

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

**VALORACIÓN DE LA RESPUESTA
HIDROLÓGICA DE LA CUENCA
DEL RÍO SAN MIGUEL, SONORA A
TRES PRODUCTOS DE
PRECIPITACIÓN.**

TESIS

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

PRESENTA:

JUAN ALEJANDRO SAIZ RODRÍGUEZ



Hermosillo, Sonora, Junio de 2016

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

F01

Hermosillo, Sonora, a 10 de Marzo de 2016

Dr. Jesús Vidal Solano
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:

"VALORACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN MIGUEL, SONORA A TRES PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN"

Esto es con el fin de que el alumno: **JUAN ALEJANDRO SAIZ RODRÍGUEZ**, 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. Christopher Watts Thorp

Director de Tesis



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



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

Departamento de Geología División de Ciencias Exactas y Naturales

Hermosillo, Sonora a 21 de abril de 2016

Dr. Christopher Watts Thorp
Director de Tesis

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

"VALORACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN MIGUEL, SONORA A TRES PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN"

Esto, con el fin de que el alumno: **SAIZ RODRIGUEZ JUAN ALEJANDRO** pueda presentar su examen profesional, para la obtención del título de Grado. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

M.I. Eva Lourdes Vega Granillo	Presidente
M.C. José Alfredo Ochoa Granillo	Secretario
Dr. Julio Cesar Rodríguez	Vocal
Dr. Christopher Watts Thorp	Vocal

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente



Dr. Jesus Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología

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



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

F06

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

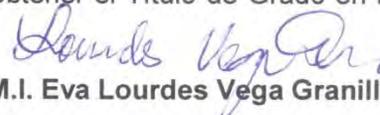
NOMBRE DE LA TESIS:

"VALORACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN MIGUEL, SONORA A TRES PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN"

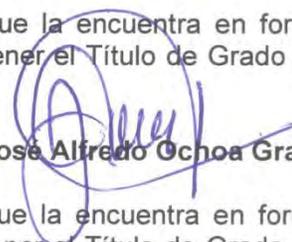
NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

JUAN ALEJANDRO SAIZ RODRÍGUEZ

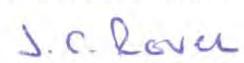
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


M.I. Eva Lourdes Vega Granillo

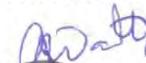
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


M.C. José Alfredo Ochoa Granillo

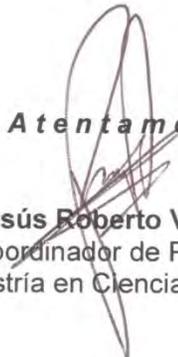
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. Julio César Rodríguez

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

Atentamente


Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

F07

Hermosillo, Sonora, a 13 de junio de 2016

Dr. Jesús Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que después de revisar y aprobar el trabajo de tesis del alumno **JUAN ALEJANDRO SAIZ RODRÍGUEZ**, hemos acordado que la presentación del examen de grado del alumno se lleve a cabo el día jueves 23 de junio del presente a las 17:00 horas.

Sin otro particular, quedamos a la espera de su respuesta.

ATENTAMENTE
Comité de Tesis

M.I. Eva Lourdes Vega Granillo

M.C. José Alfredo Ochoa Granillo

Dr. Julio César Rodríguez

Dr. Christopher Watts Thorp
Director de Tesis

C.c.p. Archivo





"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA F08

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

Hermosillo, Sonora a 15 de junio de 2016

Dr. Christopher Watts Thorp
Director de Tesis

Por este conducto y en atención a la solicitud recibida el día de hoy, le comunico que ha sido aprobada la fecha para la presentación de Examen de Grado del alumno **JUAN ALEJANDRO SAIZ RODRÍGUEZ** propuesta por el Comité de Tesis.

Dicho examen se llevará a cabo el día **jueves 23 de junio del presente a las 17:00 horas en el Aula Ing. Víctor Manuel Martínez Montaña** del Departamento de Ingeniería Civil y Minas.

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente



Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología

C.c.p. Archivo



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

Dedicatoria

A mis compañeros de estudios y amigos, por todos los gratos momentos que hemos pasado juntos y por la comprensión de todos los que, por estar inmerso en este apasionante proyecto, no pude compartir con ustedes.

A Maria Guadalupe Gamez López, una dedicatoria especial, por creer siempre en mí y por estar conmigo desde el inicio hasta la culminación de esta tesis. Tu inteligencia, fortaleza, constancia, amor y pasión con que haces que todo sea un gran logro en tu vida, han sido el pilar de la mía, por lo que nunca encontraré las palabras con las que pueda expresarte todo mi agradecimiento.

A mis padres y hermanos, los fuertes guerreros que luchan con todo en cada batalla de la vida y que son siempre mi fuente de inspiración para seguir adelante, sin importar los problemas que se tengan que enfrentar. En especial para ti, Carlos Armando, por todo lo que me enseñaste con tu valentía, tu fuerza, tu singular sentido del humor y tu sonrisa sin igual, con la que podías cambiar nuestro mundo en un instante, aún en momentos difíciles...en donde quiera que estés, te dedico mi esfuerzo y trabajo con todo mi cariño.

Agradecimientos

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por su voto de confianza y el apoyo que me otorgó del 22/08/2011 al 6/8/2013 y que hizo posible este gran logro en mi vida con registro CVU: 411724

A directivos y profesores del **Departamento de Geología y de la Maestría en Ciencias en Geología de la Universidad de Sonora**, por brindarme la oportunidad de ampliar mis conocimientos y su apoyo durante este proceso.

Al **Dr. Christopher Watts**, mi maestro y gran ejemplo a seguir. Gracias por dirigirme en esta tesis. Su tiempo, sugerencias y asesorías, así como sus acertadas observaciones, hicieron posible este logro académico.

A la **M. I. Eva Lourdes Vega Granillo**, por su tutoría, revisión, ayuda y paciencia en la realización de esta tesis. Sus valiosas ideas fueron una importante aportación a este trabajo.

Al **Dr. Julio César Rodríguez**, por compartir conmigo sus valiosos conocimientos, tanto teóricos como los aplicados en campo. Sus invaluable observaciones en la recopilación y manejo de los datos fueron de gran relevancia para la elaboración de esta tesis.

Al **Dr. Agustín Robles Morúa**, por sus acertados consejos y aportaciones para la elaboración del modelos hidrológicos y las bases de datos.

Al **Dr. Enrique Vivoni**, por todo su apoyo y por darme la oportunidad de apreciar la Ciencia de la Hidrología de tan cerca en los interesantes e importantes proyectos de investigación en los que me invitó a participar.

A la **cDra. Alejandra Castro Valencia**, por sus importantes asesorías en Sistemas en Información Geográfica. Gracias también por brindarme su amistad.

Al **Ing. Sergio Román Cárdenas Alvarado**, por su apoyo y amistad.

Al **Dr. Juan Arcadio Saiz Hernández**, por su ayuda, guía y sugerencias brindadas en todo momento como mi maestro y padre, que han sido un gran apoyo para llevar a buen término este proyecto académico y mi vida misma.

Resumen

Se utilizó el sistema informático *Herramienta para evaluación de agua y suelo* (SWAT) que se ejecuta bajo la plataforma *Evaluación Automática Geoespacial de Cuencas* (AGWA 3.0) en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.1 para elaborar un modelo hidrológico de la Cuenca del Río San Miguel, Sonora que se alimentó con tres productos de precipitación: 1) Precipitación diaria de estaciones climatológicas del *Servicio Meteorológico Nacional*, 2) Registros de lluvia de la *red pluviográfica de la Universidad de Sonora* y 3) Estimaciones de precipitación diaria del *Sistema satelital Misión de Medida de lluvias tropicales* (TRMM). Los resultados de la modelación obtenidos con cada uno de los productos, se compararon con los obtenidos de estudios previos en la cuenca, en los que se utilizaron datos de lluvia de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional y metodologías convencionales para estimar los parámetros hidroclimáticos de referencia. Los resultados indican que la modelación realizada con los datos de la red de pluviógrafos de la UNISON es la que representa con mayor precisión el comportamiento hidrológico de la cuenca. También se concluye que los resultados obtenidos con los datos de precipitación diaria de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional, a pesar de la baja densidad de la red de medida, son aceptables y que los obtenidos con los datos del sistema satelital TRMM, son los que más se aproximan a los obtenidos con la red de pluviógrafos y además constituyen una importante fuente de datos de precipitación, asequible de manera gratuita para los usuarios, lo que los convierte en una opción confiable para estudiar cuencas en zonas con baja disponibilidad de información.

Abstract

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) running under the ArcGis extension Automatic Geospatial Watershed Assessment (AGWA 3.0) was used to develop a hydrological model from the Rio San Miguel Basin, Sonora, which was fed with three precipitation products: 1) Daily rainfall of weather stations of the National Weather Service, 2) Rain records from the gauge network of the University of Sonora and 3) Estimates of daily precipitation from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). The modeling results obtained with each of the products were compared with those obtained from previous studies in the basin, where rainfall data of stations of the National Weather Service and conventional methodologies for estimating hydroclimatic parameters were used. The results indicate that the modeling performed with the data network pluviographs of UNISON is what more accurately represents the hydrological behavior of the basin. It is also concluded that the results obtained with daily precipitation data of the stations of the National Weather Service, despite the low density of the measurement network, are acceptable and those obtained with data from TRMM satellite system are closest to those obtained with the network of rain gauges, which became an important source of precipitation data, available for users for free, which makes them a reliable choice to study watersheds in areas with low availability of information.

Índice

Dedicatoria.....	I
Agradecimientos.....	II
Resumen.....	III
Abstract.....	IV
I. Introducción.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
1.2 Justificación.....	3
II. Revisión de literatura.....	4
2.1 Generalidades.....	4
2.2 Conceptos básicos.....	4
2.3 Modelos hidrológicos.....	7
2.3.1 Tipos de modelos hidrológicos.....	7
2.3.2 El modelo SWAT.....	8
2.3.3 El Modelo AGWA.....	11
2.3.4 Aplicaciones.....	12
2.4 Precipitación.....	14
2.4.1 Medida de la precipitación.....	15
2.4.2 El sistema TRMM.....	21
2.5 Estudios en la Cuenca del Río San Miguel.....	23
III. Materiales y métodos.....	27
3.1 El sitio de estudio.....	27
3.1.1 Área y perímetro de la cuenca.....	29

3.1.2	Actividad socio-económica	29
3.1.3	Clima	31
3.1.4	Vegetación.....	32
3.2	Precipitación	48
3.3	Marco geológico y suelos	49
3.4	Estratigrafía.....	49
3.5	Formación de la cuenca	51
3.6	Materiales, información y equipo utilizado	53
3.6.1	Cartografía digital.....	53
3.6.2	Datos de precipitación	54
3.6.3	Datos satelitales	54
3.6.4	Equipo de informática	54
3.6.5	Equipo de campo	55
3.7	Procedimiento de modelación.....	55
3.8	Instalación de la extensión AGWA	57
3.8.1	Estructura de carpetas y archivos	57
3.8.2	Selección de la herramienta de modelación	59
3.8.3	Fuentes de datos crudos.....	59
3.8.4	Habilitación de los datos	67
3.8.5	Almacenamiento de los datos.....	77
3.8.6	Corridas preliminares del modelo.....	78
3.8.7	Proceso de modelación.....	79
IV.	Resultados y discusión	91
4.1	Productos de precipitación.....	91
4.2	Análisis de precipitación mensual	92

4.3	Distribución espacial de la precipitación media en la cuenca.....	94
4.4	Evapotranspiración	97
4.5	Percolación.....	99
4.6	Escurrimiento superficial.....	102
4.7	Pérdida por transmisión	104
4.8	Producción de agua	106
4.9	Producción de sedimentos	108
4.10	Descarga de canales	111
4.11	Comparación con otros estudios	113
V.	Conclusiones	115
5.1	Investigación futura	116
V.	Bibliografía	118
VI.	Anexos	123

Índice de Figuras

<i>Figura 1.</i> Ubicación de pluviómetros de estación climatológica del SMN.....	16
<i>Figura 2.</i> Pluviógrafos TE525WS y balancín.	17
<i>Figura 3.</i> Red de pluviógrafos UNISON.	18
<i>Figura 4.</i> Interfaz para la visualización y el análisis de la TRMM cada 3 horas.....	22
<i>Figura 5.</i> Sensores del Sistema Terra y su área de detección en la Tierra.	23
<i>Figura 6.</i> Localización de la cuenca del Río San Miguel, Sonora.	28
<i>Figura 7.</i> Municipios.....	30
<i>Figura 8.</i> Clima (Fuente: INEGI).....	31
<i>Figura 9.</i> Vegetación en la cuenca del Río San Miguel, Sonora.	33
<i>Figura 10.</i> Estado de la vegetación antes del Monzón de Norteamérica.	34
<i>Figura 11.</i> Cambios en la vegetación en la temporada de lluvias de verano.	34
<i>Figura 12.</i> Vegetación típica a altitudes menores a 1000 msnm.	35
<i>Figura 13.</i> Vegetación típica a altitudes mayores a 1000 msnm.	35
<i>Figura 14.</i> El árbol de ocotillo es abundante en la cuenca del río San Miguel.....	37
<i>Figura 15.</i> La acacia cochliacantha es abundante en la cuenca.	37
<i>Figura 16.</i> <i>Guaiacum coulteri</i> o guayacán, en la parte baja y media de la cuenca.	38
<i>Figura 17.</i> La pitahaya se encuentra en la parte baja y media de la cuenca.....	39
<i>Figura 18.</i> El palo verde es abundante en la parte baja de la cuenca.	40
<i>Figura 19.</i> El mezquite es abundante en la parte baja y media de la cuenca.	41
<i>Figura 20.</i> El sahuaro típico en la cuenca.	42
<i>Figura 21.</i> El ocotillo se encuentra en la parte baja y media de la cuenca.....	43
<i>Figura 22.</i> La cabeza de viejo se puede localizar en la zona más árida de la cuenca.	43
<i>Figura 23.</i> El nopal se encuentra en la parte baja y media de la cuenca.	44

<i>Figura 24.</i> La choya tiene presencia en la parte baja y media de la cuenca y en gran parte del estado de Sonora.	45
<i>Figura 25.</i> Bosque de encino y pastizal.	46
<i>Figura 26.</i> Acacia willardiana o Palo blanco se encuentra en la parte de la Cuenca y su principal característica es el color blanco de su tronco.	47
<i>Figura 27.</i> La vegetación en la cuenca es un recurso invaluable, aprovechado para actividades económicas que soportan el desarrollo de la región.	47
<i>Figura 28.</i> Río San Miguel, en la parte media baja de la cuenca.	48
<i>Figura 29.</i> Metodología para la modelación hidrológica de la cuenca de estudio.	56
<i>Figura 30.</i> Barra de herramientas de AGWA.....	57
<i>Figura 31.</i> Estructura de carpetas del modelo.	58
<i>Figura 32.</i> Datos de precipitación de la estación climatológica Rayón, Sonora.....	62
<i>Figura 33.</i> Datos de precipitación de las estaciones operadas por UNISON.....	63
<i>Figura 34.</i> Portal de acceso para la descarga de datos de TRMM.	64
<i>Figura 35.</i> Opciones para la descarga de datos de TRMM.	65
<i>Figura 36.</i> Información requerida para la descarga de datos.	65
<i>Figura 37.</i> Área de la que se descargarán datos que comprende el sitio de estudio.	66
<i>Figura 38.</i> Opciones de formatos de descarga de la información de TRMM.	66
<i>Figura 39.</i> Píxeles de TRMM en los que se estimó la precipitación.....	67
<i>Figura 40.</i> Modelo digital de elevación y Fill Grid.	68
<i>Figura 41.</i> Tabla de atributos del Modelo digital de elevaciones del sitio de estudio.	69
<i>Figura 42.</i> Tipo de suelo.	71
<i>Figura 43.</i> Ubicación de las estaciones UNISON.....	72
<i>Figura 44.</i> Estructura de los datos de precipitación requerida en AGWA.....	73
<i>Figura 45.</i> Archivo de ubicación de estaciones.	74
<i>Figura 46.</i> Adaptación de datos TRMM.	75

<i>Figura 47.</i> Precipitación TRMM de enero (1) a diciembre (12) de 2005.	76
<i>Figura 48.</i> Carpetas de trabajo.	78
<i>Figura 49.</i> Herramientas de AGWA para el proceso de modelación.	79
<i>Figura 50.</i> Ventana de delineación de la cuenca.	80
<i>Figura 51.</i> Proceso de delineación de la cuenca.	81
<i>Figura 52.</i> Parteaguas de la cuenca del Río San Miguel, Sonora	82
<i>Figura 53.</i> Ventana de discretización.	83
<i>Figura 54.</i> Subcuencas y flujo con diferentes valores de CSA.	84
<i>Figura 55.</i> Uso de suelo.	85
<i>Figura 56.</i> Tipo de suelo.	86
<i>Figura 57.</i> Archivo de estaciones de la red de pluviógrafos UNISON.	87
<i>Figura 58.</i> Polígonos de Thiessen.	89
<i>Figura 59.</i> Periodo de modelación.	90
<i>Figura 60.</i> Comparación de los valores mensuales de precipitación de los tres productos. 93	
<i>Figura 61.</i> Distribución de la precipitación en la cuenca del Río San Miguel obtenida por AGWA con los tres productos.	96
<i>Figura 62.</i> Distribución de la evapotranspiración.	98
<i>Figura 63.</i> Distribución de la percolación.	100
<i>Figura 64.</i> Distribución del escurrimiento superficial.	103
<i>Figura 65.</i> Distribución de la pérdida de transmisión.	105
<i>Figura 66.</i> Distribución de la producción de agua.	107
<i>Figura 67.</i> Distribución de la producción de sedimentos.	109
<i>Figura 68.</i> Distribución de la descarga de canales.	112

Índice de Tablas

<i>Tabla 1.</i> Productos de Agua de la NASA (NASA, 2011).	19
<i>Tabla 2.</i> Instrumentación y productos de satélites de la NASA (NASA,2010).	20
<i>Tabla 3.</i> Datos primarios de entrada al modelo AGWA.	60
<i>Tabla 4.</i> Resumen de sensor TRMM de precipitación.	63
<i>Tabla 5.</i> Clasificación de cobertura de suelo.	70
<i>Tabla 6.</i> Clasificación de tipo de suelo.....	72
<i>Tabla 7.</i> Datos primarios de entrada al modelo AGWA.	77
<i>Tabla 8.</i> Comparación de descarga en canales de la cuenca	111
<i>Tabla 9.</i> Comparación de resultados con estudios previos.....	113
<i>Tabla 10.</i> Diferencia en resultados de la modelación con datos del SMN con relación a estudios previos en la cuenca del Río San Miguel	113
<i>Tabla 11.</i> Diferencia en resultados de la modelación con datos de red UNISON con relación a estudios previos en la cuenca del Río San Miguel	114
<i>Tabla 12.</i> Diferencia en resultados de la modelación con datos de TRMM con relación a estudios previos en la cuenca del Río San Miguel	114

I. Introducción

1.1 Generalidades

La Cuenca del Río San Miguel, es una de las subcuencas principales del Río Sonora, que aloja a más de 12,000 habitantes, distribuidos principalmente en los municipios de San Miguel de Horcasitas, Rayón, Opodepe y Cucurpe y que provee el agua y demás recursos naturales que soportan las actividades agrícolas, ganaderas, mineras y de servicios que constituyen el soporte económico de la región.

Desde el año 2004, debido a su estratégica localización en la zona de transición entre la llanura sonorense y la Sierra Madre Occidental, la cuenca ha sido objeto de estudio de grupos de investigadores nacionales y extranjeros e instrumentada con sensores de precipitación, humedad y temperatura de suelo, así como con torres micrometeorológicas, con lo que se han hecho aportaciones científicas, incrementado el conocimiento de los procesos hidrológicos de la región. A la fecha, la instrumentación se sigue mejorando en cantidad y calidad, así como en los procedimientos de análisis, incorporando tecnología de teledetección y modelos hidrológicos avanzados, convirtiendo a la Cuenca del Río San Miguel en uno de los sitios de mayor importancia para el estudio del Monzón de Norteamérica, fenómeno que provee la mayor cantidad de precipitación en el noroeste de México y el suroeste de los Estados Unidos de América.

La precipitación, la variable de entrada al sistema hidrológico de mayor relevancia, se mide desde hace varias décadas, dentro de la vertiente y sus inmediaciones, en seis estaciones climatológicas operadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que ofrece al usuario láminas de precipitación registradas con pluviómetros; además, desde 2004, se tienen

láminas de precipitación horaria obtenidas con una red de pluviógrafos de balancín operada por la Universidad de Sonora (UNISON). Asimismo, la región queda comprendida en la banda de detección del sistema Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) diseñado para estudios de la precipitación, el tiempo atmosférico y el clima, con lo que se tienen estimaciones en formato ráster de la precipitación en píxeles de 27.83 km (0.25° x 0.25°).

En esta tesis, se construye un modelo con el sistema de Evaluación Automatizada Geoespacial de Cuencas (AGWA, por sus siglas en inglés) utilizando información cartográfica de INEGI adaptada a los requerimientos del modelo y se evalúa la respuesta del proceso de simulación a cada uno de los productos de precipitación disponibles en la zona de estudio con los que se alimenta al modelo.

Para el desarrollo de la tesis, se parte de la premisa de que en el país existen zonas con poca disponibilidad de información climatológica, en las que sólo se cuenta con los datos obtenidos de las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que son una fuente confiable de datos de precipitación y otros parámetros climáticos; sin embargo, las redes de medición no son muy densas y no ofrecen suficiente información sobre la distribución espacial y temporal de la precipitación, por lo que la estimación de esta variable con técnicas de percepción remota es una buena solución para contar con datos de entrada con una adecuada cobertura temporal y espacial al modelo SWAT-AGWA.

1.1.1 Objetivo general

Valorar la respuesta hidrológica de la Cuenca del Río San Miguel, Sonora ante la entrada de lluvia espacialmente distribuida derivada de estaciones climatológicas operadas por el SMN, la red de pluviógrafos de la UNISON y estimaciones de precipitación obtenidas con el sistema satelital TRMM.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Comparar los datos disponibles de precipitación en la zona de estudio.
2. Establecer un procedimiento para adaptar los datos topográficos y cartográficos disponibles y adaptarlos a las bases de datos requeridas por el sistema AGWA.
3. Establecer un procedimiento para aplicar el modelo AGWA a cuencas con niveles de información similares a los existentes en la cuenca de estudio.
4. Determinar las ventajas y desventajas de utilizar cada uno de los productos de precipitación en la modelación hidrológica de la cuenca.

1.2 Justificación

La recopilación de la información cartográfica y climatológica de la cuenca del Río San Miguel y su adecuación a la estructura de base de datos requerida por el sistema informático AGWA, constituye una valiosa aportación para los usuarios, incluyendo estudiantes o académicos, interesados en el estudio de la cuenca y sus recursos naturales.

El modelo hidrológico avanzado creado para la cuenca, podrá ser utilizado para la elaboración de planes de desarrollo de los municipios de la vertiente y para estudios de los recursos naturales ante distintos escenarios de explotación y de cambio climático.

Los resultados mostrarán los niveles de precisión que se obtienen con los diferentes productos utilizados y el usuario que los aplique a otras cuencas con diferentes datos, contará con elementos cuantitativos para valorar la confiabilidad de sus resultados.

II. Revisión de literatura

2.1 Generalidades

En este capítulo se presentan los conceptos que constituyen el soporte conceptual de la tesis y se lleva a cabo una amplia revisión bibliográfica de publicaciones de estudios que han contribuido a la comprensión del comportamiento del Ciclo Hidrológico en el mundo y en el sitio de estudio. La revisión incluye también aportaciones en relación a la modelación hidrológica y la estimación de precipitación con sistemas satelitales.

2.2 Conceptos básicos

Los siguientes conceptos, tomados de la bibliografía básica para consulta y docencia de los autores Campos-Aranda (1998), Vega-Granillo (2011), Aparicio-Mijares (1992), Grijalva (2012) y otros autores, son de gran importancia para el desarrollo de la tesis, en lo que respecta a la comprensión del funcionamiento del modelo hidrológico, los datos de entrada y los resultados de la simulación.

Área de la cuenca. El área puede ser obtenida por diferentes métodos, el más común es obtener la superficie delimitada por su contorno, una vez trazada la línea divisoria sobre las partes más altas de la topografía, por lo general con ayuda de algún software especializado. En el caso de este proyecto se obtiene del polígono que genera la herramienta AGWA a partir del modelo digital de elevación (MDE).

Acuífero. Un acuífero es un conjunto de formaciones geológicas en las que circula o se almacena agua, de donde puede ser extraída para su aprovechamiento. El agua en los acuíferos existe en mayor proporción que en los lagos y ríos, pero en menor cantidad que en los glaciares. No todos los estratos que yacen bajo la superficie de la Tierra pueden contener o transmitir agua.

Aguas subterráneas. Es el agua que se encuentran bajo la superficie del suelo en la zona de saturación y en contacto directo con el suelo o el subsuelo.

Aguas superficiales. Son todas las aguas que se encuentran sobre la superficie del suelo o continentales exceptuando al agua subterránea, puede escurrir o estar estancada de manera natural o artificial.

Balance hidrológico. En hidrología el balance hidrológico se maneja en una zona determinada en cierto periodo de tiempo para un análisis, la conservación de la masa de agua en nuestro planeta y en su total incluiría toda el agua existente.

Cuenca hidrológica y flancos. Concavidades que la naturaleza ha creado en la superficie de las tierras mediante las fuerzas tectónicas, la fuerza del agua y sus corrientes, los tipos de suelos, y la vegetación. Los flancos están representados por elevaciones topográficas que marcan la zona de erosión (bloque de piso) y a partir del cual se desarrollan los diferentes sistemas sedimentarios que rellenan la cuenca. El bloque de techo que cae, representa a la cuenca; dentro de cuencas continentales, se tienen dos sistemas sedimentarios de depósito dominantes: Fluvial y Lacustre (ríos y lagos). Hay que tener en cuenta que no existen cuencas ideales, en un modelo es importante tomar en consideración que la infiltración no es la misma a lo largo de toda la cuenca.

Intensidad de precipitación. Cantidad de precipitación registrada en un intervalo de tiempo determinado. Generalmente se expresa en milímetros.

Parteaguas. Se considera como una línea imaginaria trazada por los puntos de mayor nivel topográfico que separa a cuencas adyacentes para su correcta administración, delimitando el escurrimiento originado durante la precipitación. El Modelo Digital de Elevación (MDE) nos proporciona la información de la elevación y aunque la delimitación es visible se genera con la delimitación de la cuenca de la herramienta AGWA.

Polígonos de Thiessen. Es un método de interpolación, en donde se forma un polígono con las mediatrices de las rectas que unen estaciones pluviométricas adyacentes. De esta manera el modelo distribuye la precipitación en el área de la cuenca.

Precipitación. Es agua en su forma líquida o congelada que cae desde la atmósfera en la superficie de la tierra. Es un elemento de gran importancia del Ciclo Hidrológico ya que es encargada de depositar el agua en el planeta. Los instrumentos más utilizados para registrar la precipitación son el pluviómetro y el pluviógrafo (Wurbs & James, 2002).

Isoyeta. Es un tipo de isolinéa que representa la cantidad de precipitación de un dato puntual a lo largo de una línea curva interpolando con los demás datos puntuales y obtener una distribución estimada de precipitación en un área determinada.

Sistema de Información Geográfica (SIG). Es un conjunto de herramientas informáticas que están diseñados para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos de manera ordenada con diferentes propósitos, con ellos se puede manipular datos geográficos que pueden ser obtenidos en campo o a partir de sensores remotos (Liria, 2008).

Evaporación. Proceso físico por el cual el agua pasa del estado líquido a vapor en la mayoría de las temperaturas ambientales, es principalmente obtenido por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de agua, producidas por la radiación solar, viento y presión, la cantidad de vapor presente decrece con la elevación (Oliver & Hidore, 2002).

Evapotranspiración. Es la consideración conjunta de evaporación en superficie y la transpiración de las plantas.

Infiltración. Es el proceso mediante el que el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo (Chow et al., 1994), moviéndose a través de poros o grietas en el suelo, debido a la acción de la gravedad y la capilaridad. Los factores que intervienen en la infiltración son: la textura del suelo, contenido de humedad, cobertura vegetal, uso de suelo, compactación, temperatura características físicas y químicas del agua y la pendiente de la superficie (Sánchez, 2011).

Nivel freático. Es el nivel superior del agua subterránea en un acuífero libre.

Recarga de acuíferos. Puede ser de manera artificial en donde se estudian posibles zonas de recarga y se inyecta agua a un acuífero, Es el proceso por el cual se aporta agua del exterior a la zona de saturación de un acuífero, también se presenta de manera natural.

Sensores remotos. Se puede definir como los instrumentos usados en la medición de propiedades de la superficie terrestre con sensores instalados en satélites, aeronaves o drones, con la intención de medir a distancia sin necesidad de estar en contacto con el objeto de estudio.

Percolación. Lámina de agua que se infiltra por debajo de la zona de raíces y que eventualmente alcanzará la capa freática.

2.3 Modelos hidrológicos

Los avances en la tecnología y los desarrollos informáticos han hecho posible la creación de modelos hidrológicos, que consisten en abstracciones matemáticas escritas en códigos de programación que describen fases relevantes del Ciclo Hidrológico, con el objetivo de simular la transformación de Precipitación en Escurrimiento en una cuenca (Ponce 1989), esto los convierte en una valiosa alternativa para evaluar o conocer su respuesta ante los distintos productos o conjuntos de datos de entrada como son: fisiografía de la cuenca, uso de suelo, vegetación, edafología y precipitación, entre otros.

2.3.1 Tipos de modelos hidrológicos

La clasificación más aceptada de acuerdo con la descripción de los procesos físicos que simulan, los modelos se pueden clasificar como: conceptuales y físicamente basados y, de acuerdo con la descripción espacial de los procesos de la cuenca, como agregado y distribuido (Xu, 2002). Entre los conceptuales, destacan el modelo de cuencas de Stanford (Crawford y Linsley, 1966), el modelo HBV de la Agencia Hidrológica del Departamento del Balance Hídrico de Suecia (Bergström y Forsman, 1973), HSPF y el modelo de cuencas de

Sacramento (Burnash, 1995). Ejemplos de físicamente basados son los modelos SHE - Sistema Hidrológico Europeo (Abbot et al., 1986); IHDM Modelo Distribuido del Instituto de Hidrología (Beven et al., 1987) y SWAT, modelo de herramientas de evaluación de suelo y agua (Arnold et al., 1998). En los últimos años, se han desarrollado los modelos más avanzados de parámetros distribuidos como TOPKAPI, modelo de aproximación e integración cinemática topográfica (Todini y Ciarapica, 2001) y tRIBS, el simulador integrado de cuencas en tiempo real basado en modelos digitales de red de triángulos irregulares (Bras, et al., 2004). A continuación se explican los modelos utilizados en el este trabajo

2.3.2 El modelo SWAT

SWAT es uno de los modelos físicamente basados y de parámetros semidistribuidos de simulación continua, desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), en conjunto con la Universidad de Texas, con el principal propósito de administrar los recursos de una cuenca (Arnold et al., 1998). En este modelo, la cuenca se divide en múltiples subcuencas de características de uso de suelo y vegetación similares, que constituirán las Unidades de Respuesta Hidrológica. Su rango de aplicabilidad es muy amplio e incluso se han obtenido buenos resultados en cuencas sin aforar (Alaba, 2010; Ortiz, et al., 2011).

