clasificación de acuerdo al arreglo para la interpretación. Esto depende en gran parte del software utilizado.

2.5 Sistemas de información geográfica (SIG)

En general, la definición de SIG consiste en un sistema de software con la capacidad de capturar, almacenar, analizar y visualizar información geográfica. La ventaja en la utilización de SIG consiste en el uso, aplicación y procesamiento de geobase de datos, con lo cual se pueden realizar actualizaciones de acuerdo al tipo de investigación que se requiera.

Llopis (s.f.) describe a los SIG en la aplicabilidad en distintas áreas: Topografía, geología, geografía, ingeniería civil, edafología, entre las más importantes. La utilización de software específico redundaría en la realización de mapas temáticos que brindan información precisa. Asimismo, generación de vistas en 3D, con actualización constante y facilidad en la digitalización.

El Magged, A. (2014) citando a Goodchild, et. al. (1999) menciona las siguientes ventajas en la utilización de SIG:

- Datos georeferenciados.
- Localización espacial.
- Estructuras de datos.
- Volumen grande de datos.

- Necesidad de integrar datos de fuentes distintas.
- Número grande de atributos.
- Importancia en la visualización de resultados.

2.6 Análisis de datos geográficos

Damayanti, F. (2011) en el análisis de amenazas por inundaciones, tuvo en cuenta: Geología, geomorfología, uso de la tierra y suelo. Estas condiciones fueron tenidas en cuenta para la simulación el comportamiento de inundaciones. Dentro de lo cual está lo siguiente:

- Profundidad de inundación de eventos mayores.
- Validación de mapa de evento de inundación para compararlo con el mapa de amenazas generado.
- Rasgos físicos del área de estudio: carreteras y diques.

A través de SIG se pueden operar bases de datos que contienen información a nivel regional y de país que incluyen: Fisiografía, suelos, clima, hidrología, sistemas de cultivo y disponibilidad de cosechas (Zaman, M. 2012). En los años 80's los sistemas de modelado de recursos se basaron en capas SIG, posteriormente con la implementación de sistemas computarizados más avanzados, fue posible desarrollar herramientas más flexibles y dinámicas.

Un SIG captura, almacena, analiza, maneja y presenta datos que se relacionan a localidades o que tienen distribución espacial. Es un sistema computarizado que provee 4 conjuntos de capacidades de georeferenciar datos (Zaman, M. 2012):

- Captura de datos: Datos gráficos (digitalización y conversión de datos existentes) y atributos de datos.
- Almacenamiento de datos y manipulación: Manejo de archivos y edición.
- Análisis de datos: Consulta de bases de datos, análisis espacial y modelado.
- Visualización de datos: mapas y reportes.

2.7 Modelo de elevación digital (DEM)

Damayanti, F. (2011) define el DEM como la representación de la superficie del terreno en donde los puntos de elevación son almacenados en una cuadrícula rectangular. Una simple celda rectangular que cubre un área y es representada por una elevación del mismo valor. Hay otros formatos digitales para representar el DEM como la cuadrícula, el TIN (triangular irregular network) y líneas de contorno. De esto, el formato de cuadrícula es el más utilizado debido a que fácilmente puede ser almacenado y manipulado.

Varias fuentes de datos se aplican para generar el DEM y así generar precisión vertical, tal como:

- Medición del terreno con 0.06 de precisión.
- Información de hojas topográficas (puntos de elevación y líneas de contorno con precisión en metros).
- Imágenes estereoscópicas de fotografías aéreas o imágenes satelitales (Landsat, ASTER, SPOT, Ikonos).
- Escaneo láser aéreo LIDAR puede llegar a tener 15 cm de precisión.

2.8 Análisis DEM para inundaciones

Getahun, Y.; Gebre, S. (2015) utilizan el DEM para crear el TIN, lo que facilita el cálculo de la pendiente y la geomorfología. Esto ayuda a identificar las zonas vulnerables de inundación, a visualizar la red de drenaje y así identificar las fuentes que tienen más incidencia en aumentar el caudal en la época de precipitaciones. A su vez, contribuye al modelado 2D y 3D para la representación de un área específica; además, la toma de decisiones, sobretodo en el ordenamiento territorial.

El análisis tridimensional permite el procesamiento de superficies TIN, dependiendo de la interpolación entre puntos o píxeles, que permite aproximarse a gran detalle, con pendientes y geoformas que dan la idea de la geomorfología de la región.

Dentro de las características del análisis 3D se mencionan:

- Diseño de un modelo espacial que permita la conservación de rasgos geométricos que conservan casi en su totalidad las formas originales de campo. A su vez, se crean bases de datos geográficas que permiten su constante actualización, asimismo, este modelo debe ser entendido por el público en general.
- Realización del modelo espacial que conlleve la rectificación y transformación de coordenadas y manejo de bases de datos geográficas. Además, el desarrollo de la estructura de datos, que abarcan fuentes distintas, con la finalidad de procesarlos dentro de un sistema integrado.
- La visualización del modelo espacial a través de la preparación de elementos necesarios para la visualización en 2D o 3D, lo que también permitirá la optimización en recursos y tiempo.

- Capacidad para que otros operadores puedan actualizar información, con base en las necesidades del proyecto.

Kourgialas, N; Karatzas, G. (2011) establecen una estrategia para el control de inundaciones en dos vías: El sistema de alerta temprana y el establecimiento de una metodología para estimar las zonas de amenaza de inundación. La comparación de imágenes durante época de verano y el contraste durante la época de invierno resulta factible para el establecimiento de zonas inundables y la predicción a mediano y largo plazo.

Dentro de las herramientas en la utilización de Arcgis 10.1, 3D Analyst brinda una amplia gama en el procesamiento de imágenes: Visualizar, procesar y analizar imágenes en 3 dimensiones a escala grande y pequeña. En este sentido, al trabajar un modelo 3D constituye el elemento esencial en el análisis de amenazas naturales, lo que a su vez, permite establecer zonas vulnerables. La representación espacial permite más versatilidad en el manejo de datos geográficos.

2.9 Interpolación geoestadística

Cuando la recolección de datos está completada, el DEM se puede producir a través de la interpolación de puntos; la interpolación espacial es un método para predecir el valor de una localidad basada en valores de visitas de reconocimiento Damayanti, F. (2011). Li &Heap (2008) revisaron métodos de interpolación utilizados por científicos ambientalistas; de lo cual categorizaron en tres grupos:

- Métodos no geoestadísticos.
- Métodos geoestadísticos.
- Métodos combinados.

Para propósitos de investigación, Li &Heap (2008) mencionan los siguientes métodos geoestadísticos:

- TIN (triangular irregular network).
- Natural neighbors.
- Inverse distance weighting (IDW).
- Modelos de regresión.
- Análisis de tendencia de superficie.
- Árbol de regresión.

En la mayoría de estudios, el método geoestadístico se considera como Kriging, que es un nombre genérico para una familia de regresión logarítmica de mínimos cuadrados, utilizada en reconocimiento, basado en el trabajo de Daniel Krige (1951), (Li &Heap, 2008). La interpolación Kriging es capaz de realizar un óptimo desempeño con diferencias mínimas. Blomgren (1999) notó que la interpolación de datasets en ciencias de la tierra contiene continuidad espacial que puede ser incorporada en la interpolación, y representada en un variograma. Por lo que, antes de realizar la interpolación Kriging, el modelo de variograma debe realizarse inicialmente. El variograma provee información esencial para la interpolación como un muestreo de densidad, patrón espacial y simulación espacial.

2.10 Análisis SIG e hidrología

Haboninama, F. (2014) indica que los resultados de fenómenos hidrológicos dependen de la variabilidad de precipitaciones. La capacidad de realizar simulaciones dependerá del tipo de análisis, sobretodo si se realiza en las áreas con variabilidad climática. Establecer la red de

drenaje es esencial para la identificación de las zonas de amenaza alta. Se pueden digitalizar las isolíneas de intensidades de precipitación y el tipo de suelo; lo cual ayuda a identificar las zonas de mayor absorción de agua hacia el subsuelo.

Los principales factores generadores de inundaciones son: Pendiente, altura topográfica, red de drenaje, tipo de suelo y precipitaciones. A través de la geobase se trazó las zonas de amenaza por inundación utilizando la técnica de evaluación multicriterio (Getahun, Y.; Gebre, S. 2015). Los datos se convierten a formato raster con superposición ponderada a través de Arcgis 10.1 para general el mapa de amenaza de inundación.

La posibilidad de establecer el área de influencia de inundación de cuerpos de agua: Ríos, quebradas; el uso de la herramienta Buffer permite el modelado (Bello, I.; Ogedegbe, 2015). También permite variar desde decenas a centenas de metros, asimismo, diferenciar los mayores caudales de una cuenca hidrográfica y así establecer las zonas de amenaza alta. Los poblados e infraestructura próximos tienen alta probabilidad de sufrir impactos, lo cual puede mitigarse a través de un manejo adecuado. Los sistemas de alerta temprana permiten una respuesta rápida ante cualquier ocurrencia.

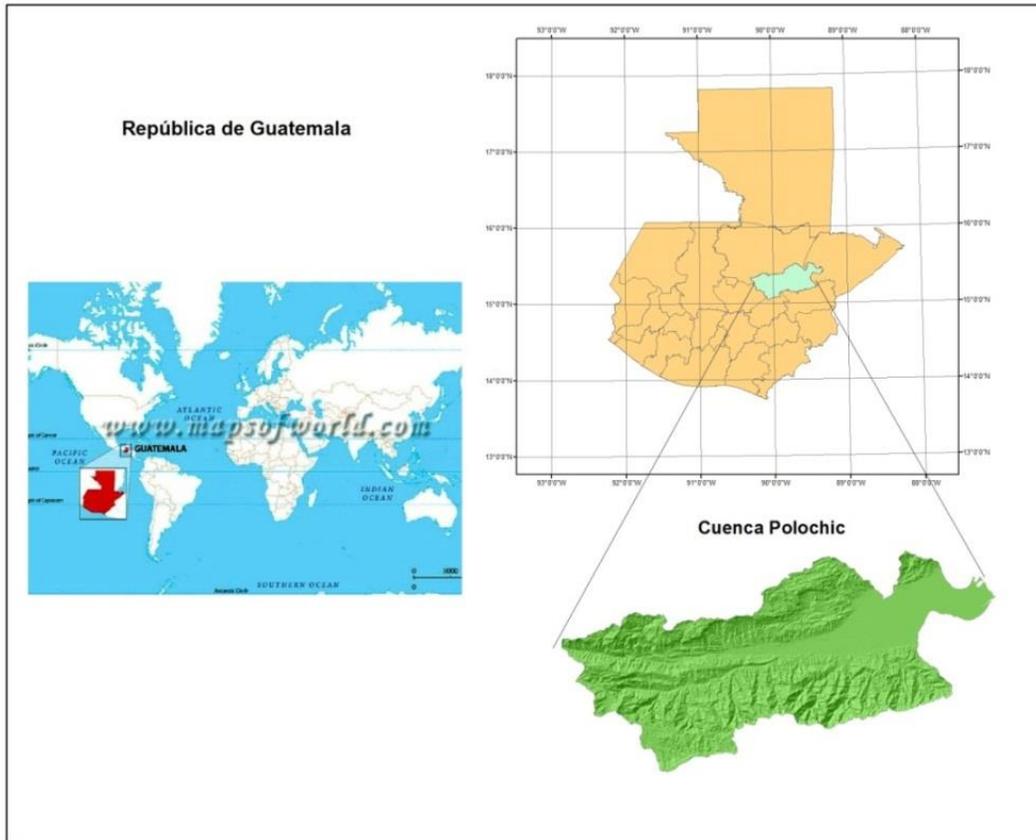
El modelado hidrológico es importante para evaluar el recurso agua en cuencas hidrográficas. El tiempo necesario dependerá del modelo seleccionado, cantidad y calidad de información requerida (Díaz, et. al. 2015). La cuenca se puede dividir en celdas y los procesos de precipitación y escorrentía se simulan hasta llegar al proceso final.

3.METODOLOGÍA

3.1 Localización del área de estudio

La cuenca del río Polochic se extiende en una amplia región del norte del país, que alcanza 2,786 km². Dentro de las características físico-naturales propias están: Biodiversidad, cobertura boscosa, suelos fértiles y riqueza mineral. Además, en cuanto a la incidencia externa, la actividad antrópica interviene directamente a través del cambio de uso de suelo (crecimiento demográfico y depredación de bosques), lo que se traduce en la ocurrencia de desastres.

El área abarca principalmente la parte sur del departamento de Alta Verapaz, asimismo, en menor porcentaje ocupa el extremo este de Baja Verapaz, la parte oeste de Izabal, donde el río Polochic desemboca en el Lago de Izabal, el cuerpo de agua lacustre más grande de Guatemala. En el Mapa 1 se muestra el mapa de localización del área de estudio.



Mapa 1. Localización del área

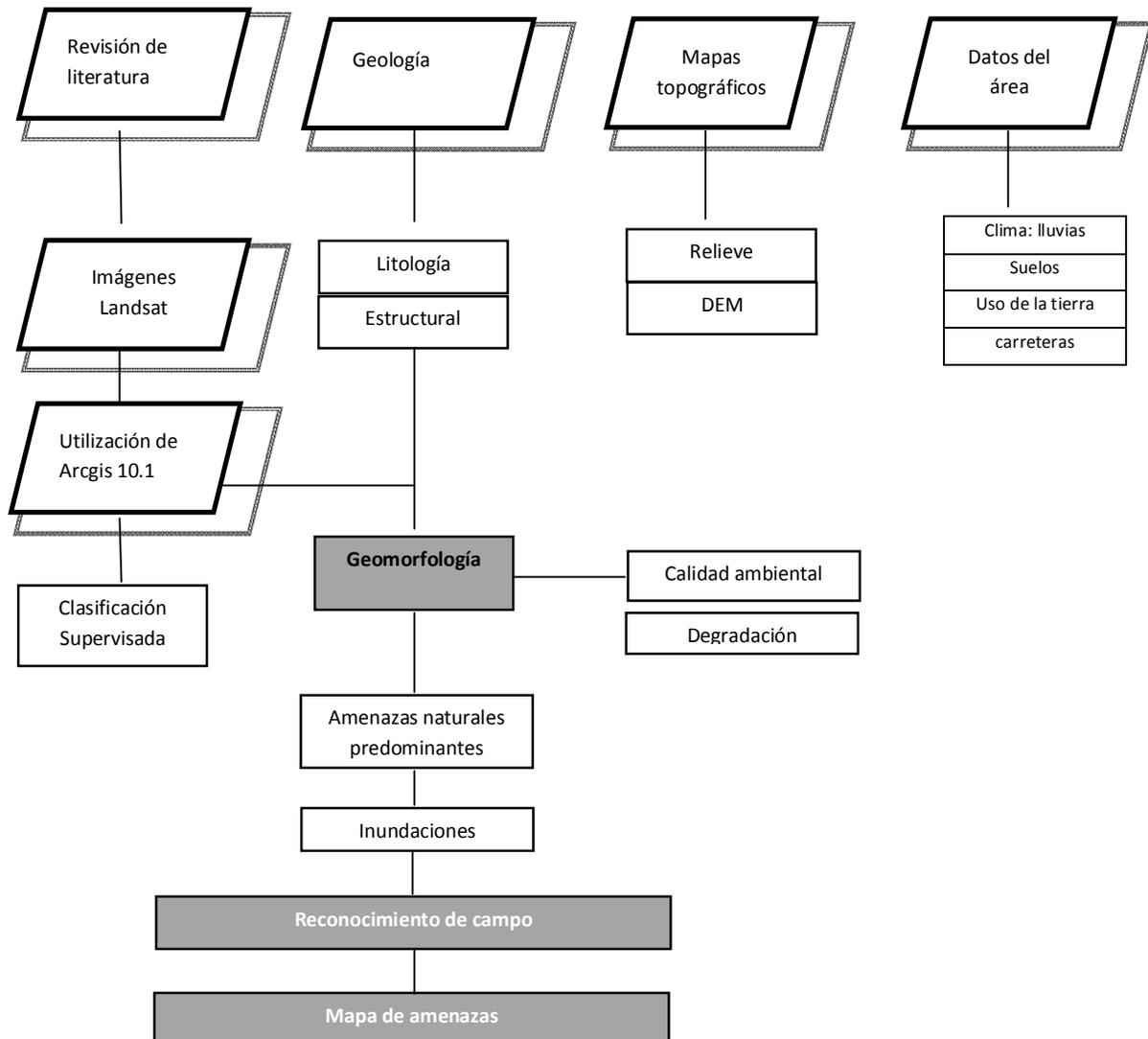


Figura 1. Flujograma de metodología

Por medio de la Figura 1 se muestra el flujograma donde se detalla la metodología utilizada en la investigación. Para la realización del trabajo, se utilizaron datos disponibles que se focalizan en los factores e incidencia de amenazas naturales con la finalidad de una evaluación integral.

