



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE
ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN GESTIÓN PARA LA REDUCCIÓN Y GESTIÓN DE RIESGO

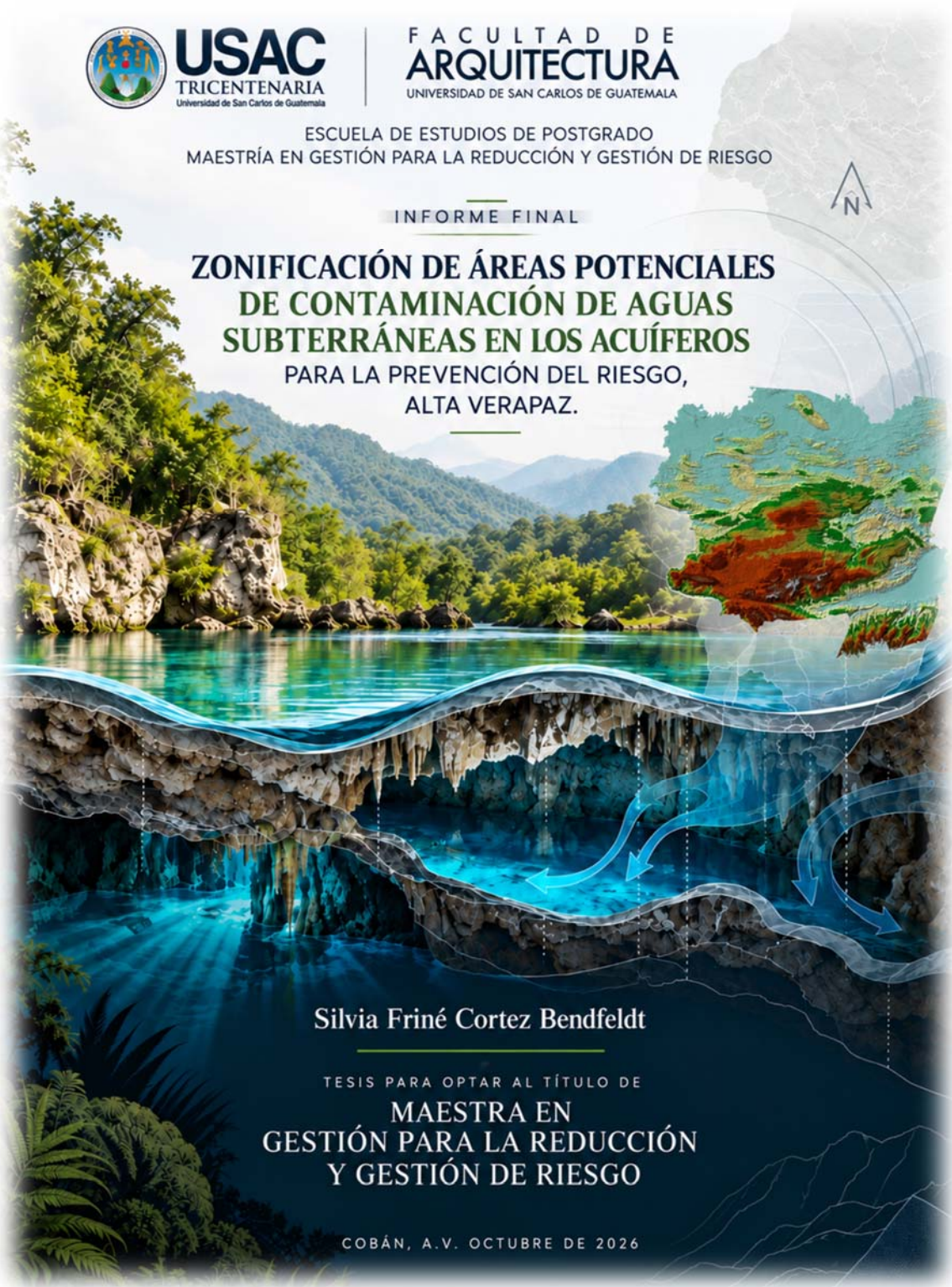
INFORME FINAL

**ZONIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES
DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN LOS ACUÍFEROS
PARA LA PREVENCIÓN DEL RIESGO,
ALTA VERAPAZ.**

Silvia Friné Cortez Bendfeldt

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE
**MAESTRA EN
GESTIÓN PARA LA REDUCCIÓN
Y GESTIÓN DE RIESGO**

COBÁN, A.V. OCTUBRE DE 2026





FACULTAD DE
ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE ARQUITECTURA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN GESTIÓN PARA LA REDUCCIÓN Y GESTIÓN DE RIESGO

**ZONIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN LOS ACUÍFEROS PARA LA PREVENCIÓN DEL RIESGO, ALTA
VERAPAZ**



Presentada por:
Silvia Friné Cortez Bendfeldt
Para optar al título de:
MAESTRÍA EN CIENCIAS
GESTIÓN PARA LA REDUCCIÓN Y GESTIÓN DE RIESGO



FACULTAD DE
ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE ARQUITECTURA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN GESTIÓN PARA LA REDUCCIÓN Y GESTIÓN DE RIESGO**

**ZONIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN LOS ACUÍFEROS PARA LA PREVENCIÓN DEL RIESGO, ALTA
VERAPAZ**

Presentada por:
Silvia Friné Cortéz Bendfeldt
Para optar al título de:
**MAESTRÍA EN CIENCIAS
GESTIÓN PARA LA REDUCCIÓN Y GESTIÓN DE RIESGO**

Guatemala, octubre de 2026

Me reservo los derechos de autor haciéndome responsable de las doctrinas sustentadas, originalidad y contenido del trabajo final de maestría, eximiendo de cualquier responsabilidad a la Facultad de Arquitectura de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Arquitectura
Escuela de Estudios de Postgrado

M. A. Walter Ramiro Mazariegos Biolis
RECTOR

JUNTA DIRECTIVA

Arq. Sergio Francisco Castillo Bonini	Decano
Lcda. Ilma Judith Prado Duque	Vocal II
Arq. Mayra Jeanett Díaz Barillas	Vocal III
Br. Oscar Alejandro La Guardia Arriola	Vocal IV
Br. Laura del Carmen Berganza Pérez	Vocal V
Dr. Arq. Francisco Ronaldo Herrarte Gonzalez	Secretario Académico

TRIBUNAL EXAMINADOR

Arq. Sergio Francisco Castillo Bonini	Decano
Dr. Arq. Francisco Ronaldo Herrarte Gonzalez	Secretario
M.Sc. Ing.Agr. Edin Alejandro Gil Esturban	Examinador
M. Sc. Dafne Adriana Acevedo Quintanilla	Examinadora

ACTO QUE DEDICO A

Dios

Sin el cual nada de lo hacemos es posible.

Mis padres

Por el apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida.

Mis hermanas

En especial a Leslie, sin su ayuda no podría haber concluido esta etapa.

Mis hijos

Silvia y Werner, porque siempre han estado para apoyarme, son la razón de todo en mi vida.

Mi nieta

Emma Victoria, por ser la alegría de mi vida.

Mis amigos

Francisco, Fernando y Osmin, por apoyarme, sin sus consejos no estaría culminando este proyecto.

La Escuela de Posgrados

Por el apoyo en todo el proceso, en especial a mi asesor y a la coordinadora de Posgrados.

La Universidad de San Carlos de Guatemala

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO	4
1. MARCO TEÓRICO	28
1.1 SITUACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ	28
1.1.1 <i>Situación social y ambiental del departamento de Alta Verapaz</i>	28
1.1.2 <i>Contexto socioeconómico</i>	29
1.1.3 <i>Acceso al agua potable y saneamiento</i>	29
1.1.4 <i>Contaminación ambiental</i>	30
1.1.5 <i>Implicaciones sociales y ambientales</i>	30
1.2 SITUACIÓN GEOLÓGICA Y CLIMÁTICA DE ALTA VERAPAZ	31
1.2.1 <i>Geología</i>	31
1.2.2 <i>Condiciones climáticas</i>	32
1.2.3 <i>Relieve</i>	33
1.2.4 <i>Hidrología de Alta Verapaz</i>	33
1.2.5 <i>Vegetación</i>	33
1.2.6 <i>Morfología kárstica</i>	34
1.2.7 <i>Suelo</i>	34
2. DISEÑO METODOLÓGICO	35
2.1 METODOLOGÍA	35
2.2 MÉTODOS.....	35
2.3 TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	36
2.4 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	36
2.4.1 <i>Etapa de recopilación bibliográfica</i>	36
2.4.2 <i>Creación y análisis de mapas</i>	39
2.4.3 <i>Delimitación de las zonas de riesgo</i>	42
2.4.4 <i>Delimitación de las zonas kársticas</i>	43
2.4.5 <i>Establecimiento de los sistemas de flujo</i>	43
2.4.6 <i>Delimitación de las zonas pobladas</i>	43
2.4.7 <i>Establecimiento de las bases para la delimitación de la contaminación potencial del agua subterránea</i> 44	
2.4.8 <i>Establecimiento de las bases para la protección de los acuíferos kársticos</i>	44
3. RESULTADOS	45
3.1 MAPAS TEMÁTICOS	45
3.1.1 <i>Mapa de facto O. función protectora</i>	45
3.1.2 <i>Mapa de proceso de flujo dominante</i>	52
3.1.3 <i>Delimitación de zonas kársticas</i>	56
3.1.4 <i>Definición de sistemas de flujo</i>	59
3.2 DELIMITACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POTENCIAL DEL AGUA SUBTERRÁNEA	61
3.3 DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS POBLADAS	64
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	67
CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES	74

BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXOS.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clase textural del suelo.....	46
Tabla: 2 Flujo de concentración C.....	59
Tabla 3 Factor O	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Delimitación espacial del área de estudio.....	6
Figura 2 Esquema endokarst y exokarst, según aistemas kársticos en carbonatos y evaporitas de la península Ibérica y Baleares.....	18
Figura 3 Ciclo del gua y sus distintas formas y relaciones, Tomado de Los Acuíferos de la provincia de Segovia.....	21
Figura 4 Esquema metodológico	38
Figura 5 Metodología para aplicar.....	39
Figura 6 Metodología propuesta para el mapeo riesgo contaminación de aguas subterráneas	42
Figura 7 Mapa clasificación textural de suelos.....	47
Figura 8 Mapa de espesores de suelos	49
Figura 9 Mapa de factor O	51
Figura 10 Mapa de tipos de flujo factor C	55
Figura 11 Mapa de formaciones kárstica	57
Figura 12 Mapa de zonas del componente C	58
Figura 13 Mapa de concentración de flujo componente C	60
Figura 14 Mapa de vulnerabilidad de la contaminación.....	63
Figura 15 Mapa de riesgos de la vulnerabilidad a la contaminación.....	65

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea constituye uno de los recursos naturales estratégicos para el abastecimiento de agua potable, la producción agrícola, las actividades económicas y el mantenimiento de los ecosistemas. En el departamento de Alta Verapaz, aproximadamente el 70 % del territorio está conformado por rocas carbonatadas, las cuales favorecen el desarrollo de acuíferos kársticos caracterizados por una elevada permeabilidad secundaria, abundantes fracturas, conductos de disolución y dolinas que permiten una rápida infiltración del agua hacia el subsuelo. Debido a estas características hidrogeológicas, dichos acuíferos presentan una capacidad limitada para atenuar contaminantes, por lo que cualquier alteración en la superficie puede afectar directamente la calidad del agua subterránea. La presente investigación se desarrolló mediante análisis espacial en un Sistema de Información Geográfica (SIG) a escala 1:50 000, utilizando información geológica, geomorfológica e hidrológica disponible para el departamento de Alta Verapaz.

Alta Verapaz constituye uno de los departamentos con mayor disponibilidad de agua subterránea del país y, al mismo tiempo, uno de los que presenta mayores índices de pobreza y menor cobertura de servicios básicos. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2018), el departamento cuenta con una población superior a 1.3 millones de habitantes, distribuida mayoritariamente en áreas rurales y perteneciente principalmente a los pueblos mayas q'eqchi' y poqomchi'. Paralelamente, los indicadores de acceso a servicios de saneamiento continúan siendo limitados, situación que favorece la disposición inadecuada de residuos sólidos y aguas residuales sobre un territorio altamente vulnerable desde el punto de vista hidrogeológico. Estas condiciones incrementan el riesgo de contaminación de las fuentes de agua subterránea y representan una amenaza para la salud pública, la seguridad hídrica y el desarrollo sostenible de la región.

En los acuíferos kársticos, el agua superficial puede infiltrarse rápidamente a través de fracturas, sumideros y dolinas, reduciendo significativamente los procesos naturales de filtración que normalmente ocurren en otros tipos de acuíferos. En consecuencia, la

expansión de los centros poblados, el crecimiento de la frontera agrícola, el establecimiento de actividades industriales y comerciales, así como el manejo inadecuado de residuos sólidos y líquidos, constituyen fuentes potenciales de contaminación cuya influencia depende directamente de la vulnerabilidad natural del medio geológico.

En este contexto, la identificación y zonificación de las áreas con mayor vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas constituye una herramienta indispensable para el ordenamiento territorial, ya que permite orientar la planificación del uso del suelo, priorizar acciones de protección y fortalecer la gestión integrada del recurso hídrico mediante criterios científicos y espaciales.

La presente investigación tuvo como objetivo zonificar las áreas con potencial de contaminación de aguas subterráneas en los acuíferos kársticos del departamento de Alta Verapaz, mediante la aplicación de la metodología COST Action 620, desarrollada por la Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología (COST), utilizando Sistemas de Información Geográfica como herramienta principal para integrar y analizar variables hidrogeológicas, geomorfológicas y edáficas relacionadas con la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

El análisis incorporó información geológica, cartografía de dolinas, modelos digitales de elevación, cobertura edáfica y análisis de concentración de flujo. La metodología COST 620 permitió evaluar los factores O (Overlying Layers), correspondientes a la capacidad protectora de las capas suprayacentes, y C (Concentration of Flow), relacionado con la concentración del flujo superficial hacia puntos preferenciales de infiltración, integrando posteriormente ambos parámetros mediante álgebra de mapas para generar la zonificación de vulnerabilidad.

La hipótesis que orientó la investigación establece que las áreas con mayor densidad de dolinas, elevada concentración de flujo, predominio de formaciones carbonatadas y menor capacidad protectora del suelo corresponden a los sectores con vulnerabilidad extrema a la contaminación de los acuíferos kársticos, mientras que las zonas con menor

desarrollo de rasgos kársticos y mayor capacidad de protección natural presentan niveles inferiores de vulnerabilidad.

Como resultado del análisis espacial se delimitaron tres categorías principales de vulnerabilidad: extrema, alta y media, las cuales constituyen una representación de la susceptibilidad natural de los acuíferos frente al ingreso de contaminantes desde la superficie. Estos resultados proporcionan una base científica para fortalecer los procesos de planificación territorial, apoyar la gestión sostenible del recurso hídrico y orientar futuras investigaciones dirigidas a la evaluación del riesgo, mediante la incorporación de información sobre fuentes específicas de contaminación y monitoreo de la calidad del agua.

PLANTEAMIENTO

A. Tema, subtema y objeto de la investigación

a) Tema de investigación

Zonificación de áreas potenciales de contaminación de aguas subterráneas en los acuíferos kárstico de mediante sistemas de información geográfica en Alta Verapaz para la prevención de riesgo.

b) Subtemas

Se describen a continuación los subtemas definidos que sirvieron en el desarrollo de la investigación

- **Hidrogeología kárstica:** estudio de la estructura y comportamiento de los acuíferos formados en roca caliza
- **Contaminación de acuíferos:** identificar las formas de la contaminación
- **Evaluación de vulnerabilidad:** (COP COST620): aplicación del método COP (C: flujo concentrado; O: capa de cobertura, P: Precipitación efectiva) para evaluar el riesgo de manera resumida adaptado algunos parámetros por la escasa información
- **Sistemas de Información Geográfica: (SIG):** herramienta para la recopilación, análisis y visualización de datos espaciales.

c) Objeto de estudio

Los acuíferos kársticos del departamento de Alta Verapaz y su susceptibilidad a la contaminación evaluados mediante el modelo resumido COP de la metodología COST 620.

Específicamente, se enfoca en identificar y zonificar las áreas con potencial de contaminación para orientar ordenamiento territorial y protección del recurso hídrico.

Dentro del departamento de Alta Verapaz, Guatemala se localizan rocas calizas, que tienden a tener una morfología definida y problemas específicos que son poco conocidos en el área, como los son dolinas, hundimientos, introducción directa del agua superficial al subsuelo, etc.

El escaso conocimiento de los sistemas kársticos se traduce en un mal uso de las áreas, aceleración de la contaminación derivada de los núcleos humanos y la falta de la delimitación de zonas, que, por sus características, pueden convertirse en fuentes de contaminación de aguas subterráneas.

B. Delimitación

Se consideraron tres aspectos específicos que ayudaron a delimitar el problema los cuales se describen a continuación

a) Delimitación espacio físico geográfico

El departamento de Alta Verapaz está ubicado al norte de Guatemala, a unos 200 km de la Ciudad de Guatemala. Limita al norte con Petén; al este con Izabal; al sur con Zacapa, El Progreso y Baja Verapaz; y al oeste con Quiché. Su cabecera es Cobán¹.

¹ Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia. (2011). *Plan de Desarrollo Departamental Alta Verapaz 2011–2025*. Gobierno de Guatemala

Localización del área de estudio

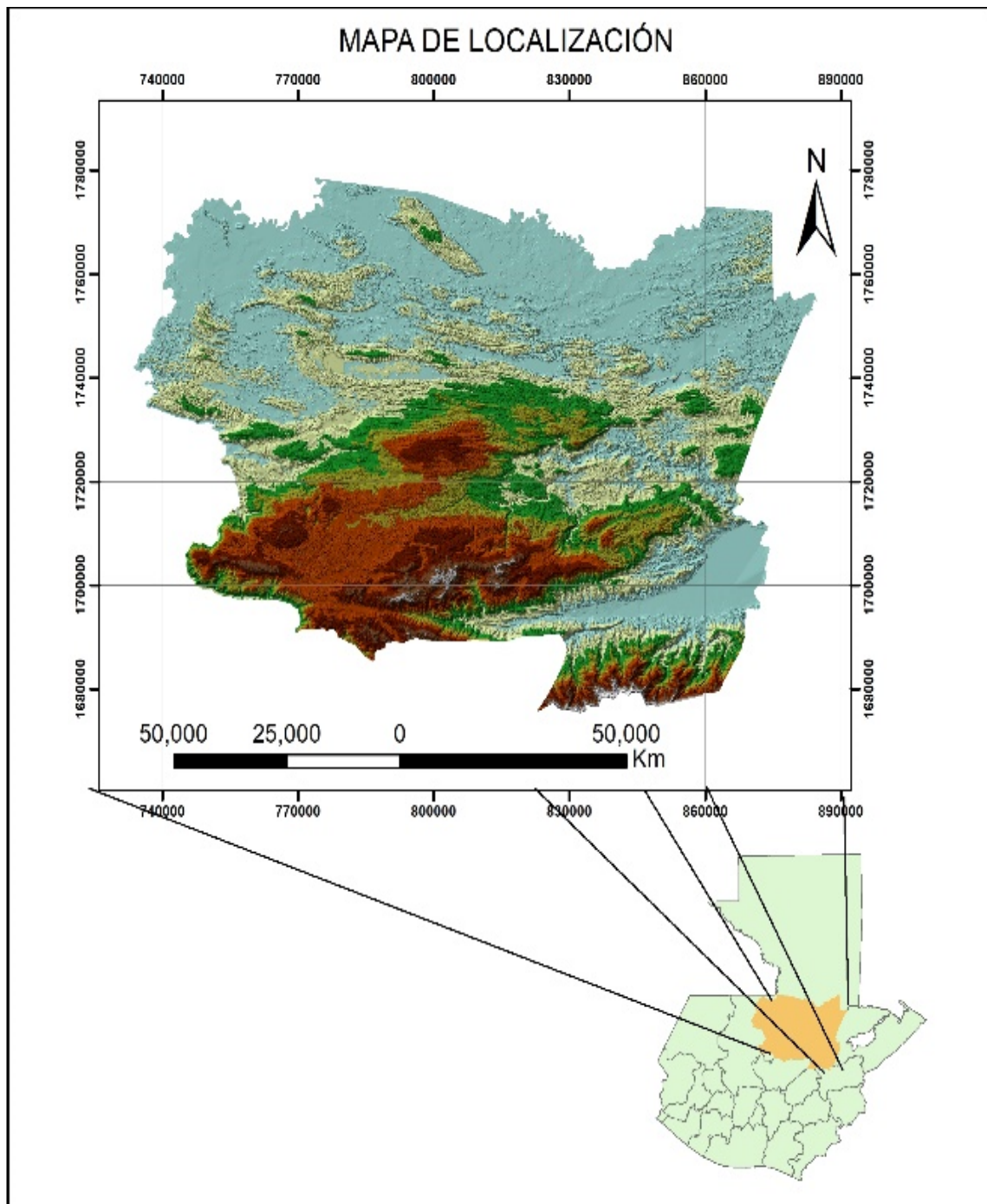


Figura 1. Delimitación espacial del área de estudio

Fuente: Modificado de datos del MAGA 1985, proyección NAD 27 zona 15

b) Delimitación temporal

El análisis se hizo con información de hojas cartográficas publicadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de 1968², año de donde se obtendrá la localización de las áreas kársticas hasta la actualidad. La variación o la obtención de una base cartográfica más fina o actualizada en años futuros podrá variar en algunos puntos los límites de la zonificación.

c) Delimitación semántica

A pesar de que existe un sinnúmero de riesgos a investigar en el área, como lo son inundaciones, deslizamientos e incendios, esta investigación se enfocará en la delimitación de zonas por riesgo de contaminación de aguas subterráneas debidas a acuíferos kársticos.

La investigación se centra en sistemas hidrogeológicos desarrollados en rocas carbonatadas, principalmente calizas, las cuales presentan alta susceptibilidad a procesos de disolución química. El proceso de disolución de las rocas carbonatadas origina un relieve kárstico caracterizado por la presencia de dolinas, sumideros, cuevas y conductos subterráneos. En la región del Cuadrángulo Cobán, ubicada en el sur de Alta Verapaz, aproximadamente el 80 % del área estudiada corresponde a karst de tipo cónico, mientras que el resto está conformado por karst en torres³.

Las corrientes de agua se infiltran directamente en el subsuelo, dejando los procesos naturales de filtración sin efecto, por lo que la transmisión de contaminante se hace más directa e importante en estas zonas, por lo que los contaminantes viajan más rápido y de manera más concentrada a las fuentes de agua.

C. Título y subtítulo

a) Título

Zonificación de áreas potenciales de contaminación de aguas subterráneas en los

² --Instituto Geográfico Nacional 1968 Hojas topográficas de Alta Verapaz. Esc 150,000. color

³ Chiquín, L., & Machorro, R. (2003). *Caracterización geológica del karst en la porción sur de Alta Verapaz, Guatemala*. Boletín Informativo de la Comisión de Geoespeleología, Federación Espeleológica de América Latina y del Caribe (FEALC).

acuíferos kársticos del departamento de Alta Verapaz utilizando sistemas de información geográfica para la prevención del riesgo.

b) Subtítulo

Aplicación de la metodología modificada COST620 y sistemas de información geográficas para la evaluación de la vulnerabilidad hídrica.

D. Antecedentes

La temática principal de esta investigación ha sido estudiada en publicaciones anteriores, la mayoría por la carrera de Geología del Centro Universitario del Norte (CUNOR), los cuales se citan a continuación.

Se han realizado tres investigaciones de tesis de grado sobre la metodología de vulnerabilidad intrínseca en acuíferos kárstico que involucra Epikarst (E), cubierta protectora (P), condiciones de infiltración (I) e red kárstica (K) EPIK en Alta Verapaz: dos de ellos en el año 2015, siendo en el casco urbano y alrededores de Cobán, por **Sergio Solares** y en Santa Cruz Verapaz, por **Andrea Reiche**. El tercero, fue llevado a cabo en el año 2017, en San Juan Chamelco, por **Luis Toc**, trabajos realizados que identifican sectores con alta vulnerabilidad de contaminación intrínseca de acuíferos.

Chiquin, Luis G. en su publicación *Caracterización geológica del Karst Cuadrángulo Cobán a escala 1:5000 (2003)*, en donde se delimitaron por primera vez las regiones kársticas en la zona norte del país.

CODEDUR (Consejo de Desarrollo Urbano y Rural GTZ), *Plan marco de desarrollo del departamento de Alta Verapaz (1996)*, donde se hizo una descripción general de las condiciones territoriales existentes, además de presentar algunos datos de contaminación ambiental de agua y suelo.

Chavarría, L (2019) realizó una investigación con el nombre *Vulnerabilidad intrínseca de acuíferos kársticos en un área de 16 km², en los alrededores de las aldeas Chicuxab, Tontem y Tres Cruces, Cobán, A.V.*, el cual, así como los anteriores se trata de una metodología a menor escala que identifica parámetros diferentes, el propósito de este trabajo es definir áreas más grandes.

Informes de Ejercicio Profesional Supervisado, de la carrera de Geología, realizados en los cuadrángulos Chisec, Fray Bartolomé de Las Casas, Campur, Sesajal, Chahal, Cahabón, Boloncó y Raxujá, que llevan por nombre de la caracterización geológica del karst a escala 1: 50,000, en el año 2002, que sirven de base para la delimitación del karst en la región.

Ramos, B, en los documentos *Evaluación hidrogeomorfológica de la vertiente del Golfo de México en el departamento de Alta Verapaz* (2004); Coy, B., *Evaluación hidrogeomorfológica de la vertiente del Pacífico en el departamento de Alta Verapaz* del mismo año, se delimita a mayor escala el porcentaje de superficie kárstica en estas vertientes.

Mollinedo, N, en el documento *Caracterización geológica del karst en los cuadrángulos, Caquiepec y Senahú, Alta Verapaz* (2005), se define y delimita las zonas kársticas en dos hojas topográficas que forman parte del departamento de Alta Verapaz.

Según un estudio de Pérez et al. (2017), las formaciones calizas de la región presentan características ideales para la formación de acuíferos kársticos, que son altamente productivos, extremadamente vulnerables a la contaminación debido a la infiltración del agua a través de grietas. Estos estudios han identificado la importancia de las zonas kársticas para gestionar adecuadamente los recursos hídricos subterráneos.

