

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

**Análisis y procesamiento de geodatos
para la generación de modelos
temático-temporales de la cuenca del
Río San Miguel, Sonora, México**

TESIS

**Que para obtener el Grado de:
Maestra en Ciencias-Geología**

PRESENTA:

MARÍA DEL CARMEN HERAS SÁNCHEZ



Hermosillo, Sonora, Mayo del 2013.

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

Hermosillo, Sonora, a 21 de Mayo de 2013

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

"Análisis y procesamiento de geodatos para la generación de modelos tematico-temporales de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México"

Esto es con el fin de que el alumno: **HERAS SANCHEZ MARIA DEL CARMEN**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Grado de la Maestría en Ciencias-Geología.

Sin otro en particular quedamos de Usted.

ATENTAMENTE

Dr. Juan Arcadio Saiz Hernández
Director de Tesis

Dr. Christopher Watts Thorp
Co-Director de Tesis



C.c.p. Interesado.
C.c.p. Archivo.



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales
Hermosillo, Sonora a 24 de mayo de 2013

Dr. Juan Arcadio Saiz Hernández

Director de Tesis

Dr. Christopher Watts Thorp

Co-Director de Tesis

Por este conducto les comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Ustedes, intitulado:

"ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE GEODATOS PARA LA GENERACIÓN DE MODELOS TEMÁTICO-TEMPORALES DE LA CUENCA DEL RÍO SAN MIGUEL, SONORA, MÉXICO"

Esto es con el fin de que la alumna: **HERAS SÁNCHEZ MARÍA DEL CARMEN**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención del título de Grado. Asimismo les comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

Dr. Miguel Rangel Medina	Presidente
M.C. José Alfredo Ochoa Granillo	Secretario
Dr. Christopher Watts Thorp	Vocal
Dr. Juan Arcadio Saiz Hernández	Vocal

Sin otro en particular quedo de Ustedes

Atentamente

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
MAESTRIA EN CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPTO. DE GEOLOGIA

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

NOMBRE DE LA TESIS:

***"ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE GEODATOS PARA LA GENERACIÓN DE
MODELOS TEMÁTICO-TEMPORALES DE LA CUENCA DEL RÍO SAN MIGUEL,
SONORA, MÉXICO"***

NOMBRE DE LA SUSTENTANTE:

MARÍA DEL CARMEN HERAS SÁNCHEZ

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. Miguel Rangel Medina

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


M.C. José Alfredo Ochoa Granillo

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. Christopher Watts Thorp

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. Juan Arcadio Saiz Hernández

A t e n t a m e n t e

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología

Dedicatoria

A Dios, de Quien vengo y a Quien voy. A mi Querido Esposo Raúl, mi Compañero. A mis Hermosas y Amadas Hijas Rebeca y Raquel. A mi Madre que Adoro.

Agradecimientos

Deseo hacer un reconocimiento al CONACYT, institución que me otorgó una beca durante el periodo del 17 de Enero del 2011, al 14 de Diciembre del 2012, bajo el número de becario/registro 341413/252897.

Agradezco a Dios, por darme la vida, las fuerzas y el espíritu para emprender y terminar éste proyecto. A mi Esposo Raúl, por apoyarme incondicionalmente e infundirme ánimo. A mis hijas Rebeca y Raquel por darme los motivos para seguir adelante y buscar un mejor futuro. A mi Madre, por darme un modelo de vida y fortaleza. A mis hermanas Rosita y Leonor, por soportar mi cansancio y brindarme su cariño. A mis grandes amigos Raquel y Federico, por darme un ejemplo de lucha y esperanza. A mis queridos compañeros Yessica y Daniel, por soportarme y apoyarme. Al Dr. Jesús Barrón por motivarme e impulsarme en mi desarrollo académico. Al Dr. Christopher Watts y al M.C. Alfredo Ochoa por facilitarme herramientas y materiales requeridos. Al Dr. Miguel Rangel por sus valiosas recomendaciones para enriquecer el presente documento. Al Dr. Juan Saiz, por brindarme su confianza y libertad para desarrollar éste trabajo.

Resumen

Se construyó una Base de Datos Geográfica (BDG) de la Cuenca del Río San Miguel, Sonora, México, que integra datos de diversas fuentes, con el propósito de analizar y representar gráficamente, fenómenos climatológicos y fisiográficos como precipitación, temperatura, suelos, topografía, uso del suelo, geología, entre otros. Se agregaron también imágenes de satélite, información tabular, gráficas, estadísticas e información vectorial espacialmente referenciada al sitio de estudio. La conformación de la BDG requirió rigurosos procesos de validación, debido a que las estructuras de datos representan valores continuos en sistemas discretos (como los computacionales), lo que hizo necesario realizar estudios de referenciación y validación geográfica, con lo que se lograron modelos matemáticos y gráficos que representan con precisión los fenómenos físicos de interés en el sitio de estudio.

Como parte fundamental de la base de datos se cuenta con los Modelos Digitales de Elevación (MDE) a partir de los cuales se delineó la cuenca hidrográfica del río San Miguel. Como resultados elementales se definió el polígono del área de estudio y se obtuvieron parámetros fisiográficos tanto de la cuenca como del cauce principal; además se generaron una serie de productos cartográficos digitales que contienen información temática como geología, hidrología, uso del suelo, entre otros, imprescindibles para realizar estudios hidrológicos y modelos tridimensionales.

El programa informático utilizado para generar las simulaciones y las modelaciones es Idrisi versión 16 y el origen de la mayoría de los datos son tanto INEGI, como los registros de las estaciones de registro de datos climatológicos de la Universidad de Sonora las cuales se encuentran distribuidas geográficamente sobre la cuenca del Río San Miguel.

Todos los procesos de manipulación de la información geográfica y climatológica se basan en la metodología creada para esos fines, lo cual brinda la confianza de que los datos han sido validados y analizados.

Abstract

A geographic database (GDB) for the San Miguel river basin has been built by integrating data from multiple sources for analysis and graphical representation of diverse physiographic features and climate phenomena such as rainfall, temperature, soil-evaporation, and topography among others. This database has allowed us to combine digital maps and images along with thematic information and spatially-referenced vector data. Moreover, further geographical referencing and validating processes has enabled us to accurately represent continuous data through discrete data structures that fit the mathematical models used in representing the physical phenomena at the study site.

Among the GDB's primary components, the digital elevation model (DEM) has enabled us to model the target basin. The models' outcome has allowed us to define the polygon for the study area, and calculate the physiographic parameters for both the river basin, and the main river-bed. Furthermore, a series of digital cartographic by-products containing thematic information such as geologic, hydrologic and soil use among others, were generated. The latter being indispensable for any further hydrological, and tridimensional modeling.

The application used to perform the simulations and modeling was Idrisi version 16, Taiga edition. We have integrated data from several sources, mainly from INEGI, and sites for record of climatological data of University of Sonora, which are distributed along the basin.

The geographic and climatological data handling processes were based on a methodology specifically designed for our purposes, which builds trust in the validation and analysis setup.

Contenido

	<i>Pág.</i>
<i>Dedicatoria</i>	<i>i</i>
<i>Agradecimientos</i>	<i>ii</i>
<i>Resumen</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>v</i>
<i>Contenido</i>	<i>vii</i>
<i>Indice de tablas</i>	<i>ix</i>
<i>Indice de figuras</i>	<i>xi</i>
<i>Capítulo 1. Introducción</i>	<i>1</i>
1.1 Generalidades.....	<i>1</i>
1.2 Objetivo.....	<i>2</i>
1.3 Justificación	<i>3</i>
<i>Capítulo 2. Marco Teórico</i>	<i>5</i>
2.1 Sistema de Información Geográfica.....	<i>5</i>
2.2 Base de Datos Geográfica	<i>7</i>
2.3 Modelos de datos espaciales para SIG	<i>8</i>
2.4 Resolución espacial de imágenes ráster	<i>9</i>
2.5 SIG en la modelación hidrológica	<i>12</i>
2.6 La interpolación espacial	<i>14</i>
<i>Capítulo 3. Materiales y métodos</i>	<i>18</i>
3.1 Características del área de estudio.....	<i>18</i>
3.1.1 Ubicación geográfica del área de estudio	<i>18</i>
3.1.2 Principales localidades y su población.....	<i>21</i>
3.1.3 Drenaje de la cuenca y su orden de corriente.....	<i>21</i>
3.2 Origen de los datos y sus atributos.....	<i>24</i>

3.2.1	Modelos Digitales de Elevación	25
3.2.2	Cartografía Temática Digital	26
3.2.3	Imágenes de satélite	32
3.2.4	Estaciones de registro de datos climatológicos	32
3.3	Especificación de los atributos de los datos	33
3.3.1	Proyección cartográfica y sistema de coordenadas	33
3.3.2	Definición de la resolución espacial con base en la información geográfica disponible	35
3.3.3	Evaluación de la resolución espacial	36
3.4	Recursos de software y hardware.....	39
3.4.1	Sistema de información geográfica	39
3.4.2	Modelos de datos geográficos	40
3.4.3	Infraestructura computacional.....	40
3.5	Metodología y procesos para la construcción de la BDG	41
3.5.1	Generación del mosaico y extracción del polígono.....	41
3.5.2	Nomenclatura de los archivos.....	53
Capítulo 4. Resultados.....		59
4.1	La base de datos geográfica.....	59
4.2	Productos cartográficos generados a partir de MDE y CTD	59
4.2.1	Modelos Digitales de elevación.....	60
4.2.2	Google Earth	65
4.2.3	Fisiografía	65
4.2.4	Geología	66
4.2.5	Hidrología Superficial	73
4.2.6	Hidrología Subterránea	76
4.2.7	Topografía.....	76
4.2.8	Uso del Suelo y Vegetación	78
4.2.9	Uso potencial	78
4.2.10	Edafología.....	86
4.2.11	Climatología	86
4.3	Parámetros fisiográficos calculados	90
4.3.1	Parámetros fisiográficos de la cuenca	90
4.3.2	Parámetros fisiográficos del cauce principal	93
4.4	Análisis de la precipitación de la cuenca del Río San Miguel durante el periodo del 01 de Junio al 30 de Septiembre del 2005	94
4.5	Análisis de la evapotranspiración de la cuenca del Río San Miguel, para el periodo de 1994 a 1997	103
4.6	Mapa de zonas agroclimáticas de la cuenca del Río San Miguel	107
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones		125
Bibliografía		127

Índice de tablas

	<i>Pág.</i>
Tabla 3.1: Conversión de 1" X 1" en coordenadas métricas	37
Tabla 3.2: Conversión del mosaico completo en coordenadas métricas.....	37
Tabla 3.3: Conversión de coordenadas máximas de métricas a geográficas	38
Tabla 3.4: Periodos para acumular la Precipitación y sus fechas correspondientes.....	49
Tabla 3.5: Relación de procesos y archivos de la BDG del Río San Miguel. Parte 1.....	56
Tabla 3.5: Relación de procesos y archivos de la BDG del Río San Miguel. Parte 2.....	57
Tabla 3.5: Relación de procesos y archivos de la BDG del Río San Miguel. Parte 3.....	58
Tabla 4.1: Parámetros fisiográficos de la cuenca del Río San Miguel	91
Tabla 4.2: Parámetros fisiográficos del Río San Miguel.....	93
Tabla 4.3: Precipitaciones mínimas y máximas por periodo acumulado	99
Tabla 4.4: Precipitación acumulada por ER	99
Tabla 4.5: Precipitación Media Acumulada en la cuenca del Río San Miguel, para el periodo de estudio	101
Tabla 4.6: Precipitación Promedio Anualizada: periodo 1994-1997. Datos de la CONAGUA, Cuenca del Río San Miguel.....	105
Tabla 4.7: Temperatura Promedio Anualizada: periodo 1994-1997. Datos de la CONAGUA, Cuenca del Río San Miguel.....	105
Tabla 4.8: Datos de las estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua, ubicadas en la cuenca del Río San Miguel	105

Tabla 4.9:	Datos de las estaciones climatológicas de la Comisión Nacional de Agua, ubicadas en la cuenca del Río San Miguel y sus correspondientes registros de Precipitación Promedio Anualizada y Temperatura Promedio Anualizada y estimación de la Evapotranspiración Real: periodo 1994-1997	108
Tabla 4.10:	Zonas de TPA y sus rangos de valores.....	119
Tabla 4.11:	Zonas de disponibilidad de humedad y sus rangos de valores ...	120

Índice de figuras

	<i>Pág.</i>
Figura 2.1: Fundamentos geométricos para la representación de puntos, líneas, áreas, superficies y volúmenes.....	9
Figura 2.2: Representación numérica de objetos utilizando un modelo de datos ráster	10
Figura 2.3: A: Representación de objetos utilizando un modelo vectorial. B: Enumeración espacial de los mismos objetos utilizando un modelo ráster	10
Figura 3.1: Ubicación geográfica del área de estudio	19
Figura 3.2: Municipios que cubre el área de estudio	20
Figura 3.3: Principales localidades y corrientes de agua superficiales de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México	22
Figura 3.4: Orden de corrientes de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México	23
Figura 3.5: Mosaico de archivos a escala 1:50,000	27
Figura 3.6: Representación de las fuerzas gravitacionales de la Tierra formando un geoide	34
Figura 3.7: Aproximación de la división de las zonas UTM para México	35
Figura 3.8: Desfase de coordenadas usando diferentes Datums	38
Figura 3.9: Diagrama de la metodología para construir una BDG de la Cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.....	42
Figura 3.10: Diagrama de la metodología para generar el polígono del área de estudio	43
Figura 3.11: Diagrama de la metodología para generar imágenes y datos temáticos del polígono del área de estudio	45
Figura 3.12: Diagrama de la metodología para generar un archivo vectorial de las ER	47

Figura 3.13:	Diagrama de la metodología para crear la BDG de precipitación.	48
Figura 3.14:	Ubicación geográfica de las ER del Río San Miguel, Sonora, México.	50
Figura 3.15:	Diagrama de la metodología para interpolar datos de precipitación	51
Figura 3.16:	Módulo Water Cycle incorporado a Idrisi16: The Taiga Edition.	52
Figura 3.17:	Diagrama de la metodología para calcular los parámetros fisiográficos de la cuenca y el río principal.	52
Figura 3.18:	Diagrama de la metodología para crear los polígonos de Thiessen de la cuenca y sus áreas	54
Figura 4.1:	Vistas panorámicas del polígono que conforma el área de estudio	62
Figura 4.2:	Vista en relieve del área de estudio e imagen de escurrimiento. ..	63
Figura 4.3:	Relieve del polígono que conforma el área de estudio y las corrientes principales	64
Figura 4.4:	Cuenca del Río San Miguel sobrepuesta en imagen de Google Earth.	67
Figura 4.5:	Fisiografía de la cuenca del Río San Miguel: Provincias y subprovincias	68
Figura 4.6:	Fisiografía de la cuenca del Río San Miguel: Sistema de topofomas	69
Figura 4.7:	Geología de la cuenca del Río San Miguel: litología	70
Figura 4.8:	Geología de la cuenca del Río San Miguel: fallas y fracturas.	71
Figura 4.9:	Geología de la cuenca del Río San Miguel: Minas, catas	72
Figura 4.10:	Hidrología superficial de la cuenca del Río San Miguel: acuíferos del área de estudio y estaciones hidrométricas.....	74
Figura 4.11:	Municipios del área de estudio y sus localidades.	75
Figura 4.12:	Hidrología subterránea de la cuenca del Río San Miguel: Unidades Geohidrológicas y aprovechamientos	77
Figura 4.13:	Topografía del área de estudio: vías de transporte y localidades urbanas	79
Figura 4.14:	Topografía del área de estudio: curvas de nivel sobre el MDE	80
Figura 4.15:	Topografía del área de estudio: ríos y cuerpos de agua	81
Figura 4.16:	Cuenca del Río San Miguel – Uso del suelo: vegetación y actividad pecuaria	82
Figura 4.17:	Cuenca del Río San Miguel – Uso potencial del suelo: forestal. ...	83
Figura 4.18:	Cuenca del Río San Miguel – Uso potencial del suelo: ganadería.	84

Figura 4.19:	Cuenca del Río San Miguel – Uso potencial del suelo: agricultura.....	85
Figura 4.20:	Edafología del área de estudio: tipos de suelo.....	87
Figura 4.21:	Climatología del área de estudio: unidades climatológicas e isolíneas de evapotranspiración.....	88
Figura 4.22:	Climatología del área de estudio: humedad en el suelo e isoyetas.....	89
Figura 4.23:	Curva hipsométrica de la cuenca del Río San Miguel.....	92
Figura 4.24:	Perfil topográfico del cauce del Río San Miguel.....	94
Figura 4.25:	Parámetros fisiográficos del Río San Miguel.....	96
Figura 4.26:	Precipitación acumulada por periodos de la cuenca del Río San Miguel.....	97
Figura 4.27:	Precipitación acumulada para el total del periodo de la cuenca del Río San Miguel.....	98
Figura 4.28:	Precipitaciones mínimas y máximas por periodo acumulado.....	100
Figura 4.29:	Polígonos de Thiessen de la cuenca del Río San Miguel.....	102
Figura 4.30:	Polígonos de Thiessen de la cuenca del Río San Miguel, datos CONAGUA.....	106
Figura 4.31:	Modelo Digital de Elevación de la cuenca del Río San Miguel....	109
Figura 4.32:	Diagrama de la metodología para generar el mapa de zonas agroclimáticas.....	110
Figura 4.33:	Gráfica del análisis de regresión entre TPA y el MDE y su respectiva ecuación.....	112
Figura 4.34:	Modelo de TPA de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.....	113
Figura 4.35:	Gráfica del análisis de regresión entre PPA y el MDE y su respectiva ecuación.....	114
Figura 4.36:	Modelo de PPA de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.....	116
Figura 4.37:	Gráfica del análisis de regresión entre ETR y el MDE y su respectiva ecuación.....	117
Figura 4.38:	Modelo de ETR de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.....	121
Figura 4.39:	Modelo de disponibilidad de humedad de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.....	122
Figura 4.40:	Zonas de TPA y disponibilidad de humedad de la Cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.....	123
Figura 4.41:	Mapa de zonas agroclimáticas de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.....	124

1. Introducción

1.1 Generalidades

La cuenca del Río San Miguel, Sonora, México, se localiza en la zona de transición entre las regiones fisiográficas Llanura Sonorense y la Sierra Madre Occidental. Debido a su ubicación, desde el año 2004, ha sido el sitio más relevante del noroeste de México para estudios del Monzón de Norteamérica, fenómeno climatológico que provee más del 70% del agua en la región.

La información requerida para los mencionados estudios consiste en: a) cartografía temática y modelos digitales de terreno de INEGI, que representa datos de la superficie terrestre considerada invariable debido a que relativamente cambia poco con el tiempo (Geología, suelos, hidrografía, entre otros); b) Imágenes de satélite, las cuales proporcionan información de rasgos fisiográficos de la tierra y la atmósfera con una mayor variabilidad espacial y temporal (cobertura vegetal, humedad de suelo, cuerpos de agua, nubes, precipitación, vientos, etc.); y c) datos alfanuméricos de estaciones climatológicas y de pluviógrafos, humedad y temperatura de suelo medidas en cuarenta y cinco estaciones de registro de datos climatológicos, operadas por el Cuerpo Académico de Ciencia y Tecnología del Agua de la Universidad de Sonora, que provee datos de una alta variabilidad espacial y temporal.

Considerando lo anterior, en esta tesis se desarrolla la metodología para construir una base de datos geográfica (BDG) estandarizada con formatos de archivos, resolución espacial, dátum, sistema de coordenadas, identificadores y nomenclatura que permita asequibilidad, precisión, intercambio de datos y , comparabilidad de resultados.

Tomando en cuenta la magnitud del área, el tipo de información y estudios que se realizan en la cuenca del Río San Miguel, la base de datos que se presenta es principalmente basada en imágenes ráster, en la que el soporte principal lo constituye el modelo digital de elevaciones de INEGI y las fuentes de datos son la cartografía temática vectorial editada por el mismo instituto, imágenes del sistema satelital LANDSAT y de GeoEye descargadas de Google Earth.

En relación a los datos alfanuméricos de las estaciones de registro, es importante mencionar que debido a la gran cantidad de datos que se han generado día a día desde el año 2004 y a que requieren de un minucioso y tardado preproceso, solo se integró BDG una muestra de datos del 01 de Junio al 30 de Septiembre del año 2005, que se complementan con la información cartográfica rasterizada para generar modelos temático-temporales, con los que es posible representar gráficamente parámetros climatológicos y/o procesos fisiográficos e hidrológicos.

1.2 Objetivo

Generar modelos temático-temporales de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México, a partir de la creación de una Base de Datos Geográfica estandarizada con los datos disponibles de elevación, precipitación, suelos, topografía, uso del suelo, geología, entre otros, utilizando Sistemas de Información Geográfica y Procesamiento de Imágenes Digitales.

Objetivos específicos

- Recopilar, organizar e identificar los datos geográficos disponibles para el área de estudio.
- Analizar los geodatos considerando las diferentes fuentes de información y las particularidades técnicas que les dieron origen, como son: la proyección geográfica, el sistema de coordenadas y el modelo de datos empleado para su representación.
- Procesar los datos con diversos algoritmos computacionales para seleccionarlos, concatenarlos, recortarlos, reproyectarlos, desplegarlos y explorarlos.
- Proveer a estudiantes, profesores e investigadores una base de datos estandarizada para realizar estudios con resultados precisos y comparables.

1.3 Justificación

Desde el año 2004, la cuenca del Río San Miguel ha sido objeto de estudio para conocer el comportamiento de los elementos del Ciclo Hidrológico y de los rasgos fisiográficos y geológicos, que han generado gran cantidad de información, por lo que es necesario integrar una base de datos geográfica que incluya modelos temático-temporales, que constituya un soporte para eficientizar y mejorar la calidad de los diversos estudios que se realizan en la vertiente y además, pueda emplearse por los organismos de gobierno municipal, estatal y federal en la toma de decisiones para el desarrollo de proyectos, la planificación, el uso de los recursos de la cuenca y el reordenamiento territorial de los municipios de la región.

Para integrar la información proveniente de diversas fuentes y múltiples formatos en una base de datos unificada y estandarizada, se requiere definir las metodologías de pre-procesamiento, procesamiento y organización de los archivos, además de un sistema de información geográfica y equipo informático

de gran capacidad de procesamiento con dispositivos de almacenamiento masivo, acorde al tamaño de las imágenes y el gran volumen de datos tabulares que se deben integrar para representar digitalmente un espacio geográfico de 17,378.25 km², que consumen aproximadamente 1 terabyte de disco duro, únicamente con la información digital básica constituida por la cartografía temática y el modelo digital de elevaciones del terreno del INEGI. Por otra parte, diariamente se generan datos de precipitación, humedad del suelo y temperatura, que generan archivos del orden de 1 gigabyte mensual, que en un año dan un total aproximado de 12 gigabytes de información tabular y 30 gigabytes de información gráfica, a la que habría que sumar imágenes de satélite de alta resolución temporal, tanto para estudios fisiográficos y de recursos naturales, como para estudios con mucha variación temporal, como cambios estacionales de la vegetación o monitoreo de fenómenos climáticos.

2. Marco Teórico

2.1 Sistema de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG), es un sistema computacional desarrollado para manipular datos geográficos que corresponden a un lugar en el espacio, los cuales pueden ser obtenidos directamente del campo de estudio, por sensores remotos como satélites, o pueden ser calculados y simulados numéricamente. La mayoría de la información se encuentra representada de manera bidimensional, pero hay SIG que pueden realizar cálculos con datos tridimensionales, lo cual hace necesario contar con equipos de cómputo con grandes capacidades de memoria, de procesamiento y de almacenamiento, que permitan realizar modelos en tres dimensiones (Liria, 2008).

El concepto de Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS por sus siglas en inglés) implica la palabra *sistema* refiriéndose al hecho de que un SIG está conformado por diferentes componentes interrelacionados (programas y subprogramas) que cumplen con funciones específicas, de tal manera que se suman las capacidades de ingresar datos, manipularlos, transformarlos, visualizarlos, combinarlos, consultarlos, analizarlos, modelarlos y generar múltiples resultantes. Por otro lado, la palabra *información* implica que los datos se encuentran organizados, de tal manera que, además de tener mapas e imágenes referidas a un espacio en particular, se puede contar con tablas, información estadística, gráficas y consultas interactivas de los datos. La palabra

geográfica involucra a los datos con una referencia o ubicación geográfica conocida (o bien puede ser calculada) por un sistema de coordenadas, por ejemplo (latitud, longitud).

Ayuga, González, Velázquez y Martín (2007a), establecen que diariamente, miles de empresas, industrias y gobiernos de todo el mundo, utilizan la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica para ayudar a resolver problemas complicados y mejorar nuestra calidad de vida. Los SIG son una importante herramienta que se utilizan para combatir el crimen, planificar mejores usos de la tierra, reducir el congestionamiento urbano, para la comprensión y preservación de nuestro medio ambiente. Industrias privadas y agencias gubernamentales también hacen uso de estas herramientas para aprovechar nuestros recursos naturales con mayor prudencia y habilidad, así como también para la ubicación de vertederos, depósitos de agua, centrales energéticas, etc. El uso de los SIG es tan generalizado que las jefaturas de bomberos y policía los utilizan para enviar vehículos de emergencia a lugares de incidentes, manejar el flujo de tráfico y ubicar adecuadamente la señalización vial de forma de poder transportarse sin dificultades. Las empresas de servicios lo utilizan para administrar sus redes (agua, telefonía, etc.). Cientos de Institutos Sanitarias, a través de los GIS pueden determinar los focos infecciosos y poder prevenir epidemias, entre otras aplicaciones.

Como herramienta en las geociencias los SIG permitieron a Hancock (2005) examinar el efecto de la resolución de los Modelos Digitales de Elevación (MDE), también conocidos como Modelos Numéricos de Altitud (MNA) utilizando los datos estadísticos de la geomorfología e hidrología de las cuencas del norte de Australia. Por otro lado, como parte de los experimentos realizados en el monzón Norteamericano, Durant (2008), propone una estrategia de modelación a mesoescala para entender los cambios cíclicos del polvo, los cuales juegan un papel importante en la microfísica de las nubes e impacta en la formación y tiempo de vida de las mismas.

2.2 Base de Datos Geográfica

Una base de datos es una colección de datos lógicamente organizada y los SIG están diseñados para brindar de manera integral datos de diversas fuentes y de múltiples formatos, en una base de datos unificada, comúnmente denominada Base de Datos Geográfica (BDG o GDB por sus siglas en inglés). Existen varias estructuras de datos que se utilizan para representar espacialmente diversos fenómenos en una serie de capas, tal es el caso de datos geológicos, uso del suelo, datos de acuíferos, tipos de suelo, entre otros, los cuales corresponden a un registro espacial que permite sobreponer correctamente las capas de datos, de esa manera se pueden analizar las relaciones entre las capas.

Lo anterior es posible debido a que se han definido modelos de datos espaciales que permitan representar fenómenos del mundo real, en un mundo simbólico (como el computacional). En otras palabras, los procesos de abstracción para representar los mencionados datos implican modelos simbólicos, los cuales son una simplificación de la realidad (Bonham-Carter y Graeme, 1994). Por mencionar un ejemplo, los Modelos Digitales de Elevación (DEM) son un modelo simbólico de la altitud de la superficie de la tierra, respecto al nivel del mar.

Los resultados de la simulación, modelación y visualización científica de los datos de la BDG son muy importantes para la toma de decisiones en estudios hidrológicos y de cualquier otra índole donde se requiera la información geográfica que puede estar contenida en una BDG. Por mencionar un ejemplo, Baldi, *et al.* (2008), colectaron datos temporales para el periodo de 1982 a 1999, los cuales almacenaron en una BDG. Los mencionados datos provienen de los registros de los sensores NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), los cuales fueron utilizados para analizar cómo los ecosistemas sudamericanos sufrieron modificaciones funcionales debido a las alteraciones del clima.

2.3 Modelos de datos espaciales para SIG

Los SIG proveen métodos para representar datos espaciales que permitan a los usuarios adoptar modelos conceptuales de datos utilizando una computadora. Uno de los mencionados modelos es el modelo de datos vectoriales que se utiliza para representar fenómenos en términos de puntos, líneas, polígonos, áreas, superficies y volúmenes, el otro, es el modelo de datos ráster (frecuentemente mencionado como modelo grid) el cual se utiliza para representar fenómenos asociados a una celda (similar a una matriz de datos), donde cada celda, tiene un solo valor (Jones, 1997) (Figuras 2.1 y 2.2).

Los modelos de datos vectorial y ráster provienen de concepciones distintas del espacio real, pudiendo ser un espacio continuo o discreto. Los datos vectoriales hacen hincapié en la existencia de fenómenos discretos delineados por sus fronteras como puntos, líneas y polígonos, por lo tanto, pueden ser considerado un modelo basado en los objetos. Por otro lado, los datos ráster enfatizan el contenido de una celda ubicada geográficamente en un espacio, debido a esto se considera un modelo de datos basado en la ubicación (INEGI, 2010).

Dependiendo del proyecto, pueden ser necesarios solo datos vectoriales o ráster, pero se obtienen grandes ventajas en las aplicaciones si se utilizan ambos modelos, puesto que pueden llegar a ser complementarios (Figura 2.3).

La información acerca de los atributos, describe diferentes aspectos de los mapas pero no de manera gráfica. A una línea que representa una ruta se le puede asociar un nombre o a un polígono un tipo de suelo. La descripción de los atributos pueden ser multidimensional, así el polígono de un determinado tipo de suelo puede contener también información sobre la textura, profundidad, salinidad, capacidad de uso, etc. La información acerca de los atributos se almacena en bases de datos separadas de los componentes geográficos o gráficos, pero relacionadas mediante un identificador del atributo particular (un

punto, una línea o un polígono). Cada línea de la base de datos tiene una relación unívoca con un atributo geográfico. Los atributos se asocian sólo a representaciones vectoriales. La información gráfica de un mapa digital brinda elementos acerca de cómo se representa la información. Esta incluye los colores, símbolos, tipos de líneas, etc., con que se desplegarán en una pantalla o en papel los distintos atributos (INEGI, 2010).

Tipo	Ejemplos de representación gráfica	Representación digital
Punto	• × + △ ○	Coordenadas (x,y) en 2D y (x,y,z) en 3D
Línea		Lista ordenada de coordenadas y función matemática
Área		Líneas donde el primer punto es igual al último y serie de líneas en un área con hoyos
Superficie		Matriz de puntos, conjunto de puntos triangulados, funciones matemáticas y líneas de contorno
Volúmen		Conjunto de superficies

Figura 2.1. Fundamentos geométricos para la representación de puntos, líneas, áreas, superficies y volúmenes.

2.4 Resolución espacial de imágenes ráster

Considerando que los Sistemas de Información Geográfica utilizan fundamentalmente los modelos de datos espaciales vectorial y ráster, se hace hincapié en que los archivos que contienen imágenes en formato ráster, representan los elementos de un mapa en celdas o píxeles, términos que se

utilizan indistintamente para hacer alusión a la unidad mínima de un grid (Thompson *et al.*, 2001).

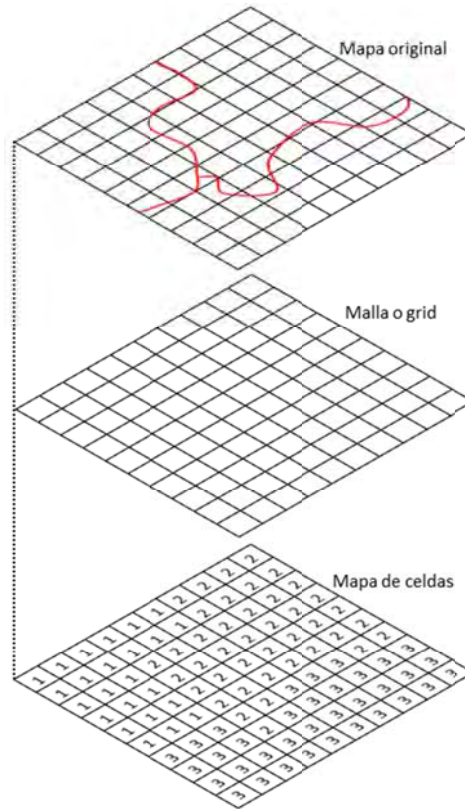


Figura 2.2. Representación numérica de objetos utilizando un modelo de datos ráster.

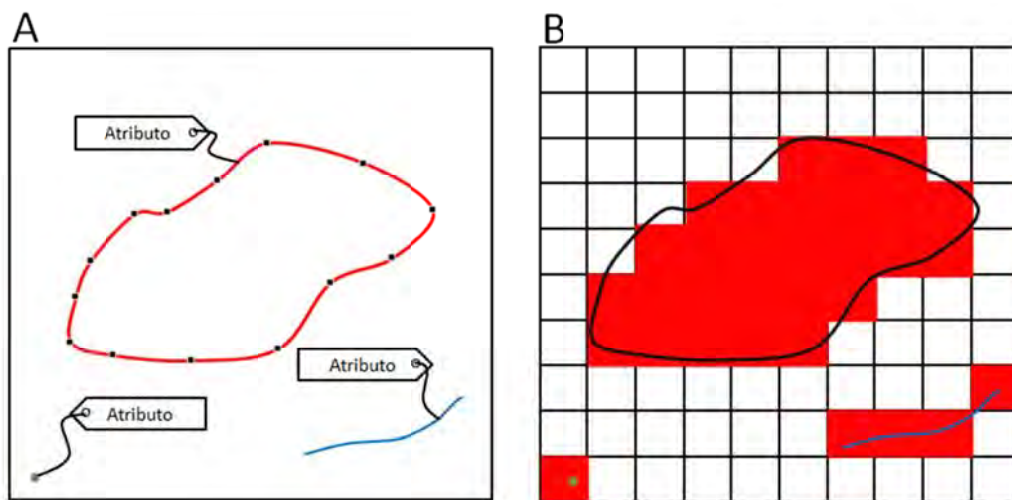


Figura 2.3. A: Representación de objetos utilizando un modelo vectorial. B: Enumeración espacial de los mismos objetos utilizando un modelo ráster.

La resolución espacial de una imagen es una indicación del tamaño del píxel expresada en términos de dimensiones sobre el terreno. A pesar de que un píxel es un elemento gráfico, es común que se llame tamaño del píxel a las dimensiones de las celdas que componen el grid.

Los sistemas de información geográfica no asumen que los píxeles son cuadrados, puesto que la resolución espacial se determina por los rangos de las coordenadas X y Y y el número de columnas y renglones que componen el grid (Hengl *et al.*, 2004).

Entonces, La resolución espacial se refiere a la finura de detalles contenidos en una imagen digital, cuanto menor es el área terrestre representada por cada píxel, mayores son los detalles que pueden ser captados y mayor es la resolución espacial (Heras-Sánchez *et al.*, 2011).

Cada píxel queda determinado por sus coordenadas y por el valor de la variable o el atributo que representa. En este formato un punto quedará representado como una celda completa, una línea por un conjunto de celdas contiguas de sólo un píxel de ancho y un polígono por un conjunto contiguo de celdas de una o más celdas de ancho. La representación de elementos tales como caminos o cursos de agua es posible (desde un punto de vista estético) solo para resoluciones finas. Las dimensiones del píxel se corresponden con la resolución y por lo tanto con la escala de la representación. Esta resolución deberá entonces guardar relación con aquellos elementos, procesos o estructuras que se busca representar. Las imágenes de satélite que se incorporan a un SIG se almacenan en formato ráster. La resolución de la imagen en estos casos varía desde centímetros a decenas de kilómetros de acuerdo al sensor y de la plataforma usada.

Los datos en formato ráster podrán ser continuos o cuantitativos, como en el caso de imagen de satélite, o cualitativos o discretos, como en el caso de mapas

temáticos. En este último caso y a diferencia de los datos continuos los valores del píxel no representan cantidades y por lo tanto no pueden tratarse estadísticamente.

Es importante mencionar que en cualquier estudio que se realice en un ámbito fisiográfico es importante observar la altimetría del área de referencia, la cual se podría tomar como base para definir la resolución espacial a la que se deben proyectar el resto de datos disponibles y estimados (Hutchinson y Gallant, 2000).

2.5 SIG en la modelación Hidrológica

Una cuenca hidrográfica es una superficie delimitada de manera natural por una divisoria (definida por el relieve del terreno) cuyas aguas fluyen hacia una corriente principal o cuerpo de agua. Constituye una subdivisión de la región hidrográfica, la cual agrupa al menos dos cuencas hidrográficas. De igual manera, una cuenca hidrográfica también puede tener subdivisiones de áreas que presentan características particulares de escurrimiento, llamadas subcuencas hidrográficas (INEGI, 2010).

Por otro lado, una cuenca hidrológica integra los datos morfológicos superficiales de una cuenca hidrográfica y los datos hidrogeológicos de un acuífero. De igual manera que una cuenca hidrográfica, la cuenca hidrológica puede integrarse en regiones hidrológicas y dividirse en subcuencas hidrológicas, lo anterior para facilitar la gestión de los recursos hídricos y vigilar la calidad del agua (Cotler, 2010).

Los avances en informática han permitido el desarrollo de SIG y de modelos hidrológicos más completos y poderosos. Actualmente se cuenta con SIG que tienen funciones específicas que facilitan el desarrollo de la modelación hidrológica (MH) y por otra parte se puede disponer de modelos hidrológicos

espacialmente distribuidos construidos en áreas de estudio pequeñas, lo que permite acercarse más al concepto de variación espacial.

El uso de los SIG aplicados a la MH en general, brinda beneficios en la modelación y la simulación de problemas que requieren interpretación y análisis de información espacial (Farías de Reyes y Reyes, 2001).

En el año 1998, el Centro de Investigación en Recursos Hídricos (CRWR) de la Universidad de Texas creó el CRWR-PrePro (como extensión del software ArcView), un pre-procesador que extrae información de datos espaciales digitales y la dispone para ser usada por el software hidrológico HEC-HMS el cual estima caudales (Olivera *et al.*, 1998; Olivera and Maidment, 1999). Otros trabajos más recientes que se han realizado aprovechando las bondades de los SIG en beneficio de la MH son: Programación de una interfaz entre el modelo hidrológico CEQUEAU y el SIG ArcView (Chávez y Estrada, 2005); Extracción de parámetros fisiográficos para un modelo hidrológico mediante la implementación de un módulo geomático (Franco *et al.*, 2006); Estimación de la Evolución de Temperaturas Medias para Detectar Cambios en el Clima Español (Ayuga, *et al.*, 2007b); Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos (Franco, 2008); Relación observada entre evapotranspiración y humedad de suelo en la región monzónica Norteamericana (Vivoni, *et al.*, 2008); Análisis de evapotranspiración (Katul y Novick, 2009); La desertificación altera la respuesta de la vegetación a los cambios en la precipitación (Verón y Paruelo, 2010); Variación espacial y temporal de la producción primaria de los prados húmedos Patagónicos (Buono, *et al.*, 2010); Tendencias de la precipitación en temperaturas extremas en el Noroeste de México (Gutiérrez-Ruacho, *et al.*, 2010); Variabilidad espaciotemporal de la humedad del suelo y evapotranspiración en una cuenca montañosa de la región monzónica Norteamericana (Vivoni, *et al.*, 2010); Desarrollo de un módulo hidro-geomático para la estimación de costos de daños por inundación: aplicación en la cuenca Lerma-Chapala (México) (Gómez-

Albores, 2012). Estimación de la evapotranspiración de referencia usando sistemas amigables para el soporte de decisiones (Bandyopadhyay, *et al.*, 2012); por mencionar algunos.

El análisis y representación de los recursos hídricos de una cuenca hidrológica está en función del conocimiento de los procesos propios que se lleven a cabo dentro de la misma (Llamas, 1993). Los mencionados procesos incluyen la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración y el escurrimiento superficial como componentes principales, los cuales pueden ser representados utilizando modelos matemáticos y computacionales, tratando de reproducir lo mejor posible la física de cada uno de los fenómenos registrados (Campos, 2007).

La calidad de los resultados obtenidos después de la simulación, está en función del cuidado que se haya tenido al momento de integrar la BDG, puesto que si no se representan correctamente los eventos hidrocimatológicos o los datos geográficos y geológicos, la precisión de la información generada no puede ser confiable, por lo tanto, no puede tener aplicación en trabajos de investigación de Geociencias.

2.6 La interpolación espacial

Los datos colectados en campo o los registros de algunas variables son de naturaleza puntual o cubren una superficie pequeña respecto del área total de estudio. Un caso típico, son los registros de precipitación de estaciones climatológicas. Si bien, en muchas ocasiones se requiere representar la cantidad de agua precipitada en un área dada, los registros disponibles corresponden a ubicaciones puntuales. Este problema se plantea, tanto con variables que tienen una variación continua en el espacio (por ejemplo la precipitación), como con otras de variación discreta (una unidad de suelos, por ejemplo), cuando se tienen muestras a partir de las cuales puede calcularse el valor para toda un área

empleando un método conocido como interpolación espacial. Así, con un margen de error calculable, pueden almacenarse eficazmente superficies continuas e irregulares. Para generarlas únicamente se necesita aplicar la función de interpolación a la muestra de datos (Márquez, 2004).