3.2 Geografía física

3.2.1 Suelos.

MAGA (2000) a través de un grupo consultor actualizó el mapa elaborado por SIMMONS realizado en 1959, lo cual se enfocó en reubicar la clasificación existente, hasta llegar al mapa final. Esto es importante, debido a que desde la década de los 50's no existió información nueva. Dentro de las actividades principales están: La revisión de la información existente, readecuación de series de suelos y elaboración de mapa final.

La base fundamental consistió en identificar los grupos de suelos similares en horizontes genéticos, con excepción en la capa superior. Esto comprende suelos cuyos horizontes tienen el mismo color, estructura, distribución y drenaje.

La revisión de cada grupo en el mapa fue de acuerdo a cada lineación, de tal manera que cada una fuera correcta. Asimismo, se utilizaron imágenes Lansat (bandas 3, 4 y 7); así como mapas geológicos a escala 1:50,000 y 1:250,000 de acuerdo a la disponibilidad de cada región.

Además, se consideró la geomorfología, patrones de drenaje, geología superficial y niveles de reflectancia visual en base a las tonalidades de las imágenes de satélite utilizadas.

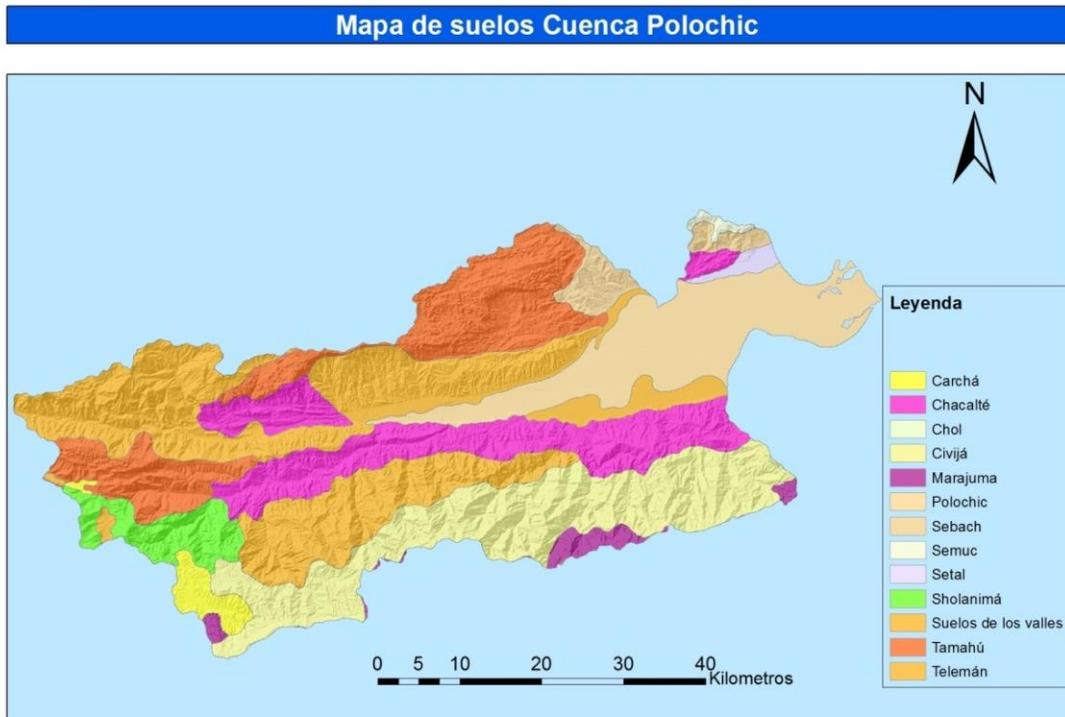
Para la representación de los suelos en la cuenca Polochic, se muestra el detalle a continuación:

- Carchá
- Chacalté
- Chol
- Civijá
- Marajuma
- Polochic
- Sebach
- Semuc
- Setal
- Sholanimá
- Suelos de los valles
- Tamahú
- Telemán

Además, se considera el tipo de Orden que contienen las clases de suelos.

- Alfisoles: aquí se agrupan Chacalté, Civijá, Carchá, Setal, Sholanimá. Corresponden a suelos con alto contenido de arcillas y alta saturación de bases (mayor al 35%) estos poseen un alto grado de desarrollo, con buen potencial de fertilidad y humedad. Para el manejo de actividades agrícolas generalmente se recomienda eliminar el exceso de agua
- Entisoles: corresponden a los suelos Telemán, Marajuma. Tienen poca o ninguna evidencia de desarrollo. Esto se debe a condiciones extremas como el relieve que incide en la erosión y las condiciones de exceso de agua. Estos suelos se localizan en áreas muy accidentadas.

- Molisoles: aquí están los suelos Tamahú. Tienen horizonte superficial grueso, con alto contenido de materia orgánica, por lo cual, son suficientemente fértiles por sus características físicas y químicas. En el Mapa 2 se pueden apreciar el tipo de suelos que se localizan en la Cuenca Polochic.



Mapa 2. Suelos de Cuenca Polochic.

3.2.2 Vegetación.

Cruz (1982) realizó una caracterización biológica en todo el país, en la cual se establecen zonas de vida. La base de este estudio fueron los mapas a escala 1:250,000, que se completaron con mapas 1:50,000. Este trabajo se concluyó con las visitas de campo mediante técnicas establecidas para el levantamiento ecológico.

Esto ha sido una base para la referencia de estudios posteriores, de hecho, forma parte del MAGA, institución del Gobierno encargada de formular y ejecutar planes agrícolas y de conservación; así como, a estudios con fines particulares para investigadores y empresas privadas para desarrollo de proyectos de diversa índole.

3.2.3 Bosque muy húmedo subtropical cálido bmh-S (c).

Es la zona más extensa de Guatemala y también ocupa el primer lugar en usos. En el norte del país abarca el Departamento de Izabal, Quiché, una parte de Huehuetenango y la parte sur de El Petén. En la cuenca Polochic ocupa alturas entre 80 y 1,600 msnm. El rango de precipitaciones es de 1,587 – 2,066mm.

La vegetación natural es muy variada, de hecho, se puede catalogar como una de las más ricas de la región, dentro de las especies están: Orbyngacohune, Terminalia Amazonia, Brosinumalicastrum, Lonchocarpus, Virola, Cecropia, Ceiba Pentandra, VochysuaHondurensis y Pinuscaribea.

Dentro de los cultivos están: Cardamomo, café, frijol, hule, cacao, arroz, citronela, banano, piña y por últimos a gran escala: palma africana y caña de azúcar. Con esto, la cuenca Polochic se considera como una de las zonas agropecuarias más importantes de Guatemala.

3.2.4 Bosque pluvial subtropical.

Ocupa la parte norte de la cuenca, principalmente en el Municipio de Senahú, en las fincas: Escollote, Sepacuité y Setzimaj.

El rango de lluvias al año es de 4,410 – 6,577 msnm. La temperatura varía entre 16 y 24° C.

Es una zona con vocación forestal, por lo cual, la protección de suelos es importante para la conservación al ser reguladores del escurrimiento. Sin embargo, la presión antrópica, al igual que en toda la cuenca Polochic.

3.3 MARCO GEOLÓGICO

3.3.1 Geología Regional.

Guatemala posee geología variada y se caracteriza por ser una de las más diversas en Centro América. La localización es sobre tres placas tectónicas: Cocos, Caribe y Norteamérica.

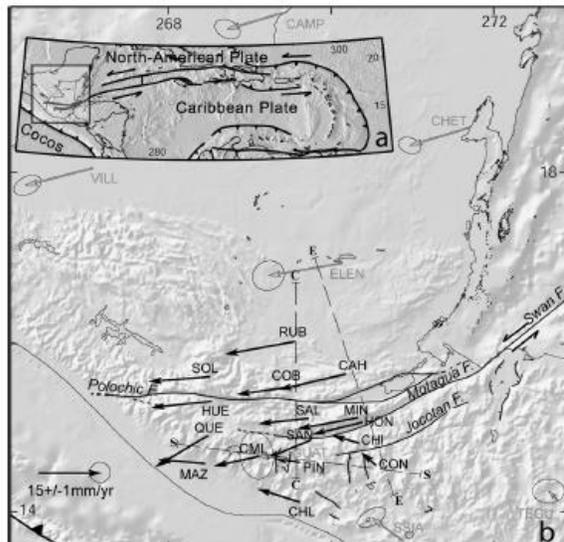
Lyon-caen, H. et al. (2006) describen el sistema de falla de rumbo Polochic-Motagua. A través de mediciones GPS entre los años 1999-2003 muestran que la velocidad de desplazamiento entre las placas de Norteamérica y Caribe (NA-CA) es de 20 mm/año. Las observaciones se basan en un sistema focalizado en la zona de falla Motagua, que está situado a 20 km de profundidad, con una disminución paulatina en el desplazamiento de la zona este a centro de 20 mm a 12 mm/año, hacia la zona de triple unión NA-CA-Cocos. Esta disminución se acomoda en un rango de 8 mm/año en una extensión este-oeste, en el área más al oeste de la placa Caribe.

3.3.2 Sistema de falla Polochic-Motagua.

Este sistema se extiende a lo largo de 400 km desde el Mar Caribe al este, a la costa Pacífica al oeste. Está compuesto de 3 sistemas de falla, paralelas y arqueadas que son las fallas de: Polochic, Motagua y Jocotán; de norte a sur respectivamente.

Así también, este límite transformante mayor se extiende hacia el mar Caribe al este por más de 2000 km. Esta extensión se denomina Fosa Mesoamericana. La falla Polochic puede trazarse cerca de 350 km desde la planicie costera del Pacífico localizada al oeste, hasta la cuenca Pull Apart del Neógeno del Lago de Izabal al este. Esto conecta también con la Falla Motagua y también con la falla Swan.

La falla Motagua se extiende cerca de 300 km sobre el continente y conecta el litoral con la falla Swan y la Fosa Cayman. La parte más al sur es la falla Jocotán, que se extiende 200 km en Honduras y el este de Guatemala. En el Mapa 3 se aprecia el marco tectónico del Caribe.



Mapa 3. Marco tectónico para el Caribe.

Fuente: Lyon-Caen; et. al. 2006

El mapa muestra el marco tectónico y topografía del Norte de Centro América. Las líneas negras indican fallas activas.

Flechas negras señalan los sitios de mediciones con GPS a través de la red geodésica nacional de los años 1999-2003.

Las flechas grises muestran velocidades permanentes en los sitios.

Las elipses indican velocidades promedio de 2 mm/año.

Las líneas punteadas con orientación norte-sur, señalan las áreas donde se establecieron perfiles y comparar las velocidades.

Además se logran distinguir algunas localidades: COB Cobán, RUB Rubelsanto, SAL Salamá; que se localizan cercanas a la región de Alta Verapaz. Lyon-Caen; et al. (2006).

Donnelly, et al. (1990) describen a Centro America Nuclear, la cual se divide en: los Bloques Maya (también llamado Yucatán) y Chortís. La zona de sutura Motagua que atraviesa el centro de Guatemala de Oeste a Este, cuya extensión oeste está cubierta por rocas Terciarias del Oeste.

El bloque Maya incluye parte de Guatemala al norte de la ZSM, Belice, península de Yucatán y México al oeste de del Istmo de Tehuantepec. Este bloque se localiza en la Placa Caribe. A través del tiempo geológico ocurrieron amplias áreas de deformación, iniciando con episodios de deformación por la colisión de ambos bloques, posteriormente por fallas de desplazamiento de rumbo y tensional.

El bloque Maya tiene un basamento metamórfico característico en la parte sur, asimismo, definir la historia geológica resulta compleja. Del Pensilvánico al Cenozoico ocurrió sedimentación marina, además, durante el Cretácico temprano se creó un depósito carbonático grueso y caliza de plataforma en el Cretácico tardío. Deformación y sedimentación clástica en el borde sur durante el evento de colisión durante el evento de sutura del Cretácico tardío y Terciario temprano. A esto se sumó cabalgamiento y deslizamiento de un complejo ofiolítico y una variedad de ambientes sedimentarios continentales.

3.3.3. Geología local (Grupo Santa Rosa).

▪ Formación Tactic (FmT)

Aflora en una zona al norte de la parte central y sur de la cuenca, se caracteriza por lutitas y areniscas en capas de color café y negro, además, se observan algunas intercalaciones de pizarras y metacuarcitas en los sitios donde la erosión corta la secuencia. Ocupan un relieve abrupto en las partes altas de los municipios de Panzós y Senahú.

Al sur en la Sierra de Las Minas ocupa un relieve accidentado. En esta área se pueden observar lutitas y conglomerados de color rojo claro a gris. Esta área colinda al sur con la Sierra de Las Minas, cuya área posee un relieve medio a alto.

De acuerdo a Donnelly (1990) la Formación Tactic es de edad Pérmica, de acuerdo a la revisión de información realizada en trabajos previos. En general ocupan alturas entre 1200 a 1500 msnm.

▪ Formación Chóchal (FmCh)

Estas rocas ocurren en la parte norte y noroeste de la cuenca en una franja con orientación este-oeste en los municipios de Tamahú y Senahú, asimismo, al norte de la cuenca existen afloramientos extensos. Consiste de calizas y dolomitas masivas, estratificadas, en algunas áreas forman escarpes. Generalmente, ocupan terrenos de relieve moderado a alto. El color es gris claro a oscuro.

Machorro (2005) describe que son calizas altamente fosilíferas, con alto contenido de fusulínidos, corales, braquiópodos, gasterópodos, crinoides, esponjas y algas. Ocupan alturas entre 800 a 1300 msnm.

Existe además un contacto litológico marcado con la formación Tactic, gradualmente hacia el oeste. Tomando como referencia a Vachard, et. al. (1977) con base a fusulínidos y algas se le asigna una edad de Roadiano-Leonardiano.

- **Formación Cobán (FmC)**

Aflora al norte de la cuenca, ocupa una topografía moderada a accidentada en algunos sitios.

Para su distinción Machorro cita a Fourcade (1994), el cual divide la formación en 2 miembros:

- Miembro dolomítico inferior: Consiste de calizas oscuras, en ocasiones cristalinas con alto contenido de miliólidos, asimismo, capas de brechas con algunos metros de espesor y otras de origen evaporítico.
- Miembro de caliza superior: Compuesta de lodolita, packstone o wackstone, asimismo, algunas intercalaciones de dolomitas y brechas. Es de color gris claro y tiene fósiles característicos como rudistas y foraminíferos grandes como: *Dicyclinaschulmergeri*, *Pseudorhapydioninasp.* y *Valvulaminapicardi*.

La edad de la Formación Cobán es Aptiano-Santoniano (Fourcade, et. al. 1994). En la región usualmente ocupan alturas entre 1100 a 1400 msnm.

- **Rocas Intrusivas Básicas (I)**

Este tipo de rocas ocurre a lo largo de las fallas activas Polochic-Motagua, principalmente al noreste y otro cuerpo menor al oeste. Consisten de cuerpos ofiolíticos, serpentinas Cretácicas, basaltos y cherts. Asimismo, litologías correspondientes a la Sierra de Santa Cruz localizada al norte de la Falla Polochic, asimismo, otra zona en la Sierra de las Minas, localizada al sur, con tendencia este-oeste. Esto da como resultado cuerpos alóctonos que afloran en el área.