Mendoza y López (2019) en la región del Petén, aborda, cómo las prácticas agrícolas y la falta de infraestructura de saneamiento son factores que incrementan el riesgo de contaminación de los acuíferos, como se da en Alta Verapaz, manera indiscriminada, no se

toma en cuenta la posibilidad de contaminación debido a sistemas kársticos.

La metodología **COST Action 620** continúa siendo uno de los principales referentes internacionales para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación en acuíferos kársticos. Su principal aporte consiste en establecer un marco metodológico que integra la vulnerabilidad intrínseca del acuífero con la identificación de fuentes potenciales de contaminación (hazards), permitiendo elaborar mapas de riesgo mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica y álgebra de mapas. Aunque fue desarrollada por la Comisión Europea en 2002, su enfoque continúa utilizándose y adaptándose en investigaciones recientes debido a su flexibilidad para incorporar diferentes métodos de evaluación y variables hidrogeológicas

Moreno-Gómez y colaboradores desarrollaron la metodología **Integrated Karst Aquifer Vulnerability (IKAV)**, la cual surge del análisis comparativo de diversos métodos de vulnerabilidad, incluyendo COST 620. Los autores emplearon geoprocésamiento, álgebra de mapas y modelación hidrogeológica para reducir la subjetividad presente en los métodos tradicionales y mejorar la representación de la vulnerabilidad potencial y específica en acuíferos kársticos de la península de Yucatán. El estudio demuestra que los Sistemas de Información Geográfica continúan siendo la herramienta fundamental para integrar información geológica, hidrológica y de uso del suelo en la evaluación de la vulnerabilidad.

En Guatemala, se han llevado a cabo diversas iniciativas de protección de acuíferos, especialmente en áreas kársticas. El proyecto de conservación del acuífero de la cuenca del río Chixoy (2013) es uno de los ejemplos, se implementaron estrategias de conservación y monitoreo para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas, incluyó el uso de SIG, proporcionó un modelo para el manejo de los recursos hídricos en áreas de alta vulnerabilidad, como lo es el caso de Alta Verapaz.

Las características hidrogeológicas de los acuíferos kársticos de Alta Verapaz,

dominados por rocas calizas fracturadas, conductos de disolución y cavidades, favorecen una rápida infiltración y recarga del agua subterránea. Sin embargo, estas mismas condiciones incrementan su vulnerabilidad frente a la contaminación procedente de actividades agrícolas, urbanas e industriales, por lo que resulta indispensable realizar estudios de zonificación de la vulnerabilidad como herramienta para el ordenamiento territorial y la protección del recurso hídrico (Chiquín & Machorro, 2003; COST Action 620; Chavarría, 2019).

Foster, Hirata y Andreo (2013) señalan que el concepto de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos constituye una herramienta de apoyo para la gestión de las aguas subterráneas, al facilitar la comunicación entre hidrogeólogos, planificadores y responsables de la toma de decisiones. Su aplicación permite identificar y priorizar las zonas más vulnerables a la contaminación, proporcionando una base científica para el diseño de estrategias de protección del recurso hídrico y la planificación del uso del suelo. No obstante, los autores enfatizan que los mapas de vulnerabilidad deben complementarse con la evaluación de las cargas contaminantes y del riesgo específico para orientar adecuadamente las medidas de protección.

Nanou y colaboradores compararon las metodologías COP y PaPRIKa mediante herramientas de geoprocusamiento y análisis estadístico espacial para elaborar un mapa híbrido de vulnerabilidad en un acuífero kárstico de Grecia. Los resultados evidenciaron que la integración de álgebra de mapas, análisis multicriterio y Sistemas de Información Geográfica mejora la resolución espacial y la confiabilidad de la zonificación de la vulnerabilidad, constituyendo una evolución metodológica de los enfoques clásicos como COST 620

E. Planteamiento del problema

En Alta Verapaz, los acuíferos kársticos constituyen una fuente vital de agua, pero también son altamente vulnerables a la contaminación debido a su alta permeabilidad y a

la falta de filtración natural. Factores como el uso intensivo de agroquímicos, la expansión urbana y la inadecuada gestión de residuos aumentan el riesgo sobre estos acuíferos, algo que se pone en evidencia en el documento potenciales de contaminación de aguas subterráneas en los acuíferos kársticos por Machorro R. en 2005.

La ausencia de una zonificación precisa de áreas vulnerables impide la implementación de medidas preventivas efectivas, también el desconocimiento de la población de lo que el karst significa, deriva en aumento de los niveles de contaminación de agua subterránea. Por ello, es necesario aplicar la metodología COST 620, apoyada en Sistemas de Información Geográfica (SIG), para identificar zonas de riesgo y apoyar la gestión sostenible del recurso hídrico en la región, mediante mapas de zonificación que serán útiles para el ordenamiento territorial y manejo del agua subterránea.

a) Pregunta general de investigación

¿Cómo se pueden identificar y zonificar las áreas con potencial de contaminación de aguas subterráneas en los acuíferos kársticos de Alta Verapaz utilizando la metodología abreviada COST 620 y sistemas de información geográfica para prevenir riesgos ambientales?

b) Preguntas específicas de investigación

Para definir hacia donde se dirige la investigación, se tienen las siguientes preguntas de investigación

- ¿Cómo se puede aplicar la metodología COT620 para evaluar y zonificar el grado de vulnerabilidad de los acuíferos kársticos a la contaminación en la región?
- ¿Qué ventajas ofrece el uso de sistemas de información geográfica (SIG) para generar mapas de zonificación de riesgo a contaminación hídrica?
- ¿Existe alguna zona kárstica en la cual sea más probable que se presente la contaminación, relacionado con las aguas subterráneas?

- ¿Existen algunos factores que permitan delimitar las zonas kársticas con mayor probabilidad de riesgo de contaminación de aguas subterráneas?

F. OBJETIVOS

a) General

Zonificar las áreas con potencial de contaminación de aguas subterráneas en los acuíferos kársticos del departamento de Alta Verapaz, Guatemala, mediante el uso de sistemas de información geográfica, con el fin de contribuir ordenamiento territorial.

b) Específicos

- Delimitar las zonas kársticas en el departamento de Alta Verapaz.
- Describir sistemas de flujo en las zonas kársticas, que corresponde al segundo parámetro a evaluar que determinó como se mueve el agua.
- Definir zonas pobladas en la zona de interés, esto servirá para determinar qué áreas cuenta con más cantidad de contaminación
- Establecer las bases para la delimitación de la contaminación potencial de agua subterránea y la protección de los acuíferos kársticos en Alta Verapaz, que servirá para definir el ordenamiento territorial del departamento.

G. Justificación

En el departamento de Alta Verapaz, se cuenta con una geología de rocas carbonatadas, mismas que son susceptibles a disolución lo que permite una fácil infiltración del agua, también esto genera una mayor vulnerabilidad según la definición de morfología kárstica propuestas por Robledo P., et al (2020), ya que los contaminantes transitan con mayor facilidad que en cualquier otro lugar. Esta situación, si no es gestionada

adecuadamente, puede resultar en la contaminación de los recursos hídricos y poner en riesgo la salud de la población.

La delimitación de áreas kárstica en Alta Verapaz en el área de estudio permitirá a las comunidades, identificar las zonas que son propensas a la contaminación de aguas subterráneas, donde los núcleos humanos son densos o donde las construcciones no tienen las instalaciones adecuadas para desechar las aguas contaminadas.

Este es el punto de partida en el tema de protección de acuíferos subterráneos en la zona, permitiendo un primer estudio, esto permitirá en un futuro hacer una mejor planificación de las construcciones, definir áreas de conservación y trabajar con las comunidades para evitar que utilicen los agujeros kársticos como lugares de acumulación de desechos.

Con la identificación de las zonas, será posible centrar los esfuerzos a mejorar la educación, el planeamiento y disminución del riesgo por contaminación de aguas subterráneas, en las áreas donde se halla delimitado y así, aumentar las zonas de protección de los acuíferos de este tipo, por lo tanto, el proyecto de investigación se justifica.

La investigación propuesta tiene como objetivo zonificar las áreas con mayor potencial de contaminación de las aguas subterráneas en los acuíferos kársticos del departamento de Alta Verapaz, utilizando la metodología COST 620. La metodología permite evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a través de: el flujo concentrado (C), la capa de cobertura (O), proporcionando una base para definir las zonas más vulnerables, por la falta de información en el territorio se usará la variante que permita usar los datos disponibles, la misma que ya fue usada en Tailandia con éxito.

La zonificación de riesgo permitirá tener una idea general de los sitios en los cuales la contaminación puede ser mayor y definir estudios a detalle en esas zonas, para definir la mejor forma de ordenamiento territorial y evitar ayudar con el manejo hídrico.

H. Limitaciones y viabilidad de la investigación

a) Limitaciones

- 1. Disponibilidad de datos:** los datos necesarios para llevar a cabo la investigación son un punto importante, en naciones en vías de desarrollo donde es difícil contar con bases de datos extensas, en este caso se ha hecho una modificación de la metodología para poder cubrir con los datos mínimos y dar una propuesta preliminar que deberá ser seguida de más estudios y reforzar estas bases de datos.
- 2. Tiempo y recursos:** el uso de sistemas de información geográfica requiere de muchos recursos en este caso computadora con capacidad suficiente para correr los programas de análisis, y el tiempo que debe dedicársele que a veces es necesario correr varios modelos para poder tener el resultado más viable.

b) Viabilidad

- 1. Disponibilidad de herramientas SIG:** se cuenta con capacitación adecuada para el manejo de estos sistemas.
- 2. Interés institucional:** la carrera de geología, así como la Municipalidad de Cobán se verán beneficiados con el resultado del estudio, esto hace que se puedan disponer de datos de ambas instituciones.

I. Revisión de la literatura

La información revisada fue de ayuda para definir las pautas y adquirir conocimientos acerca de la problemática relacionada con acuíferos kársticos.

a) Patrón de búsqueda

Se inició con información relacionada a antecedentes de estudios kársticos dentro del área con las distintas metodologías, recolección de mapas en línea, impresos y digitales

que se tenga a la disposición.

Se avanzó con las tesis de grado de licenciatura de la carrera de Geología, dado que esta es la principal fuente de información geológica en Guatemala, así como documentos publicados en los cursos de Geología de Campo, Campaña Geológica y de ejercicio profesional supervisado, se procede a indagar del tema en otras carreras y universidades.

b) Clasificación de la información

Para la clasificación de la información se tomó en cuenta su importancia y su uso, en este caso en particular la primaria serán los antecedentes kársticos, mapas temáticos (topografía, suelos, karst), y la secundaria serán las tesis de grado y otras publicaciones académicas que se desarrollen en todas las universidades.

J. Marco teórico básico

Como parte de la investigación, en esta sección se definieron los conceptos relacionados al apartado de delimitación temática, relacionados al tema de investigación.

a) Morfología Kárstica

Según Robledo P., et al (2020)⁴, El término karst denominaba históricamente a un relieve muy particular en la región italo-eslovena de Karst. Este relieve estaba originado por un proceso químico que sufre la roca caliza y que, como consecuencia, da lugar a un paisaje rocoso muy particular. La evolución del concepto ha venido de la mano de la ciencia, ya que el proceso básico de disolución (la karstificación), se amplió a otras rocas solubles como la dolomía o el yeso y posteriormente una serie de disciplinas científicas ampliaron lo que hoy conocemos como “ciencias del karst”.

La génesis del karst se basa en las reacciones químicas que producen la disolución

⁴ Robledo, P. et al., (2020) Karts y Cuevas: la cuarta dimensión de la naturaleza. ResearchGate. Los libros de la catarata. ISBN (CATARATA): 978-84-9097-929-7

y la precipitación en presencia de agua y dióxido de carbono. El CO₂ atmosférico y del suelo se disuelve en el agua de lluvia y reacciona con la roca caliza para formar ácido carbónico. El ácido carbónico disuelto se disocia parcialmente formándose el ion bicarbonato, que queda disuelto en el agua infiltrada en el suelo. En estas condiciones, el agua es ácida y puede reaccionar con la roca caliza y disolverla. La solución química generada puede buscar el equilibrio disolviendo o, por el contrario, precipitando el carbonato disuelto o, por el contrario, precipitando el carbonato disuelto, volviendo a crear depósitos carbonáticos en condiciones y formas muy particulares.

Según Zerga, B., (2024) *Karst topography: Formation, processes, characteristics, landforms, degradation and restoration: A systematic review*, el proceso principal que forma la topografía es la disolución de rocas como yeso, caliza y dolomita, expone que para que se dé este proceso es necesario: 1. La presencia de rocas soluble, preferentemente calizas en la superficie o subterráneas, 2. Estas rocas deben tener separación de estratos y estar muy fracturadas, 3. La existencia de valles profundos cubiertos con roca solubles y cohesiva, esto permite el fácil descenso del agua a través de las rocas, 4. Precipitación media, 5. Fuente de agua permanente.

El karst es reconocido por sus distintivas formas del terreno y por tener uno de los más únicos paisajes del planeta. Se pueden encontrar estas formas tanto en superficie como bajo ellas. Algunos de los rasgos característicos son depresiones cerradas, sumideros, arroyos que desaparecen y nacimientos de agua.

b) Sistemas kársticos

Según la página Hombre Geológico en la publicación *Sistemas kársticos en carbonatos y evaporitas de la península Ibérica y Baleares*⁵, el modelado kárstico es el nombre que recibe el conjunto de acciones y procesos geológicos asociados con la disolución/precipitación de rocas solubles en agua, un tipo de meteorización química.

⁵ *Sistemas kársticos en carbonatos y evaporitas de la península Ibérica y Baleares*. Consultado en <https://geologicalmanblog.wordpress.com/2022/11/30/sistemas-karsticos/> el 12 de mayo de 2025

Por lo general se suele relacionar con rocas carbonatadas, con diferencia las más abundantes, pero lo cierto es que las rocas evaporíticas (yesos, sales) también sufren este tipo de modelado. De todas formas, e independientemente de qué roca es la afectada, dentro de un paisaje kárstico se pueden distinguir dos partes: el endokarst, que estaría compuesto por las manifestaciones subterráneas (cuevas y grutas con estalactitas, estalagmitas, columnas...); y el exokarst, que lo definen las formas que aparecen en superficie (dolinas, lapiazes...).

Ambas partes constituyen un todo, ya que muchas veces el endokarst y el exokarst son solo dos fases de la evolución de un mismo relieve, como se puede observar en la figura 2.

Esquema de endokarst y exokarst

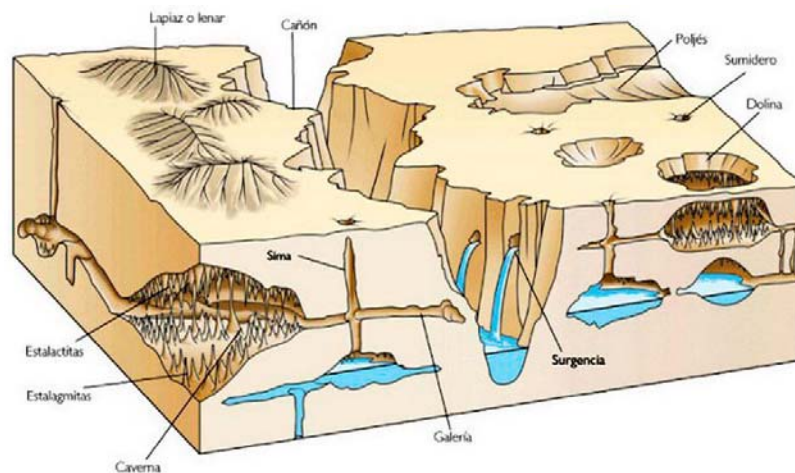


Figura 2 Esquema endokarst y exokarst, según sistemas kársticos en carbonatos y evaporitas de la península Ibérica y Baleares

Fuente: tomado de Hernández D., 2022. Sistemas kársticos en carbonatos y evaporitas en la península Ibérica

c) Karst en Alta Verapaz

En Alta Verapaz existen varias estructuras que ejemplifican el karst, siendo ellas:

- Cuevas de Candelaria:
Las Cuevas de Candelaria se encuentran ubicadas en el departamento de Alta Verapaz,

estas fueron un sitio sagrado para la civilización maya. Está formado por un complejo de cuevas consideradas como la cuna espiritual de la civilización maya de la región. Debido a que, para ellos, navegando a través del río subterráneo se conducían las almas hacia Xibalbá en busca de la inmortalidad. (Figura 3 a). Este sitio se encuentra rodeado de cerros)⁶.

- Semuc Champey

Es uno de los destinos naturales más conocidos de Guatemala. Este conjunto de pozas de agua turquesa rodeadas de vegetación se encuentra en Alta Verapaz y cada año atrae a turistas nacionales y extranjeros. Existen otros sitios turísticos que también ofrecen experiencias únicas y que se puede aprovechar visitar si se viaja por la región. Son opciones que pueden complementar la visita al famoso atractivo, ideales para quienes desean conocer más de Lanquín y sus alrededores (Figura 3 b).⁷

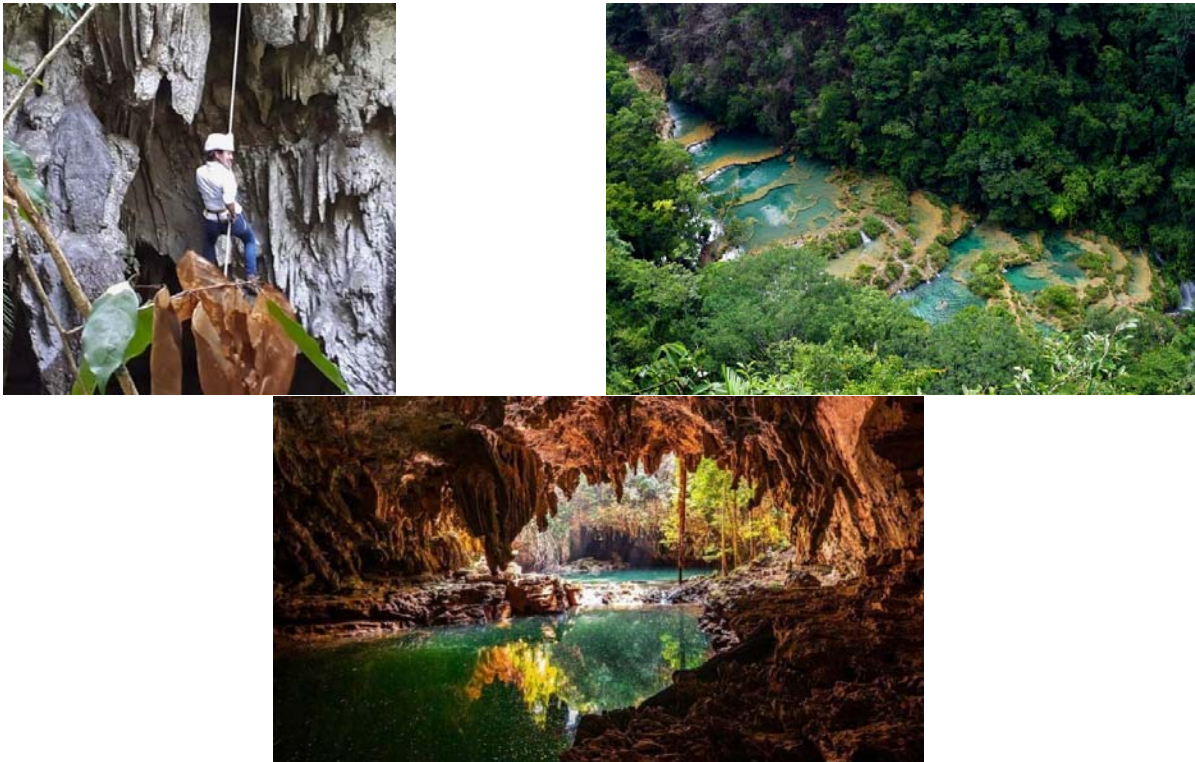
- Cuevas de Se'tzol

Bajo las montañas de Chahal se encuentran las Cuevas de Se'tzol. Rodeadas de la impresionante flora guatemalteca de una reserva natural, un tesoro poco conocido que nos transporta a un mundo subterráneo de misterio y belleza sin igual. Situadas en la aldea de Chahal, en Alta Verapaz, estas cuevas son formaciones geológicas. Todo un santuario natural que cautiva a quienes se aventuran a descubrir sus secretos (Figura 3 c)⁸

⁶ Aroche, K. Cuevas de candelaria. <https://www.guatemala.com/aprende/historia/geografia/cuevas-candelaria-alta-verapaz> consultado 20/09/2026

⁷ García, J. Lugares turísticos cerca de Semuc Champey.. <https://www.guatemala.com/guias/aventura/lugares-turisticos-cerca-de-semuc-champey/> consultado 20/09/2026

⁸ García, J. Cuevas de Se'tzol, un destino místico en Alta Verapaz. https://www.guatemala.com/guias/pasatiempos/cuevas-de-setzol-un-destino-mistico-en-alta-verapaz/?utm_source=guatemala.com&utm_campaign=crosslinking&utm_medium=widget consultado 20/09/2026



- Figura 3. Ejemplos de morfología Karstica en Alta Verapaz: a) Cuevas de Candelaria b) Semuc Champey c) Cuevas de Se'tzól. Fuente: tomado de Guatemala.com

d) Ciclo hidrológico

El ciclo del agua describe dónde se encuentra el agua en la tierra y cómo se mueve, esto se observa en la figura 3. El agua se almacena en la atmósfera, en la superficie de la tierra o debajo del suelo. Puede estar en estado líquido, sólido o gaseoso. El agua se mueve entre los lugares donde está almacenada a grandes escalas y a muy pequeñas escalas. El agua se mueve de forma natural y debido a la interacción humana, los cuales afectan dónde se almacena el agua, cómo se mueve y qué tan limpia es.⁹

La parte de este ciclo que interesa al tema de esta investigación incluye el agua subterránea. En esta se infiltra de diversas formas, las cuales permiten almacenar,

⁹Corson-Dosch, H., Nell, C., Volentine, R., Archer, A.A., Bechtel, E., Bruce, J.L., Felts, N., Gross, T. A., Lopez-Trujillo, D., Riggs, C. E., Read, E. K. (2022). Ciclo de agua. Water Science School . https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/USGS_WaterCycle_Spanish_PRINT_8.5x11_20230302_508.pdf cosultado el 11 de mayo de 2026

aprovechar y filtrar el agua en el interior del suelo; esta agua infiltrada puede volver a la atmósfera por evapotranspiración o profundizarse hasta alcanzar las capas freáticas¹⁰.

Dentro de esta investigación se trabajará con el exokarst, que son como cavidades en las cuales penetra el agua superficial y por no tener ningún tipo de barrera se perola al subsuelo, esto hace que si existe algún tipo de contaminación esta ingrese directamente por estas vías, siendo por lo tanto puntos de amenaza y vigilancia.



Figura 3 Ciclo del agua y sus distintas formas y relaciones. Fuente: tomado de Los acuíferos de la provincia de Segovia¹¹

e) Infiltración natural

La infiltración se define como el proceso por el cual el agua circula a través del perfil del suelo (desde la superficie terrestre hacia abajo) reponiendo la humedad del suelo, recargando los acuíferos y manteniendo el caudal de los ríos durante los periodos de estiaje. Este concepto hay que distinguirlo del de percolación, que es el movimiento del agua dentro

¹⁰Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), «El ciclo del agua», Water Science School, consultado el 8 de octubre de 2026, <https://www.usgs.gov/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish>

¹¹. Tejero I. V. Los acuíferos de la Provincia de Segovia.

http://www.inea.uva.es/web/materiales/web/riego/anuncios/trabajos/webs/Iv%C3%A1n%20Gonzalo%20Tejero/los_acu%C3%ADferos_de_la_provincia_de.htm . Los acuíferos de la Provincia de Segovia consultado en línea 23 de julio 2010

del suelo¹².

La magnitud de la infiltración y por lo tanto de la alimentación de las aguas subterráneas, se ve influenciada por dos tipos de condiciones; las que tienen relación con las precipitaciones, que constituyen la fuente misma de origen del agua, y las que tienen relación con las condiciones del terreno, que son las responsables de las mayores o menores facilidades existentes para la infiltración y que determinan finalmente la proporción de las precipitaciones que pueden llegar a constituir una recarga de las capas subterráneas¹³.

En este segundo tipo deben incluirse además las condiciones geológicas del subsuelo que son las que fijan la existencia y potencia de rellenos permeables, es decir, determinan la capacidad del subsuelo para recibir y regular el agua proveniente de las infiltraciones, dando lugar a aguas subterráneas.¹⁴

f) Aguas subterráneas

Son la porción de agua debajo de la superficie terrestre que puede colectarse en pozos, túneles y drenajes en galerías o la que fluye naturalmente hacia la superficie mediante fuentes.

El agua subterránea es parte de la precipitación que se filtra a través del suelo hasta llegar al material rocoso que está saturado de agua. El agua subterránea se mueve lentamente hacia los niveles bajos, generalmente en ángulos inclinados (debido a la gravedad) y eventualmente llegan a los arroyos, los lagos y océanos.¹⁵

g) Riesgo a contaminación kárstica

Para los fines de este estudio, es necesario definir el concepto que se manejara como

¹² Ruiz Romera E., Martínez Santos M. Hidrología aplicada.

https://ocw.ehu.es/pluginfile.php/47724/mod_resource/content/1/Material_Docente/Tema_4.pdf consultado el 11 de mayo de 2026

¹³ Machorro, R., 2000. Hidrogeología física principios y aplicaciones. Sociedad geológica de Guatemala

¹⁴ Machorro, R., 2000. Hidrogeología física principios y aplicaciones. Sociedad geológica de Guatemala

¹⁵ USGS (United States geological service). Aguas subterráneas. <https://water.usgs.gov/gotita/earthgw.html> consultado 10 de mayo de 2026

riesgo: según la European Cooperation in Science and Technology (COST), entidad que reúne los avances tecnológicos en Europa y que diseñó la metodología para este proyecto, vulnerabilidad intrínseca es el término utilizado para definir la vulnerabilidad de las aguas subterráneas para contaminantes generados por las actividades humanas. Tiene en cuenta las condiciones geológicas inherentes, características hidrológicas e hidrogeológicas de la zona, pero es independiente de la naturaleza de las actividades humanas¹⁶.