El Ciclo Hidrológico es simulado por SWAT en base a la ecuación del equilibrio de agua:

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde SW_t , es el contenido final de agua en el suelo, en mm; SW_0 es el contenido inicial de agua en el suelo en el día i , en mm; t es el tiempo, en días; R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i , en mm. Q_{surf} es la cantidad de escorrentía de la superficie en el día i , en mm; E_a es la cantidad de evapotranspiración en el día i , en mm; W_{seep} es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i , en mm; y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en un día i , en mm.

Para construir el modelo de una cuenca con SWAT, se requiere como datos de entrada información espacialmente distribuida como topografía, suelos, uso de suelo y pendiente (Arnold et al., 1998); construir estos archivos es una tarea difícil que complica la parametrización del modelo (Arnold et al., 2012), sobre todo cuando se pretende modelar cuencas extensas, lo que representa un obstáculo para su uso eficiente y oportuno para los usuarios (USDA-ARS, 2015). Para facilitar el uso de este modelo, se han creado sistemas informáticos como el sistema de Evaluación Automatizada Geoespacial de Cuencas (AGWA, por sus siglas en inglés), que sirven como plataformas para ejecutar modelos hidrológicos.

El modelo calcula la evapotranspiración separadamente, la evaporación la calcula utilizando funciones de profundidad de suelo y contenido de agua. La transpiración de la planta la simula como función lineal de la evapotranspiración potencial e índice de área de hoja. Para la evapotranspiración potencial (PET), SWAT tiene integrados tres métodos incluidos en el SWAT varían dependiendo de la entrada de datos. El método de Penman-Monteith requiere radiación solar, temperatura aérea, velocidad relativa de humedad y viento. El método de Priestley-Taylor requiere radiación solar, temperatura y humedad relativa. El método de Hargreaves.

El último método disponible por el modelo solo considera las temperaturas, lo que lo hace apropiado para una baja disponibilidad de información, la ecuación que utiliza es:

$$\lambda E = 0.0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \cdot (T_{av} + 17.8)$$

En dónde

λ : calor latente de vaporización (MJ kg⁻¹),
E_o: evapotranspiración potencial (mm d⁻¹),
H₀: radiación extraterrestre (MJ M⁻² d⁻¹),
T_{mx}: temperatura aérea máxima por un día dado (°C),
T_{mn}: temperatura aérea mínima por un día dado (°C),
T_{av}: temperatura aérea por un día dado (°C).

El modelo utiliza determinar el agua que percola las relaciones:

$$\begin{aligned}W_{perc, ly} &= SW_{ly, excess} (1 - \exp(-Ut/TT_{perc})) \\SW_{ly, excess} &= SW_{ly} - FC_{ly}, \text{ Si } SW_{ly} > FC_{ly}, \\SW_{ly, excess} &= 0, \text{ Si } SW_{ly} \leq FC_{ly} \\TT_{perc} &= (SAT_{ly} - FC_{ly}) / K_{sat} \\FC_{ly} &= WP_{ly} + AWC_{ly}\end{aligned}$$

En donde:

W_{perc, ly}: contenido de agua que pasa a la siguiente capa (m)
SW_{excess, ly}: volumen de agua drenable en la capa de suelo en un día (mm)
SW_{ly}: contenido de agua de la capa de suelo en un día (mm)
Ut: longitud del paso tiempo (h)
TT_{perc}: tiempo de viaje para la percolación. es único para cada capa
SAT_{ly}: cantidad de agua en el suelo cuando está saturado (mm)
FC_{ly}: capacidad de campo (mm)
K_{sat}: conductividad hidráulica saturada (mm/h)

El escurrimiento depende de la pendiente, altitud, suelo, textura y uso de suelo, además de la intensidad y la duración de un evento de lluvia.

$$Q = (R - 0.2 S)^2 / (R + 0.8 S)$$

En donde:

R: precipitación (mm)
S: Almacenamiento o abastecimiento del agua (mm)

Para estimar la pérdida por transmisión SWAT usa el método de Lane la fórmula utilizada es la siguiente:

$$T_{loss} = K_{ch} * TT * P_{ch} * L_{ch}$$

En donde:

T_{loss}: pérdidas por transmisión del canal (m³)
K_{ch}: conductividad hidráulica efectiva del canal (mm/hr)
TT: velocidad de flujo (mm/h)
P_{ch}: perímetro mojado (m)
L_{ch}: longitud del canal (km)

El modelo SWAT estima la producción de agua mediante la siguiente fórmula:

$$P. \text{ Agua} = Esc + Fl. \text{ Lateral} + Ap. \text{ Sub} - P. \text{ Trans} - Abst. \text{ Lagos}$$

En donde:

P. agua: agua que entra al canal principal en el tiempo (1 día)

Esc: escurrimiento

Fl. Lateral: flujo lateral

Ap. Sub.: umbral del nivel de agua en un acuífero somero para el flujo base

P. Trans.: pérdidas por transmisión

Abst. Lagos: abstracciones de lagos

Para la producción de sedimentos se basa en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada MUSLE:

$$Y = 11.8 (Q * qp)^{0.56} KCPLS$$

En donde:

Y es la cantidad de sedimentos que se producen durante una tormenta singular (en toneladas métricas, t).

Q: volumen de escorrentía (m³/s).

qp: caudal instantáneo máximo (m³/s).

K: factor erosionabilidad del suelo (mm/hr)

C: uso y gestión de suelos (adimensional)

P: factor de apoyo Universal Soil Loss Equation (USLE)

L: factor longitud de la pendiente (km)

S: factor gradiente de la pendiente (mm)

2.3.3 El Modelo AGWA

El sistema informático Evaluación Automatizada Geoespacial de Cuencas (AGWA) es una herramienta basada en SIG para modelación de cuencas diseñado para utilizar las bases de datos disponibles en las agencias gubernamentales de los Estados Unidos de América, que permite parametrizar, ejecutar y visualizar resultados de varios modelos hidrológicos, entre ellos SWAT en sus distintas versiones.

2.3.4 Aplicaciones

Debido a su versatilidad y eficiencia, SWAT y KINEROS, han sido ampliamente aceptados por investigadores y técnicos de muchos países e integrados en AGWA, su utilización sigue incrementándose. La literatura internacional muestra que las aplicaciones son variadas, tanto en calidad como en cantidad. En Marruecos se creó un modelo de la cuenca Bouregreg con el propósito de predecir su respuesta a los fenómenos y riesgos que enfrenta, como erosión, inundaciones, sequías, contaminación, entre otras, así como para estimar el caudal de entrada a la presa de Sidi Mohamed Ben Abdellah, en la que descarga el escurrimiento. El modelo constituye una buena herramienta para planificar y evaluar la gestión de este importante reservorio (Fadill et al., 2011). También se han obtenido buenos resultados en el impacto del cambio de uso de suelo en el comportamiento de cuencas, como lo demuestra el estudio de un afluente del Río San Pedro, que se comparte entre Sonora, México y Arizona, Estados Unidos de América, en el que Miller et al. (2002) encontraron que el cambio en cobertura de suelo en 25 años, determinado con imágenes de satélite, alteró la respuesta hidrológica de la cuenca con un incremento en el escurrimiento medio anual y como consecuencia, se impactará la ecología y decrecerá la calidad del agua en la vertiente. Los cambios en los patrones de escurrimiento también pueden tener su origen en la degradación del suelo por incendios y utilizando AGWA es posible predecir los impactos en la esorrentía y en la erosión de la cuenca (Goodrich et al., 2005).

Todos los asentamientos humanos, sean grandes urbes o pequeñas poblaciones, están ubicados en cuencas y es bien sabido que el desarrollo urbano resulta, por lo general, en una mayor cubierta impermeable que modifica los procesos hidrológicos tales como el tiempo y la magnitud del volumen de flujo y el pico de los hidrogramas, en estas condiciones, también es posible utilizar AGWA, con los modelos SWAT o KINEROS, como lo demuestra Goetz et al. (2011) con el estudio en la parte alta de la Cuenca del Río Delaware en el que acoplaron un modelo de cambio de uso de suelo a un modelo hidrológico para conocer los impactos hidrológicos de la urbanización futura en un medio ambiente de paisaje sensible. Análisis similares se realizaron en la zona de Gaza, región que enfrenta serios desafíos para la sostenibilidad futura de sus recursos hídricos, en la que Hamadl (2012) realizó una

modelación hidrológica de la cuenca considerando condiciones futuras de urbanización para evaluar el impacto del cambio de suelo en la disponibilidad futura del recurso y en el balance hídrico de la cuenca. Por su parte, Kepner, et al. (2008) examinaron el impacto del desarrollo urbano en relación con la sostenibilidad de los recursos hídricos, tema de mucha importancia en el oeste de los EEUU, con el que se intenta determinar si los patrones de crecimiento pueden ser manejados para minimizar los impactos hidrológicos y ecológicos en las cuencas.

La conservación de suelos también es una de las áreas en la que los modelos aportan valiosa información. El sistema AGWA ha sido utilizado para evaluar la producción de sedimentos en la cuenca del arroyo Kufranja, afluente del Río Jordán (Abdulla et al., 2007) y los resultados se compararon con los de un estudio que usa una ecuación que determina el sedimento en el flujo del cauce para calcular el sedimento. El modelo también fue aplicado en la Cuenca del Río Vamsadhara, India (Jain, 2014) y se determinaron los parámetros más sensibles que condicionan el flujo y la producción de sedimentos en la vertiente.

Estos modelos también pueden ser utilizados para analizar escenarios pasados y extrapolar hacia el futuro para evaluar efectos del cambio climático. En la parte alta del Río Mississippi, EEUU, (Jah, et al., 2006) calibraron y validaron SWAT para modelar un período de 30 años (1968 a 1997) con el fin de evaluar las fluctuaciones de los caudales anuales y estacionales en respuesta a la sensibilidad de nueve escenarios climáticos y seis escenarios de cambio climático; En la porción media de la cuenca del Río Koshi, en Nepal, Devkota y Gyawali (2015), utilizando modelos climáticos y SWAT, determinaron que el cambio climático no representa una amenaza seria en la disponibilidad de agua promedio; sin embargo, pronostican que en el futuro se incrementen las variaciones temporales del flujo.

La modelación de una cuenca y el análisis de escenarios pueden mejorar la comprensión científica y a la vez proporcionar información para la toma de decisiones en relación a los servicios ambientales que proporciona una cuenca. Con esta tecnología, se puede dar respuesta a cuestionamientos sobre el efecto del cambio de uso de suelo en el ecosistema y en los servicios ecohidrológicos; en la forma de modelar y plantear escenarios para mejorar la comprensión de las ventajas y desventajas y la competencia entre los distintos usos de suelo y sus impactos en los servicios, así como en la forma de que los científicos estén proporcionando las herramientas correctas a los tomadores de decisiones (Kepner et al.,

2012). También pueden desarrollarse modelos para determinar indicadores de la capacidad de los servicios de los ecosistemas (Nedkova et al.,2012), para la regulación de inundaciones, sobre todo los relacionados con la cobertura del suelo en las cuencas, o bien para obtener elementos para analizar la factibilidad de crear un mercado de servicios ambientales hídricos como lo muestra el estudio para cuantificar y caracterizar el balance hídrico total y el agua disponible, en la cuenca Tapalpa, Jalisco, México (Benavides Solorio, 2008).

El modelo SWAT tiene una amplia gama de aplicaciones y a 30 años de su creación, tiene una gran aceptación internacional (Gassman, 2006), que junto con AGWA, seguirá creciendo, tanto en número de usuarios, como en variedad de aplicaciones.

2.4 Precipitación

Se define a la precipitación como el agua procedente de la atmósfera y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la Tierra (Campos, 1998).

De acuerdo a los fenómenos meteorológicos, las precipitaciones pueden clasificarse en: precipitaciones por convección, precipitaciones orográficas y precipitaciones ciclónicas o de frontales:

Precipitación convectiva. Se forman por procesos de evaporación debida a la insolación, este aire húmedo formado en las capas bajas asciende por calentamiento a las capas altas, se enfría y por ello se produce la condensación y la lluvia.

Precipitación orográfica. Se produce en las zonas montañosas donde las masas de aire húmedo se condensan y se produce precipitación.

Precipitación ciclónica. Es la asociada a los ciclones, éstos producen lluvias típicas de frentes fríos. En el hemisferio norte se presentan durante el otoño, invierno.

2.4.1 Medida de la precipitación

La medida de la precipitación tiene una gran diversidad de propósitos, como estudios de investigación científica, control de riesgos, construcciones, etc. Todos los procedimientos de registro de datos requieren de una calibración, por lo que es importante compararlos entre ellos para disponer de una base de medidas fiable.

La precipitación se mide con pluviómetro o con pluviógrafo y puede estimarse con modelos estadísticos o con sensores remotos.

a) Pluviómetro

El pluviómetro mide la lámina de precipitación. Consiste en un recipiente cilíndrico graduado al que descarga un embudo que capta el agua de lluvia. Por cada milímetro de lluvia se deposita un centímetro en el recipiente. Se protege con una malla para evitar la entrada de basura u otros objetos. En México se toman las lecturas a las 8 de la mañana de cada día.

En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es la dependencia responsable de la vigilancia continua de la atmósfera y de identificar los fenómenos meteorológicos y de su registro (SMN, 2012). Para poder realizar dicha tarea, cuenta con estaciones climatológicas, estaciones meteorológicas automáticas, estaciones de radiosondeo y tecnología de teledetección, que son operados por el organismo a lo largo de la república mexicana o en sus oficinas centrales. Es una dependencia de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que a su vez, forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y de Recursos Naturales (SEMARNAT, 2012).

Dentro de la Cuenca del Río San Miguel, existen tres estaciones climatológicas (figura 1), ubicadas en los municipios de Cucurpe, Opodepe y Rayón, con registros de la década de los 60 hasta la fecha.

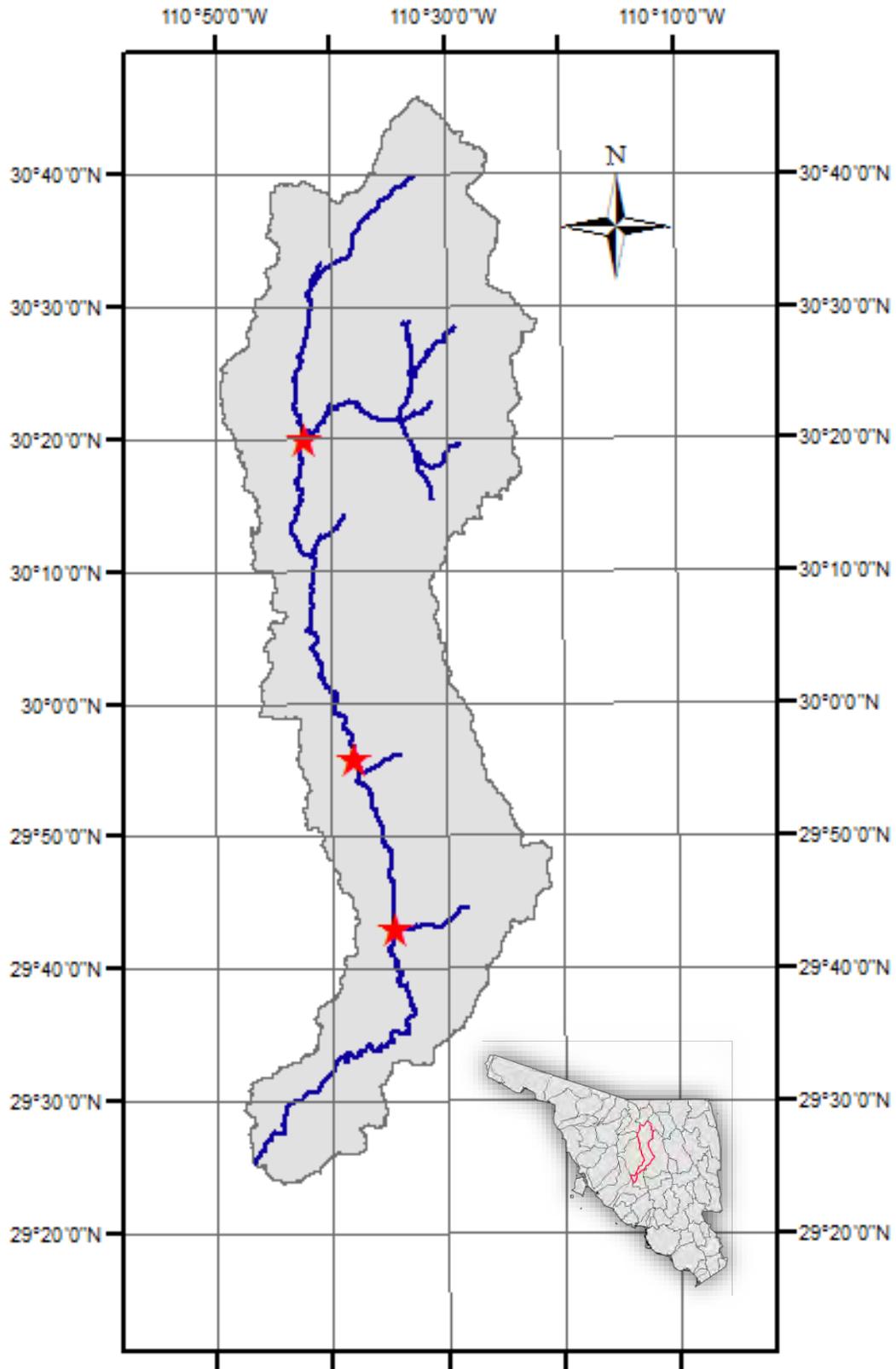


Figura 1. Ubicación de pluviómetros de estación climatológica del SMN.

b) Pluviógrafo

El pluviógrafo mide la variación de la precipitación con respecto al tiempo. A diferencia del pluviómetro, permite conocer la intensidad de la precipitación, además de la lámina acumulada en cualquier lapso de tiempo, incluso diaria como el pluviómetro.

En un pluviógrafo convencional, el mecanismo está formado por un tambor que gira en torno a un mecanismo de relojería a velocidad constante y en una banda pluviográfica en la que un estilógrafo montado en un flotador, marca la variación de la precipitación. En algunos equipos modernos como el TE525WS manufacturado por Texas Electronics (figura 2), el sistema de relojería fue sustituido por un reloj digital y el mecanismo por un sistema de balancines calibrados para que el peso del agua active un contador, lo que permite registrar la variación de la lluvia con respecto al tiempo con mucha precisión por largos períodos de tiempo.

Con la finalidad de estudiar el fenómeno conocido como el Monzón de Norte América, la Universidad de Sonora, la Universidad Estatal de Arizona y el Instituto Tecnológico de Sonora, se han esforzado por mantener un red de monitoreo de precipitación (figura 3), a la que se han añadido sensores de humedad y temperatura del suelo, en la porción central de la Cuenca del Río Sonora y algunos están ubicados en la del Río San Miguel.



Figura 2. Pluviógrafos TE525WS y balancín.

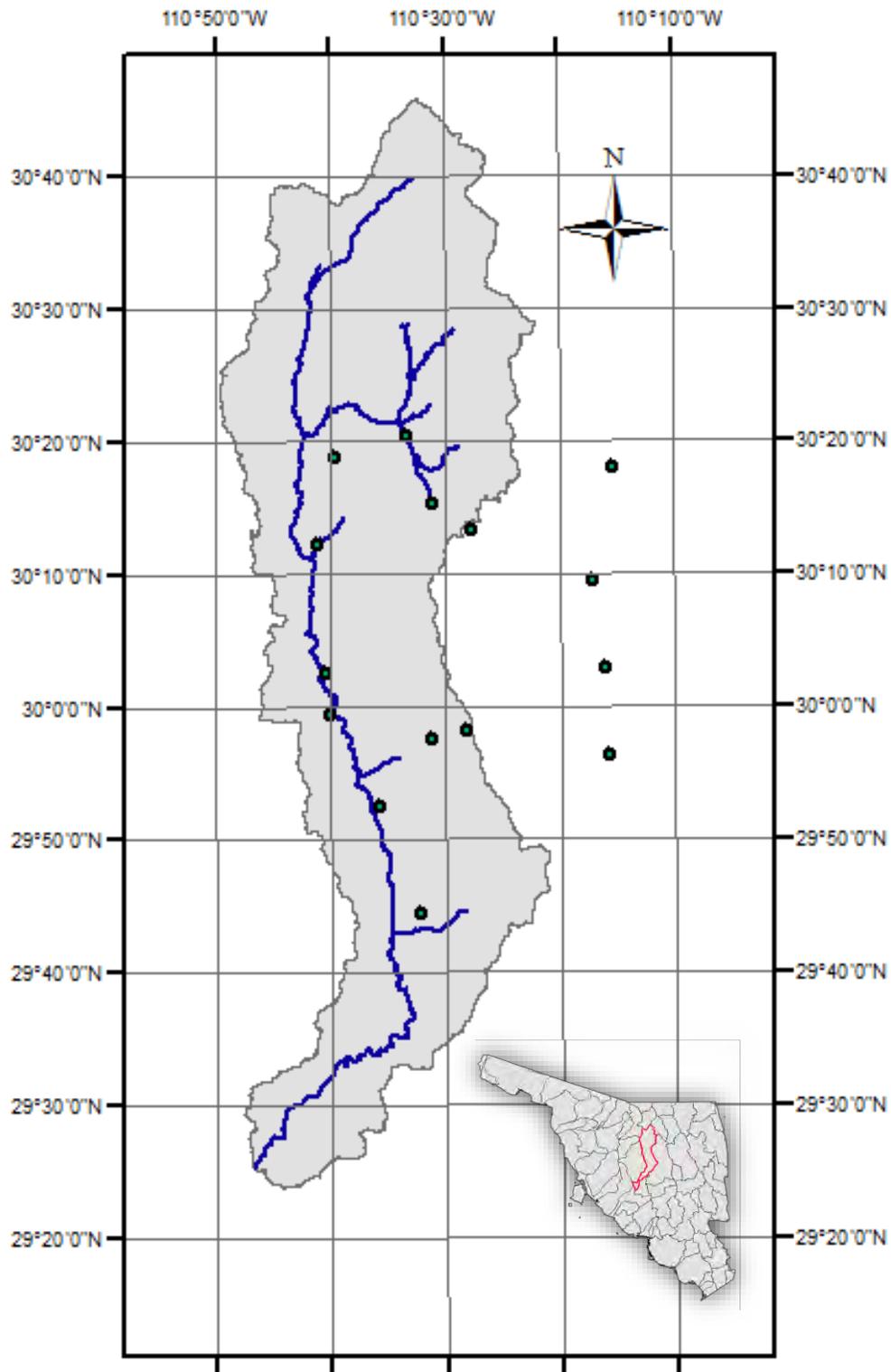


Figura 3. Red de pluviógrafos UNISON.

c) Estimación de la precipitación con sensores remotos

La estimación y la medición de lluvia son dos procesos distintos, aunque ambos tienen la finalidad de proporcionar un producto apropiado para conocer o modelar el comportamiento del Ciclo Hidrológico.

Los productos de precipitación pueden estimarse con sensores remotos, a partir de una serie de instrumentos instalados ya sea en satélites o radares, que con los parámetros registrados pueden estimar la precipitación.

Los productos de recursos hídricos de NASA, son obtenidos a partir de satélites y modelos, los cuales son principalmente utilizados en primer lugar para el monitoreo y conocimiento de lluvias e inundaciones, cantidad de nieve, deshielo y sequías (Tabla 1). En segundo lugar para variabilidad, recursos y el cambio climático (NASA, 2011).

Tabla 1. Productos de Agua de la NASA (NASA, 2011).

Productos de satélites	Productos de modelos de superficie
Precipitación	Escorrentía
Nieve/hielo	Nieve/hielo
Nubes	Lluvia, nubes, evaporación
Humedad de suelo	Humedad de suelo
Agua subterránea	Evaporación/transpiración

Los satélites pueden estimar los productos de percepción remota mencionados en la tabla 1, debido a que son instrumentados una variedad de sensores que miden la radiación electromagnética reflejada o emitida por el sistema tierra-atmósfera y la radiación. Estos datos son procesados y convertidos a datos geofísicos y puestos a disposición de forma digital (NASA, 2011).

En la tabla 2 se muestran los satélites de la NASA para la percepción remota de cantidades de agua en la Tierra y los productos que proporcionan

Tabla 2. Instrumentación y productos de satélites de la NASA (NASA, 2011).

Satélites	Instrumentos	Productos
TRMM	Radar de precipitación	Tasa de precipitación
	Instrumento de imágenes en microonda	Tasa de lluvia vertical
	Espectro visible e infrarrojo	Perfil lluvia acumulada
Terra/Aqua	Espectroradiómetro de resolución moderada (MODIS)	Cobertura de nieve
		Cobertura de nubes
		Temperatura en la parte superior de las nubes
Aqua	Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)	Cobertura de nubes
		Presión/ Temperatura en la parte superior de las nubes
		Vapor de agua
		Perfil de humedad específica y humedad relativa
	Concentración de hielo, tasa de lluvia, nieve y agua	
	Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E)	

Los productos de precipitación de sensores remotos son de carácter global y pueden ser complementados con datos terrestres.

El sistema MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Según el sitio web oficial de la NASA, es un instrumento clave a bordo de los satélites Terra y Aqua. Terra orbita alrededor de la Tierra está programado para que pase de norte a sur a través del ecuador de la mañana, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador por la tarde. Terra MODIS y MODIS de Aqua están viendo la superficie de toda la Tierra cada 1 a 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales, o grupos de longitudes de onda. Estos datos pretenden mejorar la comprensión de la dinámica global y los procesos que ocurren en la tierra, en los océanos y en la atmósfera inferior. MODIS juega un papel muy importante en

el desarrollo de los modelos globales, validados e interactivos del sistema terrestre, capaz de predecir el cambio global con precisión suficiente para ayudar a tomar decisiones acertadas en materia de protección del medio ambiente (NASA, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 2012).

El instrumento MODIS se terminó a mediados de 1995. Desde entonces, dos unidades de vuelo espacial, el Modelo Protoflight (PFM), a bordo del satélite Terra, y el modelo de vuelo 1 (FM1), a bordo del satélite Aqua, se han completado y puesto en marcha. Terra fue lanzado el 18 de diciembre de 1999, y Aqua fue lanzado el 4 de mayo de 2002.

MODIS fue construido con las especificaciones de la NASA, representan una muy buena opción en ingeniería de hardware para vuelos espaciales de teledetección (NASA, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 2012).

La Misión de Medición de Lluvias Tropicales o TRMM, por sus siglas en inglés, es una misión conjunta entre la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), diseñada para vigilar y estudiar las precipitaciones o variables relacionadas, en las regiones de los trópicos. Orbita a una altura de 403 km con un periodo de 92.5 min, con un ángulo de inclinación de 35° con respecto del ecuador (NASA, TRMM, 2012).

2.4.2 El sistema TRMM

La Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) se basa en el análisis de las precipitaciones o variables relacionadas en las regiones tropicales de la tierra. Distribución especial del producto 3B42 TRMM es de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (27.8×27.8 km). Fue lanzado en 1997 y dio inicio desde Enero de 1998, orbita a una altura de 403 km con un periodo de 92.5 minutos. El ángulo de inclinación orbital respecto al ecuador es de 35°. Se consigue una cobertura global diaria con una resolución temporal de 3 horas (figura 4 y 5).

El periodo de comparación entre las estaciones de lluvia y los datos del 3B42 TRMM es de Enero de 1998 a la fecha, este proceso fue nombrado validación en tierra para posteriormente ser dispuesto en un FTP para la distribución de carácter científico de dicho producto.

El sistema TRMM está funcionando de forma no sincronizada con el sol órbita que le permite observar las precipitaciones tropicales. Se completa una órbita alrededor de la tierra, teniendo en cuenta la cobertura tanto de los trópicos y extracción de los datos de precipitación durante el día de 24 h (16 órbitas) como posible. Los instrumentos a bordo del TRMM incluyen la Radar de Precipitación (PR), Imagen Microondas (TMI), Visible e Infrarrojo Escaner (VIRS), Nubes y la de la Tierra. Sistema de Energía Radiante, y el sensor de Lightning Imaging. De ellos, probablemente el más destacado es el PR, el cuales un radar que fue diseñado para captar una completa estructura de la precipitación que cualquier sensor aerotransportado antes de él. El mejoramiento de los datos de lluvia del TRMM fue realizado utilizando los datos “in situ” de estaciones en tierra. Los datos del sistema TRMM y su mejoramiento podrían ayudar a contribuir a describir los regímenes hidrológicos sobre regiones con pobre distribución de estaciones pluviométricas (Braun, 2008).

El presente trabajo en esta región se centraran en validar y proponer mejorar los datos TRMM acumulado a nivel diario y mensual (producto 3B42) usando información observada así como modelos hidrológicos. En este se utilizó el producto 3B42 V7 (NASA, TRMM, 2012).

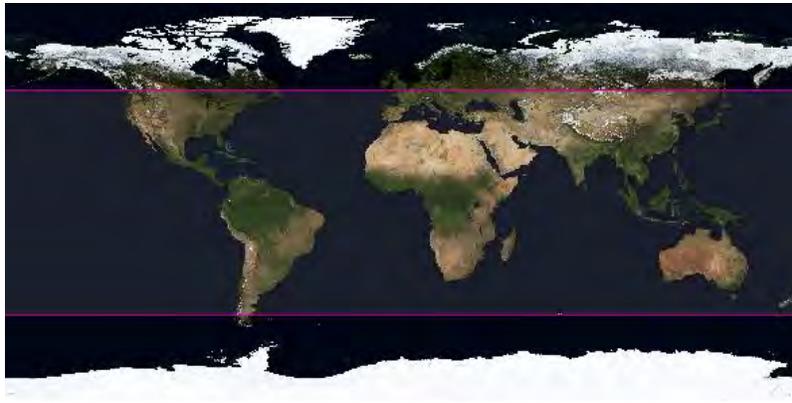


Figura 4. Interfaz para la visualización y el análisis de la TRMM cada 3 horas (3B42 V7) (NASA, TRMM, 2012).

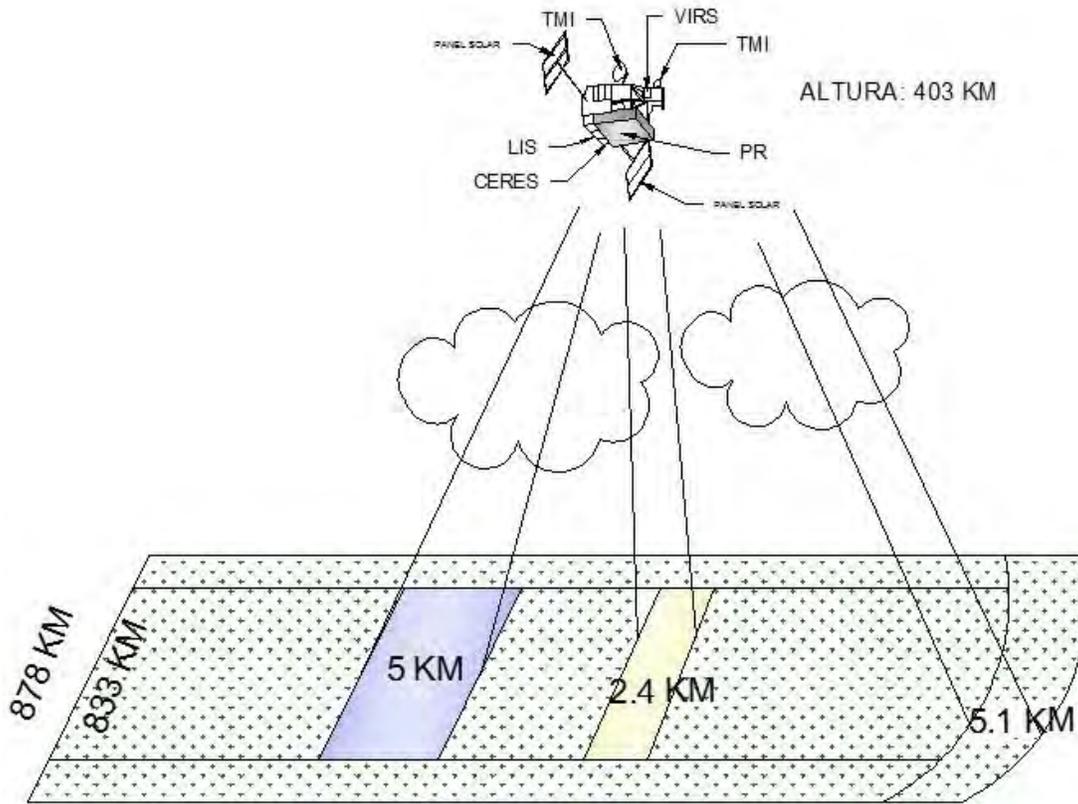


Figura 5. Sensores del Sistema Terra y su área de detección en la Tierra.