En el área afloran al noreste y suroeste, en zonas de relieve moderado a alto. Las que afloran en la parte suroeste están en alturas entre 1200-1700 msnm, mientras que al noroeste ocupan pendientes en los rangos de 200-300 y 900-1200 msnm, estas están cabalgando las secuencias carbonáticas de la cuenca Polochic. La litología predominante consiste de serpentinitas, gabros y basaltos; con coloraciones verde claro a café, respectivamente.

- **Depósitos cuaternarios**

Ocupan las partes bajas del denominado Valle del Polochic, río principal y quebradas tributarias, que también se pueden denominar planicies de inundación. La parte central del valle se encuentra a una altura promedio de 80 msnm.

Consisten principalmente de los materiales acarreados aguas arriba, entre estos: guijarros, depósitos pomáceos y suelos.

El mapa geológico muestra la disposición de las formaciones en la Cuenca Polochic. Existe una diferenciación en las montañas localizadas al norte y sur, las Montañas de Chamá tienen

litología sedimentaria del Cretácico, mientras que en la Sierra de Las Minas las rocas metamórficas corresponden al Paleozoico.

3.4 Evaluación geomorfológica

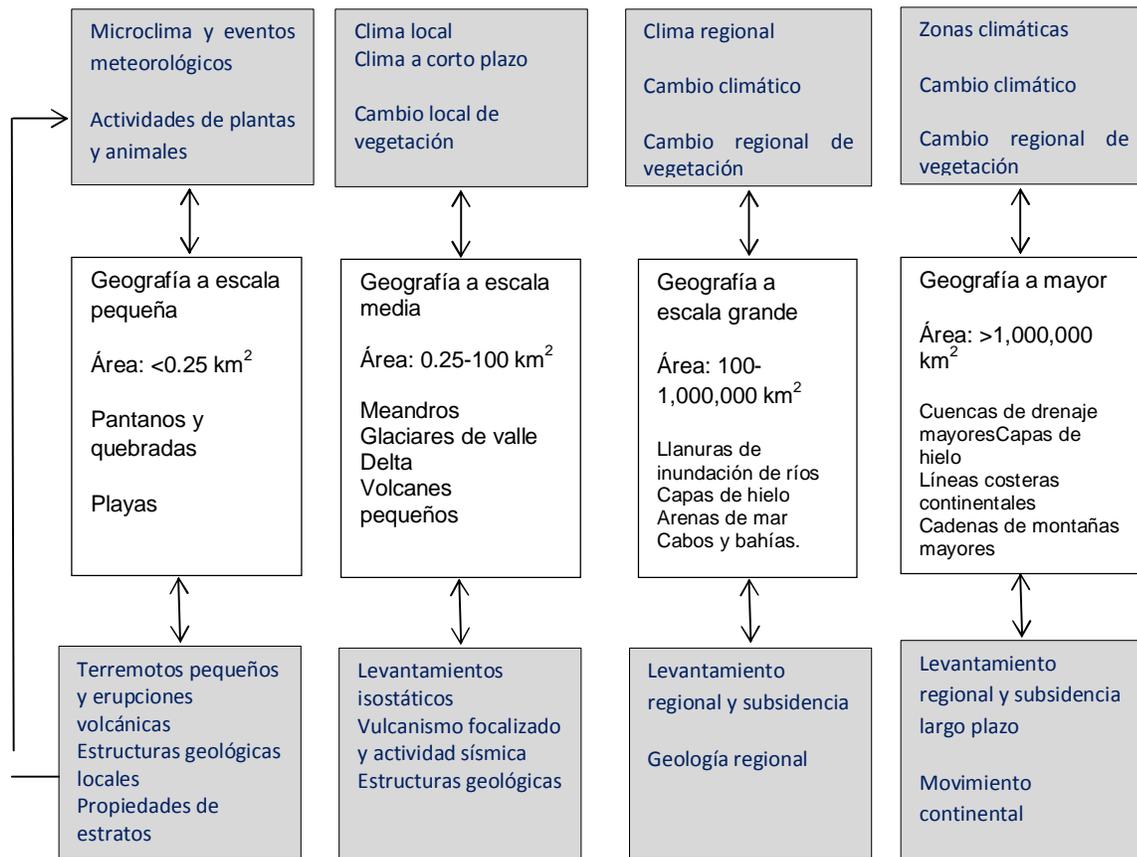
Existen varias metodologías para la clasificación geomorfológica, por lo cual, adecuarse a la representación del área de estudio requiere comprender los procesos de evolución terrestre, que incluyen además relieve, geología estructural y clima. Esto puede proveer indicadores acerca de la incidencia de estos en la ocurrencia de amenazas naturales.

Dentro de los datos disponibles, se utilizó:

- Imágenes Landsat L8 OLI/TIRS
- Hojas cartográficas
- DEM
- Reconocimiento de campo

Para esto es necesario establecer los procesos exógenos y endógenos que intervienen. En la figura 2, Huguett (2007) realiza la descripción en base a la naturaleza y factores relacionados.

Procesos Exógenos



Procesos endógenos y factores

Figura 2. Formas y diferentes escalas con procesos endógenos y exógenos.
Fuente: Huguett (2007)

La influencia de la tectónica regional; así como, el clima, intemperismo y actividad antrópica son los factores principales que inciden en el modelado terrestre de la cuenca Polochic. Los plegamientos e intemperismo son resultado de esta interacción, que a su vez se manifiesta por los procesos de superficie.

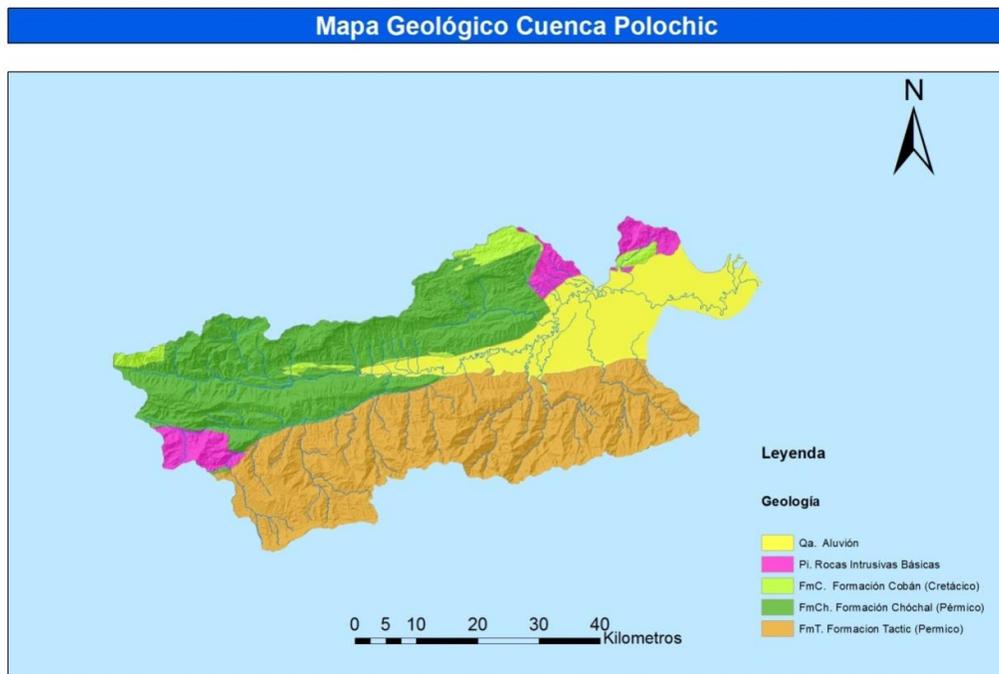
Inicialmente es importante considerar la influencia tectónica, especialmente desde el Cretácico. La tectónica de placas se considera el factor principal del relieve actual, en virtud de la interacción de las placas de Norteamérica y Caribe, en la cuenca Polochic se asume que el desplazamiento es constante de acuerdo a las mediciones GPS realizadas en la década del 2000. El lago de Izabal es una cuenca Pull Apart que marca el desplazamiento sinistral de rumbo y límite de placas convergente.

Además, la composición litológica se refleja en la competencia de acuerdo al tipo de rocas. Las rocas ígneas generalmente están compuestas de sílice, micas, anfíboles y piroxenos; de lo que la parte noreste afloran rocas ultramáficas que incluyen peridotitas serpentinizadas.

Existe diferenciación en la geomorfología de acuerdo a la composición litológica, dentro de lo cual están los carbonatos de las formaciones Cobán y Chóchal, rocas ultrabásicas en el noreste, rocas sedimentarias del Grupo Santa Rosa y el aluvión de la parte baja de la cuenca.

De acuerdo a Machorro (2005) esta línea montañosa también divide la cuenca Polochic situada al sur del Departamento de Alta Verapaz, que a su vez forma parte de una provincia hidrogeológica también distinta. De esto, se atribuye que la mayor parte forma parte de rocas metamórfica Paleozoicas, que son de baja permeabilidad y con acuíferos de flujo laminar.

Para el presente caso, se realizó la diferenciación entre las geoformas situadas al norte y sur de la cuenca, separadas en la parte central por las planicies del valle. De las clasificaciones existentes, se trató de acoplar una en base a las características de la región. En el Mapa 4 se puede apreciar la geología de la Cuenca Polochic.



Mapa 4. Geología de la Cuenca Polochic.

3.5 Clima

Las consideraciones del clima son importantes para la evaluación de amenazas naturales en la región. Para esto, es necesario notar que las alturas varían entre 0 y 2,943 msnm. De acuerdo a esto, el clima promedio anual varía en las partes bajas como los Municipios de La Tinta y Panzós, con rangos entre 20 a 25°C, con una precipitación promedio anual de 1,500 y 2000 mm; en los municipios de Tamahú, Tukurú, Senahú y regiones altas de Sierra de Las Minas entre 16 y 20°C, con precipitación de 3,000 – 3,500 mm. Existen 2 épocas en el año: Verano (Abril a Mayo) e invierno (Junio a Octubre); de lo cual las lluvias aumentan considerablemente, lo que comúnmente trae problemas para las poblaciones. En promedio ocurren 200 días de lluvia al año, con un rango de 2,000 a 4000 mm, lo cual sucede en las partes bajas y altas como la Sierra de las Minas respectivamente.

No obstante, la variabilidad climática es perceptible principalmente en la época de lluvias, lo cual se refleja en el aumento de la cantidad en pocos períodos de tiempo.

3.6 Datos disponibles

En la Tabla 1 se muestran los datos disponibles en el inicio de la investigación:

Datos disponibles	Contenidos	Fuente de información
Precipitaciones	Datos mensuales y anuales, años 1990-2013	INSIVUMEH
Geología	Unidades litológicas a lo largo de la cuenca	Geobase de datos del MAGA, SEGEPLAN, recorridos de campo
Tipo de suelos, uso actual	Clasificación de suelos de la región. Mapa de uso de suelo	Geobase de datos de SEGEPLAN
Imágenes Landsat	Imágenes a color del año 2015, a través de sensores L8 OLI/TIRS y L8 OLI/TIRS Pre-WRS-2	Earth Explorer
Hojas topográficas del país	Hojas topográficas a color	Geoservidor SEGEPLAN
Mapa de líneas de contorno	Líneas de contorno, altimetría	SEGEPLAN
Geología estructural, lineamientos	Mapas regionales	Estudios previos de investigación geológica.

Tabla 1. Datos disponibles para la investigación.

3.6.1 Uso de SIG y Sensores Remotos.

Para el desarrollo de la investigación, por medio de ArcGIS 10.1 se consideraron los siguientes factores:

- Geología
- Geomorfología
- Precipitaciones
- Pendiente
- Patrón de drenaje
- Uso de la tierra
- Microcuencas

En relación a imágenes satelitales, se optó por utilizar la descarga a través de los sensores L8 OLI/TIRS y L8 OLI/TIRS Pre-WRS-2, las imágenes obtenidas corresponden al año 2015. El procesamiento se realizó por medio de Arcgis 10.1.

En relación al clima, a través de la sección de climatología del INSIVUMEH se obtuvieron los datos de clima y precipitaciones de varias de las estaciones localizadas en la cuenca Polochic, asimismo, de zonas aledañas.

Además, se contó con la base de datos geográfica e información relacionada con el uso y tipo de suelo.

3.6.2 Reconocimiento de campo.

Para fortalecer el análisis de datos procesados, el reconocimiento de campo se realizó aprovechando la carretera principal y algunas redes secundarias. La Ruta Departamental RD-5 atraviesa los municipios de Tamahú, Tucurú, La Tinta y Panzós, asimismo, existe otra ruta que conduce hacia el municipio de Senahú que recientemente fue pavimentada en un tramo de 25 km. Para ambos casos, durante la época de lluvias existen inconvenientes debido a que la mayor parte del tramo inicial hasta llegar a La Tinta con una longitud de 60 km está en malas condiciones; además, algunos tramos hacia Senahú muestran problemas por deslizamientos. Además, existen rutas hacia la Sierra de Las Minas que facilitaron el reconocimiento al sur de la cuenca Polochic.

3.7 Informe final

A partir de los datos obtenidos y el reconocimiento de campo, el resultado final se orienta en función de seguir una secuencia que permita mostrar el marco metodológico, procesamiento de datos y mapas resultantes.

De la información disponible, la base principal la constituye el modelo de elevación digital DEM y curvas de nivel. De aquí, también surgen los mapas de: Pendiente, altura topográfica, geomorfología, red de drenaje, geología y zonas de inundación

Así también, a través de sensores remotos se determinaron las áreas susceptibles a amenazas naturales, lo que a través de modelamiento permitió establecer las zonas que puedan ser vulnerables a mediano y largo plazo, lo que se puede denominar también análisis multitemporal por medio de una comparación sistemática, que se basa en eventos

anteriores; así como, visualizar las zonas de inundación, que corresponden a las partes. El procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 se realizó por medio de Arcgis 10.1, que corresponde a la Clasificación Supervisada y No Supervisada, que permitió actualizar el uso de suelo de la región. De esto se optó por representar el mapa de Clasificación Supervisada, ya que muestra más precisión de acuerdo a la realidad de campo.

4. RESULTADOS

Al tener como referencia los datos disponibles; así como, los recorridos de campo, sobretodo en los sitios con mayor vulnerabilidad a inundaciones, existe más perspectiva en cuanto a comprender los factores relacionados a la ocurrencia de inundaciones. Para la elaboración de mapas, se tuvo como referencia el sistema de coordenadas GTM, el cual cubre toda la República de Guatemala.

La adecuación de la investigación se basa en el establecimiento de zonas inundables en la Cuenca Polochic. De esto, la caracterización se basa en el análisis de factores relacionados, que también se pueden mostrar en mapas, donde se identifican las áreas críticas que por lo regular cada año en las planicie de inundación del Valle Polochic, está están expuestas.

Por consiguiente, la revisión de parámetros físico-naturales, también forma parte de la investigación, al considerar principalmente las lluvias como evento disparador. La época de invierno da como resultado, daños a la infraestructura y eventualmente la pérdida de vidas. Cada año esto representa además la pérdida de millones de Quetzales para la reconstrucción, con lo cual, el desarrollo se detiene considerablemente.

4.1 Diseño del cálculo máximo de lluvias

Para una comprensión del clima regional, la evaluación de las intensidades de lluvia resulta en un método práctico que puede utilizarse para realizar el cálculo de períodos de retorno. Dentro de los datos de precipitaciones disponibles, el INSIVUMEH, es la entidad del Estado que facilitó los datos de las estaciones Papalhá y Panzós, que se localizan en la parte central de la Cuenca Polochic. La obtención de datos de precipitaciones data de los años 1990-2013.

El cálculo hidrológico se basó en la metodología propuesta por Oliveras, J. (2012). Los datos disponibles para el cálculo se basan en el registro promedio mensual de ambas estaciones, a lo que se le calculó el máximo anual e indicando el mes. Después, se calcula la media:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde:

\bar{x} = media

$\sum x_i$ = máximo anual por mes identificado

n = número de datos procesados

La desviación estándar se aplica mediante la siguiente fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Cuando los casos tomados son iguales al total se aplica la fórmula de desviación estándar. Así la varianza es la media de los cuadrados de las diferencias entre cada valor de la variable y la media aritmética de la distribución.