El riesgo puede ser definido como la probabilidad o frecuencia esperada de una consecuencia adversa específica, el riesgo no pretende ser una medida absoluta sino es como un medio de medida relativa o comparación. Donde puede ser particularmente útil es cuando se utilizan los diversos componentes de riesgo, junto con la fuente-trayecto-destino, como un marco para considerar la prevención/minimización de la contaminación y la protección de las aguas subterráneas.

$$\text{Riesgo} = \text{probabilidad de un suceso} \times \text{daños resultantes}$$

h) Riesgo de contaminación de aguas subterráneas en acuíferos kársticos

Según Vu Thi Minh Nguyet & Nico Goldscheider (2006),¹⁷ el concepto de vulnerabilidad en agua subterránea y riesgo de contaminación está basado en el modelo origen- camino-destino. El origen es el término que se usa para describir la localización de una posible fuente de contaminación, el camino comprende el trayecto de los contaminantes del origen al destino y el destino es a donde se dirige la contaminación.

Para proteger los acuíferos es necesario proteger la zona fuente, las fuentes de agua y corrientes superficiales. Por lo que se debe incluir el flujo del acuífero hacia la fuente de agua, desde un punto de vista cuantitativo. Tres aspectos son importantes para determinar la vulnerabilidad:

- a. El tiempo de viaje de un contaminante desde el origen hacia el destino

¹⁶ Aquifers-Final-Report COST EU. "Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers" consultado 27/08/13. <http://www.cost.eu/media/publications/03-02-Vulnerability-and-Risk-Mapping-for-the-Protection-of-Carbonate-karst->

¹⁷ Minh Nguyet Vu Thi & Goldscheider Nico (2006) A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam

- b. La atenuación a lo largo de este camino
- c. La duración de la contaminación en el destino

El termino vulnerabilidad del agua subterránea a ser contaminada, se considera como una consecuencia de la protección natural contra la contaminación, por lo que se deduce entonces que mientras menor sea la protección de la cobertura vegetal mayor será la vulnerabilidad de contaminación

La vulnerabilidad intrínseca toma en cuenta las características hidrológicas del área, pero es independiente de la naturaleza de los contaminantes. Si se quiere ser más específico se debería considerar una vulnerabilidad particular y considerar la interacción entre un tipo específico de contaminante en los sistemas hidrológicos.

El riesgo por contaminación en agua subterránea toma en cuenta diferentes aspectos: la presencia y riegos, la vulnerabilidad del agua subterránea y la importancia del valor de agua subterránea. El COST action 620 propone diferentes tipos de riesgo incluyendo intensidad del riesgo, sensibilidad el riesgo y el riesgo total. Puede ser para toda el área, para áreas particulares, para un contaminante específico o para cualquier contaminante¹⁸.

i) La valoración del peligro de contaminación en fuentes k

La valoración del peligro se hará en forma cualitativa, se clasificará como alto medio o bajo de la siguiente manera: urbanizaciones, industria, basureros, carreteras principales, estaciones petroleras, actividad agrícola intensa y descarga de agua doméstica no tratada. Se clasifican como “alto”; carreteras pequeñas, villas con sistemas de tratamiento de aguas residuales y agricultura de baja intensidad como “moderados”; vegetación natural, bosques y agricultura de muy baja intensidad como “bajo”.¹⁹ El mapa

¹⁸ Minh Nguyet Vu Thi & Goldscheider Nico (2006) A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam

¹⁹ Minh Nguyet Vu Thi & Goldscheider Nico (2006) A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam

de riesgo se generará de la superposición del mapa de vulnerabilidad con el mapa de peligro.

j) Sistemas de información geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés Geographic Information System) es una integración organizada de *hardware*, *software* y *datos geográficos* diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión²⁰.

García, J., Monnar, O., Zapata, J., Arango, E., y López, P. (2006), aseguran que los SIG constituyen actualmente, una herramienta poderosa para la recopilación, almacenamiento, actualización, análisis y visualización de la información concerniente a la evaluación y manejo de riesgos naturales, facilitando la toma de decisiones en caso de desastres, concretamente en su caso, en la ocurrencia de riesgos sísmicos, pero que puede ser aplicado para otros eventos como movimientos de remoción en masa, inundaciones, etc¹⁷

k) Marco normativo para la protección de los acuíferos kársticos en Guatemala

La protección de las aguas subterráneas en Guatemala se sustenta en un conjunto de disposiciones constitucionales, legales y reglamentarias que establecen principios generales para la conservación de los recursos naturales y la prevención de la contaminación ambiental. Sin embargo, el país aún carece de una legislación específica que regule integralmente la gestión de los acuíferos, particularmente aquellos desarrollados en medios kársticos, cuyas características hidrogeológicas los convierten en sistemas altamente vulnerables a la contaminación²¹

²⁰ Autor, título. <http://conhisremi.iuttol.edu.ve/pdf/ARTI000105.pdf> consultada el 27/08/13

²¹ Congreso de la República de Guatemala, Constitución Política de la República de Guatemala (Guatemala: Asamblea Nacional Constituyente, 1985); Congreso de la República de Guatemala, Decreto Número 68-86, Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente (Guatemala, 1986)

La **Constitución Política de la República de Guatemala** establece en los artículos 64, 97 y 127 la obligación del Estado de conservar el patrimonio natural, prevenir la contaminación ambiental y proteger las aguas como bienes de dominio público. No obstante, dichos preceptos poseen un carácter general y no desarrollan mecanismos específicos para la protección de las aguas subterráneas ni consideran criterios diferenciados para acuíferos con elevada vulnerabilidad hidrogeológica²²

En materia ambiental, la **Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente** (Decreto 68-86) constituye el principal instrumento jurídico para la prevención y control de la contaminación ambiental. Esta normativa asigna al **Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN)** la responsabilidad de regular actividades susceptibles de generar impactos ambientales mediante la evaluación de impacto ambiental y la emisión de normas técnicas. Sin embargo, la ley no incorpora procedimientos específicos para la delimitación y protección de zonas de recarga de acuíferos kársticos ni exige la incorporación de mapas de vulnerabilidad hidrogeológica dentro de los procesos de ordenamiento territorial²³

Entre los principales instrumentos reglamentarios emitidos por el MARN destacan el **Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental** (Acuerdo Gubernativo No. 137-2016), el cual regula el proceso de evaluación ambiental de proyectos, obras e industrias; el **Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos** (Acuerdo Gubernativo No. 236-2006), que establece los límites permisibles para las descargas de aguas residuales; y el **Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos Comunes** (Acuerdo Gubernativo No. 164-2021), orientado a reducir los impactos derivados del manejo inadecuado de residuos sólidos²⁴

²² Congreso de la República de Guatemala, Constitución Política de la República de Guatemala, arts. 64, 97 y 127

²³ Congreso de la República de Guatemala, Decreto Número 68-86, Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, arts. 1, 8, 12 y 15.

²⁴ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Acuerdo Gubernativo No. 236-2006, Reglamento de las Descargas

I) Metodología COST Action 620

La metodología COST Action 620 fue desarrollada por la Comisión Europea dentro del programa Cooperation in Science and Technology (COST) con el propósito de establecer criterios estandarizados para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación en acuíferos kársticos. Su principal aporte consiste en integrar variables geológicas, geomorfológicas, edáficas e hidrológicas mediante Sistemas de Información Geográfica, permitiendo identificar las zonas con mayor susceptibilidad a la contaminación y proporcionando una base técnica para la planificación territorial y la protección de los recursos hídricos.²⁵

Desde su publicación, la metodología ha sido aplicada y adaptada en numerosos países con presencia de acuíferos kársticos, entre ellos España, Francia, Italia, Austria, Grecia, Croacia, Eslovenia, Suiza y México, donde ha servido para delimitar zonas de vulnerabilidad, orientar la protección de áreas de recarga y apoyar la toma de decisiones en la gestión del agua subterránea.²⁶ En años recientes, diversos estudios han continuado utilizando los principios de COST 620 e integrándolos con herramientas de geoprocésamiento, análisis multicriterio y álgebra de mapas, lo que confirma su vigencia como una de las metodologías de referencia para la evaluación de acuíferos kársticos.²⁷

En la presente investigación, la metodología COST Action 620 constituye la base para la zonificación de la vulnerabilidad de los acuíferos kársticos del departamento de Alta Verapaz, mediante la evaluación de los factores de protección del suelo (factor O)

y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos (Guatemala, 2006); Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Acuerdo Gubernativo No. 137-2016, Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental (Guatemala, 2016); Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Acuerdo Gubernativo No. 164-2021, Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos Comunes (Guatemala, 2021)

²⁵ D. Daly et al., eds., *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers* (Luxembourg: European Commission, COST Action 620, 2002)

²⁶ Frank Zwahlen, ed., *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers: Final Report, COST Action 620* (Luxembourg: European Commission, 2004).

²⁷ M. Moreno-Gómez et al., "First Application of the Integrated Karst Aquifer Vulnerability (IKAV) Method – Potential and Actual Vulnerability in Yucatán, Mexico," *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22 (2022): 1591–1608.

y de concentración del flujo (factor C), integrados en un Sistema de Información Geográfica para generar mapas de vulnerabilidad que apoyen el ordenamiento territorial.

K. Hipótesis

En el departamento de Alta Verapaz existen zonas específicas con abundantes manifestaciones de karts activo, en donde los suelos son escaso o poco protegido y que permiten percolar el agua sin filtro al subsuelo, mediante el uso de la metodología COST 620, y sistemas de información geográfica, es posible delimitar estas áreas.

L. Tipo de investigación

Se desarrolló una investigación aplicada con enfoque cuantitativo: es aplicada porque resolvió un problema práctico y generó productos útiles; y es cuantitativa porque se apoya en datos numéricos, ponderaciones y análisis espacial, según Hernández R et al 2014.

1. MARCO TEÓRICO

En este apartado se definió la teoría que fundamentó la investigación, que va desde aspectos básicos a conceptos más complejos que darán forma a lo que se investigó.

1.1 Situación del departamento de Alta Verapaz

1.1.1 Situación social y ambiental del departamento de Alta Verapaz

Alta Verapaz es un departamento ubicado en la región norte de Guatemala, caracterizado por una amplia diversidad cultural y ambiental. La población es mayoritariamente indígena, perteneciente a los pueblos mayas q'eqchi' y poqomchi'. A pesar de su riqueza natural y cultural, el departamento enfrenta profundas limitaciones estructurales en los ámbitos social, económico y ambiental²⁸.

²⁸ Instituto Nacional de Estadística (INE), *Características Generales del Departamento de Alta Verapaz* (Guatemala: INE, 2018); Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Guatemala: Diversidad étnico-cultural y desarrollo humano (Ciudad de Guatemala: PNUD, 2020)

1.1.2 Contexto socioeconómico

Alta Verapaz presenta algunos de los índices de pobreza más altos del país. De acuerdo con la Encuesta de Condiciones de Vida (ENCOVI) 2023, más del 90 % de la población del departamento vive en condiciones de pobreza, lo que evidencia una situación de exclusión histórica y limitada inversión estatal en infraestructura y servicios básicos. La economía local se basa principalmente en la agricultura de subsistencia y en cultivos comerciales como café y cardamomo, actividades altamente vulnerables a la variabilidad climática²⁹.

Estas condiciones socioeconómicas inciden directamente en la calidad de vida de la población, especialmente en áreas rurales, donde el acceso a educación, salud y empleo formal es limitado.

1.1.3 Acceso al agua potable y saneamiento

El acceso al agua potable constituye uno de los principales problemas estructurales del departamento. En Guatemala, una parte significativa de la población carece de agua potable, situación que se agrava en Alta Verapaz. Human Rights Watch señala que solo una minoría de los hogares en el departamento cuenta con acceso regular a agua segura y que muchas comunidades dependen de ríos, manantiales o sistemas comunitarios sin tratamiento adecuado.³⁰

En cuanto al saneamiento, la cobertura es igualmente deficiente. La mayoría de las aguas residuales domésticas se descargan directamente en el ambiente sin tratamiento previo, lo que contribuye a la contaminación de ríos y quebradas y aumenta los riesgos sanitarios para la población.

²⁹ Instituto Nacional de Estadística (INE), *Características Generales del Departamento de Alta Verapaz* (Guatemala: INE, 2018); Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Guatemala: Diversidad étnico-cultural y desarrollo humano (Ciudad de Guatemala: PNUD, 2020)

³⁰ Human Rights Watch, “Without Water, We Are Nothing: The Urgent Need for a Water Law in Guatemala” (Nueva York: HRW, 2025)

1.1.4 Contaminación ambiental

La contaminación del recurso hídrico es uno de los problemas ambientales más críticos en Alta Verapaz. A nivel nacional, se estima que alrededor del 90 % de las aguas superficiales presentan algún grado de contaminación, principalmente por descargas de aguas residuales, residuos sólidos y escorrentía agrícola. En Alta Verapaz, esta situación se ve agravada por la ausencia de plantas de tratamiento y por la expansión de actividades productivas que generan presión sobre los recursos naturales ³¹.

El uso de agroquímicos en la agricultura, así como la expansión de monocultivos, ha sido señalado como un factor que contribuye a la degradación de suelos y a la contaminación de fuentes de agua utilizadas por las comunidades. Estos procesos afectan la seguridad alimentaria y la salud pública, especialmente en niños y mujeres³².

Algunas iniciativas locales, como los programas impulsados por UNICEF para reducir la contaminación fecal ambiental en municipios específicos, demuestran que es posible mejorar las condiciones sanitarias mediante acciones comunitarias e institucionales; sin embargo, estos esfuerzos aún no son puntuales frente a la magnitud del problema departamental³³.

1.1.5 Implicaciones sociales y ambientales

La combinación de pobreza, acceso limitado al agua potable y altos niveles de contaminación genera un círculo de vulnerabilidad que afecta de manera directa el desarrollo humano en Alta Verapaz. Las enfermedades de origen hídrico continúan siendo frecuentes, y la degradación ambiental reduce la disponibilidad de recursos naturales esenciales para la subsistencia de las comunidades rurales.

³¹ Human Rights Watch, *Without Water, We Are Nothing*, 2025

³² UNICEF Guatemala, “San Cristóbal Verapaz Certified as an ECOFAM Municipality, Free of Environmental Fecal Contamination” (Ciudad de Guatemala: UNICEF, 2024)

³³ UNICEF Guatemala, San Cristóbal Verapaz Certified as an ECOFAM...

1.2 Situación geológica y climática de Alta Verapaz

1.2.1 Geología

En el departamento de Alta Verapaz se pueden encontrar distintos tipos de roca, las cuales han sido ampliamente estudiadas y representadas, como cita Ramos F, 2004, siendo esta:

- i. Formación Tactic: Se encuentra situada hacia el Sur de la vertiente, de manera que se extiende formando una franja orientada en dirección E-W (hasta el valle del Polochic). La Formación Tactic consiste en lutita café a negra y lodolita con capas locales de cuarcita y dolomita. Localmente las lutitas son filíticas y donde la erosión ha cortado profundamente en la formación, afloran pizarras y metacuarcitas.
- ii. Formación Chóchal: aflora hacia el Este hasta las áreas de Cobán-Purulha y Senahú de Alta Verapaz. Litológicamente, la Formación Chóchal consiste en dolomita y caliza masiva, estratificadas, formadoras de escarpes, variando de gris-negro a amarillento-medio a gris oscuro en color. Ocurren zonas altamente fosilíferas conteniendo abundantes fusulínidos, corales, braquiópodos, gasterópodos, crinoides, esponjas y algas.
- iii. Formación Todos Santos: consiste en arenisca conglomerática, limolita y lutita terrosa roja, con un cuerpo lenticular de estratos de caliza marina presente localmente en la parte superior de la secuencia.
- iv. Formación Cobán: esta formación se sitúa al norte y este del departamento de Alta Verapaz en la vertiente del Atlántico, ocupando una gran extensión de área. La formación presenta un alto desarrollo de cavidades kársticas. Sapper (1899) dio el nombre de Cobán a una gruesa secuencia de carbonatos y evaporitas del Cretácico cerca de Cobán, A.V. Se han estudiado varias secciones de afloramientos en los Cuchumatanes del oeste de Guatemala, así como en las áreas de Cobán y Campur en la parte central del país y al este en Senahú y el lago de Izabal.

- v. Formación Campur: fue definida por Vinson (1962), cerca de la aldea Campur en Alta Verapaz. Consiste principalmente de calizas color gris, café-grisáceo a marrón de grano fino, con menor cantidad de dolomita y localmente está interestratificada con láminas delgadas de lutita, limolita, y brecha de caliza o conglomerado. La formación Campur es muy fosilífera (rudistas y miliólidos) con fauna típica de antearrecife; característica típica que la diferencia de la formación Cobán.
- vi Formación Sepur Compuesta de arcillas café, lutitas, areniscas y margas, interestratificadas con lentes de caliza. Cerca del municipio de Lanquín (Alta Verapaz), conglomerados y areniscas gruesas, conteniendo fragmentos de cuarcitas.
- vii Rocas Intrusivas Básicas: se trata de grandes cuerpos de rocas ofiolíticos, serpentinas Cretácicas, basaltos toleíticos y escasos cherts radiolarios ocurren a lo largo de las fallas activas Polochic y Motagua. Cuerpos alóctonos importantes de estas rocas componen la Sierra de Santa Cruz, al norte del río Polochic y una parte de la Sierra de las Minas, tendencia E-W, entre Purulhá y Tactic.

1.2.2 Condiciones climáticas

El clima del departamento es predominantemente húmedo, con variaciones entre cálido húmedo y templado húmedo según la altitud. La precipitación media anual oscila entre 2,000 y 4,000 mm, lo que favorece una recarga significativa de los acuíferos, pero también incrementa el riesgo de transporte rápido de contaminantes desde la superficie hacia el subsuelo³⁴.

Alta Verapaz es una región de lluvias abundantes y bien distribuidas, uno o más metros de precipitación pluvial promedio por año y en algunos lugares hasta más de cinco metros. La lluvia está bien distribuida durante todo el año, existiendo algunos lugares donde

³⁴ Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), *Caracterización Climática de Guatemala* (Guatemala: INSIVUMEH, 2022)

hay por lo menos cincuenta milímetros al mes. Las lluvias cortas y de intensidad muy fuerte son comunes entre mayo y noviembre, particularmente en el sur de la región. Muchas de estas lluvias vienen acompañadas de vientos fuertes³⁵.

1.2.3 Relieve

El relieve es montañoso y accidentado, con altitudes que varían aproximadamente entre 150 y más de 3,000 m s. n. m. Predominan sierras, mesetas kársticas y valles intermontanos, condicionando la escorrentía superficial, la infiltración y la localización de asentamientos humanos. Las pendientes pronunciadas dificultan la implementación de infraestructura de saneamiento, aumentando el riesgo ambiental.

1.2.4 Hidrología de Alta Verapaz

En 1,971 el IGN preparó el mapa de cuencas para toda la República de Guatemala a escala 1:500,000., este mapa muestra que el departamento de Alta Verapaz es drenado por dos vertientes regionales: la vertiente del golfo de México y la vertiente del Atlántico, siendo esta última, la que incluye los principales ríos: Polochic, Cahabón y Chiyú. La vertiente del golfo de México en el departamento de Alta Verapaz, es notorio que en su mayor extensión hacia el norte la configuración de drenaje kárstico es prevalente. Entre los ríos principales que drenan el área se encuentra el Chixoy, el cual con una longitud dentro de la vertiente de 126.512 km representa el límite político occidental del departamento de Alta Verapaz³⁶

1.2.5 Vegetación

La cobertura vegetal está constituida principalmente por bosques tropicales húmedos y bosques nubosos, los cuales desempeñan un papel fundamental en la regulación hídrica y la protección del suelo. Sin embargo, la deforestación asociada a la expansión agrícola y al uso de leña ha reducido la cobertura natural, afectando la recarga y la calidad

³⁵ Coy Choc, B. (2004) *Evaluación hidrogeomorfológica de la vertiente del Atlántico, en el departamento de Alta Verapaz*

³⁶ Coy Choc, B. (2004) *Evaluación hidrogeomorfológica de la vertiente del Atlántico, en el departamento de Alta Verapaz*

del agua subterránea.

La vegetación natural es una de las más ricas en su composición florística, sin embargo, podemos citar como indicadoras las siguientes: Liquidámbar, Pino Candelillo, *Terminalia amazonia*, *Brsimun alicastrum*, *Virola*, *Cecropia*, *Ceiba pentandra*, *Vochysiahondurensis* y *Pinus caribea*

1.2.6 Morfología kárstica

Pueden observarse dos tipos de drenaje kárstico dentro de la vertiente del golfo de México

- Ríos cortos y abundantes sumideros el cual podría ser designado como drenaje de puntos,
- Ríos largos que drenan principalmente en valles al que podríamos referirnos simplemente como drenaje cárstico.

Con base a estos datos queda demostrado el dominante imperio que tiene el drenaje característico de rocas calizas dentro del área en estudio, y de ahí la importancia de un enfoque hidrogeológico para evaluar el flujo subterráneo típico de regiones cársticas³⁷

El 70% de Alta Verapaz consiste en rocas carbonáticas Cretácicas con diferentes tipologías el paisaje kárstico que tiene un excelente potencial para la formación de acuíferos con flujo turbulento. Sin embargo, por la alta densidad de dolinas en las rocas carbonatadas, se ha generado un ambiente altamente vulnerable para la contaminación de acuíferos³⁸.

1.2.7 Suelo

En el estudio *Diagnostico de la franja transversal del norte y definición de las líneas estratégicas de acción del MAGA*, 2010 presenta que de manera general se clasificaron los

³⁷ Ramos Florian, B. (2004) *Evaluación hidrogeomorfológica de la vertiente del golfo de México en el departamento de Alta Verapaz, Guatemala*

³⁸ Ramos Florian, B. (2004) *Evaluación hidrogeomorfológica de la vertiente del golfo de México en el departamento de Alta Verapaz, Guatemala*

suelos en las siguientes categorías: i). Suelos de los Cerros de Calizas y ii). Suelos de las Tierras Bajas del Petén-Caribe. El material parental original de los suelos son los materiales sedimentarios de origen kárstico. La diferencia entre ambas categorías estriba en que las Tierras Bajas pueden tener aporte de material aluvial lo que permite en algunos casos una mejor trabajabilidad.

Dentro de la misma publicación refiere que se identificaron las siguientes limitantes en los suelos del área:

- Suelos muy erosionables debido a su origen kárstico.
- Limitada profundidad efectiva ya que la mayor parte de la superficie está ocupada por suelos que varían de delgados a mediana profundidad con presencia de sustrato calizo y rocas sobre todo en las áreas de cerros; en las Tierras Bajas los suelos son más profundos.
- Los suelos de las Tierras Bajas están muy lixiviados debido a las intensas lluvias anuales y esta condición genera suelos ácidos. Indicaron que la fertilidad natural del suelo predominante varía de mediana a alta fertilidad, aunque la misma es muy susceptible al lavado de bases y por ello se genera la acidez mencionada.

2. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1 Metodología

La presente investigación se orientó bajo el enfoque cuantitativo, usando los datos geoespaciales, las capas temáticas y las herramientas SIG, para evaluar los riesgos de contaminación de los acuíferos kársticos.

2.2 Métodos

Se aplicó el método científico que sigue una secuencia lógica desde observación del problema, formulación de la hipótesis, recopilación de datos y análisis e interpretación.

2.3 Técnicas de investigación

La metodología está basada en la propuesta en COST 620, un tipo de mapa de riesgo y un tipo amenaza. Los factores se redujeron a los mínimos, por lo que se tomaran en cuenta dos factores, capas sobre yacientes (**O**) y la concentración del flujo (**C**). El mapa de riesgo es obtenido por la combinación del mapa de vulnerabilidad y una simple amenaza. La metodología se resume y explica mejor en la figura 4. Esta metodología puede ser aplicada en áreas donde existe poca o nada de información y los recursos económicos son limitados.

La metodología se dividió en tres etapas definidas según la figura 4, que son etapa de recopilación de información, creación y análisis de mapas y delimitación de zonas de riesgo.

2.4 Procedimiento metodológico

2.4.1 Etapa de recopilación bibliográfica

En esta etapa se compilo la información digital disponible, en forma de estudios realizados dentro de ellos varias tesis de la carrera de Geología, trabajos de graduación a nivel técnico de la carrera de Geología, mapas digitalizados a partir de información antigua de mapas geológicos publicados y documentos varios relacionados al análisis kárstico como diferentes metodologías relacionadas al tema, publicaciones en revistas relacionadas con acuíferos y sistemas kársticos a nivel mundial

Dentro de la información primaria fue necesario contar con datos detallados de las aplicaciones de la metodología en otros países como:

- Estudios de casos
- Resultados de estos
- Mapa de ríos y quebradas

- Mapa de suelos de Simmons
- Mapa geológico de Alta Verapaz
- Mapas de carreteras, todos ellos a escala 1: 250,000,

Debido a que el estudio es de tipo exploratorio, estos mapas se obtuvieron de la base datos del MAGA 1985, proyección NAD 27, zona 15 y el mapa topográfico y de dolinas a escala 1:50,000, se dibujaron a partir de los mapas topográficos 1:50,000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN). El resultado es la primera aproximación para después hacer estudios a más detalle.