2.5 Estudios en la Cuenca del Río San Miguel

La Cuenca del Río San Miguel, Sonora, queda comprendida en la zona de estudio definida para los estudios que se realizaron durante el Experimento del Monzón de América del Norte (NAME), programa que conjuntó esfuerzos internacionales de múltiples instituciones con el propósito de mejorar las predicciones de la precipitación durante la estación cálida en América del Norte, asociada con las variaciones del fenómeno climático Monzón de Norte América (NAM). El proyecto significó no sólo una oportunidad para recopilar datos de campo muy detallados sobre el intercambio y el transporte de energía y el agua dentro del sistema, sino que sino que constituyó un gran ejemplo para mejorar significativamente la colaboración internacional entre instituciones de gobierno y universidades de México y los Estados Unidos de América (Gochis. 2008).

Este gran esfuerzo, que se materializó con una campaña de campo durante el verano de 2004, produjo valiosa información sobre los procesos hidrológicos y los mecanismos que los condicionan, que quedó plasmada en interesantes publicaciones y tesis de maestría y doctorado de las instituciones participantes, algunas de las cuales se describen a continuación.

Con relación a la precipitación, Gebremichael et al. (2007) llevó a cabo un análisis de la variabilidad utilizando observaciones *in situ* a partir de la red de pluviómetros instalados durante el experimento SMEX04 (Experimento de Humedad del Suelo de 2004), observaciones del sistema satelital TRMM-PR y las observaciones de temperatura de la parte alta de las nubes con imágenes en infrarrojo del satélite GOES. Encontró que la precipitación en la región de estudio se caracteriza por su alta variabilidad temporal y espacial, fuertes ciclos diurnos, tanto en frecuencia e intensidad con máximos en las horas de la noche. También estableció que el patrón espacial y la dinámica temporal de las precipitaciones son modulados por las características topográficas, y a gran escala por la circulación atmosférica y por los campos de humedad relacionados con la ubicación geográfica. En sus resultados también encontró que en las zonas bajas de la cuenca, localizadas al sur predominan los sistemas convectivos.

El cambio drástico en la vegetación, producto del NAM también ha sido tema de estudio en esta zona de influencia del Monzón. Watts et al. (2007), estimaron el balance de energía superficial en siete sitios localizados en Sonora y Arizona durante los experimentos del verano de 2004, con el fin de comprender responde la partición del flujo de energía ante el cambio el cambio en la vegetación. Se observaron grandes cambios en el índice de vegetación, sobre todo en las porciones en las que predomina el matorral subtropical y la radiación superficial neta fue mayor en las porciones que están transpirando y menor en las superficies más secas y calientes. Los cambios en el vigor de la vegetación están directamente ligados con las condiciones hidrológicas y dependen también de las especies vegetales (Mendez et al., 2009).

La precipitación como elemento del Ciclo Hidrológico es el principal dato de entrada en los modelos hidrológicos con los que se ha simulado el comportamiento de la cuenca. Esta

variable es medida en la red de pluviógrafos de la UNISON instalada para estudios del Monzón de Norteamérica (Watts et al., 2006) y con cuatro estaciones que cuentan con pluviómetro. Estos datos fueron utilizados para el modelo construido con HEC-HMS (Sistema de modelación hidrológica desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos de América) para realizar el balance de agua en la cuenca (Valencia, 2009 y Félix, 2009), trabajo que junto con los estudios realizados por CONAGUA en el sitio de estudio, son un soporte importante para cotejar con los resultados obtenidos en esta tesis. Además, se ha utilizado el Sistema de Simulación de datos terrestres de América del Norte (NLDAS), que además de precipitación, proporciona otros datos como humedad de suelo y temperatura superficial. Los datos de NLDAS demostraron su utilidad en regiones que cuentan con pocos registros de precipitación (Robles, 2010) y fueron el principal producto de entrada a un modelo hidrológico de la cuenca del Río Sonora, con el que se analizó el impacto de la descarga de agua residual en porciones de la vertiente.

Para obtener la precipitación la Comisión Estatal del Agua (CEA), trazaron isoyetas, mediante el método Inverse Distance Weighted (IDW) del programa Arcview Gis 3.2 a partir de los datos anuales de 3 estaciones climatológicas dentro del área de estudio.

El programa calcula el volumen de precipitación total media anual, multiplicando el área del acuífero por la lámina de precipitación.

Para el cálculo de la evapotranspiración en el estudio realizado por la CEA se utilizó el método de Turc, el cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$ETR = P / \sqrt{0.9 + (P^2/L^2)}$$

En donde:

P = Precipitación media anual en mm

$$L = 300 + 25 * T + 0.05 * T^2$$

T = Temperatura media anual en °C

El escurrimiento directo se obtuvo igualmente multiplicando el coeficiente de escurrimiento por la precipitación efectiva.

La infiltración se calculó mediante la diferencia entre la precipitación efectiva, el escurrimiento directo.

En el balance superficial obtenido por Valencia 2009, se obtuvo la distribución de la precipitación media anual en la cuenca aplicando el método de polígonos de Thiessen, calculada a partir de los registros utilizados por la CEA y se agregaron 8 estaciones más con registros de tres años (2004-2006). Para calcular la evapotranspiración se tomaron los valores de temperatura y precipitación de tres estaciones calculados en el estudio realizado por la CEA, se distribuyeron espacialmente en la cuenca mediante el método de polígonos de Thiessen, y se llevó a cabo el proceso de distribución de la precipitación efectiva con el programa Idrisi (Valencia, 2009).

El escurrimiento superficial, se obtuvo con el mismo método que se utilizó en el estudio de la CEA, se estimó sumando el escurrimiento directo y el flujo base y el escurrimiento directo se obtuvo igualmente multiplicando el coeficiente de escurrimiento por la precipitación efectiva (Valencia, 2009).

La infiltración se calculó mediante la diferencia entre la precipitación efectiva y el escurrimiento directo.

$$I = Pe - Es$$

En donde:

Pe: precipitación efectiva (mm)

Es: escurrimiento directo (mm)

III. Materiales y métodos

3.1 El sitio de estudio

El sitio de estudio comprende la Cuenca del Río San Miguel, Sonora (figura 6), que se localiza en el rectángulo definido por las coordenadas UTM (515,845.353 3,404,958.067 m), (572,783.801 3,404,534.733 m), (572,111.317 3,256,239.888 m), (515,754.954 3,256,239.888 m). Está ubicado en la región hidrológica RH09 Sonora Sur con clave de subcuenca RH09De. Comprende los municipios de San Miguel de Horcasitas, Rayón, Opodepe, Cucurpe y una pequeña parte de Carbó, Hermosillo, Heroica Ciudad de Ures, Aconchi, Banámichi y Arizpe (figura 7).

Tiene una forma alargada con dirección Norte-Sur; limita al Norte con la Cuenca del Río los Alisos, al Sur y al Este con la Cuenca del Río Sonora, al Oeste con la Cuenca del Río Zanjón y al Suroeste con la Costa de Hermosillo. Al Norte colinda con la Sierra Azul, al Oeste con las sierras La Madera, Cucurpe y San Jerónimo, al Este con las sierras San Antonio, Los Locos, El Jucaral y El Aconchi, descargando al Sur, en la Presa Abelardo L. Rodríguez.

La Cuenca del Río San Miguel, Sonora, se ubica en la zona de transición entre las provincias hidrogeológicas Planicie Costera del Pacífico y la Sierra Madre Occidental, subcuenca de la Cuenca del Río Sonora, que a su vez está comprendida dentro de la Región Hidrológica RH-9, que abarca la mayor superficie en Sonora.

La vertiente se seleccionó como sitio de estudio por la disponibilidad de información requerida para la tesis y por el interés que existe en la región por desarrollar infraestructura e instrumentación de registro de parámetros climatológicos e hidrológicos en la cuenca,

principalmente para estudio del Monzón de Norteamérica, fenómeno que aporta cerca del 70% de la precipitación que ocurre en el Noroeste de México.

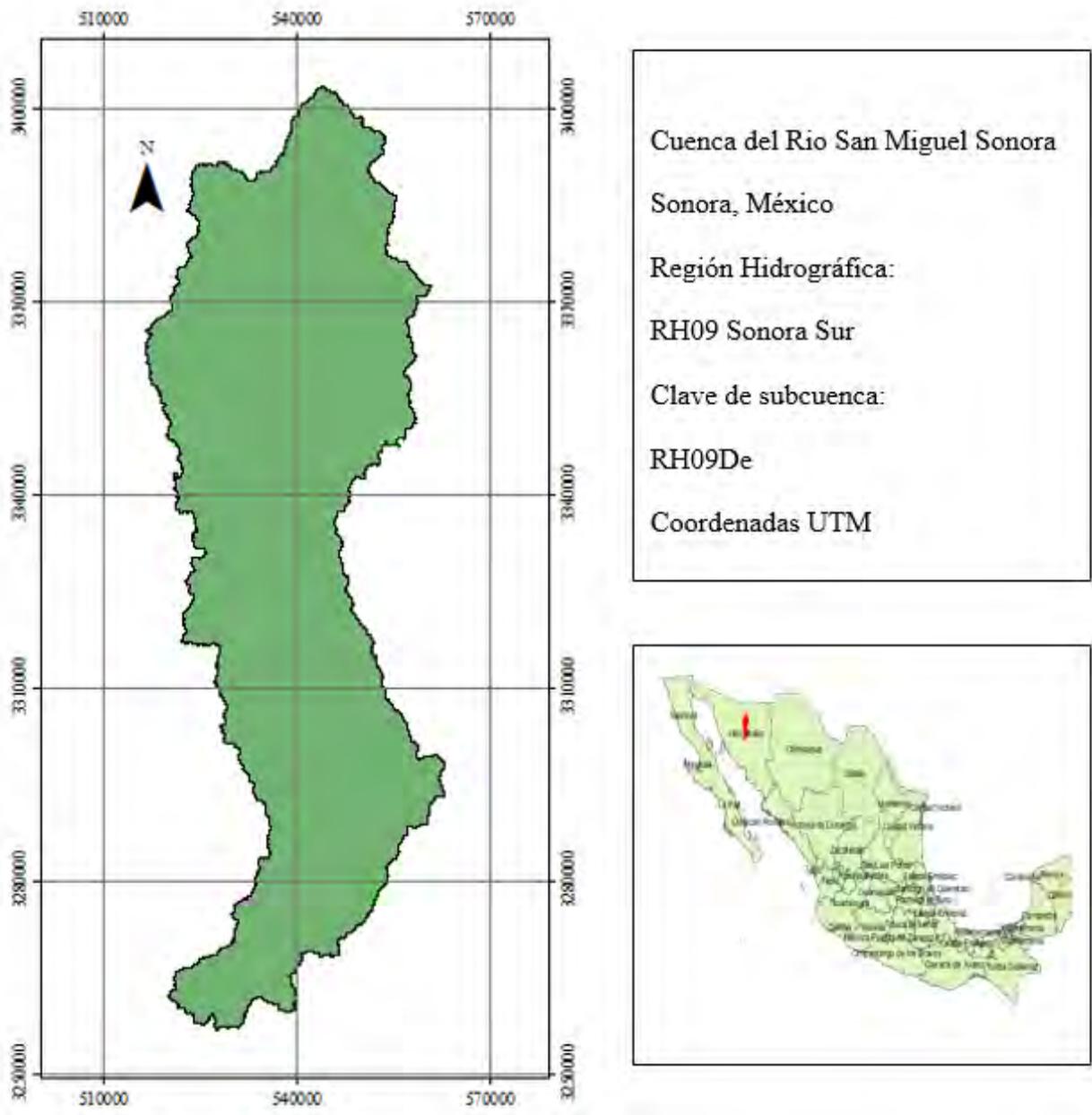


Figura 6. Localización de la Cuenca del Río San Miguel, Sonora.

3.1.1 Área y perímetro de la cuenca

La cuenca de Río San Miguel tiene un área de 4,175 km², obtenidos a partir de la delimitación del parteaguas de 583 km trazado tomando como punto de partida la estación de aforo “El Cajón”. Estos parámetros fueron obtenidos con ArcGIS a partir del continuo de elevaciones mexicano disponible en la página de INEGI.

De acuerdo con la clasificación de INEGI, basada en los criterios establecidos por la ya desaparecida Secretaría de Recursos Hidráulicos, la Cuenca del Río San Miguel, Sonora, es de tamaño mediana, por lo que entra dentro del rango de aplicabilidad de AGWA.

3.1.2 Actividad socio-económica

La cuenca alberga una población de 13,812 habitantes, distribuida en los municipios de Cucurpe con 985; Opodepe 2,878; Rayón, 1,599 y San Miguel de Horcasitas con 8,382 habitantes (INEGI, 2011).

Las principales actividades económicas en la zona son la agricultura, la ganadería y en menor proporción la minería. Las áreas de siembra por municipio son Cucurpe, 549 ha, Opodepe 129 ha, Rayón 1,873 ha y San Miguel de Horcasitas 3,708 ha (INEGI, 2011).

El sector agrícola, en su mayoría, se beneficia del Acuífero del Río San Miguel y entre los usuarios destacan los pequeños propietarios y los ejidatarios afiliados a organizaciones como la Central Campesina Independiente y la Confederación Nacional Campesina. Los principales usos del agua son el agrícola, con el 35% de los aprovechamientos registrados; el uso pecuario con un 22% y el uso público urbano con un 15 %. Las demandas industrial, doméstico, múltiples y otros son menos frecuentes (CONAGUA, 2009). La SAGARPA brinda apoyo técnico a los usuarios en forma permanente a través de Centros de Apoyo Agropecuario. Por otra parte, la CONAGUA, pretende integrar al Consejo de Cuenca el cual forma parte del Consejo del Alto Noroeste, con el propósito de mejorar el uso y manejo del agua de la vertiente.

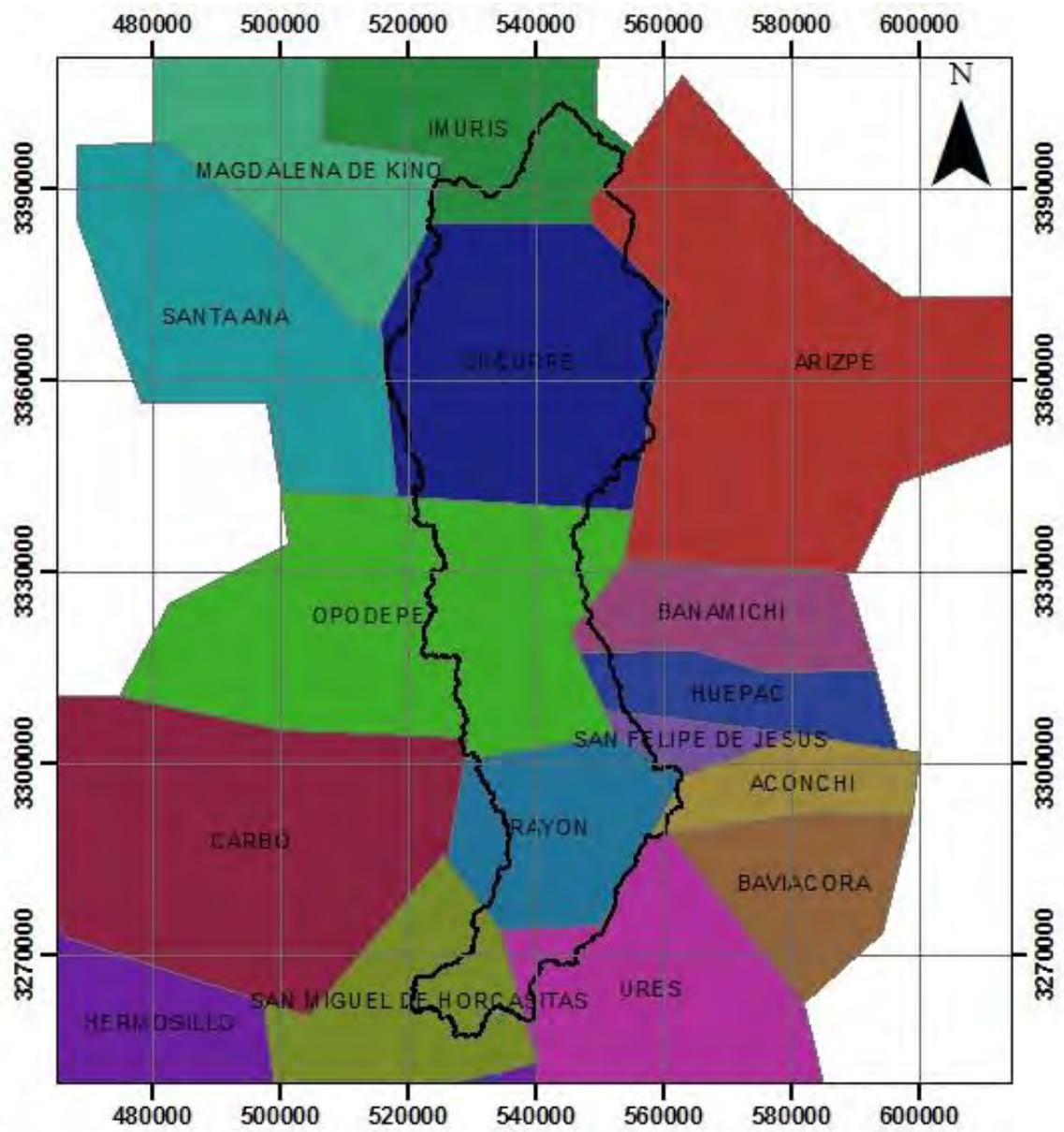


Figura 7. Municipios de la CRSM.

3.1.3 Clima

La cuenca tiene una variedad de climas, que van de muy secos y secos a semisecos, como se muestra en la figura 8, elaborada con datos de INEGI

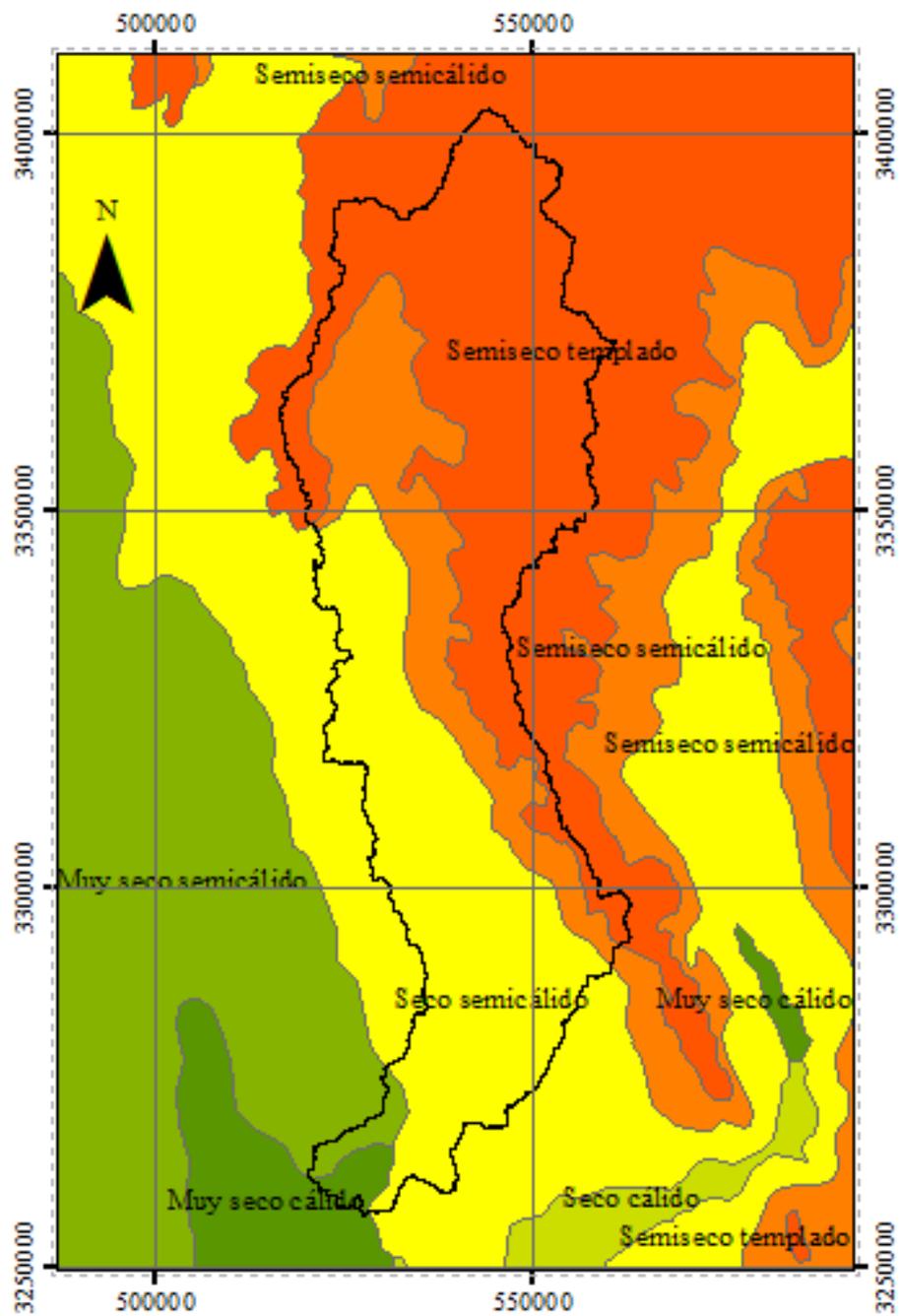


Figura 8. Clima.

El clima muy seco, también llamado desértico, abarca el 46% de la superficie de Sonora y una pequeña porción de la Cuenca del Río San Miguel, se caracteriza por su precipitación inferior a los 400 mm al año y su temperatura media anual varía de 18 a 26 °C. Su oscilación térmica es mayor a 14 °C por lo que se consideran climas extremos. Los climas secos caracterizan principalmente la cuenca y están situados al Este de los que presentan climas muy secos, ocupan el 20% de la entidad. Se dividen en cálidos 22 °C, semicálidos 18-22 °C y templados 12-18 °C.

Los semisecos abarcan el 28% de Sonora, con temperaturas medias anuales de 12-22 °C.

Se consideran climas de transición entre los secos y los templados y se dividen en función de su temperatura media anual en cálidos, semicálidos y templados. Ocupan la parte alta de la cuenca.

La CONAGUA (2009), elaboró un análisis climatológico que se efectuó por medio de los datos de precipitación pluvial, temperatura y evaporación, registrados en 11 estaciones climatológicas que se encuentran localizadas dentro del área de estudio y las 6 fuera de ella. El método utilizado fue básicamente el de Polígonos de Thiessen, aunque también se construyeron las isoyetas e isotermas anuales con el objeto de conocer la distribución de la lluvia y la temperatura media anual en el área de estudio. Determinaron que la temperatura media anual en el área de estudio varía de unos 17°C en la cabecera de la Cuenca del Río Sonora, a unos 24° C en las inmediaciones de la Ciudad de Hermosillo. Las temperaturas más bajas corresponden a las zonas montañosas y las más altas a la zona de planicie en la Mesa del Seri.

3.1.4 Vegetación

La cobertura vegetal es un factor condicionante del Ciclo Hidrológico. Determina el escurrimiento, la infiltración y la evapotranspiración entre otros procesos hidrológicos, por lo que es un factor relevante para el desarrollo de esta tesis.

La Cuenca del Río San Miguel es rica en variedad de especies de vegetación desértica (figuras 9a a 9d). En la parte alta al Noreste predomina el bosque de encino y pastizal natural,

en la porción media al Norte destaca el matorral desértica micrófilo y en la parte baja abunda el matorral subtropical. En la parte sur de la cuenca en menor proporción se encuentra Mezquital Xerófilo y bosque de mezquite.



Figura 9. Vegetación en la Cuenca del Río San Miguel, Sonora.

La vegetación en la vertiente sufre un drástico cambio de la temporada seca (figura 10) a la temporada de lluvias (figura 11), por efecto del fenómeno climatológico conocido como Monzón de Norteamérica, responsable de la entrada de humedad proveniente del Océano Pacífico que impacta significativamente cada año el comportamiento hidrológico de la vertiente.



Figura 10. Estado de la vegetación antes del Monzón de Norteamérica.



Figura 11. Cambios en la vegetación en la temporada de lluvias de verano.



Figura 12. Vegetación típica a altitudes menores a los 1,000 msnm.



Figura 13. Vegetación típica a altitudes mayores a los 1,000 msnm.

En la cuenca se pueden encontrar diferentes especies vegetales que se enmarcan dentro de las clases: matorral subtropical, matorral desértico y bosque de encino, que son representativas de la cuenca y de gran parte de la región noroeste de México.

3.1.4.1 Matorral subtropical

Consisten en matorrales que alcanza una altura del dosel entre 2 a 8 m. Usualmente se encuentran en las laderas de la zona montañosa de la cuenca. En terrenos con una altitud entre 300 y 1,500 m, en climas muy secos semicálidos con temperaturas medias anuales entre 20 y 24° C y precipitación total anual por debajo de 400 mm; así mismo y en climas secos semicálidos y semisecos, semicálidos y templados con temperaturas medias anuales entre 17 y 21° C y precipitación total anual entre 300 y 500 mm. Los suelos que lo sustentan son yermosoles, regosoles, litosoles, feozems y fluvisoles. Las principales plantas representativas de esta clasificación son *Fouquieria macdougalii*, *Guaiacum coulteri*, *Stenocereus thurberi*, *Caesalpinia pulcherrinia*, *Peniocereus striatus*.

Fouquieria macdougalii. Conocida en el área como Ocotillo macho o árbol de Ocotillo, es una especie dominante en el matorral subtropical. Se encuentra en laderas de cerros y arroyos y es considerado arbusto o árbol de hasta 5 m de altura; pasa la mayor parte del año sin hoja y sin su característica flor roja, generalmente vista en la temporada de lluvias (figura 14).

Acacia cochliacantha. La familia fue clasificada como leguminosa por su fruto, que en la mayoría de las especies es una leguminosa. Requiere de grandes cantidades de minerales como nitrógeno, fósforo y potasio (figura 15).



Figura 14. El árbol de ocotillo es abundante en la Cuenca del Río San Miguel.



Figura 15. La *Acacia cochliacantha* es abundante en la cuenca.

Guaiacum coulteri. Próxima a la vegetación de galería se encuentra a 400 m.s.n.m. Es un árbol pequeño y denso en temporada de precipitaciones, con flores color azul brillante y que responde rápidamente a la lluvia (figura 16).



Figura 16. Guaiacum coulteri o guayacán, en la parte baja y media de la cuenca.

Stenocereus thurberi. Conocida como pitahaya puede medir más de 10 m de altura. Es considerada un ejemplar típico y muy valioso en Sonora (figura 17).



Figura 17. La pitahaya se encuentra en la parte baja y media de la cuenca.

Cercidium praecox. Conocida como palo verde, siendo este color su principal característica, con flores amarillas brillantes que emiten un olor atractivo para los insectos. Es común encontrarlo en la parte baja de la Cuenca del Río San Miguel (figura 18).



Figura 18. El palo verde es abundante en la parte baja de la cuenca.

Prosopis velutina. Conocida comúnmente como mezquite, es un árbol mediano bien adaptado al desierto de Sonora, puede crecer 10 m de altura o más. Al contrario del palo verde este árbol se protege de los insectos lo que lo hace muy resistente a las plagas (figura 19).



Figura 19. El mezquite es abundante en la parte baja y media de la cuenca.

3.1.4.2 Matorral desértico

Carnegiea gigantea. Conocido como saguaro o sahuaro, se encuentra desde los 50 a los 1000 m.s.n.m. Se considera un símbolo del desierto de Sonora debido a su majestuoso porte, comúnmente alcanzando 12 o más metros de altura, sin embargo tiene un crecimiento lento, por lo que es una especie protegida por las autoridades (figura 20).



Figura 20. El sahuaro típico en la cuenca.

Fouquieria splendens. Conocida como ocotillo, es un matorral espinoso que en tiempo de lluvias, se cubre de hojas que permanecen durante la temporada (figura 21).



Figura 21. El ocotillo se encuentra en la parte baja y media de la cuenca.

Mammillaria grahamii. Conocida comúnmente como cabeza de viejo, florece en temporada de lluvias, con brillantes flores de color rosa pálido; se puede encontrar en colinas y laderas a una altitud entre 150 a 600 m.s.n.m. Son de las más pequeñas y abundantes de su especie (figura 22).



Figura 22. La cabeza de viejo se puede localizar en la zona más árida de la cuenca.

Opuntia robusta. Conocida como Nopal, es común encontrarlo en las partes altas de la cuenca y crece de 1.0 a 1.5 m de alto. Se ramifica desde la base con areolas ovaladas con espinas. Florece y da frutos con la llegada de las precipitaciones de verano (figura 23).



Figura 23. El nopal se encuentra en la parte baja y media de la cuenca.

Opuntia fulgida. Se le conoce comúnmente como choya y se encuentra a una altura de 300 a 1000 m.s.n.m., los tallos son de color verde claro con espinas. Las ramas jóvenes, como se aprecia en la figura 25, están cubiertas por espinas de un color más amarillo de 2 a 3 cm que oscurecen con la edad (figura 24).



Figura 24. La choya tiene presencia en la parte baja y media de la cuenca y en gran parte del estado de Sonora.

3.1.4.3 Bosque de Encino y pasto.

Contrastando con la vegetación de la parte baja y media de la cuenca, en la porción norte y oriente del área, se tiene la presencia de bosque, donde predominan las especies siguientes:

Quercus chihuahuensis. Conocida como encino, crece hasta 10 m de altura y se encuentra en la parte alta de la cuenca, arriba de los 1000 m.s.n.m. (figura 25).



Figura 25. Bosque de encino y pastizal.

Palo blanco se encuentra en la parte de la cuenca y su principal característica es el color blanco de su tronco.



Figura 26. Acacia willardiana.

. La vegetación en la cuenca es un recurso invaluable, aprovechado para actividades económicas que soportan el desarrollo de la región.



Figura 27 .Panorama de vegetación en la cuenc.

3.2 Precipitación

En la región se registran dos temporadas de lluvia: en invierno y en verano. Durante el invierno, predomina el tipo de precipitación frontal, caracterizado por su baja intensidad, larga duración y amplia cobertura espacial. Durante el verano, el Monzón de Norteamérica (NAM) proporciona la mayor parte de la precipitación en la zona de estudio.