Aunque esta fórmula es correcta, en la práctica interesa el realizar inferencias poblacionales, por lo que en el denominador en vez de n , se usa $n - 1$ según la corrección de Bessel. Esta ocurre cuando la media de muestra se utiliza para centrar los datos, en lugar de la media de la población. Puesto que la media de la muestra es una combinación lineal de los datos, el residual a la muestra media se extiende más allá del número de grados de libertad por el número de ecuaciones de restricción. Dado esto a la muestra así obtenida de una muestra

sin el total de la población se le aplica esta corrección con la fórmula desviación estándar muestra.

Para el cálculo del período de retorno se calculan

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{2} * \beta$$

$$\beta = \beta - 0.5772 * \beta$$

$$\beta = \frac{\beta}{\beta} - \frac{\beta}{\beta}$$

El cálculo de la Intensidad es a través de la siguiente fórmula

$$\beta = \frac{\beta (\beta \beta)}{\beta \beta \beta \beta \beta \beta \beta (\beta \beta)}$$

4.2 Diseño de la estimación de lluvias

La precipitación máxima probable constituye una de las claves principales en la evaluación de zonas de amenazas de inundación (Fulkner, 1999). Específicamente, se obtuvo datos de dos estaciones meteorológicas registradas en el INSIVUMEH, las cuales corresponden a Papalhá y Panzós, que se localizan en la parte central de la Cuenca Polochic. Se puede considerar que la ubicación de estas estaciones es adecuada para conocer la cantidad de precipitaciones que afectan las planicies.

Los datos disponibles corresponden desde los años 1990 a 2013 (Tabla 2), con excepción de algunos años entre este período, que al final se tomaron como promedio de manera anual de acuerdo a los meses correspondientes, lo que brinda datos que se pueden procesar, de

acuerdo a las características variables en cuanto a la incidencia de precipitaciones. La referencia metodológica más común en hidrología es: Valor extremo Tipo I (EVI), Normal (N), lognormal, Gumbel, Pearson Tipo III y log Pearson Tipo III (Tingsanchali, T.; Karim, F. (2010). Entre las funciones de probabilidad, la distribución de Gumbel produce valores x^2 mínimos para todos los datos de análisis; de lo cual se calcularon períodos de retorno para 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años (Tablas 3 -12).

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máximo
1990	122.0	36.4	75.2	122.9	224.2	394.6	340.2	596.0	535.3	159.4	158.7	141.0	596.00 (Agos)
1991	127.4	65.7	75.0	32.5	242.6	388.3	581.4	429.2	692.6	275.1	60.3	42.5	692.60 (Sept)
1992	23.9	14.7	74.5	293.3	125.8	344.2	585.8	430.7	447.5	100.5	201.2	87.2	585.80 (Jul)
1993	57.2	9.4	74.9	149.6	197.5	375.7	502.5	18.2	414.6	206.2	123.4	90.2	502.47 (Jul)
1994	82.6	78.7	3.7	58.4	202.2	267.2	571.7	512.1	477.3	170.5	137.3	136.5	571.70 (Jul)
1995	66.3	66.7	33.5	133.5	87.1	321.0	464.8	400.5	418.9	101.4	124.5	85.7	464.80 (Jul)
1996	26.9	23.4	14.3	72.7	318.8	48.6	241.1	692.9	497.7	168.9	134.2	97.2	692.90 (Agos)
1997	58.3	42.1	N/D	38.6	241.1	447.5	761.7	692.9	510.0	257.6	240.6	11.2	761.70 (Jul)
1998	37.6	0.1	61.8	13.1	85.6	357.9	346.5	302.4	499.2	179.9	147.5	86.4	499.24 (Sept)
1999	66.9	37.5	51.6	101.6	191.7	327.2	488.4	452.8	499.2	179.9	147.5	86.4	499.24 (Sept)
2000	60.8	37.6	48.7	99.3	188.0	319.7	504.9	436.9	495.2	182.2	146.3	80.4	504.87 (Jul)
2001	53.4	34.5	45.4	106.7	182.0	312.1	496.4	437.7	473.3	171.9	155.8	84.6	496.37 (Jul)
2002	65.3	37.2	50.8	101.8	190.6	325.3	490.4	308.8	347.8	250.7	82.7	94.4	490.44 (Jul)
2003	69.3	38.1	152.0	10.1	283.8	225.9	609.7	341.8	417.2	235.0	143.1	86.4	609.70 (Jul)
2004	65.6	37.3	58.6	95.3	197.2	318.2	499.0	432.3	480.4	188.5	143.1	86.4	498.96 (Jul)
2005	140.6	51.6	53.3	30.7	258.5	513.5	425.8	570.6	440.2	268.3	146.4	40.8	570.60 (Agos)
2006	172.6	70.6	58.1	91.3	201.0	330.4	494.4	441.0	477.9	193.5	143.3	83.6	494.39 (Jul)
2007	117.8	N/D	112.1	59.0	81.2	210.9	494.4	441.0	477.9	193.5	143.3	83.6	494.39 (Jul)
2008	80.3	47.0	80.3	26.0	109.3	400.5	624.4	336.0	474.6	384.1	52.4	N/D	624.40 (Jul)
2009	83.0	59.7	5.6	73.6	245.7	301.1	486.7	382.3	371.7	104.2	63.9	97.4	486.70 (Jul)
2010	61.8	28.5	7.3	79.8	371.9	271.2	596.9	603.3	442.2	19.8	87.0	N/D	603.30 (Agos)
2011	65.7	19.9	82.5	78.2	62.8	431.7	375.0	386.9	406.5	390.8	91.8	59.7	431.70 (Jun)
2012	97.8	92.8	42.7	65.5	457.2	463.0	407.9	552.8	276.9	298.6	55.1	60.0	552.80 (Agos)
2013	106.8	56.8	9.9	44.4	290.7	331.3	495.2	443.4	426.4	579.2	127.4	82.0	579.20 (Oct)
MAX	172.6	92.8	152.0	293.3	457.2	513.5	761.7	692.9	692.6	579.2	240.6	141.0	761.70

Tabla 2. Datos de precipitación de estación Panzós 1990-2013.

Nº	Año	Mes Max. Precip.	Precipitación (mm)	
			x_i	$(x_i - \bar{x})^2$
1	1990	(Agos)	596.00	1826.37
2	1991	(Sept)	692.60	19414.52
3	1992	(Jul)	585.80	1058.59
4	1993	(Jul)	502.47	2580.37
5	1994	(Jul)	571.70	339.89
6	1995	(Jul)	464.80	7825.88
7	1996	(Agos)	692.90	19498.21
8	1997	(Jul)	761.70	43445.56
9	1998	(Sept)	499.24	2918.86
10	1999	(Sept)	499.24	2918.86
11	2000	(Jul)	504.87	2341.51
12	2001	(Jul)	496.37	3236.69
13	2002	(Jul)	490.44	3946.43
14	2003	(Jul)	609.70	3185.02
15	2004	(Jul)	498.96	2948.73
16	2005	(Agos)	570.60	300.54
17	2006	(Jul)	494.39	3466.25
18	2007	(Jul)	494.39	3466.25
19	2008	(Jul)	624.40	5060.33
20	2009	(Jul)	486.70	4430.77
21	2010	(Agos)	603.30	2503.60
22	2011	(Jun)	431.70	14777.81
23	2012	(Agos)	552.80	0.22
23		Suma	12725.1	151491.2

Tabla 3. Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel, Estación Panzós 1990-2013.

Cálculo variables probabilísticas	Cálculo de las Precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias																																													
$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 553.26$ mm																																														
$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 82.98$ mm																																														
$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * s = 64.70$ mm																																														
$u = \bar{x} - 0.5772 * \alpha = 515.92$ mm																																														
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Período Retorno</th> <th>Variable Reducida</th> <th>Precip. (mm)</th> <th>Prob. de ocurrencia</th> <th>Corrección intervalo fijo</th> </tr> <tr> <th>Años</th> <th>YT</th> <th>XT'(mm)</th> <th>F(xT)</th> <th>XT (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2</td><td>0.3665</td><td>539.6324</td><td>0.5000</td><td>609.7846</td></tr> <tr><td>5</td><td>1.4999</td><td>612.9658</td><td>0.8000</td><td>692.6514</td></tr> <tr><td>10</td><td>2.2504</td><td>661.5189</td><td>0.9000</td><td>747.5164</td></tr> <tr><td>25</td><td>3.1985</td><td>722.8659</td><td>0.9600</td><td>816.8384</td></tr> <tr><td>50</td><td>3.9019</td><td>768.3765</td><td>0.9800</td><td>868.2655</td></tr> <tr><td>100</td><td>4.6001</td><td>813.5512</td><td>0.9900</td><td>919.3128</td></tr> <tr><td>500</td><td>6.2136</td><td>917.9428</td><td>0.9980</td><td>1037.2754</td></tr> </tbody> </table>	Período Retorno	Variable Reducida	Precip. (mm)	Prob. de ocurrencia	Corrección intervalo fijo	Años	YT	XT'(mm)	F(xT)	XT (mm)	2	0.3665	539.6324	0.5000	609.7846	5	1.4999	612.9658	0.8000	692.6514	10	2.2504	661.5189	0.9000	747.5164	25	3.1985	722.8659	0.9600	816.8384	50	3.9019	768.3765	0.9800	868.2655	100	4.6001	813.5512	0.9900	919.3128	500	6.2136	917.9428	0.9980	1037.2754
Período Retorno	Variable Reducida	Precip. (mm)	Prob. de ocurrencia	Corrección intervalo fijo																																										
Años	YT	XT'(mm)	F(xT)	XT (mm)																																										
2	0.3665	539.6324	0.5000	609.7846																																										
5	1.4999	612.9658	0.8000	692.6514																																										
10	2.2504	661.5189	0.9000	747.5164																																										
25	3.1985	722.8659	0.9600	816.8384																																										
50	3.9019	768.3765	0.9800	868.2655																																										
100	4.6001	813.5512	0.9900	919.3128																																										
500	6.2136	917.9428	0.9980	1037.2754																																										
	$F_{(x)} = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}}$																																													

Tabla 4. Cálculo de variables probabilísticas y precipitaciones diarias máximas probables, Períodos de Retorno, Estación Panzós 1990-2013.

Duraciones, en horas									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
0.30	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.80	0.91	1.00

Tabla 5. Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración de 24 horas, Estación Panzós 1990-2013.

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	X24	609.7846	692.6514	747.5164	816.8384	868.2655	919.3128	1037.2754
18 hr	X18 = 91%	554.9040	630.3128	680.2399	653.4707	790.1216	836.5747	943.9206
12 hr	X12 = 80%	487.8277	554.1211	598.0131	653.4707	694.6124	735.4502	829.8203
8 hr	X8 = 68%	414.6536	471.0029	508.3111	555.4501	590.4205	625.1327	705.3473
6 hr	X6 = 61%	371.9686	422.5173	455.9850	498.2714	529.6419	560.7808	632.7380
5 hr	X5 = 57%	347.5772	394.8113	426.0843	465.5979	494.9113	524.0083	591.2470
4 hr	X4 = 52%	317.0880	360.1787	388.7085	424.7560	451.4980	478.0427	539.3832
3 hr	X3 = 46%	280.5009	318.6196	343.8575	375.7457	399.4021	422.8839	477.1467
2 hr	X2 = 39%	237.8160	270.1340	291.5314	318.5670	338.6235	358.5320	404.5374
1 hr	X1 = 30%	182.9354	207.7954	224.2549	245.0515	260.4796	275.7938	311.1826

Tabla 6. Precipitaciones máximas para diferentes tipos de duración de lluvias, Estación Panzós 1990-2013.

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm/hr) según el Periodo de Retorno						
Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	1440	25.4077	28.8605	31.1465	34.0349	36.1777	38.3047	43.2198
18 hr	1080	30.8280	35.0174	37.7911	36.3039	43.8956	46.4764	52.4400
12 hr	720	40.6523	46.1768	49.8344	54.4559	57.8844	61.2875	69.1517
8 hr	480	51.8317	58.8754	63.5389	69.4313	73.8026	78.1416	88.1684
6 hr	360	61.9948	70.4196	75.9975	83.0452	88.2737	93.4635	105.4563
5 hr	300	69.5154	78.9623	85.2169	93.1196	98.9823	104.8017	118.2494
4 hr	240	79.2720	90.0447	97.1771	106.1890	112.8745	119.5107	134.8458
3 hr	180	93.5003	106.2065	114.6192	125.2486	133.1340	140.9613	159.0489
2 hr	120	118.9080	135.0670	145.7657	159.2835	169.3118	179.2660	202.2687
1 hr	60	182.9354	207.7954	224.2549	245.0515	260.4796	275.7938	311.1826

Tabla 7. Intensidades de lluvia a partir de precipitaciones diarias, según duración y frecuencia, estación Panzós 1990-2013.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máximo
1990	84.6	34.3	69.4	78.1	176.9	324.0	289.9	497.9	467.8	253.9	160.1	96.9	497.9 (Agos)
1991	55.3	29.3	5.6	23.3	151.9	254.8	350.1	199.5	485.8	199.6	55.1	153.5	485.8 (Sept)
1992	7.7	5.6	42.1	129.1	158.8	373.2	429.8	378.6	245.9	148.0	116.0	61.8	429.8 (Jul)
1993	94.6	18.5	33.9	54.9	123.3	500.6	684.1	712.6	430.9	385.3	53.9	36.6	684.1 (Jul)
1994	68.1	49.9	13.1	33.4	299.8	109.1	331.5	330.7	480.0	256.9	142.2	73.2	480.0 (Sept)
1995	23.1	29.1	7.5	103.3	138.3	366.7	431.9	769.6	578.0	153.6	35.6	84.4	769.6 (Agos)
1996	15.2	31.8	17.3	119.9	537.5	389.3	954.0	525.3	323.2	219.4	344.2	131.6	954.0 (Jul)
1997	41.4	48.1	83.4	94.4	131.5	348.7	801.7	630.1	387.1	248.1	139.6	18.9	801.7 (Jul)
1998	33.2	8.2	9.5	108.3	31.0	334.3	534.1	171.6	166.8	455.0	625.8	30.2	625.8 (Nov)
1999	21.3	54.5	95.5	11.6	153.8	295.3	860.4	140.1	763.1	331.6	219.9	45.8	860.4 (Jul)
2000	37.8	34.2	27.0	36.2	463.7	141.5	190.0	435.6	393	208.4	31.1	69.1	463.7 (May)
2001	41.9	35.4	52.9	28.6	83.1	135.4	164.8	163.5	145.8	94.1	26.2	51.0	164.8 (Jul)
2002	47.7	68.1	46.2	37.3	241.0	288.1	660.4	156.8	228.3	189.6	66.7	33.7	660.4 (Jul)
2003	33.1	67.2	97.4	44.4	269.2	420.9	812.6	256.5	184.8	116.3	39.7	14.2	812.6 (Jul)
2004	**	12.3	37.8	10.7	211.4	443.7	562.6	164.3	118.6	298.2	54.6	4.6	562.6 (Jul)
2005	30.7	11.9	11.3	20.2	273.5	328.4	220.1	773.8	715.1	181.3	24.2	33.7	773.8 (Agos)
2006	51.1	6.7	44.5	58.7	107.9	602.8	626.5	303.0	235.3	193.9	43.7	128.3	602.8 (Jun)
2007	8.2	7.0	27.5	67.4	91.8	275.8	635.4	272.7	469.82	156.9	61.7	27.2	635.4 (Jul)
2008	102.3	96.4	127.5	68.7	192.6	414.3	746.9	418.5	217.6	348.2	24.0	59.9	746.9 (Jul)
2009	19.0	64.8	31.9	37.9	281.2	223.1	452.3	424.0	382.8	103.6	24.0	42.2	452.3 (Jul)
2010	30.6	56.8	0.4	123.7	351.3	271.6	308.6	524.3	699.4	74.5	19.5	26.2	699.4 (Sept)
MAX	102.30	96.40	127.50	129.10	537.50	602.80	954.00	773.80	763.10	455.00	625.80	153.50	954.00

Tabla 8. Datos de precipitación Estación Papalhá, 1990-2010.