Vargas, Santos, Cardenas y Obregón (2011) mencionan que la interpolación espacial es el procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición en el espacio, conociendo los valores de esa variable en otras posiciones. También destacan la importancia de que la interpolación se lleve a cabo dentro del área en que se encuentran los datos originales, para así diferenciarla del concepto de extrapolación (calcular el valor de una magnitud para valores de la variable que se hallan fuera en que dicha magnitud es conocida).

Burrough y McDonnell (1998) y Cañada *et al.* (2010), consideran que la función de interpolación debe cumplir una serie de condiciones para ser considerada un estimador válido:

- Debe crear una superficie continua a partir de datos distribuidos discretamente en el espacio.
- Debe tener propiedades matemáticas.
- Debe ser fácil de calcular, puesto que si se tienen n puntos con muestras, se calcularán $n \times n$ interpolaciones.
- Debe ajustarse a los datos con un nivel de precisión determinado.
- No deberá permitir fuertes oscilaciones.
- Deberá ser independiente de las muestras de datos.

Existen varias técnicas de interpolación espacial las cuales se clasifican en globales, locales y geoestadísticas. Los diferentes métodos ofrecen distintos desempeños de acuerdo a las características del área de estudio, lo mejor es

probar diversos métodos y comparar los resultados para determinar el método más apropiado para cada caso de estudio espacial y/o temporal (Vargas, *et al.*, 2011).

La interpolación puede ser global cuando se define una función a partir del conjunto completo de puntos y está se aplica toda el área en la cual se quiere definir esa variable. Los métodos globales utilizan información externa como datos geográficos y topográficos, tendencias de superficies y modelos de regresión, además de análisis espectrales. Los interpoladores globales no son generalmente usados para interpolación directa, sino para examinar y posiblemente eliminar los efectos de variaciones globales causadas por tendencias. Las superficies de tendencias no tratan de representar con fidelidad la totalidad de un área de estudio, sino de señalar cual es la tendencia de los datos espaciales (Márquez, 2004), como es el caso de estructuras geológicas profundas donde se puede determinar si el estrato tiende a subir o bajar, o si es de forma cóncava o convexa, o si el espesor aumenta o disminuye.

Los métodos de interpolación local se basan en punto de apoyo ubicados en la vecindad del punto a interpolar, basándose en los datos puntuales se formula una función matemática para predecir el valor de la variable en el resto de los puntos (Howard, 2011). El proceso es espacialmente continuo. Algunas formas de interpolación local que se utilizan con frecuencia son la interpolación lineal, la interpolación polinómica, la interpolación usando ajuste por curvas (splines), además del método de distancia inversa (Cañada *et al.*, 2010).

Otra alternativa de interpolación es el “Kriging”, un método geoestadístico de estimación de puntos que utiliza un modelo de variograma para la obtención de datos. Esta aproximación geoestadística se basa en los puntos más próximos se parecen más que a los más lejanos. Supone que la distribución de las diferencias entre puntos es constante en el área y que depende de la distancia y la orientación de los puntos. En definitiva supone que las diferencias no son

constantes sino consistentes en el espacio. El variograma (o semivariograma) es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida considerando la influencia de los datos a diferentes distancias. Consiste básicamente en un gráfico de la semivarianza en función de la distancia entre pares de puntos. La semivarianza de puntos separados por un intervalo h es una medida de la influencia de puntos ubicados a esa distancia sobre la variable en cuestión (por ejemplo la precipitación). El método Kriging calcula los pesos que se darán a cada punto observado. Esta técnica de interpolación se basa en la premisa de que la variación espacial continúa con el mismo patrón (Sun, *et al.*, 2009).

Los especialistas Teegavarapu, Meskele y Pathak (2012) opinan que si los datos son abundantes, la mayoría de las técnicas de interpolación darán similares resultados, por otro lado, si los datos son escasos o se encuentran mal distribuidos es muy importante determinar cuidadosamente el método de interpolación y sus parámetros de control.

Capítulo 3. Materiales y métodos

3.1 Características del área de estudio

La cuenca hidrográfica del Río San Miguel queda comprendida dentro de la Región Hidrológica RH-8, Sonora Norte y se encuentra clasificada como una subcuenca de la Cuenca Río Sonora. De acuerdo con la clasificación hidrológica que se dispone para esta zona, no se tiene información sobre subregiones hidrológicas formales. Según la Comisión Nacional del Agua, el acuífero Río San Miguel, se ubica entonces, dentro de la cuenca 8D-Río Sonora.

3.1.1 Ubicación geográfica del área de estudio

La Cuenca Hidrográfica del Río San Miguel se localiza geográficamente en la parte centro-norte del Estado de Sonora, México, tal y como se puede apreciar en la figura 3.1, siendo los Municipios de Cucurpe, Opodepe y Rayón, los que aportan la mayor cantidad de agua a la cuenca (Figura 3.2). El área del polígono en el cual se encuentra enmarcada la cuenca en mención, tiene una extensión de 17,378.25 km² y un perímetro de 546.11 km. Las coordenadas UTM de los puntos que definen al polígono son las siguientes: a(482805,3408152), b(583812,3408152), c(482805,3236102) y d(583812,3236102).

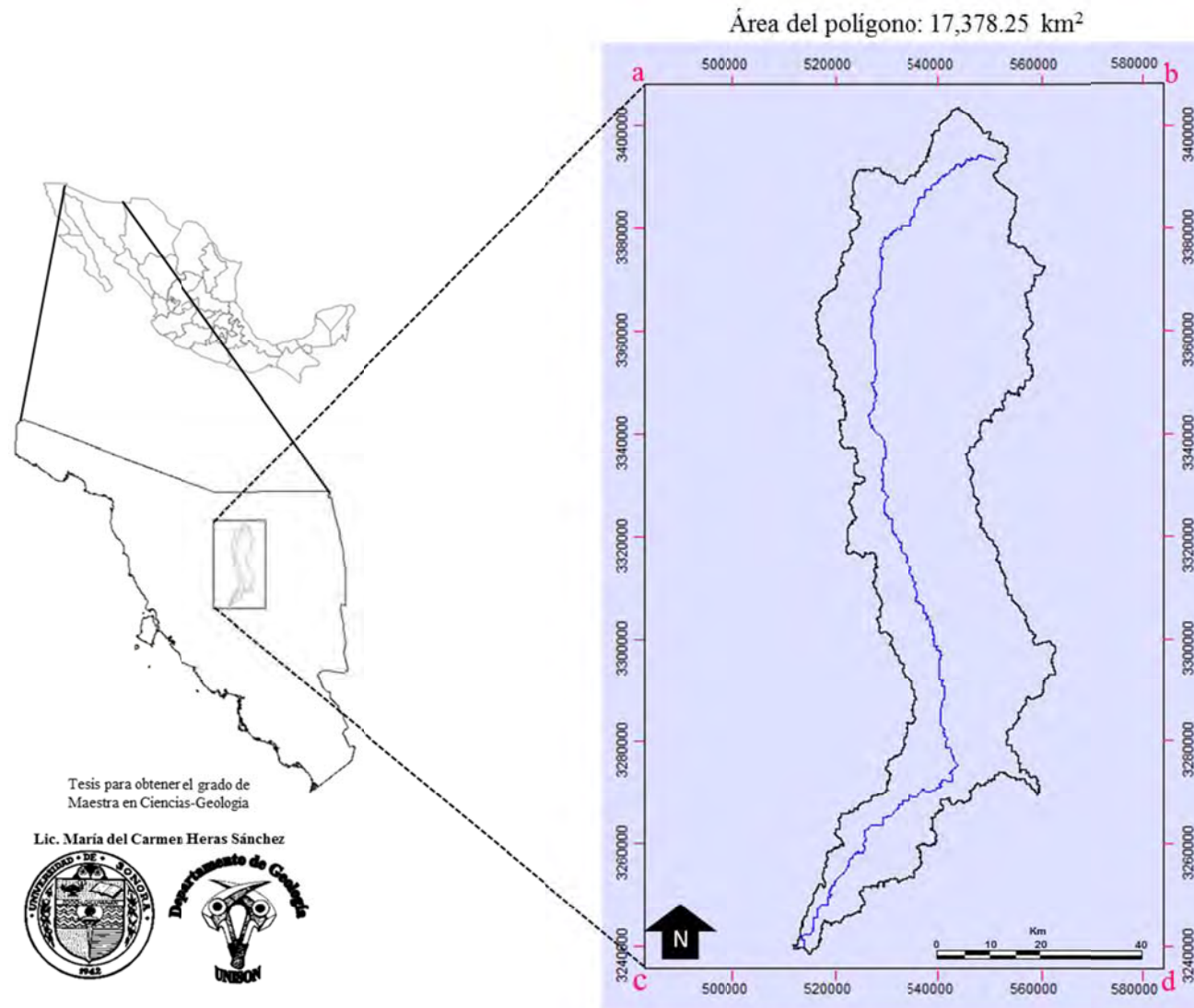


Figura 3.1. Ubicación geográfica del área de estudio.

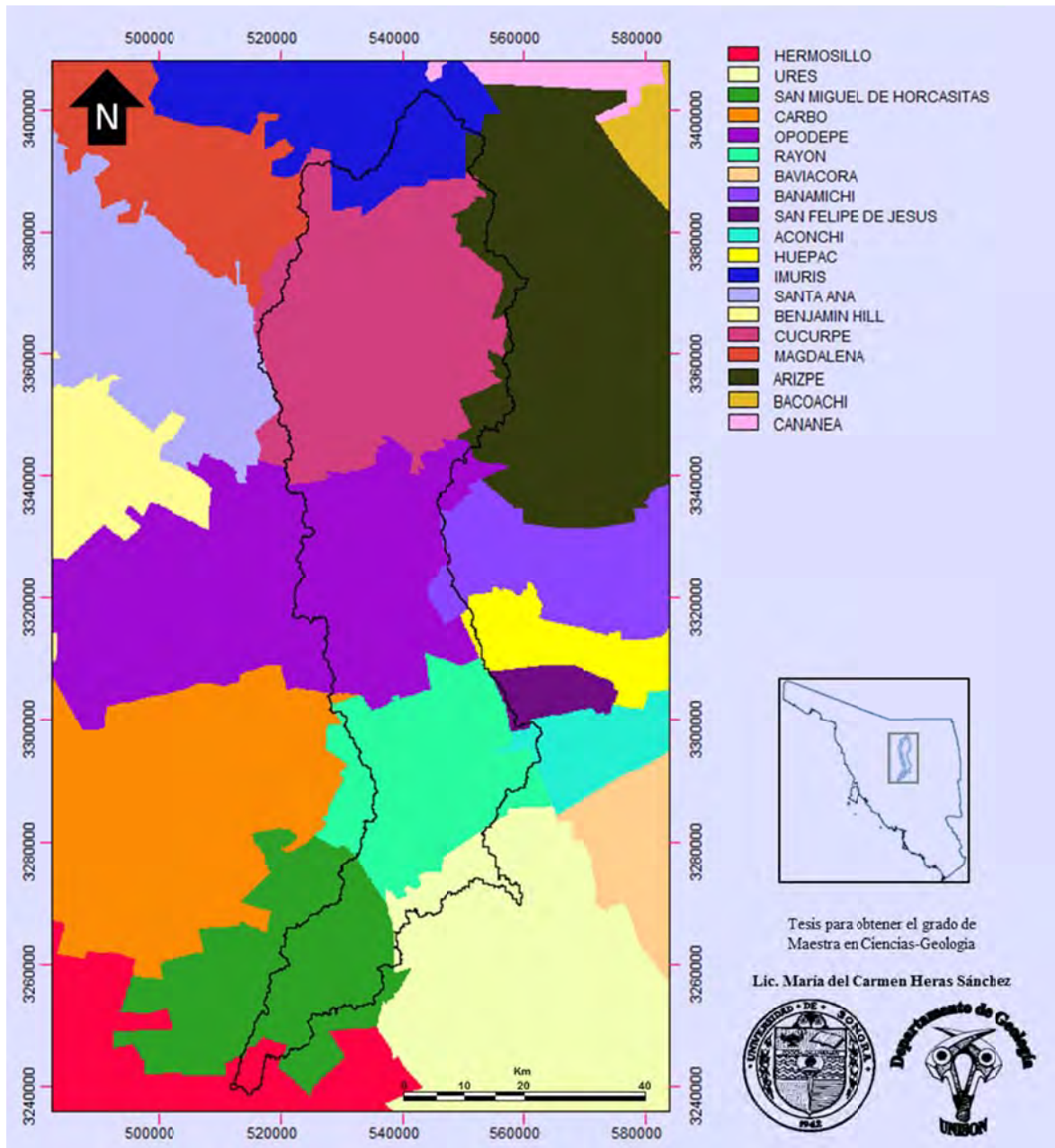


Figura 3.2. Municipios que cubre el área de estudio.

3.1.2 Principales localidades y su población

Dentro de la cuenca del Río San Miguel se encuentran las poblaciones de Cucurpe, Rayón, San Miguel de Horcasitas, Opodepe, además de otras comunidades de menor importancia y rancherías. En la figura 3.3 se puede apreciar la ubicación geográfica de las mencionadas poblaciones y los principales afluentes que tributan agua al río principal.

3.1.3 Drenaje de la cuenca y su orden de corriente

El orden de corriente está determinado por el orden del cauce principal. Un orden alto, indica un drenaje más eficiente que desalojará rápidamente el agua.

- Corriente de primer orden: pequeños canales que no tienen tributario(s)
- Corriente de segundo orden: dos corrientes de primer orden se unen
- Corriente de tercer orden: dos corrientes de segundo orden se unen
- Corriente de orden $n+1$: dos corrientes de orden n se unen

Es muy importante considerar la escala a la que se está estudiando la cuenca, mientras más detallada sea la cuenca se puede clasificar en un orden de corriente mayor.

En la figura 3.4 se pueden apreciar las corrientes principales y el orden de magnitud de las mismas, del área de estudio.

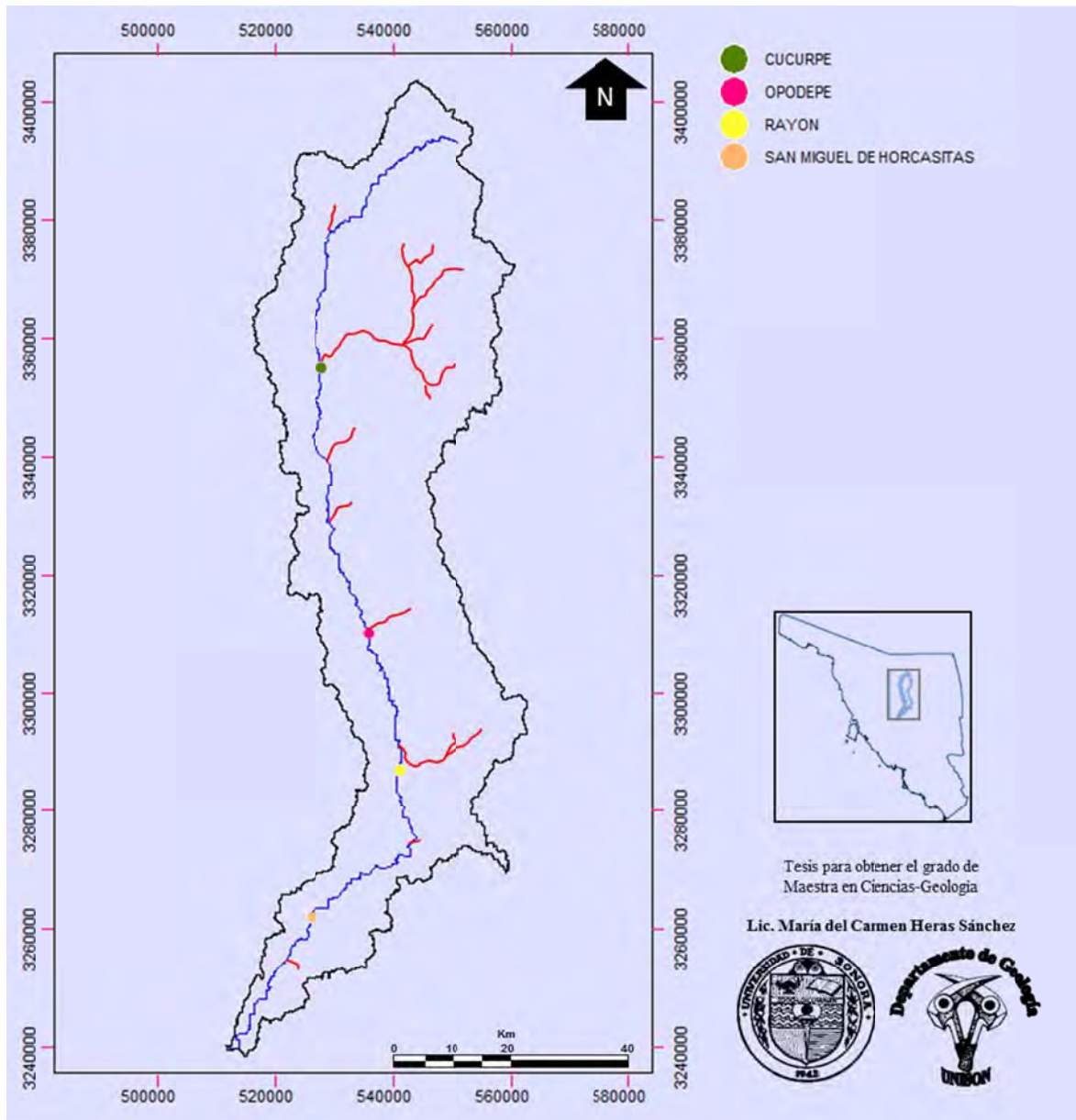


Figura 3.3. Principales localidades y corrientes de agua superficiales de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

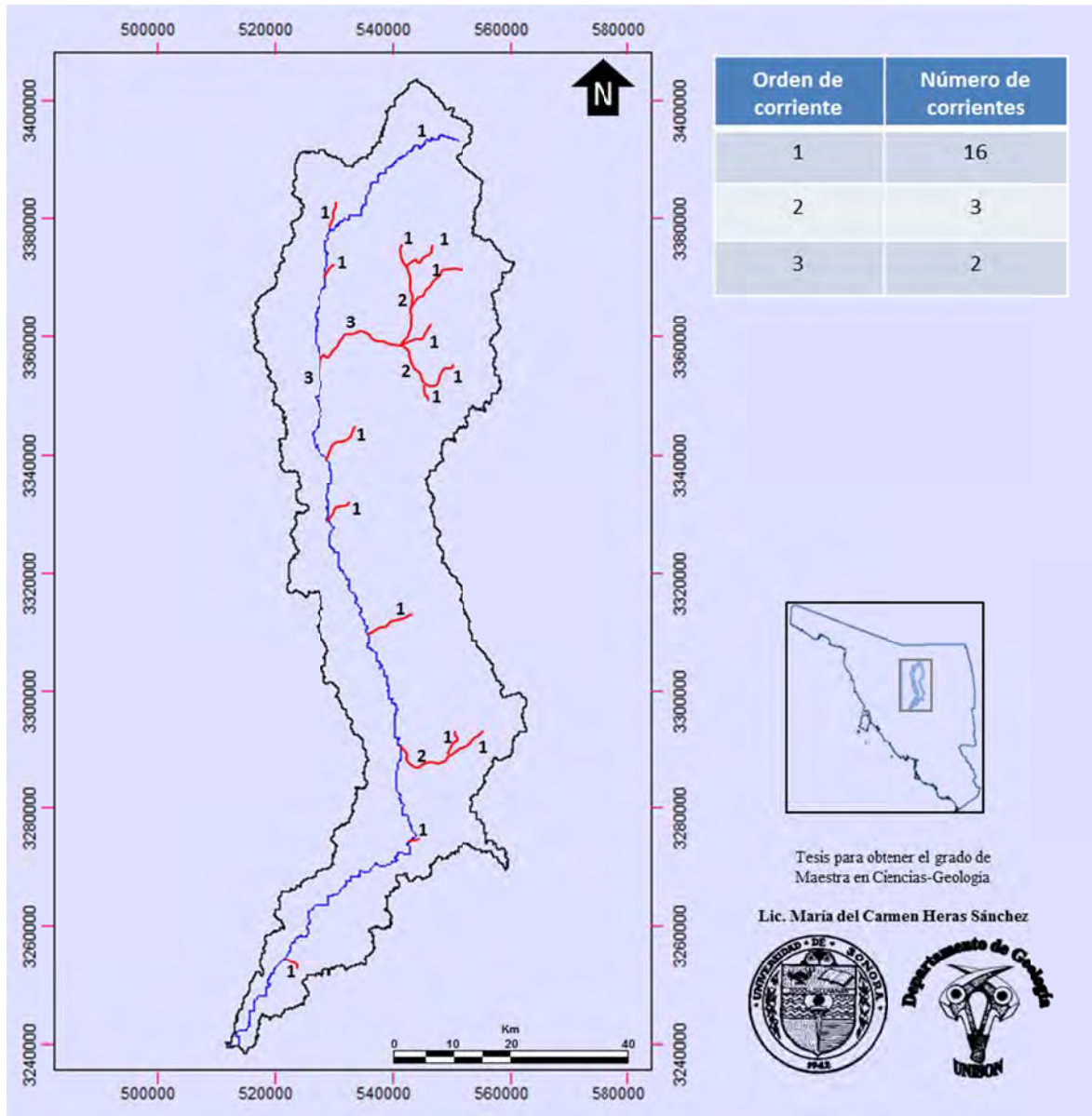


Figura 3.4. Orden de corrientes de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

3.2 Origen de los datos y sus atributos

Los datos son la parte fundamental de un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual está diseñado para transformarlos en información, es decir, para darle sentido a los datos. Mientras un dato por si solo indica el valor de una variable en una determinada ubicación geográfica, la información asociada a ése dato, permite identificar otros atributos y variables, por ejemplo un tipo particular de suelos o de vegetación.

Para ingresar los datos a un SIG, deben ser transformados a un formato susceptible de ser almacenado en una computadora, además de pasar por un proceso de georreferenciación, formando así una Base de Datos Geográfica (BDG). Las estructuras de datos digitales en las que puede almacenarse información acerca de un atributo geográfico son básicamente: ráster (grid) y vector.

A una BDG pueden sumarse datos e información provenientes de diversas fuentes digitales: datos ráster en formato continuo (imágenes de satélite, fotografías aéreas, modelos digitales de elevación del terreno, etc.), datos ráster categóricos o mapas temáticos (vegetación, suelos, usos del suelo, etc.), estadísticas varias (censos de población, agropecuarios, etc.), datos o información acerca de atributos vectoriales (composición química de suelos, nombre de calles, características de un curso de agua, etc.).

Para desarrollar éste trabajo, se han integrado datos de fuentes diversas siendo las principales el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), las estaciones de registro de datos climatológicos de la Universidad de Sonora (ER), imágenes de satélite, entre otras. Del INEGI se han obtenido tanto los Modelos Digitales de Elevación a escala 1:50,000, como la cartografía temática digital, del área cubierta por las coordenadas geográficas

desde $-111^{\circ}20'0''$ hasta $-110^{\circ}0'0''$ de longitud Oeste y desde el grado $29^{\circ}15'0''$ hasta $31^{\circ}15'0''$ de latitud Norte.

3.2.1 Modelos Digitales de Elevación

En el año 2003 se creó el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) escala 1:50,000, que es la integración de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) del territorio nacional basados en la cartografía topográfica escala 1:50,000 producida por el INEGI. Los MDE se encuentran organizados e identificados por la clave topográfica del terreno que cubren, la estructura de los datos es ráster y cuentan con un marco de referencia vertical y horizontal uniforme. Los archivos se descargaron gratuitamente en formatos .BIL (contiene los datos de las elevaciones), .HDR y .BLW. (archivos auxiliares).

Las alturas se guardan en valores enteros con signo en forma binaria utilizando 16 bits para cada dato, cada dato corresponde a una celda de $1'' \times 1''$ (1 segundo de arco cuadrado) y están ordenados por renglones de norte a sur y en sentido oeste a este, en los archivos auxiliares se indica el número de filas y columnas y las coordenadas de la esquina superior izquierda.

La información se proporciona en coordenadas geográficas, las unidades de Z están en metros, el datum es ITRF92 época 1988.0 o elipsoide GRS80.

Para conformar el polígono del sitio de estudio se descargaron 32 archivos que al unirse en una especie de mosaico brindan un primer recurso del que se extrae, justamente el área de interés que cubre los $17,378.25 \text{ km}^2$ (Figura 3.5). Las claves que identifican éstos recursos a escala 1:50,000 son: H12A49, H12A59, H12A69, H12A79, H12A89, H12C19, H12C29, H12C39, H12B41, H12B51, H12B61, H12B71, H12B81, H12D11, H12D21, H12D31, H12B42, H12B52,

H12B62, H12B72, H12B82, H12D12, H12D22, H12D32, H12B43, H12B53, H12B63, H12B73, H12B83, H12D13, H12D23 y H12D33.

3.2.2 Cartografía Temática Digital

Desde el año 1994 y hasta el año 2003, aproximadamente, el INEGI se dio a la tarea de construir una Base de Datos Geográfica digital implementando diversas versiones de Sistemas de Información Geográfica. Los datos que constituyen esta información se clasifican, de acuerdo con su representación, en tres tipos: vectorial, ráster y alfanumérico. El tipo vectorial contiene los datos provenientes de las cartas que a diferentes escalas y temas se han producido, convirtiéndose para referencias en éste trabajo, en la Cartografía Temática Digital (CTD).

Estos conjuntos de datos vectoriales se encuentran en formato shape y tienen proyección geográfica Cónica Conforme de Lambert (CCL). Los archivos SHAPE son archivos vectoriales, compuestos por entidades de tipo punto, línea y área. Un archivo Shape se compone a su vez de tres archivos con extensión .SHX, .SHP y .DBF en los cuales se almacena información geométrica y alfanumérica.

A continuación se detalla información sobre la cartografía del INEGI integrada en la BDG construida para el área de estudio.

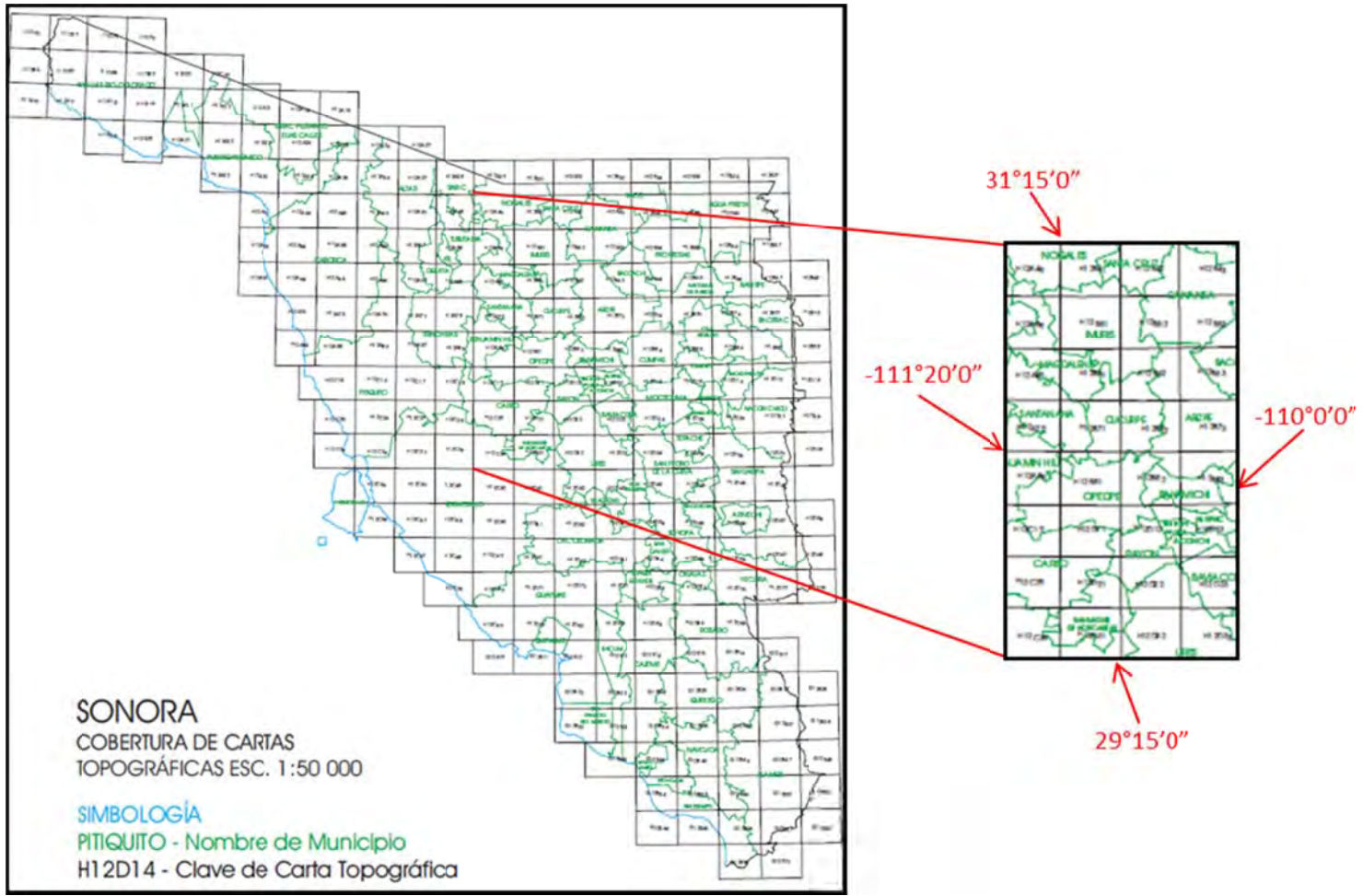


Figura 3.5. Mosaico de archivos a escala 1:50,000.

Fisiografía

La cartografía fisiográfica presenta una visión general del gran mosaico de formas del relieve que caracterizan el Territorio Nacional, a través de conjuntos paisajísticos relativamente homogéneos, identificados y definidos a partir del análisis integral de información topográfica, geológica, hidrológica y edafológica.

La división planteada muestra unidades y subunidades de información que abarcan extensiones considerables de terreno, siguiendo un enfoque metodológico, básicamente cartográfico.

Los grandes conjuntos estructurales que integran la porción continental e insular del país, definen unidades morfológicas superficiales de características distintivas. La clasificación comprende la provincia, que es una gran área con características similares; la subprovincia, primera subdivisión en donde las condiciones paisajísticas son más recurrentes; la discontinuidad fisiográfica, que es una zona con morfología propia que la distingue; los sistemas de topoformas que agrupan elementos, y las topoformas, que constituyen el producto de la interacción de los agentes formadores del relieve.

En este trabajo se incluyen las provincias fisiográficas, las subprovincias fisiográficas y el sistema de topoformas.

Geología

La carta geológica escala 1:1,000,000 proporciona información regional referente a la naturaleza de las rocas, su origen y su edad, así como estructuras geológicas que las afectan, además de información puntual de áreas geoeconómicas. La información aquí referida es útil como un marco desde la investigación hasta la aplicación en diversas disciplinas de las ciencias de la tierra.

En la BDG se incluyen los subtemas de geomorfología estructural, minas y catas, y litología.

Hidrología Superficial

Para la conformación de la carta temática de hidrología superficial del INEGI, se consideran rasgos propios del tema, tales como: regiones hidrológicas, cuencas y subcuencas, unidades de escurrimiento, distritos de riego y estaciones hidrométricas, entre otros. Estos rasgos son integrados conceptualmente como entidades, con características espaciales y descriptivas definidas en forma particular para cada una de ellas, considerando sus interrelaciones y las dimensiones mínimas de representación cartográfica. Además se incluye un índice de referencia de entidades, un catálogo con la división hidrológica, donde aparecen las claves y nombre de las regiones, cuencas y subcuencas, y un catálogo de los Distritos de Riego.

En la BDG para el área de estudio se incluyen los rasgos referentes a las regiones hidrológicas, las unidades de escurrimiento y las estaciones hidrométricas.

Hidrología Subterránea

En la cartografía de hidrología subterránea, se describen de manera textual, las características del Territorio Nacional, desde el punto de vista de sus propiedades relacionadas con la presencia o probabilidad de agua subterránea, así como de su comportamiento, explotación, control y afectación por la intrusión salina.

Los subtemas incluidos en la BDG son flujo, unidades geohidrológicas, calidad de agua y aprovechamientos, área de veda, y concentración de pozos.

Localidades y Municipios

La información referente a la localización geográfica de las localidades y la identificación de los polígonos que forman los municipios, se encuentra incluida en archivos vectoriales y ráster.

Topografía

Las cartas topográficas contienen información como los nombres y ubicación de las localidades urbanas y rurales, las principales obras de infraestructura hechas por el hombre, la representación del relieve, los rasgos hidrográficos más representativos como son: ríos, arroyos, presas y lagunas.

El INEGI elabora estos mapas en varias escalas para que se tenga oportunidad de identificar a diferentes niveles de detalle las características del territorio nacional. Para el área de estudio se lograron conformar los siguientes componentes: cuerpos de agua, curvas de nivel, localidades urbanas, ríos, topónimos y vías de transporte.

Uso del Suelo y Vegetación

En la carta de uso del suelo y vegetación, se representa la localización y extensión de los diferentes tipos de vegetación y agricultura, así como erosión apreciable.

Para la recopilación de datos vectoriales del área de estudio se integraron los elementos de actividad pecuaria, agricultura nómada, especies vegetales y vegetación.

Uso potencial

La cartografía de uso potencial de la tierra presenta los tipos de uso agrícola, pecuario y forestal con posibilidades de ser establecidos en una determinada unidad de terreno, sin considerar su ubicación geográfica, ni ningún criterio de evaluación del potencial de uso relacionado con otros atributos como vías de comunicación, localidades, etc. Los elementos reunidos de ésta cartografía son el uso potencial para la agricultura, forestal y ganadería.

Edafología

La carta edafológica es una representación gráfica del inventario general de los tipos de suelo. Es posible conocer aquellas áreas que muestran las mejores posibilidades de uso y manejo del suelo puesto que, contiene información acerca de la textura superficial dominante y en su caso las limitantes químicas (sal, sodio) o físicas (roca, tepetate, pedregosidad) que más afectan el uso y manejo del suelo.

Climatología

Entendiendo que el clima es el estado medio de la atmósfera en un lugar, se representan la temperatura media anual y la precipitación total anual, así como los tipos de clima según la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García para adaptarla a las condiciones del territorio mexicano (García, 1973). En función de las escalas disponibles, se considera también la presencia de fenómenos como la canícula, sequía interestival, heladas y vientos dominantes, déficit de agua, evapotranspiración real media anual, y balance de agua por cuenca.

Para el caso del área de estudio se logró recopilar información sobre las unidades climatológicas, la evapotranspiración, la humedad en el suelo y la precipitación media anual.

3.2.3 Imágenes de satélite

Se incluye imagen de satélite georreferenciada del área de estudio, la cual fue obtenida del recurso público de Google Earth. De la misma manera se cuenta con imágenes de satélite Landsat de resolución de 1000 m, las cuales fueron obtenidas del sistema en línea glovis (visualizador global) desarrollado por U.S. Geological Survey. En el mencionado sistema se pueden visualizar y descargar gratuitamente, colecciones de imágenes de más de 30 años de cualquier parte del mundo. Las colecciones correspondientes al área de estudio se encuentran identificadas por la trayectoria 35, renglones 39 y 40.

3.2.4 Estaciones de registro de datos climatológicos

Una estación de registro de datos climatológicos (ER) es un instrumento destinado a medir y registrar diversas variables climatológicas con el fin de estudiar la transferencia del agua y energía entre la superficie y la atmósfera.

En la Cuenca Hidrológica del Río San Miguel se tienen instaladas un buen número de ER, las cuales proporcionan datos puntuales sobre precipitación, temperatura y humedad del suelo, además de otros parámetros. Los datos se registran cada hora como valores alfanuméricos ordenados por columnas y separados por espacios, los cuales se transfieren a formato de hoja de cálculo para facilitar su consulta y su almacenamiento. Los datos deben ser preprocesados y referenciados geográficamente para introducirse a la BDG utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG). Para el caso de la BDG construida se consideraron 8 ER y sus correspondientes registros de precipitación. Se eligió el periodo del 01 de Junio al 31 de Septiembre del 2005, por ser los datos que se encontraban disponibles en el momento, los cuales son suficientes para probar la metodología, además, en cualquier momento se

pueden agregar otros datos similares, correspondientes a otros periodos y acumulados con otra frecuencia, según sean requeridos.

3.3 Especificación de los atributos de los datos

Una vez que se colectaron y analizaron los datos se decidió sobre los atributos más convenientes para estructurar la información, lo anterior en función del espacio geográfico que cubre el área de estudio, la resolución espacial de los datos disponibles, el detalle requerido de la información, el sistema de coordenadas más adecuado, la cantidad de registros de los parámetros climatológicos de interés, el formato de los datos temáticos requeridos para las estimaciones, entre otras.

3.3.1 Proyección cartográfica y sistema de coordenadas

Un sistema de coordenadas sirve para identificar la posición de un punto en el espacio en relación a un punto de referencia, cuyos valores de posición inicial son el cero. Cuando se habla de coordenadas en el espacio terrestre, se relaciona al sistema de coordenadas geográficas, donde el punto de referencia o de partida es el que corresponde al Ecuador y al Meridiano de Greenwich. Los pares de coordenadas geográficas se expresan en grados, minutos y segundos o en su equivalente en decimal. Los valores enteros o fraccionarios van desde 0 hasta ± 90 , para representar diferentes latitudes y de 0 hasta ± 180 , para representar longitudes. Así, cuando se habla de información geográfica referida o referenciada, se trata de datos que corresponden a un espacio identificado por sus coordenadas (x,y) o (latitud,longitud).

Por otra parte, debido a que la forma de la tierra es un geoide (tiene ondulaciones debido a las fuerzas gravitacionales de la tierra, Figura 3.6), se han establecido una serie de proyecciones cartográficas para poder representar en un plano tanto

sus dimensiones, como sus rasgos característicos. La proyección cartográfica más empleada en la cartografía, geodesia y navegación, es la Proyección de Mercator, creada por Gerardus Mercator en 1569, la cual es cilíndrica y aunque presenta algunas distorsiones hacia los polos, éstas se pueden “arreglar” utilizando el dátum que los corrija. Un dátum son los datos de referencia geodésica, como el sistema de coordenadas y el modelo geométrico asociado a la Tierra utilizado para lograr sus mediciones.



Figura 3.6. Representación de las fuerzas gravitacionales de la Tierra formando un geoide.

Se utilizó el sistema de coordenadas UTM, basado en la Proyección de Mercator y como modelo base del sistema de coordenadas, el elipsoide WGS84 (World Geodetic System 84), el cual consiste en un patrón matemático de tres dimensiones, que representa la tierra por medio de un cuerpo geométrico más regular y el más acertado para medirla. Una cualidad del sistema de coordenadas UTM, es que maneja valores que representan metros y no hay que hacer conversiones entre grados, minutos y segundos al sistema métrico, de esta manera, se pueden obtener mediciones de áreas o distancias en metros o

kilómetros. Por otro lado, existe la confianza de que nuestra área de estudio se encuentra posicionada en la parte central de la zona 12 de la proyección UTM (Figura 3.7), lo cual significa que los desfases se disminuyen considerablemente, puesto que cada zona cubre 6 grados de longitud y toma de referencia principal el medio, en este caso la zona 12 va del grado -114W (oeste) al -108W y la longitud de referencia es entre el grado -111W y -110W, justo nuestra área de estudio a la altura de los grados 29N(norte) y 31N.

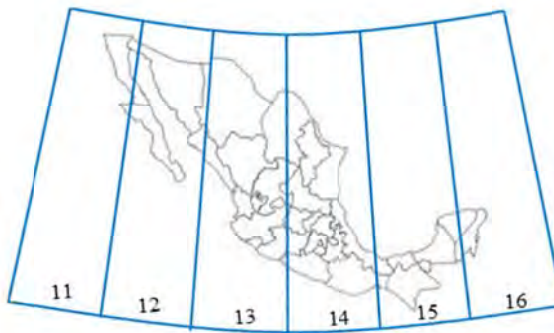


Figura 3.7. Aproximación de la división de las zonas UTM para México.

3.3.2 Definición de la resolución espacial con base en la información geográfica disponible

En cualquier estudio que se realice en un ámbito fisiográfico es importante observar la altimetría del área de referencia. Considerando lo anterior se tomó como base los MDE para definir la resolución espacial a la que se deben proyectar el resto de datos disponibles y estimados.

Los fundamentos para calcular la resolución de los MDE son los siguientes:

- La resolución espacial de una imagen es una indicación del tamaño del píxel (o celda) expresada en términos de dimensiones sobre el terreno.
- Los sistemas de información geográfica no asumen que los píxeles son cuadrados.

- La resolución espacial se determina por los rangos de las coordenadas X y Y y el número de columnas y renglones que componen el grid.
- El dátum UTM12N de Idrisi considera el sistema de coordenadas UTM para la zona 12 Norte y el modelo geométrico WGS84.

En consecuencia, la dimensión de las celdas para el objeto de estudio se define así:

Resolución espacial $X = X_{\max} - X_{\min} / n_{\text{col}} = 583812 - 482805 / 3741 = 27$.