Este fenómeno climatológico provoca el ingreso de humedad oceánica a la zona, que durante los meses de junio, julio, agosto y parte de septiembre, ponen en marcha un mecanismo de precipitación predominantemente de tipo convectiva, que en las partes altas se combina con precipitación de tipo orográfica. En esta temporada se mantiene un escurrimiento intermitente en el Río San Miguel (figura 28).

De acuerdo con los datos del Servicio Meteorológico Nacional de las estaciones Meresichic, Opodepe, Rayón y El Cajón, la precipitación media anual en la cuenca es de 420.4 mm.



Figura 28. Río San Miguel, en la parte media baja de la cuenca.

3.3 Marco geológico y suelos

El territorio sonorenses tiene una historia geológica bastante compleja, la formación de las cuencas en la entidad se debe a distensión. En la cuenca del Río San Miguel acontecieron varios eventos geológicos que dieron lugar a una diversidad de unidades litológicas, que por medio de los procesos endógenos y de los procesos exógenos como la erosión y el depósito sedimentario, modelaron el paisaje con el paso del tiempo. En la vertiente destaca la Formación Baucarit en la fase temprana, principalmente en las partes bajas del Río San Miguel y una sedimentación horizontal en la fase tardía, sin apreciables fallas.

La mayor parte de los cortes litológicos de pozos se encuentran concentrados en la parte baja de las subcuencas de los ríos San Miguel y Zanjón y principalmente en los alrededores de la población de Pesqueira, municipio de San Miguel de Horcasitas, Sonora.

En la cuenca del Río San Miguel subyace un acuífero de tipo libre, con fronteras laterales formadas por rocas ígneas intrusivas del tipo granítico y extrusivas del tipo riolítico y andesítico. El acuífero está contenido en un medio poroso permeable, constituido de boleas, gravas y arenas no consolidados, restringidos a los cauces del río y arroyos tributarios. Presenta buena porosidad granular debido a que los sedimentos tienen buena permeabilidad.

Las provincias hidrogeológicas consideran las propiedades hidráulicas de los materiales (permeabilidad, conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, porosidad, entre otras) (CONAGUA, 2009)

3.4 Estratigrafía

A continuación se describe la estratigrafía de acuerdo a estudios realizados por CONAGUA en 2002 y publicados en el Diario Oficial de la Federación en 2009 los cortes litológicos, obtenidos de pozos, se encuentran concentrados en la parte baja de las subcuencas de los ríos San Miguel y Zanjón y principalmente en los alrededores de la población de Pesqueira, Sonora.

Paleozoico. En el área de estudio, las rocas más antiguas corresponden al Paleozoico. Se encuentran cubiertas por depósitos más jóvenes o muy erosionados, por lo que sus afloramientos se encuentran distribuidos en poca proporción con respecto a la columna geológica del área. Tienen su mayor extensión en el borde norte de la cuenca y en una línea de dirección predominante norte-sur, siguiendo aproximadamente el cauce del Río San Miguel. Es probable que esta alineación haya sido causada por los movimientos originados hacia fines del Mesozoico y principios del Terciario, que elevaron el bloque tectónico sobre el que yacían estos afloramientos, por lo que actualmente se hallan expuestos sobre una traza de falla. Estas rocas son de naturaleza impermeable.

Mesozoico. Este tipo de rocas tiene una distribución muy limitada en la cuenca. Sobreyacen a las rocas del Paleozoico. Están representadas por sedimentos clásticos del Grupo Barranca, con edades que han sido asignadas al Triásico y por calizas y areniscas del Cretácico Inferior. En la porción noreste de la cuenca se tienen expuestos afloramientos de rocas triásicas y los del Cretácico Medio en la parte sur. La aparición de rocas plutónicas se dio a fines del Periodo Cretácico y consisten en granitos y granodioritas que intrusieron a las rocas paleozoicas y a las correspondientes de la parte inferior y media del Mesozoico. Estas masas intrusivas predominan en el área, sobre todo en la parte oriental y central, formando cadenas montañosas. Sobre estas rocas se depositó una gran columna de sedimentos Cenozoicos y constituyen el basamento geológico regional. Debido al peso ejercido sobre ellas, se transformaron notablemente sus propiedades físicas, anulando prácticamente la permeabilidad intersticial de los sedimentos y sellando las fracturas de los granitos y calizas.

Cenozoico (Terciario). En el área de estudio, las rocas del Cenozoico son las que tienen mayor distribución horizontal, debido a que las rocas sedimentarias y volcánicas cubren aproximadamente dos tercios de la superficie de la cuenca. Las rocas volcánicas están compuestas por emisiones lávicas de naturaleza ácida e intermedia como riolitas y andesitas. Casi contemporáneo con estas emisiones lávicas, están los piroclástos finos que formaron las tobas volcánicas que afloran al norte de la cuenca. Dentro del grupo de rocas cenozoicas, específicamente de la época Terciaria, se encuentran expuestos enormes espesores de conglomerados continentales de la Formación Baúcarit, nombrada así por King en 1939 y quién distinguió dos miembros en esta unidad: el superior, que consiste de arenas, arcillas y

conglomerados poco consolidados y el inferior, que se compone de conglomerados bien consolidados.

Cenozoico (Cuaternario). Los depósitos aluviales y fluviales se encuentran sobreyaciendo a los conglomerados de la Formación Báucarit del cuaternario, formados por boleos, gravas, arenas, arcillas y limos. Su distribución horizontal es muy reducida, limitada a las zonas de los cauces de los ríos y arroyos y a sus planicies de inundación. Estos materiales constituyen un acuífero libre de alta transmisividad y de altos valores de caudales específicos, donde quedan alojadas la mayor parte de las obras de explotación de aguas subterráneas de la cuenca estudiada. El Acuífero del Río San Miguel es del tipo libre, con fronteras laterales compuestas por rocas ígneas intrusivas del tipo granítico y extrusivas del tipo riolítico y andesítico; el acuífero está constituido de boleos, gravas y arenas, no consolidados, restringidos a los cauces del río y arroyos tributarios (CONAGUA, 2009).

3.5 Formación de la cuenca

De acuerdo a estudios realizados por CONAGUA en 2002 y publicados en el Diario Oficial de la Federación en 2009, la génesis geológica de la cuenca puede describirse como sigue:

Hacia fines del Cretácico y hasta principios del Terciario, el paisaje geológico de la zona estaba conformado por enormes plegamientos de rocas Paleozoicas, Triásicas y Cretácicas, que se extendían hacia el oriente, hasta la cuenca de Chihuahua. En esa misma época, la Orogenia Laramide con su fase compresiva, dio origen a un proceso de ruptura en bloques que debilitó la corteza terrestre, permitiendo la intrusión de enormes masas de rocas graníticas que levantaron los bloques fallados.

Grietas producidas por la deformación de la corteza terrestre, constituyeron un ducto que dio salida a emisiones de lavas riolíticas y andesíticas que cubrieron extensas superficies.

Después, se inició una etapa de erosión, que acumuló en las fosas tectónicas y sobre las tierras menos elevadas grandes espesores de conglomerados, arenas y arcillas que componen la parte inferior de la Formación Báucarit. Con un nuevo movimiento tectónico, se forma el “graben” o depresión de la subcuenca del Río Zanjón y los bajos tectónicos de los ríos San Miguel y Sonora.

Una última etapa del proceso geológico, está formada por un nuevo ciclo de erosión, cuyo mayor desarrollo se ubica dentro del Terciario que se depositó en la parte superior de la Formación Báucari (CONAGUA, 2009).

De acuerdo a la cartografía del INEGI, la Cuenca del Río San Miguel aloja diferentes tipos de suelos, como se describe a continuación:

Suelos de textura gruesa. Se caracterizan por ser muy delgados con velocidades de infiltración altas.

Suelos de textura media. Tienen velocidades moderadas de infiltración.

Suelos de textura fina. Son delgados, limitados por roca, tienen muy bajas velocidades de infiltración.

Suelos de textura muy fina. Se caracterizan por sus velocidades muy bajas, casi nulas de infiltración.

Los tipos de suelos dependen de la Geología y de la morfología de la cuenca, entre otros factores. Su descripción detallada se hace a continuación.

Feozem. Suelos de textura media con capa superficial oscura, suave, se caracteriza por su gran contenido de materia orgánica y de nutrientes. Se localiza en las llanuras de inundación del Río San Miguel, en la parte baja de la cuenca y en la parte alta en los alrededores de Cucurpe.

Fluvisol. Suelos de textura gruesa, representativos de las llanuras de inundación de la parte media del Río San Miguel.

Litosol. Se localizan principalmente en las partes más elevadas o en las zonas de la sierra de la cuenca.

Regosol. Es el tipo de suelo dominante en la Cuenca del Río San Miguel, con cerca del 31% de la superficie del área de estudio. Es de textura gruesa.

Xerosol. Presenta una capa superficial de color, de textura media y pobre en humus y se localizan en las zonas de lomerío.

Yermosol. Ocupa cerca del 2% de la superficie del área de estudio. Los suelos de esta unidad presentan una capa superficial de textura gruesa, de color claro y muy pobre en humus. Se distinguen de los Xerosoles por presentar capas de textura más gruesa. El origen de estos suelos parece estar asociado a depósitos eólicos. Los Yermosoles se encuentran asociados principalmente a materiales de aluvión del Cuaternario.

3.6 Materiales, información y equipo utilizado

Los materiales y datos utilizados consistieron principalmente en productos cartográficos editados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), datos de precipitación de varias fuentes e imágenes de satélite para estimar la precipitación, como se describe a continuación.

3.6.1 Cartografía digital

- ✓ Conjunto de datos en formato *shape* de INEGI de la escala 1:250 000 serie II de Geología, Hidrología, Fisiografía y Vegetación y uso de suelo.
- ✓ Cartografía topográfica digital de la escala 1:50 000, editada por INEGI: H12B71, H12B72, H12B81, H12B82, H12D11, H12B12, H12D21, H12D22, H12D31, H12D32, H12D41 y H12D42.
- ✓ Modelo Digital de Elevación (MDE) de INEGI, representa visual y matemáticamente de los valores de elevación con respecto al nivel medio del mar y permite caracterizar las formas del relieve.
- ✓ Base de datos de Food and Agriculture Organization (FAO) en formato *shape* consistente en un mapa de vegetación para alimentar el modelo.

3.6.2 Datos de precipitación

- ✓ Registros de precipitación diaria del año 2005 de las estaciones climatológicas Rayón, El Cajón y Cucurpe, operadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), dependencia de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- ✓ Precipitación del año 2005 de 14 pluviógrafos operados por la Universidad de Sonora (UNISON) dentro y próximos a la Cuenca del Río San Miguel. Los sitios se identificaron como ID G130, G131, G132, G133, G134, G135, G136, G138, G139, G140, G143, G144, G146 y G147.

3.6.3 Datos satelitales

- ✓ Bases de datos de precipitación en formato ráster de TRMM v7.
- ✓ TRMM Online Visualization and Analysis System, como visualizador del rectángulo de trabajo para la descarga de datos de TRMM V7.
- ✓ Datos de temperatura de TRMM en formato raster para su adecuación al modelo.

3.6.4 Equipo de informática

El procesamiento de la información requirió de una buena capacidad de cómputo, de almacenamiento y de despliegue para análisis visual. Se utilizaron los equipos y programas informáticos siguientes:

- ✓ Computadora de escritorio HP con procesador Intel Core i5 de cuarta generación, sistema operativo de 64 bits, memoria instalada (RAM) de 16.0 GB, disco duro de 1 TB.
- ✓ Computadora portátil Dell Vostro Intel Core i5, Sistema Operativo de 64 bits, Memoria instalada (RAM) de 4.0 GB, disco duro de 500 GB.
- ✓ ArcGIS 10. Sistema de Información Geográfica (SIG), que se utilizó para el procesamiento, visualización y modelado de los datos espacialmente referenciados.

- ✓ AGWA. Extensión de ArcGIS, sobre la que se ejecutan los modelos SWAT y KINEROS (AGWA Tools).
- ✓ AutoCAD 2011. Se utilizó para el cálculo de áreas y elaboración de figuras.

3.6.5 Equipo de campo

- ✓ Pluviógrafos TE525WS. Se utilizaron para medir la variación de la precipitación en función del tiempo. Existen 30 equipos de pluviógrafos de balancín distribuidos en la cuenca.
- ✓ GPS diferencial. Se utilizó para la ubicación de puntos de interés, como pluviógrafos, y otros equipos instalados en la cuenca.

3.7 Procedimiento de modelación

En el diagrama de la figura 29 se presenta el esquema de la metodología aplicada en la tesis, iniciando con la selección e instalación del sistema informático, el acopio y la adecuación de los formatos de los datos a los requerimientos del sistema y la modelación con cada uno de los productos de precipitación y su posterior visualización y análisis de resultados.

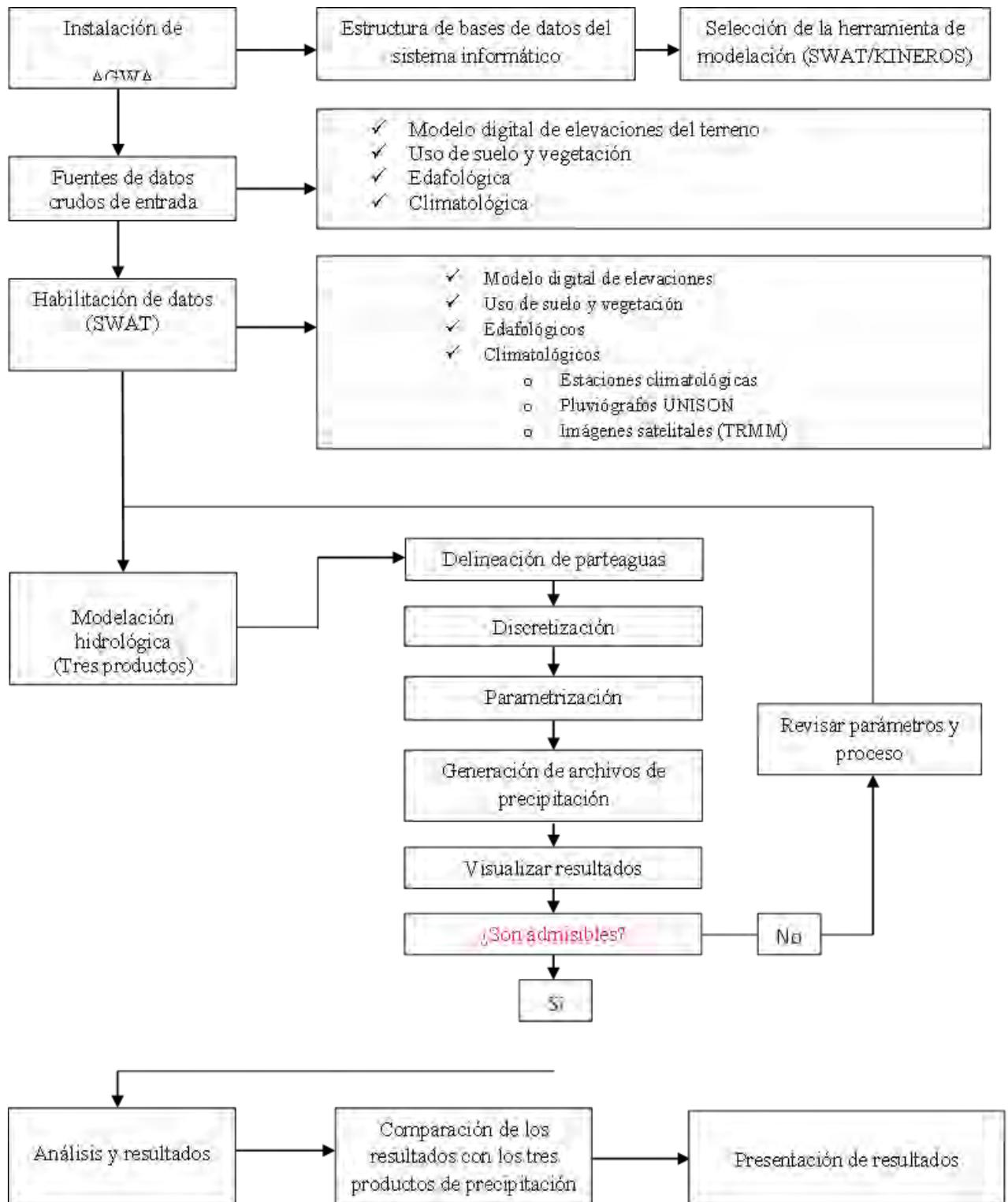


Figura 29. Metodología para la modelación hidrológica de la cuenca de estudio.

3.8 Instalación de la extensión AGWA

La extensión de *Automated Geospatial Watershed Assessment Tool* (AGWA), para ArcGIS se descargó de la página <http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/> junto con la documentación del programa, que incluye: tutoriales e información relevante para el manejo del sistema. Para acceder a la descarga se requiere de un registro previo como usuario del servicio WEB.

Una vez descargado, dentro de ArcGIS, se ejecuta como administrador y se activa la barra de herramientas de AGWA como se muestra en la figura 30.

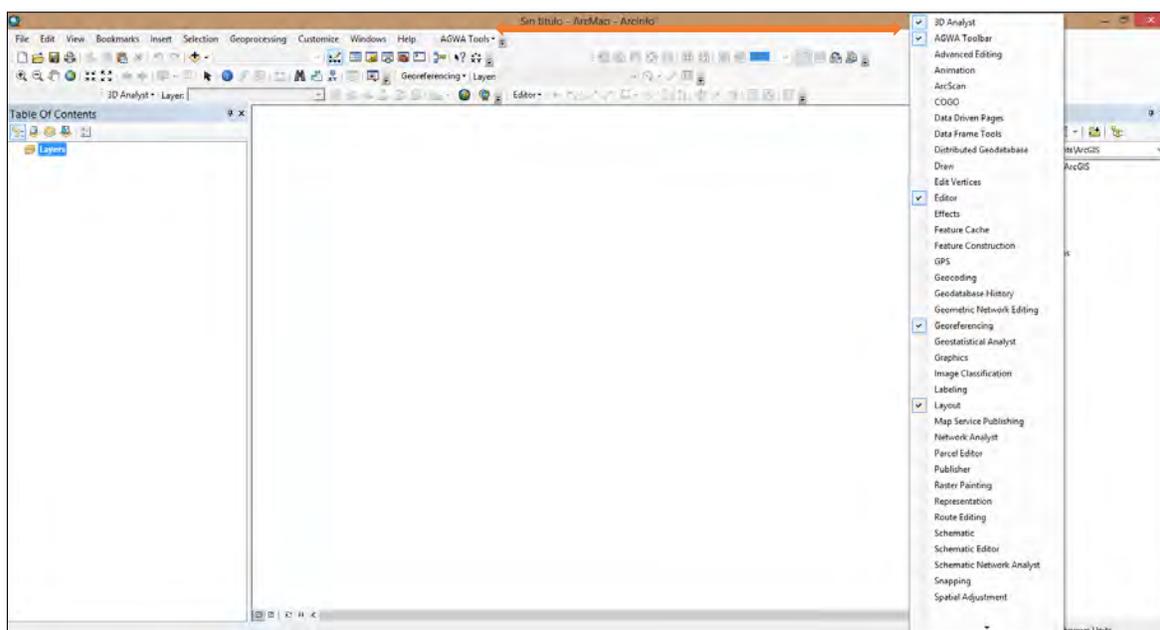


Figura 30. Barra de herramientas de AGWA.

3.8.1 Estructura de carpetas y archivos

La carpeta de AGWA debe estar en el disco duro "C:" con las carpetas de trabajo como se muestran en la figura 31. Dentro de la carpeta AGWA se encuentran las carpetas de *datafiles*, *documentation*, *models*, *mxds*, *temp* y *workspace*.

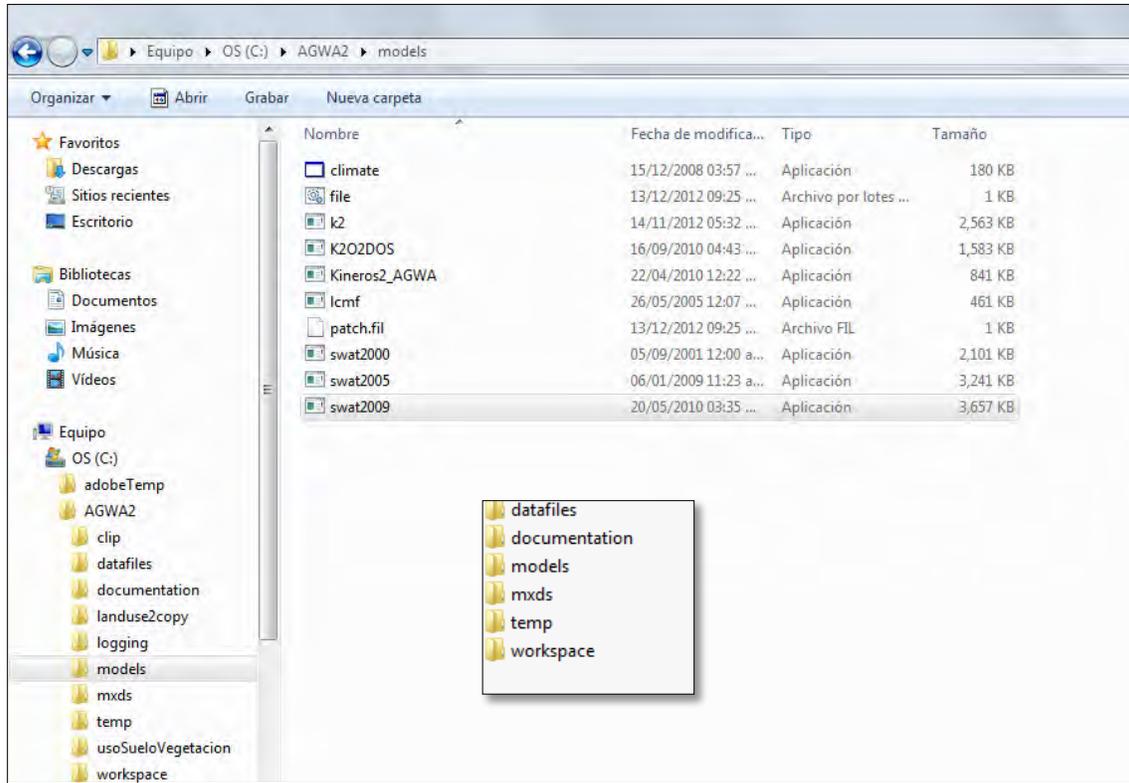


Figura 31. Estructura de carpetas del modelo.

Para conocer los formatos y estructura de datos de entrada a modelo, se hizo un análisis exhaustivo de las bases de datos primarias ubicadas en el directorio “datafiles” de AGWA, que contiene las tablas de FAO_World, FAO_Properties, FAO_Summ, kin_lut, kin_lut.dbf y nacl_lut.dbf, que están disponibles para los usuarios en la página de Internet de The Automated Geospatial Watershed Assessment Tool del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA) (<http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/>). Este análisis permitió conocer el arreglo de los datos ráster, vectoriales y tabulares y compararlos con los datos adquiridos en campo, INEGI, CONAGUA y otras dependencias para aplicar el modelo en la Cuenca del Río San Miguel, Sonora.

3.8.2 Selección de la herramienta de modelación

Agua ofrece dos modalidades de modelación: KINEROS y SWAT. El primero, modela la respuesta de cuencas pequeñas ante tormentas aisladas en escalas de tiempo menores a una hora. El segundo, SWAT, puede modelar cuencas grandes, caracterizadas por la heterogeneidad de sus rasgos fisiográficos y en escalas de tiempo de un día, así como largas series tiempo de datos climatológicos, lo que se apega más al problema planteado en esta tesis.

3.8.3 Fuentes de datos crudos

En este apartado se describen los datos requeridos para la modelación y sus respectivas fuentes, enfatizando que están en diferentes formatos tal y como los producen y ofrece a los usuarios las distintas dependencias mexicanas y que no son enteramente compatibles con los formatos o estructuras de los archivos o bases de datos digitales de AGWA.

La base de datos básica para la elaboración de modelo se puede dividir básicamente en dos partes, las *primarias* y las *secundarias*.

Las *primarias* contienen la información que se obtiene a partir de trabajos de campo y agencias de gobierno, entre otras (tabla 3). Son los datos de entrada en bruto, que aún no se han trabajado con el modelo y que han sido trabajado o elaborado por algún otro sistema informático o SIG para hacerlos aptos para el modelo. En algunos casos requieren de un proceso especializado, detallado y minucioso, para que el modelo pueda tomar en cuenta los valores y ser analizados, por lo que se recomienda leer el manual del modelo para identificar sus requerimientos, antes de trabajar o modificar cualquier archivo.

Tabla 3. Datos primarios de entrada al modelo AGWA.

Nombre	Tipo de archivo	Descripción
Modelo Digital de Elevación (MDE)	<i>Grid</i>	Se obtuvo la porción correspondiente al sitio de estudio del <i>Continuo de Elevaciones Mexicano</i> disponible en INEGI.
Datos de precipitación	Tabla con ID	Consisten en datos de pluviógrafos de las estaciones de la UNISON, datos de estaciones climatológicas del SMN e imágenes satelitales del sistema TRMM
Uso de suelos y vegetación	<i>Shapefile</i>	Tabla de atributos de la cobertura vegetal elaborada con los datos de INEGI, que debe adecuarse al formato de entrada al modelo.
Tipo de suelo	<i>Shapefile</i>	Consisten en los tipos de suelo obtenidos de INEGI deben adecuarse y relacionarse con las tablas de FAO

Las secundarias son las que el modelo genera a partir de las primarias, como la delimitación de la cuenca, dirección de flujo, acumulación de flujo, red de drenaje y todos los grid o mallas como resultados del modelo. Las tablas de información requeridas por el modelo para la cuenca del río San Miguel, no están disponibles en el formato requerido por AGWA, por lo que algunas tablas tienen que ser adaptadas al modelo. En esta tesis las tablas de mayor relevancia son las de precipitación, debido a que el formato original difiere de manera significativa.

3.8.3.1 Modelo digital de elevación

El modelo digital de elevaciones se descargó de la página de Internet de INEGI (www.inegi.gob.mx) que ofrece un producto gratuito denominado *Continuo de Elevaciones Mexicano*, que es la representación de la topografía y del relieve de la República Mexicana.

Se descargó un sector de 3,247 columnas y 7,402 filas que comprende el rectángulo delimitado por las coordenadas geográficas (-111° 00' 00" W, 29° 00' 00" N y -110° 00' 00" W) y (-110° 00' 00" W, 30° 00' 00" N).

Descripción de los datos obtenidos de INEGI:

- Resolución espacial: píxel de 30 x 30 m
- Valores de altitud (z): enteros positivos y negativos, en metros
- Datos de georeferencia: Datum ITRF92, época 1988.0, elipsoide GRS80
- Coordenadas: Geográficas
- Formato de archivo digital: Ráster, Banda intercalada por línea (BIL) y formato TIFF con resolución espacial de 30 m, en formato intercalado por banda (BIL) de 16 bits

3.8.3.2 Uso de suelo y vegetación

La información de uso de suelo y vegetación se obtuvo de las cartas digitalizadas de la escala 1:250,000 que ofrece el INEGI. Esta información está en formato vectorial (shape file) e incluye los atributos en formato tabular. Esta información está basada en el sistema de clasificación de la vegetación y usos agropecuarios utilizados por el INEGI en las primeras ediciones de la carta de uso de suelo y vegetación, a la que se le han hecho modificaciones y adecuaciones.

3.8.3.3 Edafología

La información sobre los suelos de la cuenca de estudio, se obtuvo de la cartografía digital de INEGI que se elaboró a partir de la carta a escala 1:250,000 y que se ofrece al público en formato vectorial (*shapefile*) e incluye las bases de datos de atributos, basada en la *Leyenda del Mapa Mundial de Suelos* (FAO-UNESCO, 1968) que se ha ido actualizando a la Cartografía Serie II, usando la *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo* (WRB 1998).

3.8.3.4 Datos climatológicos

Se utilizaron registros del año 2005 de las estaciones climatológicas Rayón, Meresichic, El Cajón y Ures, operadas por el Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N.) y proporcionados por la Jefatura de Meteorología de la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Noroeste.

3.8.3.5 Descripción de los datos.

En la figura 32 se puede observar que los datos del SMN vienen ordenados en forma tabular, donde el dato de la celda de la primera línea y de la primera columna del cuerpo de información de precipitación, corresponde al día 1 de enero y el de la última línea y última columna, al día 31 de diciembre. De igual manera están ordenados los datos de evaporación, temperatura máxima y temperatura mínima.

ESTACION: RAYÓN		PRECIPITACIÓN																																	
ID: 26139																																			
AROMES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	MAX.	PROM	SUMA	
482	2005-02	0.0	0.0	0.0	INAP	14.0	0.0	0.0	0.0	INAP	1.7	33.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.0	2.0	50.7
483	2005-03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
484	2005-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
485	2005-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
486	2005-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
487	2005-07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
488	2005-08	22.0	INAP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
489	2005-09	5.8	3.3	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	6.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
490	2005-10	INAP	INAP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
491	2005-11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
492	2005-12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	INAP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
493	2006-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
494	2006-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
495	2006-03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
496	2006-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
497	2006-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
498	2006-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
499	2006-07	1.4	1.9	0.5	2.7	8.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
500	2006-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
501	2006-09	40.0	14.5	17.0	0.5	INAP	29.5	51.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
502	2006-10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
503	2006-11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
504	2006-12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
505	2007-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
506	2007-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
507	2007-03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
508	2007-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
509	2007-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
510	2007-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 32. Datos de precipitación de la estación climatológica Rayón, Sonora.

De los Datos de la red de pluviógrafos de la *UNISON*, se utilizaron de 14 estaciones del año 2005 de 14. El archivo contiene fecha, estación y precipitación, además, otros parámetros como temperatura del suelo a cada hora (figura 33).

Year	Day	G130	G131	G132	G133	G134	G135	G136	G138	G139	G140	G143	G144	G146	G147
2005	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	2	7.112	7.112	14.986	8.382	11.938	9.652	5.588	18.542	15.24	15.494	5.635	6.604	17.272	14.732
2005	3	10.668	15.748	27.178	19.812	16.002	10.16	6.35	20.828	20.828	18.542	6.37	6.35	24.13	23.622
2005	4	19.05	13.462	22.098	20.574	19.812	14.732	10.414	4.064	17.018	36.83	9.31	10.414	22.606	10.414
2005	5	0.254	0	0	0	0	0.254	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	10	0	0	0	0	0.762	0.762	0	0	1.016	1.778	0	0	0	0
2005	11	0	0	0	0	0	13.208	14.224	0	5.334	24.13	0	0	0	0
2005	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.508	0	0	0	0
2005	13	0	0	0	0	0	1.778	0.508	0	0	0	0	0	0	0
2005	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	16	0	0	0	0	0	5.588	9.398	0	6.35	13.462	0	0	0	0
2005	17	0	0	0	0	0	1.016	1.27	0	0.254	0.508	0	0	0	0
2005	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.254	0	0	0	0
2005	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	20	0	10.922	0.508	0	0.762	0	0	0.508	0	0	8.085	0	0.254	0
2005	21	9.906	0	14.732	9.398	11.43	0	0	8.382	0	0	0	12.192	10.668	6.35
2005	22	0	1.016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	23	0.508	0	0.254	1.27	0	0	0	0	0	0	0	2.286	0	1.524
2005	24	0	0	0	0.254	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	25	0	5.588	0	0	0	2.794	0.254	0	18.796	20.828	8.82	0	0	0
2005	26	7.62	0.254	13.716	16.002	12.192	22.606	1.524	8.128	16.002	17.272	0.98	5.08	1.524	11.938
2005	27	0.254	0	0.254	0	2.286	1.524	5.334	0	3.81	0.762	0	0.762	27.432	7.874
2005	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.874	0
2005	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 33. Datos de precipitación de las estaciones operadas por la UNISON.