Nº	Año	Mes Max. Precip.	Precipitación (mm)	
			x_i	$(x_i - \bar{x})^2$
1	1990	(Agos)	497.9	16627.4885
2	1991	(Sept)	485.8	19894.4308
3	1992	(Jul)	429.8	38827.7642
4	1993	(Jul)	684.1	3277.83512
5	1994	(Sept)	480.0	21564.2232
6	1995	(Agos)	769.6	20378.2423
7	1996	(Jul)	954.0	107028.68
8	1997	(Jul)	801.7	30573.3551
9	1998	(Nov)	625.8	1.09750567
10	1999	(Jul)	860.4	54546.7146
11	2000	(May)	463.7	26617.1456
12	2001	(Jul)	164.8	213488.002
13	2002	(Jul)	660.4	1125.76227
14	2003	(Jul)	812.6	34503.947
15	2004	(Jul)	562.6	4127.75655
16	2005	(Agos)	773.8	21595.0023
17	2006	(Jun)	602.8	578.287982
18	2007	(Jul)	635.4	73.14322
19	2008	(Jul)	746.9	14412.5742
20	2009	(Jul)	452.3	30466.8713
21	2010	(Sept)	699.4	5263.84798
21		Suma	13163.8	664972.2

Tabla 9. Distribución de probabilidades pluviométricas a través de Gumbel, Estación Papalhá 1990-2010.

los meses más críticos durante el año. Como resultado, esto comprende los meses de: Junio, Julio, Agosto, Septiembre y Octubre; lo que también se muestra a través de eventos anteriores, principalmente el Huracán Mitch (31 Octubre de 1998) y Tormenta Tropical Stan (5 de Octubre de 2005). El cálculo a través del método de Gumble resulta práctico para estos fines.

A través de 2 estaciones meteorológicas: Papalhá y Panzós que se localizan en la parte central de la Cuenca Polochic, el cálculo diario y mensual de lluvias permite obtener el promedio, lo que da lugar a la aplicación de valores en la fórmula respectiva. A nivel Institucional existe carencia para la implementación de estaciones, por lo que, el procesamiento de datos de precipitaciones se basó en las mencionadas.

Dentro de los principales factores en el establecimiento de zonas de inundación se consideró principalmente la altura topográfica, geomorfología, red de drenaje y uso de la tierra (Tingsanchali, T.; Karim, F.; 2011). Esta valoración permite identificar que los períodos de retorno son a mediano plazo, lo cual sucede generalmente cada 5 años, lo que se acrecienta cada 10 y 15 años. La visualización de zonas de amenaza de inundación, ocurre en la parte centro y este, donde también se ubican los principales sitios poblados de los municipios de la región, asimismo, las zonas de cultivo de caña de azúcar y palma africana se localizan en las áreas cercanas al cauce del río Polochic. Las profundidades en las áreas cercanas al río Polochic llegan a alcanzar entre 0.5 a 1.50 metros. Al alcanzar 1.00 metros, las poblaciones aledañas están bajo amenaza y los daños a la infraestructura son inevitables, la carretera principal sufre daños y causa que en algunos tramos se interrumpa la comunicación.

Para el cálculo de intervalos de duración de lluvias, se consideró un rango de tiempo de 24 horas, lo que permitió visualizar a mediano y largo plazo las intensidades y como éstas se traducen en la generación de zonas de amenaza de inundación. La fase más crítica suele ocurrir a partir de las 8 horas de lluvia continua. Esto facilita visualizar la ocurrencia de inundaciones durante el período de lluvias y el período de respuesta de inundaciones.

En relación a determinar los períodos de retorno y magnitud, afectan el mismo escenario en extensión, principalmente en los rangos de 5 a 10 años, cuyos eventos en las últimas décadas indican la tendencia a generar zonas de inundación, sobretodo en el área de meandros, que abarca también las cercanías de cabeceras municipales de La Tinta, Telemán y Panzós, principalmente.

4.4 Zonas de inundación

Para considerar la dinámica hidrológica de la Cuenca Polochic, las planicies de inundación se localizan en áreas de relieve bajo, depositación activa de sedimentos, diversos canales de drenaje y flujos de caudales (Allen, 1965; Speight, 1974). En general, las partes bajas se pueden agrupar en una categoría en virtud que existen formas características: Planicie de inundación, meandros y delta. Las alturas en esta área tienen un promedio de 80 msnm.

La otra categoría corresponde a las partes altas, al norte formada por la Sierra de Chamá, con alturas entre 1100 y 1300 msnm en las sitios de mayor altura como la Comunidad Actelá. Así también, la Sierra de Las Minas al sur, cadena montañosa que corresponde a área protegida, tiene alturas desde los 1100, con alturas promedio entre 1300 y 1500 msnm; las alturas mayores alcanzan 2500 msnm. Esta última se puede considerar una de las mayores

zonas de aporte en recarga hídrica, al tomar en cuenta que posee mayor cobertura boscosa y tasa de precipitaciones.

Inicialmente, se optó por la utilización de la imagen Landsat 8, que para este caso, 2 imágenes contienen el total de la cuenca. A través de Arcgis 10.1, Spatial Analyst Tools la herramienta Extraction, por medio de Extract by Mask; permite ubicar la cuenca y extraerla para el procesamiento georeferenciado. La unión de ambas imágenes da como resultado la delimitación de la cuenca.

Además, se realizó una diferenciación: a. Zonas inundables, b. Zonas no inundables. En relación a diferenciar las profundidades de inundación, es importante mencionar que a nivel de planicie de inundación (Valle del Polochic) la altura topográfica es constante 80 msnm, por lo cual resulta conveniente diferenciar solamente ambas zonas.

Las características geomorfológicas, precipitaciones flujos de agua y la altura topográfica que predomina en el valle Polochic muestran que las zonas inundables se localizan en la parte central y este y noreste de esta planicie. Estas se focalizan en la zona de meandros y sitios aledaños, que también corresponden a las que tienen menor altura topográfica de la región. Aquí conviene considerar que los centros poblados se localizan generalmente a lo largo del cauce del río Polochic.

La geomorfología reflejan las características de inundaciones (Oya, 2001). No obstante, a pesar de similares condiciones de elevación, las zonas inundables pueden variar cada año en magnitud, es decir, dependerá sobretodo de la cantidad de precipitaciones para que alcancen mayor extensión; sobretodo, en la zona de meandros y sitios aledaños; la variación

está dada en función de la capacidad del río principal en contener y transportar el caudal de agua.

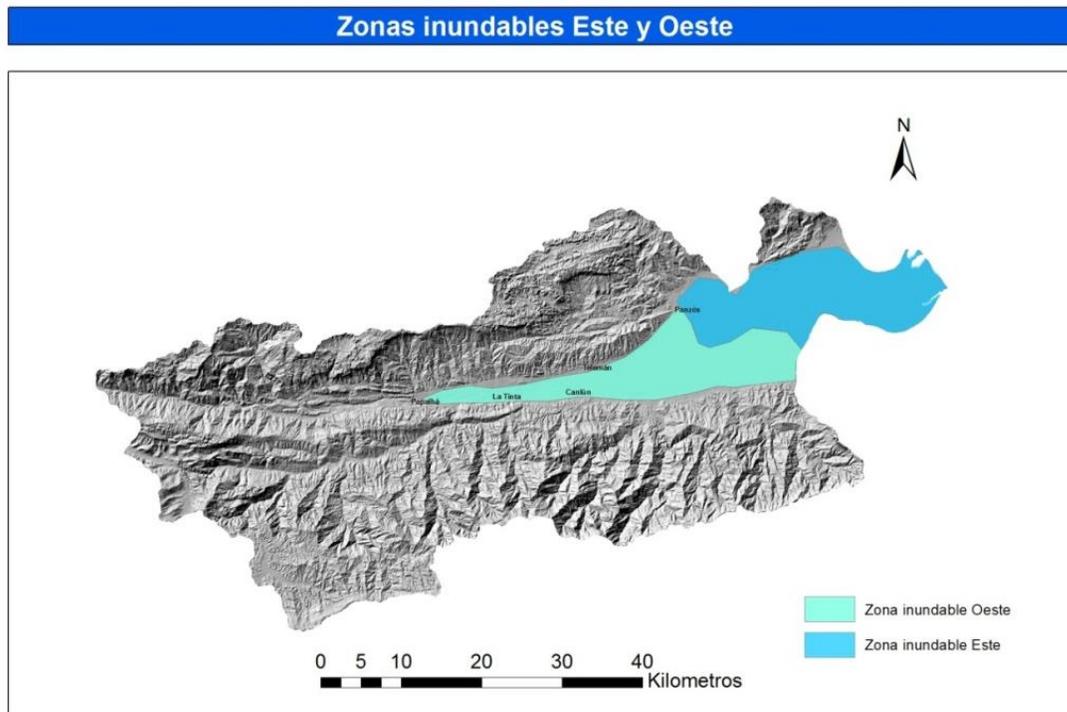
En este sentido, la utilización del DEM es importante para establecer que las diferencias de altura son marcadas y fácilmente identificables, lo cual sucede a partir de una altura de 80 msnm. La zona que se mantiene la mayor parte del tiempo inundable se localiza cercana a la desembocadura con el Lago de Izabal, con un área de 260.00 km². La parte oeste de la planicie cuenta con 213.52 km².

El nivel de precisión para establecer zonas de inundación resulta práctico, debido a que a través del modelado visualizan las áreas que son afectadas desde hace algunos años, de modo que, una evaluación integral del modelo planteado, resulta práctico debido a que representa lo que generalmente sucede en campo. A esto se agrega, el reconocimiento de campo, que permitió también identificar las zonas expuestas.

La combinación de factores resulta en una metodología práctica con la utilización de SIG a través de Arcgis 10.1. Resulta práctica la manera de comparar las áreas inundables, para lo cual se agruparon en una zona, debido a que generalmente esto representa la realidad en el campo; la zona inundable abarca el delta del río Polochic, área de desembocadura con Lago de Izabal y cabeceras municipales de Panzós y La Tinta. El resto de cabeceras sufren inundaciones temporales debido quebradas (arroyos) que atraviesan estas áreas, lo que origina inconvenientes a las poblaciones de los municipios.

Las poblaciones aledañas al río Polochic son las más afectadas, de hecho, forman parte de los centros poblados de las cabeceras municipales de La Tinta y Panzós y aldeas cercanas. Al tomar en cuenta que la zona de valle es una de las más productivas para propósitos de

producción agrícola, la llegada de empresas de caña de azúcar y palma africana ocupan ahora en mayor proporción en comparación con pequeños agricultores que fueron desplazados hacia las zonas montañosas. El resultado de este análisis se puede ver en el Mapa 5.



Mapa 5. Zonas inundables Este y Oeste

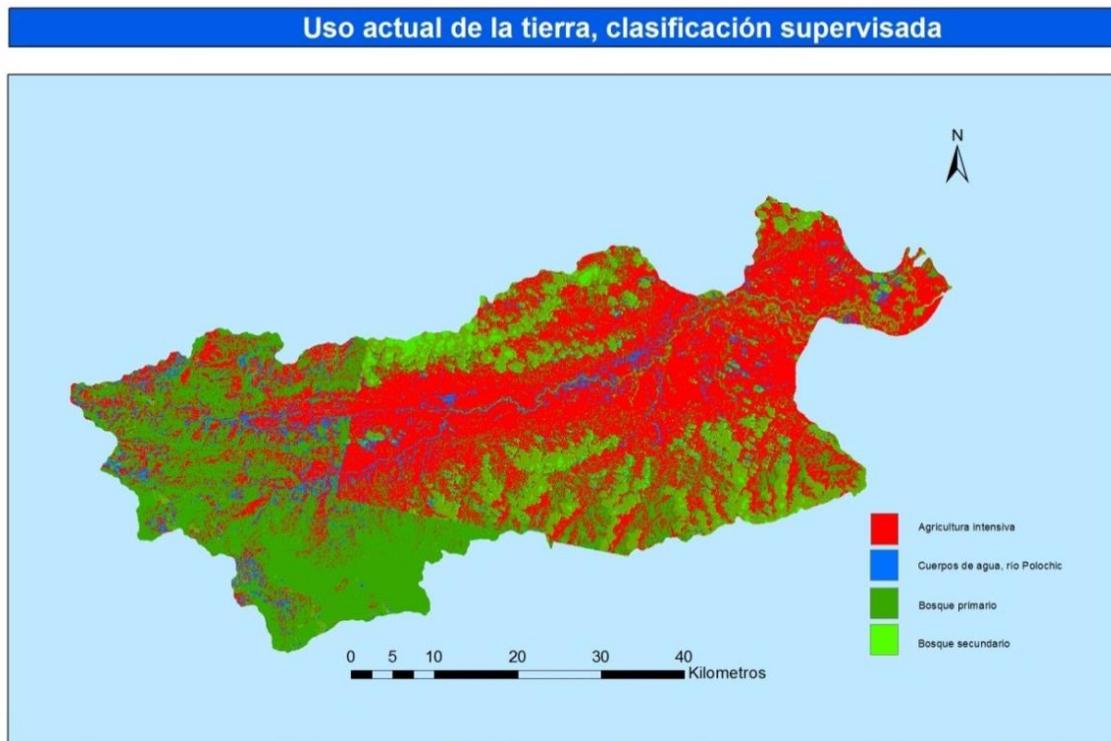
4.6 Uso actual de la tierra

La utilización de sensores remotos para el análisis de zonas del uso actual de la tierra facilita también la identificación de áreas dentro de la zona de amenaza, asimismo, aquellas que durante los últimos años, están degradadas debido principalmente a la intervención humana.

Dentro de los datos disponibles, la utilización de imágenes Landsat 8 OLI/TIRS del mes de Mayo de 2015 ayuda a establecer el análisis en dos vías: a. Clasificación supervisada o no supervisada, b. Identificación de rasgos geomorfológicos, c. uso actual de la tierra. El procesamiento se realizó a través de Arcgis 10.1, con lo cual, la precisión para establecer las condiciones actuales.

Al realizar la comparación, la planicie de inundación se convirtió desde hace aproximadamente una década en zona de cultivo intensivo de caña de azúcar y palma, sobretodo en la parte central y oeste, el río Polochic drena de oeste a este previo a desembocar en el Lago de Izabal. Los principales centros poblados se localizan en sitios aledaños al río Polochic, aquí se optó por no diferenciarlos debido a la resolución de la Imagen Landsat. Al norte, las Montañas de Chamá muestran también el avance de la frontera agrícola, de lo cual el bosque primario se redujo sustancialmente. Al sur, la Sierra de las Minas muestra más conservación, no obstante el nivel de presión antrópica es alto.

En general, el uso intensivo de suelo está relacionado a fuentes de agua, es decir, el riego es importante para lograr cosechas a gran escala. Prácticamente, el valle del Polochic está devastado casi en su totalidad, una parte aún se conserva que corresponde a las Bocas del Polochic, biotopoprotegido. En el resultado se puede observar en el Mapa 6.



Mapa 6. Uso actual de la tierra, clasificación supervisada

4.7 Caracterización geomorfológica

La combinación de fotointerpretación e investigaciones de campo, contribuye al estudio de inundaciones. El mapa geomorfológico ayuda considerablemente a identificar zonas de amenaza, la dirección de flujo y cambios en el curso de ríos y quebradas (Ho, L.; Umitso, M. 2011).