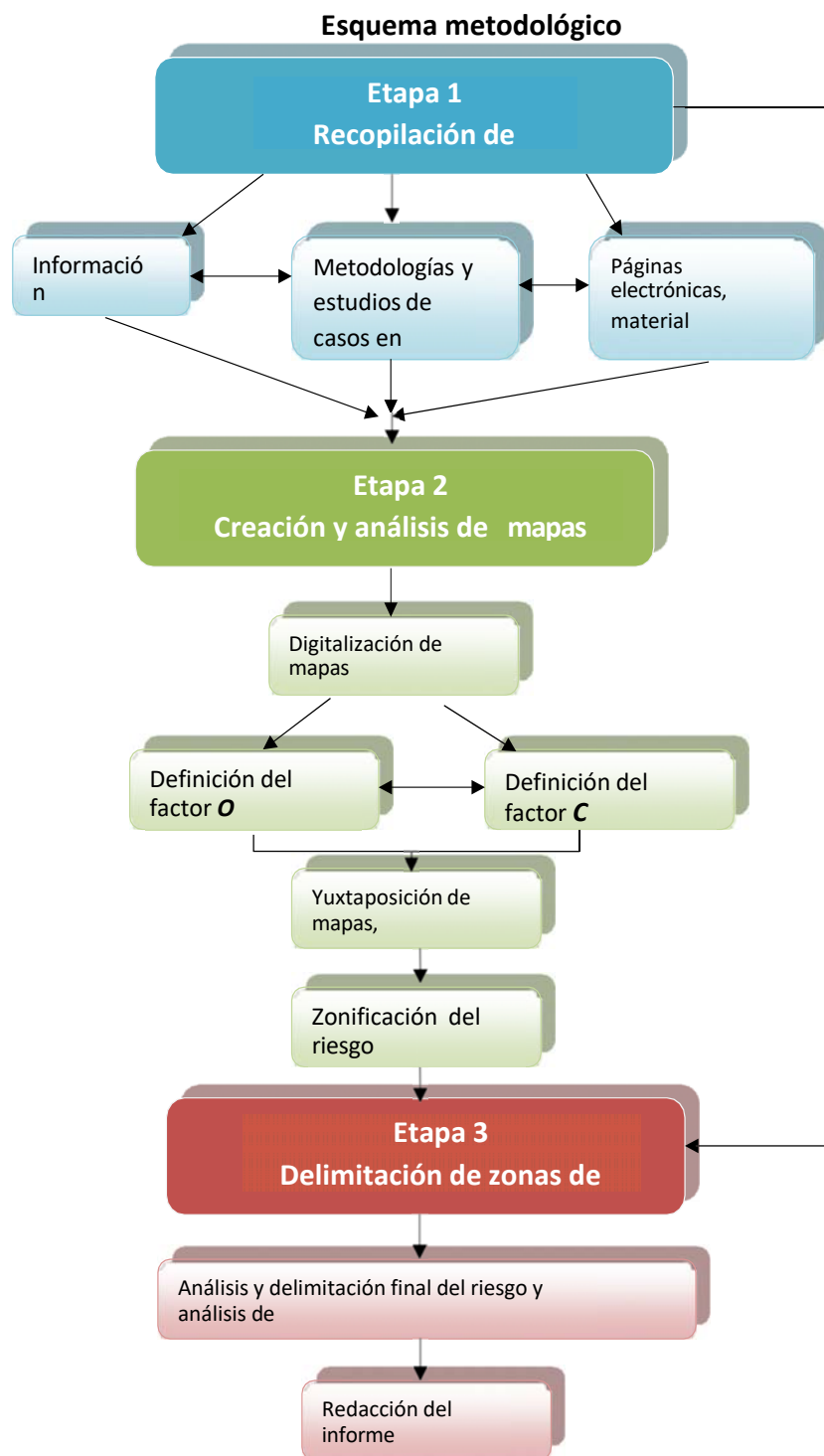


Figura 4 Esquema metodológico

Fuente: elaboración propia

2.4.2 Creación y análisis de mapas

En esta etapa se definieron los factores de trabajo, en este caso se utilizan las capas sobre yacientes (**O**) y la concentración del flujo (**C**), estos factores toman en cuenta la dualidad de los procesos en acuíferos kársticos. El factor **O** describe las capas que protegen los acuíferos y el factor **C** es específico para karst, se analizaran mediante el programa ArcGis 10.2.2 en su versión de prueba, esto se muestra en la figura 5

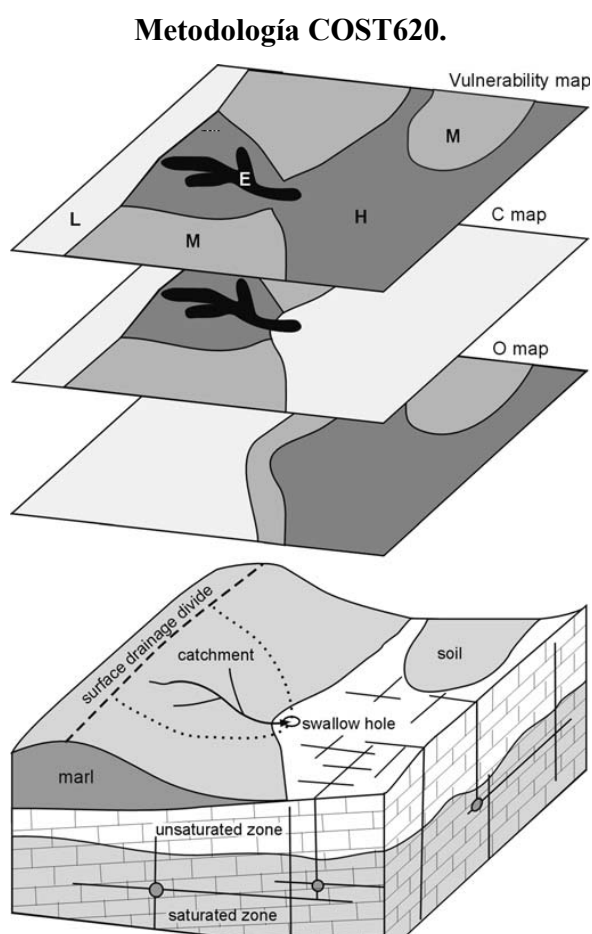


Figura 5 Metodología para aplicar

Fuente: COST 620

El factor **O** se aplica a todos los tipos de acuíferos, el factor **C** es específico para acuíferos kársticos, describe la vulnerabilidad resultante de procesos de recarga alogénica. El flujo superficial originado en formaciones no kársticas, que se percola rápidamente dentro del acuífero kársticos que, por medio de agujeros superficiales, se puede transportar rápidamente a las aguas subterráneas.

a. FACTOR O

Este factor se define con la protección superficial del terreno, esto es posible definiendo el tipo de suelo y el espesor de este, dentro de esta metodología se define tres situaciones:

- i. Baja protección (L): se debe asignar a las situaciones en donde el acuífero está cubierto por menos de 30 cm del suelo, no importando el tipo de este.
- ii. Alta protección (H): cuando existen capas gruesas de baja a moderada permeabilidad, estas proporcionan alta protección natural en lugares donde existe espesores > 5 m.
- iii. Moderada protección (M): esta sería la situación intermedia 1 metro de suelo sobre la roca con moderada permeabilidad.

Esto se resume en la figura 6, según el cuadro se asignarán tres letras: L (*low*, bajo), M (*moderate*, moderado), H (*high*, alto) y E (*extrem*, extremo) donde L es el valor más bajo y E el valor más alto.

b. FACTOR C

El factor C se refiere a la infiltración en sí, el flujo y el comportamiento en paisaje kárstico este factor se compone de dos pasos. El primer paso es determinar el proceso de flujo dominante (Fig. 6) los flujos dominantes se describen a continuación:

- Tipo A:** la infiltración y percolación directa se lleva a cabo en formaciones de alta permeabilidad
- **Tipo B:** situaciones intermedias
- Tipo C:** esorrentía superficial frecuente tiene lugar en formaciones de baja permeabilidad

Para definir los tipos de flujo se tomará como base el mapa geológico de Alta Verapaz en cada una de las formaciones, a escala 1: 250,000 y el mapa de tipo de suelos, ambos tomados de la base de datos del MAGA de 1985 en formato vector digital.

Según la imagen, el tipo A indica el predominio de la recarga de fuera del área kárstica, mientras que el tipo C significa que la recarga alógena podría ocurrir si el área dada drena hacia un punto o zona de infiltración.

El siguiente paso es subdividir la superficie de la tierra en cuatro tipos de zonas:

- **Zona 1:** es donde a) se localizan agujeros superficiales (dolinas), b) ríos o quebradas que se sumergen y que están localizadas hasta a 1 km aguas arriba de los agujeros superficiales; c) una zona de amortiguamiento de 20 m a ambos lados de los ríos o quebradas que se infiltran directamente en las dolinas.
- **Zona 2:** el resto de las zonas de captación ríos o quebradas que se infiltran dentro de las dolinas. Estas zonas son las que se encuentran más alejadas de las quebradas, pero que se encuentran dentro del drenaje kárstico y a la zona de captación de agua.
- **Zona 3:** áreas fuera, zonas donde se infiltran los ríos o quebradas en los agujeros kársticos, pero dentro de la zona kárstica.
- **Zona 4:** las áreas que drenan lateralmente fuera del sistema hidrogeológico kárstico.

Estas zonas se definieron en el mapa topográfico, tomando en cuentas las dolinas y las corrientes de agua superficial, ríos o quebradas, se tomará una zona buffer de 20 metros para la zona 1 y para las demás zonas se delimitará en función de la distribución del karst en superficie, por medio del mapa topográfico se delimitaron las dolinas y a partir de ellos se definieron las zonas relacionadas.

El mapa C se obtiene mediante la combinación de “mapa de procesos de flujo dominante y el mapa de captación superficial por medio de GIS, para acuíferos no consolidados y fracturado. El mapa de vulnerabilidad del agua subterránea puede traducirse en un mapa de vulnerabilidad para acuíferos kársticos, el mapa de vulnerabilidad se obtiene de la superposición del factor O y factor C, mapas.

Metodología propuesta para el mapeo riesgo contaminación de aguas subterráneas

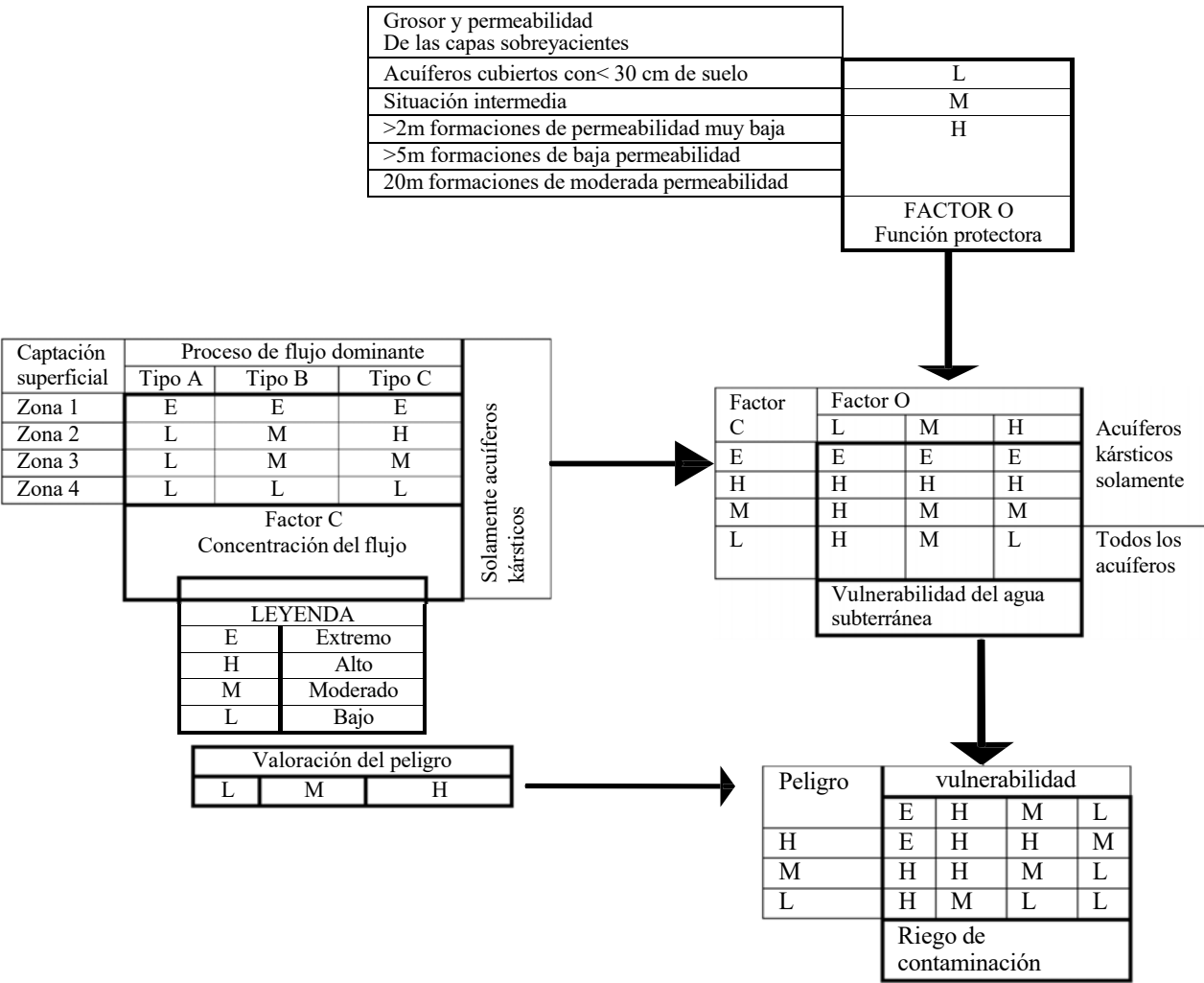


Figura 6 Metodología propuesta para el mapeo riesgo contaminación de aguas subterráneas
Fuente: traducido de Minh V. et al 2006

2.4.3 Delimitación de las zonas de riesgo

Consistió en el análisis y delimitación final de zonas de riesgo, verificación de los polígonos delimitados en las distintas zonas y la congruencia de los resultados obtenidos con la realidad.

Dentro de esta etapa se delimitarán las zonas pobladas, esto se hará mediante los mapas topográficos, se dibujarán los centros poblados, y al compararlos mediante SIG con las zonas de karst delimitadas, se obtendrá que área tiene más probabilidad de contaminación y esto definirá las bases para la delimitación de la contaminación potencial del agua subterránea.

Los geoprocesos a utilizar fueron las zonas coincidentes, esto significa que usando la metodología de la figura 6 se delimitaron áreas, por ejemplo las de flujo dominantes y captación superficial por aparte, una vez finalizados los mapas, se les colocaron las valoraciones de las tablas propuestas delimitando zonas de baja, media, alta y extrema, se sobrepusieron y se redibujaron las zonas coincidentes, es decir aquellas que cumplen con matriz correspondiente, en este caso la zona 1 de captación superficial y que tenga lo tipos a b y c del proceso dominante le será asignada una valoración de E, es decir extrema dando como resultado datos en formato vectorial. Esto se repitió en cada uno de los parámetros definidos en la figura 6 hasta definir el riesgo, se dará más detalle en la sección de interpretación de resultados.

Una vez delimitadas las áreas y definidos las zonas de contaminación y tomando en cuenta la localización, tipo de protección, áreas pobladas se dieron recomendaciones al respecto como, por ejemplo, determinar qué zonas deben ser de protección, que zonas pueden usarse para siembra y otro uso, con esto se sientan las bases para la protección de acuíferos.

2.4.4 Delimitación de las zonas kársticas

Este proceso responde al primer objetivo específico y consistió en delimitar las áreas con presencia de formaciones carbonatadas dentro del departamento de Alta Verapaz. Para ello se utilizó el mapa geológico del MAGA, complementado con la digitalización de dolinas obtenidas a partir de mapas topográficos del Instituto Geográfico Nacional a escala 1: 50,000. Mediante herramientas SIG se definieron las zonas kársticas que constituyen el área de aplicación de la metodología COST 620.

2.4.5 Establecimiento de los sistemas de flujo

Corresponde al segundo objetivo específico. Se aplicó el factor C de la metodología COST 620, utilizando información geológica, edáfica y topográfica para clasificar los procesos de flujo dominante en Tipo A, Tipo B y Tipo C. Asimismo, se delimitaron las zonas de captación superficial a partir del análisis de dolinas, corrientes superficiales y áreas de drenaje.

2.4.6 Delimitación de las zonas pobladas

En esta etapa se identificaron y digitalizaron los principales centros poblados del departamento utilizando la cartografía topográfica disponible. Posteriormente, esta información se

integró con las zonas kársticas mediante geoprocesamiento para identificar los sectores donde la presión antrópica coincide con áreas de mayor vulnerabilidad.

2.4.7 Establecimiento de las bases para la delimitación de la contaminación potencial del agua subterránea

Una vez definidos los factores O (capas sobreyacentes) y C (concentración del flujo), ambos fueron integrados mediante procesos de superposición espacial y álgebra de mapas en ArcGIS. La aplicación de las matrices de valoración propuestas por COST 620 permitió obtener el mapa de vulnerabilidad y delimitar las zonas con diferente potencial de contaminación.

2.4.8 Establecimiento de las bases para la protección de los acuíferos kársticos

Finalmente, los resultados obtenidos fueron analizados juntamente con la distribución de las áreas pobladas y las zonas de mayor vulnerabilidad, generando información técnica que constituye una base para la protección de los acuíferos kársticos y para apoyar el ordenamiento territorial del departamento de Alta Verapaz.

3. RESULTADOS

Los resultados se presentan siguiendo el mismo orden de los objetivos específicos planteados en la investigación, con el propósito de mantener la congruencia metodológica entre los objetivos. Cada apartado corresponde al resultado obtenido para uno de los procesos metodológicos desarrollados mediante la aplicación de la metodología COST Action 620 y el uso de Sistemas de Información Geográfica. Los resultados se presentan relacionados con los objetivos y son de carácter cualitativo.

3.1 Mapas temáticos

Siendo la metodología previamente expuesta, se crearon mapa de dolinas, mapa de componente O, mapa de componente C y mapa de vulnerabilidad de contaminación de acuíferos kársticos, con la ayuda del programa ArcMap 10.2.2. Se superpusieron los mapas y se intersectaron las zonas de interés, dejando valoraciones cualitativas descritas como L, M, H y E (*low, medium, high, extreme*; bajo, medio, alto y extremo) definiciones definidas por la metodología, lo que permitió obtener el mapa final.

3.1.1 Mapa de facto O. función protectora

Este mapa es útil para cualquier tipo de ambientes, representa la protección que tiene los acuíferos, representado por la capa de suelo que los recubre, dicho parámetro, está centrado en el grosor y permeabilidad de las capas que cubre los acuíferos. Dentro de la recopilación de material se tuvo acceso a las bases de datos creadas por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGA) en el año 1985 en proyección NAD 27, zona 15, dicha base de datos cuenta con archivos compatibles con GIS, siendo estos datos la base de este estudio, dentro de ella se cuenta con *shapes* de uso de suelo, poblados, clasificación de suelo, ríos, municipio, departamentos y otras más, que fueron resultado de un trabajo en sistemas de información geográfica y que representan los mapas temáticos que aún son usados en diversas instituciones.

Como primer paso se determinaron los tipos de suelo según la clasificación de USDA. La clasificación textural de suelos propuesta por el USDA se basa en la proporción relativa de arena, limo y arcilla que componen el suelo, permitiendo describir sus características físicas fundamentales³⁹

³⁹ United States Department of Agriculture (USDA). Soil Survey Manual. Washington, D.C.: USDA Handbook No. 18, 2017

Se definió esta base de clasificación porque define el tipo de permeabilidad que tienen los suelos, esto se puede observar en el cuadro 1, este mapa forma parte de la base de datos del MAGA 1985, esto consta en la figura 6.

Cuadro 1. Clase textural del suelo

Clase textural (USDA)	Fracción dominante	Permeabilidad relativa	Interpretación hidrogeológica
Arenoso	Arena	Muy alta ¹	Alta infiltración y baja retención hídrica; elevada vulnerabilidad a la contaminación.
Franco arenoso	Arena predominante	Alta ¹	Buen drenaje y moderada retención de agua; favorece procesos de recarga.
Franco	Arena-limo-arcilla	Media ¹	Balance entre infiltración y retención; comportamiento hidráulico estable.
Franco limoso	Limo predominante	Media a baja ²	Infiltración moderada; susceptible a compactación y sellado superficial.
Limoso	Limo	Baja ²	Drenaje lento; tendencia a saturación temporal del suelo.
Franco arcilloso	Arcilla moderada	Baja ¹	Limitada infiltración; incremento de escorrentía superficial.
Arcilloso	Arcilla	Muy baja ¹	Infiltración mínima; alta retención de agua y posible expansión volumétrica.

Fuente: tomado de *Soil Survey Manual*. Washington, D.C.: USDA Handbook No. 18, 201.

Se presenta entonces el mapa de clasificación textural de suelos, servirá para identificar la clase de cobertura que tiene las rocas, tomando como base el cuadro 1 para entender la permeabilidad presente.

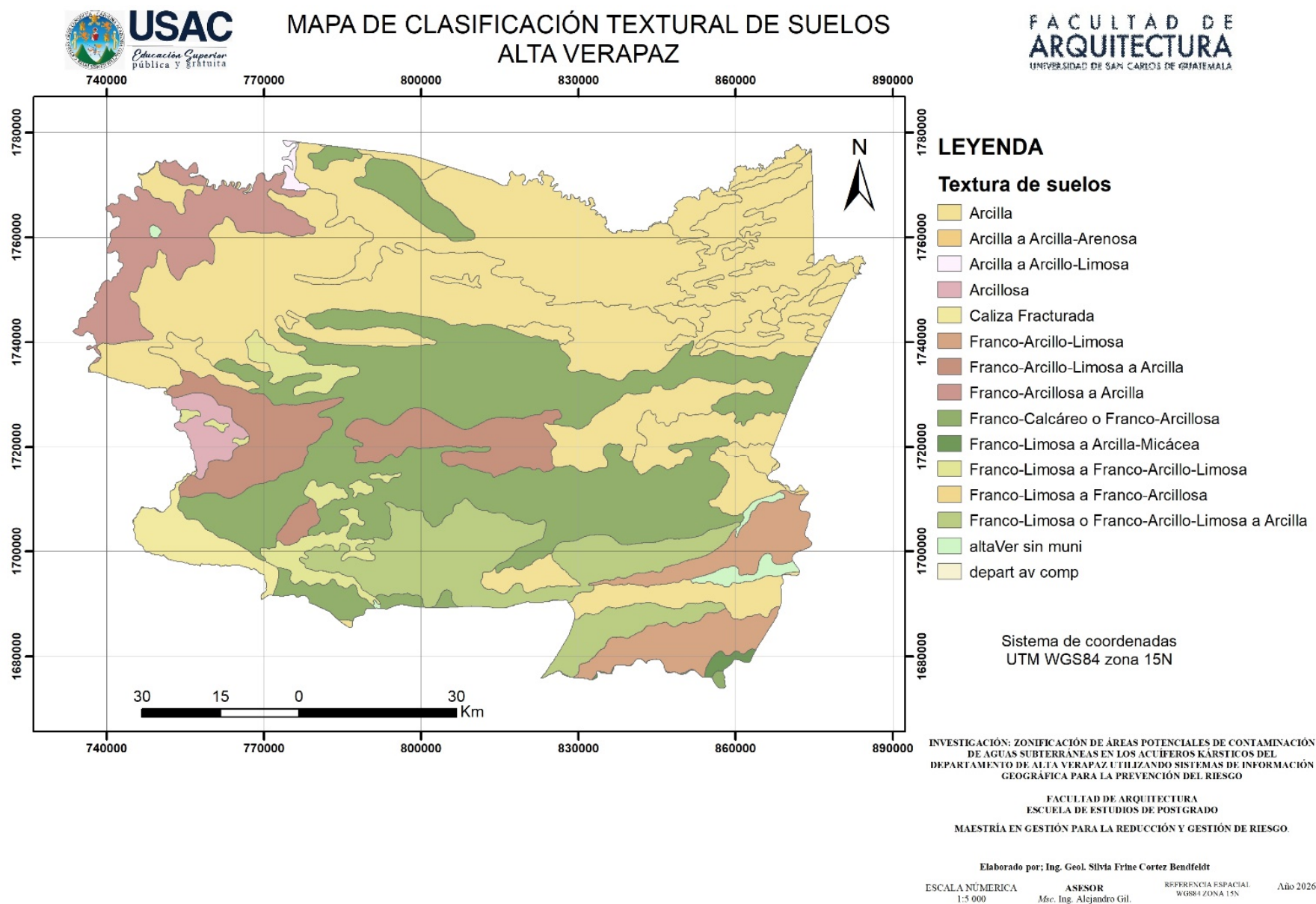


Figura 7 Mapa clasificación textural de suelos

Fuente: modificado MAGA 1985

La metodología considera el espesor de suelos (ver figura 6, factor O), dentro la información del MAGA, 1985 está el mapa de suelos, en la base de datos del mismo esta descrito el espesor total de suelos, usando esta información se definieron límites de espesores considerando el dato mayor, el menor y datos intermedios, dando como resultado los intervalos expuestos, dado que la metodología solo considera espesores menores de 30 cm y mayores de 2 metros, esta clasificación define mejor las áreas a considerar. En este caso y debido a que se trata de una investigación exploratoria se tomaron los datos proporcionados por MAGA, 1985 se trata de espesor de suelo formado.

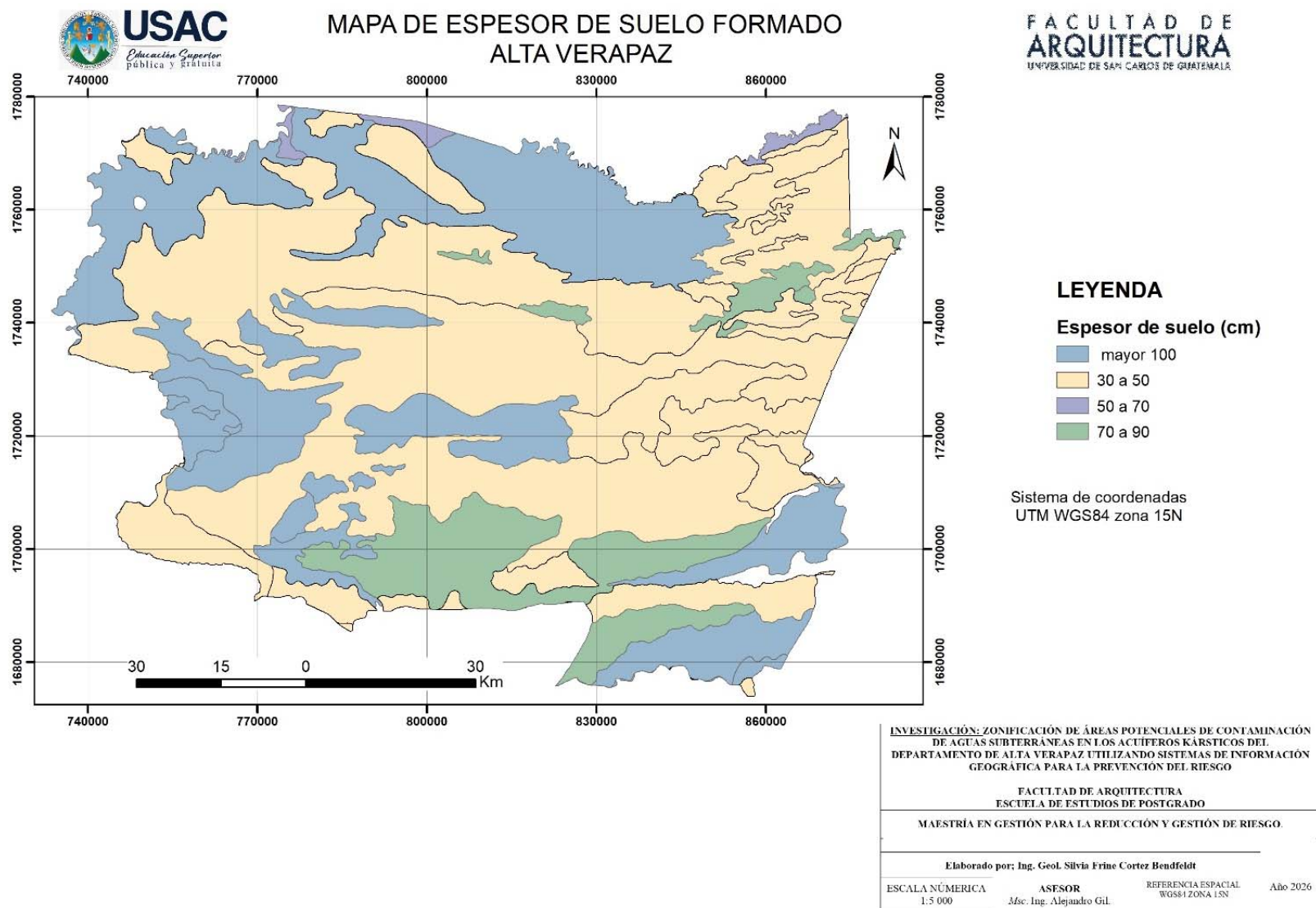


Figura 8 Mapa de espesores de suelos

Fuente: base en los datos proporcionados por MAGA, 1985

Y dio como resultado el siguiente mapa, figura 8, en el cual se marcan los espesores descritos en la metodología (figura 6). En este se aprecia que la mayor proporción de terreno tiene espesores de 30 a 50 cm con lo que se define que el terreno en su mayoría tiene una buena cobertura de suelo, a pesar de que las texturas de suelos indiquen alta permeabilidad.