3.8.3.6 Datos del sistema satelital

Consisten en imágenes digitales y se obtuvieron de la página de internet del sistema TRMM. Se utilizó la versión 7 de los productos TRMM 3B42 y 3B43 publicada el 22 de mayo de 2012.

Tabla 4. Resumen de sensor TRMM de precipitación.

	Radiómetro de microondas (TMI)	Radar (PR)	Visible e Infrarrojo
			Radiómetro (VIRS)
Frecuencias	10.7, 19.3, 21.3, 37.0 y 85.5 GHz	13.8 GHz	0.63, 1.61, 3.75, 10.8 y 12 μ m
Resolución	11 x 8 km campo de visión a 37 GHz	5 km y 250 m resolución vertical	2.5 km
Exploración	De exploración cónica (530 inc.)	Escaneo Cross-track	Escaneo Cross-track
Ancho de barrido	880-km franja	250 km franja	830 km franja

Constituyen el producto más importante para la estimación de precipitación, que se realiza con un sistema de microondas activos y pasivos, operados a una órbita baja con inclinación de 35°. En la tabla 4 se presentan datos del sensor TRMM.

La altitud de la órbita TRMM es de 350 km y la inclinación de 35 °, de modo que el satélite cubre los trópicos y las porciones del sur de Japón y los Estados Unidos.

3.8.3.7 Descarga de los datos

Para descargar los datos se accede a la página web pmm.nasa.gov/data-acces, donde se selecciona “TRMM data downloads & documentation”, con lo que se despliegan las opciones para elegir los productos disponibles.

Para descargar estimaciones de precipitación diaria, se elige el producto “3B42 RT Derived Daily Product”, donde es necesario especificar las coordenadas del sitio, el período de información requerido y el formato de descarga, que en este caso, fue Giovanni.

En las figuras 34 a 39 se muestran las ventanas que se despliegan en el portal para el procedimiento de descarga de los datos.

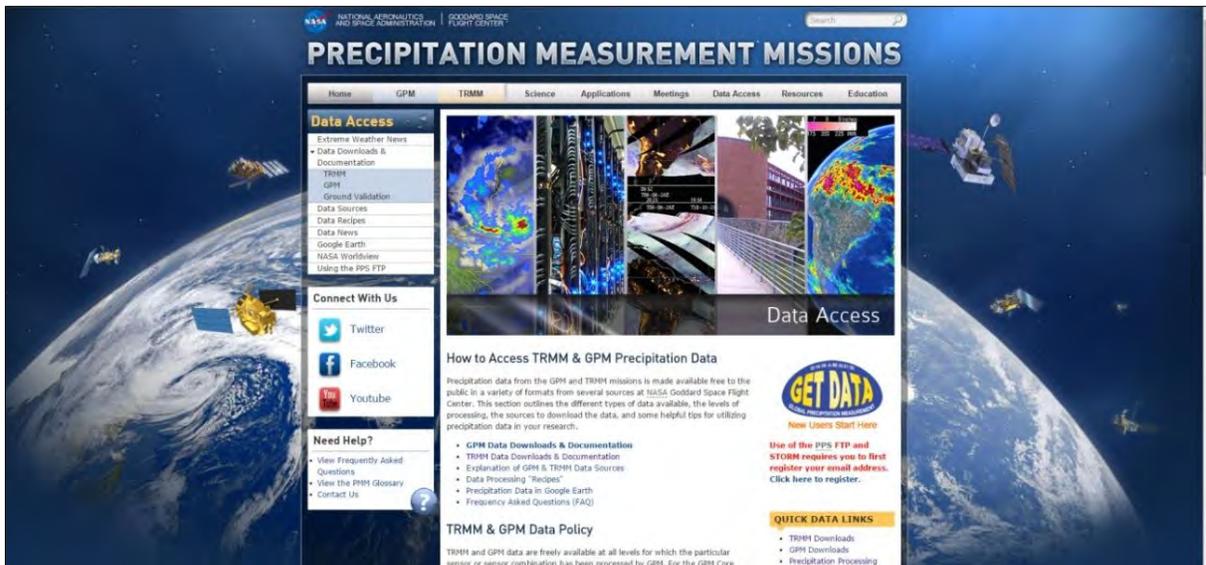


Figura 34. Portal de acceso para la descarga de datos de TRMM.

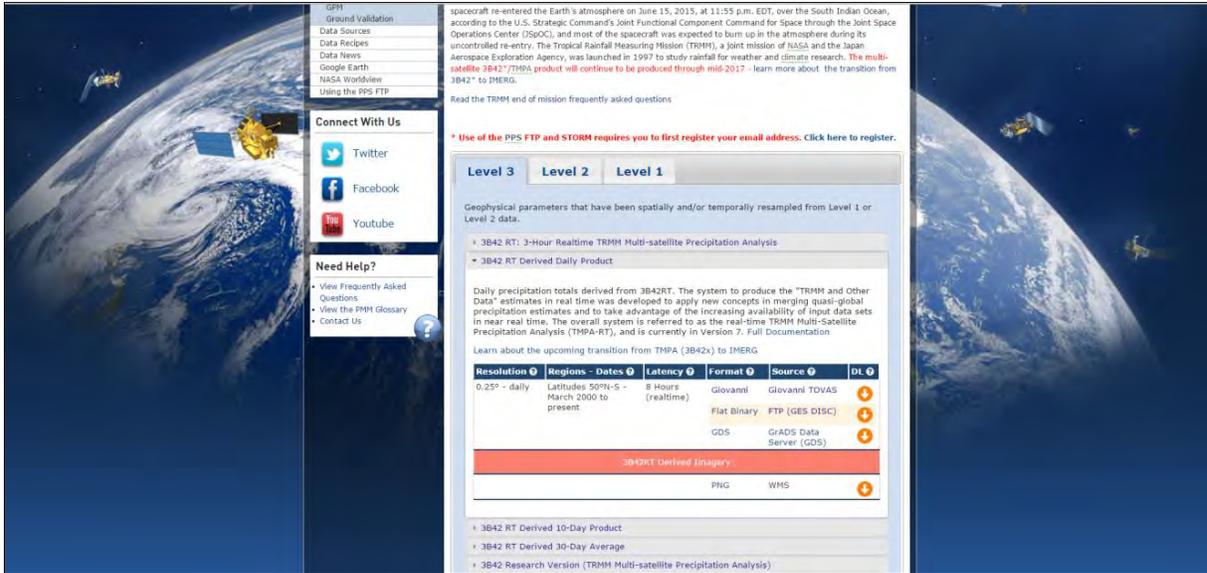


Figura 35. Opciones para la descarga de datos de TRMM.

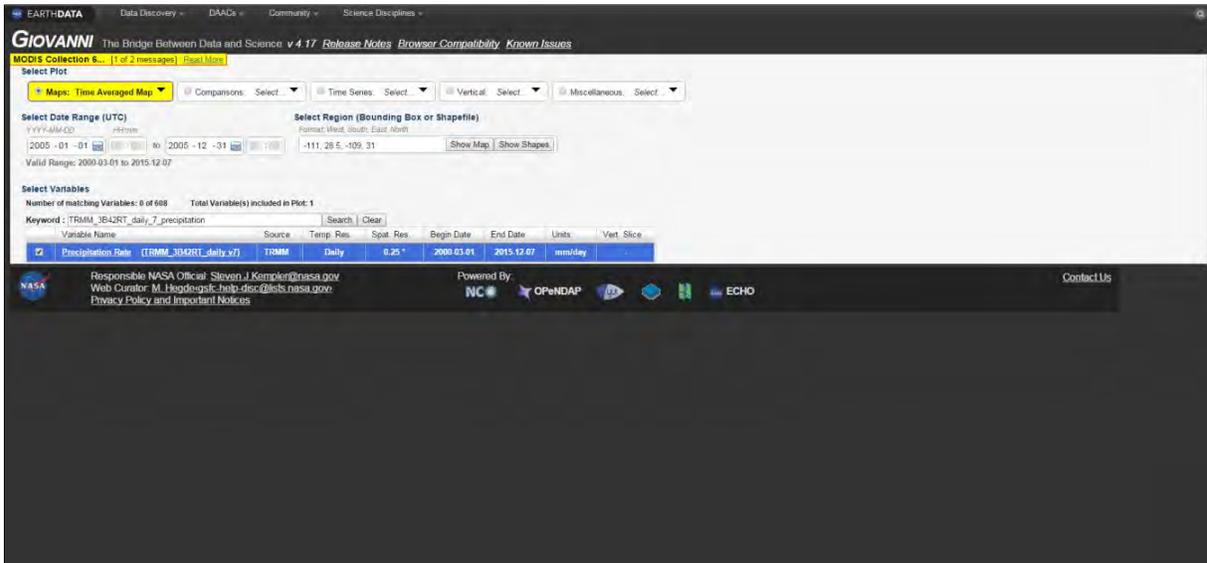


Figura 36. Información requerida para la descarga de datos.

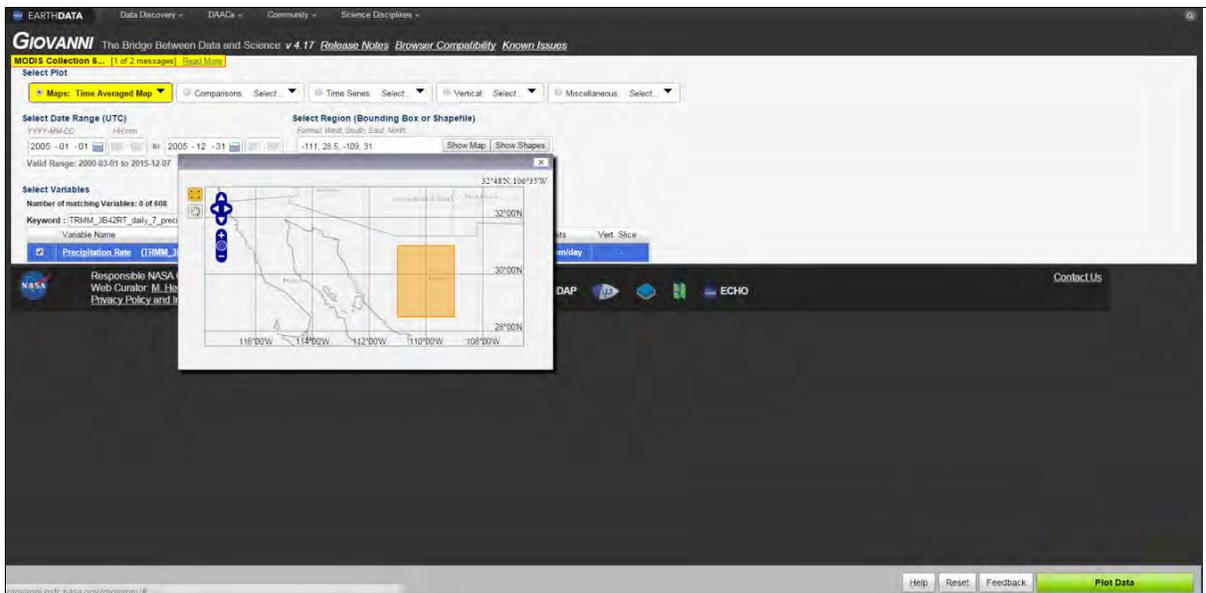


Figura 37. Área de la que se descargarán datos que comprende el sitio de estudio.

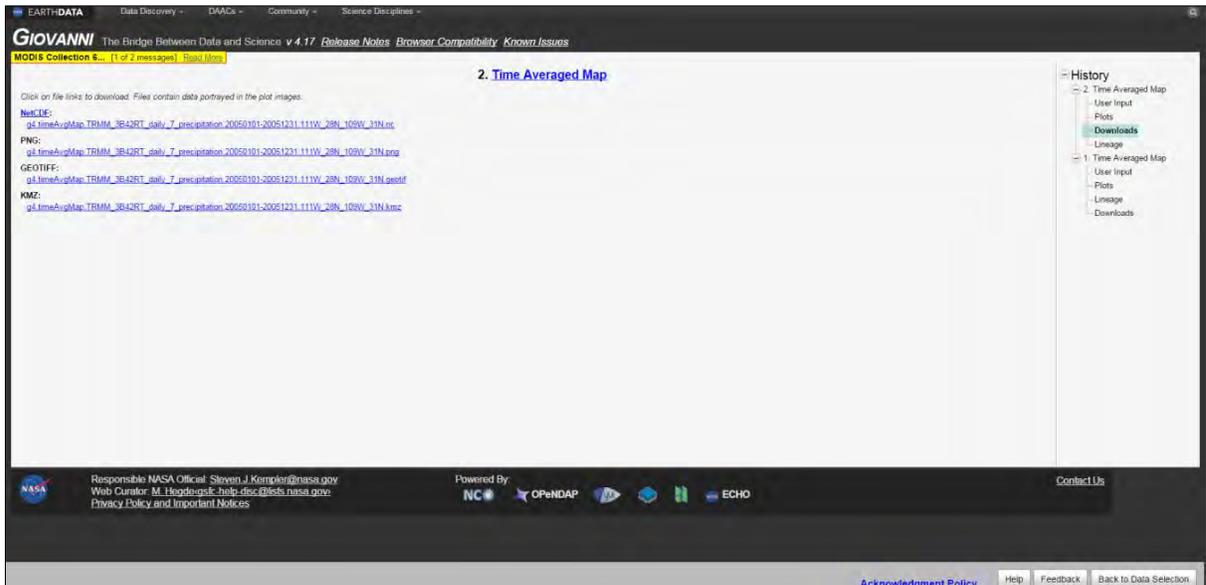


Figura 38. Opciones de formatos de descarga de la información de TRMM.

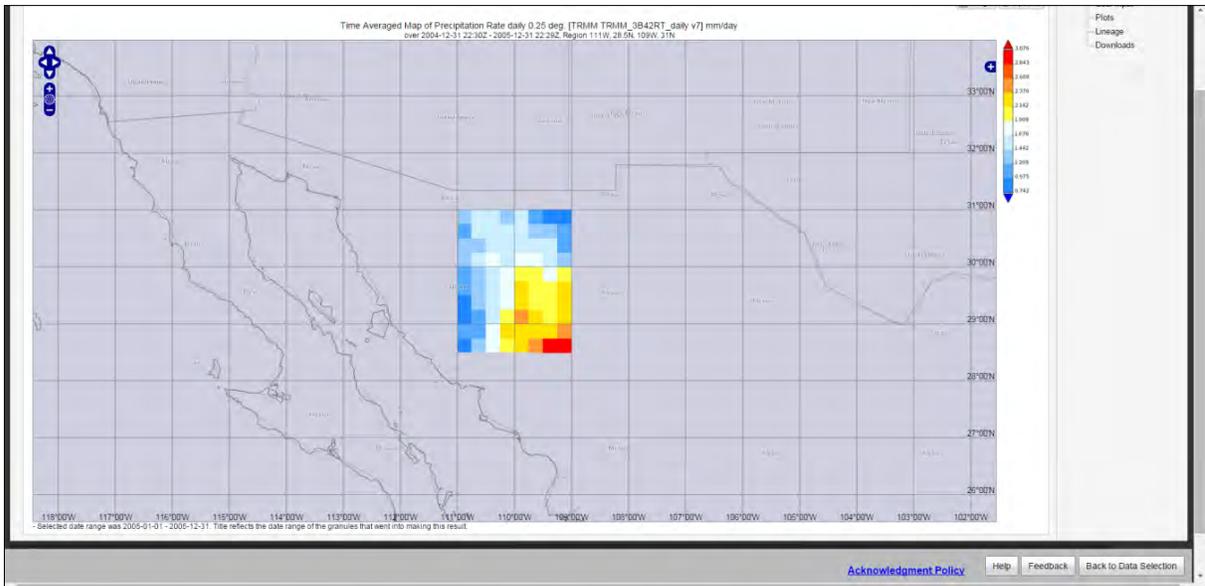


Figura 39. Pixeles de TRMM en los que se estimó la precipitación.

3.8.4 Habilitación de los datos

Debido a que el modelo no fue diseñado para trabajar con el formato de la información disponible en México, los datos tienen que ser adaptados en diferente grado a los requerimientos de la interfaz AGWA.

Modelo digital de elevaciones

Se crea un Fill Grid en ArcGIS, con lo que se hace compatible con la interfaz AGWA. Con la información de referencia espacial Zona UTM 12N, WGS84. Una vez en el SIG, se proporciona la información solicitada por la interfaz datum, las unidades de distancia y la zona UTM. Se añaden los campos “Value” y “Count” requeridos como parte del proceso del modelo. En las figuras 40 y 41 se muestra el área rectangular que comprende la Cuenca del Río San Miguel, Sonora.

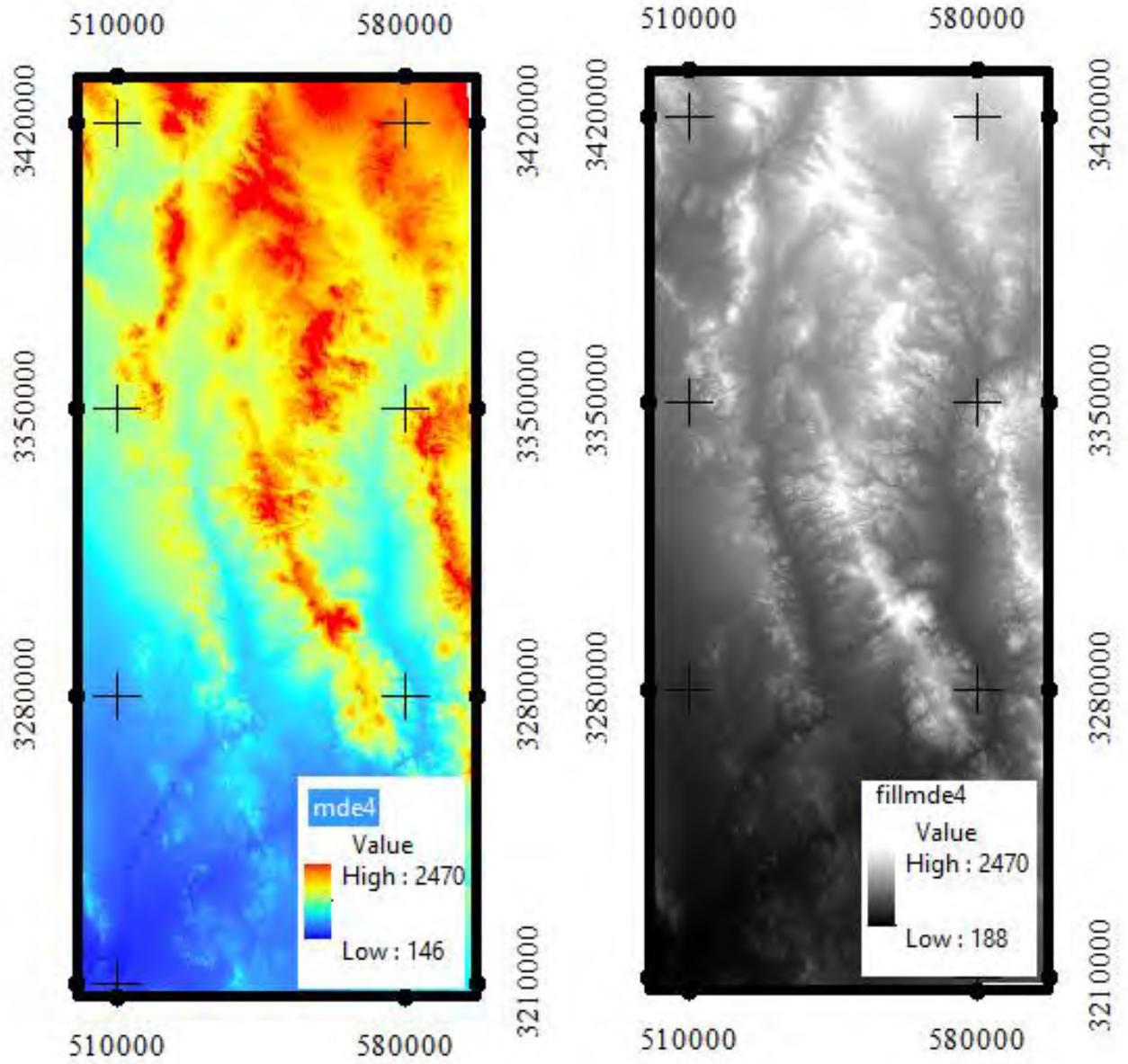


Figura 40. Modelo digital de elevación y Fill Grid.

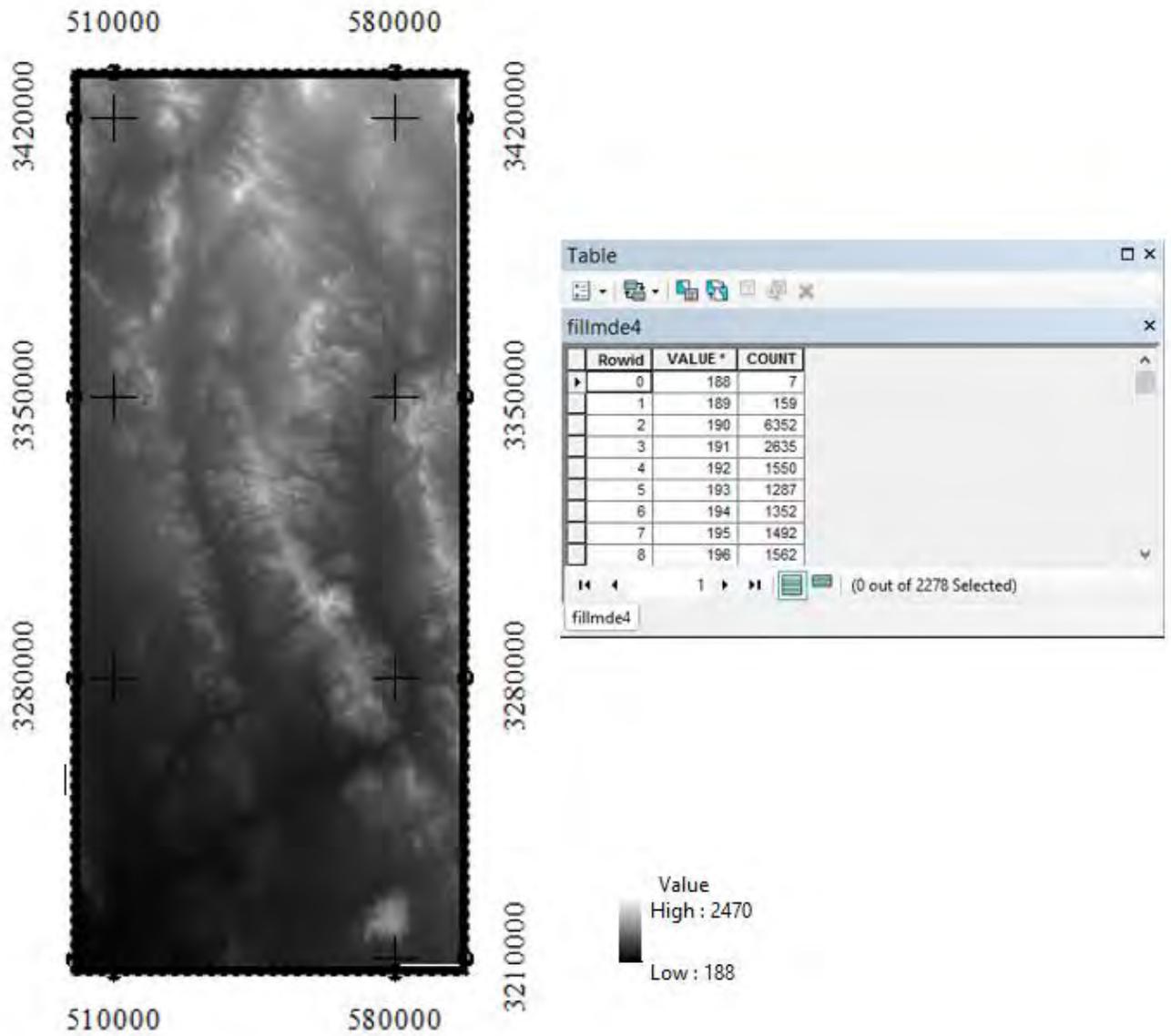


Figura 41. Tabla de atributos del Modelo digital de elevación y tabla de atributos del sitio de estudio.

Cobertura de suelo y vegetación

El análisis de las bases de datos, permitió conocer que la clasificación de suelos utilizada por el sistema AGWA, se deriva de la base de datos creada por el proyecto North American Landscape Characterization (NALC); debido a que los datos obtenidos de INEGI no son compatibles con la información requerida por AGWA, se realizó una reclasificación.

La información de uso de cobertura de suelo y vegetación que maneja AGWA se encuentra en el archivo “nalc_lut.dbf” y la tabla de atributos del *grid* de cobertura de suelo seleccionado contiene dos campos: *value* y *count*. El primero se asoció con el valor de “class” o “clase” de la tabla contenida en el archivo “nalc_lut.dbf”.

En la tabla 5 se muestra la clasificación ya relacionada según sus características.

Tabla 5. Clasificación de cobertura de suelo.

Clase	Nombre (INEGI)	Name (NALC)
7	Agricultura de riego	Agriculture
8	Área urbana	Urban
2	Bosque de encino	Oak Woodland
1	Bosque de pino	Forest
5	Matorral crasicaule	Desert Scrub
5	Matorral desértico microfolio	Desert Scrub
5	Matorral sacrocaule	Desert Scrub
6	Matorral Subtropical	Riparian
3	Mezquital	Mesquite Woodland
4	Pastizal natural	Grassland

Edafología

La habilitación de la información edafológica de la cuenca, se basó en la descripción de las unidades de clasificación los suelos que proporciona INEGI en su cartografía escala 1:250,000 las cuales se relacionaron con las correspondientes de la tabla FAO_World. En la figura 42 se muestra un plano de suelos habilitado para AGWA.

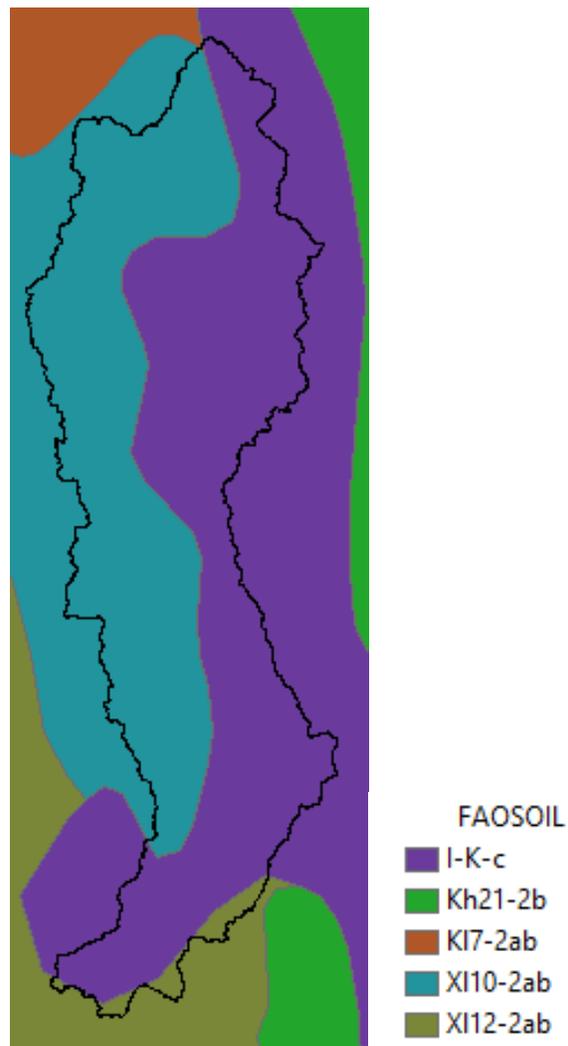


Figura 42. Tipo de suelo según la FAO.

Tabla 6. Clasificación de tipo de suelo.

FAOSOIL	INEGI
l– K c	LEPTOSOL, FLUVIOSOL, REGOSOL, PHAEZEM
Kh21-2b	FLUVIOSOL, LEPTOSOL, CALCISOL
Kl7-2ab	LEPTOSOL, LUVIOSOL, REGOSOL
Xl10-2ab	REGOSOL, PLANOSOL, LEPTSOL, CAMBISOL, PLANOSOL, PHAEZEM
Xl12-2ab	REGOSOL, LEPTOSOL, PHAEZEM

Productos de precipitación

Del análisis de las bases de datos de AGWA, se observó que la precipitación se almacena en un archivo binario en el que se ordenan los datos en forma secuencial por año, día y una columna adicional por cada sitio de medida de precipitación a utilizar en el modelo. La fecha está en días del calendario juliano y la precipitación en milímetros.

La información de precipitación, está relacionada con una tabla (figura 43) con la localización espacial de los sitios de medida, ubicados en una proyección UTM, con Datum WGS84, Zona 12R en el modelo en ArcMAP.

ID	x	y
G130	531465	3323298
G131	532166	3317608
G132	546347	3314298
G133	539130	3305014
G134	551857	3343293
G135	546349	3346966
G136	532579	3353405
G138	570690	3324453
G139	568744	3336421
G140	571478	3352076
G143	542590	3356533
G144	530134	3341169
G146	551091	3315638
G147	544811	3290182

Figura 43. Ubicación de las estaciones UNISON

Al nombre o ID de las estaciones se le asigna como primer carácter del nombre la letra G (figura 44), con lo que el encabezado es reconocido como nombre de las estaciones y no como un dato de precipitación. Una vez que se edita el archivo de precipitación y se actualiza con la información requerida, los datos se guardan en la carpeta de “datafiles” (c:/ agwa / datafiles) donde se le asigna la extensión .dbf que corresponde a la base de datos. Para los datos de temperatura se procede de la misma manera, solo que se agrega la extensión .tmp.

Year	Day	G130	G131	G132	G133	G134	G135	G136	G138	G139	G140	G143	G144	G146	G147
2005	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	2	7.112	7.112	14.986	8.382	11.938	9.652	5.588	18.542	15.24	15.494	5.635	6.604	17.272	14.732
2005	3	10.668	15.748	27.178	19.812	16.002	10.16	6.35	20.828	20.828	18.542	6.37	6.35	24.13	23.622
2005	4	19.05	13.462	22.098	20.574	19.812	14.732	10.414	4.064	17.018	36.83	9.31	10.414	22.606	10.414
2005	5	0.254	0	0	0	0	0.254	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	10	0	0	0	0	0.762	0.762	0	0	1.016	1.778	0	0	0	0
2005	11	0	0	0	0	0	0	13.208	14.224	0	5.334	24.13	0	0	0
2005	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.508	0	0	0	0
2005	13	0	0	0	0	0	1.778	0.508	0	0	0	0	0	0	0
2005	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	16	0	0	0	0	0	5.588	9.398	0	6.35	13.462	0	0	0	0
2005	17	0	0	0	0	0	1.016	1.27	0	0.254	0.508	0	0	0	0
2005	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.254	0	0	0	0
2005	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	20	0	10.922	0.508	0	0.762	0	0	0.508	0	0	8.085	0	0.254	0
2005	21	9.906	0	14.732	9.398	11.43	0	0	8.382	0	0	0	12.192	10.668	6.35
2005	22	0	1.016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 44. Estructura de los datos de precipitación requerida en AGWA.

Estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional

Para poder utilizar los datos de precipitación del SMN en AGWA, se ordenaron los datos en un tabla, donde cada estación comprendía una columna, con los datos ordenados del 1 de enero (día 1 del calendario juliano) al 31 de diciembre (día 365 del calendario juliano). Los encabezados se crearon de acuerdo al formato requerido en AGWA.

Estaciones de la red de pluviógrafos UNISON

Los datos de precipitación de las estaciones operadas por la UNISON, consisten en datos de pluviógrafos, dispuestos en forma horaria y se guardaron en tablas de Excel, por lo que se eliminó la información innecesaria y se adecuaron los archivos al formato de AGWA.

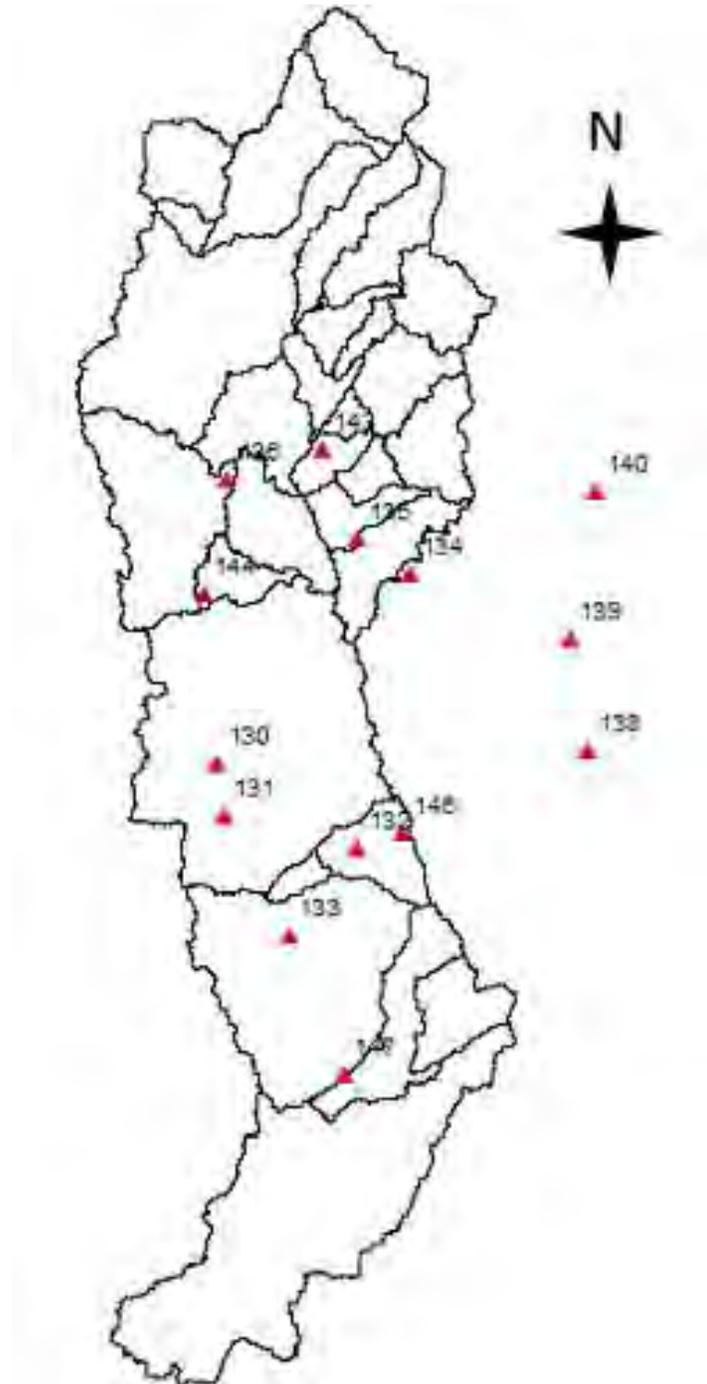


Figura 45. Mapa de ubicación de estaciones.

Datos del sensor TRMM

En la figura 46 se muestran los píxeles de precipitación de TRMM superpuestos en la cuenca del Río San Miguel. Como se puede apreciar, se tomaron 10 píxeles como representativos de la precipitación en la cuenca y se determinó la posición del centroide de cada píxel para manejarlo como si fuera un sitio de medida de precipitación

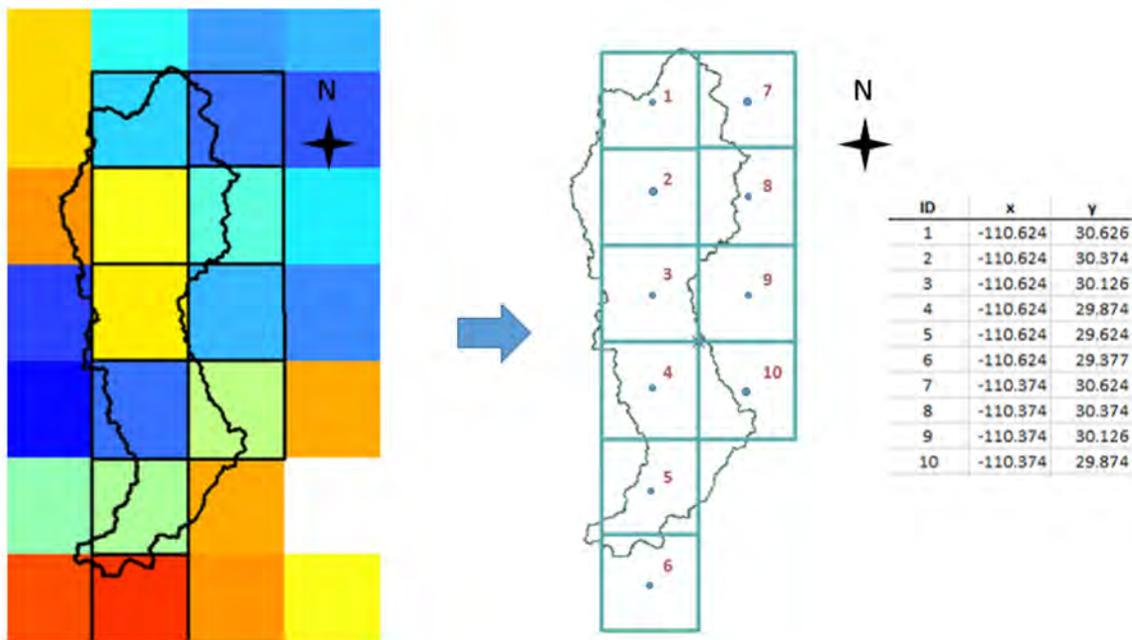


Figura 46. Adaptación de datos TRMM.

Para distribuir la precipitación espacialmente en toda la cuenca, se utilizó el método de Isoyetas (figura 47), que es el método apropiado de acuerdo a las condiciones topográficas de la vertiente.

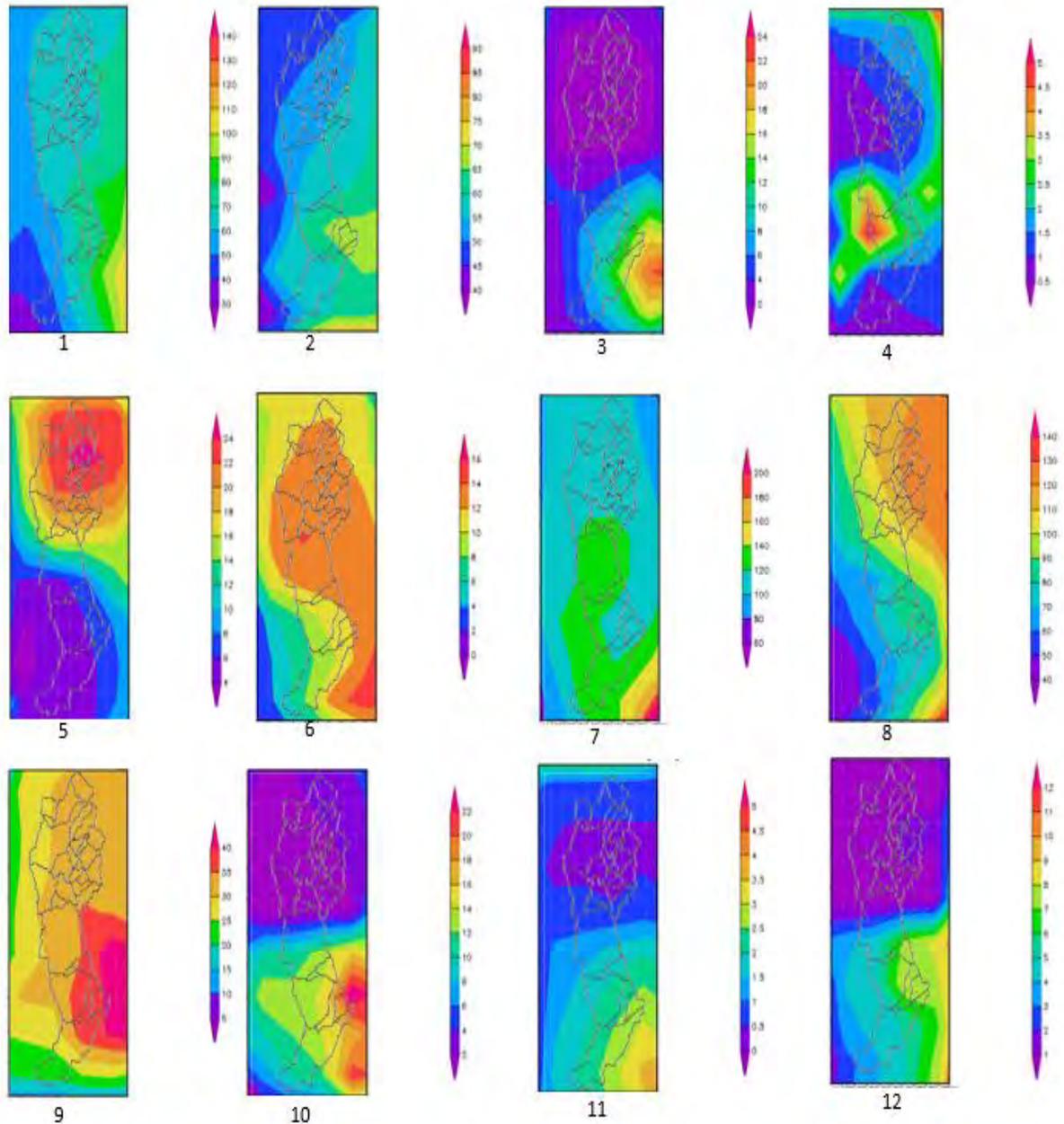


Figura 47. Precipitación TRMM de enero (1) a diciembre (12) de 2005.

Una vez creada la base de datos, la operación de AGWA es relativamente sencilla. Para iniciar, se aloja la base de datos dentro de la carpeta C:\agwa\projects, donde la información contenida estará compuesta de capas o tablas.

3.8.5 Almacenamiento de los datos

Una vez adaptados los valores de precipitación de las fuentes: Estaciones climatológicas del S.M.N., Estaciones UNISON y Datos del sensor TRMM, a la estructura requerida por AGWA, la base de datos se aloja en C:\ agwa \projects en formato tabular o en capas.

Bases de datos primarias y secundarias

Las bases de datos de soporte para el modelo hidrológico, ya ordenadas y adecuadas al formato de AGWA, se pueden clasificar en: *primarias* y *secundarias*.

a) Bases de datos primarias

Las bases de datos *primarias* (tabla 7) consisten en la información que se genera a partir de trabajos de campo y agencias de gobierno, entre otras. Son los datos de entrada en bruto, que aún no se han trabajado con el modelo y que han sido manipulado o editado por algún sistema informático para hacerlos utilizables en el modelo hidrológico. En algunos casos se requiere de un proceso especializado, detallado y minucioso, para que el sistema informático pueda procesar los datos, por lo que se recomienda leer el manual del modelo para identificar sus requerimientos, antes de editar y modificar cualquier archivo.

Tabla 7. Datos primarios de entrada al modelo AGWA.

Datos fuente	Tipo	Datos primarios
Modelo digital de elevación de INEGI	Grid	Porción correspondiente al sitio de estudio del <i>Continuo de Elevaciones Mexicano</i> disponible en INEGI
Datos de precipitación	Tablas	Registros del Servicio Meteorológico Nacional
		Datos de pluviógrafos operados por la UNISON
		Datos satelitales del Sistema TRMM
Uso de suelos y vegetación (INEGI)	Shapefile	Tabla de atributos de la cobertura vegetal reclasificados
Tipo de suelo (INEGI)	Shapefile	Tipos de suelo obtenidos de INEGI, adecuados y reclasificados de acuerdo a FAO

b) Bases de datos secundarias

Las bases de datos secundarias son las que crea el modelo durante el procesamiento, a partir de la base de datos primaria. Consisten en imágenes digitales como la *delimitación de la cuenca, dirección de flujo, acumulación de flujo, red de drenaje* y todos los *grid* o *mallas* resultantes de las corridas del modelo.

3.8.6 Corridas preliminares del modelo

Es altamente recomendable llevar a cabo corridas preliminares del modelo con el fin de verificar que la estructura de los datos esté correcta, aun cuando en el proceso de levantamiento en campo o gabinete, proceso y captura, se haya llevado a cabo un estricto control de calidad.

En esta etapa de la modelación de la cuenca, se obtuvieron resultados sobre la *cantidad de agua, producción de sedimentos, escurrimientos, evapotranspiración y percolación*. Estos resultados iniciales, se presentaron en mapas y fueron analizados para tomar decisiones sobre los parámetros de modelación utilizados y la calidad de los datos de entrada.

Antes de comenzar la modelación se requiere proponer las carpetas de trabajo y de archivos temporales (figura 48) generados por el modelo en AGWA Tools > Other Options > AGWA Preferences

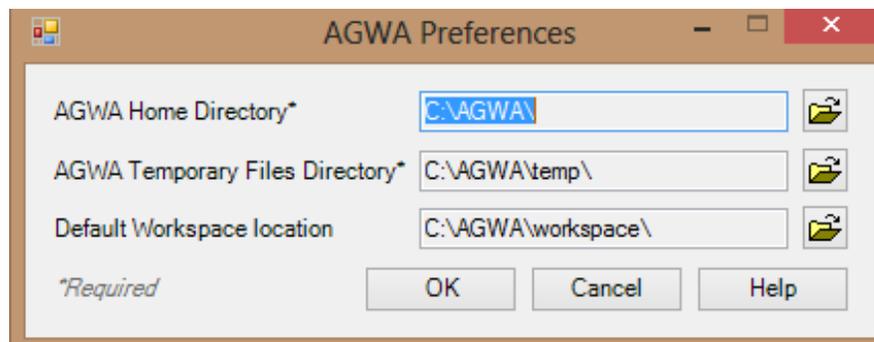


Figura 48. Carpetas de trabajo.

3.8.7 Proceso de modelación

Como se estableció en al inicio del capítulo, la cuenca del Río San Miguel se desarrollará con el modelo SWAT, se ejecuta sobre el sistema AGWA y el procedimiento consiste en los seis pasos siguientes y que son descritos en este capítulo.

Pasos del procedimiento de modelación con SWAT (figura 49):

- a) Delineación de la cuenca
- b) Discretización de la cuenca
- c) Parametrización (uso y tipo de suelo)
- d) Selección del modelo de precipitación
- e) Preferencias de resultados
- f) Opciones de simulación
- g) Visualización resultados

a) Delineación de la cuenca

La delineación de la cuenca consiste en obtener el parteaguas de la cuenca de estudio, acción que el algoritmo de AGWA realiza a partir del modelo digital de elevaciones, que en su extensión excede suficientemente el límite de la cuenca para identificar las cotas topográficas que delimitan a la vertiente. En las herramientas de AGWA (*AGWA Tools*) (figura 49), se selecciona Opciones de delinación (Options delineation)

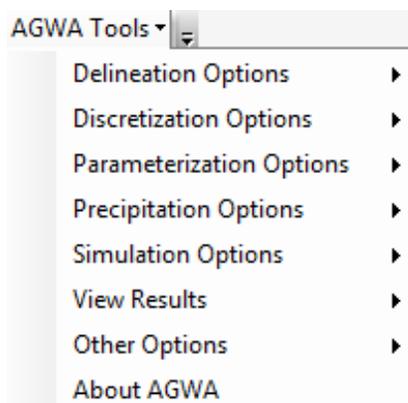


Figura 49. Herramientas de AGWA para el proceso de modelación.

Se despliega la ventana de la figura 50, donde se indican la carpeta de trabajo (*Workspace*), el nombre de la *Geodatabase*, y los demás datos generados a partir del MDE. A partir del modelo digital de elevación se generaron *grids* de dirección de flujo y de flujo acumulado.

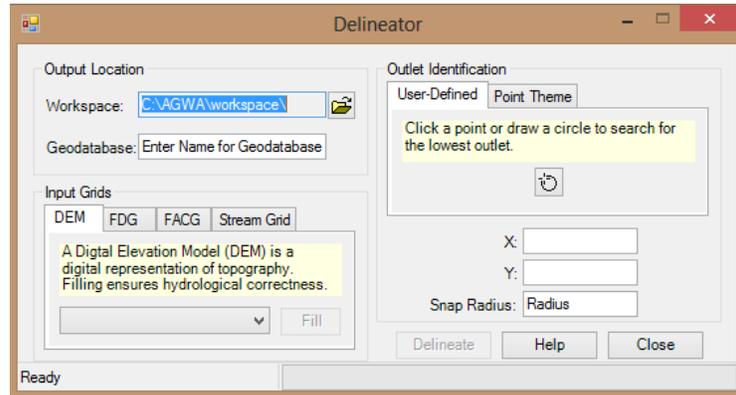


Figura 50. Ventana de delineación de la cuenca.

Los archivos que se generan a partir del proceso de delineación se muestran en la figura 51 y consisten en los siguientes:

Relleno o suavizado del DEM (fill). Se aplica un filtro de relleno (FDG) al modelo digital de elevaciones con el fin de rellenar huecos o picos en la topografía digital.

Dirección de flujo (flow direction). Es el segundo archivo generado. Consiste en una malla (FDG, por sus siglas en inglés) que representa la dirección del flujo superficial en la cuenca.

Acumulación de flujo (flow accumulation). El tercer archivo que se produce y consiste en una malla o grid que representa las zonas topográficas en las que ocurre concentración de escurrimiento superficial (*FACG*, por sus siglas en inglés). Después de generar estas imágenes, se propone un umbral de área mínima, que determina la tolerancia en el trazo del parteaguas.

Finalmente, se selecciona el punto de salida de la cuenca, a partir del que se trazará el polígono que representa el límite de la vertiente, que en este caso, se seleccionó el punto de localización de la estación de aforos El Cajón, aunque también es posible utilizar un simulador de flujo o utilizar el archivo *stream Grid* generado por el modelo para buscar un punto de salida conveniente, que incluso puede ser aguas arriba o aguas abajo de la estación de aforo elegida.

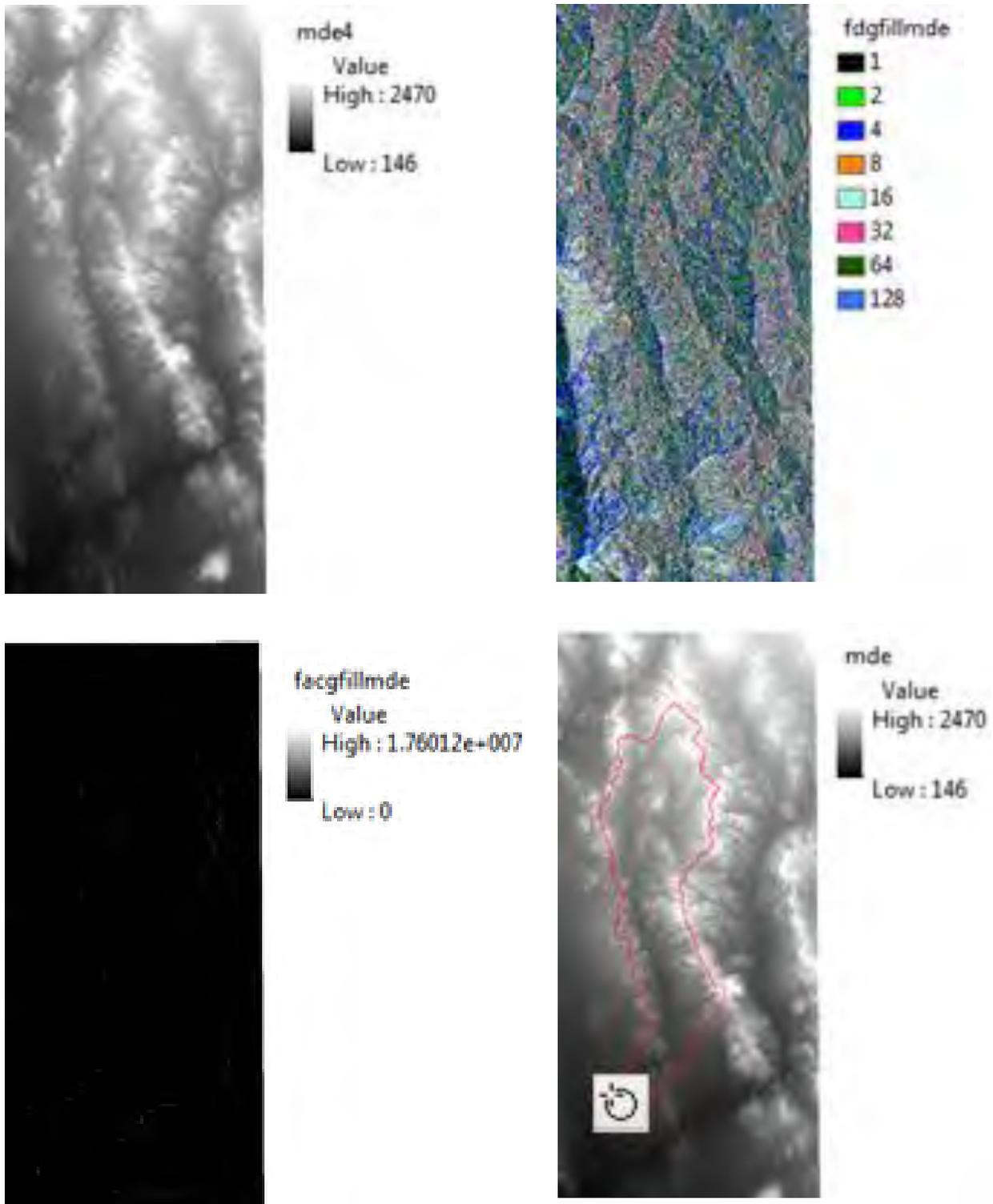


Figura 51. Proceso de delineación de la cuenca.

Con la imagen del parteaguas, puede crearse un polígono ráster que representa la superficie de la cuenca (figura 52).



Figura 52. Parteaguas de la cuenca del Río San Miguel, Sonora

b) Discretización de la cuenca

Este proceso consiste en la división de la cuenca en subcuencas. Se realiza a partir de los archivos del modelo digital de elevaciones relleno (fillmde4) y los rásters de dirección (fdgfillmde4) y acumulación de flujo (facgfillmde4) generados en el proceso de delimitación. Se debe definir un umbral de área de contribución (CSA), con el que se determina el número de cuencas en que se subdividirá la vertiente (figura 53).

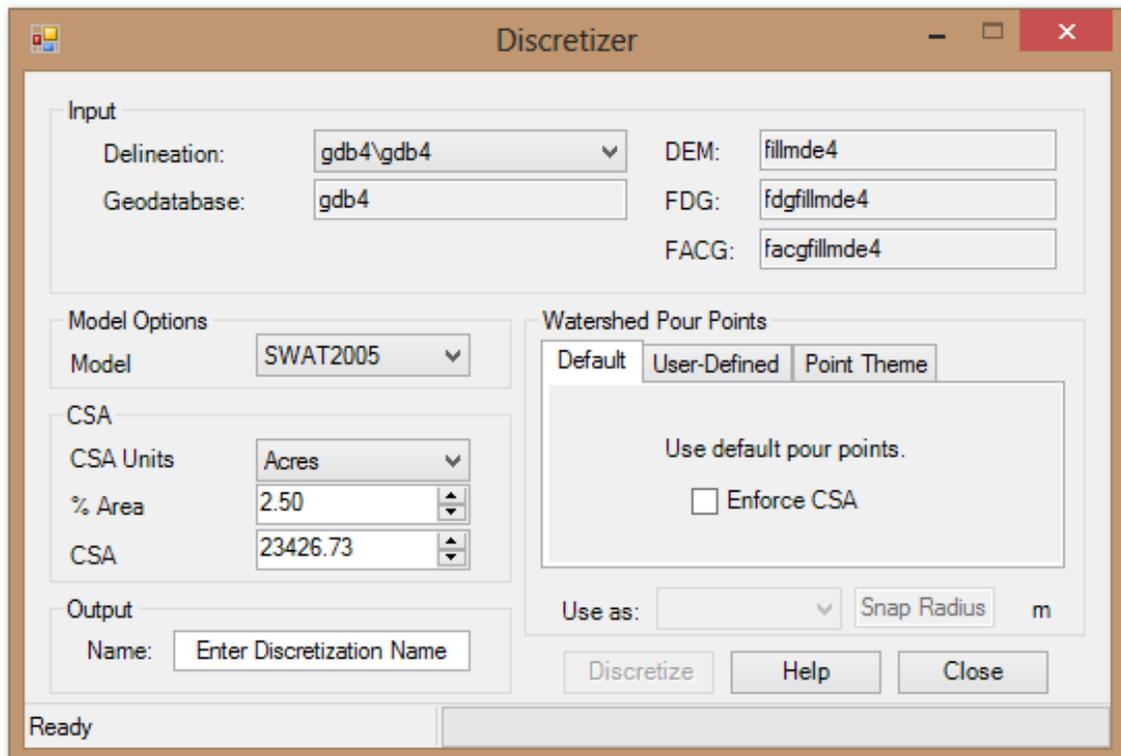


Figura 53. Ventana de discretización.

Se selecciona el modelo (SWAT) y el siguiente dato en alimentarse es el umbral de área mínima que se requiere antes de canalizarse el agua (CSA), esto define el número de subcuencas en las que puede ser dividida la cuenca. La aplicación propone 2.5% como valor de default de CSA.

En la figura 54 se muestra el resultado de la discretización con 3%, 2.5% y 1.8% en el mismo orden de izquierda a derecha y se puede observar que al disminuir el porcentaje de área obtenemos un mayor número de subcuencas.

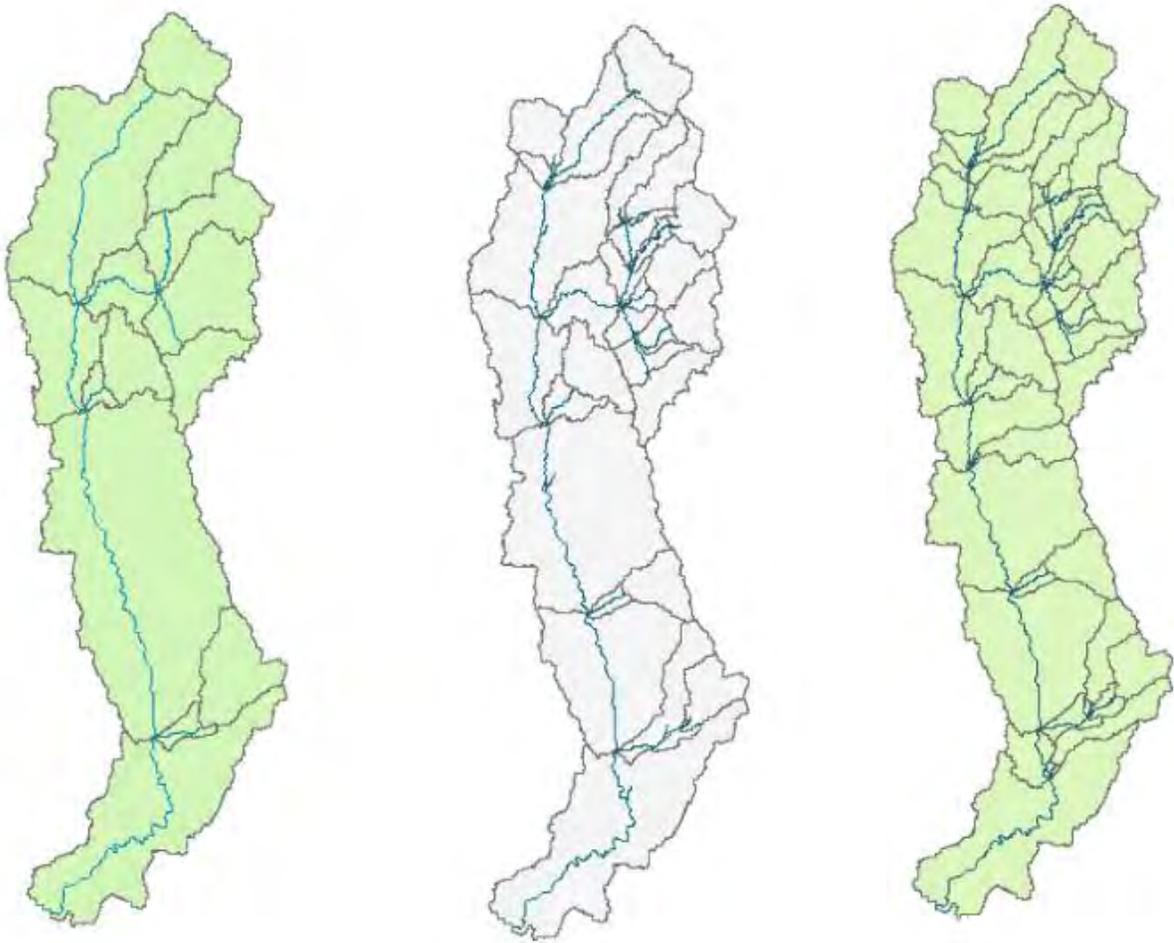


Figura 54. Subcuencas y flujo con diferentes valores de CSA.

c) Parametrización (uso y tipo de suelo)

La parametrización consiste en relacionar las tablas de datos de suelo y cobertura vegetal, de manera que el modelo identifique la información en base a las unidades de suelo de la región cortadas en una máscara con las mismas características espaciales del MDE.

En estas tablas, se encuentra la información que utilizará AGWA sobre la cobertura del suelo y el tipo de suelo, que serán utilizados para incluir su efecto en el comportamiento

hidrológico de la cuenca. Las unidades del suelo (figuras 55 y 56), las propiedades y parámetros hidráulicos están contenidos en los archivos FAO_World, FAO_properties, FAO_summ y kin_lut.dbf.