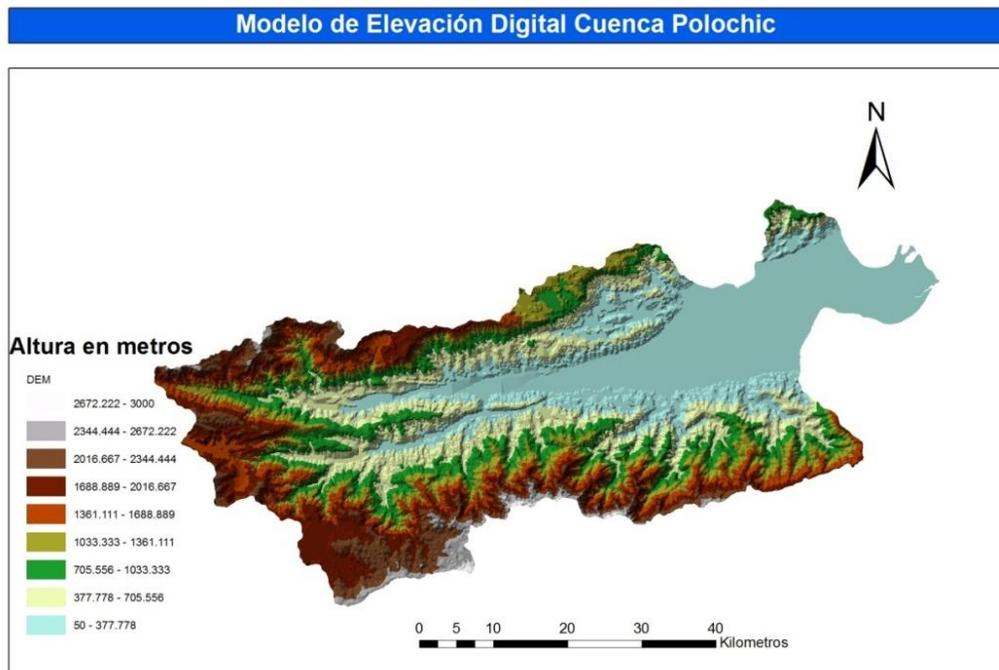
El mapeo de inundaciones se puede realizar con metodologías diferentes, que se basan principalmente en análisis hidrológicos, meteorológicos y geomorfológicos. En países en vías de desarrollo, donde los datos climáticos son insuficientes, la generación de modelos de inundaciones a través del modelo geomorfológico resulta efectivo y apropiado (Lastra, et. al.

2008). Este método se basa en la fotointerpretación y reconocimientos de campo que pueda evidenciar eventos de inundación, zonas inundables, dirección de flujo, rasgos de relieve y depósitos sedimentarios formados a través de inundaciones continuas. Estas características brindan información importante para eventos futuros (Oya, 2001).

Para el reconocimiento de la geomorfología, se hizo en dos vías: a. análisis del DEM, b. análisis de imágenes satelitales Landsat 8. El tratamiento para el DEM se realizó a través de Arcgis 10.1; iniciando con el relleno de imperfecciones de la imagen; el ArcToolBox cuenta con la Herramienta Hydrology brinda una amplia gama de opciones, que incluye la acumulación, dirección de flujo y la red de drenaje principal y secundario, que da lugar a delimitar la cuenca hidrográfica completa. La obtención del relieve en base a las diferencias de elevación, es una manera de diferenciar las formas del terreno.

En relación a las imágenes Landsat 8, se realizó el tratamiento digital en base a la obtención de las curvas de nivel, que es la base para la generación del TIN. Luego, el procesamiento por medio de ArcScene, a través del modelado del TIN, para así obtener el DEM. Esta opción es ideal para visualizar el relieve de la Cuenca Polochic,

La adquisición de imágenes Landsat 8 corresponde al mes de Mayo del año 2015, de lo cual, es distinguible el relieve relativamente alto de la parte Sur, en comparación con la parte Norte; mientras que la parte Central está corresponde a las partes planas, con alturas promedio entre 50-80 msnm. El modelo de elevación digital se puede apreciar en el Mapa 7.



Mapa 7. Modelo de elevación digital Cuenca Polochic.

Las planicies aluviales se caracterizan por su bajo relieve, que a su vez son formadas por depositación constante de sedimentos, red de drenaje y flujo de materiales (Allen, 1965; Speight, 1974; Ho, L.; Humitso, M. 1974). Por lo que, las microformas están compuestas de formas primarias: Planicies de inundación, barrera de inundación, barrera de meandros, planicie aluvial estancada, delta y terrazas. Junto con los elementos morfológicos: Red de drenaje, islas aluviales, diques naturales, relleno de canales y cuencas de inundación (Ho, L.; Humitso, M. 1974).

La caracterización geomorfológica para la Cuenca Polochic, se basa en la interpretación de imágenes satelitales, hojas cartográficas y DEM. La delineación de geoformas se basa en el procesamiento de imágenes satelitales, con la finalidad de establecer las zonas de amenaza a inundaciones. De acuerdo a la disponibilidad en descarga a través de EarthExplorer que corresponden al mes de Mayo de 2015. No fue posible obtener de la época de lluvias; no

obstante, la identificación de zonas de inundación son relativamente fáciles de identificar por medio de la altitud topográfica principalmente.

Las zonas críticas corresponden al delta del río Polochic, que se localiza previo a la desembocadura en el Lago de Izabal, asimismo, sitios aledaños son susceptibles a inundaciones. Además, el trazo meandriforme es característico de la fase terminal ríos previo a desembocar en el mar o lagos. Durante la época de invierno debido al aumento del caudal, los meandros desaparecen temporalmente; mientras, que en verano son característicos. Esto corresponde a la zona Este, donde también son comunes los pantanos, lo cual es característico en la mayor parte del tiempo.

La imagen satelital se compone de 3 bandas, lo que a través del procesamiento en Arcgis 10.1 da como resultado que los rasgos geomorfológicos tengan una resolución aceptable, con lo cual, las zonas inundables afectan considerablemente los sitios de inundación y así realizar la comparación con otras áreas que tienen más elevación topográfica.

La Figura 3 muestra la imagen satelital obtenida a través del Sensor Landsat 8 OLI/TIRS, que muestra la diferencia geomorfológica de las áreas ubicadas al Norte y Sur respectivamente. Así también, la cantidad de precipitación es relativamente mayor en la Sierra de Las Minas, lo que contribuye a que también exista más humedad, esto se visualiza en el área protegida denominada Bocas del Polochic, que también corresponde a la zona donde desemboca en el Lago de Izabal.

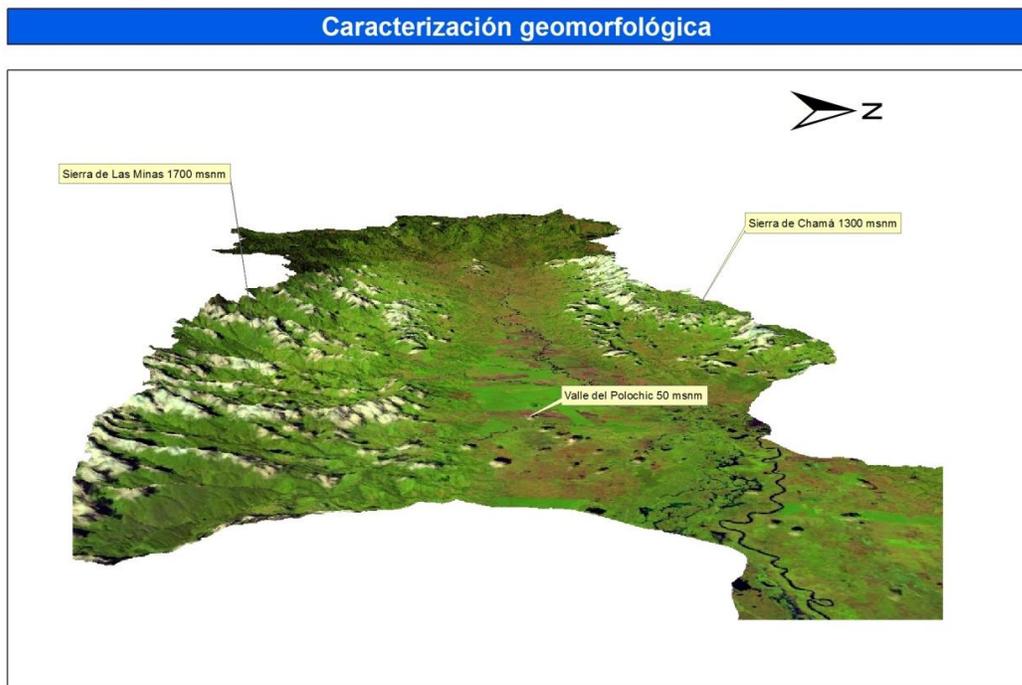


Figura 3. Caracterización geomorfológica 2D de la Cuenca Polochic

Así también, el análisis de imágenes Landsat y DEM, facilitan el reconocimiento; así como, establecer la proyección en cuanto a la evolución a largo plazo relacionada a los procesos naturales que intervienen en el modelado terrestre de la región, que incluyen el karst y tectónica.

Machorro, R. (2005) con base en la elaboración del estudio hidrogeológico para el Departamento de Alta Verapaz, describe el origen del término karst en relación donde cita a GSI (2000), cuyo origen del vocablo se refiere a las palabras servo-croata krsy la eslovena kars que significan tierra pedregosa descubierta. Kars es una región descubierta que ahora forma parte de Eslovenia y Croacia, donde los paisajes kársticos están bien desarrollados.

En este sentido, la consideración hacia la Cuenca Polochic en base a la variabilidad litológica y la predominancia en la parte norte en base a las Formaciones Cobán y Chóchal. Así también, la diferenciación con rocas ígneas y metamórficas al noreste y sur del área de investigación.

Definir las geoformas en la investigación forma parte de conocer la dinámica de la cuenca. Dentro de esto, la utilización del DEM e imágenes Landsat fue importante para definir las.

A nivel superficial hay una distinción entre las rocas carbonatadas al norte del valle, con aquellas que se localizan al sur, que consisten en su mayor parte de rocas metamórficas.

4.7.1 Paisaje kárstico.

Una clasificación para la parte norte de la cuenca se basa en la descripción de Machorro (2005) y Huguet (2007).

NOMBRE		DESCRIPCIÓN
Holokarst o región kárstica		Paisaje completamente kárstico
Fluviokarst		Región con combinación de karst y corrientes superficiales
Valle kárstico		Zona con escaso drenaje superficial, pérdida de flujo hacia aguas subterráneas
Estructuras con relieve negativo	Dolina	Depresión subredondeada desde decenas a 1,000 de tamaño, profundidad entre 1 a cientos de metros
	Uvala	Depresión formada por la unión de varias dolinas
	Valle ciego	depresiones parecidas a uvalas, que se forman en las etapas finales de degradación de valles con drenaje escaso

NOMBRE		DESCRIPCIÓN
	Cockpit	Dolinas grandes que se localizan en dolinas de espesor grande y clima tropical
	Polje	Depresión larga y cerrada con piso plano, la superficie puede variar desde 2-400 km ² , el fondo normalmente contiene aluvión, y están rodeados por montañas de calizas con pendientes fuertes
	Cañón	Garganta de paredes verticales, normalmente excavadas por corrientes alógenas, que nacen fuera de regiones calcáreas
Estructuras con relieve positivo	Colinas residuales	Colinas aisladas de calizas que se levantan sobre planicies.
	Karst cónico-torres	Colinas residuales con pendientes verticales a subverticales, los tamaños pueden variar

Tabla 13. Tipología de paisaje kárstico

Fuente: tomado y modificado de Machorro (2005), Huguet (2007)

Para la cuenca Polochic, es importante tomar en cuenta el clima tropical, incide en el aumento de la intensidad del proceso kárstico en comparación con zonas templadas o frías. Esto se refleja en el área que el karst puede cubrir, además el grado de desarrollo. El ácido carbónico es el solvente principal en paisajes kársticos.

4.7.2 Zona de Fluvio Karst.

En la región, dolinas y uvalas son características, lo que se manifiesta a través de la subsidencia de áreas. Por lo general, la incidencia de deslizamientos es poca debido a que los suelos tienden a ser menos húmedos, consolidados y con menos contenido de carbonatos, además del nivel de cobertura boscosa.

Las diaclasas son resultado de la infiltración de agua a través de intersecciones de diaclasas o fisuras desde donde se crea una zona de máxima disolución y en consecuencia hay subsidencia de las paredes rocosas. La unión de varias dolinas se denomina uvala.

Generalmente en la región predominan dolinas, que en algunas ocasiones están interconectadas, pero esto es en menor proporción. Las ocurrencias más comunes están al norte y noreste de la cuenca, que corresponde al Municipio de Senahú.

Así también, otras geoformas existentes corresponden a mogotes, que tienen las mejores exposiciones entre la ruta Senahu- Lanquín. Estas corresponden a protuberancias de algunas decenas de altura, con pendientes entre 60-80%.

La altura topográfica en la zona norte de la cuenca Polochic tiene un rango entre 200 a 1,400 msnm.

La red de drenaje es de tipo meándrica, lo cual se observa a lo largo de esta zona. El transporte de material hacia las partes bajas del valle es constante, al tomar en cuenta que en época de lluvia

Comúnmente, ocurren desprendimientos de rocas de diferentes tamaños, sobretodo en los sitios de pendiente alta y aquellos donde los buzamientos están en dirección de las carreteras.

4.7.3 Zona de montaña.

La zona montañosa localizada al sur de la cuenca, presenta áreas amplias con pendientes moderadas a fuertes. No obstante, la consideración en la composición de las rocas, predispone la caracterización en relación a la composición litológica. Este tipo de rocas muestra más resistencia a la erosión de acuerdo a su composición; por lo que el relieve actual es resultado de la interacción tectónica.

Así también, el patrón de drenaje es subdentritico, con lineaciones norte-sur, además de contar con una lineación al sistema de falla Polochic en dirección este-oeste. El control estructural de la falla es evidente, asimismo, la deformación en la parte sur de la cuenca es más intensa.

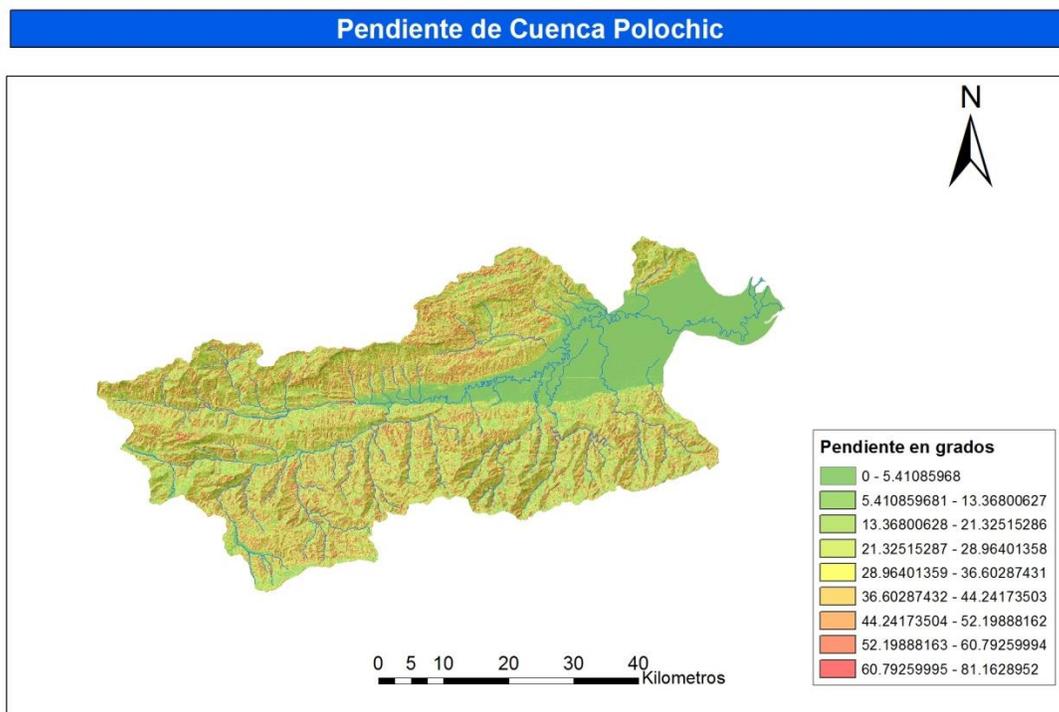
Las alturas topográficas alcanzan rangos entre 1300-1800-2500 msnm. Para establecer una subdivisión de las geoformas se hizo de acuerdo a las variaciones estructurales de la zona sur de la cuenca.

Dar, J.; Dubey, R., (2013) utilizaron el término neotectónica como una herramienta eficaz para el análisis de la deformación terrestre en una región de los Himalayas, una cadena montañosa activa con un rango de desplazamiento aproximado de 10 mm/año. Esto incluye utilización de sensores remotos y SIG fue parte vital para el análisis estructural. Los patrones sísmicos de la región tienen incidencia en el modelado del relieve.