Resolución espacial $Y = Y_{\max} - Y_{\min} / n_{\text{ren}} = 3408152 - 3236102 / 5550 = 31$.

Resolución espacial de las celdas en X y Y para los MDE = 27X31.

Entonces, la resolución espacial se refiere a la finura de detalles contenidos en una imagen digital, cuanto menor es el área terrestre representada por cada píxel, mayores son los detalles que pueden ser captados y mayor es la resolución espacial. En el caso de la resolución espacial de las imágenes con información temática, ésta se definió a una escala mayor, de hecho, la dimensión de los píxeles son 3 veces más grandes que la de los MDE, para los que se requiere mayor detalle y precisión para los cálculos.

Resolución espacial de las celdas en X y Y para información temática = 81X93.

3.3.3 Evaluación de la resolución espacial

Considerando la importancia de la altimetría como parte de una BDG, se puso especial interés en determinar la resolución de las celdas que componen el grid del área de estudio. Se hicieron corridas experimentales con diferentes cortes del área comprendida dentro del polígono con la intención de corroborar la resolución resultante de la fórmula general. Como parte del proceso se consultó (comunicación oral) sobre la metodología empleada a la Geóg. Luisa Reyna Soto

García, quien labora en la Dirección General de Geografía del INEGI, quien sostiene que el píxel debe ser cuadrado en sus dimensiones, lo cual es totalmente cierto siempre y cuando utilicemos el sistema de coordenadas geográficas. Se hicieron pruebas con diferentes dátum y se obtuvieron diferentes resultados, lo que es consistente debido a que se basan en diferentes figuras geométricas para representar a la Tierra. Los experimentos se basaron en el siguiente orden:

Primero se convirtieron las coordenadas geográficas (-110°0'0",31°0'0") tanto en NAD27 (North American Dátum, Elipsoide de Clark de 1866) como en NAD83.2007 (North American Dátum, Elipsoide WGS84 de 2007) y las coordenadas (-110°0'1",31°0'1") con el fin de calcular cuanto mide en metros un segundo cuadrado para la zona 12N, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 3.1. Conversión de 1" X 1" en metros

Geográficas	NAD27	NAD83.2007
(-110°0'0",31°0'0")	(595408.7,3430042.9)	(595468.3,3430031.0)
(-110°0'1",31°0'1")	(595381.9,3430073.4)	(595441.5,3430061.6)

Los cálculos indican que la resolución métrica es de 26.8X30.5 con nad27 y 26.8X30.6 con nad83.2007, mientras que en grados el píxel sigue siendo cuadrado de 0.0002777777778 grados X 0.0002777777778 grados. Después se hicieron las conversiones para el mosaico completo, con los siguientes resultados:

Tabla 3.2. Conversión del mosaico completo en coordenadas métricas

Geográficas	NAD27	NAD83.2007
(-110°0'0",31°15'0")	(595280.4, 3457543.9)	(595218.3, 3457739.9)
(-111°20'0",29°15'0")	(467670.1, 3235537.1)	(467611.7, 3235730.0)

Para este caso el resultado de los cálculos de la resolución para la celda es de 26.59X30.83 metros, tanto para NAD27 como para NAD83.2007; sin embargo, se puede observar como las coordenadas de los puntos están desfasadas en dirección sureste, en un rango de 58.4 a 62.1 metros en longitud (X) y de -192.9 a -196 metros en latitud (Y) lo cual se debe a que los cálculos se realizan con base en diferentes figuras geométricas (Figura 3.8).

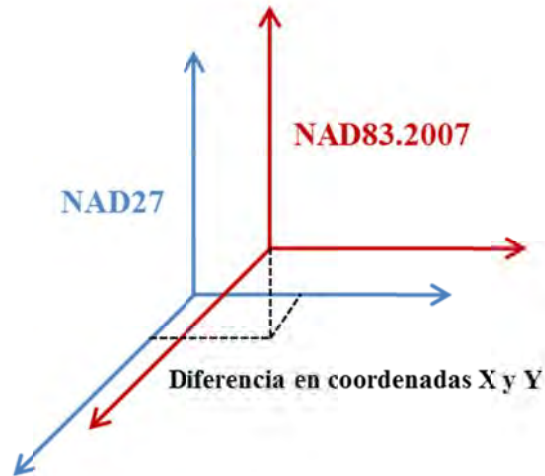


Figura 3.8. Desfase de coordenadas usando diferentes Datum.

También se intentó ajustar a una resolución de 30X30 metros, sin embargo, al hacer los cálculos las coordenadas máximas no corresponden a las originales ni siquiera en coordenadas geométricas (una vez hecha la conversión), puesto que el SIG se basa en un punto inicial para extender el sistema de coordenadas al resto de los puntos que componen la imagen, sumando la distancia en metros (de la resolución, en este caso 30) multiplicada por 4,800 y 7,200 celdas tanto para longitud como para latitud, respectivamente (tabla 3.3).

Tabla 3.3. Conversión de coordenadas máximas de métricas a geográficas

Coordenadas de origen		Coordenadas máximas de la grid de 4800X7200 celdas	
NAD83.2007	Geográficas	NAD83.2007	Geográficas
(467611.7,3235730.0)	(-111°20'0",29°15'0")	(611611.7,3451730)	(-109°49'42",31°11'39")

Lo anterior sugiere que el píxel de los MDE del INEGI no es cuadrado y que dependiendo del sistema de coordenadas métrico y del área que se cubra en el muestreo, puede haber variaciones tanto en los pares de coordenadas resultantes, como en el cálculo de longitudes y áreas.

3.4 Recursos de software y hardware

Uno de los retos que se presentaron para construir la BDG, es el tamaño de las imágenes y el gran volumen de datos tabulares que se deben integrar, los cuales representan un espacio geográfico de 17,378.25 km², incluyendo la cartografía temática editada por INEGI en los años de 1994 al 2001 (temas, series y años en la tabla 3.5), además de las imágenes generadas de la precipitación, cuyos valores deben ser sometidos a algoritmos complejos que realicen los cálculos necesarios para obtener los indicadores deseados, que a la vez involucran “*n*” variables procedentes de datos tabulares con información puntual o imágenes vectoriales que representan a los distintos parámetros.

3.4.1 Sistema de información geográfica

Existen un buen número de SIG que proporcionan las herramientas necesarias para el cálculo y el análisis visual de los datos geográficos, lo que marca la diferencia entre ellos es el costo computacional y económico que se requiere para su óptimo funcionamiento. Para este caso el sistema informático utilizado fue Idrisi Taiga, desarrollado por Clark Labs, de la Universidad de Clark (Clark Labs, 2012), que ofrece las ventajas de una amplia portabilidad entre formatos de geodatos, algoritmos rápidos, se instala en diversas plataformas y es fácilmente asequible, sobre todo por su costo.

3.4.2 Modelos de datos geográficos

Cuando se cuenta con datos tan diversos como los que se han recabado, es de suma importancia organizarlos para hacer más sencilla su manipulación. Se ha decidido utilizar los modelos de datos ráster, vector y alfanuméricos para representar las características de la Cuenca de Río San Miguel que son parte del análisis.

Un modelo de datos computacional es una simplificación numérica de la realidad, para el que debe definirse una estructura de datos y los tipos de archivos más convenientes según sea el caso, por ejemplo, para representar las elevaciones de la cuenca, el modelo de datos adecuado es el ráster, que está conformado por un grid de datos y se encuentra almacenado en un archivo binario codificado. Por otro lado los datos vectoriales corresponden a la representación digital de fenómenos discretos (con límites definidos sobre el espacio geográfico) utilizando una serie de puntos, líneas o polígonos, conformando diferentes capas de información como localidades, fisiografía, curvas de nivel, entre otros.

En lo que corresponde a los datos alfanuméricos, se encuentran archivos de tipo texto con diferentes atributos considerados de interés, relativos a los diferentes rasgos existentes en los conjuntos de datos vectoriales. En ésta clase se incluyen archivos de nombres geográficos (topónimos y localidades), puntos geodésicos, puntos de muestreo, descripciones de unidades temáticas y otros.

3.4.3 Infraestructura computacional

El proyecto exige una gran capacidad de cómputo y complejos algoritmos que resuelvan cada problema matemático y de simulación, por lo que la BDG se implementó en un servidor con 16 GB en RAM y un sistema de almacenamiento masivo de 4 TB. Los mencionados recursos han sido proporcionados por el

Centro de Desarrollo de Aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección del Departamento de Ingeniería Civil y Minas, y por el Área de Cómputo de Alto Rendimiento de la Universidad de Sonora (ACARUS).

3.5 Metodología y procesos para la construcción de la BDG

La metodología que se ha desarrollado integra datos sistemáticamente validados, los cuales pueden ser utilizados como soporte para estudios que requieran realizar diferentes procesos incluyendo análisis numéricos y visuales de modelos climatológicos temáticos-temporales, además del análisis espacio-temporal de la precipitación, humedad del suelo, escurrimiento, evapotranspiración y la modelación hidrológica de parámetros distribuidos en cuencas similares a la del Río San Miguel, Sonora. En la figura 3.9 se pueden observar de manera genérica, todos los procesos que se llevaron a cabo, además de las entradas y salidas de datos y documentos del mismo.

3.5.1 Generación del mosaico y extracción del polígono

Modelos Digitales de Elevación

El proceso se puede apreciar en la figura 3.10. Para iniciar se importaron los archivos .BIL (formato de los MDE de INEGI) a Idrisi tomando en cuenta los metadatos contenidos en los archivos .HDR y .BLW. Este proceso se llevó a cabo con el comando GENERICRASTER (Idrisi, 2008), el cual arroja como resultado 32 archivos ráster, que contienen el grid con las elevaciones del terreno en una superficie de 20' de longitud Oeste por 15' de latitud Norte.

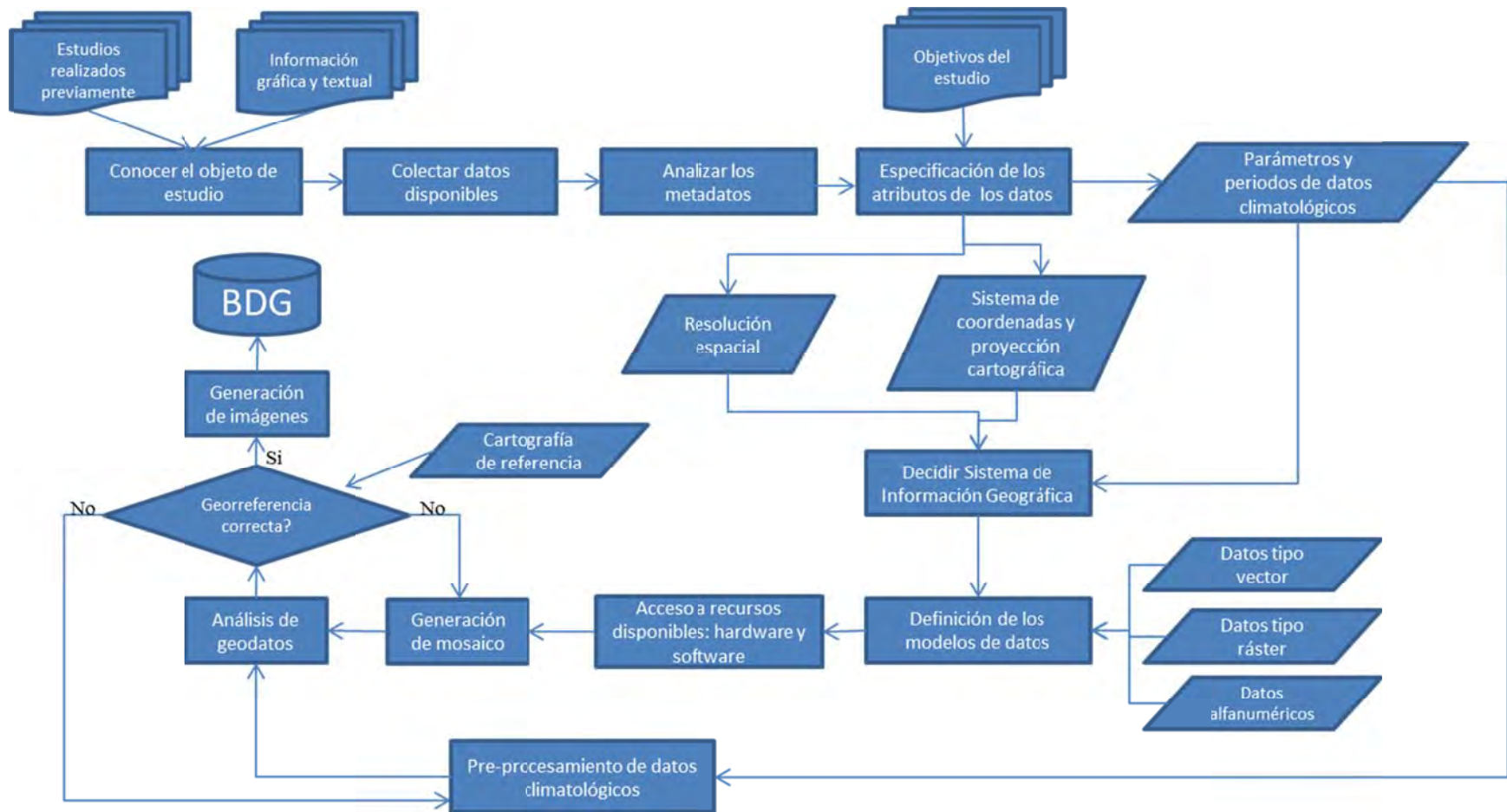


Figura 3.9. Diagrama de la metodología para construir una BDG de la Cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

En total los MDE cubren un área de que va desde $-111^{\circ}20'0''$ hasta $-110^{\circ}0'0''$ de longitud Oeste y desde el grado $29^{\circ}15'0''$ hasta $31^{\circ}15'0''$ de latitud Norte. Cada archivo fue nombrado con la clave que identifica el área que cubre.

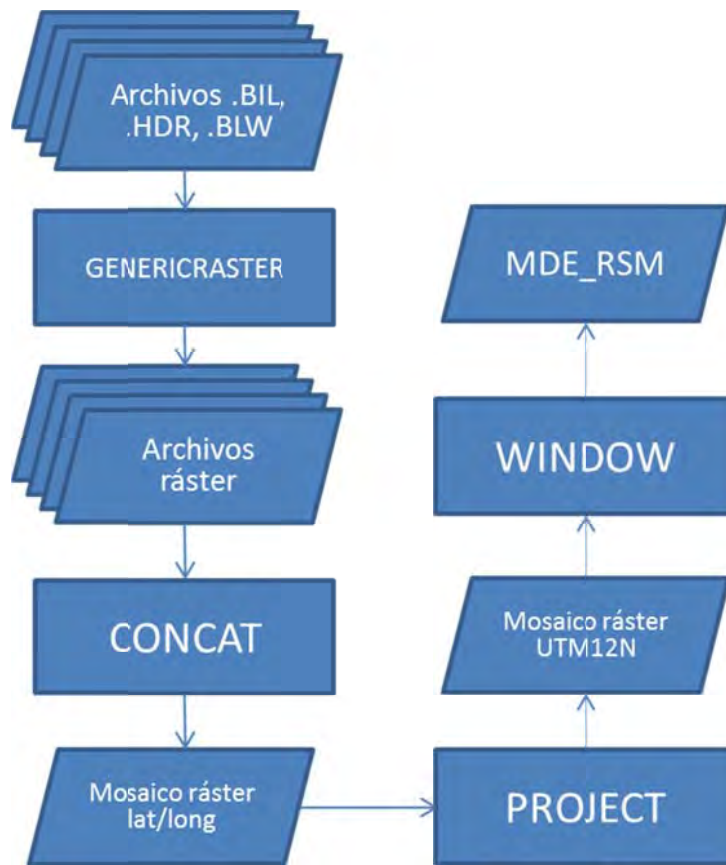


Figura 3.10. Diagrama de la metodología para generar el polígono del área de estudio.

Usando el comando CONCAT (Idrisi, 2008) de Idrisi, se formó el mosaico con los 32 archivos que contienen los MDE a escala 1:50,000, conservando el sistema de coordenadas original (lat/long). Después con el comando PROJECT (Idrisi, 2008) se cambió tanto el sistema de coordenadas como el dátum de lat/long a UTM12N, especificando los mínimos y máximos para X y Y.

Una vez que se obtuvo el mosaico con UTM12N, se usó el comando WINDOW (Idrisi, 2008) para extraer justamente el polígono que cubre los 17,378.25 km² del

área de estudio, especificando en las coordenadas métricas de los puntos superior-izquierdo e inferior-derecho, indicando así el inicio y el fin del recorte. El nombre de este archivo es MDE_RSM, que identifica al modelo digital de elevación de la cuenca del Río San Miguel.

Los archivos que resultaron entre cada una de las etapas anteriores a la extracción del polígono se eliminaron porque no serán necesarios para ningún otro proceso.

Cartografía Temática Digital

Integrar la Cartografía Temática Digital a la BDG implicó una serie de procesos y análisis de datos muy detallado y cuidadoso (Figura 3.11). El resultado final ha sido una serie de imágenes vectoriales y ráster, la mayoría de ellas clasificadas según el tema y los datos disponibles (tabla 3.5).

Primero se importaron a Idrisi la serie de archivos .SHX, .SHP y .DBF con las imágenes en formato shape y con proyección geográfica Cónica Conforme de Lambert (CCL), dando como resultado los archivos vectoriales y alfanuméricos globales. Después se hizo una conversión del sistema de coordenadas y proyección cartográfica utilizando el dátum UTM12N (Proyección de Mercator y como modelo base del sistema de coordenadas, el elipsoide WGS84, para la zona 12 Norte). Los archivos resultantes se sometieron a una transformación de vectorial a ráster, de donde utilizando el comando WINDOW, se obtuvo el polígono correspondiente al área de estudio. Los archivos del mismo polígono también se obtuvieron en formato vectorial.

Por otro lado, los datos alfanuméricos del área de estudio fueron extraídos utilizando Microsoft Access Database y fueron vinculados a los archivos vectoriales correspondientes con los módulos Collection Editor y Database (Idrisi, 2008).

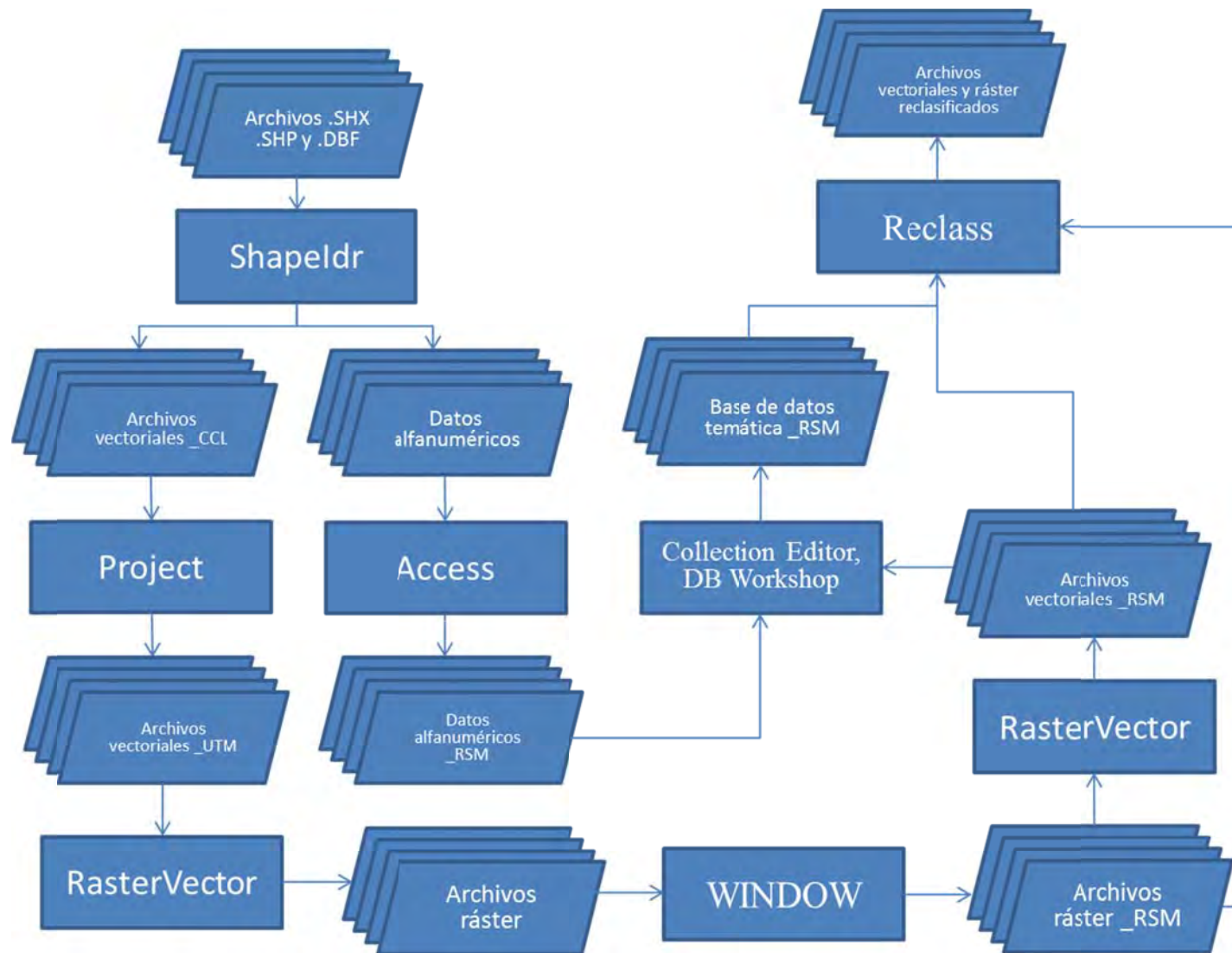


Figura 3.11. Diagrama de la metodología para generar imágenes y datos temáticos del polígono del área de estudio.

Finalmente, tanto los archivos vectoriales como los ráster, fueron reclasificados en base a la información alfanumérica disponible, con el fin de obtener imágenes más detalladas en cuanto a su contenido. Lo anterior se logró utilizando el comando Reclass.

A todas las imágenes se les agregó un título representativo y conservan íntegros todos sus metadatos.

Preprocesamiento de datos climatológicos: georreferenciación de las estaciones de registros operadas por la Universidad de Sonora y colección de datos

Para ubicar la información temporal en mapas digitales, se utilizó el comando XYZIDRIS para digitalizar los puntos que representan cada una de las ER, tomando como base el archivo MDE_RSM y un archivo de texto ordenado con los pares de coordenadas de las ER y su respectivo identificador. Estos puntos se almacenaron en un archivo de datos vectoriales. La digitalización es una tarea que debe llevarse a cabo con mucho cuidado tratando de ubicar lo mejor posible los puntos en el espacio geográfico, utilizando sus posicionamiento con pares de coordenadas, en éste caso se utilizaron las coordenadas UTM correspondientes.

Al vector resultante se le realizó a un proceso de georreferenciación utilizando cartografía digital que sirvió de referencia e indicaron si la ubicación de los puntos era correcta. De no ser así, es necesario realizar de nuevo el proceso de digitalización para corregir, agregar o eliminar los puntos almacenados previamente y de nuevo se ejecuta la etapa de georreferenciación, hasta que la referencia de todos los puntos sea correcta (Figura 3.12).

En relación al preprocesamiento que debe llevarse a cabo con los datos que se colectan directamente en campo, de las estaciones de registro de datos climatológicos (ER), es importante mencionar que se generan una serie de

archivos alfanuméricos identificados con un número de ER, donde se tienen los datos registrados cada 30 minutos, los cuales se abren en el programa Excel para facilitar su manejo, donde los datos son acumulados en el periodo que se requiera, teniendo la posibilidad de contar con datos a cada hora, por día, semana o mes, etc. (Figura 3.13).

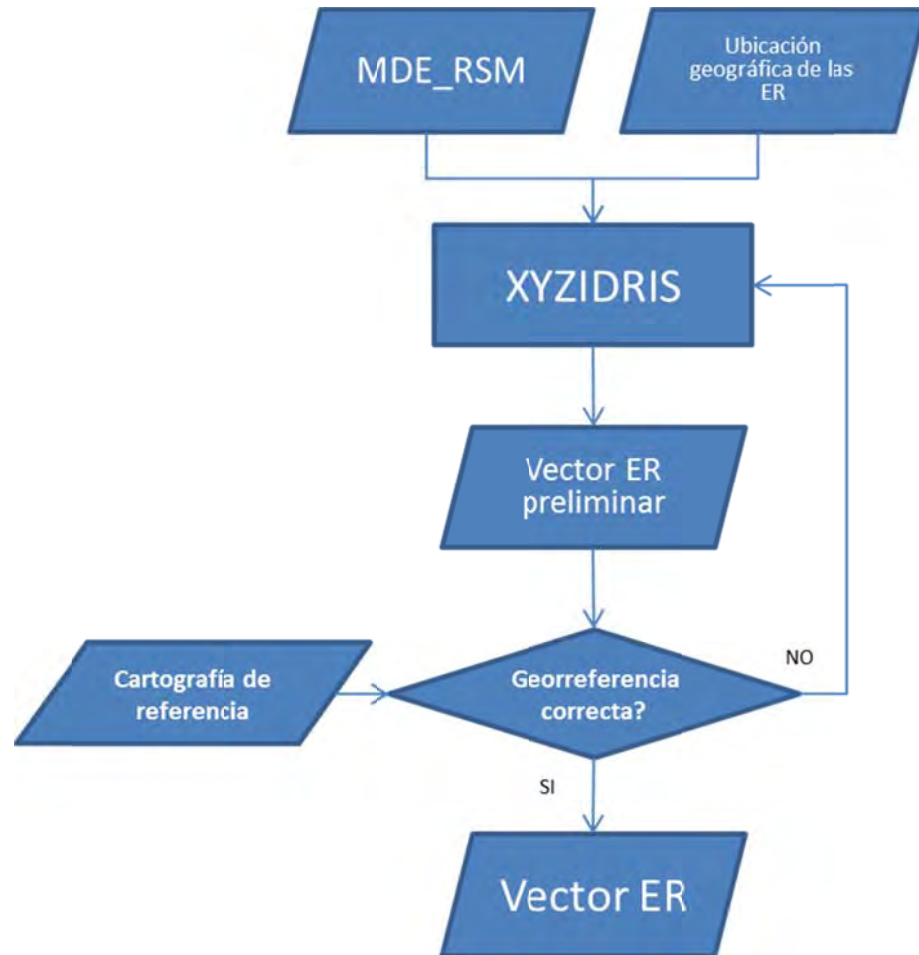


Figura 3.12. Diagrama de la metodología para generar un archivo vectorial de las ER.

Datos provenientes de las ER

Para el caso de estudio, se decidió integrar una BDG que comprende los datos de precipitación acumulada para cada día desde el 01 de junio hasta el 30 de septiembre del 2005. Estos datos fueron acumulados por día en los archivos

tabulares que se generaron directamente en 8 de las estaciones de registro de datos climatológicos de la Universidad de Sonora (Figura 3.13). En total son 122 días que abarca la longitud del registro, mismo número del total de archivos por tema que se generaron, sumando 122X8 registros únicamente para la base de datos de precipitación. También se acumuló la precipitación en 4 periodos por mes con lo que se reduce el número de archivos a 16. Los días que cubre cada periodo pueden apreciarse en la tabla 3.4.

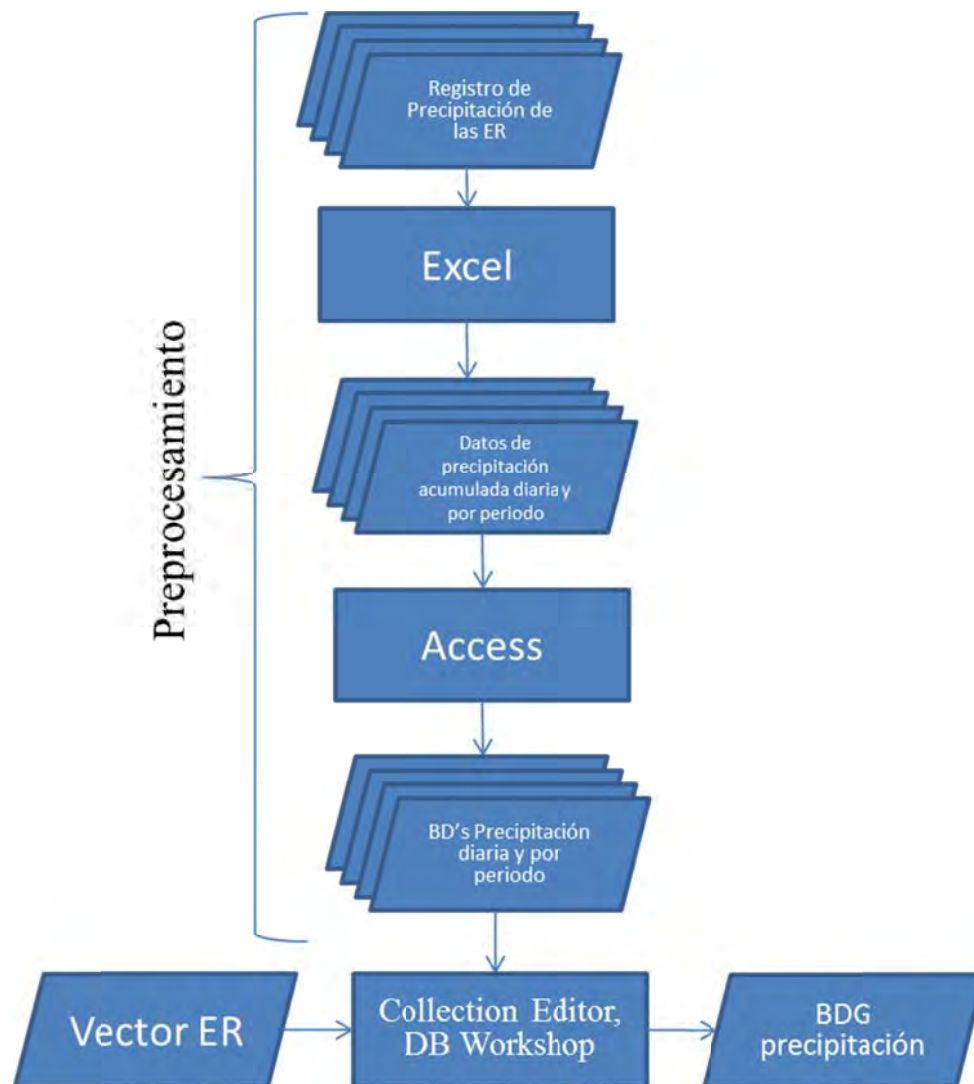


Figura 3.13. Diagrama de la metodología para crear la BDG de precipitación.

En la figura 3.14 se muestra la ubicación geográfica de las ER. Como no es posible obtener la precipitación total del área de estudio, se utilizan métodos de distribución espacial de valores puntuales, como es el caso de los procesos de interpolación, con los que se generaron los polígonos que representan el fenómeno de la precipitación a partir de un punto dado (Figura 3.15). De esta manera se produjeron tanto imágenes como vectores que representan áreas con atributos que corresponden al valor cuantitativo de los diferentes fenómenos climáticos distribuidos en la zona en un momento determinado. Cada nombre de archivo creado contiene el prefijo correspondiente y la fecha en el formato ddm. Con estos archivos se pueden hacer modelos temático-temporales y series de tiempo con el fin de analizar cada fenómeno ocurrido.

Tabla 3.4. Periodos para acumular la Precipitación y sus fechas correspondientes

Periodo Acumulado	Fechas
0106	01/06/05-07/06/05
0206	08/06/05-15/06/05
0306	16/06/05-23/06/05
0406	24/06/05-30/06/05
0107	01/07/05-07/07/05
0207	08/07/05-15/07/05
0307	16/07/05-23/07/05
0407	24/07/05-31/07/05
0108	01/08/05-07/08/05
0208	08/08/05-15/08/05
0308	16/08/05-23/08/05
0408	24/08/05-31/08/05
0109	01/09/05-07/09/05
0209	08/09/05-15/09/05
0309	16/09/05-23/09/05
0409	24/09/05-30/09/05

Para este caso, con los datos de precipitación disponibles para el periodo de estudio, se generaron 16X8 archivos georreferenciados con datos binarios de doble precisión, utilizando el distintivo para los archivos correspondiente al periodo acumulado.

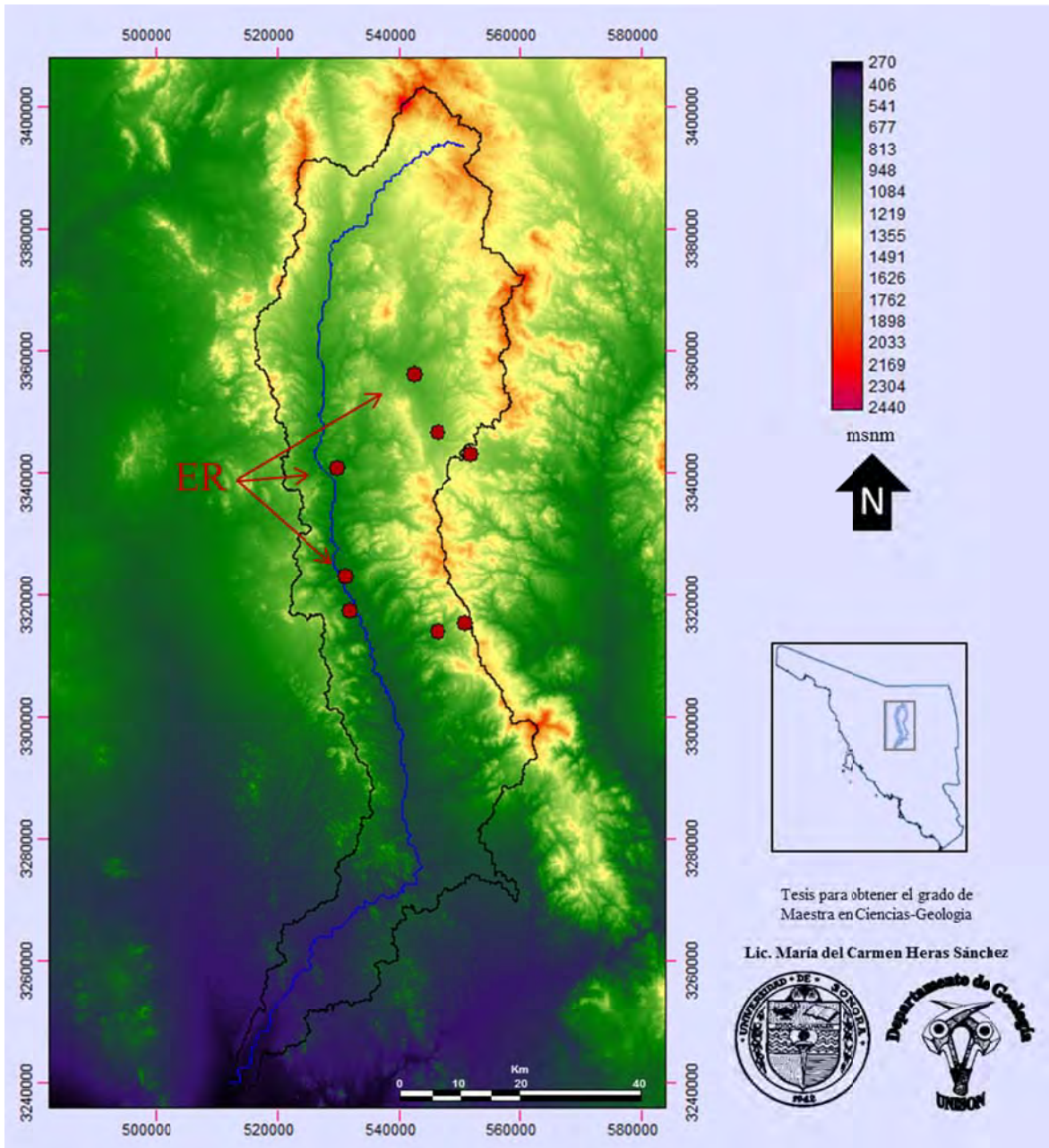


Figura 3.14. Ubicación geográfica de las ER del Río San Miguel, Sonora, México.

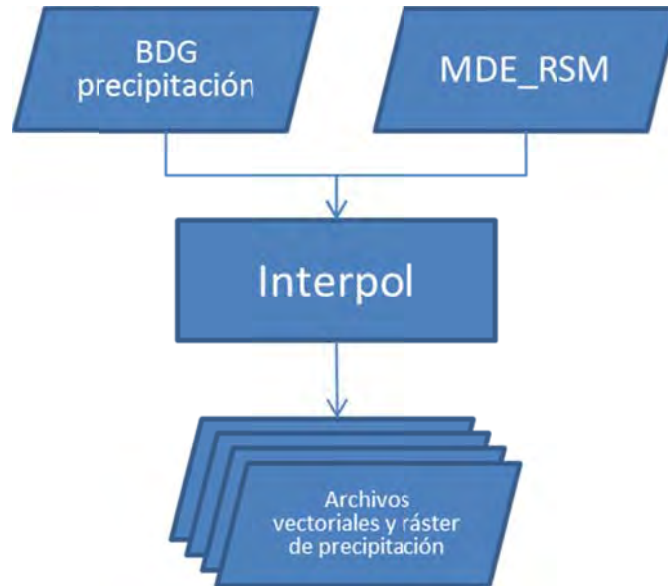


Figura 3.15. Diagrama de la metodología para interpolar datos de precipitación.

Parámetros fisiográficos calculados

Los parámetros fisiográficos de la cuenca y del río principal deben ser dimensionados para poder hacer referencia al espacio geográfico que ocupa. La cuenca misma es la unidad fisiográfica esencial donde ocurren fenómenos climatológicos medibles y presenta características propias sobre el uso del suelo, vegetación, litología, hidrología superficial y subterránea, entre otras.

Idrisi cuenta con los algoritmos necesarios para calcular los parámetros fisiográficos de la cuenca y el río principal. Estos algoritmos pueden ser ejecutados en los menús y línea de comando del programa, además del módulo hidrogeomático Water Cycle, que es un subprograma desarrollado por el grupo de investigadores del Laboratorio de Hidrogeomática del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), que corresponde a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX) (Franco, 2008). En este caso el módulo Water Cycle fue incorporado a Idrisi16: The Taiga Edition (Figura 3.16). El mencionado módulo automatiza varios procesos que se deben ejecutar

con los MDE para lograr los parámetros fisiográficos tanto de la cuenca como del río principal, además se proporciona la ubicación geográfica de la exutoria del río principal (Figura 3.17).

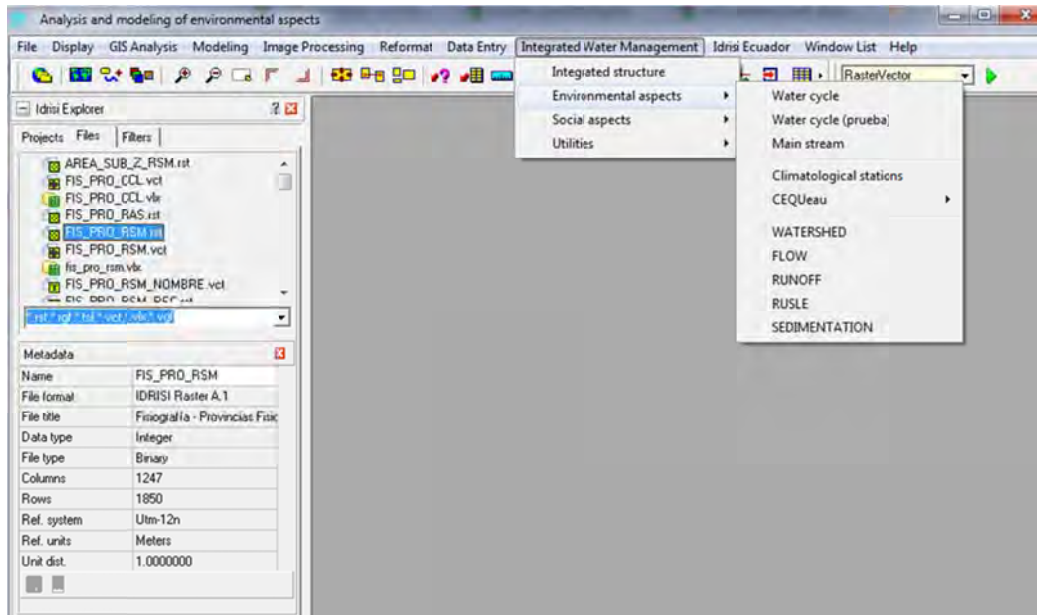


Figura 3.16. Módulo Water Cycle incorporado a Idrisi16: The Taiga Edition.