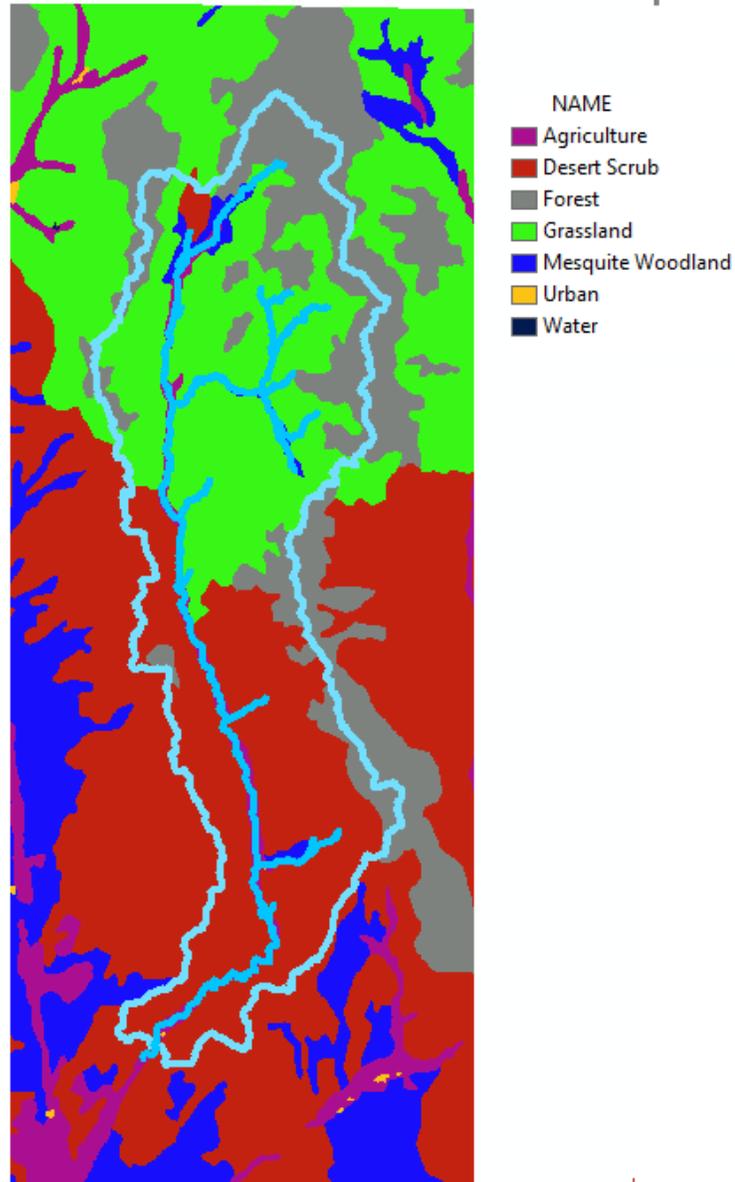


Figura 55. Uso de suelo.

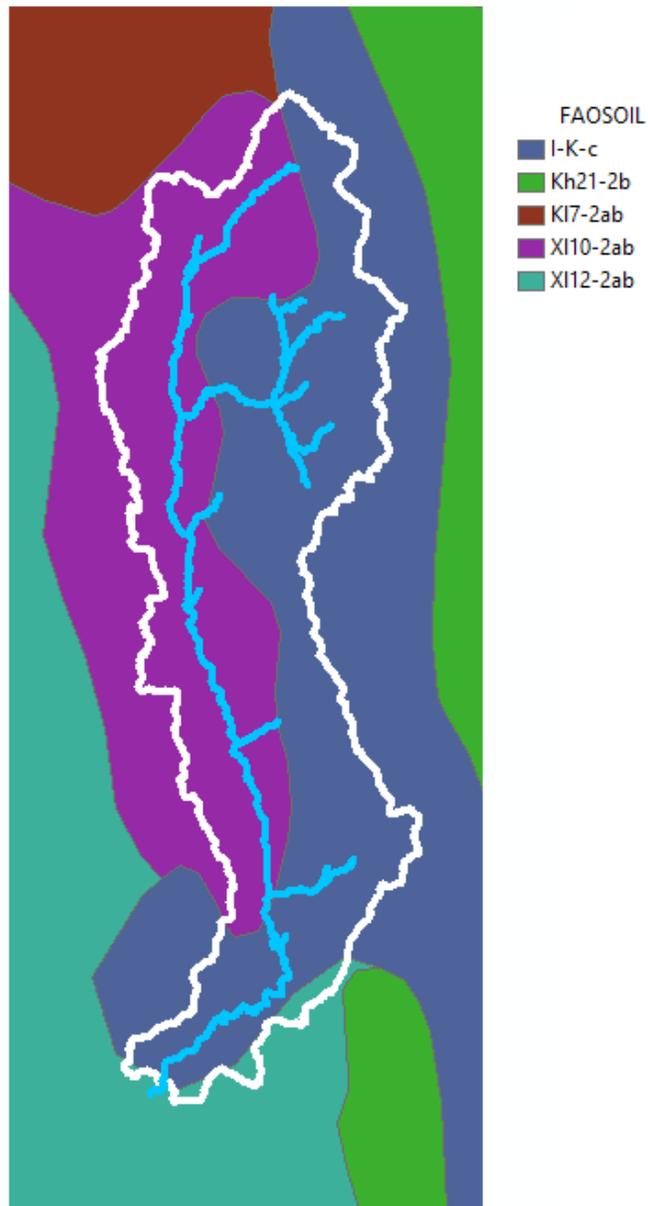


Figura 56. Tipo de suelo.

Al utilizar las capas y tablas de información, el modelo obtiene parámetros relacionados a cada unidad de diferente contenido dentro de la cuenca y lo despliega en un mapa con sus propiedades. La tabla se renombró como FAO-INEGI para identificar que es información obtenida de las cartas de INEGI con el formato de FAO.

Las principales propiedades y parámetros hidrológicos son: conductividad hidráulica (K_s), capacidad de retención de agua (AWC), grupos de suelos, capas de suelos y profundidad.

d) Selección del modelo de precipitación

En esta tesis, la variable más relevante es la precipitación, que consiste en tres productos: Datos de la red de pluviógrafos operados por la UNISON, lámina de precipitación medida con pluviómetros del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y estimaciones de precipitación satelital con TRMM.

Datos de la red de pluviógrafos operada por la UNISON

Los productos de precipitación de las estaciones de la Universidad de Sonora fueron convertidos al formato de los archivos “wgn”. Los datos se almacenaron en el archivo *estuni.wgn* y contienen la información de los sitios de medida localizados dentro y fuera de la Cuenca del Río San Miguel (figura 57).

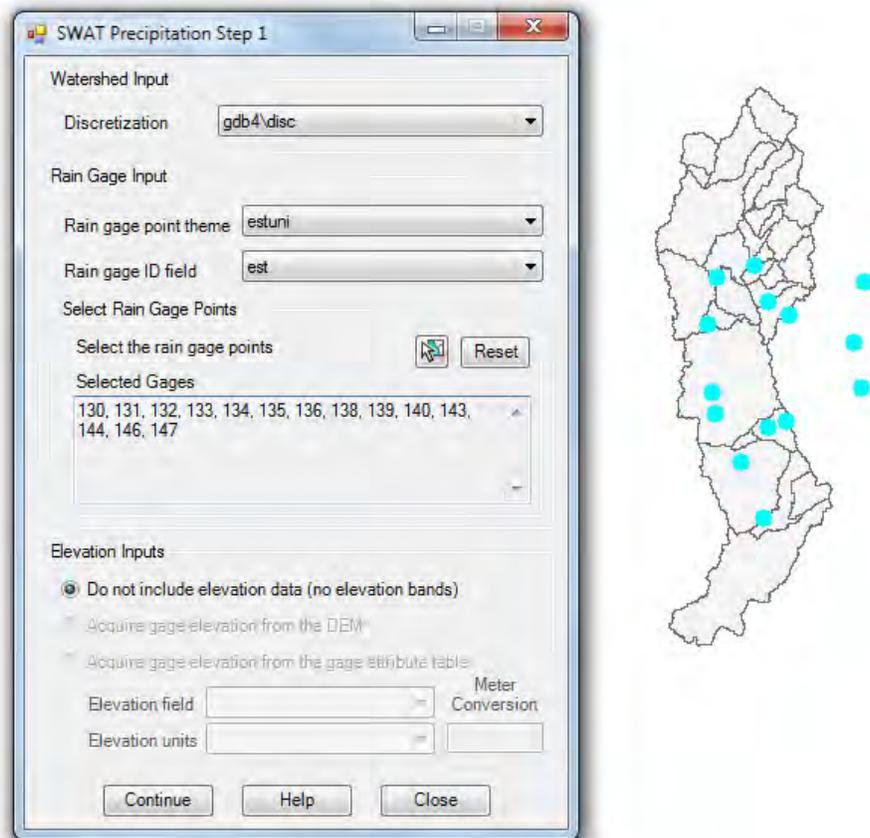


Figura 57. Archivo de estaciones de la red de pluviógrafos UNISON.

Datos de estaciones climatológicas del SMN

Para alimentar los productos de precipitación de las estaciones del SMN, se procedió de manera similar al de las estaciones de la UNISON, incluyendo además la temperatura registrada en la estación.

Datos del sistema TRMM

A partir de los datos ráster, como se describe en el proceso de habilitación de los datos, se crearon las tablas de precipitación que serán utilizadas para la modelación con este producto.

Distribución espacial de la precipitación

AGWA ofrece opciones para el modelo de precipitación. Si se dispone de una red de estaciones de medida, los valores pueden distribuirse espacialmente por medio de polígonos de Thiessen. Si no se dispone de mucha información, puede utilizarse el procedimiento de precipitación uniforme, en donde sólo se requiere de datos de una o dos estaciones.

Para la modelación de la Cuenca del Río San Miguel, se utilizaron polígonos de Thiessen para distribuir la precipitación en la vertiente y los datos de precipitación obtenidos (figura 58) se almacenaron en la carpeta “rainfall” de AGWA.

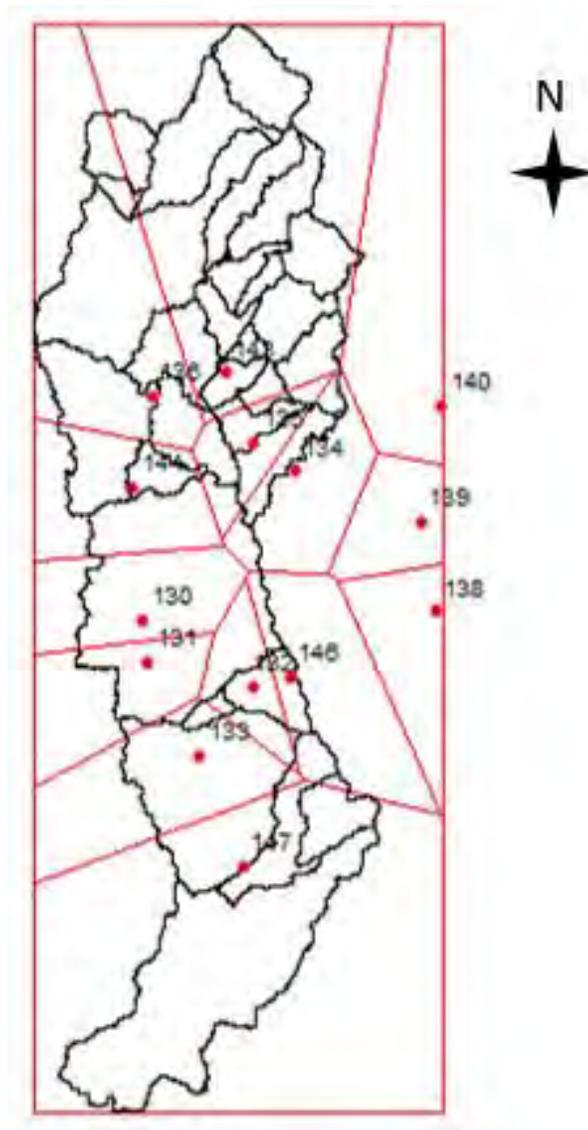


Figura 58. Polígonos de Thiessen.

e) Preferencias de Resultados

En este paso se asigna un nombre a la simulación, la fecha de inicio y el número de años a simular. También se elige la unidad de tiempo que desea modelarse, que puede ser diaria, mensual o anual. En esta tesis se modela el comportamiento de la cuenca durante el año 2005 (figura 59).

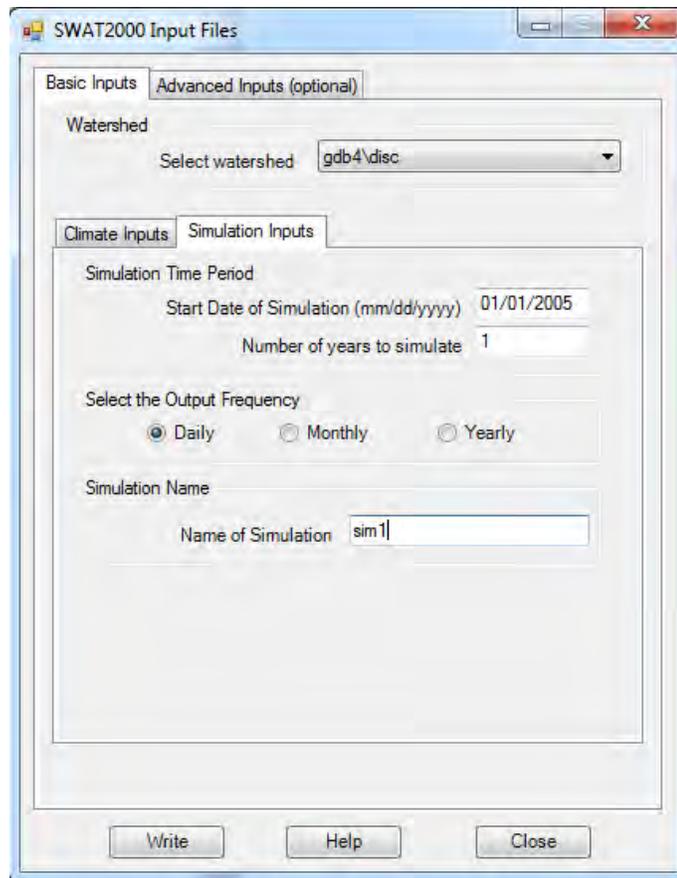


Figura 59. Periodo de modelación.

f) Opciones de Simulación

AGWA es compatible con los modelos *KINEROS2*, *SWAT2000* y *SWAT 2005* para seleccionar el modelo en la herramienta *AGWA* > *opciones de simulación* > *SWAT 2005*

f) Visualización de resultados

Para ver los resultados del modelo en *AGWA*, los resultados deben de ser importados y guardados en la misma carpeta de la simulación generada en formato *DBF* Los archivos de precipitación se basa en la distribución de las estaciones y *SWAT* permite generar una capa considerando la elevación.

IV. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos mediante el proceso de modelación dependen de los datos de entrada, que consisten en la topografía del terreno, el uso y el tipo de suelo y los productos de precipitación utilizados. Los tres primeros, son productos únicos disponibles en INEGI que fueron adecuados y reclasificados para que pudieran ser procesados en el sistema AGWA para el cálculo de parámetros que condicionan algunos de los elementos del Ciclo Hidrológico en la vertiente de estudio. En cambio, los productos de precipitación, provienen de diferentes fuentes y constituyen la variable más relevante del proceso de modelación de la cuenca, por lo que este capítulo inicia con el análisis de los productos de precipitación utilizados para posteriormente presentar y discutir los resultados de evapotranspiración, percolación, escurrimiento superficial, pérdidas por transmisión, producción de agua, producción de sedimentos y descarga en canales.

4.1 Productos de precipitación

Los productos de precipitación utilizados consistieron en observaciones diarias del Servicio Meteorológico Nacional, de la red de pluviógrafos operada por la UNISON y de las estimaciones diarias de TRMM del 1 de enero al 31 de diciembre de 2005 con los que se estructuraron las bases para alimentar al modelo.

4.2 Análisis de precipitación mensual

En la figura 60 se muestran los valores de precipitación de los tres productos a escala mensual del año de estudio. Se puede apreciar que durante los meses en que predomina la precipitación de tipo frontal, enero y febrero, existe poca diferencia entre los tres valores de precipitación; en enero, el valor de TRMM es inferior en 1.23% al registrado en la red de pluviógrafos y superior en 2.07 % al valor medido en la estación del SMN, mientras que en febrero, la estimación del sensor es menor en 1.19% a la medida del pluviógrafo y un 7.60% superior a la media en la estación climatológica. En los meses más secos, no obstante que la ocurrencia de precipitación es mínima, las diferencias son mayores entre las estimaciones del sensor TRMM y los medidos en los pluviógrafos y los pluviómetros; en marzo, el sensor estima un valor 87.31% y 55.60% respectivamente; en abril, la precipitación correspondiente es inferior en 23.77% y 12.52% y en mayo, se presenta la subestimación más grande del sensor con una diferencia de 98.73% y 188.14%. En junio, mes en el que inician las lluvias de verano, también se observa una subestimación del sensor de 22.31 % con relación al pluviógrafo y 33.24 % con respecto al pluviómetro. En los meses de lluvia más abundante, típicamente de tipo convectiva, la diferencia se reduce, resultando para julio una subestimación del sensor TRMM de 32.83% y 14.87% y para agosto, una subestimación de 17.98% y una sobreestimación de 28.77% con relación a los pluviógrafos y a los pluviómetros respectivamente. En septiembre, con una lámina de lluvia menor, se incrementa de nuevo la subestimación del sensor TRMM en un 118.35% y 192.79% en las láminas medidas. El valor de precipitación obtenido con el sensor en octubre fue superior en 25.44% e inferior en 145.10%, mientras que en noviembre, con menos precipitación registrada, se obtuvo una sobreestimación de 59.78% y 63.10%. Finalmente, en diciembre, el sensor no detectó precipitación, coincidiendo con los valores registrados en los pluviógrafos y en los pluviómetros.

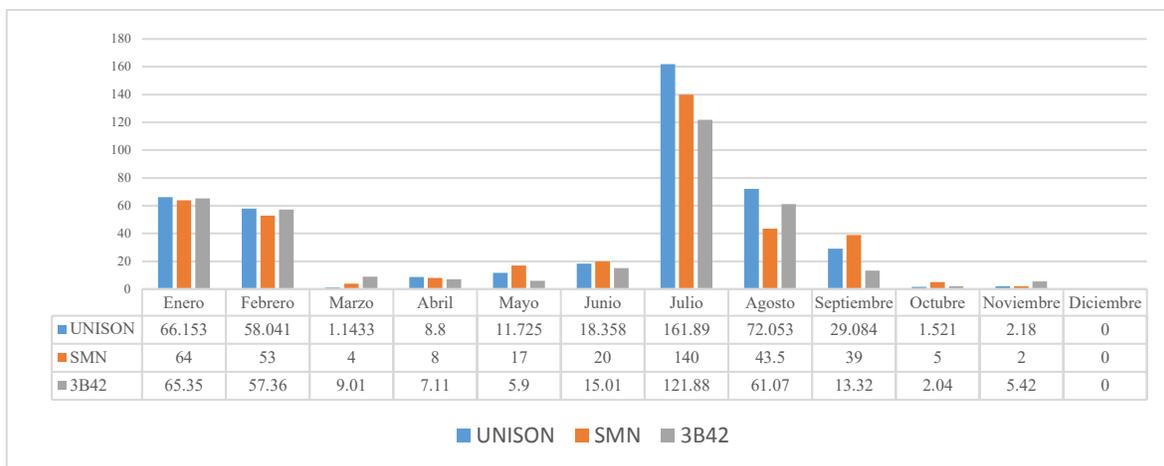


Figura 60. Comparación de los valores mensuales de precipitación de los tres productos.

Los valores mostrados en la gráfica sugieren que un factor que determina la precisión del sensor TRMM es la cantidad de medidas puntuales de comparación con el valor del píxel de TRMM. Si se compara el valor de TRMM con el promedio de los valores medidos en los pluviógrafos y los pluviómetros, lo que equivale a incrementar la densidad de puntos de medida, la diferencia se reduce. Así, para los doce meses del período de análisis, la diferencia es 0.42, 3.21, 71.46, -18.14, -143.43, -27.77, -23.85, 5.39, -155.57, -59.83, 61.44 y 0.00 mm.

Las estimaciones más precisas se observan durante los meses de enero, febrero y diciembre, en las que predomina la precipitación de tipo frontal, que se caracteriza por su relativamente baja intensidad, larga duración y amplia cobertura espacial. En los meses con láminas de precipitación reducida, el error se incrementa significativamente, por lo general subestimando los valores pequeños.

En los meses de julio y agosto, que son los de lluvia más abundante, típicamente de tipo convectiva, influenciada por el Monzón de Norteamérica, el sensor tiene a subestimar, lo que puede estar relacionado con las características de este tipo de lluvia, como son su corta duración, alta intensidad y su estructura, comúnmente en celdas de poca extensión territorial, que sin embargo, arroja valores comparables con los medidos en tierra.

4.3 Distribución espacial de la precipitación media en la cuenca

Los valores de precipitación media resultante con los datos del año de estudio de las estaciones climatológicas, de los pluviógrafos y las estimaciones del sensor TRMM son, respectivamente, 412.2 mm, 448.3 mm y 434.0 mm. Tomando como referencia el valor obtenido con los pluviógrafos, se aprecia que hay una diferencia de 8.05 % con los del SMN y de 3.19 % con los de TRMM. La diferencia entre la precipitación media calculada en base a las estaciones climatológicas y la medida en la red de pluviógrafos es de 36.1 mm, que representa un volumen de 150.718 hm³, aproximadamente 50% más de lo que consume la ciudad de Hermosillo en un año.

La precipitación promedio obtenida con la red de pluviógrafos es más cercana a la estimada con la malla de TRMM debido a que tienen una cobertura espacial más amplia en la cuenca y toman en cuenta valores de sitios distribuidos en partes bajas y también en la zona montañosa, donde, de acuerdo a los registros pluviográficos, ocurren las precipitaciones más intensas en la zona. En contraste, las estaciones climatológicas, aparte de ser menos puntos de medida, están localizadas a lo largo del cauce o partes bajas de la vertiente y sus datos no son representativos de la precipitación en toda la cuenca, por lo que se tiene una mayor diferencia con los otros dos productos.

La figura 61 muestra la distribución de la precipitación de 2005 en las 32 subcuencas, calculada por AGWA a partir de los datos de los tres productos utilizados en la tesis. Se puede apreciar que en la porción baja de la cuenca los valores más bajos de precipitación se obtienen con los datos del SMN, con 300 mm, a diferencia los 320 y los 335 obtenidos con la red de pluviógrafos y el sensor TRMM respectivamente; los valores máximos en la misma porción son de 419 mm, contra 452 y 456 mm obtenidos con las estaciones climatológicas, los pluviógrafos y TRMM, respectivamente. En la zona media, representada por la subcuenca de mayor tamaño, la precipitación resultante fue 380, 396 y 390 mm, resultando también menor el primer valor, correspondiente a los datos del SMN y mayor en los estimados con la red de pluviógrafos, siendo en esta parte de la cuenca donde se tuvo la menor diferencia. En la parte alta de la vertiente, donde el proceso de discretización creó 25 cuencas, la precipitación mínima se obtuvo en la zona del cauce, que es la de menor altitud, con valores

de 396, 405 y 400 mm, con los datos del SMN, los pluviógrafos y el sensor TRMM respectivamente; los valores mayores fueron de 430, 497 y 503 mm, obtenidos respectivamente con los datos del SMN, la red de pluviógrafos y TRMM y corresponde a la subcuenca de mayor altitud.

Los resultados de precipitación obtenidos reflejan las características de los datos de entrada disponibles. Así, los resultados generados a partir de los datos del SMN, están condicionados por registros que se tomaron sólo en las partes cercanas al cauce y son los que menos diferencia mantienen con los obtenidos con los otros dos productos; sin embargo, los valores máximos obtenidos con los pluviómetros de las estaciones climatológicas, sobre todo en las partes altas, mantienen una significativa diferencia con los valores obtenidos con los otros dos productos, con una mayor densidad de puntos de medida o estimación. Estas diferencias, aparte de estar condicionadas por la fuente de datos, también dependen de otras variables que AGWA considera en el modelo de distribución de precipitación en la cuenca, como son temperatura y altitud. Los datos de temperatura fueron tomados de las estaciones climatológicas y la altitud del modelo digital de elevaciones.

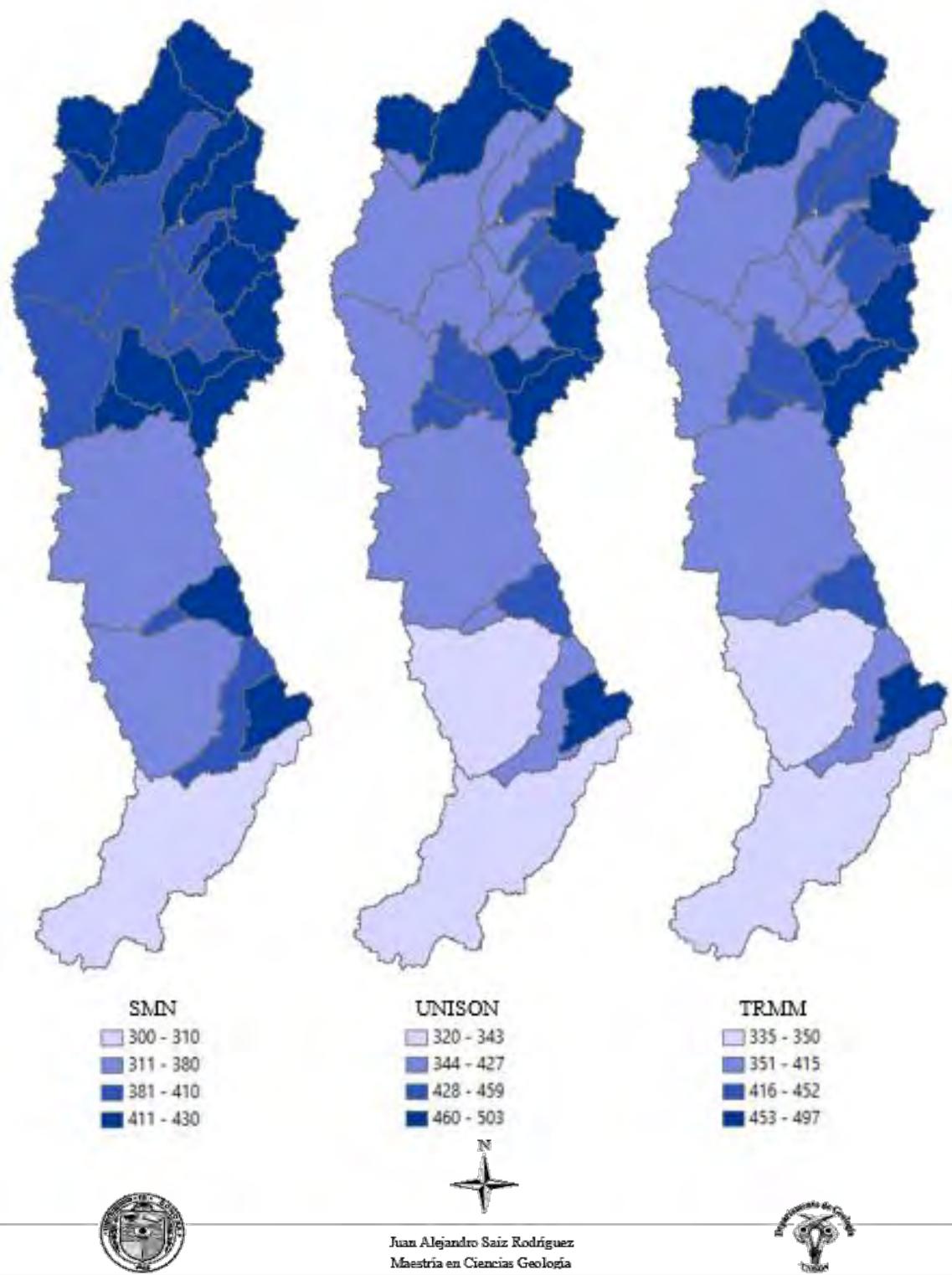


Figura 61. Distribución de la precipitación en la Cuenca del Río San Miguel obtenida por AGWA con los tres productos.

4.4 Evapotranspiración

Los mayores valores promedio de evapotranspiración obtenidos del modelo son 380 mm, obtenidos con las estaciones del SMN, 405 mm con las estaciones UNISON y 434 mm obtenidos con TRMM. Los datos de uso de suelo y vegetación, así como los de temperatura y presión, son similares en los tres modelos construidos; sin embargo, los datos de precipitación del SMN, con su red de medida menos densa que las de los otros dos productos y ubicadas en los sitios menos lluviosos, aportan menor cantidad de humedad y por lo tanto, el modelo alimentado con estos datos arroja un resultado de evapotranspiración de 380 mm, menor en un 6.59% que el obtenido con la red UNISON y 14.21% con respecto a TRMM.

En la figura 62 se muestra la distribución de la evapotranspiración en cada una de las 32 subcuencas de la vertiente del Río San Miguel. El valor mínimo, en la modelación con datos del SMN fue de 358 mm y el máximo de 391 mm; en los resultados del modelo con los datos de la red de pluviógrafos UNISON, el mínimo fue de 379 mm y el máximo de 408 mm y, con los valores de TRMM, el mínimo fue de 369 mm y el máximo de 403 mm.

Los resultados obtenidos son congruentes en los tres modelos y muestran claramente la relación que existe entre evapotranspiración con las características climáticas y fisiográficas y de la vertiente. Los valores mayores ocurren en las subcuencas de la porción media y baja de la cuenca, caracterizadas por su temperatura más elevada, menor precipitación media, menor altitud (menor a 800 msnm) y donde predomina la agricultura y el matorral desértico de condición hidrológica pobre a media, en suelo de textura arcillo-arenosa, que incrementa notablemente su biomasa durante el Monzón de Norteamérica y con ello el transporte de agua mediante el proceso de transpiración, importante componente de la transpiración. En las cuencas 30, 31 y 32, con el modelo alimentado con la red de pluviógrafos, resultaron precipitaciones de 396, 343 y 320 mm, respectivamente; sin embargo, la evapotranspiración, de manera correspondiente, resultó mayor: 403, 406 y 408 mm, lo que indica que el modelo toma en cuenta el escurrimiento de las partes altas a las bajas de la cuenca y no se considera retención o almacenamiento de agua en represas u otras obras hidráulicas.