No solo es necesario conocer los espesores sino se solicita saber si son permeables los suelos de cobertura o no, por lo cual se procedió a reclasificar usado para ello el cuadro 1 y el mapa de textura de suelos (figura 7), ubicando la permeabilidad al tipo de suelo que le corresponde para cada uno de los datos representados en el mapa. Lo siguiente fue relacionar el mapa de espesor de suelos con la permeabilidad al comparar ambos mapas se dibujaron las áreas donde se tiene baja infiltración y alto espesor, media infiltración y alto espesor y así con los demás criterios, con ello se creó el mapa O, Este factor se define como la protección superficial del terreno, esto es posible definiendo el tipo de suelo y el espesor de este y está representado en la figura 9.

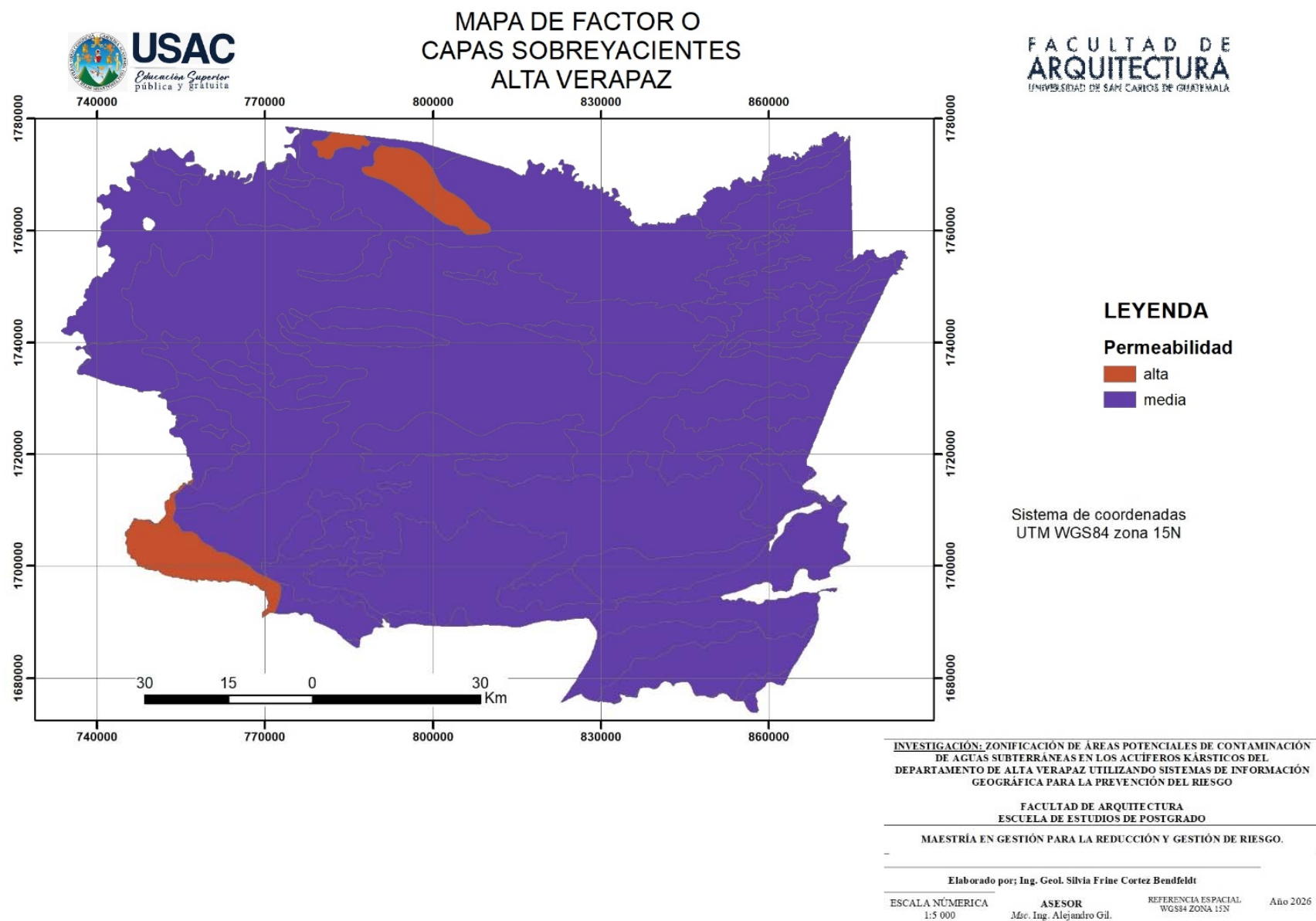


Figura 9 Mapa de factor O

Fuente: base en los datos proporcionados por MAGA 1985

El mapa de factor O muestra que la mayor parte del territorio se encuentra en una situación media (color morado), lo que considera que esta medianamente protegido, esto significa que el espesor de suelo es menor a 2 metros y son permeables, a pesar de ser formaciones permeables el espesor brinda una mejor protección.

La parte naranja, en menor proporción, se trata de zonas en las cuales la protección es alta y cuyas formaciones tienen baja a media permeabilidad y alto espesor de suelos, el alto espesor de suelos permite, a pesar de ser tipos de suelo más permeables que se tenga una mejor protección.

3.1.2 Mapa de proceso de flujo dominante

Para este mapa fue necesario definir el proceso de flujo dominante, este está compuesto de 3 tipos:

- **Tipo A:** la infiltración y percolación directa se lleva a cabo en formaciones de alta permeabilidad.
- **Tipo B:** situaciones intermedias
- **Tipo C:** esorrentía superficial frecuente tiene lugar en formaciones de baja permeabilidad.

Dado que se trata de tipo de rocas fue necesario generar el mapa geológico de Alta Verapaz, en el cual se muestran los tipos de roca. Este se observa en la figura 10

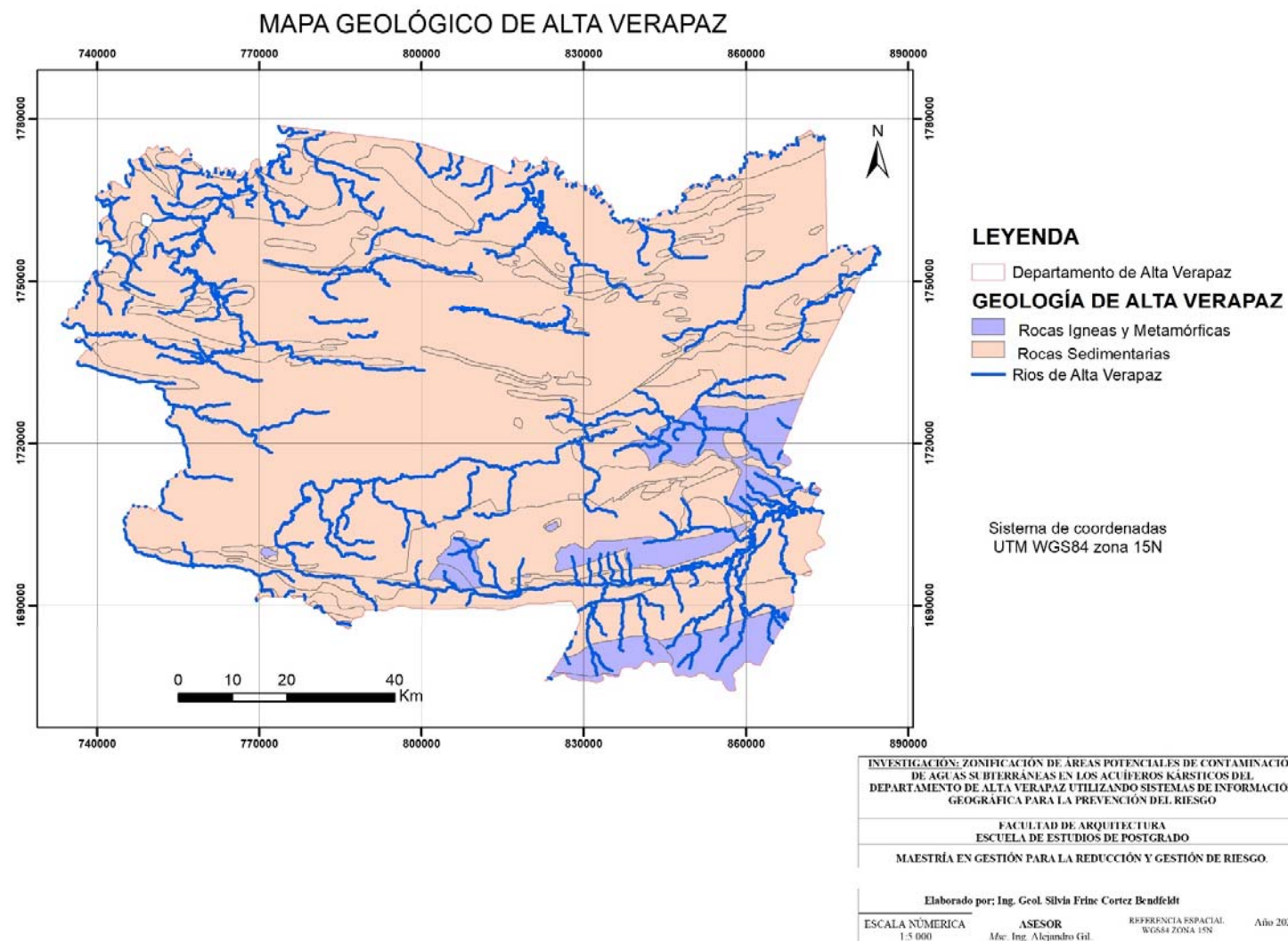


Figura 10 Mapa de geológico de Alta Verapaz

Fuente: base en los datos proporcionados por MAGA 1985

El mapa geológico describe el tipo de rocas reportado para esa área, dicho tipo de roca permite inferir la permeabilidad de estas. Usando el mapa geológico y con la permeabilidad de las rocas existentes se definió la categoría C el proceso de flujo dominante.

Las rocas aflorantes en el departamento se dividen en rocas sedimentarias de grano fino, permeables, rocas ígneas impermeables, rocas calizas impermeables, rocas metamórficas impermeables, por lo que se tiene solo tipo A y tipo C; las cuales se observan en el mapa de flujo dominante figura 11. El tipo de zona está relacionado a si hay infiltración o escorrentía, el factor O considera las capas protectoras, el factor C considera las rocas que se encuentran abajo, tomando como base su permeabilidad.

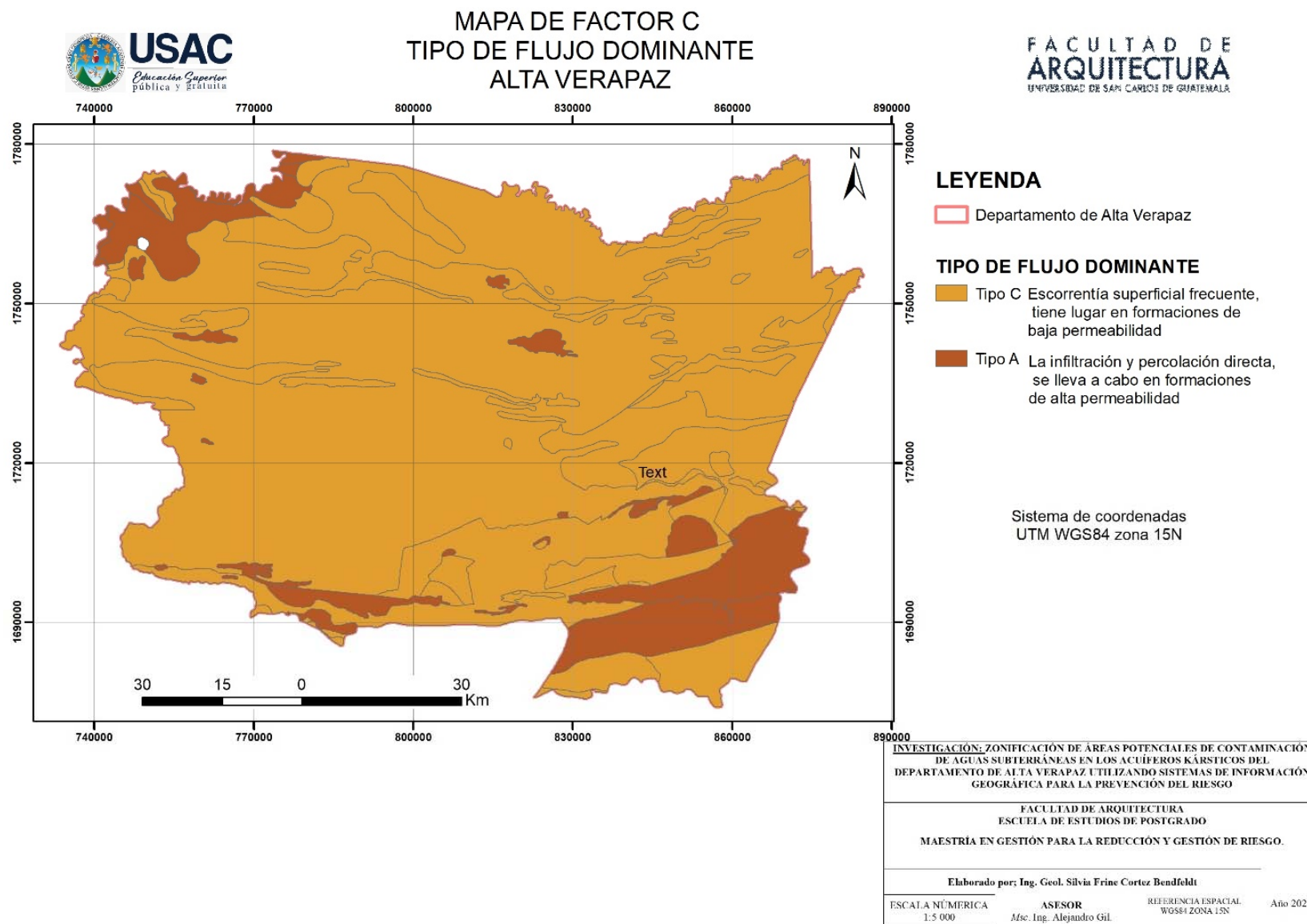


Figura 11 Mapa de tipos de flujo factor C

Fuente: base en los datos proporcionados por MAGA 1985.

3.1.3 Delimitación de zonas kársticas

El primer objetivo específico define la delimitación de la zona kárstica presente en el departamento de Alta Verapaz. Para ello se analizaron las formaciones carbonatadas, el espesor del suelo y la distribución de las dolinas, información que permitió identificar las áreas con mayor desarrollo del relieve kárstico. Los resultados obtenidos constituyen la base para la evaluación posterior de la vulnerabilidad a la contaminación.

a. Mapa de captación superficial

Para este mapa se definieron 4 zonas de la siguiente manera: zona 1: agujeros superficiales, ríos o quebradas que se sumergen y que están localizadas hasta a un km aguas arriba de los agujeros superficiales y una zona de amortiguamiento de 20 m a ambos lados de los ríos o quebradas que se infiltran; zona 2: el resto de las zonas de captación ríos o quebradas que se infiltran. Estas zonas son las que se encuentran más alejadas de las quebradas pero que se encuentran dentro del drenaje kárstico y a la zona de captación de agua; zona 3: áreas fuera de las zonas donde se infiltran los ríos o quebradas en los agujeros kársticos, pero dentro de la zona kárstica; zona 4: las áreas que drenan lateralmente fuera del sistema hidrogeológico kárstico.

Para lo cual es necesario definir las zonas que podrían ser kársticas, estas son las rocas carbonáticas, por lo que se genera el mapa respectivo basado en el mapa geológico de Guatemala, las zonas de celeste son las que pueden considerarse kársticas las cuales ocupan un área de 7,150.34 km².

Como también el parámetro C implica agujeros superficiales, se dibujaron las dolinas existentes tomando como base un mapa topográfico escala 1: 50,000, se incluyeron también los ríos de la región, todo esto consta en el mapa de formaciones kársticas figura 12.

A partir de ello se definió el mapa de captación superficial, que se muestra en la figura 13

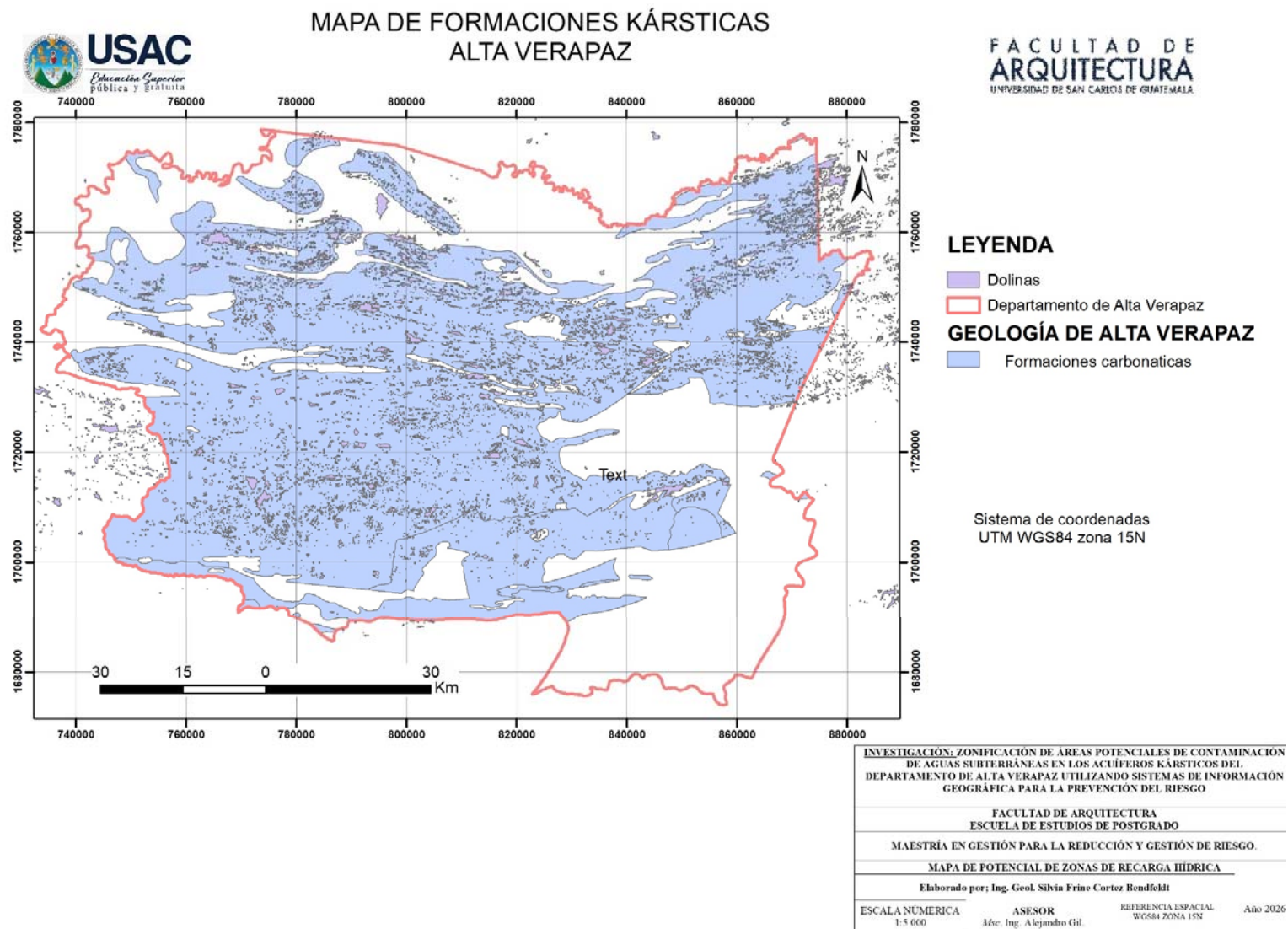


Figura 12 Mapa de formaciones kárstica
Fuente: esta investigación

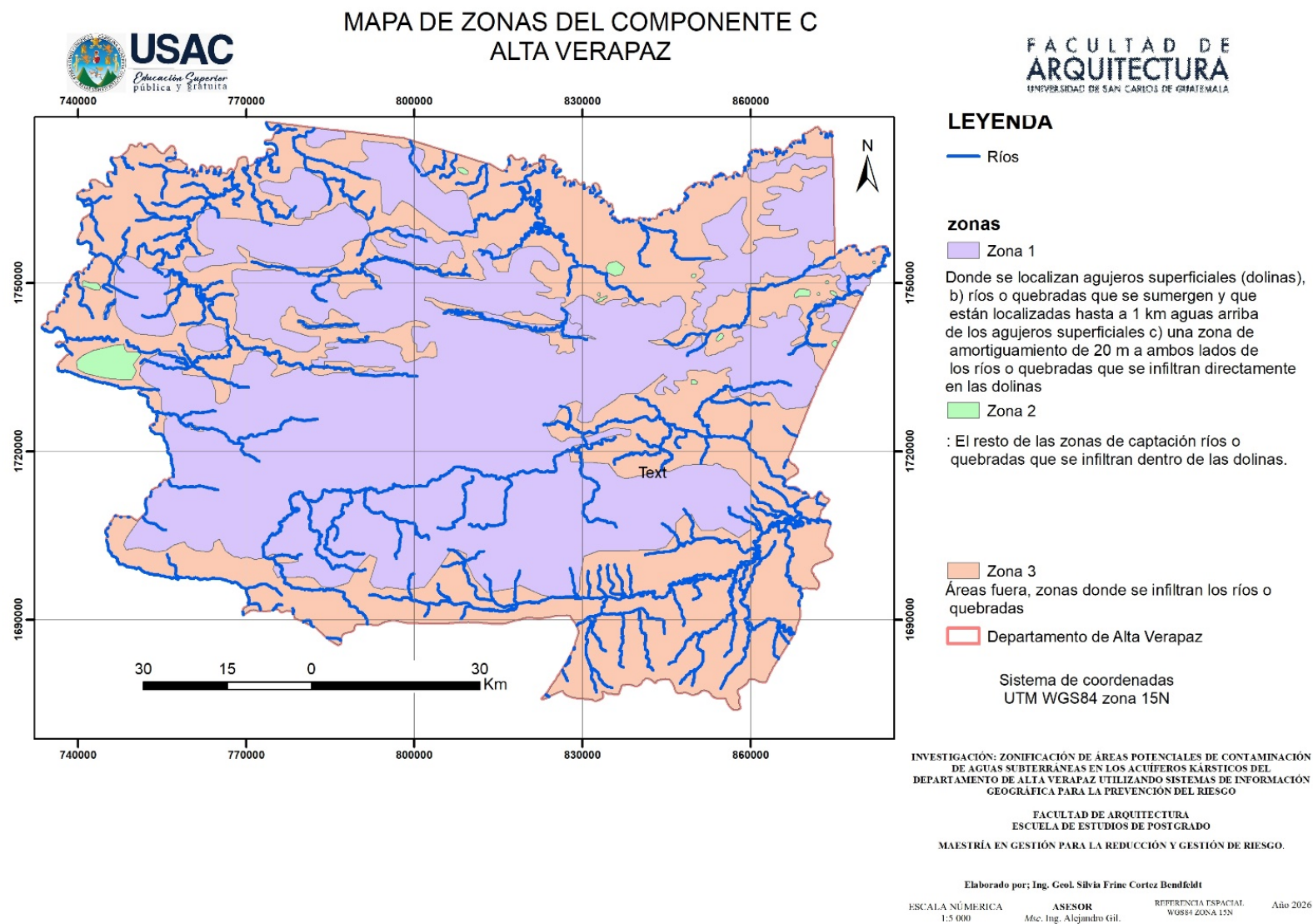


Figura 13 Mapa de zonas del componente C
Fuente elaboración propia

Dado que no existen zonas de drenaje fuera del área kárstica, solo se presentan tres zonas. La zona 1 con un área de 5,635.76 km² que corresponde a agujeros superficiales, corrientes que se pierden dentro de los agujeros, la siguiente en área es la zona 3 que corresponde a áreas fuera de la zona captación en agujeros kársticos, pero dentro de la zona de karst con una distribución superficial de 5,064.14 km² y por último la zona 2, que se refiere al resto de área de captación de los ríos dentro de las zonas kársticas con un área de 70.46 km².