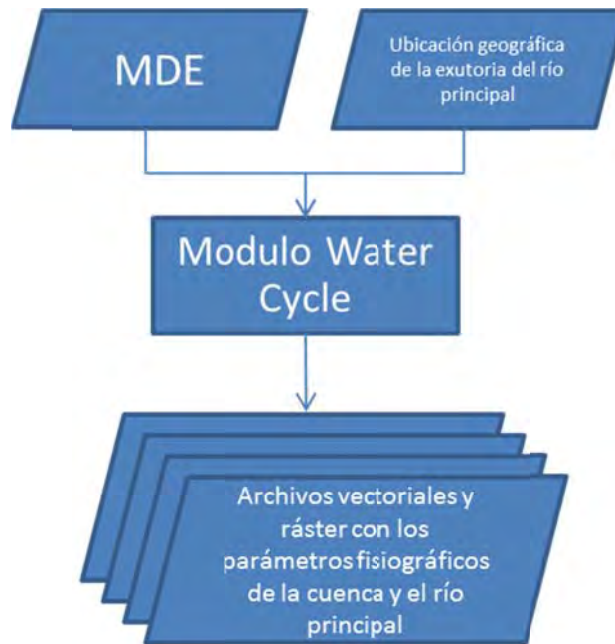


Figura 3.17. Diagrama de la metodología para calcular los parámetros fisiográficos de la cuenca y el río principal.

Polígonos de Thiessen

También se construyeron los polígonos de Thiessen utilizando el subprograma de Idrisi llamado THIESSEN (Figura 3.18) (Idrisi, 2008), que construye los polígonos alrededor de una serie de puntos, donde cada polígono generado contiene el espacio más cercano a cada punto de control, en este caso, la ubicación geográfica de las ER. Cada polígono define una región cuyos valores son influenciados por el punto de control correspondiente. La división espacial de los polígonos también es conocida como diagramas de Voronoi (Reem, 2011).

El archivo resultante se encuentra en formato ráster y es sometido a un proceso de superposición con la imagen que contiene el parteaguas de la cuenca del río en cuestión, lo anterior con la finalidad de obtener una imagen de la cuenca con los polígonos y las áreas de los mismos. También se obtuvo la cuenca con los polígonos de Thiessen en formato vectorial.

3.5.2 Nomenclatura de los archivos

El diseño de la BDG requirió de un detallado análisis de las características del espacio a representar y de un profundo estudio de los datos disponibles, a partir de los que se determina tanto el sistema de coordenadas, como la mejor resolución espacial que se utilizan para proyectar los datos. Asimismo, la metodología incluye un pre-procesamiento iterativo de los datos temporales, que dio como resultado la generación de diversos archivos de datos estandarizados, corregistrados y georreferenciados.

Cada archivo que se generó contiene sus metadatos completos para poder conocer su origen, que tipo y modelo de datos contiene, sus dimensiones, de que proceso proviene, etc. El nombre de los archivos juega un papel muy importante en la identificación de los datos.

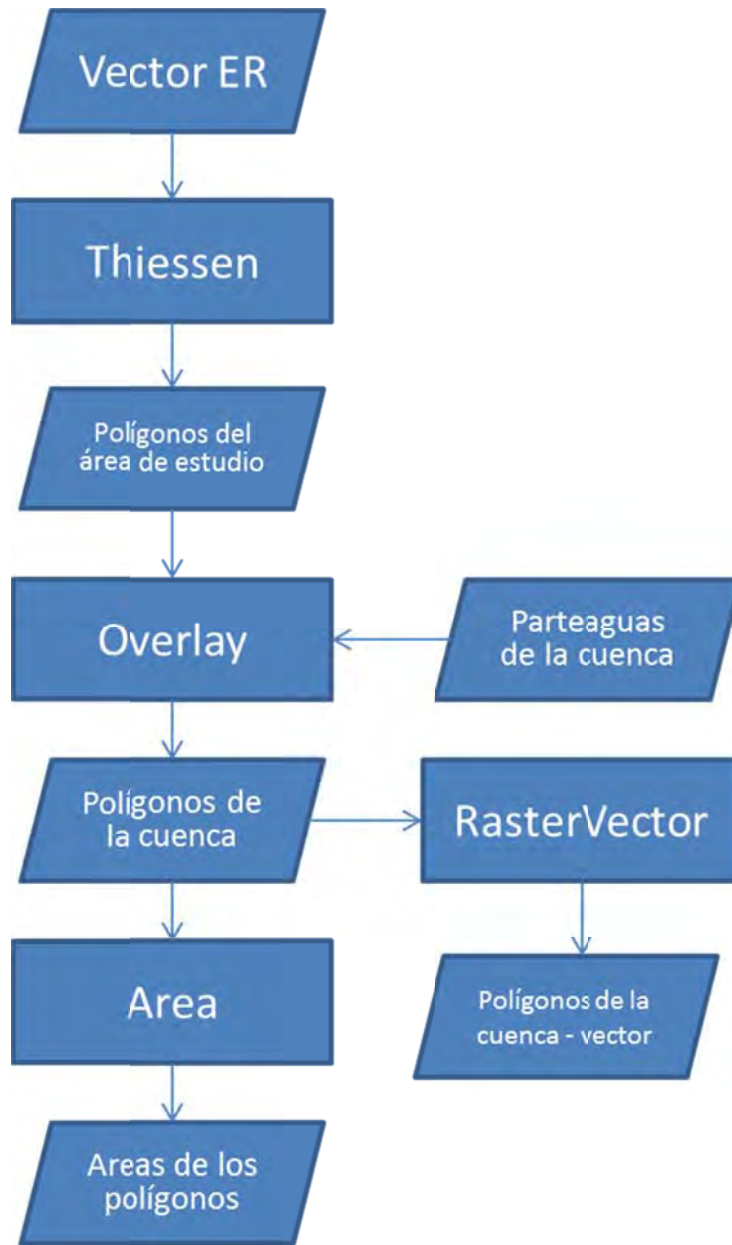


Figura 3.18. Diagrama de la metodología para crear los polígonos de Thiessen de la cuenca y sus áreas.

Dado que todos los archivos son referidos al mismo espacio geográfico, en el caso de las imágenes y vectores que contienen información temática del objeto de estudio, basta identificar su contenido con un juego de letras representativas, tal y como se puede observar en la tabla 3.5.

Los archivos deben estar identificados por sus nombres y organizados dentro de la base de datos, para facilitar su manipulación, pero sobre todo su correcta interpretación, puesto que es común confundir los datos que corresponden a un mismo espacio pero que constituyen diferente información, como el hecho de crear un mapa con datos que representan las unidades climáticas e interpretarlos como tipos de suelo. Este tipo de errores de interpretación pueden presentarse debido a que ambos datos son valores numéricos que se visualizan en colores y formas similares.

Los nombres de los archivos que contienen los datos de precipitación acumulada, se identifican con el prefijo PRE_ y continúan con los números que representan el día y el mes o al periodo (ddmm o nmm), al que corresponde la precipitación.

Las imágenes generadas de la cuenca y sus parámetros fisiográficos, se encuentran identificados con prefijos representativos de tres letras, como CUE_, para cuenca o subcuenca, CAU_, para el cauce del río, PAR_, para el parteaguas y CON_, para confluencias.

Tabla 3.5. Relación de procesos y archivos de la BDG del Río San Miguel. Parte 1

Tema / Subtema	SERIE Y AÑO	NOMBRE RAIZ	TIPO DE ELEMENTO	Shapeldr: Mex27CCL		Project: UTM12N	RasterVector	Window:	RasterVector	Access (registros correspondientes)	Collection Editor, DB Workshop	DB Workshop: Create IVF	Reclass, Categories, Notepad	Reclass, Categories, Notepad
				Excel: coord	RESOLUCION		X=4822805-628112	Y=3236102-3408152						
				_CCL.VCT	_CCL.VLX	_UTM.VCT	_RAS.RST	_RSM.RST	_RSM.VCT	_RSM.MDB	_RSM.VLX	_RSM_*	_RSM_REC.RST	_RSM_REC.VCT
Fisiografía / Provincias Fisiográficas	I, 1:1000000, 2001	FIS_PRO	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	2360 y 2367	OK	_NOMBRE	OK	OK
Fisiografía / Subprovincias Fisiográficas	I, 1:1000000, 2001	FIS_SPR	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	2434 y 2438	OK	_NOMBRE	OK	OK
Fisiografía / Sistema de Topoformas	I, 1:1000000, 2001	FIS_STF	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	450-3285	OK	_NOMBRE	OK	OK
Geología / Geomorfología Estructural	I, 1:1000000, 1999	GEO_LIN	LINEAS	OK	OK	OK	OK	OK	OK, pero no igual ID	NO BD	X	X	SE RECLASIFICO EN BASE A_FC	
Geología / Minas, Catas	I, 1:1000000, 1999	GEO_PTS	PUNTOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	1762-2684	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A_FC	
Geología / Litología	I, 1:1000000, 1999	GEO_POL	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	5343-13861	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A_FC	
Hidrología Subterránea / Flujo	I, 1:1000000, 2000	HID_SUB_F	LINEAS	OK	OK	OK	OK	OK	OK, pero no igual ID	X	X	X	X	X
Hidrología Subterránea / Unidades Geohidrológicas	I, 1:1000000, 2000	HID_SUB_P	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	4153-11047	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A_FC	
Hidrología Subterránea / Calidad de Agua y Aprovechamientos	I, 1:1000000, 2000	HID_SUB_T	PUNTOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	823-1495	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A_FC	
Hidrología Subterránea / Area de Veda	I, 1:1000000, 2000	HID_SUB_Z	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	909	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A_FC	
Hidrología Subterránea / Concentración de Pozos	I, 1:1000000, 2000	HID_SUB_V	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	311	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A_FC	

Tabla 3.5. Relación de procesos y archivos de la BDG del Río San Miguel. Parte 2

Tema / Subtema	SERIE Y AÑO	NOMBRE RAIZ	TIPO DE ELEMENTO	ShapeIdr: Mex27CCL		Project: UTM12N	RasterVector	Window:	RasterVector	Access (registros correspondientes)	Collection Editor, DB Workshop	DB Workshop: Create IVF	Reclass, Categories, Notepad	Reclass, Categories, Notepad
				Excel: coord	RESOLUCION		X=482805-628112	Y=3236102-3408152						
				_CCL.VCT	_CCL.VLX	_UTM.VCT	_RAS.RST	_RSM.RST	_RSM.VCT	_RSM.MDB	_RSM.VLX	_RSM_*	_RSM_REC.RST	_RSM_REC.VCT
Hidrología Superficial / Regiones Hidrológicas	I, 1:1000000, 2000	HID_SUP_C	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	VARIOS	OK	X	X	X
Hidrología Superficial / Unidades de Ecurrimiento	I, 1:1000000, 2000	HID_SUP_E	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	919-6192	OK	X	X	X
Hidrología Superficial / Estaciones Hidrométricas	I, 1:1000000, 2000	HID_SUP_P	PUNTOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	379-499	OK	_OBRA	X	X
Localidades		LOC	PUNTOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	6698-14288	OK	_NOMLOC	X	X
Municipios		MUN	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	47-99	OK	_NOM_MUNI	OK	OK
Topografía / Cuerpos de agua	I, 1:1000000, 1997	TOP_AGUA	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	VARIOS	OK	X	OK	OK
Topografía / Curvas	I, 1:1000000, 1997	TOP_CUR	LINEAS	OK	OK	OK	OK	OK	OK, pero no igual ID	NO BD	X	X	OK	OK
Topografía / Localidades urbanas	I, 1:1000000, 1997	TOP_LOC	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	83-85, 150, 154	OK	X	SE RECLASIFICO CON 2 VALORES	
Topografía / Ríos	I, 1:1000000, 1997	TOP_RIO	LINEAS	OK	OK	OK	OK	OK	OK, pero no igual ID	NO BD	X	X	SE RECLASIFICO CON 2 VALORES	
Topografía / Toponimos	I, 1:1000000, 1997	TOP_TNM	PUNTOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	186-466	OK	_NOM_OFI	X	X
Topografía / Vías de transporte	I, 1:1000000, 1997	TOP_VTR	LINEAS	OK	OK	OK	OK	OK	OK, pero no igual ID	X	X	X	SE RECLASIFICO CON 2 VALORES	

Tabla 3.5. Relación de procesos y archivos de la BDG del Río San Miguel. Parte 3

Tema / Subtema	SERIE Y AÑO	NOMBRE RAIZ	TIPO DE ELEMENTO	Shapeldr: Mex27CCL		Project: UTM12N	RasterVector	Window:	RasterVector	Access (registros correspondientes)	Collection Editor, DB Workshop	DB Workshop: Create IVF	Reclass, Categories, Notepad	
				Excel: coord	RESOLUCION: 1000 2=81		X:5482205-58812 Y:3236102-9408132	_CCL.VCT					_CCL.VLX	_UTM.VCT
Uso de suelo / Actividad pecuaria	I, 1:1000000, 1994	USS_ACP	PUNTOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	392-536	OK	_TIPO	SE RECLASIFICO EN BASE A _FC	
Uso de suelo / Clases de cultivo	I, 1:1000000, 1994	USS_CLC	PUNTOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	44-474	OK	X	X	X
Uso de suelo / Especies vegetales	I, 1:1000000, 1994	USS_ESV	PUNTOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	17-673	OK	X	X	X
Uso de suelo / Vegetación	I, 1:1000000, 1994	USS_VEG	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	3732-9444	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A _FC	
Uso potencial / Agricultura	I, 1:1000000, 2000	USP_USA	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	215-889	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A _FC	
Uso potencial / Forestal	I, 1:1000000, 2000	USP_FOR	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	203-740	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A _FC	
Uso potencial / Ganadería	I, 1:1000000, 2000	USP_GAN	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	1039-1743	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A _FC	
Edafología / Suelos	I, 1:1000000, 1998	EDA_SUE	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	5488-8572	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A _FC	
Climas / Unidades climatológicas	I, 1:1000000, 2000	CLI_UC	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	13-16	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A TIPO_N	
Climas / Evapotranspiración	I, 1:1000000, 2000	CLI_EVA	LINEAS	OK	OK	OK	OK	OK	OK, pero no igual ID	X	X	X	RECLASIFICACION MANUAL	
Climas / Humedad en el suelo	I, 1:1000000, 2000	CLI_HUM	POLIGONOS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	sep-75	OK	X	SE RECLASIFICO EN BASE A _FC	
Climas / Precipitación media anual	I, 1:1000000, 2000	CLI_PMA	LINEAS	OK	OK	OK	OK	OK	OK, pero no igual ID	13-16	OK	X	RECLASIFICACION MANUAL	

Capítulo 4. Resultados

4.1 La base de datos geográfica

La base de datos construida con la metodología descrita en el capítulo 3, es el principal resultado de la tesis. Las posibles combinaciones de MDE, información temática y climatológica es infinita, de tal manera que se pueden obtener n productos cartográficos como resultado, dependiendo de los requerimientos de información. Los que se describen a continuación, constituyen resultados fundamentales para el desarrollo de aplicaciones en las diversas áreas del conocimiento relacionadas con el estudio de cuencas o aprovechamiento de sus recursos.

4.2 Productos cartográficos generados a partir de MDE y CTD

Los modelos digitales de elevación son el principal soporte de la base de datos geográfica, los cuales permiten desarrollar aplicaciones de modelación y visualización de superficies de la Tierra, que son muy importantes en la modelación hidrológica y estudios del territorio de una cuenca.

La combinación de la información temática disponible con los modelos digitales de elevación, ofrece la posibilidad de generar modelos de iluminación, tendencias, elevación, curvas de nivel, perfiles topográficos, temperaturas, precipitación, escurrimiento, entre otros modelos que sería imposible obtener sin

una BDG referenciada y validada como la que se derivó de la metodología desarrollada.

Utilizando las diferentes herramientas proporcionadas por Idrisi16 se ha trabajado en la organización, análisis, procesamiento, acceso, despliegue, exploración y modelado de geodatos espacialmente referidos, con la finalidad construir una fuente de información fundamental, estandarizada y corregida para la Cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

Para los resultados que se presentan en este capítulo, se utilizó la herramienta Composer con la que se integraron sobre una imagen diferentes elementos cartográficos como el sistema de coordenadas, la malla de coordenadas, la orientación del despliegue, el título, las leyendas, etc. También se combinó información gráfica contenida en diferentes archivos como capas que se activan y desactivan, que también pueden configurarse en relación a su apariencia dando valores a los parámetros de despliegue como escala, paleta de colores, entre otros.

Fue necesario realizar un análisis riguroso de los elementos presentes en las imágenes ráster de origen para de lograr una reclasificación correcta de los mismos. Se cuenta con imágenes reclasificadas con base en la metodología desarrollada en los temas de fisiografía, geología, hidrología superficial, hidrología subterránea, topografía, uso del suelo y vegetación, uso potencial, edafología, climatología e imágenes de satélite. Para cada tema se generaron las imágenes correspondientes a los subtemas, por ejemplo la imagen de vegetación se derivó del tema uso del suelo y la de litología se derivó del tema geología.

4.2.1 Modelos Digitales de elevación

En la figura 4.1 se presentan vistas panorámicas del polígono que conforma el área de estudio. La imagen superior tiene una orientación vertical hacia el sur y

la inferior hacia el norte. Los grados de inclinación pueden variar así como también el factor de exageración de las elevaciones más altas, las cuales, según la paleta de colores se encuentran desplegadas en color rosa intenso. Cada color representa el valor de la elevación en metros sobre el nivel del mar (msnm).

Como se ilustra, es posible obtener modelos tridimensionales con base en la altimetría comprendida en los MDE. La información que se puede apreciar de los mencionados modelos es muy variada, por ejemplo las áreas generales de erosión se pueden observar en la misma figura 4.1. El medio de transporte principal de todos los sedimentos producidos por la erosión, es precisamente el Río San Miguel, los cuales son depositados en la parte sur-sureste de la cuenca.

En la figura 4.2, se muestran imágenes con el relieve del terreno, que se derivan de un proceso que introduce la iluminación del terreno a partir del MDE. El módulo ILLUMINATE (Idrisi, 2008) de Idrisi separa el esquema de colores de la imagen en sus componentes RGB (rojo, verde y azul) y los transforma en bandas de color, luminosidad y saturación, que se combinan para lograr una imagen de relieve sombreado, pudiendo así apreciar éstas dos importantes piezas de información. Para lograrlo, es necesario especificar el azimut del sol (0-360 grados) y el ángulo de elevación (0-89 grados).

Por otro lado el módulo RUNOFF (Idrisi, 2008) de Idrisi calcula la acumulación de unidades de precipitación por píxel de la imagen de elevación, considerando que cae la misma cantidad de agua en todo el terreno.

En la imagen superior izquierda se presenta con fondo negro el resultado del proceso de RUNOFF del área de estudio, las líneas graficadas representan corrientes de agua.

En la figura 4.3 se puede apreciar el relieve del área, lo que permite identificar los valles y montañas, así como también las corrientes principales.

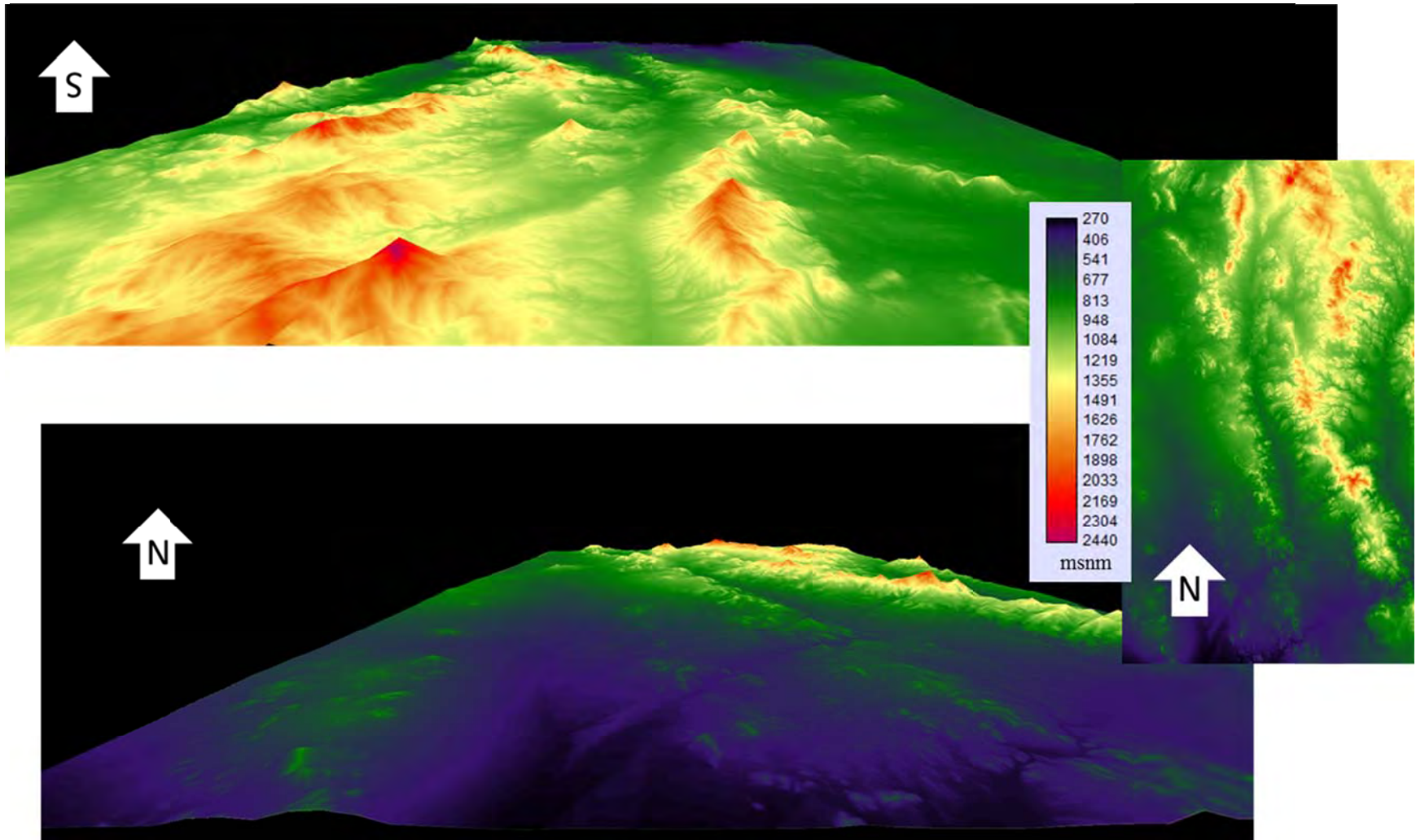


Figura 4.1. Vistas panorámicas del polígono que conforma el área de estudio.

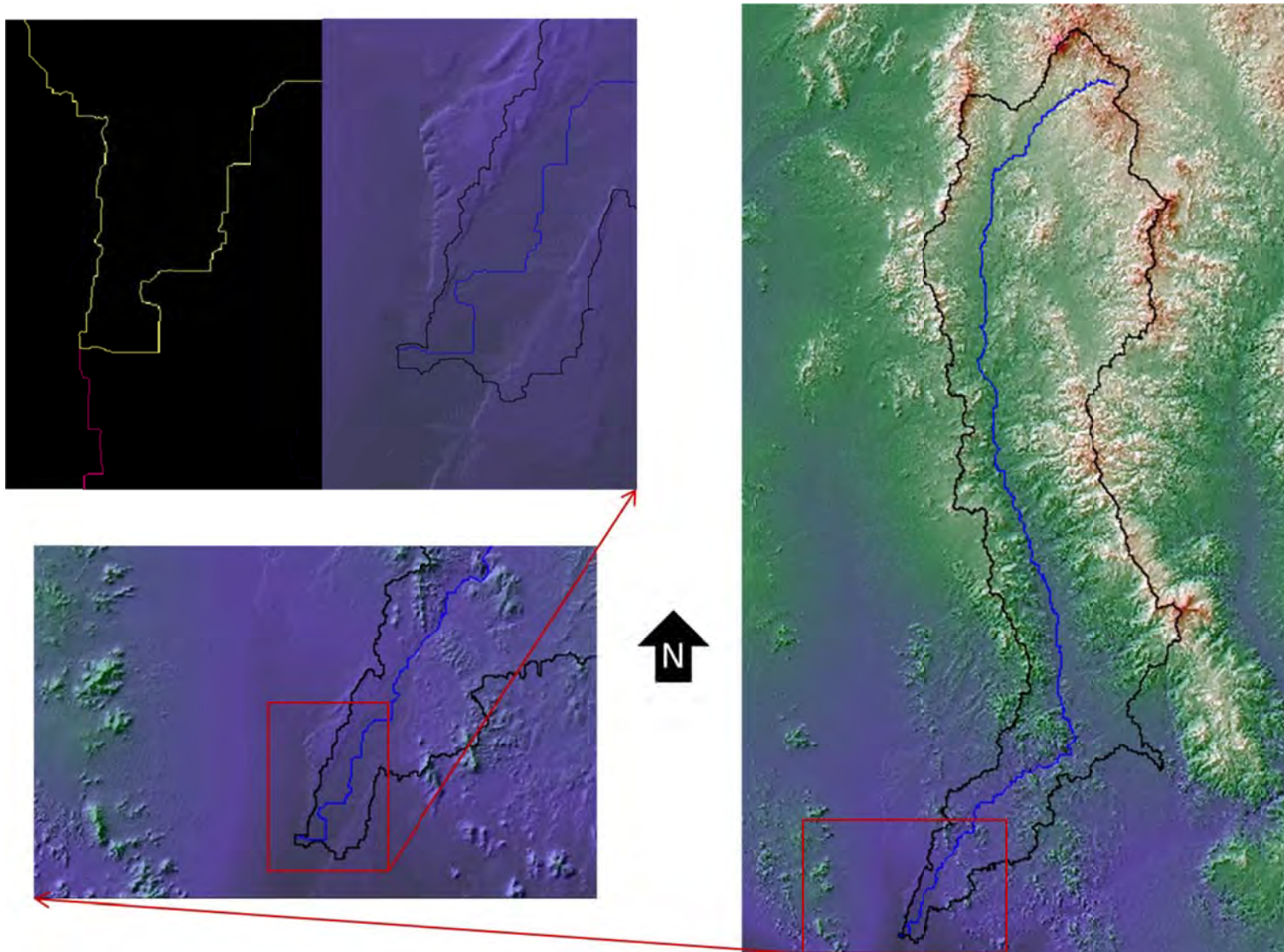


Figura 4.2. Vista en relieve del área de estudio e imagen de escurrimiento.

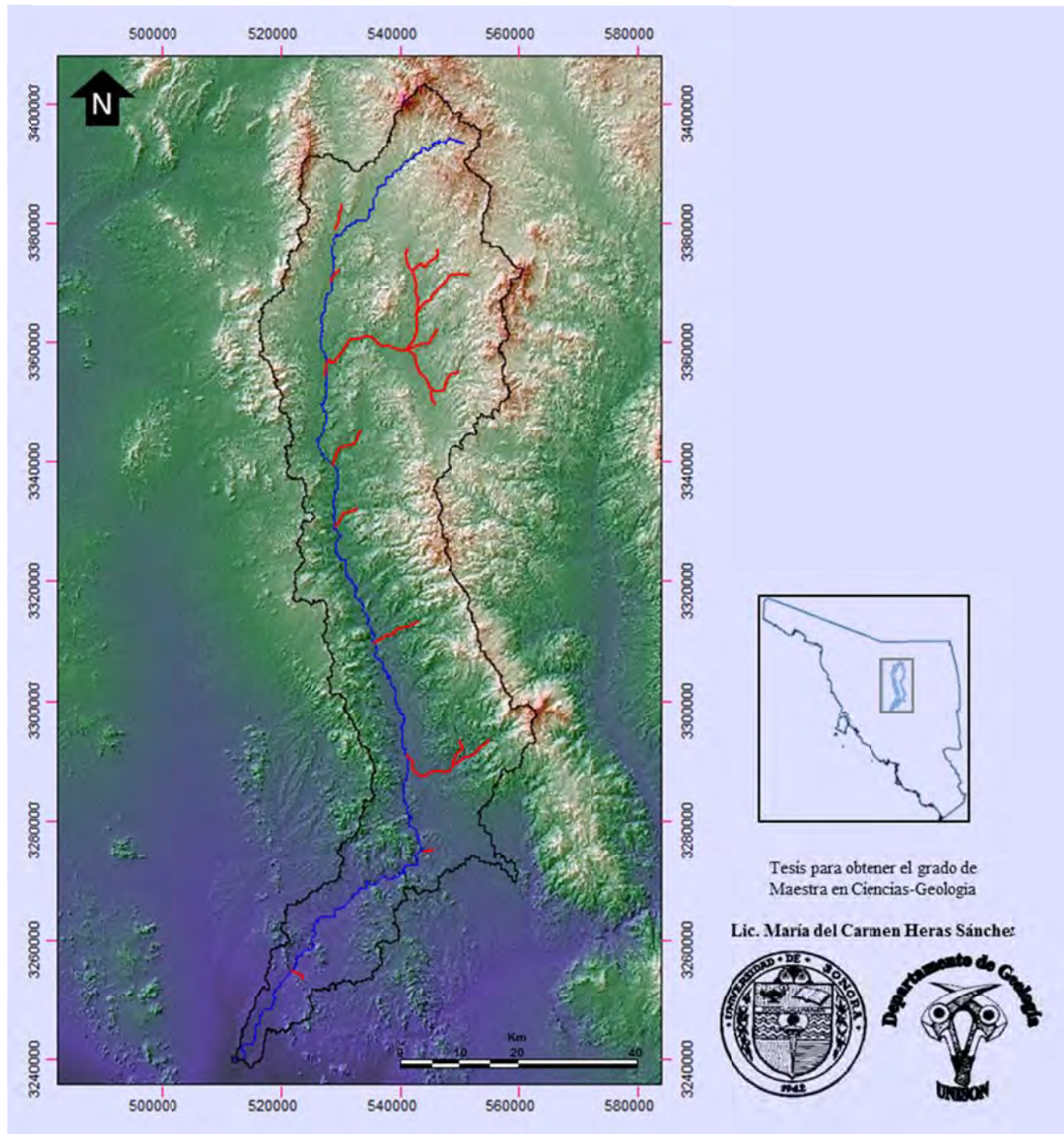


Figura 4.3. Relieve del polígono que conforma el área de estudio y las corrientes principales.

4.2.2 Imagen de Google Earth

Para lograr la figura 4.4 se sobrepuso la imagen de la cuenca del Río San Miguel sobre la imagen recortada del Google Earth, la cual se sometió a un proceso de georreferenciación en Idrisi.

4.2.3 Fisiografía

La importancia de la información fisiográfica es que enmarca el paisaje contemporáneo, proporcionando un panorama completo de las características físicas y geográficas naturales de un área, lo cual facilita la comprensión del relieve indicando implícitamente los aspectos climáticos, edafológicos y de la vegetación.

En la cuenca del Río San Miguel se presenta, al menos desde el Cenozoico hasta nuestros días, una actividad geodinámica que la hace más compleja para su estudio, como consecuencia de la apertura del Golfo de California. Esto le da características propias que es interesante analizar a nivel de cuenca hidrográfica. El análisis fisiográfico de la cuenca en mención permite identificar las áreas actuales de zonas de valles, inundación y denudación, todas ellas resultantes de los procesos geológicos a los que han sido sometidas las rocas desde su formación.

Según la clasificación de datos fisiográficos publicada por el INEGI en el diccionario de datos fisiográficos, escala 1:1,000,000, en el año 2000, La cuenca hidrográfica del Río San Miguel se ubica en las provincias fisiográficas Llanura Sonorense y Sierra Madre Occidental, que al dividirse en subprovincias, corresponden a las subprovincias fisiográficas Sierras y Llanuras Sonorenses y Sierras y Valles del Norte como se aprecia en la figura 4.5. En cuanto al sistema de topoformas, la zona presenta cadenas de montañas longitudinales, las cuales están separadas por valles paralelos intermontanos menos extremosos (Figura

4.6). Las aplicaciones de esta información son diversas y abarcan estudios multidisciplinarios, académicos y científicos en Geología, Edafología, Urbanismo y muchas otras áreas del conocimiento.

4.2.4 Geología

En conjunto, las principales formas morfológicas que se encuentran expuestas en el área de estudio están representadas por valles, sierras y terrazas. Los valles están constituidos por materiales de relleno Terciarios y Cuaternarios; las sierras por rocas intrusivas, sedimentarias, volcánicas y metamórficas; y las terrazas, por conglomerados de la formación Báucarit (CONAGUA, 2009). Se caracteriza geomorfológicamente por la presencia de una serie de sierras y lomas paralelas, con orientación Noreste-Sur y separadas entre sí por valles angostos (Figura 4.7).

Las cadenas montañosas están compuestas por rocas metamórficas y sedimentarias, coronadas de lavas e intrusionadas por granito y otras rocas plutónicas. Los valles están cubiertos por conglomerados del Terciario Superior y rellenos fluviales y aluviales del Cuaternario (CONAGUA, 2009). Además de las grandes fallas longitudinales que dieron lugar a la formación de los valles, existen algunas secundarias de dirección Este-Oeste que tienen su mayor expresión en la cuenca del Río Sonora. Estas fallas son las que propician los estrechamientos y controlan el sistema de drenaje de muchos arroyos y el propio cauce del Río San Miguel (Figura 4.8) (CONAGUA, 2009).

En la figura 4.9 se puede observar la ubicación de minas y catas para la explotación de un yacimiento, con el señalamiento de los minerales que son extraídos. La información geológica se sobrepone a una imagen de satélite Landsat 4, la cual es producto de la combinación de imágenes de satélite multiespectrales y temáticas. La información ha sido obtenida de la carta geológica del INEGI, a escala 1:1,000,000, del año 1999.

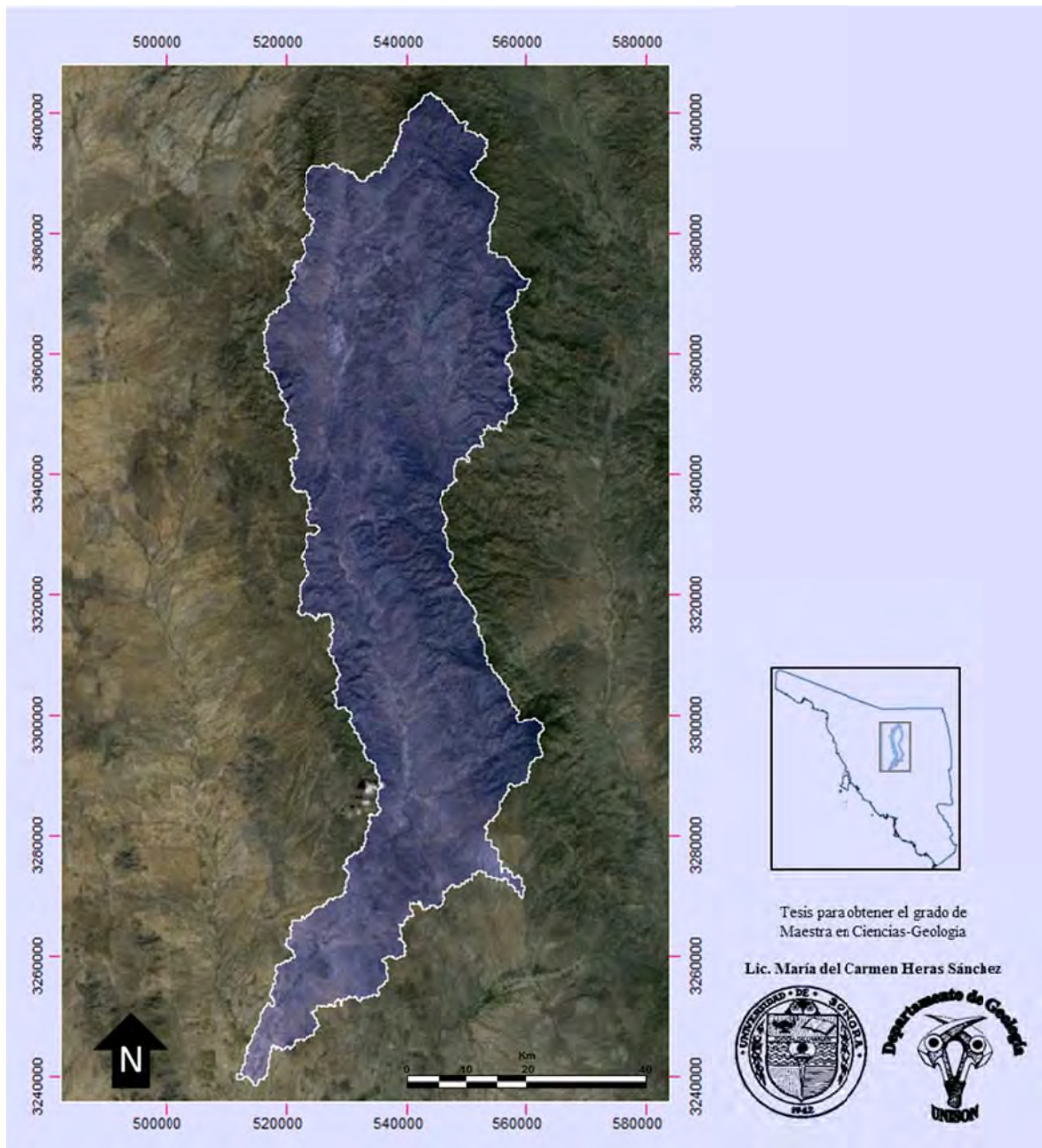


Figura 4.4. Cuenca del Río San Miguel sobrepuesta en imagen de Google Earth.

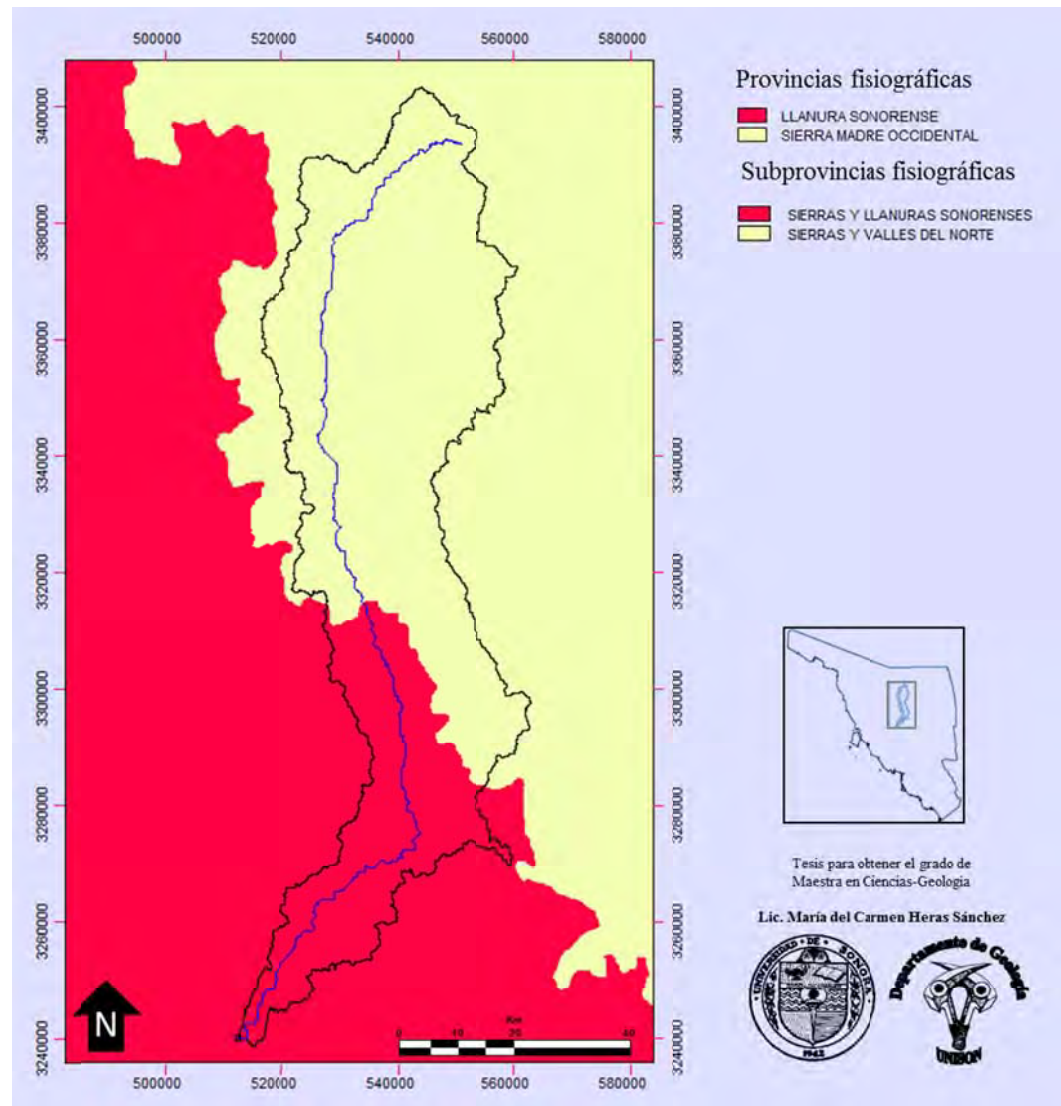


Figura 4.5. Fisiografía de la cuenca del Río San Miguel: Provincias y subprovincias.