La revisión de esta metodología y la aplicación en base a los objetivos de la investigación, redundan en conocer la geodinámica de la cuenca Polochic. Esta distinción se realizó en base a la diferenciación geológica, de relieve y distinción de rasgos a través del análisis de imágenes Landsat 8 y DEM.

Por consiguiente, se realizó la división a través de geoformas y estructuras que forman parte de la cuenca. Para ello se denominan unidades morfotectónicas, con la finalidad de definir aquellas que representan niveles de deformación diferentes, que además incluyen el tipo de geología.

Otro factor importante consistió en el análisis de pendiente, con lo que de igual manera hay distinción entre las zonas norte y sur. Al norte predomina el paisaje kárstico con pendientes altas en áreas relativamente pequeñas, en comparación con la zona sur. En el mapa 4, se pueden visualizar la pendiente en el área caso de estudio.



Mapa 8. Pendiente en Cuenca Polochic.

4.8 Análisis de amenazas

Definir el tipo de amenazas que afectan la región es sobre la base de identificar los sitios que a través de los años sufren las consecuencias, principalmente de deslizamientos e inundaciones.

De esto, el principal evento disparador son las precipitaciones que aumentan considerablemente en invierno. Íntimamente relacionado, la degradación ambiental por factores antrópicos, refleja la poca aplicabilidad de planes de ordenamiento territorial a nivel de país. En este sentido, por medio de la siguiente tabla se muestran las diferentes clases asignadas de acuerdo al nivel de amenaza en la región.

		Grado de actividad			Nivel de amenaza
		Activo	Parcialmente activo	Inactivo	
Procesos principales					
Karst	Disolución	x			Medio
	Dolinas		x		Medio
Procesos de denudación	Erosión lenta	x	x		Alto
	Flujo lateral de río	x			Medio
	Flujo laminar	x			Alto
	Flujo Turbulento		x		
	Depósitos de debris	x	x		Alto
	Deslizamientos	x	x		Alto
	Inundaciones	x	x		Alto

Tabla 14. Nivel de amenaza en la región.

4.9 Análisis de imágenes

El ordenamiento del proceso de imágenes se inició con la comparación de los cambios en la cobertura forestal de la cuenca, para ello se dispuso de imágenes a través de ChangeMatters de Esri. Esto facilita sustancialmente la cobertura boscosa y pérdida en un período de 20 años. Ver figura 4.

Esto también se puede interpretar también como la influencia antrópica, lo que en general es uno de los factores principales a considerar en relación al aumento en la incidencia de deslizamientos, principalmente, asimismo, en el crecimiento demográfico a través de poblaciones que se localizan alrededor del río Polochic.

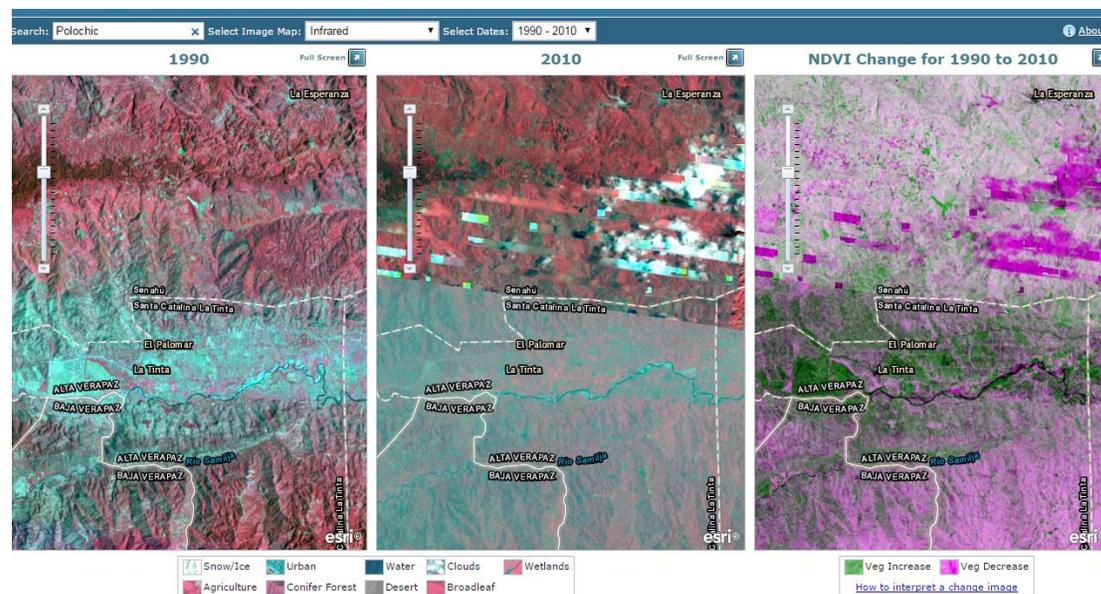


Figura 4. Cambios de cobertura forestal Cuenca Polochic

Fuente: Proceso a través de ChangeMatters, Esri.

La secuencia de imágenes muestra el período entre 1990 y 2010, dentro de los cambios más notorios, la disminución de cobertura boscosa en las zonas centro y sur, que corresponden a zonas montañosas. En orden de predominancia, las zonas aledañas al Municipio de Senahú (al norte), muestran más depredación, lo cual se puede deber a la mayor cantidad de finca cafetaleras y cardamomo, así como, el gran número de Comunidades rurales dispersas.

4.10 Río Polochic.

Es el rasgo geomorfológico más importante en la cuenca, con una trayectoria oeste-este y longitud de 194 km, atravesando la parte sur del Departamento de Alta Verapaz (incluye los Municipios de Tamahú, Tukurú, La Tinta y Panzós) y luego desemboca drena hacia el Lago de Izabal. Dentro de las vertientes está vertiente Sur de la Sierra de Chamá y vertiente norte de Sierra de Las Minas. Ver figura 5.

Es también una geoforma estructural que marca la zona de falla, con un desplazamiento sinistral anual alrededor de 8 mm, de lo que el Lago de Izabal forma una cuenca pull apart, la cual debe su origen al desplazamiento de las placas de Norteamérica y Caribe.

Hacia el río Polochic drenan quebradas tributarias en dirección norte-sur, lo que marca también la influencia estructural de la región. El margen oeste desde el Municipio de Tamahú se caracteriza por una trayectoria rectilínea, mientras que al llegar a los Municipios de La Tinta y Panzós adquiere una forma de meandros, lo que indica también la etapa senil de su trayecto, aproximadamente 20 km antes de desembocar en el Lago de Izabal.

En general, esta trayectoria se mantiene, lo que cambia temporalmente en época de lluvias, principalmente en las partes bajas del Valle. Esto se marcó durante el Huracán Mitch en Noviembre de 1998, en las áreas de meandros, donde estas formas se unieron entre sí por el exceso de agua. Gran parte del valle en la zona central fue cubierto por debris y sedimentos gruesos como resultado de la erosión de laderas.

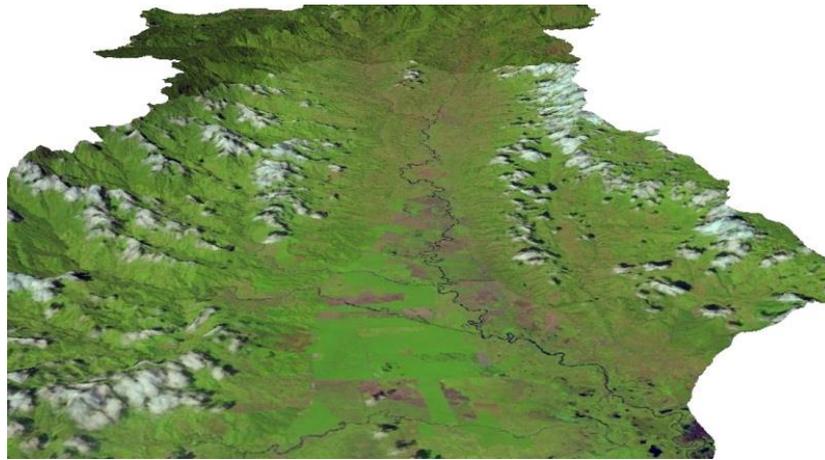


Figura 5. Meandros en Cuenca Polochic.

4.11 Evaluación de amenazas naturales

En relación a la evaluación de amenazas naturales, es importante considerar que la cuenca Polochic forma parte de una región vulnerable a la ocurrencia de deslizamientos e inundaciones. A su vez es una zona compleja, de lo cual es conveniente realizar el análisis por separado, tomando en cuenta la distribución espacial en las áreas que estas afectan.

La importancia de evaluar estos aspectos, redundan en establecer la ocurrencia de fenómenos naturales, principalmente ocasionados por el aumento de lluvias en la zona sur del Departamento de Alta Verapaz, que corresponde a la cuenca Polochic, con un área de 2,876 km². El enfoque principal redundan en identificar los sitios de amenazas por inundación,

tomando en cuenta que cada año esto crea grandes problemas a la población, que se refleja en el alto grado de destrucción que se puede alcanzar.

La razón en evaluar realizar dos tipos de análisis diferentes en esta región, se debe a la distribución espacial que el tipo de amenazas y los efectos que producen. A decir de las inundaciones, estas son focalizadas y ocupan las partes bajas del valle, y afectan los poblados que se localizan en los alrededores del río Polochic; mientras que los deslizamientos ocurren en las áreas donde hay pendientes altas y alto grado de deforestación, generalmente. Para ambos casos, el evento disparador comúnmente son las lluvias.

4.12 Inundaciones

A través de la obtención de información previa y datos de campo, el procesamiento de la información relacionada a inundaciones es dinámico y versátil en el manejo y proceso de información. Adicionalmente, la revisión de imágenes satelitales permite abarcar más extensión y con ello establecer prioridad a través de zonas que representen riesgo.

Así también, este el tipo de investigación requirió la obtención de datos climáticos y la consideración del relieve y geología. Esto permitió establecer la heterogeneidad en el uso de la tierra, crecimiento poblacional y el desarrollo comercial, principalmente en la implementación de campos de cultivo de caña de azúcar y palma africana.

La identificación de sitios de inundaciones se basó en la utilización de datos, los que se mencionan a continuación:

- Datos hidrometeorológicos
- Geología
- Red de drenaje
- Geomorfología
- Curvas de nivel
- Sensores remotos a través de la utilización de imágenes Landsat 8
- Ortofotos
- Sistemas de información geográfica
- Recorridos de campo

Las inundaciones se convierten en el tipo de amenazas naturales que pueden causar más impacto en la población, debido a que los daños son más perceptibles y tangibles. En general, para la cuenca Polochic, estas ocupan la zona correspondiente al valle, en los sitios poblados que se asientan en sitios aledaños al río Polochic, estos son: La Tinta y Panzós (que incluye a la aldea Telemán, la más grande de la región del valle.)

La visualización de la cuenca hidrográfica a través del DEM requirió el procesamiento y rectificación de imagen. Por medio de Arcgis 10.1 se realizó el proceso, iniciando por el llenado de la cuenca, es decir, que los vacíos de la imagen y/o terreno de interés quedaran cubiertos, principalmente en áreas montañosas y así facilitar la obtención de los flujos de dirección y acumulación.

La utilización de datos hidrometeorológicos adquirió papel importante, para lo cual la utilización de SIG, permitió identificar los escenarios de inundaciones a través del tiempo. Esto permitió también la estimación del nivel de impactos de acuerdo a la magnitud de eventos histórico; además, se realizó una diferenciación. Una característica en la región consiste en que las partes bajas del valle son las que a través del tiempo, lo cual se puede catalogar de riesgo moderado a alto, el resto de la cuenca corresponde a zonas montañosas que alcanzan elevaciones entre 1,500 msnm en la zona norte, mientras que en la zona sur (Sierra de Las Minas) alcanzan 2,000 msnm.

La época lluviosa empieza en el mes de Mayo, alcanzando entre 250-500 mm en los meses más lluviosos. Además, anualmente puede sobrepasar los 2,500 msnm, la distribución es casi uniforme a lo largo de la cuenca, por lo que, a decir de los niveles de aporte de agua y sedimentación de laderas alledañas.

De lo que respecta al valle Polochic, las zonas central y oriente son las más afectadas; esto incluye las poblaciones más grandes del área: La Tinta, Telemán y Panzós, además, de aldeas alledañas localizadas a lo largo de las márgenes del río Polochic. Esto simplifica sustancialmente el tipo de evaluación en virtud de focalizar la zona de interés hacia el sector central de la cuenca.

4.13 Crecimiento demográfico

El crecimiento demográfico es desordenado, el asentamiento de estos a lo largo del cauce del río Polochic es uno de los principales condicionantes hacia la población. No existen planes de ordenamiento territorial. No obstante, esto representa uno de los principales factores que inciden negativamente: la compra de las tierras más fértiles del valle Polochic motivó la siembra de palma africana y caña de azúcar, lo cual cambió drásticamente el uso de suelo y paisaje natural de la región.

En los últimos 20 años, el asentamiento de nuevas comunidades, se da en base a las necesidades que afrontan los campesinos; sobretodo, por el nivel de desplazamiento en busca de nuevas zonas para habitar.

A su vez, el desplazamiento ocasiona la invasión de tierras, así como, la destrucción sistemática de la calidad natural. De lo anterior, mientras no exista un tipo de inversión integral, el problema seguirá latente.

4.14 Modelamiento de la cuenca

La representación de un modelo orientado a definir las áreas susceptibles a inundaciones de la cuenca Polochic, se basa en el conocimiento de las características físico naturales, principalmente: Geología, relieve y datos climáticos.

Así también, el establecimiento de unidades geomorfológicas ayudó a establecer características relacionadas a eventos históricos. Más aún, esto puede predecir el rumbo de caudales de ríos y quebradas que pueden provocar inundaciones, lo puede ayudar a evitar la

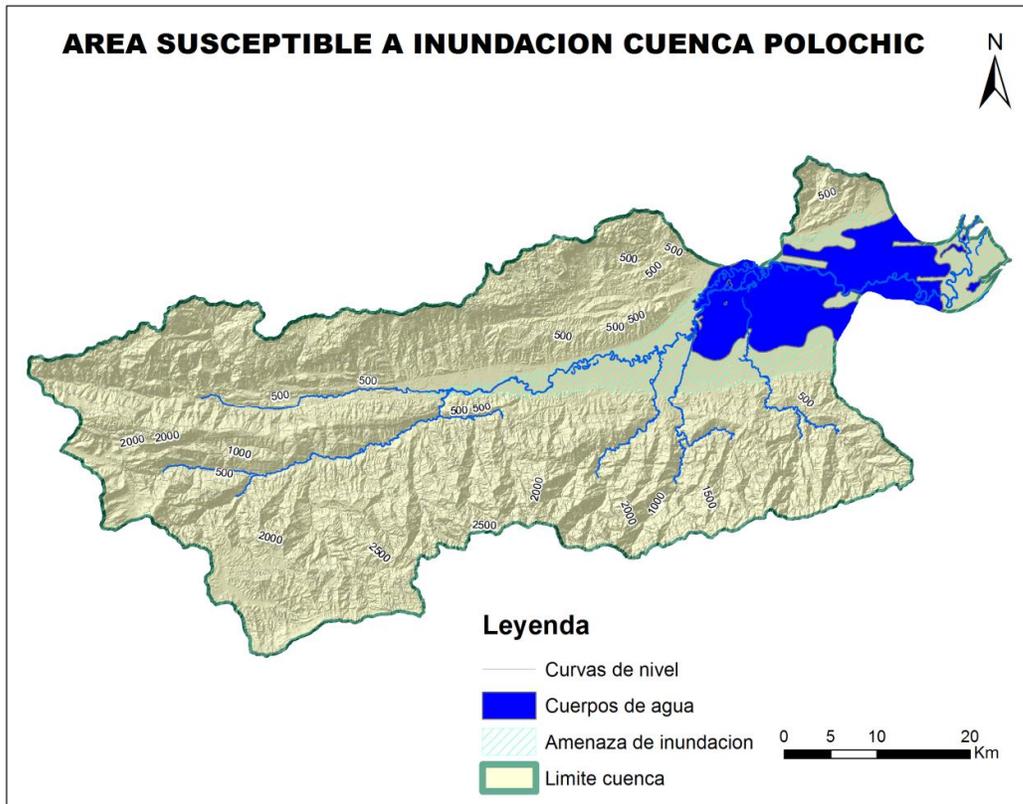
pérdida de vidas humanas y daños a la infraestructura, por lo que el análisis de la red de drenaje es también otro factor importante que se tomó en cuenta. De esto, los tributarios que se localizan al sur, en el área de Sierra de Las Minas, tienen más incidencia debido a que aquí existe más cantidad de precipitación.