3.1.4 Definición de sistemas de flujo

En cumplimiento del segundo objetivo específico, se analizó el comportamiento del flujo dominante mediante la aplicación del factor C de la metodología COST 620. Este análisis permitió establecer la forma en que el agua superficial ingresa al sistema kárstico y la influencia que este proceso tiene sobre la vulnerabilidad de los acuíferos

a. Mapa de concentración de flujo C

Usando los mapas proceso de flujo dominante y mapa de captación superficial con el cuadro 2 se definió:

La concentración del flujo dominante el tipo A sería el que más infiltra y tipo C el que menos lo hace, la zona 1 es donde los ríos corren directamente hacia la dolinas y zona 4 son las zonas más lejanas,

Si se tiene baja protección combinada con ríos que descarga directamente en dolinas se tienen zonas flujo concentrado extremo, es decir las zonas más vulnerables. Todos los que se localizan en la zona 1 no importando el tipo de protección siempre van a ser más vulnerables. El resultado de este cuadro es la definición del factor C, el cual delimita las zonas más vulnerables basados en los componentes kársticos y el flujo dominante, como se aprecia en la figura 12.

Cuadro: 2 Flujo de concentración C

Captación superficial	Proceso de flujo dominante			Solamente
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	
Zona 1	E	E	E	
Zona 2	L	M	H	
Zona 3	L	M	M	
Zona 4	L	L	L	
	Factor C Concentración del flujo			

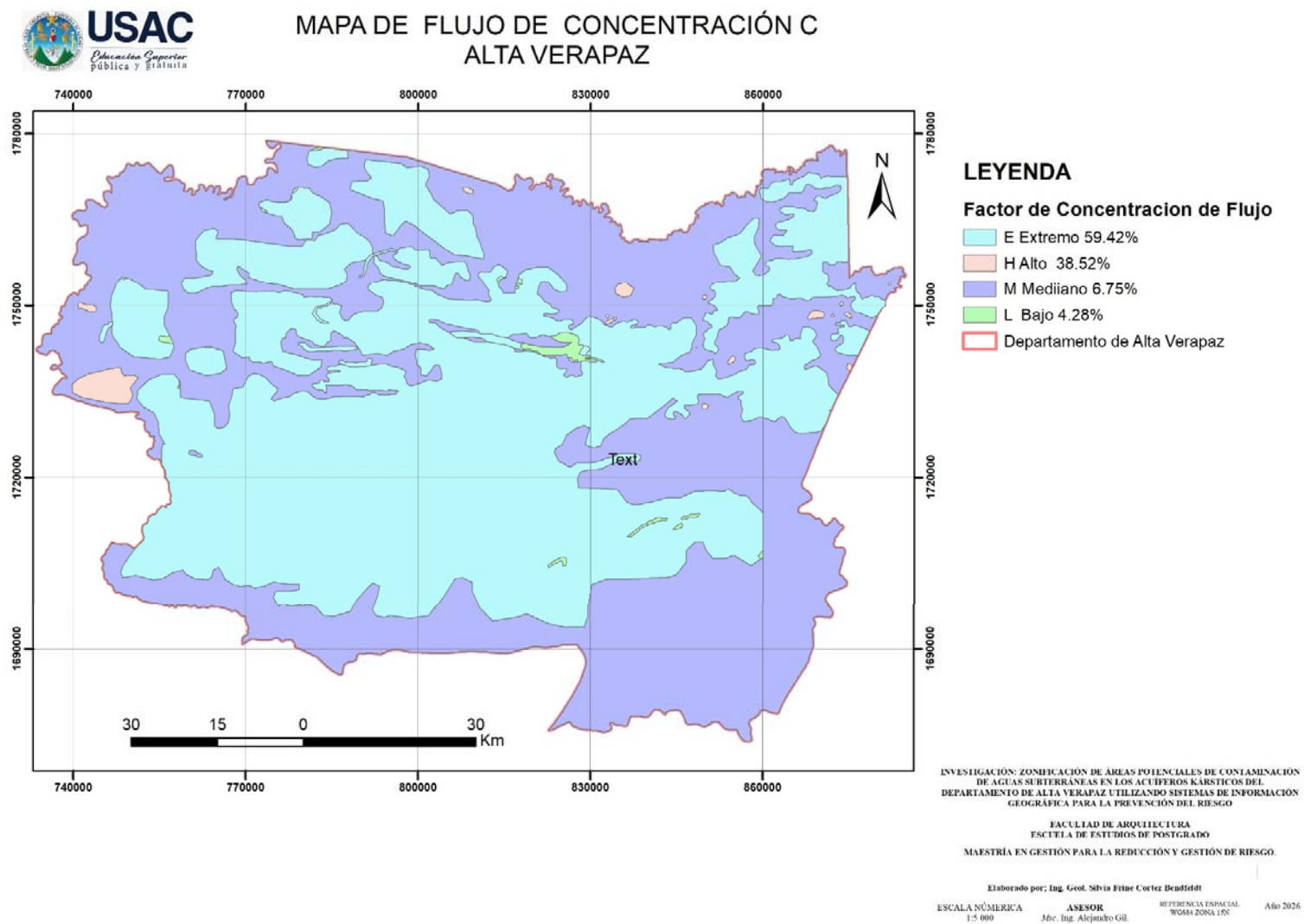


Figura 14 Mapa de concentración de flujo componente C

Fuente elaboración propia

Al analizar el mapa de la figura 14 se puede observar que la mayor área tiene una concentración de flujos es en el factor de concentración “extremo (E)”, con un área de 5,635.77 km² cuadrados que es un 50.42 % la mitad del área, seguido por el factor de concentración “medio (M)” con un área de 4,306.88 km² cuadrados que es un 38.52 %, el factor de concentración “bajo (L)” con un área de 756.20 km² que es un 6.75% y por último en el factor de concentración de flujo “alto (H)” con 479.25 km² que es menor porcentaje con un 4.28%. El factor, extremo indica que son las áreas con mayor susceptibilidad kársticas lo que implica una gran posibilidad de contaminación de aguas subterráneas, en este caso en la mayor extensión.

3.2 Delimitación de la contaminación potencial del agua subterránea

Una vez integrados los factores O y C mediante álgebra de mapas, se obtuvo la zonificación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos kársticos. Este resultado representa la susceptibilidad natural del medio geológico frente al ingreso de contaminantes provenientes de la superficie

a. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación

Usando los mapas se procesaron el mapa de factor C y mapa de factor O, usando el cuadro 3:

Cuadro 3 Factor O

Factor C	Factor O			Acuíferos kársticos solamente
	L	M	H	
E	E	E	E	
H	H	H	H	
M	H	M	M	
L	H	M	L	
	Vulnerabilidad del agua subterránea			Todos los acuíferos

Tomando en cuenta los atributos se hicieron las operaciones marcadas en el cuadro 3, da como resultado el mapa de la figura 15

En dicho mapa se observan las distribuciones a reales: el valor más alto es la vulnerabilidad extrema con un área de 5635.76 km² que es un 52.32%; la segunda posición son las zonas con vulnerabilidad media con 5,064 km² que es 47.02% para dejar de ultimo la vulnerabilidad alta con

un área de 70.47 km² que es un 0.65%. Con esto es posible definir que más de la mitad del territorio se localiza en vulnerabilidad extrema y toda el área del departamento de Alta Verapaz se encuentra con alto o extrema posibilidad de contaminación de aguas subterráneas relacionadas con karst.

.

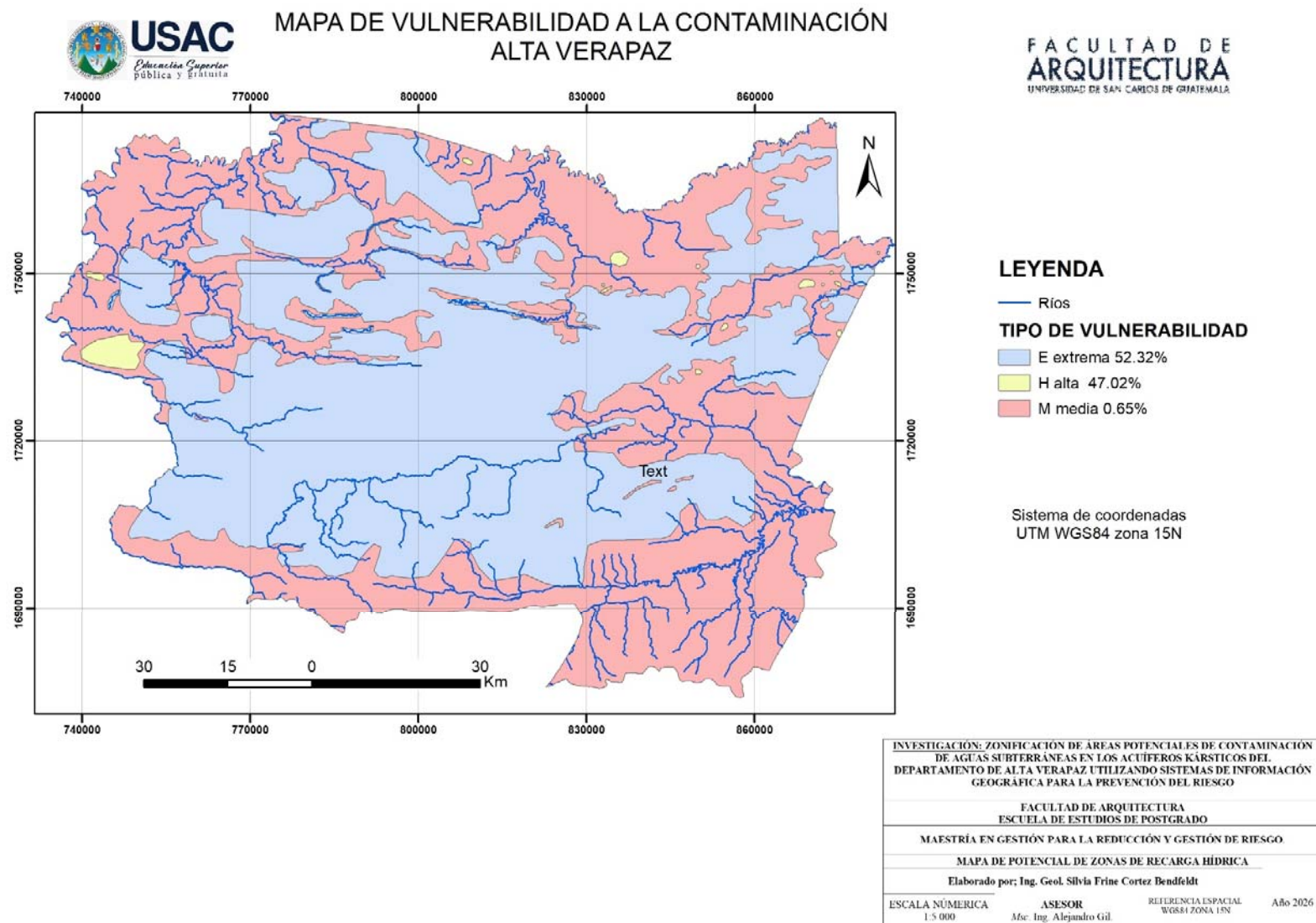


Figura 14 Mapa de vulnerabilidad de la contaminación
Fuente: elaboración propia

3.3 Delimitación de las zonas pobladas

Como parte del tercer objetivo específico identificación de zonas pobladas, se delimitaron las principales áreas pobladas del departamento, con el propósito de reconocer los sectores donde existe una mayor presión antrópica sobre los acuíferos kársticos. Esta información constituye un elemento fundamental para interpretar posteriormente la distribución espacial del riesgo potencial de contaminación.

a. Mapa de riesgo

Para obtener el mapa de riesgo fue necesario contar con los polígonos correspondientes a las poblaciones, dicha capa se sobrepuso con el de vulnerabilidad y se obtuvo el mapa de riesgo que puede observarse en la figura 15.

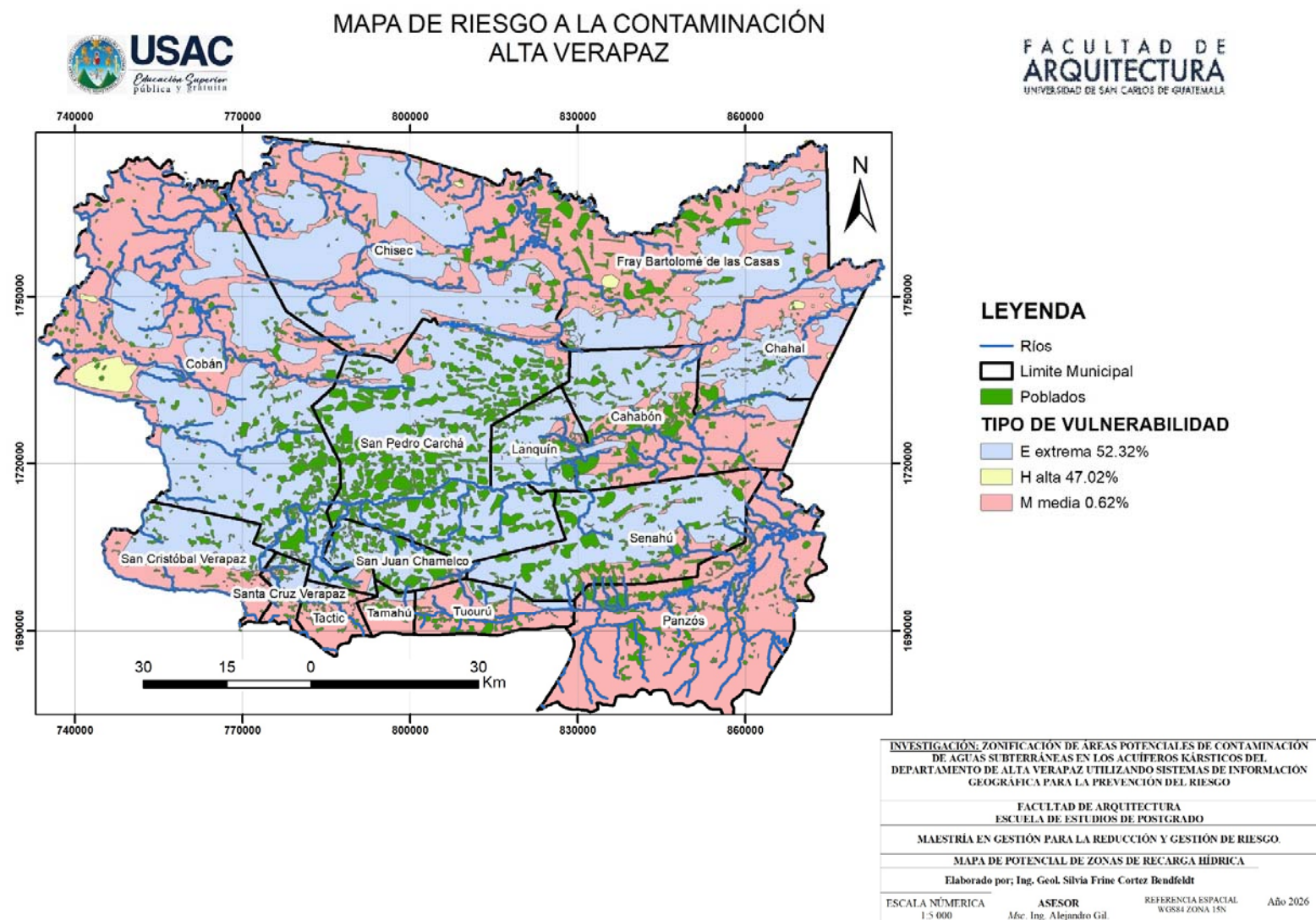


Figura 15 Mapa de riesgos de la vulnerabilidad a la contaminación.

Fuente: elaboración propia.

Donde los polígonos de color verde son los poblados, se puede apreciar el límite departamental, así como en qué tipo de vulnerabilidad se puede ubicar, es necesario hacer mención que, no fue posible contar con especificaciones de la vivienda por lo que se tendrá solamente zonas de riesgo en general.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se identificaron tres zonas de riesgo de contaminación en los acuíferos kársticos del departamento: extrema (E), alta (H) y media (M), sin registrarse áreas clasificadas como de baja vulnerabilidad. Este resultado evidencia que gran parte del territorio presenta condiciones hidrogeológicas altamente susceptibles a la contaminación.

La elevada vulnerabilidad de los acuíferos kársticos se explica por sus características hidrogeológicas, entre ellas la elevada permeabilidad secundaria generada por fracturas y procesos de disolución, el desarrollo de cavidades y conductos, así como la presencia de dolinas y sumideros que favorecen la infiltración rápida del agua superficial y el transporte acelerado de contaminantes hacia el acuífero (Daly et al., 2002; Stringfield et al., 1979), estas estructuras actúan como puntos de recarga directa, permitiendo que los contaminantes ingresen al sistema subterráneo con escasa o nula filtración natural.

Como consecuencia, el drenaje hídrico en gran parte del departamento ocurre predominantemente en el subsuelo, siendo alimentado principalmente por la precipitación. En este tipo de sistemas, los contaminantes pueden desplazarse rápidamente a través de conductos kársticos, lo que dificulta la identificación de su trayectoria y de los puntos de descarga final. Esta dinámica incrementa significativamente el riesgo de deterioro de la calidad del agua subterránea y resalta la necesidad de implementar medidas de planificación territorial orientadas a la protección de los acuíferos.

Según el mapa, los municipios que se encuentran menos vulnerables son Chisec con un 4 % de riesgo, Chahal con un 20 % de riesgo, parte norte de Cobán con un 20 % de riesgo, Panzos, no tiene vulnerabilidad extrema. Siendo los más vulnerables, San Pedro Carcha con un 50 % de riesgo, San Juan Chamelco, con un 60 % de riesgo, la parte sur de Cobán con un 40 % de riesgo, Senahú con un 40 % de riesgo, Lanquín que tiene una vulnerabilidad extrema del 80 % debido a estar menos poblada solamente tiene un 30 % de riesgo y Cahabón con un 30 % de riesgo, algunas zonas altamente pobladas, otras en vías de serlo, lo que aumenta la necesidad de hacer estudios más detallados para definir rutas de contaminación y determinar el tipo de edificios que se encuentran en las localidades mencionados.

El mapa de dolinas elaborado en esta investigación evidencia una alta concentración de depresiones kársticas en amplios sectores del departamento. La abundancia de estas geoformas indica una intensa actividad de los procesos de disolución y un sistema kárstico funcional, en el que la infiltración concentrada del agua superficial ocurre a través de dolinas y sumideros. Estas condiciones no solo incrementan la vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación, sino que también favorecen la ocurrencia de subsidencias, derrumbes y colapsos localizados asociados al desarrollo y evolución de cavidades subterráneas⁴⁰.

De acuerdo con el mapa geológico del área de estudio, el análisis se centró en las unidades litológicas de composición carbonatada, debido a que este tipo de rocas constituye el principal sustrato susceptible a procesos de karstificación mediante la disolución de minerales carbonatados, especialmente calcita y dolomita. No obstante, la presencia de rocas carbonatadas no implica necesariamente el desarrollo de formas kársticas superficiales, como las dolinas.

La génesis y distribución de estas depresiones dependen de la interacción de diversos factores geológicos, hidrológicos y climáticos, entre ellos el grado de fracturamiento de la roca, la permeabilidad secundaria, la circulación de aguas meteóricas ligeramente ácidas, el tiempo de evolución del relieve, la estructura geológica y el espesor de la cobertura edáfica. En consecuencia, existen sectores con afloramientos carbonatados donde no se registran dolinas, debido a que las condiciones necesarias para el desarrollo de procesos avanzados de karstificación no se encuentran presentes o no han alcanzado un grado suficiente de evolución⁴¹.

Esta situación puede explicarse por diferentes factores geológicos. En primer lugar, algunas de estas formaciones corresponden a dolomitas y no exclusivamente a calizas. La dolomita es una roca carbonatada compuesta principalmente por carbonato doble de calcio y magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). A diferencia de las calizas, cuya composición está dominada por calcita, las dolomitas presentan una menor velocidad de disolución cuando interactúan con aguas meteóricas ligeramente ácidas. Como consecuencia, los procesos de karstificación suelen desarrollarse de forma más lenta y, en muchos casos, las manifestaciones superficiales del relieve kárstico, como

⁴⁰ Tony Waltham, Fred G. Bell y Martin G. Culshaw, Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction (Berlin: Springer, 2005), 205–243

⁴¹ Ford, D. C., & Williams, P. W. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. Chichester: John Wiley & Sons

dolinas, lapiazes y sumideros, son menos abundantes o desarrolladas. Sin embargo, esto no significa que las dolomitas sean inmunes a la karstificación, ya que la formación de estos rasgos depende también de factores como el grado de fracturamiento de la roca, la circulación del agua, las condiciones climáticas y el tiempo de evolución geológica del sistema (Ford y Williams 2007; Palmer 2007).

El desarrollo del relieve kárstico no ocurre de manera homogénea en todas las zonas donde afloran rocas carbonatadas. Aunque la litología constituye el factor fundamental para la formación del karst, la evolución de estas geoformas también está condicionada por otros elementos del medio físico. Entre ellos destacan el espesor del suelo, la cobertura vegetal, el grado de fracturamiento de la roca, la disponibilidad de agua y las condiciones hidrológicas, los cuales influyen en la velocidad con que se producen los procesos de disolución, estos son los factores que se evalúan en esta investigación.

En áreas donde las formaciones carbonatadas permanecen cubiertas por depósitos de suelo relativamente espesos, el desarrollo de dolinas y otras formas kársticas superficiales puede ser más lento o incluso no manifestarse en la superficie, aun cuando los procesos de disolución continúen desarrollándose en el subsuelo. Esta situación explica que en algunas zonas del departamento no se registren dolinas visibles, pese a la presencia de rocas carbonatadas susceptibles a la karstificación (Ford y Williams 2007; Goldscheider y Drew 2007; Palmer 2007).

En este contexto, el uso de dolinas como sitios para la disposición de residuos sólidos o como puntos de descarga de aguas residuales representa una de las fuentes potenciales de contaminación más importantes en ambientes kársticos. La infiltración directa de lixiviados y efluentes puede facilitar el transporte de compuestos químicos, nutrientes, microorganismos patógenos y metales hacia el acuífero en períodos relativamente cortos, afectando la calidad del recurso hídrico y aumentando la vulnerabilidad ambiental del sistema. Adicionalmente, la infiltración permanente de aguas con características químicas distintas a las naturales puede modificar localmente los procesos de disolución de las rocas carbonatadas, favoreciendo la evolución de las cavidades y la ampliación progresiva de las depresiones kársticas (Palmer 2007; Waltham, Bell y Culshaw 2005)

Es necesario poner en evidencia que las acciones de gestión territorial orientadas a la protección de los acuíferos kársticos deben enfocarse principalmente en la conservación del suelo en las zonas donde predominan formaciones carbonatadas, evitar la construcción de infraestructura sobre dolinas o áreas que presenten evidencia de karst activo, ya que estas estructuras funcionan como puntos de infiltración directa hacia el sistema subterráneo, que como ya se explicó aumenta el riesgo a contaminación.

Parte importante de los riesgos derivados es el uso de dolinas como sitios de disposición de residuos sólidos o como puntos de descarga de aguas residuales, debido a que estas prácticas favorecen la infiltración directa de contaminantes hacia los acuíferos. Este tipo de actividades no solo incrementa el riesgo de contaminación del agua subterránea, sino que también puede acelerar los procesos de disolución y ampliación de las dolinas.

A pesar de que esta metodología permite definir las zonas vulnerables, no se tiene registro de los grados de contaminación actuales que permitan tener una idea de cuánto ha avanzado y que áreas son las afectadas, si bien el karst aumenta el riesgo, no define qué áreas están contaminadas per se si no cuales son susceptibles, es posible que aún no esté contaminadas, también es de hacer notar que tampoco se cuenta con información relacionada a el efecto de los cascos urbanos en la calidad de agua, cosa que sería necesaria a la hora de toma de decisiones.

La distribución de las actividades económicas sobre escenarios kársticos constituye un factor determinante en la evaluación del riesgo de contaminación de los acuíferos. Si bien la vulnerabilidad intrínseca describe la susceptibilidad natural del sistema hidrogeológico, el riesgo ambiental resulta de la interacción entre dicha vulnerabilidad y las características de las fuentes potenciales de contaminación. En este sentido, el tipo de establecimiento, los procesos que desarrolla y la forma en que gestiona sus residuos condicionan la naturaleza, magnitud y frecuencia de las cargas contaminantes que pueden alcanzar el acuífero. Por esta razón, actividades como vertederos, rastros, estaciones de servicio, industrias, talleres mecánicos o plantas de tratamiento generan presiones ambientales distintas a las producidas por centros educativos, oficinas o áreas residenciales, debido a las diferencias en el volumen de residuos, la composición química de los efluentes y el potencial de liberación de contaminantes.

En consecuencia, la integración de la información sobre el uso del suelo y la localización de actividades antrópicas con los mapas de vulnerabilidad permite realizar una evaluación más objetiva del riesgo y constituye un insumo técnico para la planificación territorial y la protección de los recursos hídricos (Daly et al. 2002; Zwahlen 2004; Foster, Hirata y Andreo 2013).

Los temas de aguas residuales y basureros son más delicados en este tipo de escenarios, no contar con instalaciones adecuadas y monitoreo constante hacen que se tenga una bomba de tiempo que, quizás no hoy ni mañana pero eventualmente resultará en un aumento de la contaminación y la posibilidad de no contar con agua limpia en el futuro, de allí la importancia de contar con estudios de este tipo que puedan aportar a las comunidades y se pueda prevenir para fortalecer la seguridad hídrica en el departamento. El acceso al agua potable es un derecho con el que todo ser humano debe contar.

Por tanto, se confirma la hipótesis, debido a que en Alta Verapaz existen zonas específicas con abundantes manifestaciones de karts activo, que es donde se concentran las zonas de riesgo a contaminación en acuíferos kársticos.