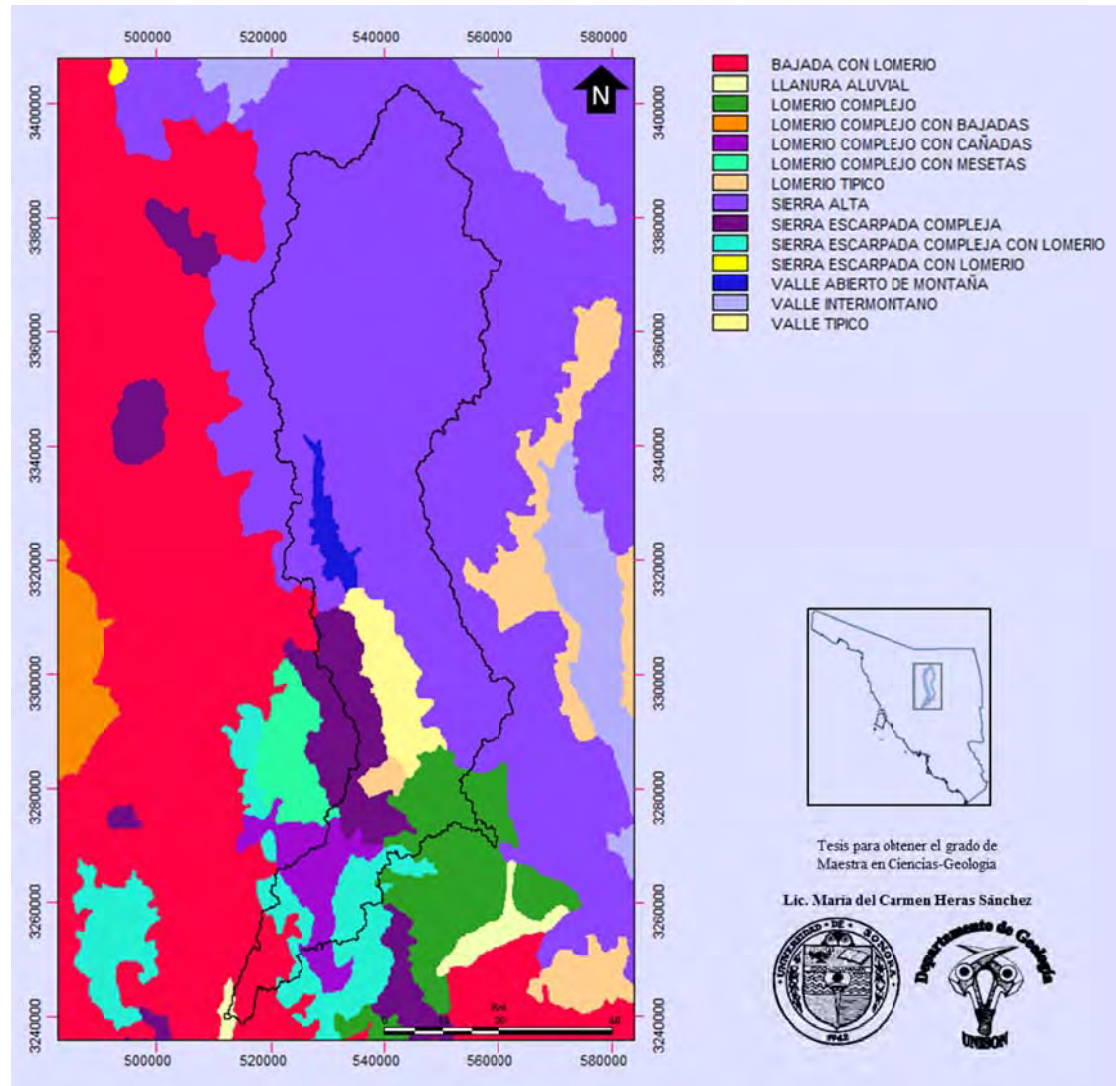


Figura 4.6. Fisiografía de la cuenca del Río San Miguel: Sistema de toposformas.

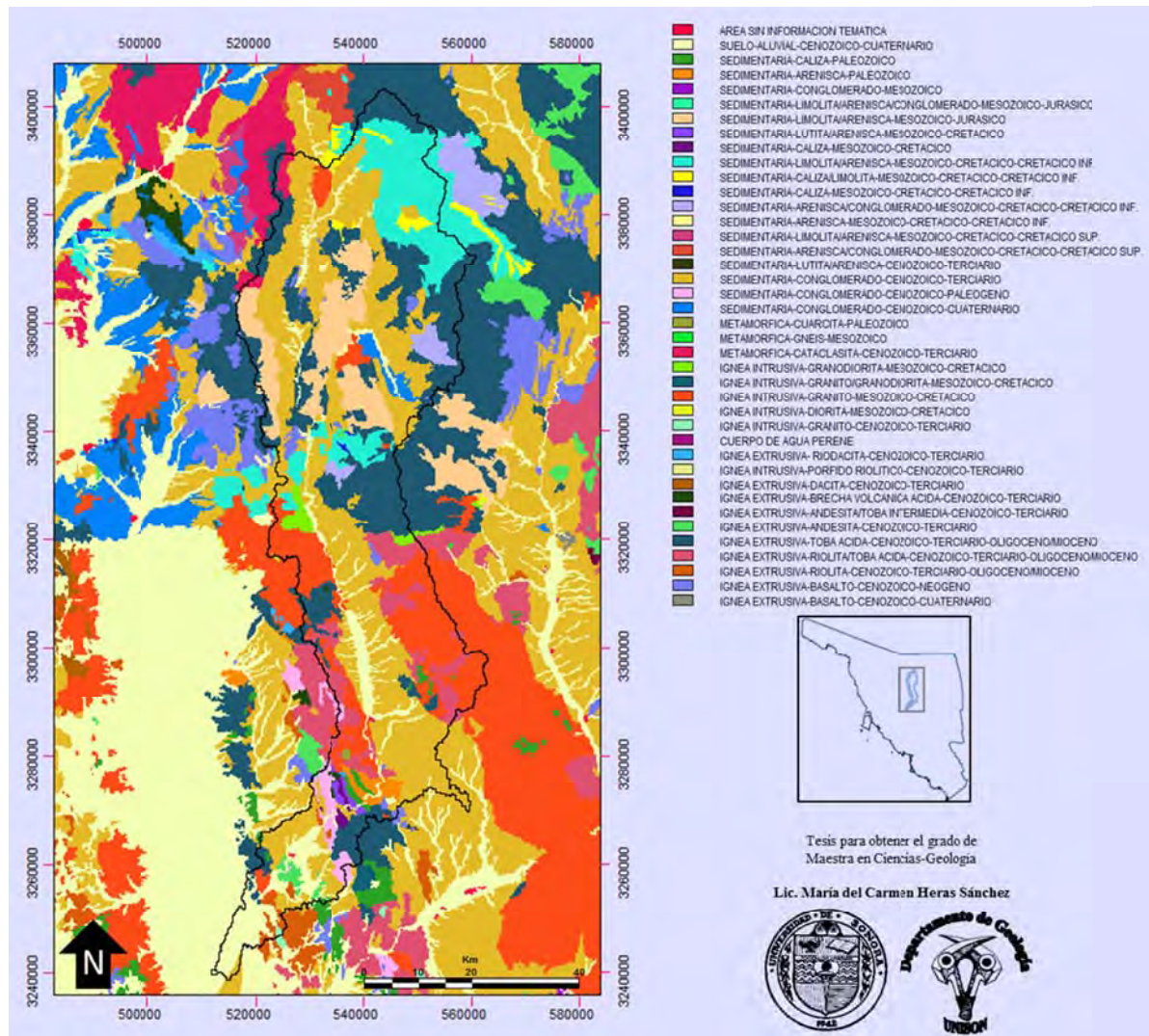


Figura 4.7. Geología de la cuenca del Río San Miguel: litología.

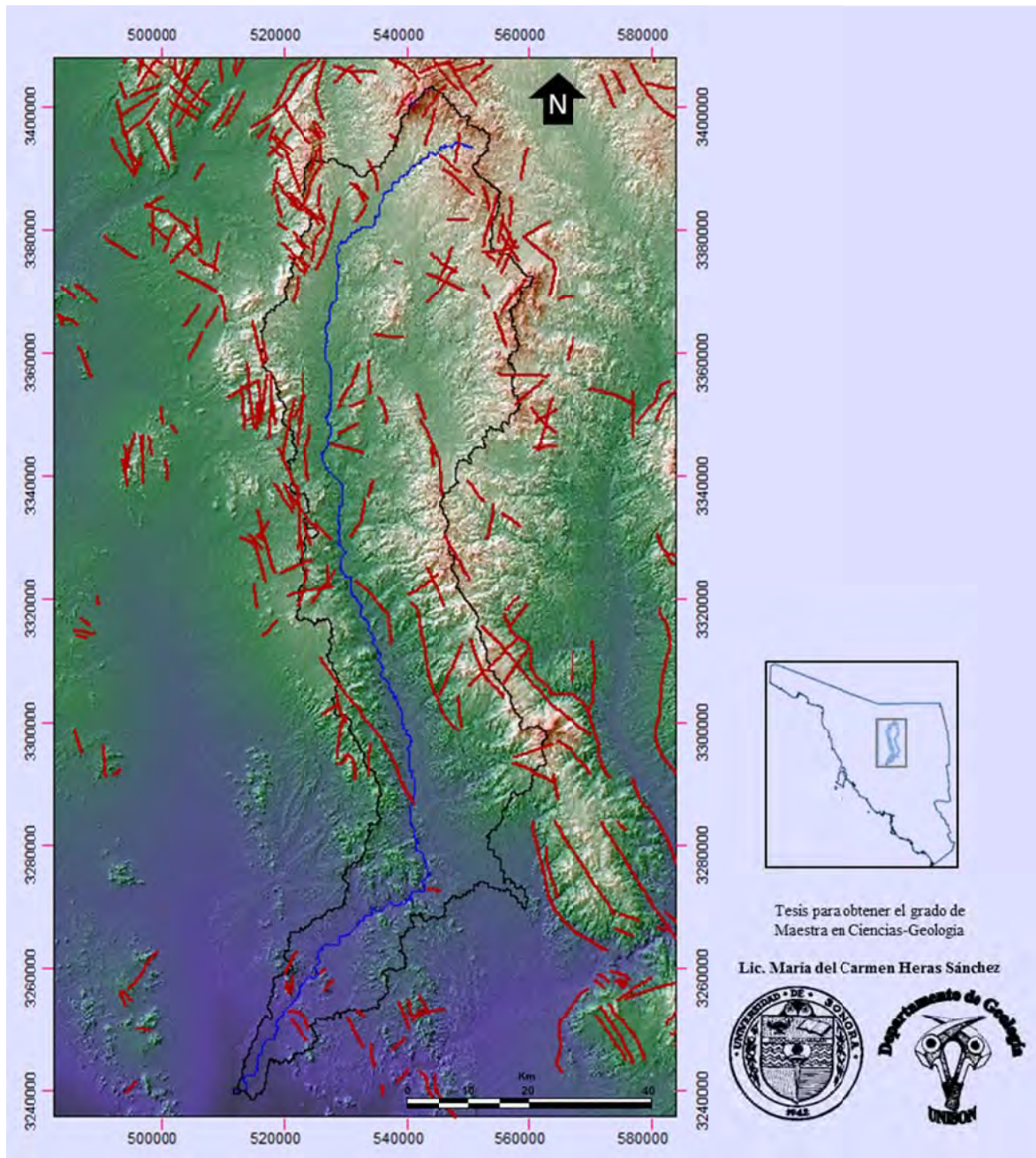


Figura 4.8. Geología de la cuenca del Río San Miguel: fallas y fracturas.

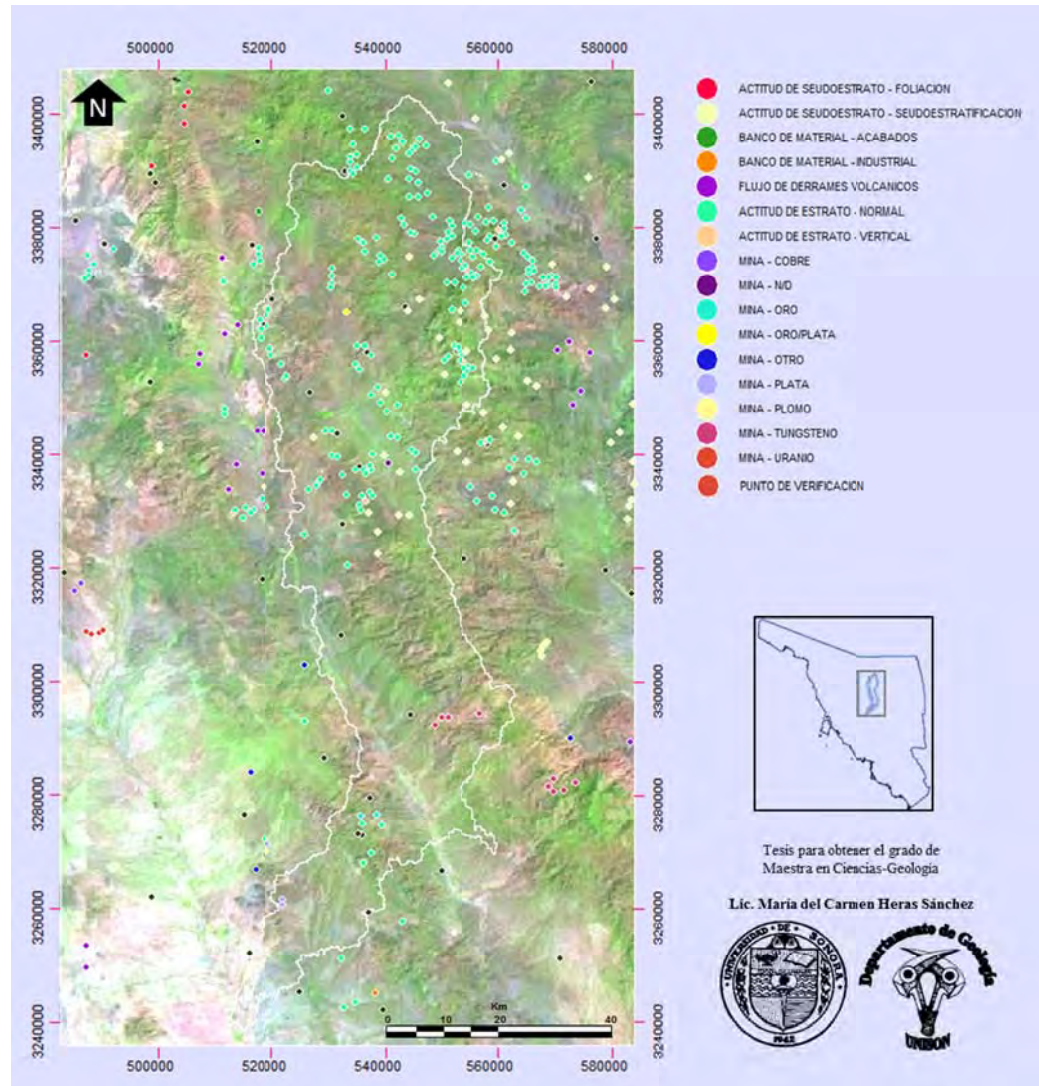


Figura 4.9. Geología de la cuenca del Río San Miguel: Minas, catas. Sobre imagen Landsat.

4.2.5 Hidrología Superficial

La cartografía de hidrología superficial del INEGI permite representar uno de los recursos más importantes para el desarrollo de todo organismo viviente: el agua. Para su estudio, el agua se relaciona íntimamente con factores tales como roca, suelo, vegetación y pendiente del terreno, que permiten determinar su comportamiento sobre la superficie de la corteza terrestre.

En la figura 4.10 se puede observar que el Río San Miguel nace en la parte noreste de la cuenca y alcanza una longitud de 228.18 km. a través de la superficie de una cuenca hidrográfica con una extensión de 4,034.27 km² (Heras, *et.al.*, 2011). El río mantiene un rumbo referencial Norte-Sur, pero a la altura de Rayón cambia su dirección hacia el Suroeste atravesando el Valle de San Miguel, para después continuar hacia la planicie de Estación Zamora donde se incorpora con el Río Zanjón, para descargar finalmente y unirse al Río Sonora. Recibe el aporte de arroyos por ambas márgenes, pero los principales son por margen izquierda.

El drenaje es de tipo rectangular, y los aprovechamientos superficiales son escasos.

En la misma figura 4.10, la imagen de fondo corresponde a la delimitación de las cuencas hidrográficas realizada por INEGI con base en la carta topográfica a escala 1:1,000,000, en cambio, la cuenca hidrográfica que se encuentra enmarcada en color blanco, al igual que el cauce del río principal, son parámetros que fueron calculados con base en la altimetría con resolución de 27X31 metros para X y Y, respectivamente, lo cual deriva en las diferencias observadas.

El valle del río se localiza en la porción central del área estudiada, cruza por los valles de Opodepe, Rayón y San Miguel de Horcasitas (Figura 4.11).

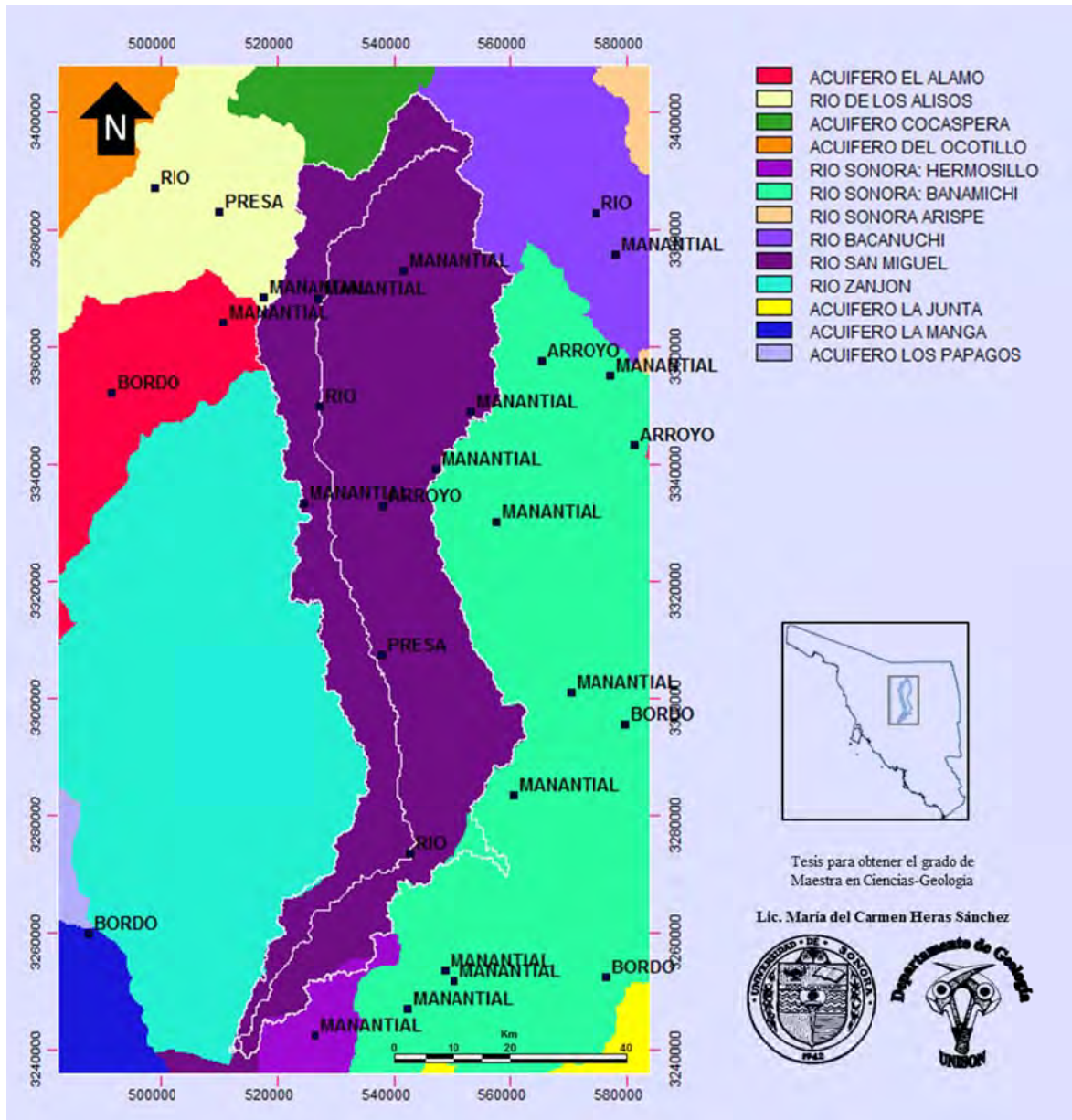


Figura 4.10. Hidrología superficial de la cuenca del Río San Miguel: acuíferos del área de estudio y estaciones hidrométricas.

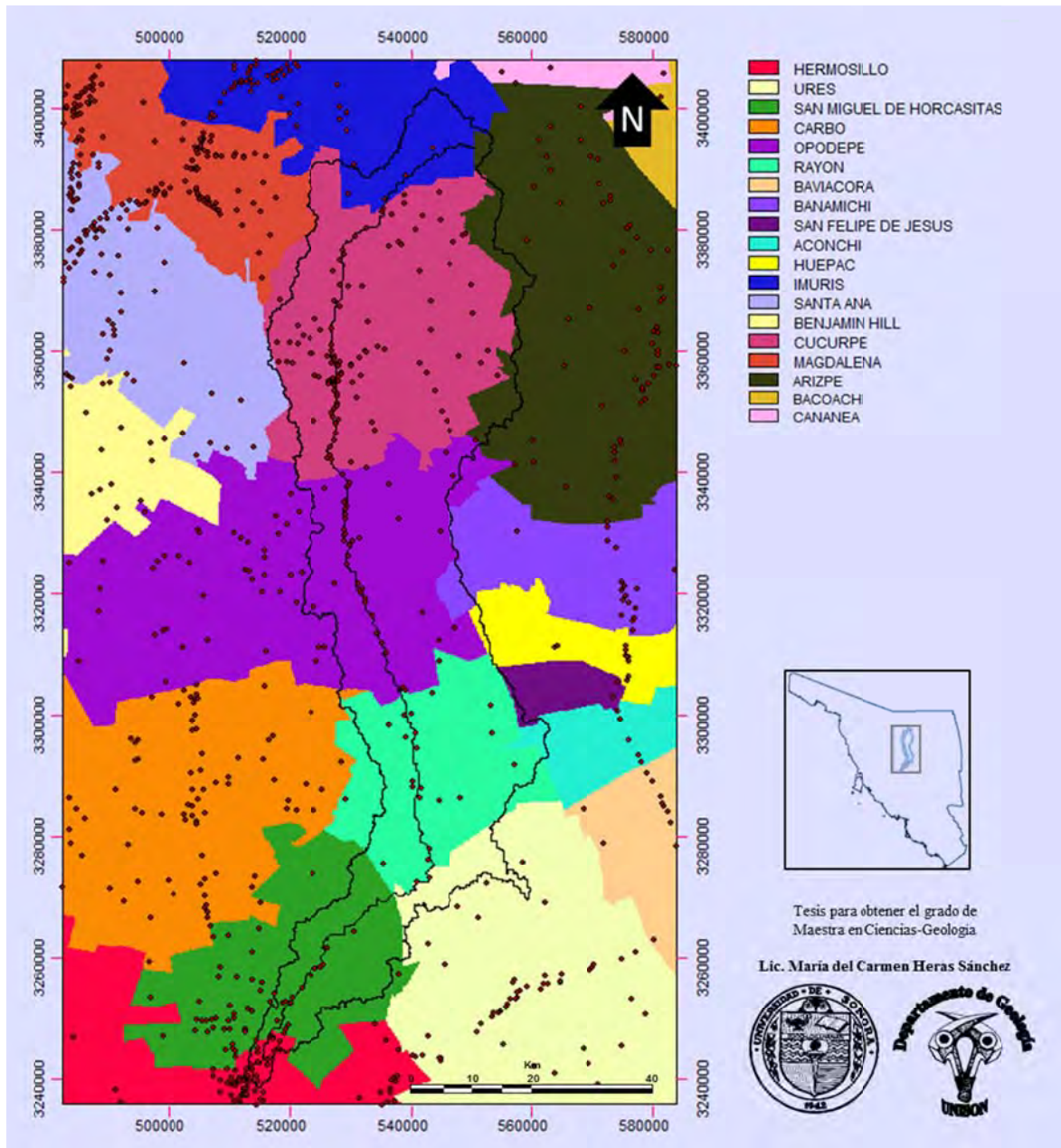


Figura 4.11. Municipios del área de estudio y sus localidades.

4.2.6 Hidrología Subterránea

Siendo el agua un recurso de vital importancia, el estudio de las aguas del subsuelo, es considerado como una ciencia cuantitativa y cualitativa que tiene como objetivo fundamental determinar entre otras cosas, su localización, cantidad, dirección de flujo, así como las características de las rocas y suelos localizados en las diferentes unidades de permeabilidad, información que se encuentra contenida en la cartografía temática de INEGI, que permite establecer los criterios necesarios para la extracción y distribución del agua, así como para prevenir su contaminación, lo que facilita su aprovechamiento integral optimizado dentro de los sectores agropecuario, industrial y doméstico.

En la figura 4.12 se pueden observar las unidades geohidrológicas del área de estudio, que permiten identificar varios tipos de roca o material granular cuyas características permiten, en diferente grado, almacenar y transmitir el agua subterránea. La información para generar la imagen ha sido clasificada por el INEGI en la carta de hidrología subterránea a escala 1:1,000,000, editada en el año 2000.

4.2.7 Topografía

Los rasgos topográficos del área de estudio se muestran en las figuras 4.13, 4.14 y 4.15, cuyos datos se han obtenido de la carta topográfica del INEGI, a escala 1,000,000, editada en el año 1997. Las principales obras de infraestructura hechas por el hombre en materia de vías de transporte se puede apreciar en color amarillo en la figura 4.13; además, las cabeceras municipales y localidades con más de 2500 habitantes, aparecen con el contorno verde y los nombres de las mismas en color negro. El fondo es una imagen de Google Earth.

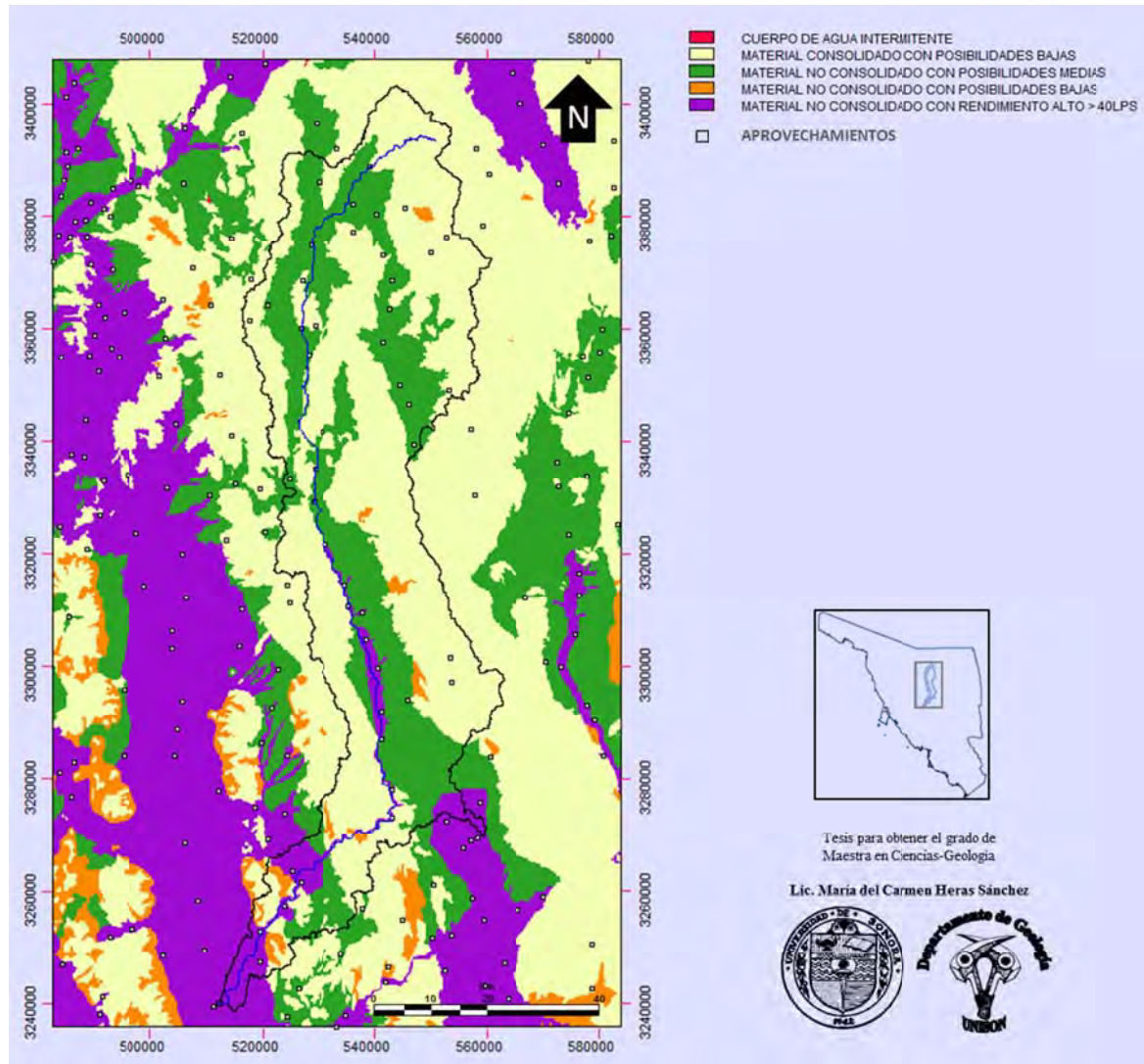


Figura 4.12. Hidrología subterránea de la cuenca del Río San Miguel: Unidades Geohidrológicas y aprovechamientos.

La representación del relieve (Figura 4.14) muestra en el fondo las elevaciones del terreno y en diversos colores, se pueden apreciar las curvas de nivel generadas cada 200 metros. Las curvas de nivel han sido generadas con el comando CONTOUR (Idrisi, 2008) de Idrisi16, donde se puede especificar el intervalo de valores de las curvas, así como también los valores iniciales y finales de las mismas, pudiendo generar los gráficos según los requerimientos de cada proyecto.

Los rasgos hidrográficos más representativos como son ríos, presas y lagunas, están sobrepuestos a una imagen del relieve del terreno que se generó con base en las elevaciones del mismo (Figura 4.15). En la misma imagen se pueden ver las diferencias entre la hidrografía del área de estudio calculadas con Idrisi16 (color azul) y el gráfico generado por INEGI (color negro). Las diferencias se deben a la resolución del grid que compone las elevaciones del terreno.

4.2.8 Uso del Suelo y Vegetación

En la figura 4.16 se muestran los tipos de vegetación y de actividad pecuaria del área de estudio, además de la erosión apreciable. También se cuenta con información relacionada con clases de cultivo y especies vegetales. La clasificación de la información corresponde a la carta de uso de suelo y vegetación del INEGI, a escala 1:1,000,000, del año 1994.

4.2.9 Uso potencial

Las figuras 4.17, 4.18 y 4.19 muestran el uso potencial de la tierra para los tipos de uso forestal, ganadería y agricultura, respectivamente, según la clasificación del INEGI, en la carta de uso potencial del suelo, a escala 1:1,000,000, del año 2000. Esta información es complementaria a las vías de comunicación, localidades y demás parámetros considerados en estudios de ingeniería y proyectos de desarrollo.

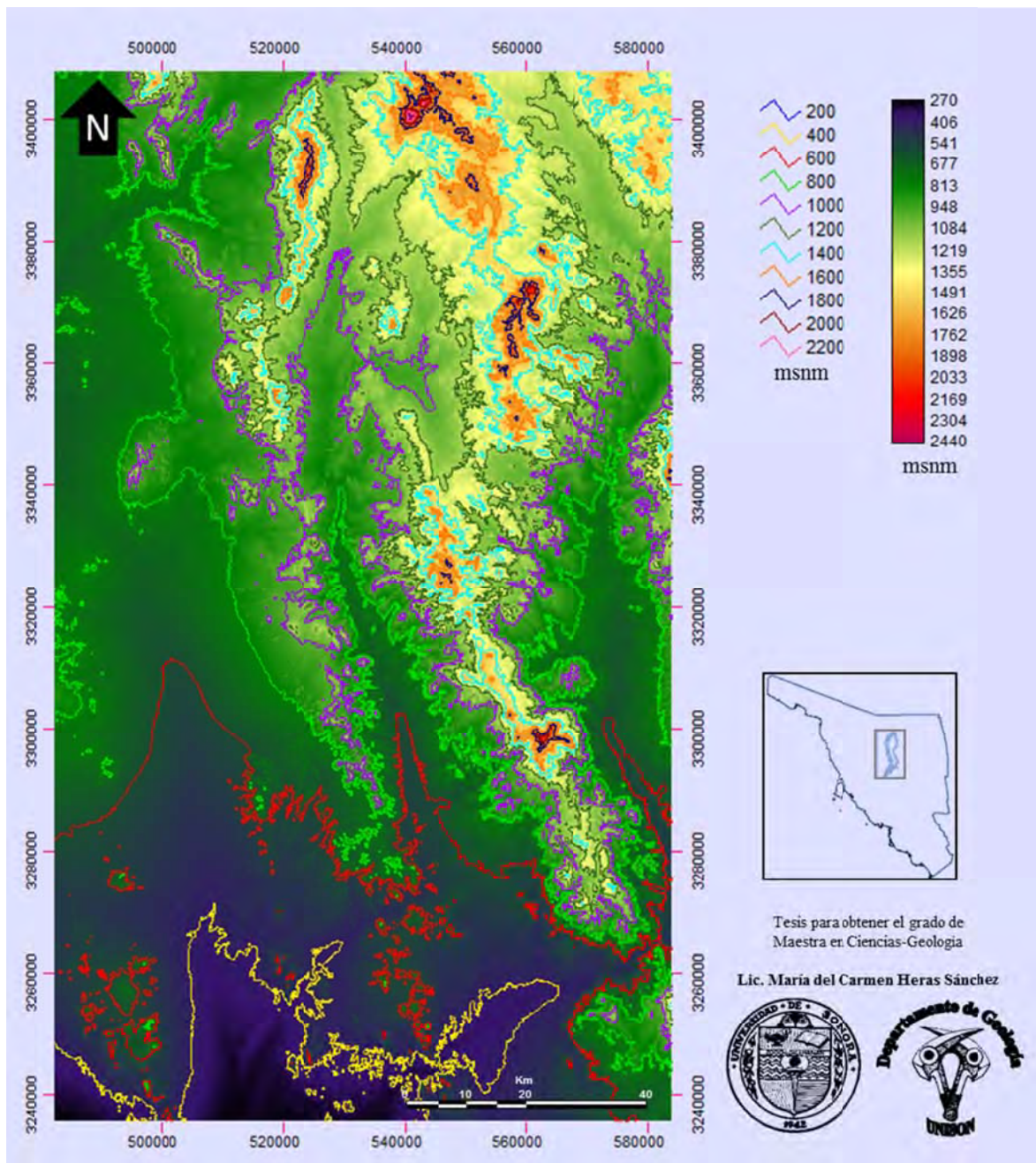


Figura 4.14. Topografía del área de estudio: curvas de nivel sobre el MDE.

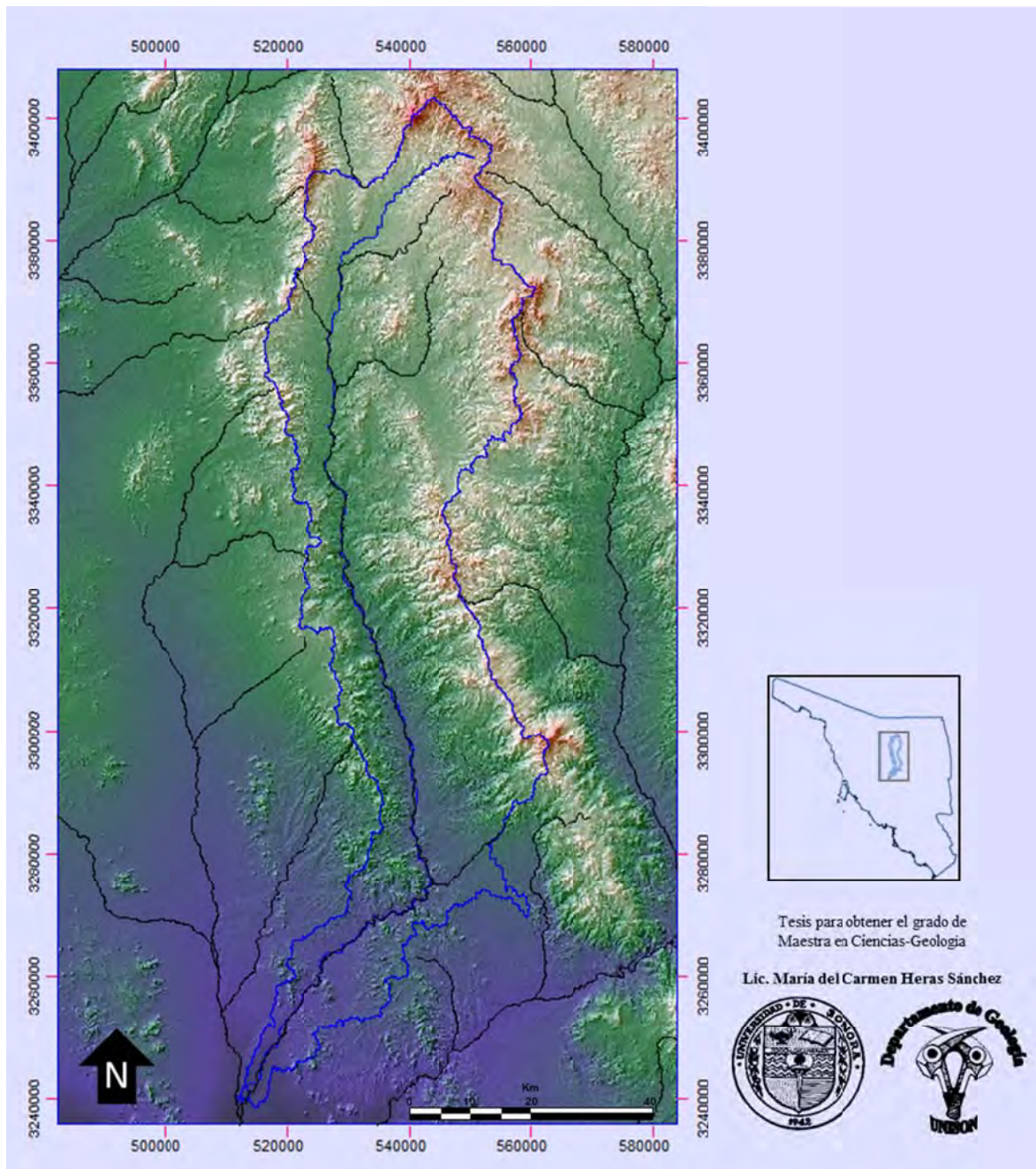


Figura 4.15. Topografía del área de estudio: ríos y cuerpos de agua.

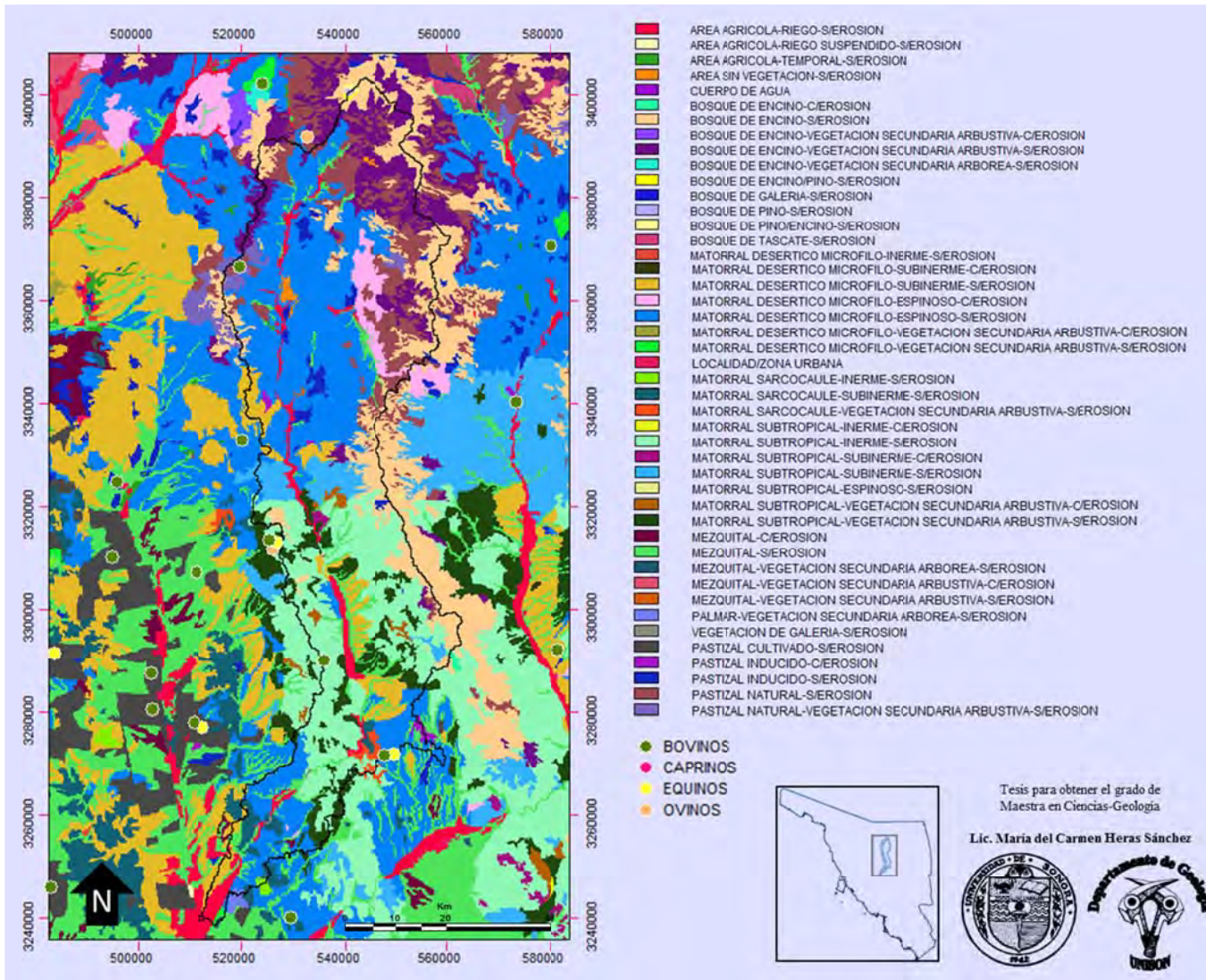


Figura 4.16. Cuenca del Río San Miguel – Uso del suelo: vegetación y actividad pecuaria.