Además, de acuerdo a los criterios establecidos, la conjunción de esta información permite el análisis para llegar a realizar el modelamiento de la zona, lo que a su vez se traduce en lograr la precisión necesaria para el establecimiento de parámetros que contribuyan sustancialmente en la aproximación más cercana que pueda ocurrir en la realidad.

Un enfoque de este tipo requiere también la comprensión de los factores naturales y antrópicos que intervienen en la evolución de una cuenca hidrográfica, además, considerar, la dinámica en la evolución terrestre y los cambios a través del tiempo.

La combinación de imágenes Landsat y DEM para el área de investigación resulta también en un método adecuado, debido a la extensión y falta de acceso a gran parte del área. La utilización de estas herramientas es de gran utilidad, además, la comparación con áreas aledañas en cuanto a la similitud o diferenciación en cuanto a las consecuencias que representan.

Por consiguiente, el uso de sensores remotos permite distinguir mediante la clasificación supervisada los sitios previamente afectados, lo que también puede orientarse al fortalecimiento de planes de ordenamiento territorial. El Mapa 9 muestra las áreas susceptibles a inundación en la cuenca Polochic.



Mapa 9. Área susceptible a inundación Cuenca Polochic

4.15 FOTOGRAFÍAS



Foto 1. Inundaciones en cultivos de maíz, zona central Valle Polochic, las pérdidas a pequeños agricultores son altas.



Foto 2. Puente que comunica a Sierra de Las Minas en Aldea Telemán.



Foto 3. Palma africana en la zona centro-oeste del Valle Polochic, el cambio de uso de suelo representa impactos irreversibles a la biodiversidad, además, se cambió por medio de maquinaria algunas partes del río Polochic.



Foto 4. La caña de azúcar es otro cultivo que causó impactos ambientales a la región, pone en riesgo áreas protegidas.



Foto 5. El Refugio de Vida Silvestre Bocas del Polochic, es un área protegida que se ubica al extremo este de la Cuenca, el factor antrópico influye considerablemente al reducir áreas ricas en biodiversidad. La pesca y ecoturismo son parte importante en la vida diaria de las personas



Foto 6. Las Bocas del Polochic es un ecosistema característico de la región.

5. CONCLUSIONES

La utilización de sistemas de información geográfica y sensores remotos, constituyen herramientas importantes para el análisis de varios factores relacionados a inundaciones: Uso actual de la tierra, altura topográfica, geomorfología y tipo de suelos. El análisis conjunto permite definir áreas de inundación y el nivel en que poblaciones aledañas son afectadas, a esto se agrega que las principales cabeceras municipales se localizan en áreas aledañas al río Polochic.

La obtención de datos de precipitaciones es de importancia para el cálculo de períodos de retorno para varios períodos de tiempo. De esto la mayor tasa de incidencia para inundaciones se refleja en 5, 10 y 15 años. Así también, durante períodos de lluvia, las inundaciones se generan a partir de 8 horas desde el inicio de estas.

El análisis de imágenes satelitales, permite identificar el cambio de uso de suelo, sobretodo en la planicie de inundación del Valle Polochic. La agricultura intensiva que inició en la última década devastó amplias áreas, por lo que los impactos ambientales son irreversibles.

Otra característica importante a considerar es la geodinámica regional, la zona está influenciada por el sistema de falla Chixoy-Polochic-Motagua, que se extiende desde el oeste de Guatemala. En la región esto se muestra a través del trazo casi rectilíneo del río Polochic, mientras al norte y sur se localizan las cadenas montañosas de Chamá y Sierra de Las Minas respectivamente

6. BIBLIOGRAFÍA

- Adams, M. (2013). *Global warming computers models collapse; Arctic sheets rapidly expands as a planet plunges into global cooling*. Recuperado el 8 de Marzo de 2015, de www.academia.edu: www.academia.edu
- Alcantara, I. (1999). *Landslides: ¿ Deslizamientos o movimientos del terreno ? Definición, clasificaciones o terminología*. Cambridge. 19 p.: Massachussets Institute of Technology. Department of Environmental Engineering.
- Alfaro, W; Rivera, L. (2008). *Cambio climático en Mesoamérica: Temas para la creación de capacidades y la reducción de vulnerabilidad*. Guatemala: The International Development Center, Department of International Deveppment.
- Barillas, E. (2012). *Historia y ocurrencia de los deslizamientos generados por lluvia en Guatemala, Centro América*. Obtenido el 9 de Marzo de 2015, de <http://www.geociencias.com.gt/publi.php>.
- Barillas, M.; Van Westen, C.; Orozco, E.; Thonon, I.; Lira, E.; Peters, G.; Tax, P. (2003). *Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián, Retalhuleu, Guatemala*. Guatemala: GEOS. Pag. 17-24.
- Bello, I.; Ogedegbe, S. (2015). *Geospatial analysis of flood problems in Jimeta riverine community of Adamawa State, Nigeria*. Journal of Environment and Earth Science. Pag. 32.45.
- Buch, M. (2001). *Evaluación del riesgo a desluzamientos en la subcuenca Matanzas, río Polochic, Guatemala*. Turrialba, Costa Rica: Tesis Maestría en Cuencas Hidrográficas Escuela de Posgraduados, CATIE.
- Buckman, R.; et. al. (2001). *Deslizamientos de tierra inducidos por el huracán Mitch en Guatemala*. Denver Colorado. 43 p.: U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.
- Burkett, V. et. al. (2013). *U.S. Geological Survey Climate and Land Use Change Strategy - A frame work for understandandng and responding to global change*. Reston Virginia. 56 p.: U.S. Geological Survey.

- Caloiero, T.; Petrucci, O. . (2014). *The impact of damaging hidrogeological events on urbanised sectors: The case of 19th November 2013 in Catanzaro, Italy*. Porto, Portugal: 3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceeding.
- Carrera, J.; Mendez, W.; Rivas, L. (2013). *Modelaje hidrológico para eventos de inundaciones en la planicie de desborde del río Patanemo, Estado Carabobo, Venezuela*. Venezuela: Revista de Investigación, No. 80. Septiembre-Diciembre.
- Cavan, G. (2012). *Spatial modelling and web gis tools for climate change adaptation planning in urban areas*. Manchester. 27 p: School of environment and adaptation.
- Chaglia, L. (2014). *Estructuración de una plataforma de acceso a datos georeferenciados para la gestión de riesgos en Ecuador*. 135 p. Ecuador: Tesis Maestría en Sistemas de Información Geográfica, Colegio de Posgrados, Universidad San Francisco de Quito.
- Chandra, D.; Blaschke, T. (2013). *Spatial vulnerability assessment of floods in the coastal regions of Bangladesh*. Geomatics, natural hazards and risks. 25 p.
- Coe, J.; et. al. (2004). *Landslide susceptibility from topography in Guatemala*. London, 10 p.: Taylor and Francis Group, ISBN.
- Cruz, G. (2014). *Análisis de la capacidad del uso de las tierras y propuesta de ordenamiento territorial del Cantón Santa Elena, Provincia de Santa Elena, Ecuador*. Ecuador, 75 p.: Tesis Maestría en Sistemas de Información Geográfica, Colegio de Posgrados, Universidad San Francisco de Quito.
- Cruz, J. D. (1982). *Clasificación de zonas de vida de Guatemala a nivel de reconocimiento*. Guatemala. 29 p.: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Instituto Nacional Forestal.
- Damayanti, F. (2014). *Hydrodynamic modelling for flood hazard assessment in Telomoyo Catchment*. Holland. 85 p.: Thesis. Faculty of Geoinformation Science and Earth Observation, University of Twente.
- Damayanti, F. (2011). *Hidrodinamic modelling for flood hazard assessment in Telomoyo Catchment, Central Java, Indonesia*. Holland. 85 p.: Thesis, Double Degree Program, Gadjadara University and Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente.
- Dar, J.; Dubey, R. (2013). *Deformation and neotectonics of Sub-Himalaya of Kashmir Valley, India: A Remote Sensing and GIS Approach*. India: Department of Applied Geology, Indian School of Mines. International Journal of Earth Sciences and Engineering. 7 p.

- Dardon, A. (2011). *Aplicación de SIG al ordenamiento territorial para la gestión de riesgo, por tormentas tropicales*. Guatemala. 40 p.: Especialización en Sistemas de Información Geográfica, Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- De Cubber, G.; Balta, H.; Doroftei, D.; Baudoin, Y. (2014). *UAS deployment and data processing during Balkans flooding*. Bruselas, Bélgica.: Royal Military Academy, Department of Mechanics.
- Dewan, A., et. al. (2007). *Deliniating flood risk areas in Greater Dhaka of Bangladesh using geoinformatics*. ISSN.
- Donnelly, T., & al., e. (1990). *Northern Central America; The Maya and Chortis Blocks*. 39 p.: The Geological Society of America.
- El-Magded, A. (2014). *Applyng geographical information systems and remote sensing to evaluate flash flood hazards: Eastern side of Qena Bend, Nile Valley, Egypt. (Resume)*. Salzburg. 126 p.: Thesis Ms. Sc. UNIGIS, Salzburg University.
- Fernandez, D., Lutz, M. (2010). *Urban flood hazard zoning in Tucuman Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis*. Engineering Geology.
- Fernandez, D.; Lutz, M. (2009). *Urban flood hazard zoning in Tucuman Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis*. Pag. 90-98: Engineering Geology.
- Ghosh, S.; Mistri, B. . (2015). *Geographic concerns on flood climate and flood hidrology in monsoon dominated Damodar River Basin, Eastern India*. India: Geographical Journal.
- Haboninama, H. (2014). *Integrated flood modelling in Lubigi Catchment, Kampala*. Holland. 60 p.: Thesis, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente.
- Hall, J.; et.al. (2015). *A European Flood Database : facilitating comprehensive flood research beyond administrative boundaries*. Viena, Austria.: International Associations of Hidrological Sciences.
- Hosen, S. (2014). *Climate change impact in Bangladesh: Environment and Biodiversity*. Obtenido el 6 de Marzo de 2015, de www.academia.edu: https://www.academia.edu/9878505/Climate_Change_Impact_in_Bangladesh_Environment_and_Biodiversity. 24 p

- Hughett, R. (Fundamentals of Geomorphology). 2007. Ed. Taylor & Francis. 483 p.
- IARNA, & URL. (2011). *Cambio Climático y biodiversidad, elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico*. Guatemala. 114 p.: Universidad Rafael Landívar.
- Islam, M; Sado, K. (2009). *Development of flood hazard maps of Bangladesh using NOAA-AVHRR images with GIS*. Hidrological Sciences Journal. 20 p.
- Jebur, M., et.al. (2014). *Manifestation of Lidar-Derived Parameters in the spatial predictions of landslides using novel ensemble evidential belief functions and support vector machine models in GIS*. Obtenido el 10 de Marzo de 2015, de www.academia.edu: https://www.academia.edu/11332176/Spatial_modelling_and_web-GIS_tools_for_climate_change_adaptation_planning_in_urban_areas
- Khan, S.; et.al. (2009). *Climate change, clima variability and Indian agriculture: Impacts vulnerability and adaptation strategies*. Obtenido el 25 de Febrero de 2015, de www.academia.edu: https://www.academia.edu/10367227/Climate_Change_Climate_Variability_and_Indian_Agriculture_Impacts_Vulnerability_and_Adaptation_Strategies
- Kourgialas, N.; Karatzas, G. (2011). *Flood management and a GIS modelling to assess flood-hazard areas - a case study*. Hidrol. Sci. 15 p.
- Lazo, J. (2014). *Sistema de información geográfica orientado a un plan de ordenamiento territorial con enfoque al sistema físico-ambiental*. Ecuador. 88 p.: Tesis Maestría en Sistemas de Información Geográfica, Colegio de Posgrados, Universidad San Francisco de Quito.
- Loan, H., Masatomo, U. (2011). *Micro landform classification and flood hazard assesmentof the Thun Bon alluvial plain, central Vietnam via an integrated method utilizing remotely sensed data*. Elsevier, Applied Geography.
- Loarte, G. (2013). *Determinación de zonas susceptibles a movimientos en masa por factores condicionantes y desencadenantes en la parroquia Lloa, del canto Quito de la provincia de Pichincha*. 100 p. Ecuador: Tesis Maestría en Sistemas de Información Geográfica. UNIGIS, Universidad San Francisco de Quito.
- LYON-CAEN, H.; et. al. (2006). *Kynematics of the North American-Caribbean-Cocos plates in Central America from new GPS measurements across the Polochic-Motagua fault system*. 5 p.: Geophysical Research Letters.

- Machorro, R. (2005). *Evaluación hidrogeológica de Alta Verapaz*. Guatemala. 88 p.: CONCYT.
- MAGA. (2000). *Primera aproximación taxonómica al mapa de clasificación de suelos de la República de Guatemala a escala 1:250,000*. Guatemala. 48 p.
- MARN. (2009). *Política Nacional de Cambio Climático*. Guatemala. 26 p.: The Nature Conservancy.
- Merino, Z. (2013). *Análisis, diagnóstico y planificación sociodemográfico del sistema territorial de la provincia de los Ríos, con el uso de herramientas SIG y de estadística espacial*. Quito, Ecuador. 91 p. : Tesis Maestría en Sistemas de Información Geográfica Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Postgraduados.
- Mialhe, F.; al, et. (10 de Noviembre de 2014). *Monitoring land use change by combining participatory land-use maps with standar remote sensing techniques: showcase from a remote forest catchment on Mindanao, Philippines*. Obtenido el 19 de Junio de 2015, de www.elsevier.com/locate/jag
- Onywere, S.; Getenga, Z.; Mwakalila, S.; Twesigye, C.; Nakarinda, J. (2011). *Assessing the challenge of settlement in Budalangi and Yala swamp area in western Kenya using Landsat Satellite Imagery*. Kenya: The Open Environmental Engineering Journal.
- R, M.; et. al. (2013). *Biodiversity Conservation in a Changing Climate: A review of Threats and Implications for conservations planning in Myanmar*. Journal of the Human Environment. Pag. 789-804.
- Santillan, J.; Makinano-Santillan, M. (2015). *Combining geoespatial data and numerical models to map and differentiate flooding extents caused by two tropical storms in the Philipinnes*. Singapore: 13th South East Asian Survey Congress.
- SEGEPLAN. (2006). *Obras necesarias para estabilizar las cuencas de mayor riesgo afectadas por la Tormenta Stan, Parte I*. Guatemala. 33 p.
- Tehrany, M.; Pradhan, B.; Jebur, M. (2013). *Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS*. Malasya. 11p.: Journal of Hidrology.
- Tingsanchli, T, T.; Karim, F. (2010). *Flood hazard assessment and risk base zoning of a tropical flood plain: case study of the Yom River, Thailand*. London. 18 p.: Hidrological Sciences Journal.
- Van Der Knijff, J.; Younis, P.; De Roo, P. (2010). *LISFLOOD: A GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation*. Holanda: International journal of Geographical Information Science.

- Van Westen, C. (2000). *The modelling of landslides hazards using GIS*. Obtenido el 25 Marzo de 2015, de
<file:///C:/Users/GEOAMBIENTE/Downloads/2000%20Surveys%20Geophysics%2021%20VanWesten.pdf>
- Van Westen, C. (2011). *Remote Sensing and GIS for Natural Hazards, Assesstment and Disaster Risk Management*. Holland. 61 p: Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC) University of Twente.
- Vinod, P.; Menen, A; Ajin, R. (2013). *Deliniation of flood areas in Achankovil River Basin, Kerala, using GIS and Remote Sensing approach*. Obtenido el 5 de Marzo de 2015, de www.academia.edu:
https://www.academia.edu/11034373/DELINEATION_OF_FLOOD_HAZARD_AREAS_IN_ACHANKOVIL_RIVER_BASIN_KERALA_USING_GIS_AND_REMOTE_SENSING_APPROACH