CONCLUSIONES

1. Las formaciones carbonatadas dominan el sistema hidrogeológico de Alta Verapaz, abarcando unos 7,150 km². La abundancia de dolinas y rasgos kársticos en este territorio funciona como un pase directo para el agua superficial hacia el subsuelo; esto anula casi por completo la capacidad de filtración natural del terreno y deja a los acuíferos altamente expuestos a la contaminación.
2. Al aplicar la metodología COST 620 permitió entender cómo se mueve el agua en la región, identificando tres flujos principales: infiltración rápida y directa (tipo A), condiciones intermedias (tipo B) y escorrentía superficial (tipo C), donde predomina la escorrentía superficial debido a una menor permeabilidad. Conocer esta dinámica ha sido clave para comprender por qué el agua subterránea del área es tan vulnerable.
3. El análisis espacial de concentración de flujo de agua revela un panorama crítico: más de 5,635 km² del territorio presentan una capacidad extrema que es un 50.42 %, seguida por la categoría media con 4,306 km² que es un 38.52 %, la baja con 756 km² que es un 6.75 % y el alta con 479 km² que es un 4.28 % para transportar líquidos hacia el subsuelo. Esto confirma que una inmensa mayoría de la región funciona como un embudo directo que podría arrastrar rápidamente cualquier contaminante hacia los acuíferos kársticos.
4. La zonificación de la vulnerabilidad tiene un impacto desigual a nivel municipal. Lugares como San Pedro Carchá, San Juan Chamelco, Lanquín, Cahabón, Senahú y el sur de Cobán enfrentan el riesgo más alto. Lo más alarmante es que estas zonas extremadamente frágiles coinciden con los mayores asentamientos poblacionales, lo que multiplica el riesgo de que la actividad humana contamine las fuentes de agua que abastecen a sus propios habitantes.
5. Los municipios que se encuentran menos vulnerables son Chisec con un 4 % de riesgo, Chahal con un 20 % de riesgo, parte norte de Cobán con un 20 % de riesgo, Panzos, no tiene vulnerabilidad extrema. Siendo los más vulnerables, San Pedro Carcha con un 50 % de riesgo,

San Juan Chamelco, con un 60 % de riesgo, la parte sur de Cobán con un 40 % de riesgo, Senahú con un 40 % de riesgo, Lanquín que tiene una vulnerabilidad extrema del 80 % debido a estar menos poblada, solamente tiene un 30 % de riesgo y Cahabón con un 30 % de riesgo.

6. Los mapas de vulnerabilidad generados permiten integrar las condiciones hidrogeológicas para convertirse en instrumentos para el ordenamiento territorial. Su aplicación facilita la identificación de áreas donde determinadas actividades productivas pueden representar un mayor potencial de contaminación de los acuíferos, considerando que el tipo de actividad determina.
7. La zonificación mediante la metodología COST 620 permitió delimitar para Alta Verapaz: la vulnerabilidad extrema que domina el paisaje, abarcando más de 5,635 km² que es un 52.32 %, seguida de zonas con vulnerabilidad media con 5,064 km² que es 47.02 % y alta con 70 km² que es un 0.65 %. Estos resultados evidencian que gran parte del territorio posee condiciones hidrogeológicas que favorecen la rápida infiltración del agua y, por consiguiente, presentan una elevada susceptibilidad a la contaminación cuando existen fuentes contaminantes en la superficie.
8. La zonificación obtenida comprobó la eficacia de la metodología COST 620, la cual constituye una herramienta factible para identificar y diagnosticar la fragilidad natural del entorno en los acuíferos kársticos. Sin embargo, la evaluación realizada representa únicamente la susceptibilidad natural y no el estado actual de contaminación del agua subterránea.

RECOMENDACIONES

- Implementar comprobaciones de campo para verificar la validez del modelo desarrollado y para realizar el análisis a un mayor detalle de riesgos de contaminación para toma de decisiones a nivel local.
- Establecer zonas de protección en las áreas clasificadas con vulnerabilidad alta y extrema, especialmente en aquellas donde se identificaron dolinas y otros rasgos kársticos. En estas zonas debe limitarse el desarrollo de actividades potencialmente contaminantes, con el fin de reducir el riesgo de infiltración directa hacia los acuíferos.
- Evaluar la ubicación y las condiciones de los basureros municipales y clandestinos existentes en el departamento, con el propósito de evitar su localización en zonas kársticas vulnerables. Asimismo, se sugiere promover la implementación de rellenos sanitarios técnicamente adecuados, que incluyan sistemas de impermeabilización y manejo de lixiviados.
- Evitar el uso de dolinas como sitios de disposición de residuos o como puntos de descarga de aguas residuales, debido a que estas estructuras funcionan como vías directas de infiltración hacia el sistema subterráneo, lo que incrementa significativamente el riesgo de contaminación de los acuíferos.
- Que las municipalidades del departamento de Alta Verapaz incorporen los mapas de vulnerabilidad generados en esta investigación dentro de sus instrumentos de planificación territorial, tales como los planes de ordenamiento territorial y los planes de desarrollo municipal. Esto permitiría regular el uso del suelo en zonas kársticas vulnerables y reducir el riesgo de contaminación de los acuíferos.

BIBLIOGRAFÍA

Centro de Computacion Universidad de Chile. *Apuntes de hidrogeologia*. s.f.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe-Caribbean and Latin America. *Morfología kárstica*. s.f. CEPAL-CALA http://www.redes-cepalcala.org/ciencias1/geologia/geomorfologia/karst_marcos.htm.

Chavarría, Luis. *Vulnerabilidad intrínseca de acuíferos kársticos en un área de 16 km², en los alrededores de las aldeas Chicuxab, Tontem y Tres Cruces, Cobán Alta Verapaz*. Tesis de licenciatura, Universidad San Carlos de Guatemala, 2019.

Congreso de la República de Guatemala. *Constitución Política de la República de Guatemala (Guatemala: Asamblea Nacional Constituyente, 1985)*. Guatemala, 1986.

Congreso de la Republica de Guatemala. *Ley de proteccion y mejoramiento del medio ambiente, decreto número 68-86*. Guatemala, 1986.

Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu. *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*. Editado por & Zwahlen, F. I. C. COST action 620, 2002.

Enger, Eldon D., y Bradley F. Smith. *Ciencia ambiental: un estudio de interrelaciones*. (McGraw-Hill Interamericana) 10 (2006).

European Commission. *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*. COST action 620, 2003.

Ford, D. C., & Williams, P. W. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Editado por Chichester: John Wiley & Sons. 2007.

Ford, Derek C., and Paul W. Williams. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. *Hydrogeology Journal* 14, nº 5 (2006): 707-720.

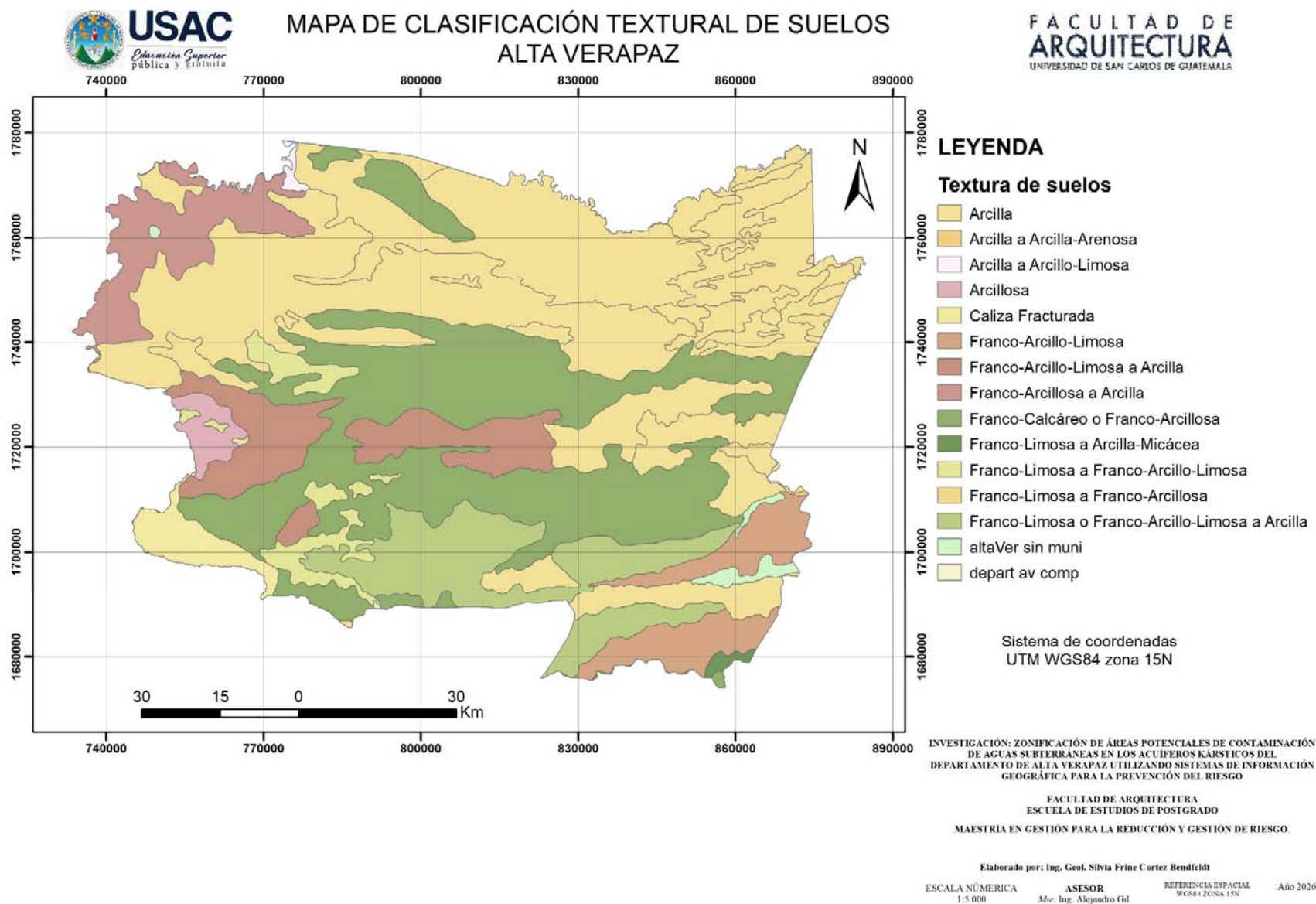
- Foster, S., Hirata, R., & Andreo, B. The aquifer pollution vulnerability concept: Aid or impediment in promoting groundwater protection?» *Hydrogeology Journal* 21, nº 7 (2013): 1389-1392.
- García, Jimena. *Cuevas de Se'tzol, un destino místico en Alta Verapaz*. 11 de abril de 2024. <https://www.guatemala.com/guias/pasatiempos/cuevas-de-setzol-un-destino-mistico-en-alta-verapaz/>
- Gobierno de Guatemala (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales). «Proyecto de conservación del acuífero de la cuenca del río Chixoy, Guatemala. Informe Final del Proyecto.» 2013.
- Goldscheider, Nico, and David Drew. *Methods in Karst Hydrogeology*. London: Taylor & Francis, 2007.
- González, F., Pérez, L., y Martínez, C. «Evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos kársticos mediante la metodología COST 620 en México.» *Revista de Hidrogeología Latinoamericana*, 2015: 45-60.
- Guatemala.com. *Cuevas de Candelaria Muchbilhá, un lugar de aventura en Alta Verapaz*. 15 de 09 de 2026. <https://www.guatemala.com/guias/aventura/cuevas-de-candelaria-mucbilha-un-lugar-de-aventura-en-alta-verapaz/>.
- Gutiérrez, M. *Geomorfología. Madrid*. Madrid: Pearson Educación, S.A, 2008.
- Hernández, R., y et al. «Los acuíferos de la Provincia de Segovia.» Editado por Tejero I. *Metodología de la investigación* (McGraw-Hill Education), 2014.
- Instituto Geográfico Nacional. *Hojas topográficas de Alta Verapaz, Guatemala*. Instituto Geográfico Nacional. Ecs. 1: 50,000.» Guatemala: color, 1968.
- J., Ordoñez. *Aguas subterráneas—acuíferos cartilla técnica*. Foro Peruano para el Agua—GWP Perú, Lima: Secretaria geográfica de lima., 2014.

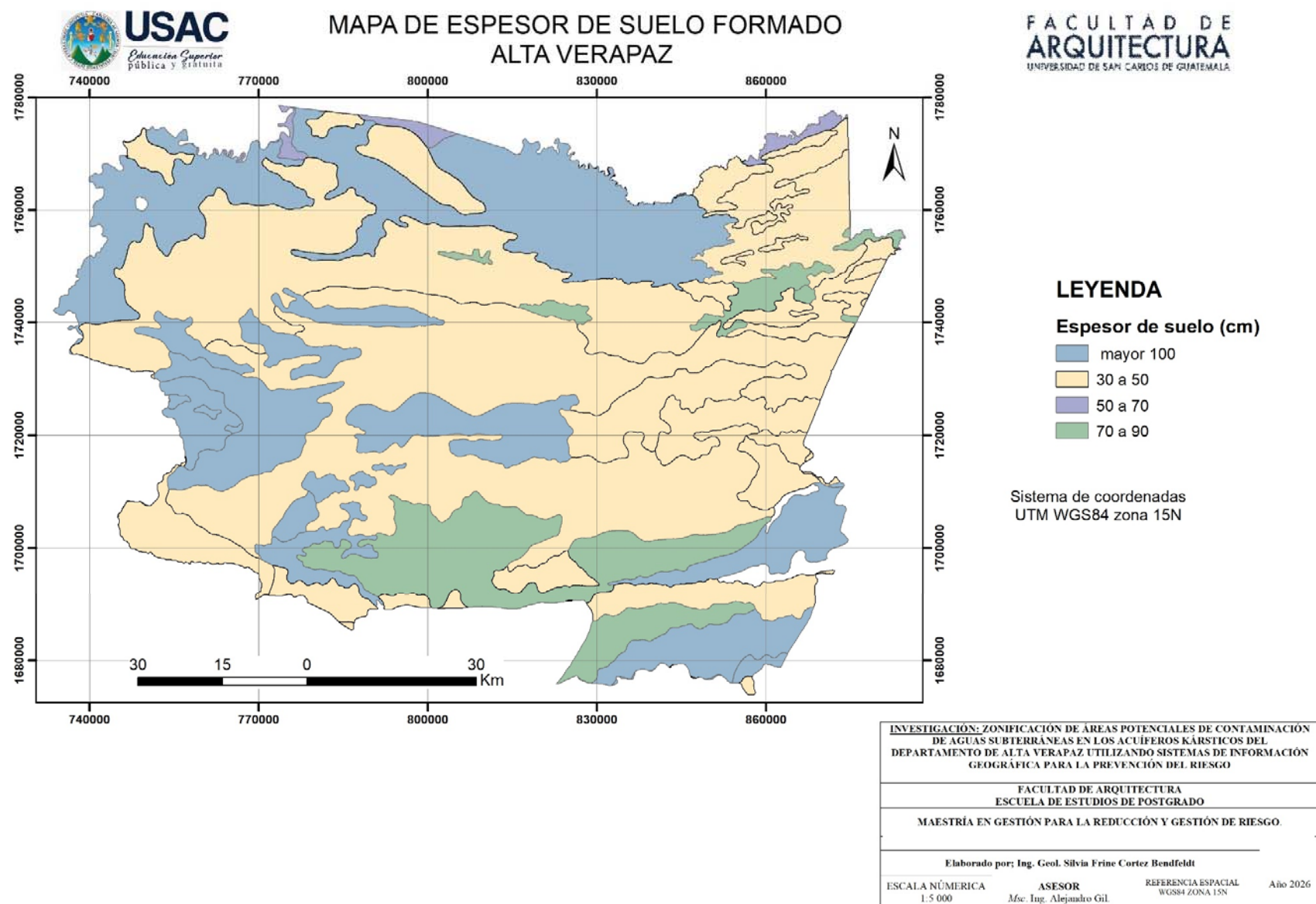
- Machorro, Luis Chiquin & Rudy. Caracterización geológica del karst en la porción sur de Alta Verapaz, Guatemala. *Boletín Informativo de la Comisión de Geoespeleología, Federación Espeleológica de América Latina y del Caribe (FEALC)*. Guatemala : S.E., 2003.
- Machorro, R. *Hidrogeología física principios y aplicaciones*. Guatemala. Guatemala: Sociedad Geológica de Guatemala., 2008.
- Machorro, R. *Potenciales de contaminación de aguas subterráneas en los acuíferos kársticos*. Proyecto FODECIT 01-02, 2005.
- Mendoza, J., y et al. «Impacto de la agricultura intensiva en la contaminación de acuíferos kársticos en la región del Petén, Guatemala.» *Journal of Environmental Management* 25, nº 3 (2019).
- Minh V, Goldscheider N. «A Simplified Methodology For Mapping Groundwater vulnerability And Contamination Risk, And Its First Application In A Tropical Karst Area.» *Vietnam Hydrogeology Journal* 1 (2006): 1-10.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental, Acuerdo Gubernativo No. 137-2016*. Guatemala, 2016.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos Comunes, Acuerdo Gubernativo No. 164-2021*. Guatemala, 2021.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Reglamento de evaluación, control y seguimiento ambiental: Acuerdo Gubernativo 23-2003*. Guatemala, 2003.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, Acuerdo Gubernativo No. 236-2006*. Guatemala, 2006.
- Moreno-Gómez, M., Martínez-Salvador, C., Liedl, R., Stefan, C., & Pacheco, J. «First application of the Integrated Karst Aquifer Vulnerability (IKAV) method – Potential and

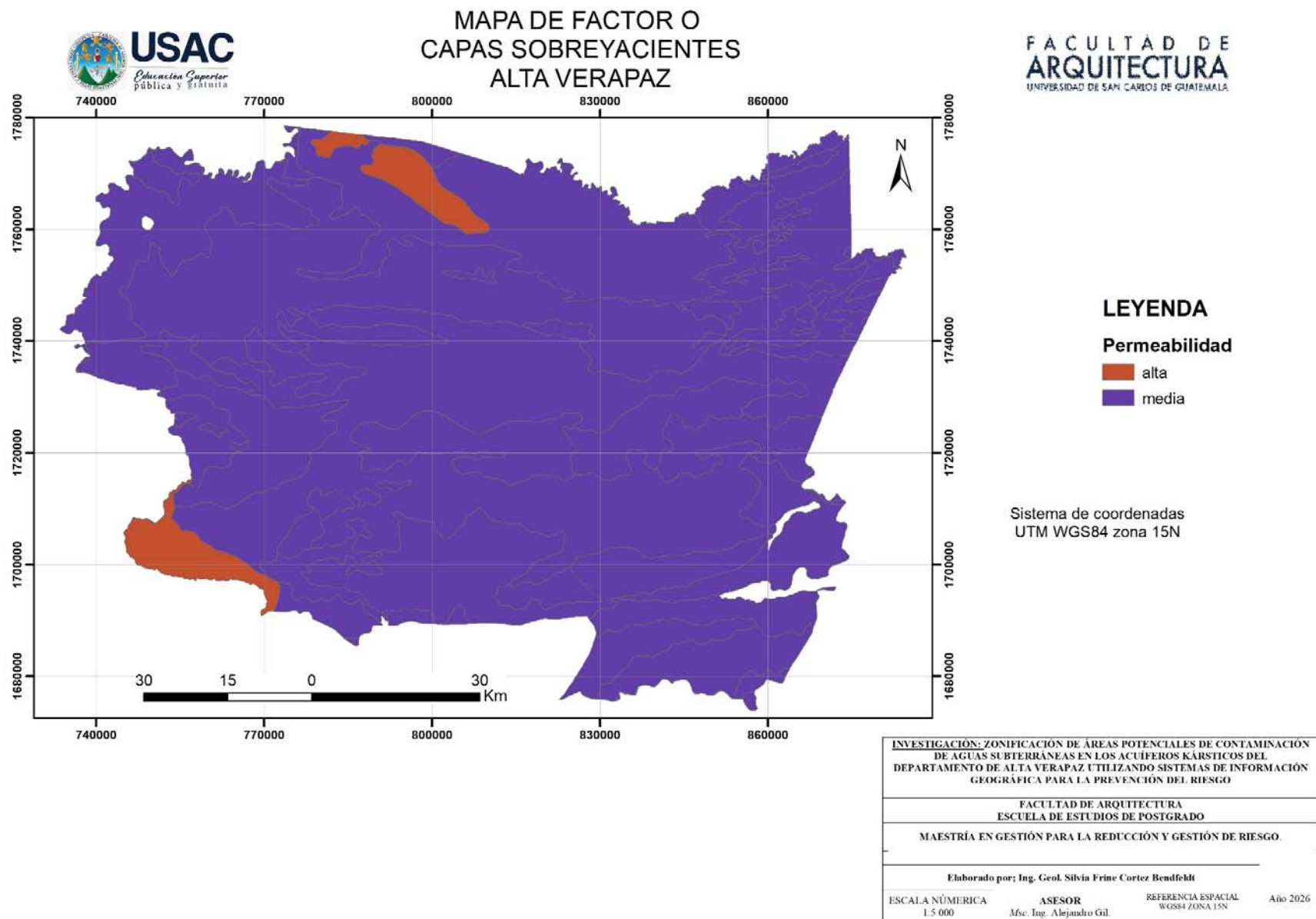
- actual vulnerability in Yucatán, Mexico.» *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22 (2022): 1591-1608.
- Municipalidad de Cobán Alta Verapaz. *Monografía oficial del municipio de Cobán*. Cobán: Oficina de Gobernación de Cobán, 2018.
- Nanou, E.-A., Zagana, E., Pouliaris, C., & Kazakis, N. «Development of a hybrid karst aquifer vulnerability map by using geospatial and statistical tools: The case study of Ziria aquifer in northern Peloponnese.» *Groundwater for Sustainable Development* 27, n° 101319 (2024).
- Oldham, Tony. *Semuc Champey*. 2004.
<https://www.showcaves.com/english/gt/karst/SemucChampey.html>.
- Palmer, Arthur N. «Cave Geology.» Editado por OH: Cave Books Dayton. 2007: 39-67.
- Pérez, J., López, M., & García, A. «Estudio hidrogeológico de los acuíferos kársticos en el departamento de Alta Verapaz.» *Revista Geología y Recursos Hídricos* 45, n° 2 (2017): 120-135.
- Rodríguez, E., y García, P. «Vulnerabilidad de los acuíferos kársticos en Alta Verapaz: Un enfoque de gestión integral.» *Revista de Ciencias Ambientales* 29, n° 1 (2016): 58-72.
- Sánchez, R., Romero, J., y Vargas, H. «Uso de SIG para la zonificación de riesgo de contaminación de acuíferos: un caso en Colombia.» *Revista de Tecnología Ambiental* 32, n° 4 (2018): 153-166.
- Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia. *Plan de Desarrollo Departamental Alta Verapaz 2011–2025*. Gobierno de Guatemala, 2011.
- Servicio Geológico de Lituania. «Actividad Kárstica.» 2010.
- Sistemas de Informacion Geografica. *Riesgos y SIG consultado*. 2025.
<http://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/> .

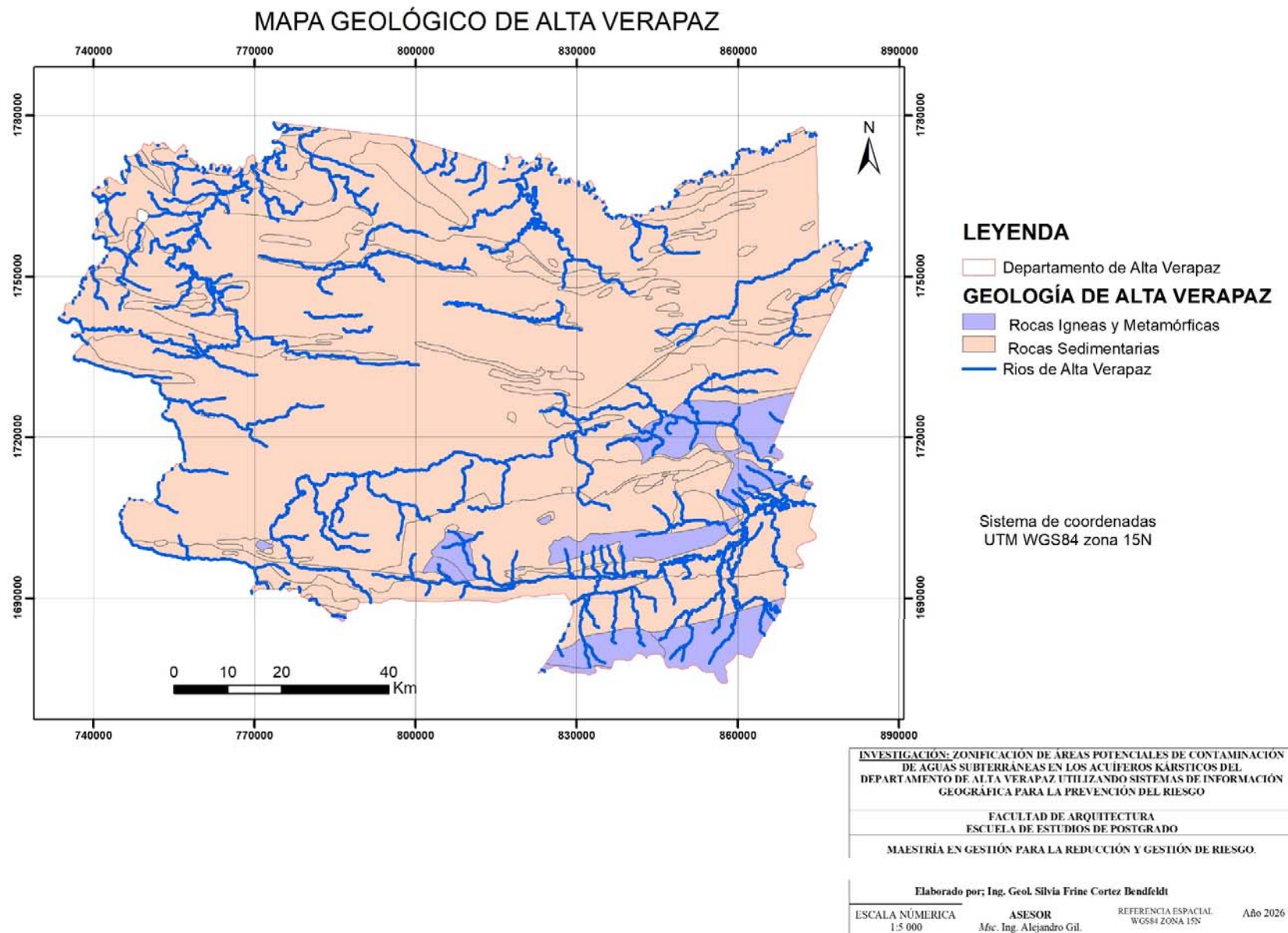
- Stringfield, V. T., Rapp, J. R., & Anders, R. B. «Effects of karst and geologic structure on the circulation of water and permeability in carbonate aquifers.» *Journal of Hydrology* 43, n° 1-4 (1979): 313-332.
- Tarbuck, E. & Lutgens, F. *Earth An Introduction to Physical Geology*. Estados Unidos: Prentice Hall, 1996.
- Tony Waltham, Fred G. Bell & Martin G. Culshaw. «Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction.» *Berlin: Springer*, 2005: 205-243.
- USDA, United States Department of Agriculture. *Soil Survey Manual*. Washington D.C.: Handbook, 2017.
- Williams, David C. Ford & Paul W. «Karst Hydrogeology and Geomorphology.» Editado por Chichester: John Wiley & Sons. 2007: 23-45.