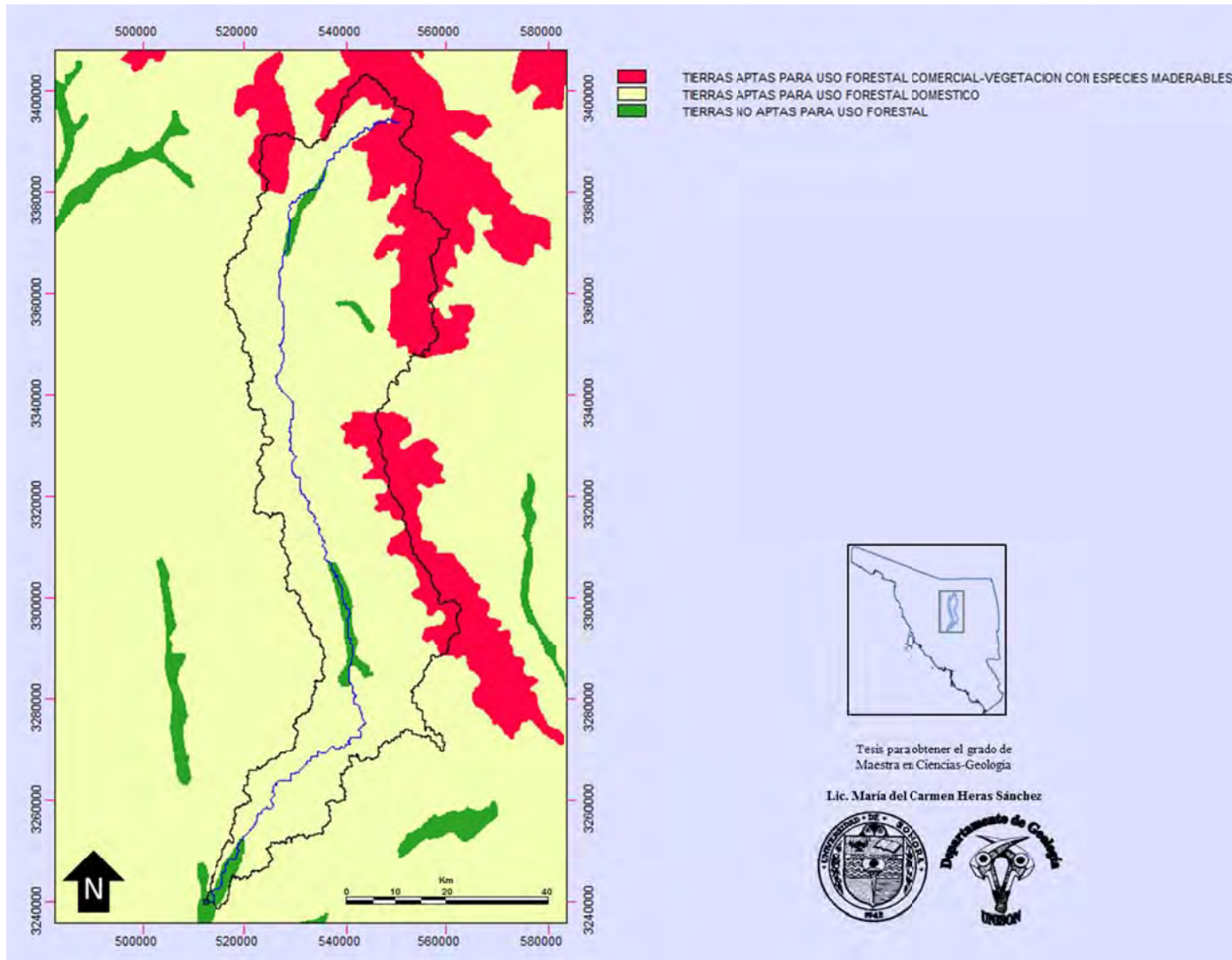


Figura 4.17. Cuenca del Río San Miguel – Uso potencial del suelo: forestal.

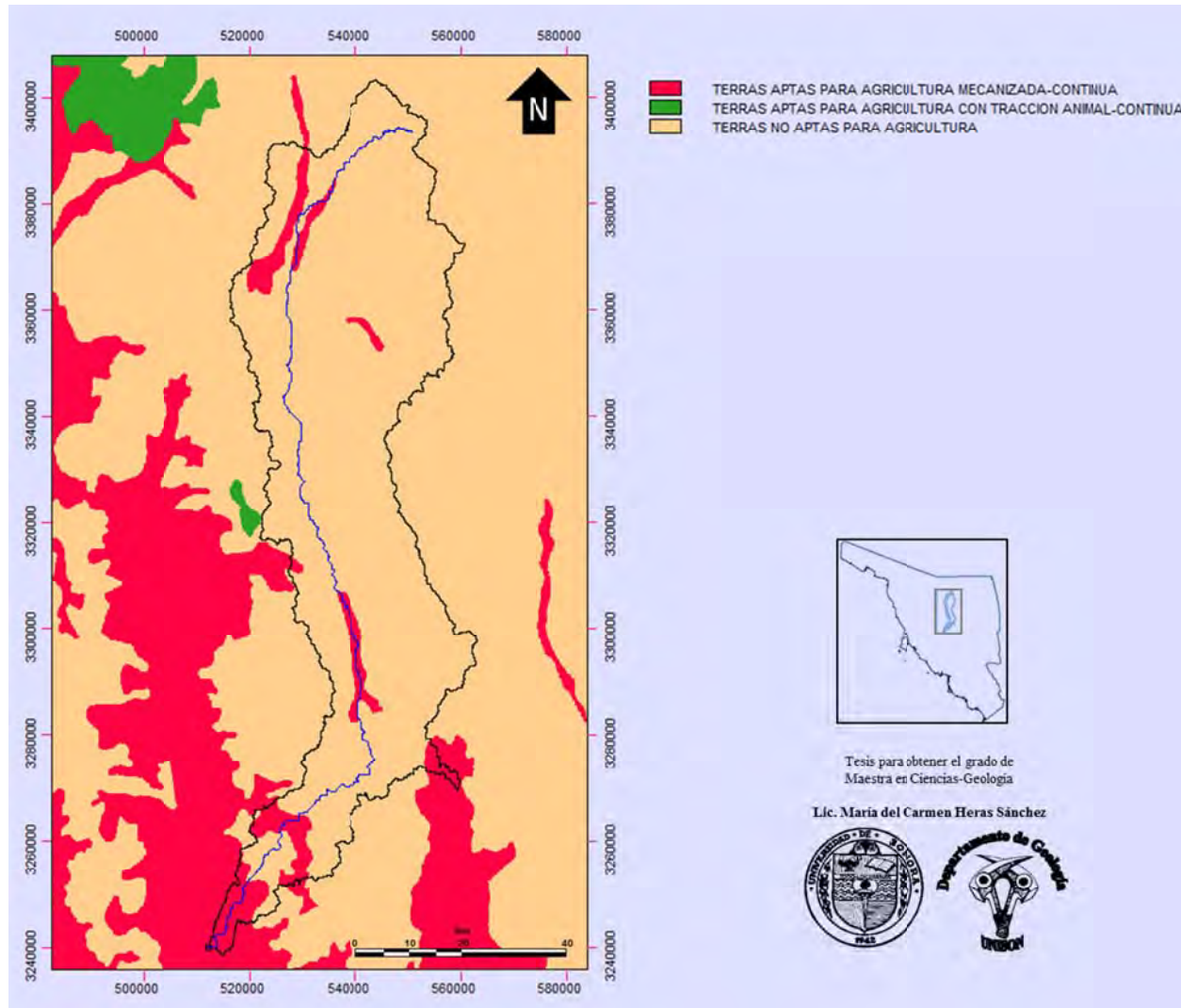


Figura 4.19. Cuenca del Río San Miguel – Uso potencial del suelo: agricultura.

4.2.10 Edafología

La clasificación de información utilizada por el INEGI en la carta edafológica a escala 1:1,000,000, editada en el año 1998, permite destacar las características morfológicas, físicas y químicas que se toman en consideración para la identificación y separación de los suelos en unidades representables cartográficamente (Figura 4.20) y que son directamente traducibles a ventajas o desventajas en su utilización para determinadas actividades, proporcionando información de mucha utilidad para la planeación, investigación y educación, con aplicaciones prácticas a estudios agropecuarios, forestales y de Ingeniería Civil, entre otras. Por consiguiente, constituye un apoyo fundamental en la planeación y ejecución de acciones encaminadas al uso óptimo de los recursos naturales, marco de referencia para la prevención de desastres ecológicos y degradación ambiental, ocasionados por la sobreexplotación o uso inadecuado del suelo.

4.2.11 Climatología

La información presentada en las figuras 4.21 y 4.22 es útil para comprender la dinámica del clima a nivel global y regional, caracterizar regiones hidrológicas, delimitación de zonas de riesgo meteorológico y planeación agrícola, entre otras aplicaciones. Lo anterior es posible con la información proporcionada de las unidades climatológicas, la humedad en el suelo y las isolíneas de evapotranspiración y de la precipitación media anual expresada en mm. Los datos utilizados para generar las imágenes han sido clasificados en la carta de climas a escala 1:1,000,000, editada por el INEGI en el año 2000.

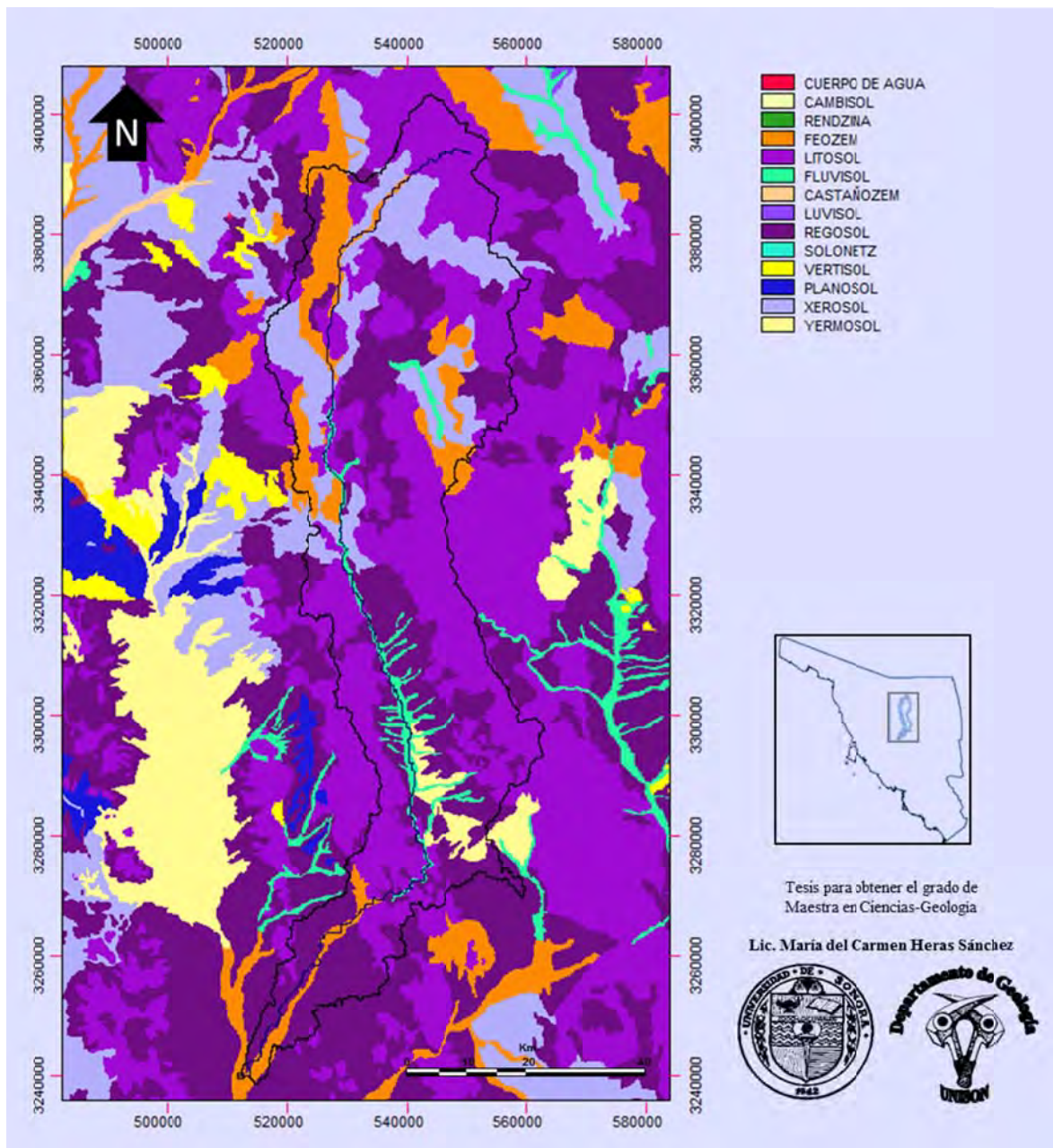


Figura 4.20. Edafología del área de estudio: tipos de suelo.

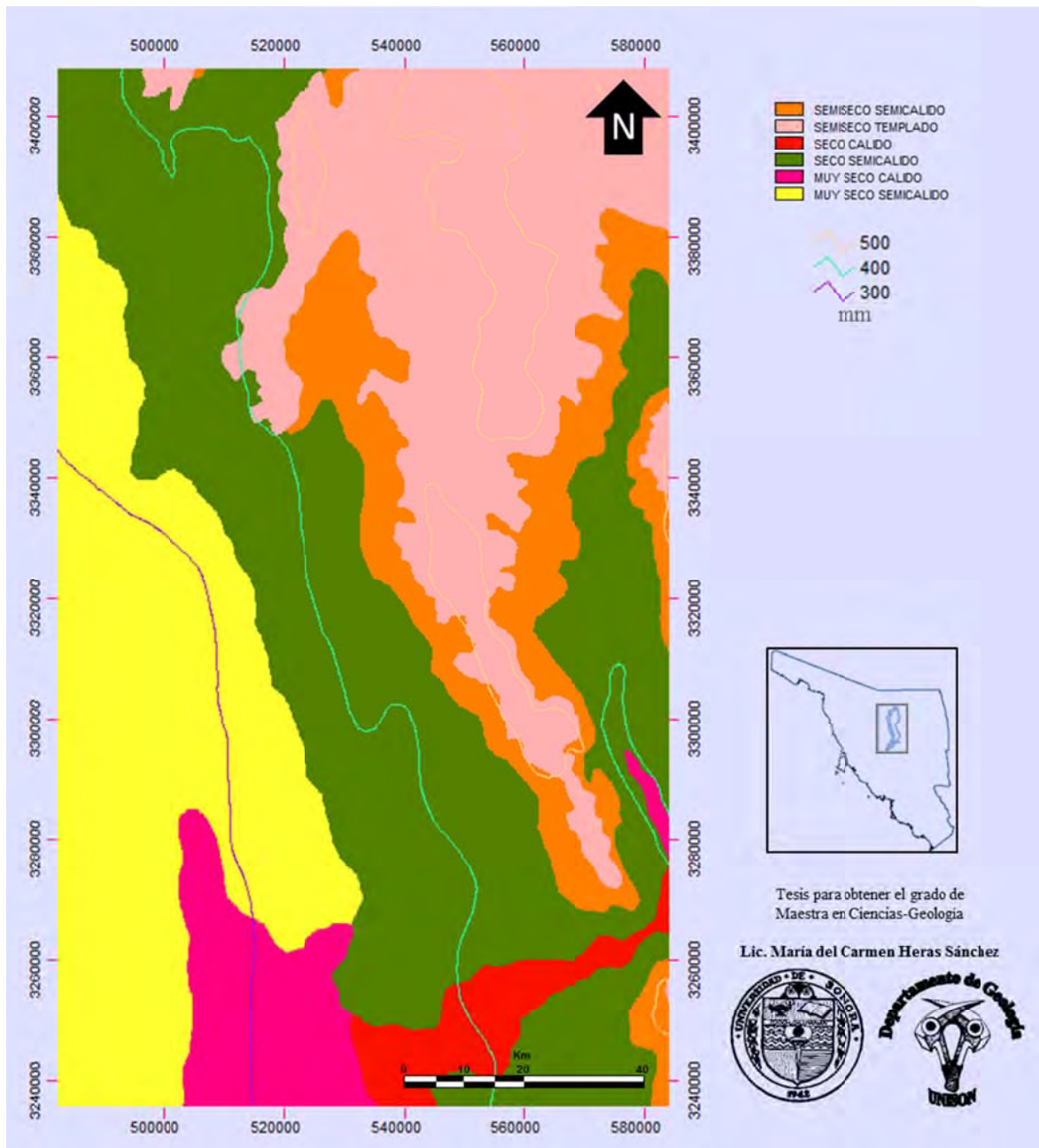


Figura 4.21. Climatología del área de estudio: unidades climatológicas e isolíneas de evapotranspiración.

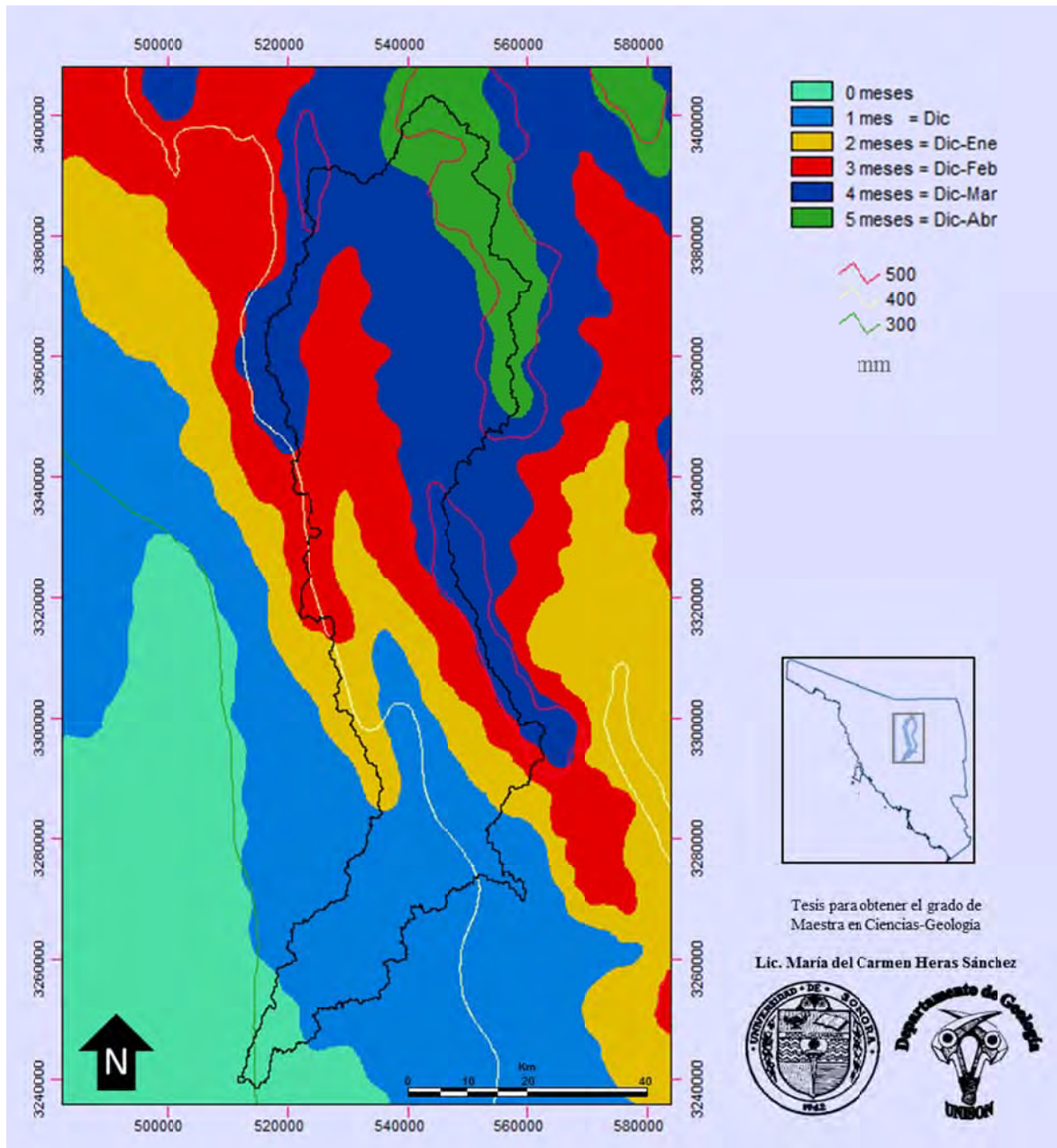


Figura 4.22. Climatología del área de estudio: humedad en el suelo e isoyetas.

4.3. Parámetros fisiográficos calculados

Se han dimensionado los parámetros fisiográficos de la cuenca y del cauce principal utilizando los algoritmos proporcionados por Idrisi16: The Taiga Edition y el módulo hidrogeomático Water Cycle, que es un subprograma desarrollado por el grupo de investigadores del Laboratorio de Hidrogeomática del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) (Franco, 2008). Los resultados se muestran a continuación.

4.3.1 Parámetros fisiográficos de la cuenca

Los parámetros se obtienen a partir de las características físicas de la cuenca, factor condicionante en el estudio del comportamiento de los componentes del Ciclo Hidrológico.

En la tabla 4.1 se muestran parámetros fisiográficos de la cuenca de estudio, como son el área, el perímetro y la altitud media, entre otros.

La forma de la cuenca se ha determinado con base en los coeficientes de compacidad y circularidad.

El coeficiente de compacidad K_c se debe a Gravelius (Llamas, 1993) y es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca. Se calcula con base en la siguiente expresión matemática:

$$K_c = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{P}{\sqrt{A}} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{717.76}{\sqrt{403427}} = 3.19$$

donde P y A son el perímetro y el área de la cuenca, respectivamente. En cualquier caso el coeficiente será mayor que la unidad. Mientras K_c sea más

próximo a 1, su forma será más parecida a un círculo, pudiendo alcanzar valores arriba del 3 en cuencas muy alargadas, como es el caso de la cuenca del Río San Miguel.

Tabla 4.1. Parámetros fisiográficos de la cuenca del Río San Miguel.

Campo	Parámetro calculado	Valor
A_km2	Superficie de la cuenca en km ²	4,034.27
P_km	Perímetro en km	717.76
Em_m	Altitud media de la cuenca en msnm	972.20
Pm_g	Pendiente media de la cuenca en grados	10.9
Kc	Coefficiente de compacidad	3.19
Rci	Relación de circularidad	0.1

Por otro lado el coeficiente de circularidad es la relación entre el área de la cuenca y la de un círculo cuyo perímetro es igual al de la cuenca, se calcula de la siguiente manera:

$$R_{ci} = \frac{4\pi A}{P^2} = \frac{4\pi 4034.27}{717.76^2} = 0.1$$

Igualmente P y A con el perímetro y el área de la cuenca, respectivamente. Los valores resultantes son entre 0 y 1, mientras más alejado del 1 es el valor de R_{ci} menos parecida es la cuenca a un círculo, como es el caso de estudio.

Otro de los parámetros fisiográficos más utilizados en análisis de cuencas, es la curva hipsométrica, con la cual se puede obtener la relación hipsométrica de la cuenca y determinar su potencial erosivo (Figura 4.23).

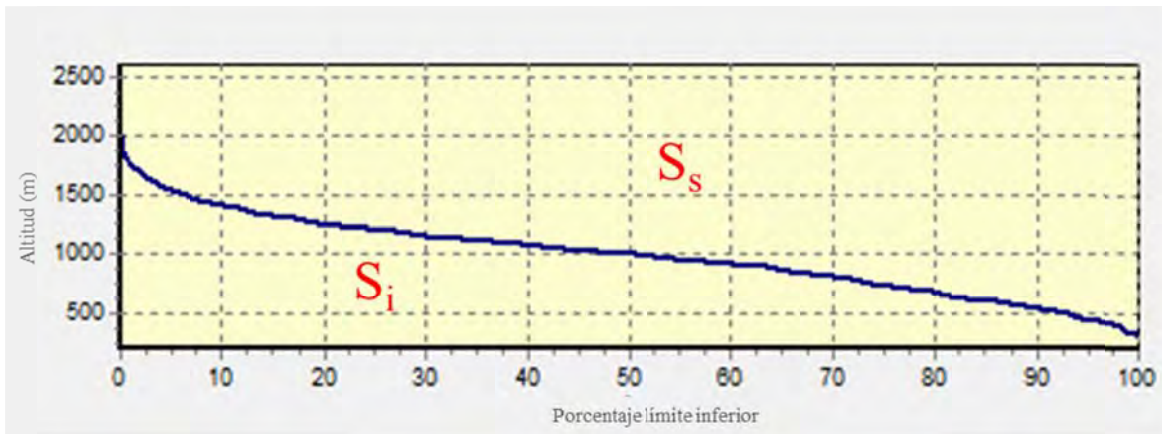


Figura 4.23. Curva hipsométrica de la cuenca del Río San Miguel.

La curva hipsométrica refleja con precisión el comportamiento global de la altitud en la cuenca que va desde 290 hasta 2440 msnm, factor directamente relacionado con la temperatura y la precipitación. En el caso de la curva hipsométrica de la cuenca del Río San Miguel, se hicieron clases de 500 m de altitud, se calcularon las áreas totales para cada clase y se obtuvo el porcentaje de las áreas por intervalo en relación al área total de la cuenca. S_s y S_i , son las áreas totales sobre y debajo de la curva hipsométrica con las cuales se puede obtener la relación hipsométrica de la cuenca del Río San Miguel, de la siguiente manera:

$$R_h = \frac{S_s}{S_i} = 2.08$$

De tal manera que, según Llamas (1993), la importancia de esta relación reside en que es un indicador del equilibrio dinámico de la cuenca, así cuando $R_h=1$, se trata de una cuenca en equilibrio, si es $R_h<1$, se trata de una cuenca joven con potencial erosivo, y si $R_h>1$, se trata de una cuenca vieja, o sedimentaria, como es el caso de la cuenca en estudio.

4.3.2 Parámetros fisiográficos del cauce principal

Los parámetros fisiográficos de cauce son valores que indican sus características medibles principales como son su longitud y la longitud del eje trazado entre los puntos de mayor y menos elevación, datos con los cuales se puede calcular el índice de sinuosidad y el perfil del río principal, además de otros parámetros.

Los parámetros obtenidos para el Río San Miguel se pueden apreciar en la tabla 4.2. La longitud del cauce principal se obtiene con la ayuda del orden de corrientes partiendo de la salida de la cuenca hacia aguas arriba siguiendo la corriente de más alto orden, hasta alcanzar una bifurcación o confluencia del mismo orden. Una vez obtenida la longitud, se obtiene su elevación más alta y se van registrando las elevaciones que cortan al río al ir descendiendo y sus correspondientes longitudes recorridas desde el inicio.

Tabla 4.2. Parámetros fisiográficos del Río San Miguel.

Campo	Parámetro calculado	Valor
Lc_km	Longitud del eje del río principal en km	228.18
La_km	Longitud del eje en km	158.12
Emx_m	Altitud máxima del río principal en msnm	1463
Emn_m	Altitud mínima del río principal en msnm	290
Sc	Pendiente promedio del río principal	1.02

Por otro lado, el perfil longitudinal o topográfico (Figura 4.24) es un gráfico que representa las distintas elevaciones del fondo del río, desde el nacimiento hasta la desembocadura.

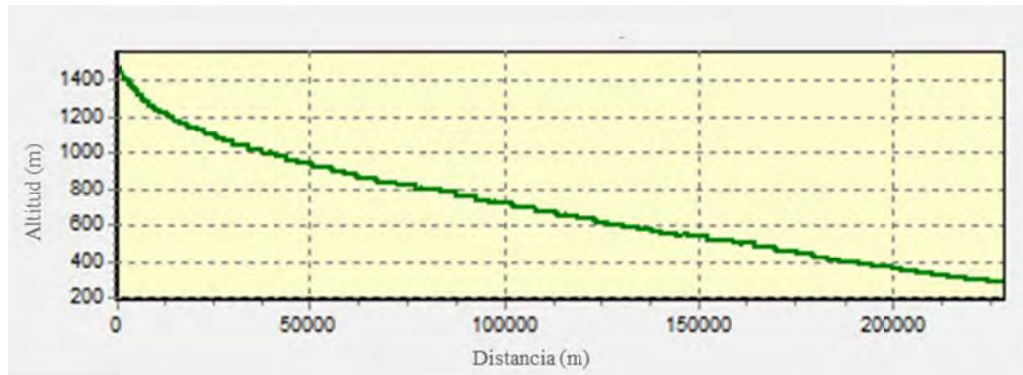


Figura 4.24. Perfil topográfico del cauce del Río San Miguel.

Para obtener el índice o coeficiente de sinuosidad se considera la relación entre la longitud del cauce principal (L_c) y la de una línea recta (L_a) entre el punto de mayor elevación (E_{max}) y el de menor elevación (E_{min}) (Figura 4.25).

$$\text{Coeficiente de sinuosidad (Sh)} = L_c / L_a = 228.18 / 158.12 = 1.44$$

4.4 Análisis de la precipitación de la cuenca del Río San Miguel durante el periodo del 01 de Junio al 30 de Septiembre del 2005

Con los datos de precipitación disponibles para el periodo de estudio, se generaron 16X8 archivos georreferenciados con datos binarios de doble precisión con los que se generaron las imágenes correspondientes, utilizando el método de interpolación para la distribución espacial de los valores climáticos en el área especificada.

Cada una de las imágenes que representan la precipitación acumulada de cada periodo, ha sido obtenida utilizando el comando INTERPOL (Idrisi, 2008) de Idrisi,

que interpola valores puntuales para toda una superficie, considerando el promedio de las distancias ponderadas entre los puntos o un modelo de tendencias. En ambos casos el peso del exponente asociado con el factor distancia es definido por el usuario, para éste caso se interpoló el MDE con el factor por omisión de 2.0, puesto que el módulo está optimizado para éste valor.

Como resultado se obtiene un valor estimado de precipitación para cada píxel que conforma la imagen. Mientras más alejado se encuentra el píxel de la ubicación geográfica de la ER, más pequeño es el valor que obtiene, de lo contrario, es porque se encuentra en el área de influencia de otra ER (Figura 4.26).

Se generó también la interpolación para los datos de precipitación acumulada de todo el periodo (Figura 4.27).

Las precipitaciones mínimas y máximas acumuladas para cada periodo y el total acumulado se pueden consultar en las tablas 4.3 y 4.4, así como también en la figura 4.28.

También en las tablas 4.3 y 4.4 se muestra que en la primera y segunda semana de Junio y que la cuarta semana de Septiembre hay ausencia de precipitación. Por otro lado la estación 131 indica el menor registro de precipitación acumulada mientras la estación 134 indica la mayor precipitación acumulada registrada en el total del periodo.

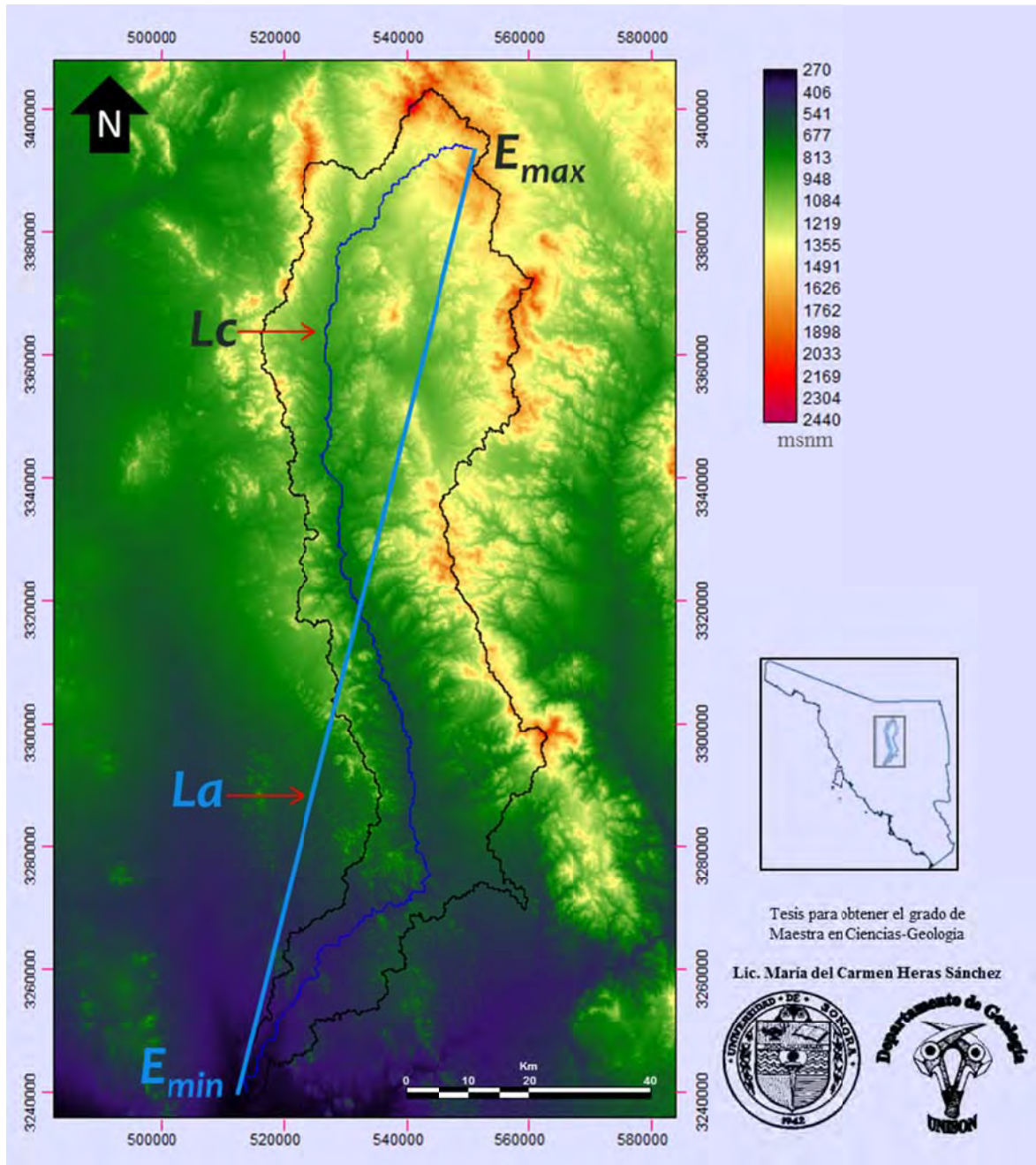


Figura 4.25. Parámetros fisiográficos del Río San Miguel.

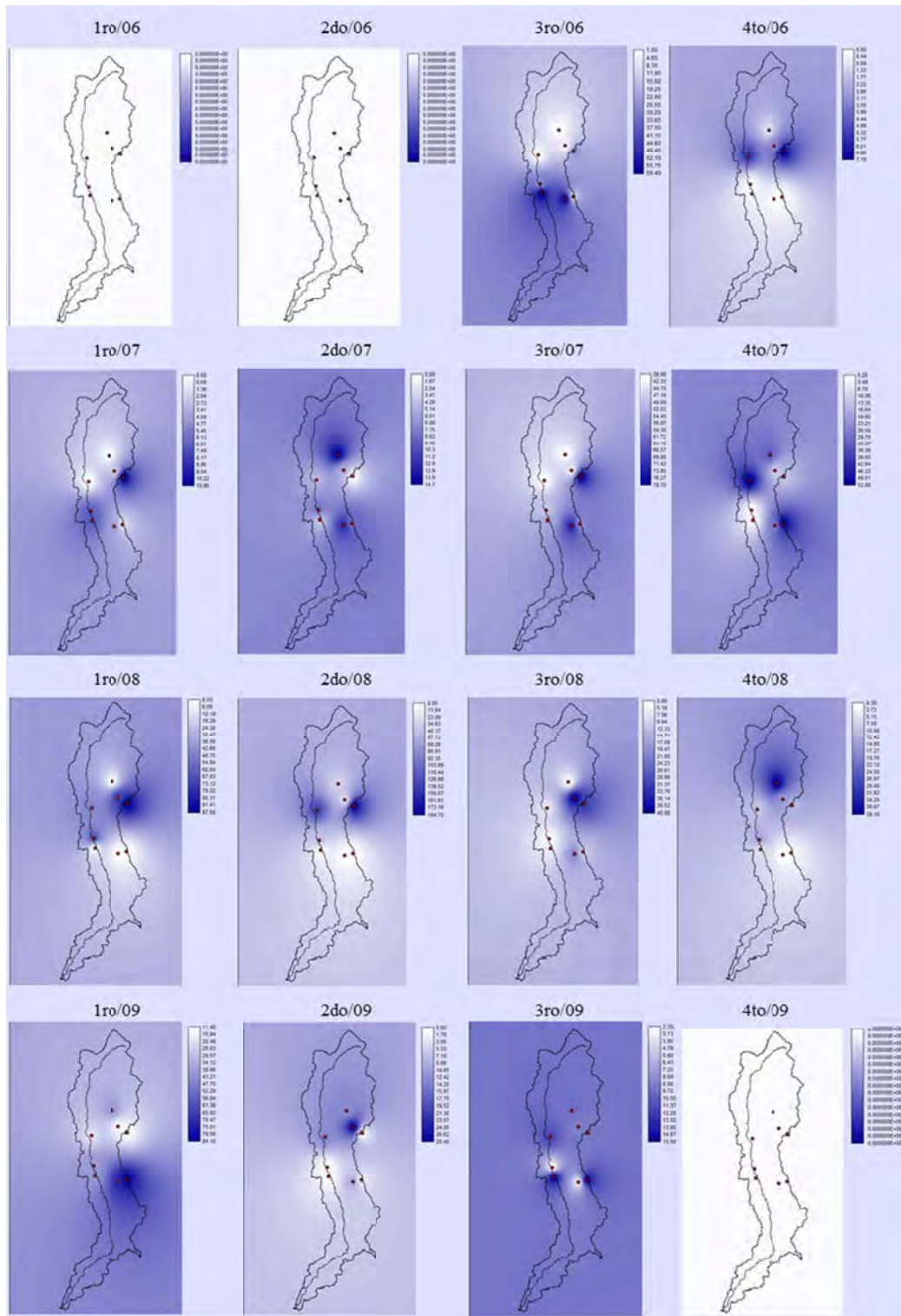


Figura 4.26. Precipitación acumulada por periodos de la cuenca del Río San Miguel.

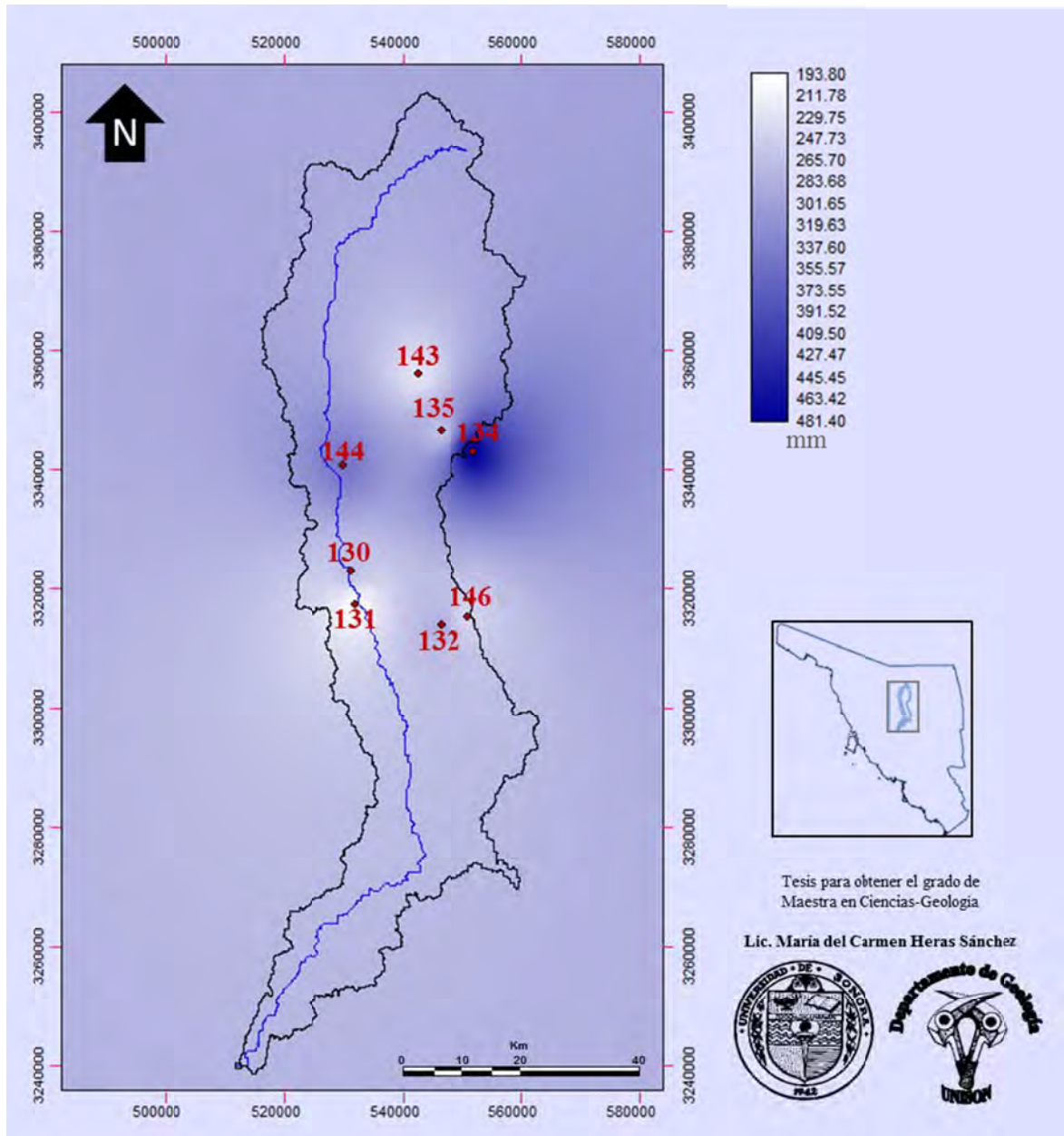


Figura 4.27. Precipitación acumulada del periodo de estudio en la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

Tabla 4.3. Precipitaciones mínimas y máximas por periodo acumulado

Periodo acumulado	Precipitación mínima (mm)	Precipitación máxima (mm)
0106	0.0	0.0
0206	0.0	0.0
0306	1.0	59.4
0406	0.0	7.1
0107	0.0	10.9
0207	0.8	14.7
0307	39.9	78.7
0407	0.2	52.8
0108	0.0	97.5
0208	0.0	184.7
0308	2.8	40.9
0408	0.3	39.1
0109	11.4	84.1
0209	0.0	28.4
0309	2.3	15.5
0409	0.0	0.0

Tabla 4.4. Precipitación acumulada por estaciones hidrometeorológicas

No. EH	Precipitación registrada acumulada (mm)
130	267.4
131	193.8
132	280.4
134	481.4
135	266.9
143	226.6
144	348.2
146	424.7

La figura 4.28 muestra la distribución de la precipitación acumulada por periodo en el total del tiempo transcurrido. Las fechas de los periodos están en la tabla 3.4.

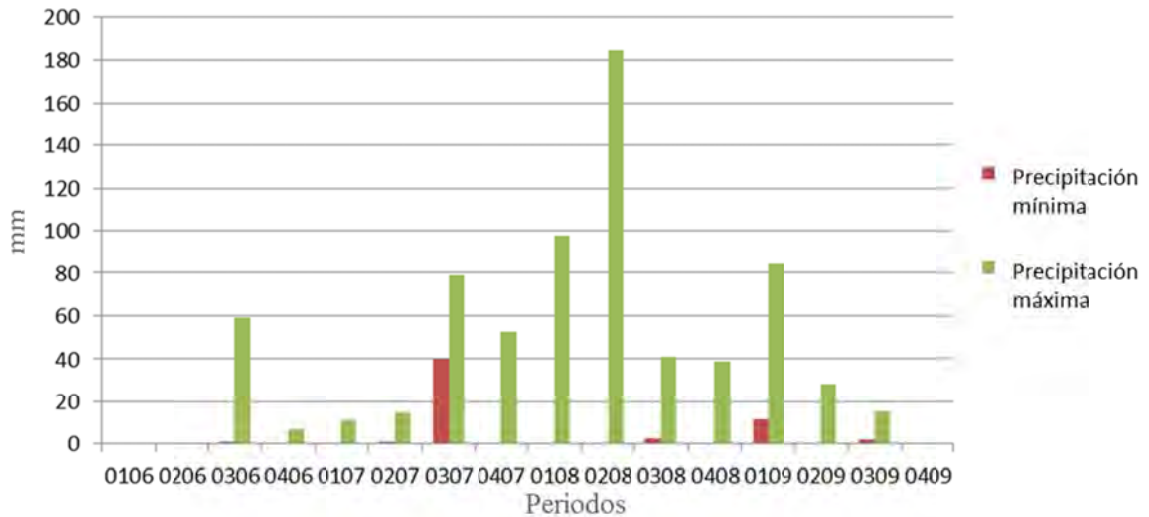


Figura 4.28. Precipitaciones mínimas y máximas por periodo acumulado.

Polígonos de Thiessen

La red poligonal se traza formando los polígonos mediante las perpendiculares en el punto medio a los segmentos que unen cada dos estaciones. Se supone que cada estación es representativa del área del polígono que la encierra, de manera que la precipitación media de la superficie limitada por cada polígono es la que se registra como precipitación acumulada en la ER correspondiente. La precipitación media de la cuenca se obtiene sumando los productos de las precipitaciones acumuladas de cada estación por el área del polígono correspondiente y dividiendo la suma entre el área total de la misma cuenca:

$$P = \frac{\sum p_n a_n}{A}$$

En donde: P precipitación media de la cuenca, p precipitación media de cada polígono (corresponde a la precipitación acumulada de la estación limitada por cada polígono), a área correspondiente a cada polígono y A es el área total de la cuenca. Las áreas de los polígonos se calculan mediante el empleo de papel milimétrico, del planímetro o como en este caso, utilizando sistemas de información geográfica como Idrisi.

En la tabla 4.5 se puede observar el resumen de los cálculos y en la figura 4.29 la distribución de los polígonos en la cuenca.

Tabla 4.5. Precipitación Media Acumulada en la cuenca del Río San miguel, para el periodo de estudio

No. EH	PMA: Precipitación media acumulada (mm)	AP: Área del polígono (m ²)	PMA*AP
130	267.4	224508598	60033599105.2
131	193.8	506368280	98134172664.0
132	280.4	1015546329	284759190651.6
134	481.4	85469418	41144977825.2
135	266.9	176211936	47030965718.4
143	226.6	1364510087	309197985714.2
144	348.2	461170260	160579484532.0
146	424.7	200521678	85161556646.6
Suma		4034306586	1086041932857.2
Precipitación media acumulada			269.2 mm

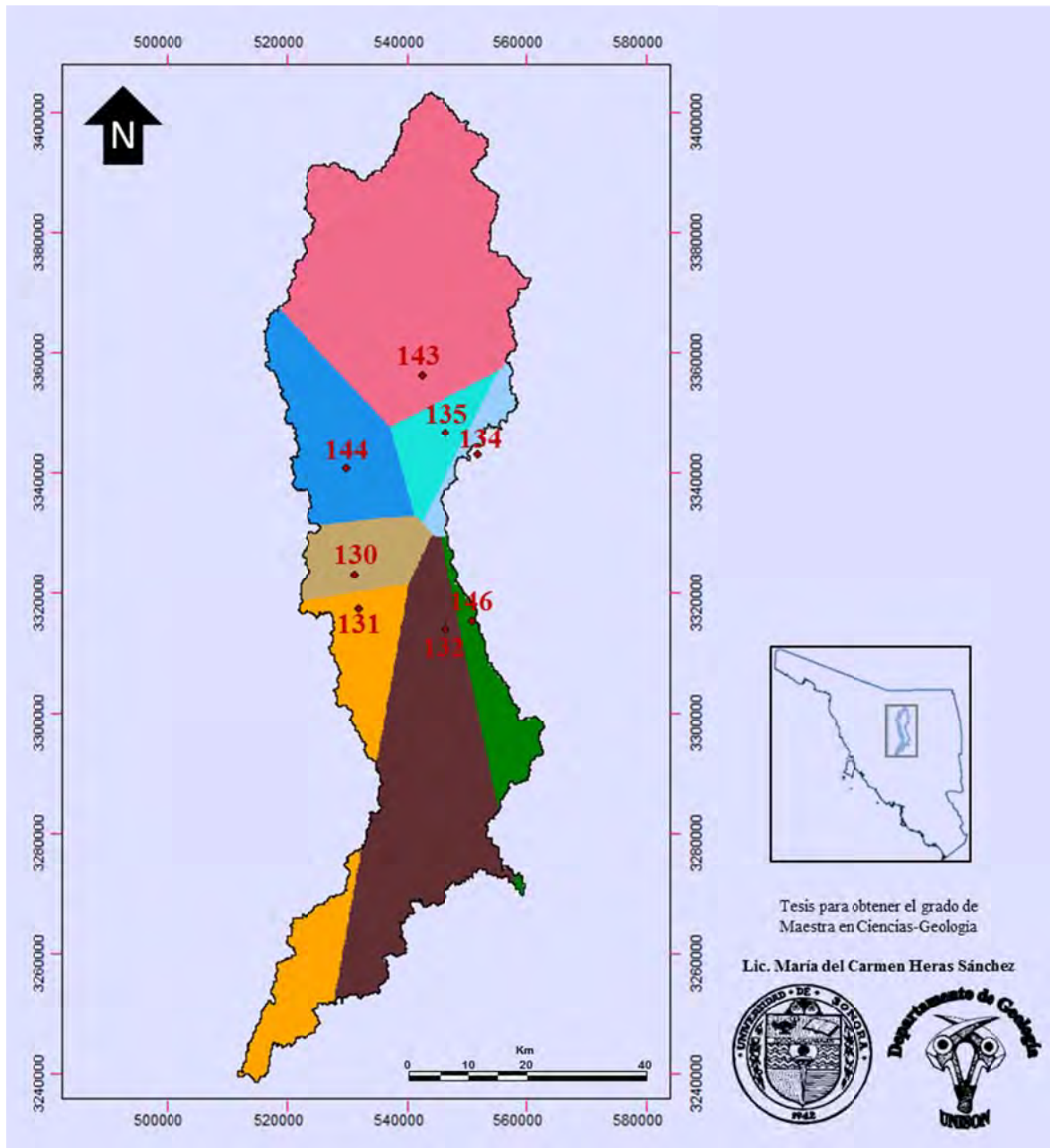


Figura 4.29. Polígonos de Thiessen de la cuenca del Río San Miguel.

La precipitación promedio acumulada para la Cuenca del Río San Miguel durante el periodo del 01 de Junio al 30 de Septiembre del 2005 es de 269.2 mm.

4.5 Análisis de la evapotranspiración de la cuenca del Río San Miguel, para el periodo de 1994 a 1997.

La presencia de agua en la atmósfera está estrechamente relacionada con los procesos de evaporación, transpiración y evapotranspiración.

Como parte del ciclo hidrológico, la evaporación (E) se presenta cuando el agua se convierte en vapor en la superficie terrestre, por otro lado, la Transpiración es el proceso de evaporación de agua en un ser vivo, dicho en otras palabras, es el vapor que sudan los animales y las plantas. La Evapotranspiración (ET) se comprende como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa total y se expresa en mm por unidad de tiempo, a partir de la siguiente fórmula:

$$ET = E + \text{Transpiración}$$

Se entiende por ET Potencial a la máxima de evaporación y transpiración de un suelo, estimada bajo unas determinadas condiciones atmosféricas y de radiación y a la ET Real es la cantidad de agua que efectivamente pasa por el proceso de ET bajo condiciones existentes reales de vegetación, tipo de suelo, etc. La Evapotranspiración real es inferior a la evapotranspiración potencial por los siguientes factores: falta de agua en algunos períodos, variación de la evapotranspiración según el desarrollo de la planta y variaciones de las condiciones atmosféricas como la humedad y la temperatura.

La evaporación puede medirse en forma directa desde pequeñas superficies de agua naturales o artificiales (tanques de evaporación) o a través de evaporímetros o lisímetros. Las tasas de evaporación obtenidas con los métodos

mencionados pueden generalmente ser consideradas como máximas y dan una buena aproximación del poder evaporante de la atmósfera.

Para la estimación de la evapotranspiración potencial y real se utilizan métodos indirectos, empleando fórmulas empíricas que dependen de la fuente de datos disponible y del ajuste del método a las condiciones locales, tal es el caso del método de Turc quien experimentando en un gran número de cuencas en distintas partes del mundo y considerando la evapotranspiración, precipitación y temperatura (Pereyra, 2011), definió la siguiente expresión:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{IT^2}}}$$

Donde ETR, es la evapotranspiración real expresada en mm/año. P, es la precipitación media anual dada en mm/año, IT es un indicador que depende directamente de la temperatura: $IT = 300 + 25T + 0.05T^3$, donde T, es la temperatura media anual.

Con los datos de las estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua de la cuenca del río San Miguel, correspondientes a los años del 1994 al 1997 y considerando los datos requeridos para la estimación de la ETR según Turc, se procedió a calcular la precipitación media (ver tabla 4.6) y la temperatura media (ver tabla 4.7), utilizando el método de promedio aritmético para la precipitación de cada una de las estaciones y los Polígonos de Thiessen para la precipitación de la cuenca. Cabe mencionar que el periodo se eligió por ser el más completo que se pudo obtener de las observaciones realizadas en las 5 estaciones climatológicas que se ubican a lo largo y ancho de la cuenca en mención (ver tabla 4.8 y figura 4.30), sin embargo faltan los registros de la estación 107 (Rancho La Aquituna) correspondientes a los meses 4/1994, 5/1994, 6/1994, 2/1995, 8/1996, 10/1996, 11/1996 y de la estación 41 (El Cajón) correspondiente al mes 6/1995.

Tabla 4.6. Precipitación Promedio Anualizada: periodo 1994-1997
 Datos de la CONAGUA, Cuenca del Río San Miguel

Nombre de la Estación Climatológica	PPA (mm)	Area del polígono (m ²)	PPA / polígono
El Cajón	407.89	862,658,880	351,869,930,563.20
Rayón	471.82	845,347,818	398,852,007,488.76
Meresichic	494.37	438,855,984	216,957,232,810.08
Cucurpe	519.42	818,178,636	424,978,347,111.12
Rancho La Aquituna	438.47	1,069,265,268	468,840,742,059.96
Suma		4,034,306,586	1,861,498,260,033.12
PPA de la cuenca:			461.42 mm

Tabla 4.7. Temperatura Promedio Anualizada: periodo 1994-1997
 Datos de la CONAGUA, Cuenca del Río San Miguel

Nombre de la Estación Climatológica	TPA (°C)	Area del polígono (m ²)	TPA / polígono
El Cajón	21.85	862,658,880	18,849,096,528.00
Rayón	22.26	845,347,818	18,817,442,428.68
Meresichic	18.97	438,855,984	8,325,098,016.48
Cucurpe	19.5	818,178,636	15,954,483,402.00
Rancho La Aquituna	20.3	1,069,265,268	21,706,084,940.40
Suma		4,034,306,586	83,652,205,315.56
TPA de la Cuenca:			20.74 °C

Tabla 4.8. Datos de las estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua, ubicadas en la cuenca del Río San Miguel

Nombre de la Estación Climatológica	Longitud	Latitud	UTM WGS84/12N	Altitud (msnm)
El Cajón	110° 41' 11"	29° 28' 20"	530406,3260347	390
Rayón	110° 34' 14"	29° 42' 38"	541539,3286790	560
Meresichic	110° 40' 30"	30° 01' 50"	531336,3322216	700
Cucurpe	110° 42' 22"	30° 19' 50"	528251,3355451	860
Rancho La Aquituna	110° 42' 15"	30° 28' 22"	528396,3371212	950

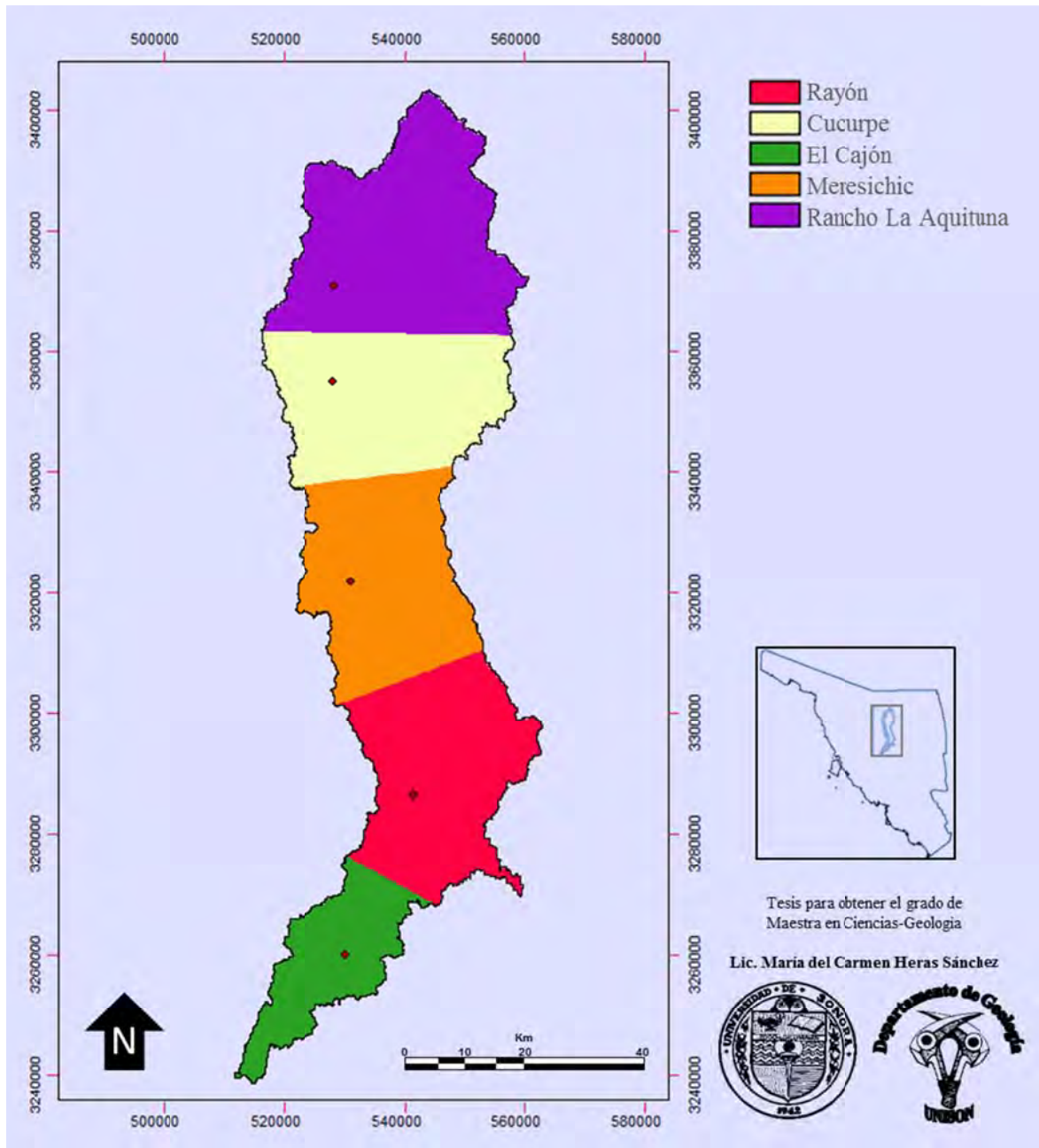


Figura 4.30. Polígonos de Thiessen de la cuenca del Río San Miguel, datos CONAGUA.

Sustituyendo las variables en la fórmula con los datos de precipitación promedio anualizada (PPA) y temperatura promedio anualizada (TPA), correspondientes a la cuenca del Río San Miguel para el periodo del 1994 al 1997:

$$ETR = \frac{461.42}{\sqrt{0.9 + \frac{461.42^2}{(300 + 25 * 20.74 + 0.05 * 20.74^3)^2}}} = 453.96 \text{ mm / año}$$

Como se puede observar, empleando el método anterior, se calcula una ETR del 98.38% en la cuenca del Río San Miguel, para el periodo de estudio, exclusivamente.

4.6 Mapa de zonas agroclimáticas de la cuenca del Río San Miguel

Se plantea crear un mapa de zonas agroclimáticas para la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México, con la finalidad de evaluar las zonas con el clima idóneo para varias alternativas de agricultura y reconocer la mayoría de los aspectos climáticos que afectan al crecimiento de las plantas, como son la humedad disponible, la temperatura, la precipitación y la evapotranspiración (Martínez, 2007). El mapa de zonas agroclimáticas está compuesto por una serie de píxeles con las características propias de distintas zonas agroclimáticas, según los criterios establecidos con base en las elevaciones del terreno, la precipitación, la temperatura y las elevaciones de las 5 estaciones climatológicas de la CONAGUA ubicadas en el área de estudio.

Para resolver el modelo ha sido necesario emplear el álgebra de mapas, que es una técnica que se emplea cuando se usan imágenes en formato ráster, como si fueran variables para llevar a cabo operaciones aritméticas con ellas, de tal manera que es posible realizar sumas, restas, y resolver ecuaciones que

involucran a una o un grupo de imágenes, las cuales deben tener las mismas referencias geográficas.

Para generar este modelo no se están considerando los factores de intensidad y duración de la precipitación, así como tampoco se contabilizan las temporadas de sequía y su variación anual, por la razón de que no se cuenta con los datos, de tal manera que, solo se puede considerar como una aproximación que provee información básica con propósitos de planeación regional.

Las zonas agroclimáticas fueron definidas por una combinación específica de zonas de temperatura y zonas de disponibilidad de humedad (SAGARPA-INIFAP, 2012), de tal manera que hubo que generar las imágenes con valores continuos que representara los mencionados fenómenos, tomando como base los registros de Temperatura Promedio Anual (TPA), Precipitación Promedio Anual (PPA), el MDE y las elevaciones de las estaciones climatológicas de la CONAGUA , además de la Evapotranspiración Real, calculada con el método de Turc explicado en el apartado 4.5 (ver tabla 4.9 y figura 4.31).

Tabla 4.9. Datos de las estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua, ubicadas en la cuenca del Río San Miguel y sus correspondientes registros de Precipitación Promedio Anualizada y Temperatura Promedio Anualizada y estimación de Evapotranspiración Real: periodo 1994-1997

No. Estación Climatológica	Nombre de la Estación Climatológica	Longitud	Latitud	UTM WGS84/12N	Altitud (msnm)	TPA (°C)	PPA (mm)	ETR (mm)
1	El Cajón	110° 41' 11"	29° 28' 20"	530406,3260347	390	21.85	407.89	410.17
2	Rayón	110° 34' 14"	29° 42' 38"	541539,3286790	560	22.26	471.82	468.99
3	Meresichic	110° 40' 30"	30° 01' 50"	531336,3322216	700	18.97	494.37	472.14
4	Cucurpe	110° 42' 22"	30° 19' 50"	528251,3355451	860	19.5	519.42	494.99
5	Rancho La Aquituna	110° 42' 15"	30° 28' 22"	528396,3371212	950	20.3	438.47	432.46

En la figura 4.32 se muestra la metodología empleada para generar los modelos y realizar tanto los cálculos entre las imágenes como la clasificación de las mismas, los cuales dan como resultado el mapa de zonas agroclimáticas.

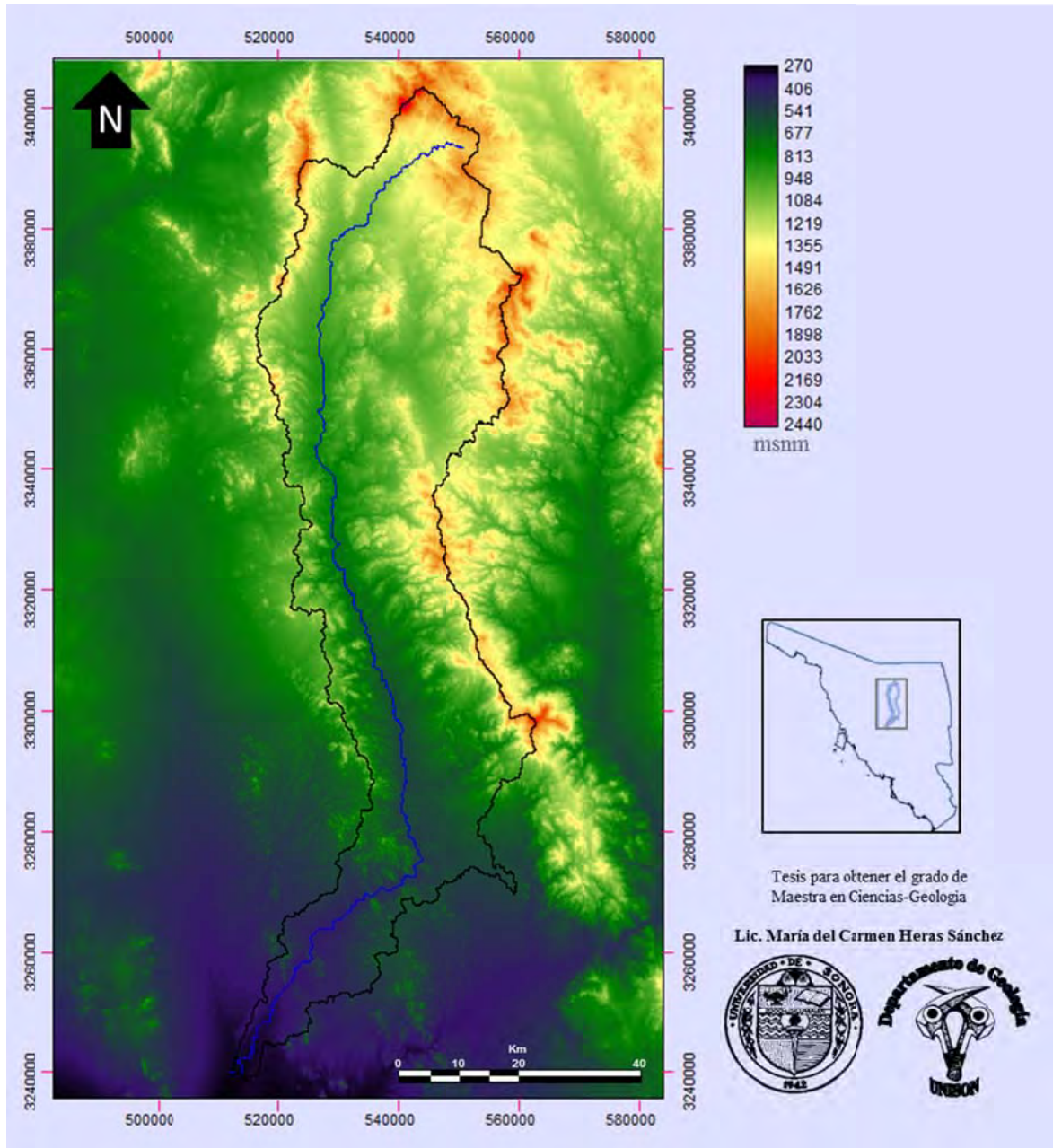


Figura 4.31. Modelo Digital de Elevación de la cuenca del Río San Miguel.

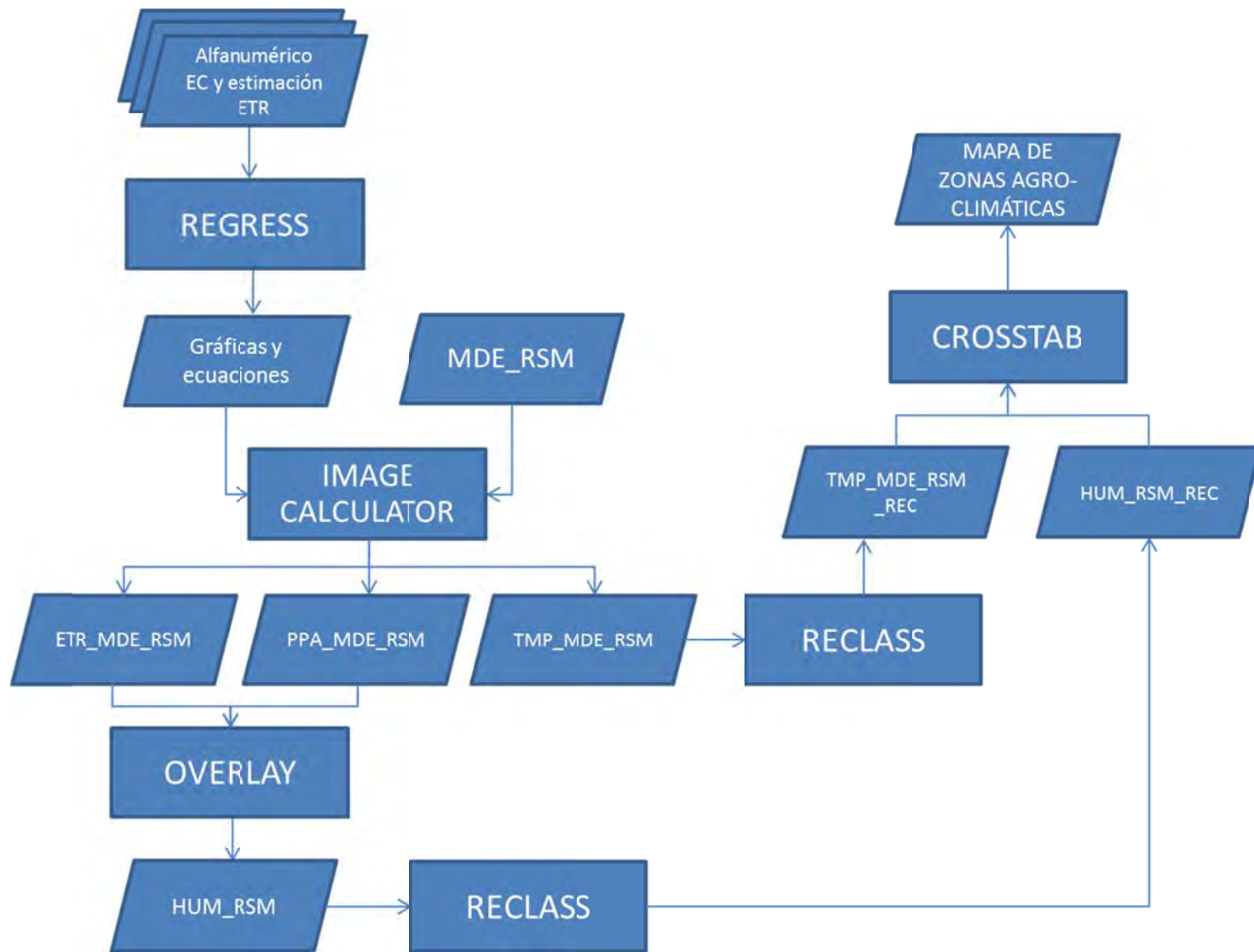


Figura 4.32. Diagrama de la metodología para generar el mapa de zonas agroclimáticas.

Modelo de T de la cuenca del Río San Miguel.

En la tabla 4.9, se puede observar una relación entre la TPA y la elevación de las EC, en la mayoría de los casos, a las elevaciones más altas, corresponden las temperaturas más bajas y a las elevaciones más bajas, corresponden las temperaturas más altas. Para conocer con exactitud las correspondencias entre las elevaciones y las temperaturas se aplica un análisis de regresión (Anderson, *et al.*, 2011), el cual es un método matemático que modela la relación entre una variable independiente (trazada en el eje de las X) y una variable dependiente (trazada en el eje de las Y), dando como resultado una ecuación matemática que expresa la mencionada relación. En otras palabras, para cualquier valor conocido de X, la ecuación calcula un valor para Y.

Para aplicar el método de análisis de regresión, se utiliza el subprograma REGRESS de Idrisi (Idrisi, 2008), considerando a Y para los valores de temperatura, los cuales dependen de X, que representan los valores de las elevaciones. En la figura 4.33 se muestra la gráfica de la relación resultante para X y Y, así como también la ecuación que define la relación.

La gráfica provee información muy importante, por un lado se observan a manera de puntos, las combinaciones entre T y la elevación de cada EC, por otro lado vemos la línea de tendencia de la regresión que representa el mejor ajuste entre los datos. Mientras más cerca se encuentre los puntos de la línea de tendencia, más fuerte es la relación entre los datos. Cabe mencionar que el coeficiente de correlación “r” muestra lo mismo numéricamente, para valores entre -1.0 y 0, existe una fuerte relación inversa o negativa, para el valor de 0, no existe una relación y para valores entre 0 y 1.0 existe una fuerte relación positiva (Pérez, 2009). De la misma manera, si la pendiente de la línea va de izquierda a derecha, indica una relación negativa entre los datos, de lo contrario, es una relación positiva. En este caso los datos de T y elevación tienen una relación inversa.

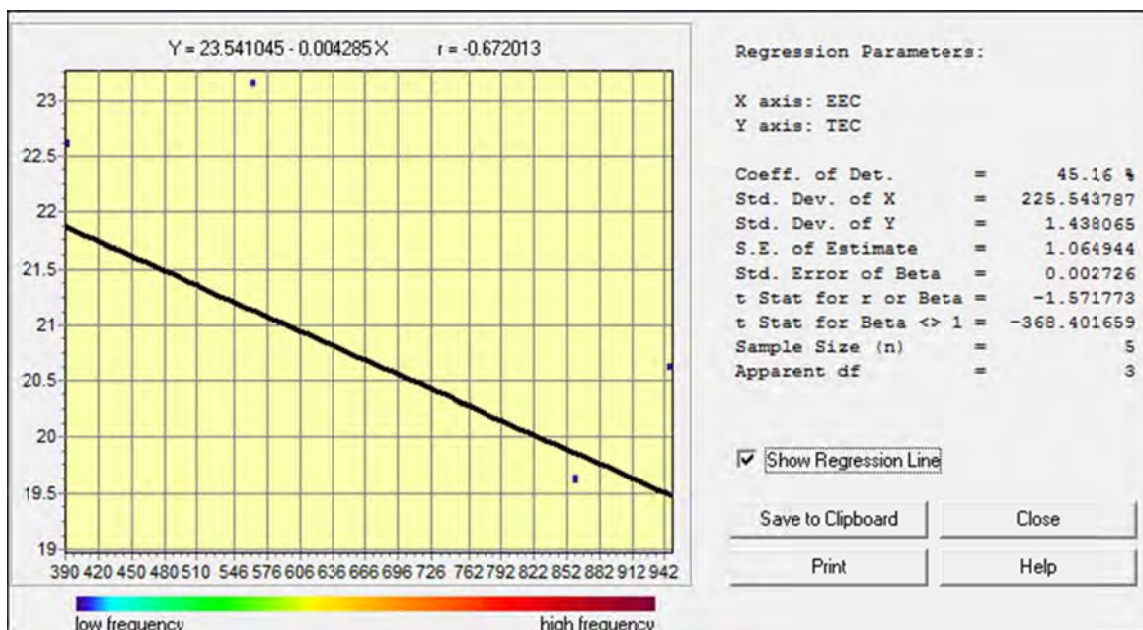


Figura 4.33. Gráfica del análisis de regresión entre TPA y el MDE y su respectiva ecuación.

La ecuación por sí misma es una expresión matemática de la línea:

$$Y = a + bx = 23.541045 - 0.004285X$$

Donde Y es la variable dependiente (T), a es la intersección con el eje de las Y, b es la pendiente que multiplica a X, que es la variable independiente (elevación).

Los cálculos que implica la ecuación anterior se aplica a cada píxel que contiene la imagen de elevaciones del terreno, utilizando el módulo de Idrisi llamado IMAGE CALCULATOR (Idrisi, 2008), dando como resultado, un modelo de temperaturas, donde se aprecia que las temperaturas más bajas se encuentran en las elevaciones más altas y viceversa (Figura 4.34).

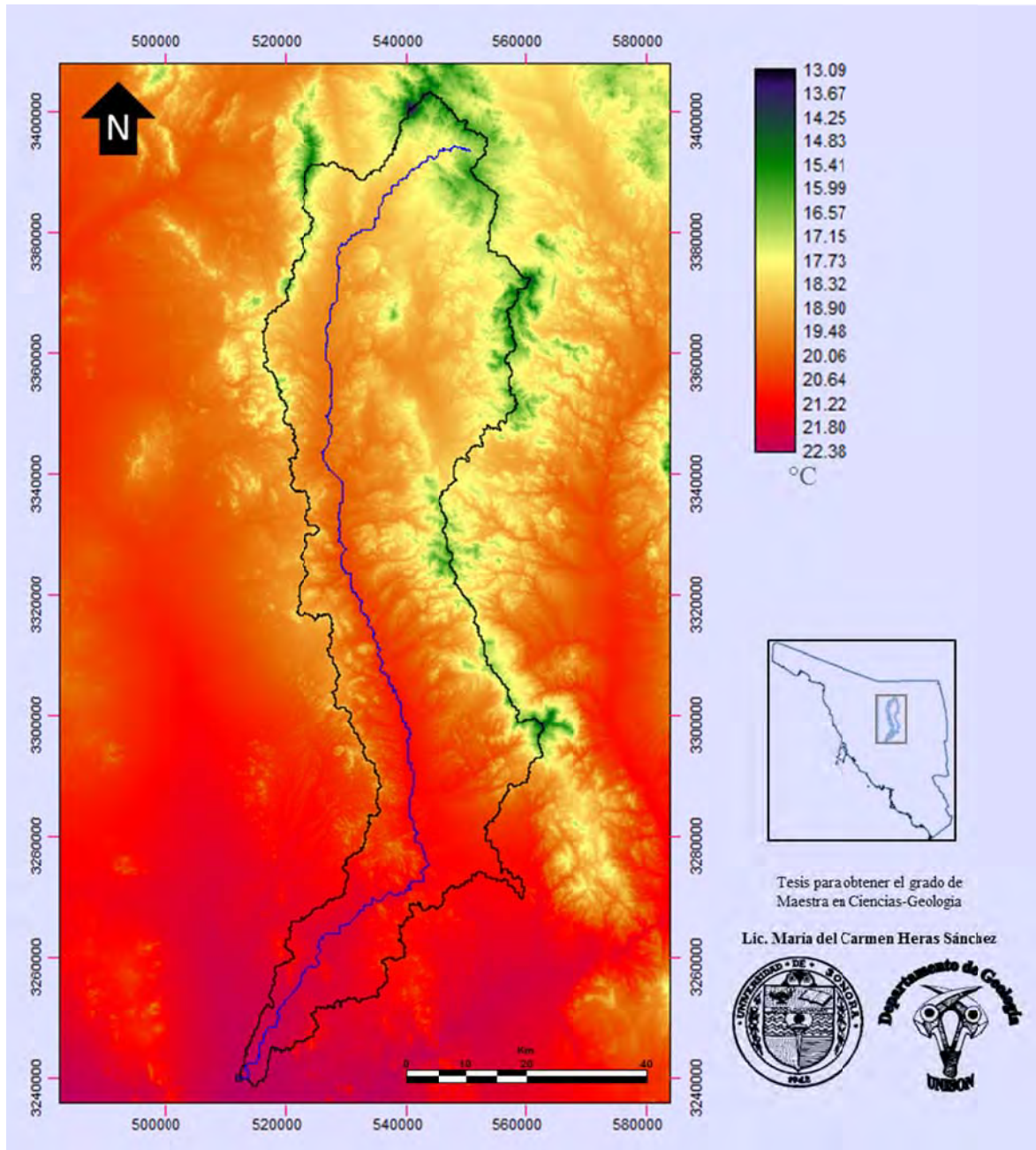


Figura 4.34. Modelo de TPA de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

Modelo de P de la cuenca del Río San Miguel

Para crear el modelo de precipitación, se repiten los procesos y operaciones realizadas anteriormente para crear el modelo de temperaturas.

De igual manera, para aplicar el método de análisis de regresión, se utilizó el subprograma REGRESS de Idrisi (Idrisi, 2008), considerando a Y para los valores de precipitación, los cuales dependen de X, que representan los valores de las elevaciones. En la figura 4.35 se muestra la gráfica de la relación resultante para X y Y, así como también la ecuación que define la relación.