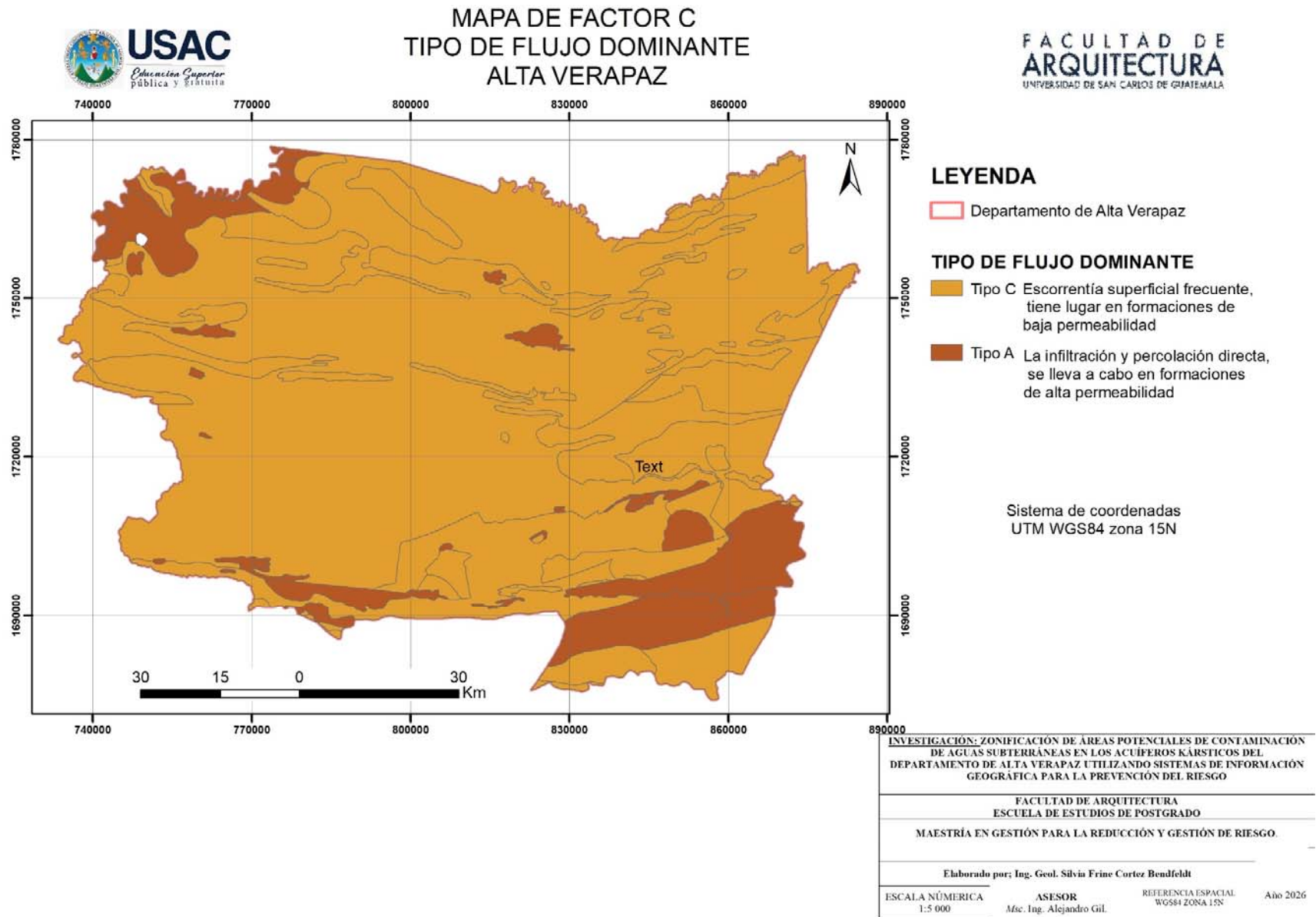
ANEXOS

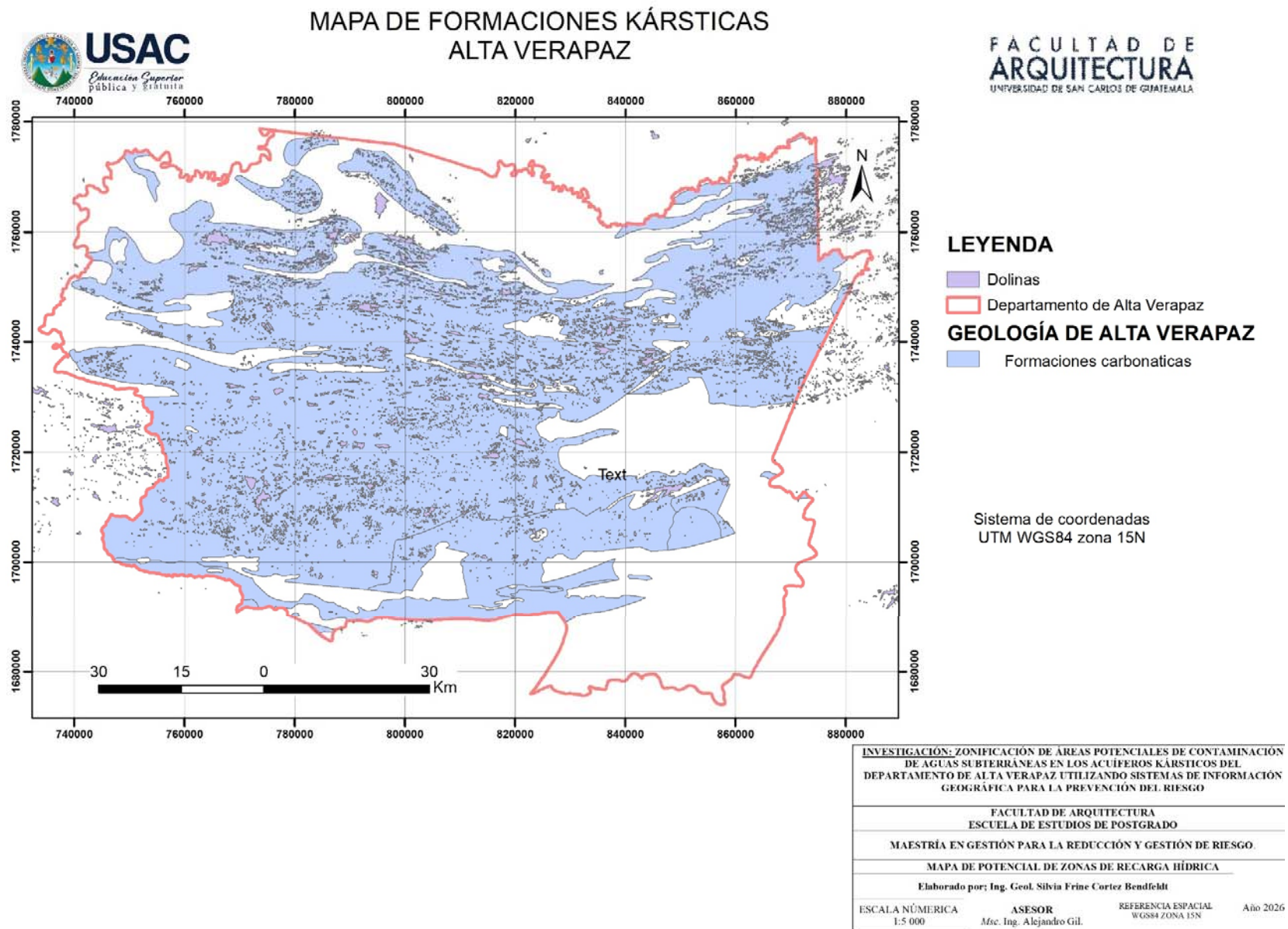


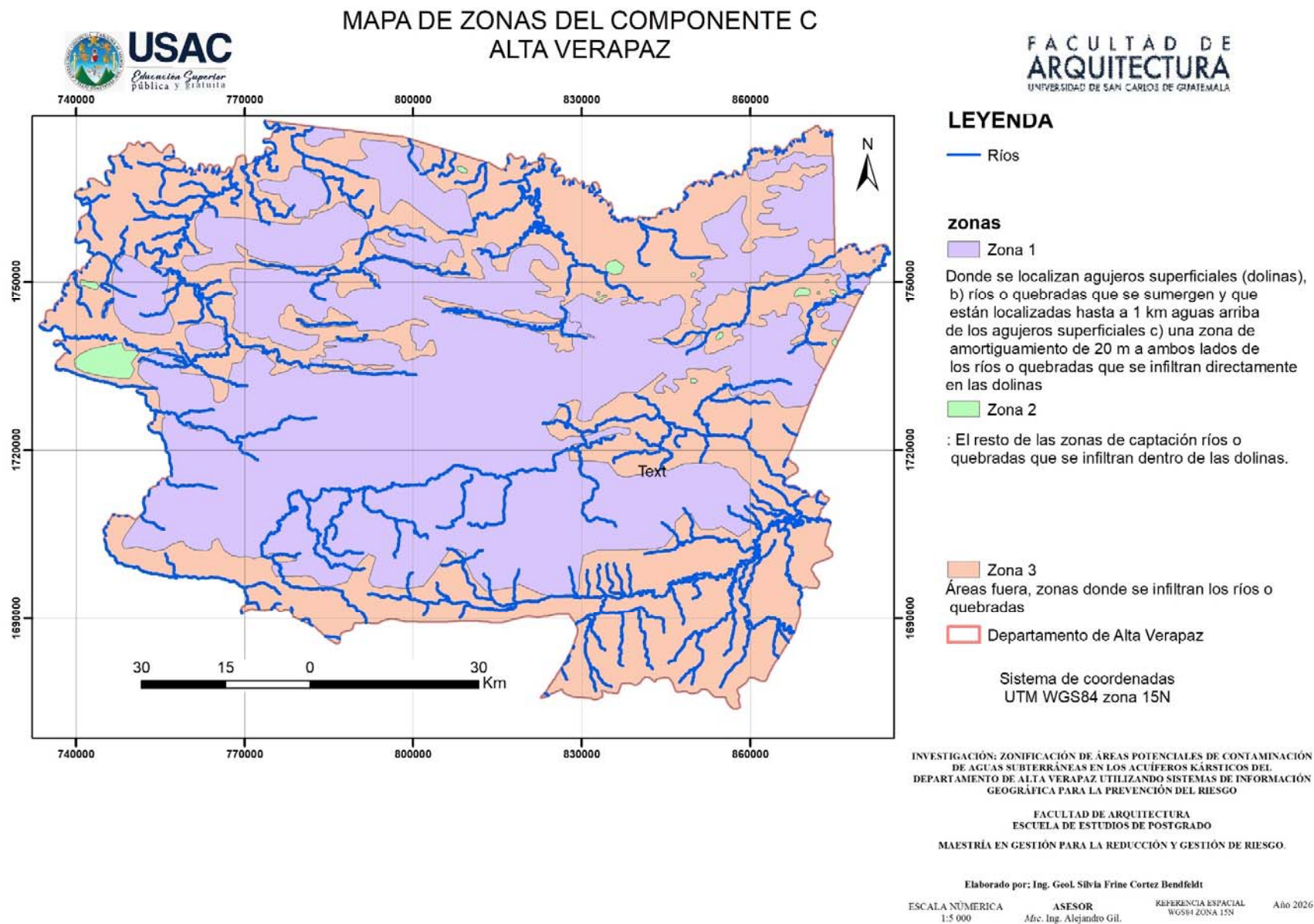






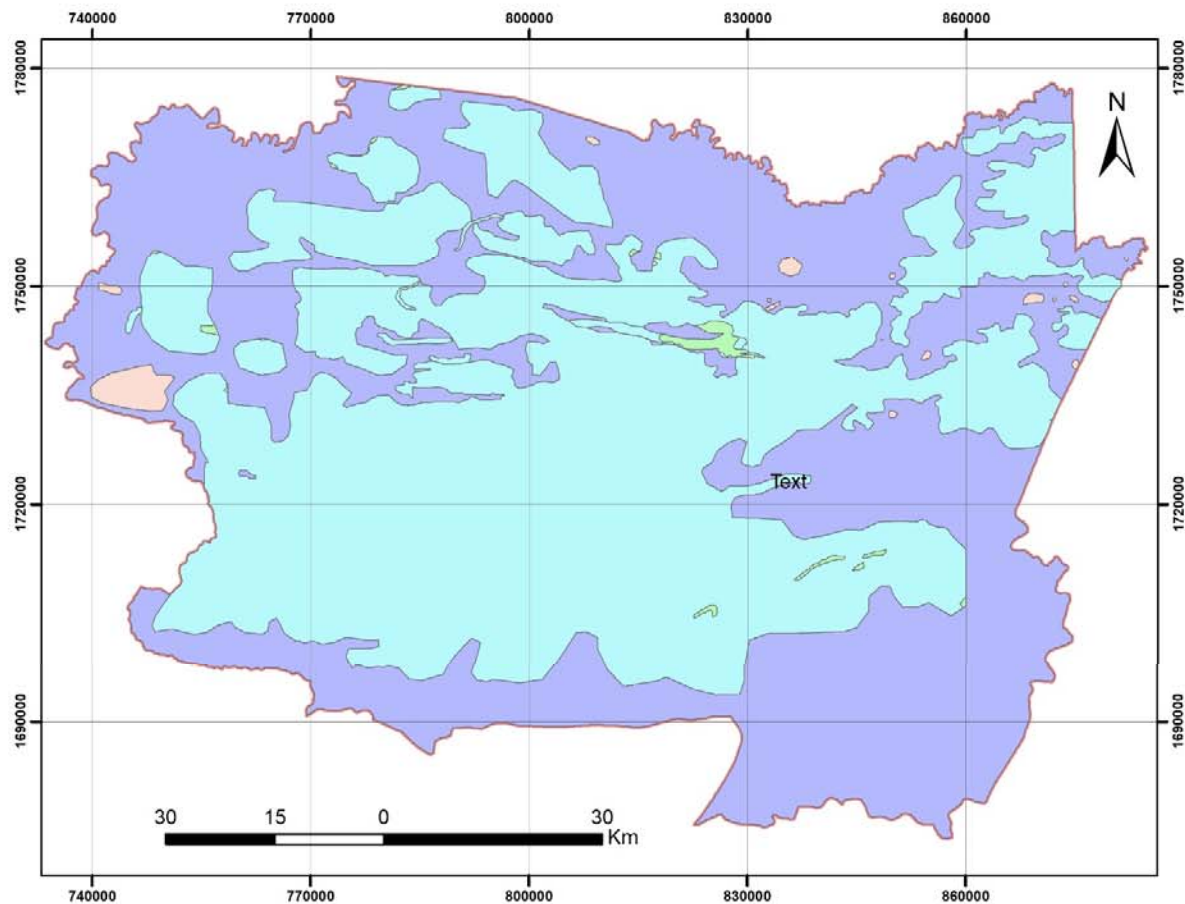








MAPA DE FLUJO DE CONCENTRACIÓN C ALTA VERAPAZ



LEYENDA

Factor de Concentracion de Flujo

- E Extremo 59.42%
- H Alto 38.52%
- M Mediano 6.75%
- L Bajo 4.28%
- Departamento de Alta Verapaz

INVESTIGACIÓN: ZONIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS ACUÍFEROS KARSTICOS DEL
DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA PARA LA PREVENCIÓN DEL RIESGO

FACULTAD DE ARQUITECTURA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN GESTIÓN PARA LA REDUCCIÓN Y GESTIÓN DE RIESGO

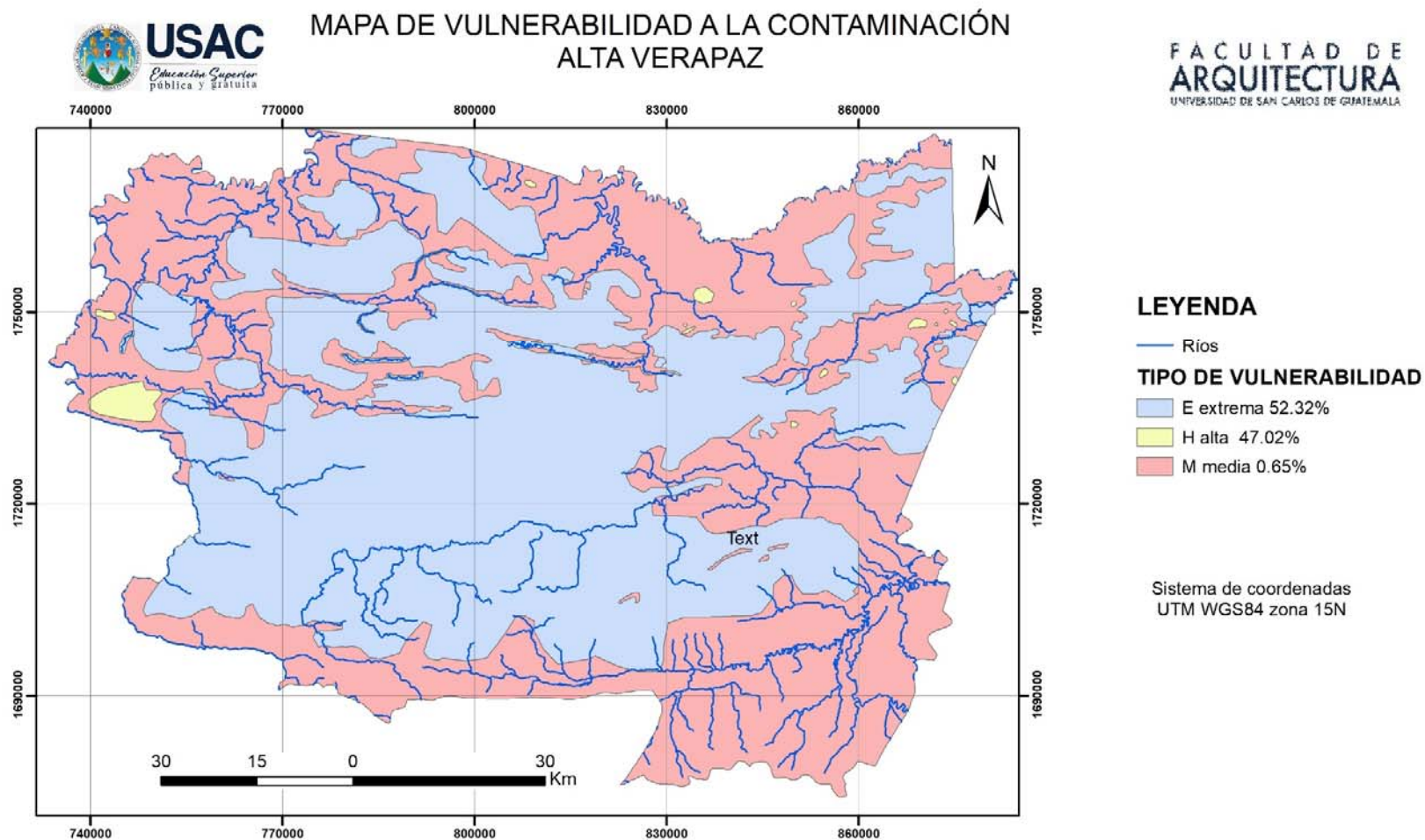
Elaborado por: Ing. Geol. Silvia Frine Cortez Benfediti

ESCALA NUMÉRICA
1:5 000

ASESOR
Msc. Ing. Alejandro Gil

REFERENCIA ESPACIAL
WGS84 ZONA 15N

Año 2026



INVESTIGACIÓN: ZONIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS DEL
DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA PARA LA PREVENCIÓN DEL RIESGO

FACULTAD DE ARQUITECTURA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN GESTIÓN PARA LA REDUCCIÓN Y GESTIÓN DE RIESGO.

MAPA DE POTENCIAL DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

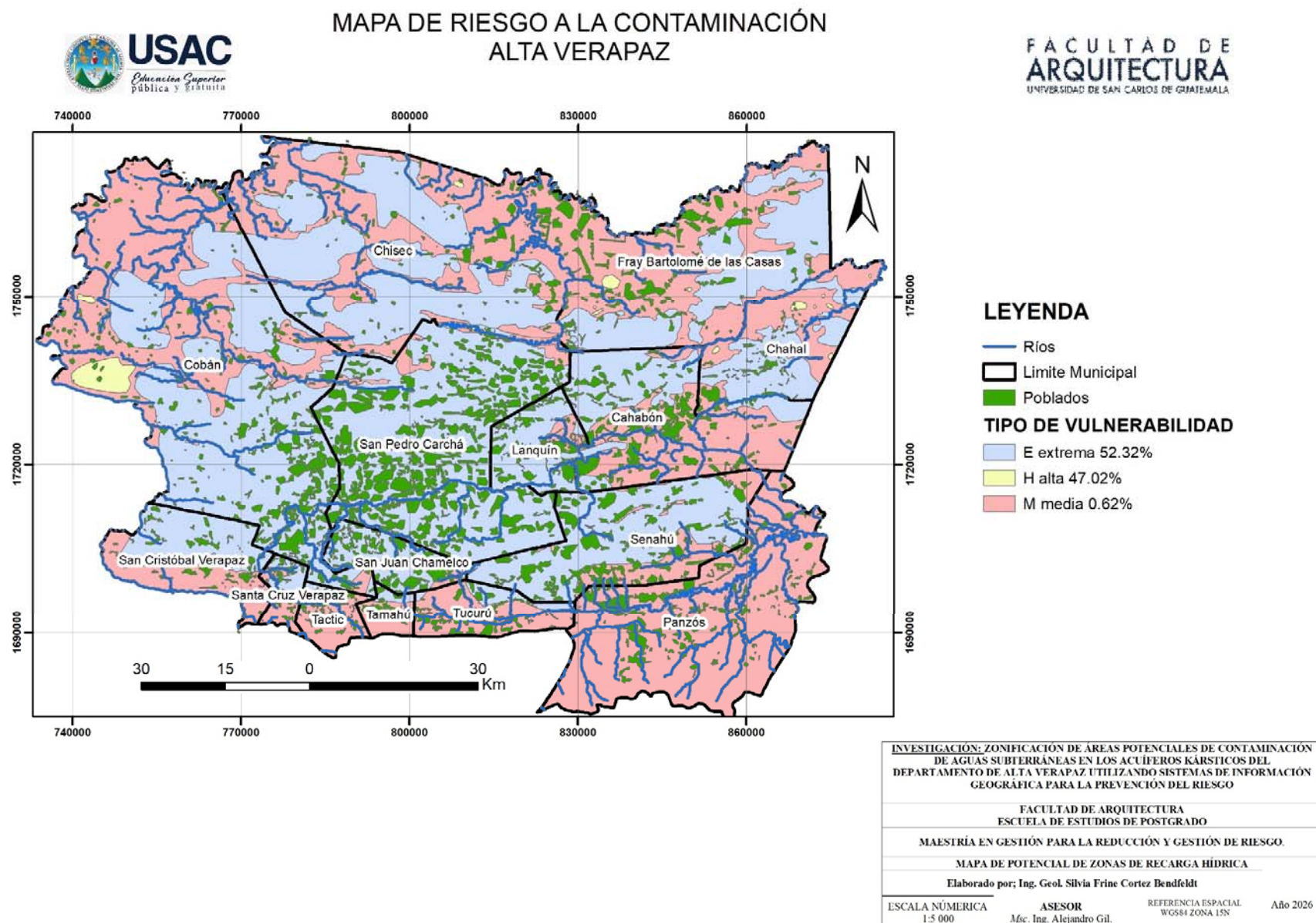
Elaborado por: Ing. Geol. Silvia Frine Cortez Bendfeldt

ESCALA NUMÉRICA
1:5 000

ASESOR
Msc. Ing. Alejandro Gil.

REFERENCIA ESPACIAL
WGS84 ZONA 15N

Año 2026



Rosa Amelia González Domínguez
Licenciada en Letras
Correos electrónicos:
rosgon06@yahoo.es
rosamelia4669@gmail.com
Teléfono: 56961166



Guatemala, 6 de octubre de 2026

Arquitecto
Sergio Francisco Castillo Bonini
Decano de la Facultad de Arquitectura
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Decano:

Atentamente, hago de su conocimiento que he realizado la revisión de estilo del proyecto de graduación: **Zonificación de áreas potenciales de contaminación de aguas subterráneas en los acuíferos para la prevención del riesgo, Alta Verapaz** de la estudiante de la Maestría en Ciencias en Gestión para la Reducción y Gestión de Riesgos: **Silvia Friné Cortéz Bendfeldt** de la Facultad de Arquitectura, carné universitario **100013796** previamente a conferírsele el título de **Maestra en Ciencias en Gestión para la Reducción y Gestión de Riesgo**.

Luego de las adecuaciones y correcciones que se consideraron pertinentes en el campo lingüístico, considero que el proyecto de graduación que se presenta cumple con la calidad técnica y científica requerida.

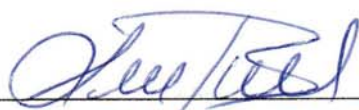
Al agradecer la atención que se sirva brindar a la presente, me suscribo respetuosamente.

Rosa Amelia González Domínguez
Licenciada en Letras
Colegiado número 5,284

Rosa Amelia González Domínguez
Número de colegiado: 5284

**“ZONIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN LOS ACUÍFEROS PARA LA PREVENCIÓN DEL RIESGO, ALTA
VERAPAZ”**

Proyecto de Graduación desarrollado por:



Silvia Friné Cortéz Bendfeldt

Asesorado por:



M.Sc. Ing. Agr. Edin Alejandro Gil Esturban



M. Sc. Dafne Adriana Acevedo Quintanilla

Imprímase:

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Arq. Sergio Francisco Castillo Bonini

Decano

Ciudad Universitaria, Zona 12, Facultad de Arquitectura, Edificio T2