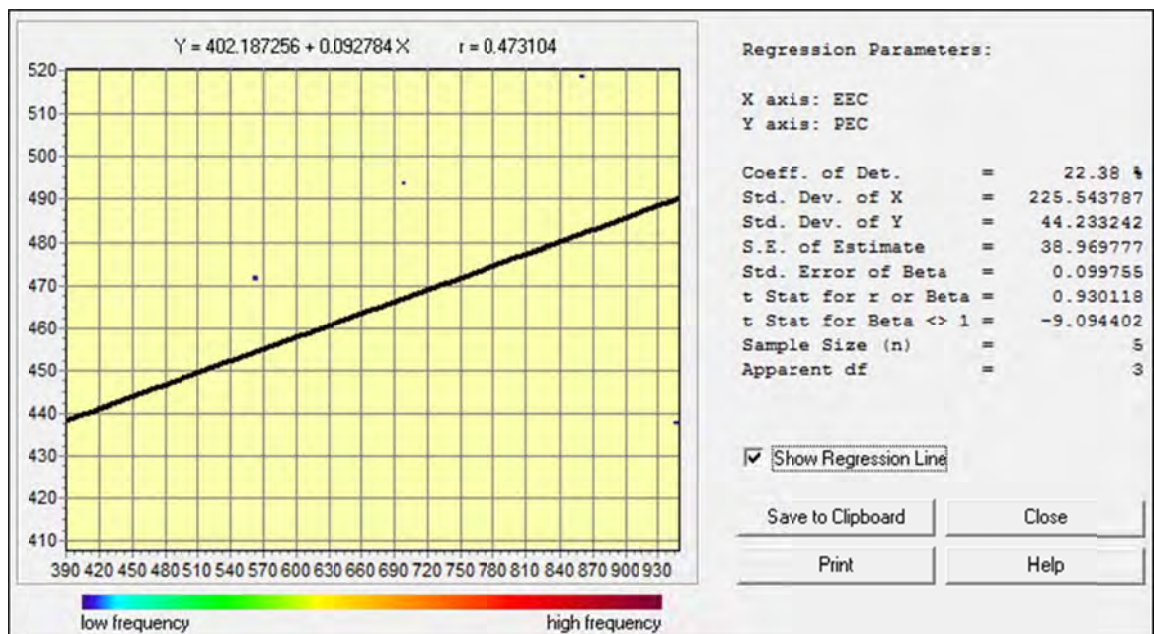


Figura 4.35. Gráfica del análisis de regresión entre PPA y el MDE y su respectiva ecuación.

La figura anterior provee información muy importante, por un lado se observan a manera de puntos, las combinaciones entre P y la elevación de cada EC, por otro lado vemos la línea de tendencia de la regresión que representa el mejor ajuste entre los datos. De manera similar que en la línea de regresión de T, mientras más cerca se encuentre los puntos de la línea de tendencia, más fuerte es la relación entre los datos. En este caso, el coeficiente de correlación “r” muestra

una relación positiva, lo cual indica que a mayores valores de elevación, corresponden mayores valores de precipitación.

De nuevo, la ecuación por sí misma es una expresión matemática de la línea:

$$Y = a + bx = 402.187256 + 0.092784X$$

Donde Y es la variable dependiente (P), a es la intersección con el eje de las Y, b es la pendiente que multiplica a X, que es la variable independiente (elevación). Nuevamente los cálculos que implica la ecuación anterior se aplica a cada píxel que contiene la imagen de elevaciones del terreno, utilizando el módulo de Idrisi llamado IMAGE CALCULATOR, dando como resultado, un modelo de precipitación, donde se aprecia que las precipitaciones más bajas se registran en las elevaciones más bajas y las precipitaciones más altas se registran en las elevaciones más altas (Figura 4.36).

Modelo de ETR de la cuenca del Río San Miguel

Para crear el modelo de evapotranspiración real, primero se estimaron los valores utilizando el Método de Turc para cada una de las estaciones climatológicas, después se repitieron los procesos y operaciones realizadas anteriormente para crear el modelo de temperaturas.

De nuevo, para aplicar el método de análisis de regresión, se utilizó el subprograma REGRESS de Idrisi (Idrisi, 2008), considerando a Y para los valores de ETR, los cuales dependen de X, que representan los valores de las elevaciones. En la figura 4.37 se muestra la gráfica de la relación resultante para X y Y, así como también la ecuación que define la relación.

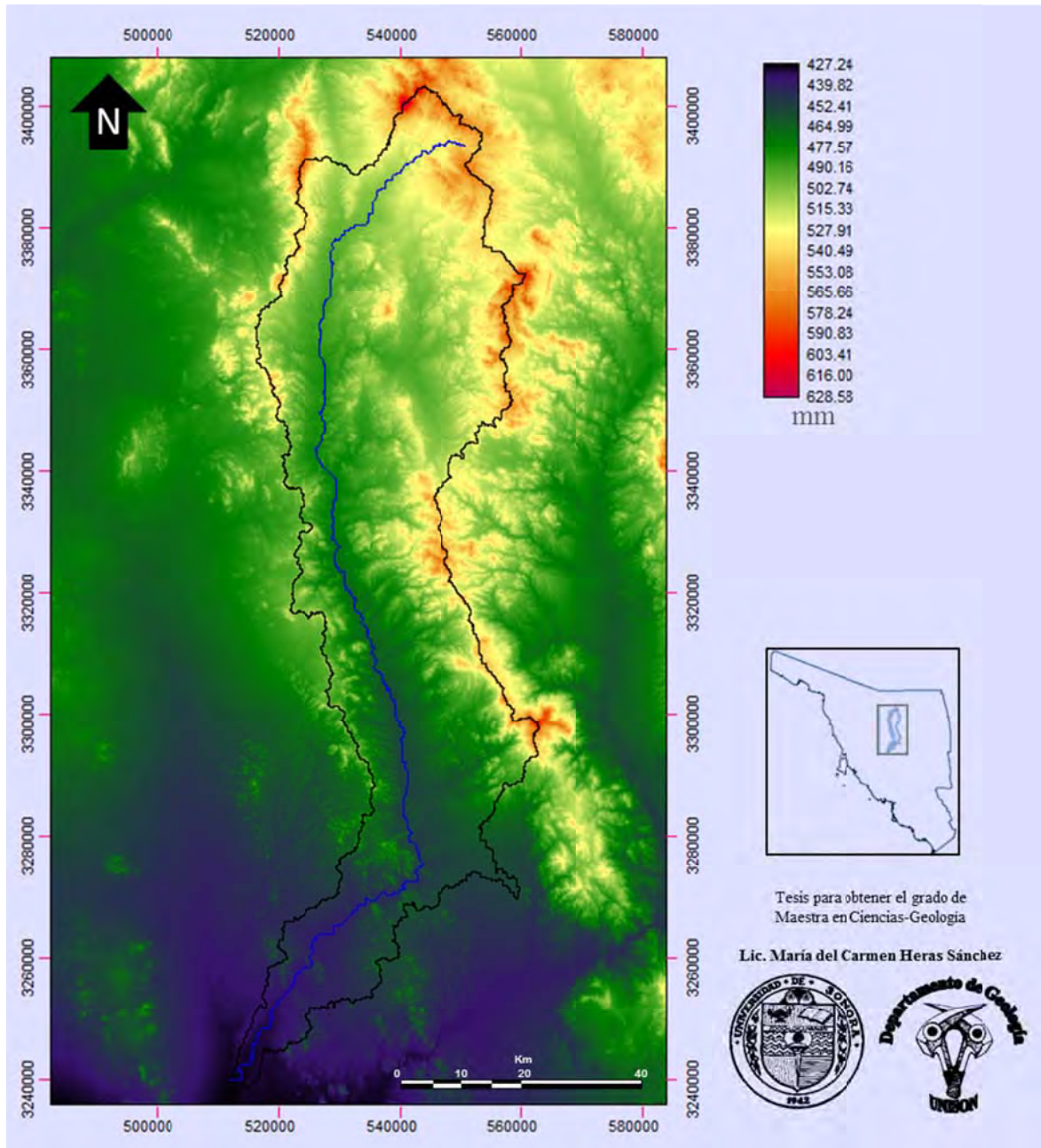


Figura 4.36. Modelo de PPA de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

La gráfica provee información muy importante, por un lado se observan a manera de puntos, las combinaciones entre ETR y la elevación de cada EC, por otro lado vemos la línea de tendencia de la regresión que representa el mejor ajuste entre los datos. De manera similar que en la línea de regresión de T, mientras más cerca se encuentre los puntos de la línea de tendencia, más fuerte es la relación entre los datos. De igual manera, el coeficiente de correlación “r” muestra una relación positiva, lo cual indica que a mayores valores de elevación, corresponden mayores valores de ETR.

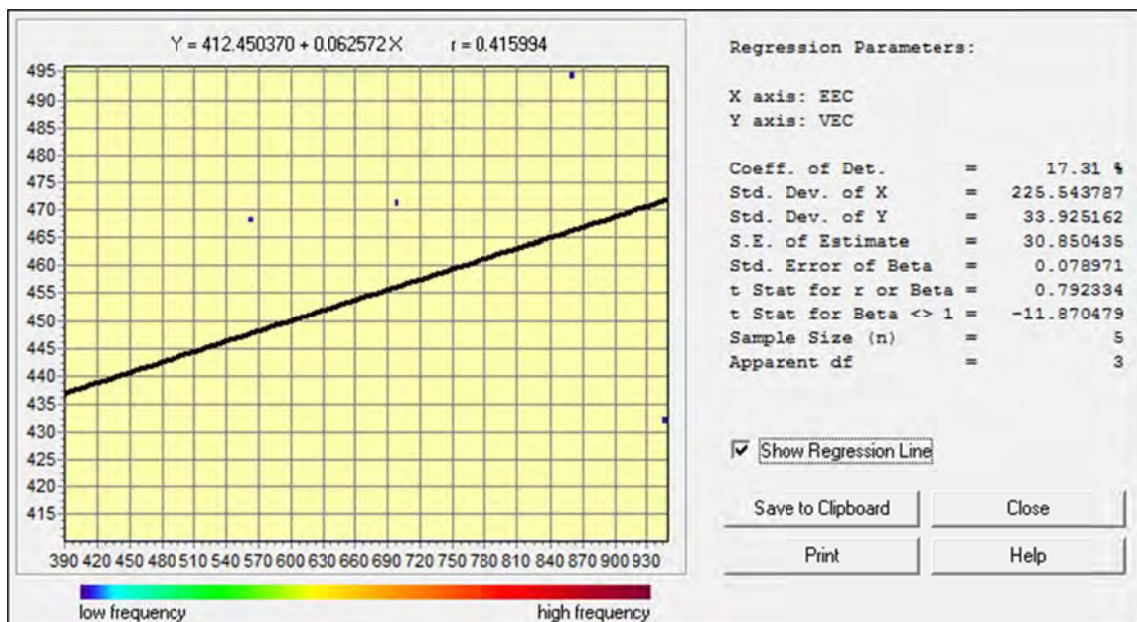


Figura 4.37. Gráfica del análisis de regresión entre ETR y el MDE y su respectiva ecuación.

De nuevo, la ecuación por sí misma es una expresión matemática de la línea:

$$Y = a + bx = 412.450370 + 0.062572X$$

Donde Y es la variable dependiente (ETR), a es la intersección con el eje de las Y, b es la pendiente que multiplica a X, que es la variable independiente (elevación).

Nuevamente los cálculos que implica la ecuación anterior se aplica a cada píxel que contiene la imagen de elevaciones del terreno, utilizando el módulo de Idrisi llamado IMAGE CALCULATOR, dando como resultado, un modelo de evapotranspiración, donde se aprecia que los valores de ETR más bajos se registran en las elevaciones más bajas y los valores de ETR más altos se registran en las elevaciones más altas (Figura 4.38).

Modelo de disponibilidad de humedad

Para generar el modelo de zonas agroclimáticas, además de los modelos de temperaturas, precipitación y evapotranspiración, se requiere un modelo de disponibilidad de humedad. La humedad disponible es un indicador del balance entre la Precipitación Promedio Anual (PPA) y la Evapotranspiración Potencial (ETR) y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Humedad} = \text{PPA}/\text{ETR}$$

Considerando la fórmula anterior se utiliza el módulo de Idrisi llamado OVERLAY (Idrisi, 2008), el cual genera una imagen a partir de los cálculos que se realizan con los valores de los píxeles de otras 2 imágenes, en este caso se utilizaron las imágenes de los modelos de precipitación y evapotranspiración, donde cada uno de los píxeles del primero, fue dividido entre el valor del píxel de igual ubicación geográfica del segundo y el resultado de la operación se almacenó en el píxel de la imagen resultante, el cual se convirtió en el modelo de humedad disponible, la expresión matemática de la operación fue:

$$\text{Humedad}(X_i, Y_j) = \text{PPA}(X_i, Y_j) / \text{ETR}(X_i, Y_j)$$

La imagen resultante contiene valores sin unidad, ya que se dividió la precipitación expresada en mm, entre la evapotranspiración, también expresada

en mm, donde los píxeles con valores igual a 1, indican un balance exacto entre los 2 parámetros implicados. Cuando los valores de los píxeles son mayores a 1 la PPA es mayor que la ETR indicando un balance positivo de humedad disponible, por lo contrario, cuando los valores de los píxeles son menores a 1, la ETR es mayor que la PPA, significando un balance negativo de disponibilidad de humedad (Figura 4.39).

Mapa de zonas agroclimáticas

Finalmente, para definir las zonas agroclimáticas se establecieron los rangos de los valores para cada clase de las zonas de Temperatura (T) y Humedad disponible (Hum) (Ver tablas 4.10 y 4.11), lo cual derivó en la generación de los modelos de las zonas correspondientes a ambos parámetros climáticos (Figura 4.40), a partir de los cuales se hicieron los cruces de datos utilizando el subprograma de Idrisi CROSSTAB (Idrisi, 2008), el cual hace una tabulación cruzada entre 2 imágenes con valores clasificados y genera como resultado una tercera imagen con las combinaciones posibles, remarcando las zonas agroclimáticas requeridas en el planteamiento del problema (Figura 4.41).

Tabla 4.10. Zonas de TPA y sus rangos de valores

No. de zona	Rango de TPA
1	12-13
2	14-15
3	16-17
4	18-19
5	20-21
6	22-23

Tabla 4.11. Zonas de disponibilidad de humedad y sus rangos de valores

No. de zona	Rango de disponibilidad de humedad
1	0.98-0.99
2	1
3	1.01-1.05
4	1.06-1.11

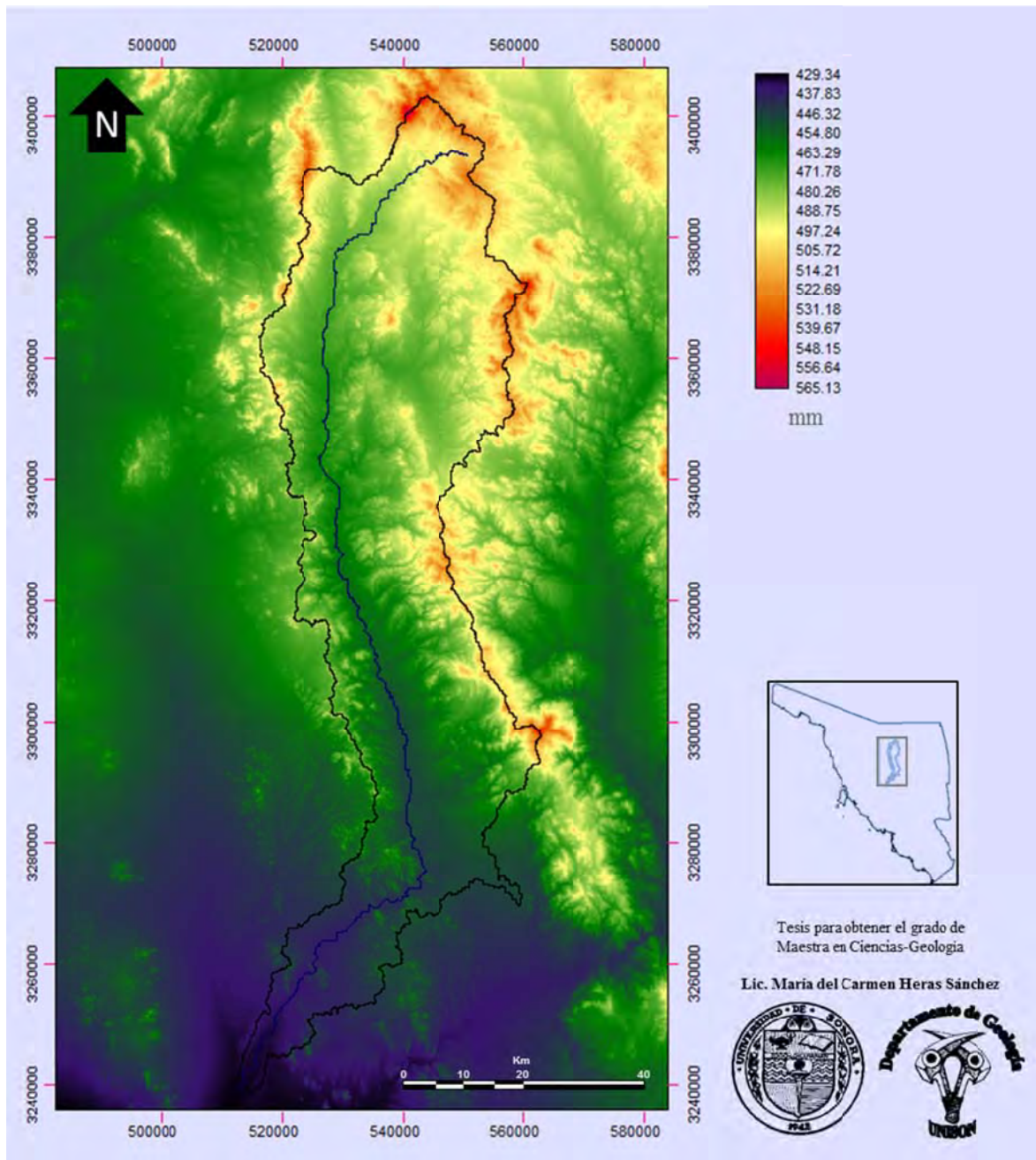


Figura 4.38. Modelo de ETR de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

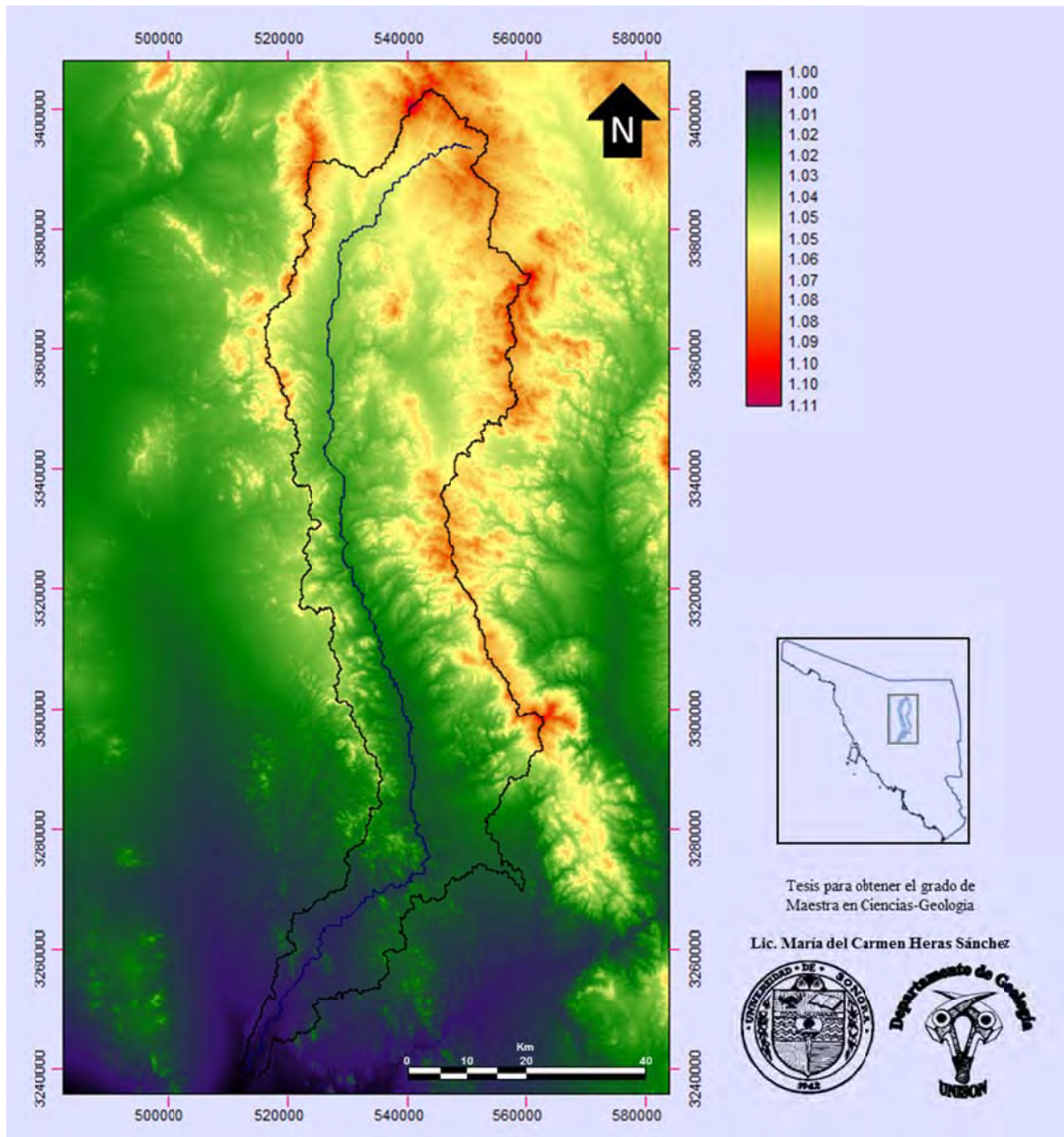


Figura 4.39. Modelo de disponibilidad de humedad de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

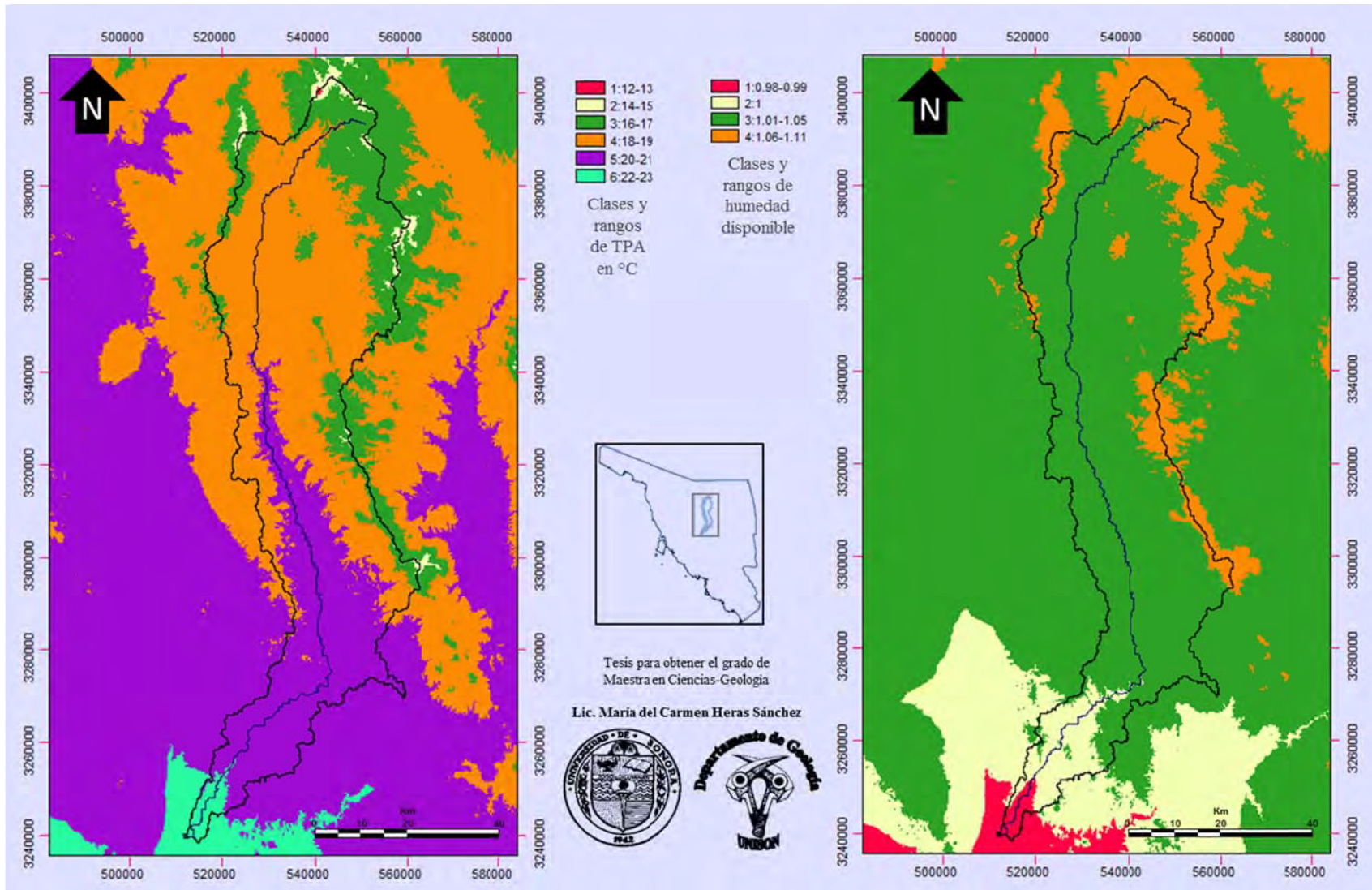


Figura 4.40. Zonas de TPA y disponibilidad de humedad de la Cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

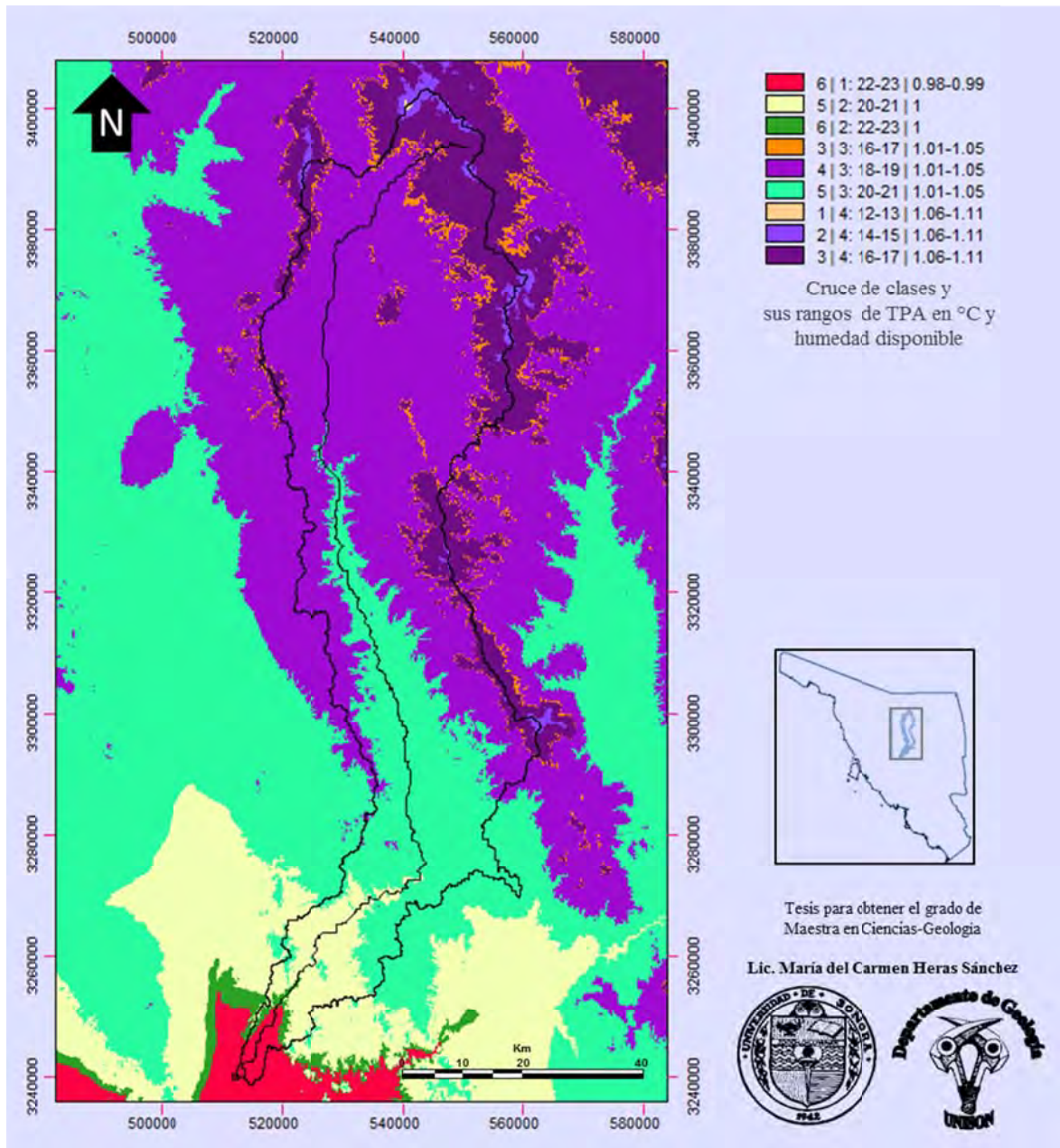


Figura 4.41. Mapa de zonas agroclimáticas de la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

5. Conclusiones y recomendaciones

La base de datos geográfica que se ha desarrollado constituye un elemento fundamental para desarrollar diversos estudios en la cuenca del Río San Miguel, Sonora, México. Los datos que contiene ofrecen la posibilidad de realizar análisis de tendencias del terreno, modelos de iluminación, series de tiempo con fenómenos temporales como los climatológicos, entre otros, que generarán nueva información temática que puede emplearse para el desarrollo de proyectos de Ingeniería, el reordenamiento territorial de los municipios de la región y en la toma de decisiones para la planificación y el uso de los recursos cuenca.

La metodología desarrollada, sienta las bases para desarrollar bases de datos geográficas en otras zonas del país en las que existe información similar. La flexibilidad de la metodología permite agregar datos temporales o permanentes a la base de datos con el fin de complementarla, de tal manera que la temática de la BDG se puede enriquecer tanto como se requiera.

Debido a que Idrisi realiza la mayor parte de las operaciones con datos en formato ráster, y aunque como se muestra en la tesis, es posible realizar ciertas operaciones con datos vectoriales, es recomendable desarrollar un programa informático de manejo de información de este tipo, con capacidad para almacenar y manipular datos alfanuméricos de precipitación, humedad de suelo, temperatura

del aire y suelo que se miden en la red de estaciones para estudios del monzón, que constituye la principal fuente de datos de la BDG y que año tras año genera grandes cantidades de información, lo que da lugar a una importante área de oportunidad para mejorar la base de datos geográfica de la cuenca de estudio.

La versatilidad de la estructura y el formato de los datos permite que la BDG pueda ser transportada a otras plataformas de manejo de información geográfica sin pérdidas de información.

Las imágenes de satélite de alta resolución espacial como las del sistema LANDSAT incorporadas en el sistema, en conjunto con la información de INEGI, abren la posibilidad de hacer estudios más precisos de vegetación, hidrografía, erosión e identificación de fallas geológicas, entre otros. También pueden incorporarse a la base de datos imágenes de alta resolución temporal como las del sensor MODIS de los sistemas satelitales TERRA y AQUA o de GOES y aprovechar los módulos de IDRISI de análisis de series de tiempo para realizar estudios de monitoreo o evaluación de cambio en vegetación o de movimiento de masas de aire húmedo y estimación o calibración de modelos de precipitación, respectivamente.

Bibliografía

- Anderson, D.R., Sweeney, D.J.,A y Williams, T.A. (2011). Estadística para negocios y economía, 11ª. ed. Ed. Cengage Learning. ISBN 13:978-0-324-78324-7.
- Ayuga, E., González, C., Velázquez, J. y Martín, S. (2007a) Recursos en Internet y ArcGis, herramientas para la enseñanza tutorizada de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en Ciencias Ambientales. Vol II. pp 1-5.
- Ayuga-Téllez, E., González-García, C.; Montero García-Andrade, M.J., García-García, A.I., Ramírez-Gómez, A. y García-Montero, L.G. (2007b). Estimación de la Evolución de Temperaturas Medias para Detectar Cambios en el Clima Español. IV Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental. Madrid: 25-27/4/2007. ISBN: 978-84-96437-73-9. Pp 313-319.
- Baldi, G., Noretto, M.D., Aragón, R., Aversa, F, Paruelo, J.M. y Jobbágy, E.G. (2008). Long-term satellite NDVI data sets: Evaluating their ability to detect Ecosystem Functional Changes in South America. *Sensors*. 8, 5397-5425.
- Bandyopadhyay, A., Bhadra, A., Swarnakar, R.K., Raghuwanshi, N. S., Singh, R. (2012). Estimation of reference evapotranspiration using a user-friendly decision support system: DSS ET. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 154-155, pp 19-29.

- Bonham-Carter y Graeme, F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon/Elsevier Science Publications. 398 pp.
- Buono, G., Oesterheld, M., Nakamatsu, V. y Paruelo, J.M. (2010). Spatial and temporal variation of primary production of Patagonian wet meadows. *Journal of Arid Environments* 74: 1257-1261.
- Burrough, Peter A. y McDonnell, Rachael A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. 333 pp.
- Campos, D. F. (2007). *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*. Editorial Universitaria Potosina. México. 440 pp.
- Cañada T., R.; Vidal D., M.J.; y Moreno J., A.(2010). Interpolación espacial y visualización cartográfica para el análisis de la justicia ambiental: ensayo metodológico sobre la contaminación por partículas atmosféricas en Madrid. In: Ojeda, J.; Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.). *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. p. 691-715.
- Chávez, M. I. Estrada, B. (2005). *Programación de una interfaz entre el modelo hidrológico CEQUEAU y el SIG ArcView*. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. 281 pp.
- Clark Labs (2012). Clark University, Massachuset, USA. <http://clarklabs.org/>
- CONAGUA, Organismo de Cuenca Noroeste (2009). *Disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (2625) Río San Miguel*.
- Cotler, H., (2010). *Las cuencas hidrográficas de México, diagnóstico y priorización*. Semarnat. ISBN 978-607-7655-07-7.
- Durant, A., Harrison, S.P., Maher, B., Balkanski, Y. (2008). The QUEST Working Group on Dust and the future of dust-cycle research. *News letter of the Climate Variability and Predictability Programme*, No. 45 vol. 13 No.2. pp 25-26.

- Farías de Reyes, C. M. y Reyes, J. (2001). Modelación de lluvia escorrentía usando Sistemas de Información Geográfica (SIG) en situaciones de información escasa. XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil – PUNO. Lima, Perú.
- Franco, R., Guerra-Cobián, V. H., Manzano-Solís, L. R., Quentin, E., Bâ, K. M. and Díaz-Delgado (2006). Extraction of Physiographic Parameters for a Distributed Hydrologic Model through the Implementation of a Geomatic Module. 7th International Conference on Hydroinformatics. Nice, Francia.
- Franco, R. (2008). Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos. Tesis de Doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México.
- García, Enriqueta (1973). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. 2a. ed, México, Instituto de Geografía, UNAM.
- Gómez-Albores, M. A., Díaz-Delgado, C., Baro-Suárez, J., Esteller-Albericht, M., Sánchez-Flores, O., Fabela-Estrada, A. (2012). Desarrollo de un módulo hidro-geomático para la estimación de costos de daños por inundación: aplicación en la cuenca Lerma-Chapala (México). La importancia de las Inundaciones en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en México, Capítulo I, pp. 235-257. ISBN 978-607-513-004-0. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Gutiérrez-Ruacho, O.G., Brito-Castillo, L., Díaz-Castro, S.C., and Watts, C.J. (2010). Trends in rainfall and extreme temperatures in northwestern Mexico. *Climate Research* 42:133-142.
- Hancock, G.R. (2005). The use of digital elevation models in the identification and characterization of catchments over differen grid scales. *Hydrological Processes*, Vol. 19. Pp 1727-1749.

- Hengl, T., S. Gruber and D. P. Shrestha (2004). Reduction of errors in digital terrain parameters used in soil–landscape modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, no. 5. pp. 97–112.
- Heras-Sánchez, M.C., Guzmán, D., Watts, C. y Saiz, J. A., (2011). Assessing a Digital Elevation Model's Resolution for a Geographic Database (GDB), for geoscience applications. *Proceeding of Latin American Conference on High Performance Computing 2011*, pp. 82-89. ISBN: 978-607-7912-17-0.
- Heras-Sánchez, M. C., Ochoa, J. A., Watts, C., Saiz, J. A., Rodríguez, J. C., Hazas-Izquierdo, R. G. y Gómez, M. A. (2012). Tridimensional-temporal-thematic hydroclimate modeling of distributed parameters for the San Miguel river basin. *ISUM2012 Conference Proceedings*. ISBN 978-84-939640-5-4.
- Howard, A. (2011). *Introducción al Álgebra Lineal*. Ed. Limusa. ISBN 978-607-05-290-3.
- Hutchinson, M. y J. Gallant (2000). Digital elevation models and representation of terrain shape, in *Terrain Analysis. Principles and Applications*. Ed. Wilson y Gallant, John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.
- Idrisi (2008). Idrisi Taiga Help System version 16.1.
- INEGI (2010). Red hidrográfica escala 1:50,000, ed. 2.0. Documento técnico descriptivo. http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/index.html#
- Jones, Christopher B. (1997). *Geographical Information Systems and Computer Cartography*. Addison Wesley Longman Limited, Edinburgh Gate, England. 319 pp.
- Katul, G. and Novick, K. (2009). Evapotranspiration. In: Gene E. Likens, (Editor) *Encyclopedia of Inland Waters*. Volume 1, pp. 661-667 Oxford: Elsevier.
- Liria, J. (2008). Sistemas de Información Geográfica y análisis espaciales: un método combinado para realizar estudios panbiográficos. *Revista Mexicana de Biodiversidad* No. 79: 281-284.

- Llamas, J. (1993). Hidrología general: Principios y aplicaciones. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. Bilbao. 635 pp.
- Martínez, J. L., Tijerina, L., Arteaga, R., Vázquez, M. A., Becerril-Román, A. E. (2007). Determinación de zonas agroclimáticas para la producción de mango (*Mangifera indica* L. "Manila") en Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas*, n.63, pp. 17-35. ISSN 0188-4611. Instituto de Geografía de la UNAM.
- Márquez, J. (2004). Modelos Digitales de Elevación, métodos de interpolación y parámetros de relieve. Tesis Doctoral del Departamento de Geología Física y Análisis Geográfico Regional de la Universidad de Sevilla. España. 594 pp.
- Olivera, F., Reed, S. and Maidment, D.R. (1998). HEC-PrePro v.2.0: An ArcView Pre-Processor for HEC's Hydrologic Modeling System. 1998 ESRI User's Conference, July 25-31, San Diego, California.
- Olivera, F. and Maidment, D. R. (1999). GIS tools for HMS Modeling Support. 1999 ESRI User's Conference. San Diego, California.
- Pereyra, D., Cruz, D. G., Pérez, J. A., (2011). La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* ISSN 0188-4611, Núm. 75, 2011, pp. 37-50.
- Pérez, C. (2009). Técnicas de análisis de datos con SPSS 15. Ed. Pearson Educación, S.A. ISBN 978-84-8322-601-8.
- Reem, D. (2011). The geometric stability of Voronoi diagrams with respect to small changes of the sites. *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on Computational Geometry (SoCG 2011)*, pp. 254–263. ISBN: 978-1-4503-0682-9.
- SAGARPA-INIFAP (2012). Zonificación agroclimática de Los Altos de Jalisco, México. Folleto técnico no. 1. ISBN 978-607-425-785-4. 59 pp.
- Sun, Y., Kang, S., Li, F., and Zhang, L. (2009). Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in

- the Minqin oasis of northwest China. *Environmental Modelling & Software*. v. 24, p. 1163-1170, 2009.
- Teegavarapu, R.S.V., Meskele, T., and Pathak, C. S. (2012). Geo-spatial grid-based transformations of precipitation estimates using spatial interpolation methods. *Computers & Geosciences*. v. 40, p. 28-39.
- Thompson, J. A., J. C. Bell and C. A. Butler (2001). Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma* no. 100. Pp. 67–89.
- Vargas, A., Santos, A., Cardenas, E.,y Obregón, N. (2011). Analysis of distribution and spatial interpolation of rainfall in Bogota, Colombia. *Dyna*. v. 78, n. 167, p. 151-159.
- Verón, S.R. y Paruelo, J.M. (2010). Desertification alters the response of vegetation to changes in precipitation. *Journal of Applied Ecology* 47: 1233–1241.
- Vivoni, E. R., Moreno, H.A., Mascar, G., Rodríguez, J.C., Watts, C.J., Garatuza-Payan, J., and Scott, R.L. (2008). Observed relation between evapotranspiration and soil moisture in the North American monsoon region. 35 L22403, *Geophysical Research Letters*.
- Vivoni, E.R., Rodríguez, J.C., and Watts, C.J. (2010). On the Spatiotemporal Variability of Soil Moisture and Evapotranspiration in a Mountainous Basin within the North American Monsoon Region. *Water Resources Research* 46, W20509.