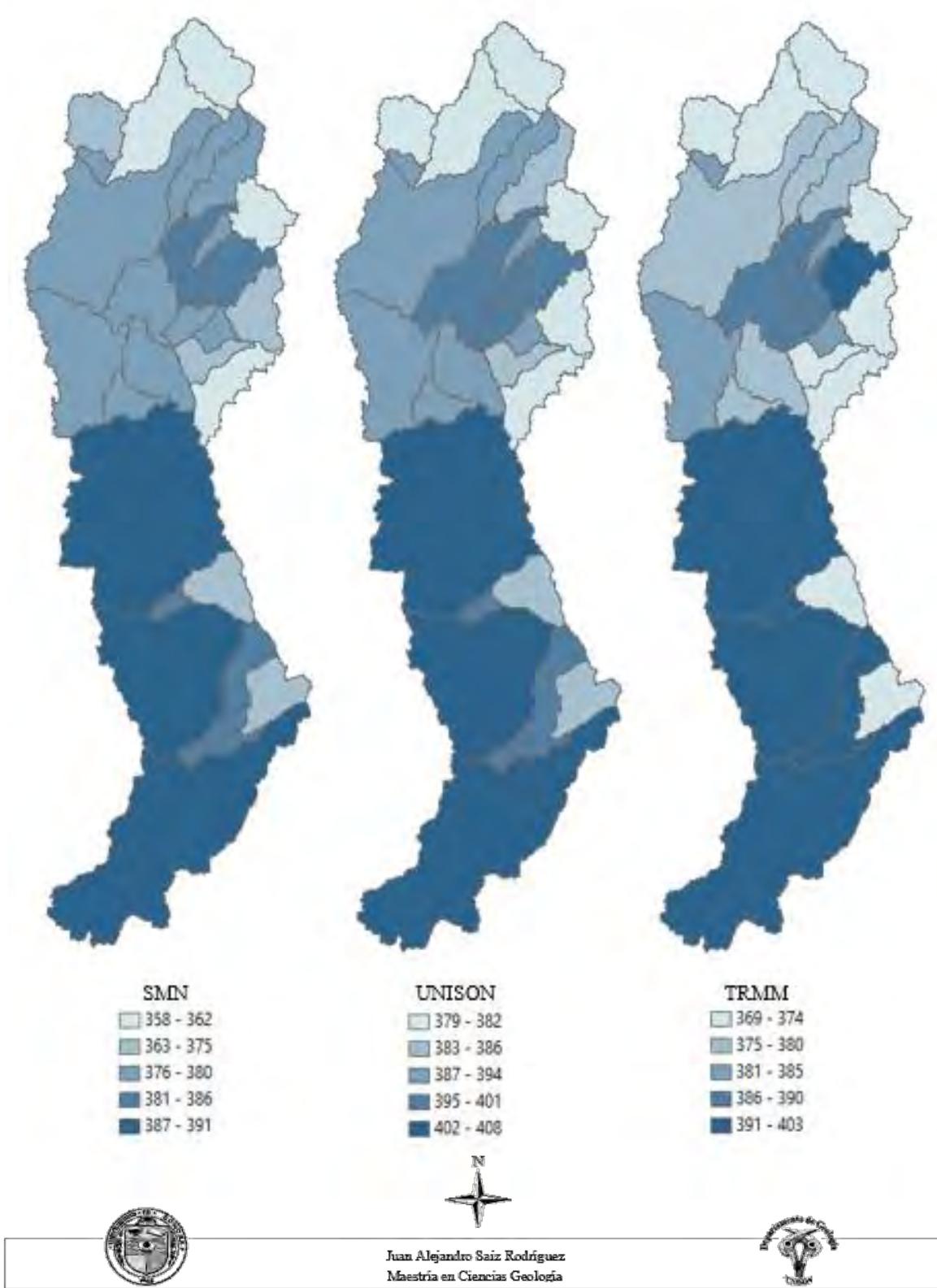
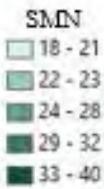
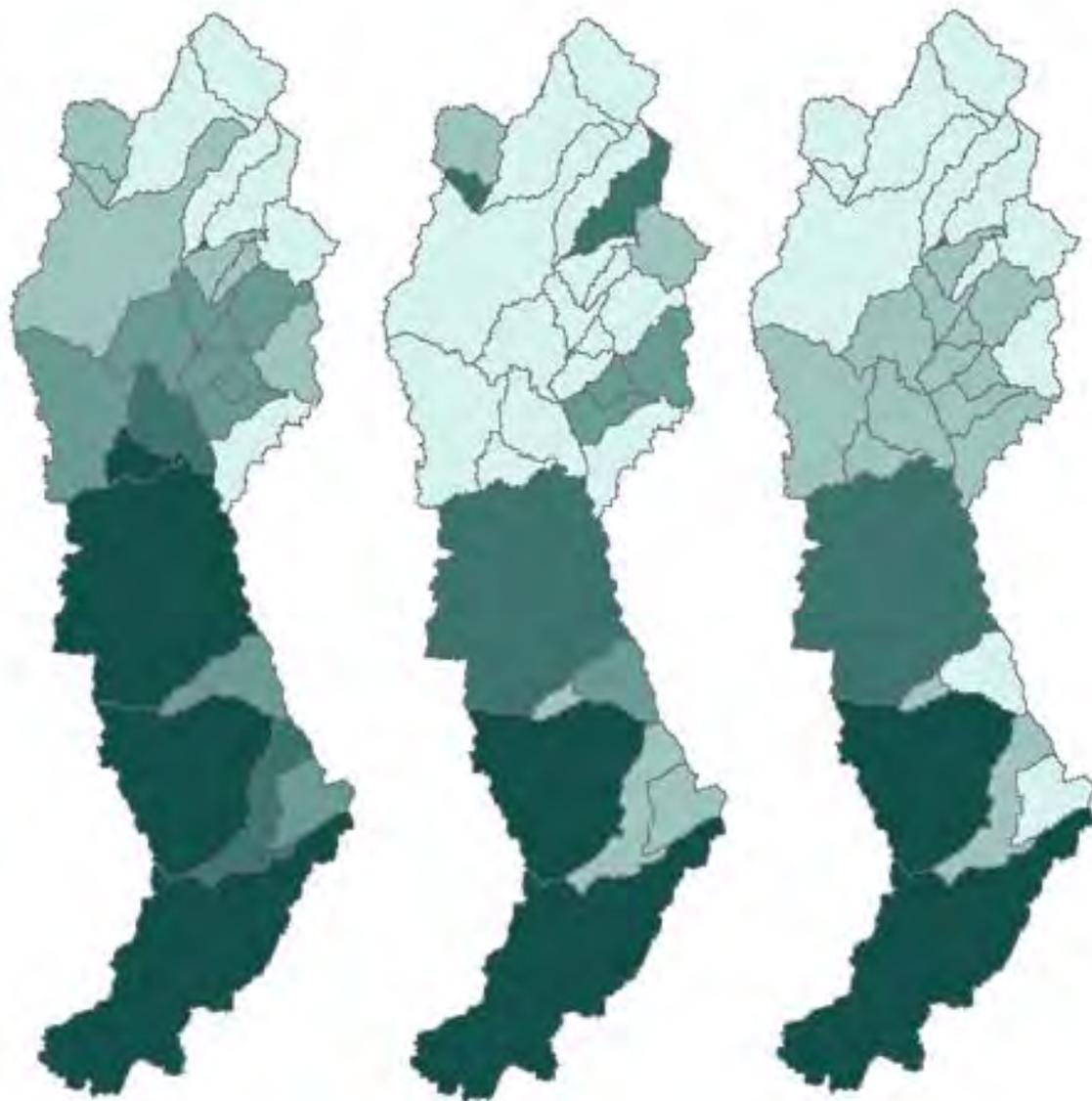


Figura 62. Distribución de la evapotranspiración.

En la misma figura 62, se puede observar que los valores menores ocurren en las subcuencas de la parte alta de la cuenca, caracterizadas por una temperatura más baja, mayor precipitación media, mayor altitud y donde predomina el bosque de encino y áreas de pastizal de condición hidrológica media a buena, en suelo de textura arcillo-arenosa. Las cuencas 7, 24 y 25 registraron precipitaciones de 422, 430 y 429 mm y la evapotranspiración, de manera correspondiente, resultó 359, 358 y 361 mm, agua que escurrirá a las partes bajas de la cuenca. En las porciones de la cuenca con mayor tasa de evapotranspiración, en las que predomina el matorral desértico y agricultura, el proceso está controlado por la evaporación, inducida por las altas temperaturas durante el año, y en las partes altas, con temperaturas notablemente menores, domina la transpiración.

4.5 Percolación

La percolación depende principalmente del agua disponible que fluye más abajo de la zona de raíces, condicionada por las características hidráulicas de los suelos, la altitud, la pendiente y los tipos de suelo, derivados de la textura y el uso de suelo, que se proporcionaron al modelo a partir de la cartografía adecuada a los requerimientos de AGWA.



Juan Alejandro Saiz Rodríguez
 Maestría en Ciencias Geología



Figura 63. Distribución de la percolación.

En la figura 63 se muestra el volumen de la percolación anual en cada una de las 32 subcuencas de la vertiente del Río San Miguel. El valor mínimo, en la modelación con datos del SMN fue de 18 mm y el máximo de 40 mm; en los resultados del modelo con los datos de la red de pluviógrafos UNISON, el mínimo fue de 30 mm y el máximo de 44 mm y, con los valores de TRMM, el mínimo fue de 29 mm y el máximo de 41 mm.

Los resultados obtenidos son congruentes en los tres modelos y muy parecidos en las corridas con los datos de la red de pluviógrafos UNISON y TRMM. Muestran claramente la relación que existe entre la percolación y las características climáticas y fisiográficas de la vertiente. Así, en la figura, se aprecia que los valores mayores ocurren en las subcuencas de la porción media y baja de la cuenca, en las que hay mayor disponibilidad de agua y que se caracterizan por su menor altitud, poca pendiente, con los cauces de mayor orden de corriente, que fluyen por suelos que presentan buena porosidad granular y por tanto son sedimentos regularmente de buena permeabilidad, constituidos por boleos, gravas y arenas no consolidados. Estos sedimentos contribuyen a la percolación y a la recarga del acuífero. Los suelos de estas cuencas están formadas principalmente por Litosoles de textura media, Regosoles de textura gruesa y Xerosoles, típicos de las zonas áridas y semiáridas de la región, con vegetación natural predominantemente compuesta por matorral y pastizal.

En las cuencas 30, 31 y 32, con el modelo alimentado con datos del SMN, las láminas de percolación fueron de 36, 40 y 40 mm; con la red de pluviógrafos UNISON, se obtuvieron valores de 38, 42 y 44 milímetros, en las mismas cuencas, respectivamente, mientras que con las estimaciones de precipitación de TRMM, se obtuvieron 36, 40 y 41 mm. Los resultados con datos del SMN y los de TRMM son muy similares y no se alejan mucho de los obtenidos con la red de pluviógrafos.

En la parte alta de la cuenca se tuvo la menor cantidad de agua percolada, presentándose el mínimo en los tres modelos, en la cuenca 24, con 18 mm para la modelación con datos del SMN, 30 mm con los datos de la red de pluviógrafos y 29 para la corrida con los datos de TRMM. Como puede apreciarse, a diferencia de la parte baja de la cuenca, el resultado con los datos de la red de pluviógrafos es muy parecido al obtenido con los de TRMM.

4.6 Escurrimiento superficial (mm)

Los resultados son congruentes, lo que se confirma porque las subcuencas que aportan mayor escurrimiento, son las de mayor precipitación; además, son también las que tuvieron menor percolación, variables de las que depende directamente el escurrimiento y la ecuación que utiliza el modelo, que considera también el tipo de suelo y su uso en cada subcuenca.

En la figura 64 se muestra la lámina escurrida anual en cada una de las 32 subcuencas del sitio de estudio. El valor mínimo, en la modelación con datos del SMN fue de 4 mm y el máximo de 15 mm; en los resultados del modelo con los datos de la red de pluviógrafos UNISON, el mínimo fue de 6 mm y el máximo de 16 mm y, con los valores de TRMM, el mínimo fue de 5 mm y el máximo de 15 mm.

Los resultados obtenidos son coherentes en los modelos y muy parecidos en las corridas con los tres productos de precipitación. También muestran claramente la relación que existe entre las características climáticas y fisiográficas de la vertiente. Así, en la figura 64 se aprecia que las láminas mayores de escurrimiento, en los tres casos, ocurren en las subcuencas de la porción alta, en las que hay mayor disponibilidad de agua y que se caracterizan por su menor altitud, mayor pendiente, con los cauces de menor orden de corriente, que fluyen por suelos que presentan una condición hidrológica que facilita el escurrimiento. Las láminas de precipitación en esa parte de la cuenca resultaron de 15 mm para el modelo alimentado con los datos del SMN y con los del TRMM y de 16 mm con los de la red de pluviógrafos. La porción media y baja de la cuenca resultaron con la menor aportación de escurrimiento superficial, presentándose el mínimo 4 mm para la modelación con datos del SMN, 6 mm con los datos de la red de pluviógrafos UNISON y 5 con los datos de TRMM.

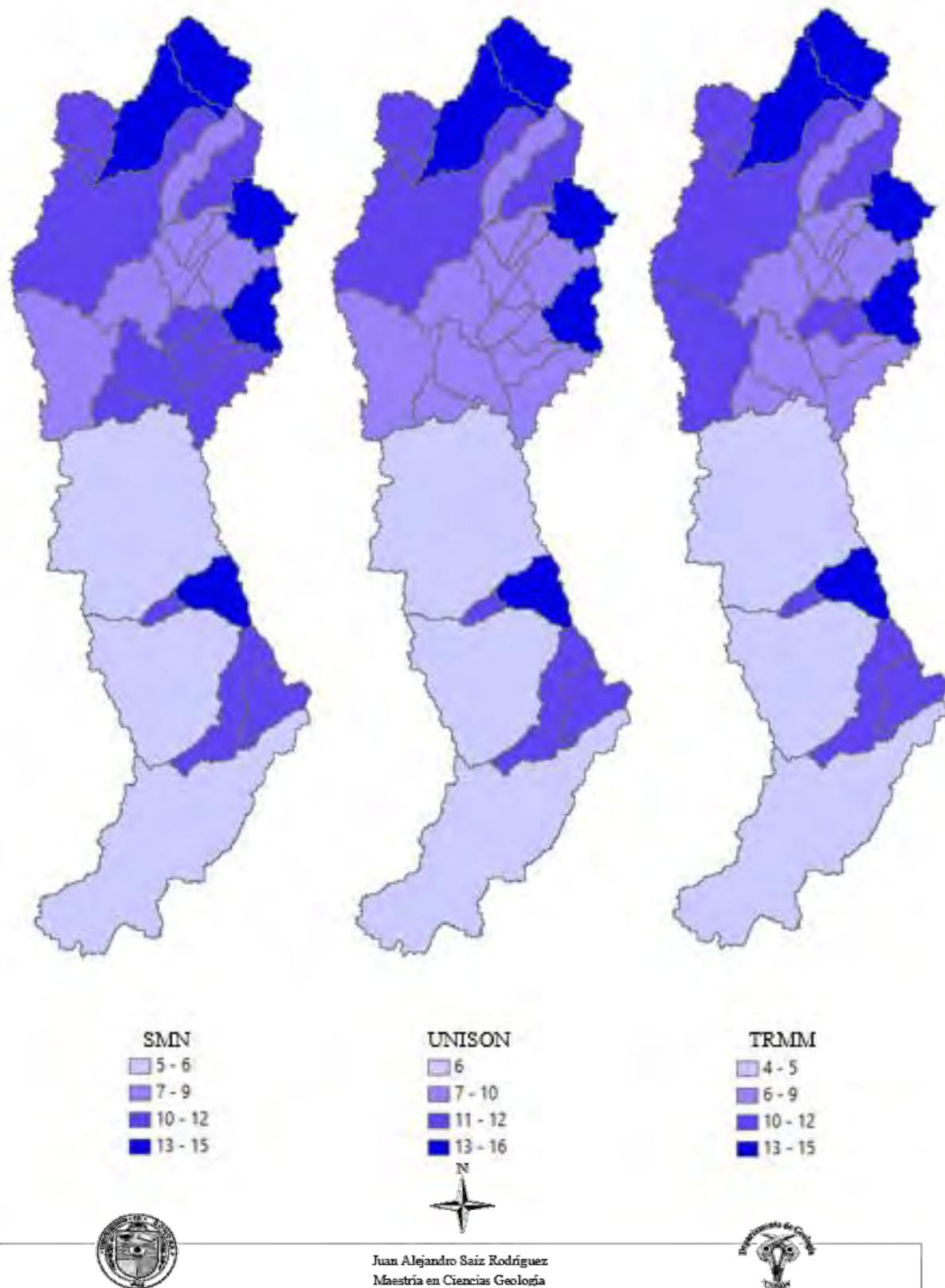


Figura 64. Distribución del escurrimiento superficial.

Los valores promedio de escurrimiento fueron de 7.2 mm, 8.4 y 8.0 mm, con los datos del SMN, la red de pluviógrafos y las estimaciones de TRMM, respectivamente, siendo más cercanos los obtenidos con los dos últimos productos. En volumen, con el primer producto resultó 30.66 hm³, con el segundo 34.92 hm³ y con el tercero 33.40 hm³.

4.7 Pérdida por transmisión (mm)

Las pérdidas por transmisión son pérdidas de flujo de la superficie a través de la lixiviación por el cauce, incluyendo arroyos intermitentes, que se reduce con la contribución de agua subterránea que ocurre sólo en ciertos períodos del año. Las variables que influyen en este proceso en cualquier río son la topografía, los escurrimientos, las propiedades de los suelos y de las características de los canales como longitud, pendiente, ancho y conductividad hidráulica. SWAT usa el método de Lane para estimar las pérdidas por transmisión, en el que se establece que son función de la anchura y longitud del canal y de la duración de flujo.

La distribución de la pérdida por transmisión en la cuenca, mantiene una relación con la del escurrimiento, de igual manera, las subcuencas que aportan mayor escurrimiento, son las que tuvieron mayor precipitación y mayor escurrimiento.

En la figura 65 se muestra la lámina perdida por transmisión anual en cada una de las 32 subcuencas del sitio de estudio. El valor mínimo, en la modelación con datos del SMN fue de 6 mm y el máximo de 16 mm; en los resultados del modelo con los datos de la red de pluviógrafos UNISON, el mínimo fue de 9 mm y el máximo de 26 mm; y con los valores de TRMM, el mínimo fue de 10 mm y el máximo de 26 mm.

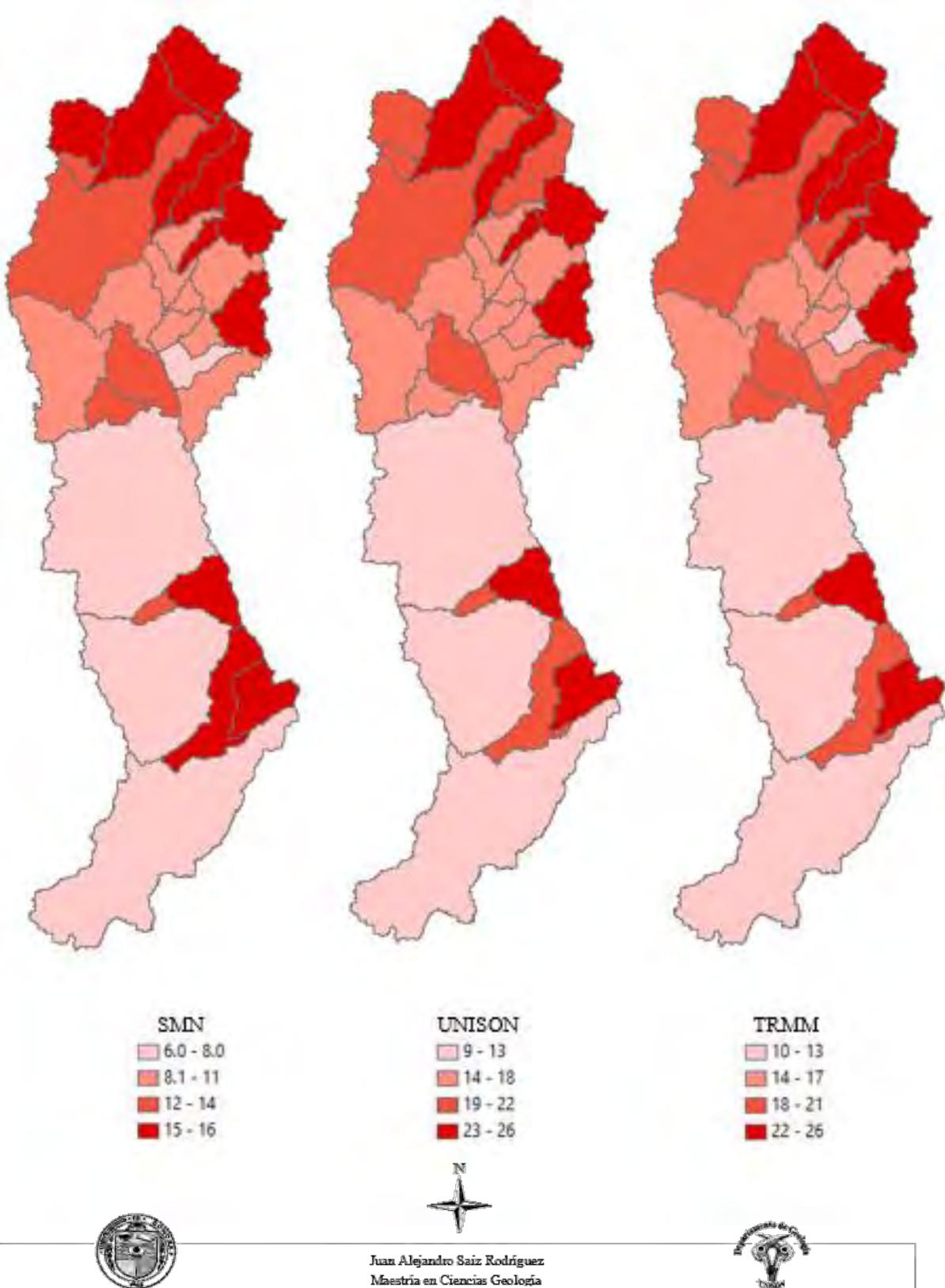


Figura 65. Distribución de pérdidas por transmisión.

Los resultados obtenidos son coherentes en los modelos, a diferencia del resultado obtenido con los datos del SMN, los otros dos son muy parecidos y los valores máximos ocurren en la cuenca experimental del arroyo “La Ramada” y en las de mayor altitud de la vertiente. También muestran claramente la relación que existe entre las características climáticas y fisiográficas de la vertiente. Así, en la figura 66, se aprecia que las láminas mayores de pérdida, en los tres casos, ocurren en las subcuencas de la porción alta, en las que hay mayor disponibilidad de agua y que se caracterizan por su mayor altitud, pendiente agreste, con los cauces de menor orden de corriente, que fluyen en lechos de cauces compuestos por materiales granulares mal graduados que presentan una condición hidrológica que facilita las pérdidas de energía por fricción y de agua por infiltración.

La porción media y baja de la cuenca resultaron con la menor pérdida por transmisión, no obstante que reciben y por ellos transita gran parte del escurrimiento que aportan las cuencas aguas arriba. Esto se debe a las características hidráulicas de los cauces, como forma y coeficiente de rugosidad, determinada por la textura arcillo arenosa de los lechos.

4.8 Producción de agua (mm)

La producción de agua, es resultado de la diferencia entre el escurrimiento superficial más flujo lateral más el nivel de agua subterráneo menos las pérdidas por transmisión y las abstracciones de los lagos.

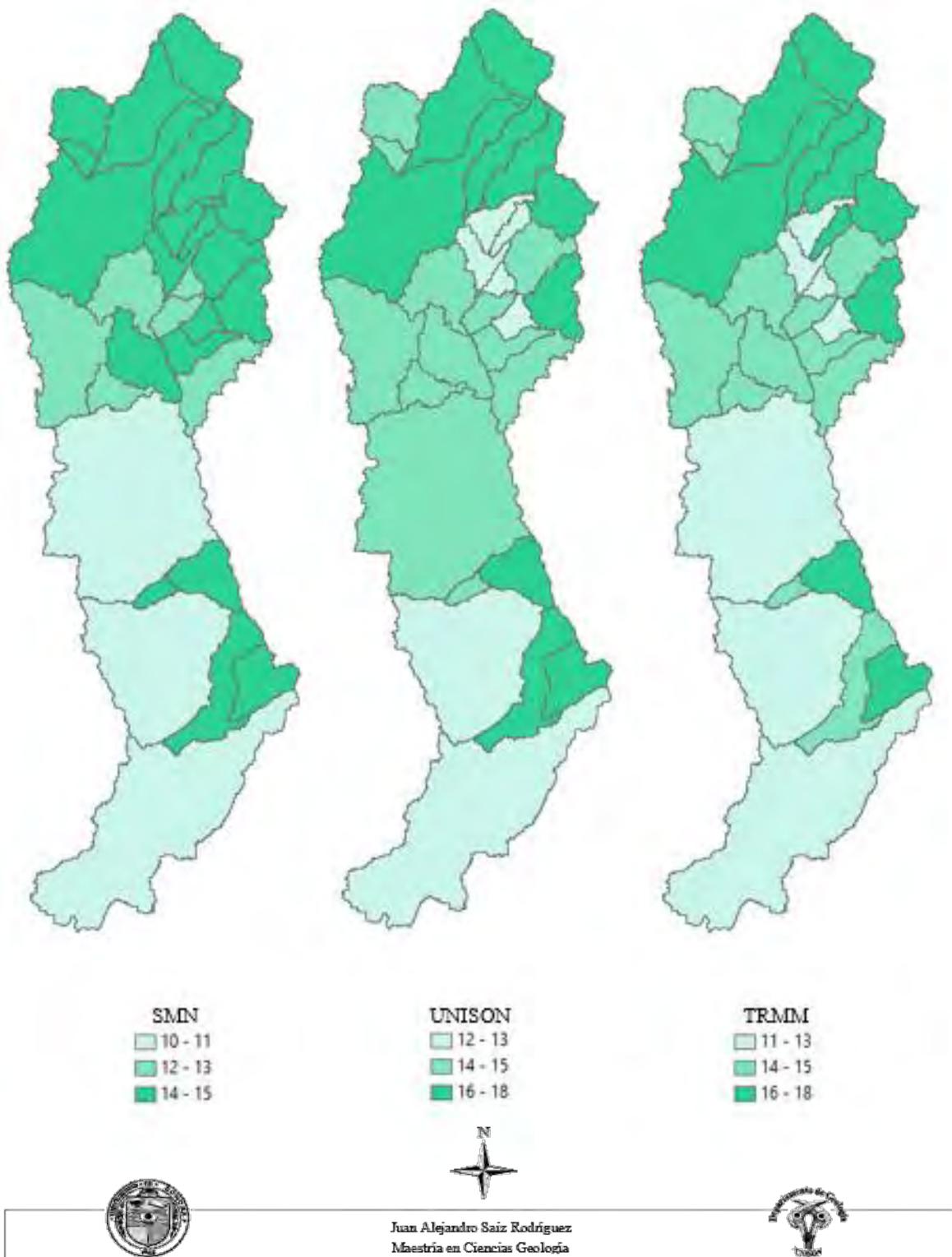


Figura 66. Distribución de la producción de agua.

Las subcuencas de mayor producción son las que contribuyen con mayor flujo de agua al canal principal y la lámina es mayor en las cuencas de mayor precipitación y escurrimiento y que reciben aportación de agua subterránea y que tienen menos pérdidas por transmisión.

En la figura 66 se muestra la lámina de producción de agua en cada una de las 32 subcuencas del sitio de estudio. El valor mínimo, en la modelación con datos del SMN fue de 10 mm y el máximo de 15 mm; en los resultados del modelo con los datos de la red de pluviógrafos UNISON, el mínimo fue de 12 mm y el máximo de 17 mm y, con los valores de TRMM, el mínimo fue de 11 mm y el máximo de 17 mm.

Los resultados obtenidos son coherentes en los modelos y muy parecidos, sobre todo en la modelación con los datos de los pluviógrafos y con los de TRMM. Los valores máximos ocurren en las subcuencas de mayor altitud, entre ellas en la cuenca experimental del arroyo “La Ramada”.

4.9 Producción de sedimentos

AGWA se basa en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada MUSLE, con la que se calcula la producción de sedimentos (ton/ha) para eventos aislados basado en la ecuación.

Los factores que afectan la producción de sedimento principalmente son: El caudal, la topografía, contenido de arcilla, arena y limo, gránulos de arena y cobertura vegetal.

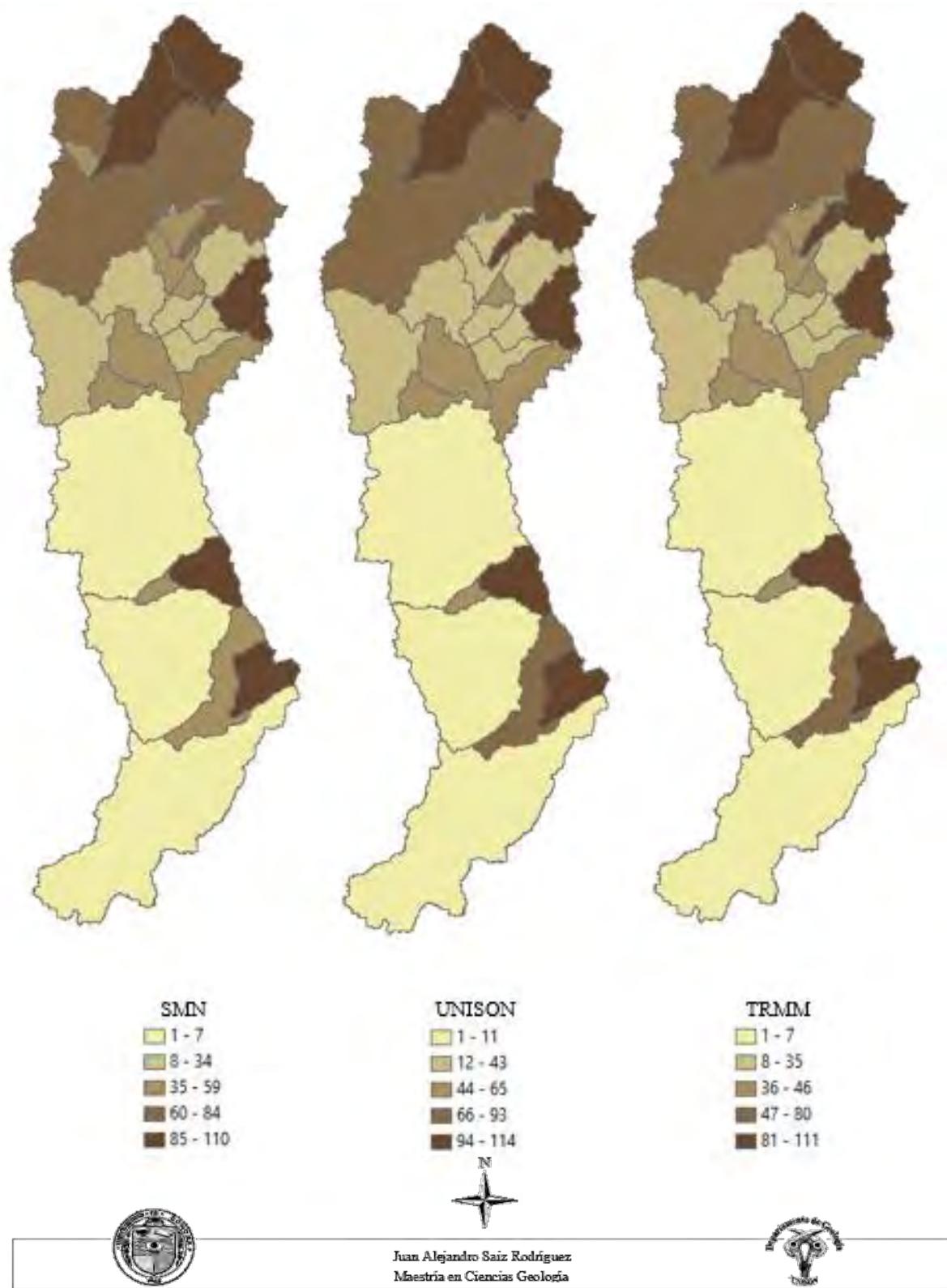


Figura 67. Distribución de la producción de sedimentos.

Analizando los resultados obtenidos (figura 67), se puede apreciar que las subcuencas que aportan la mayor cantidad de sedimentos son las de pendiente más pronunciada, que se combina con la densidad y el tipo de vegetación, la textura del suelo, la magnitud del flujo sobre el terreno y el cauce, favorables para la producción y el transporte del sedimento.

Las subcuencas de mayor producción de sedimentos, también son las que contribuyen con mayor flujo de agua al canal principal y el volumen es mayor en las cuencas con precipitación más abundante.

En la misma figura se muestra la producción de sedimentos en las 32 subcuencas. El valor mínimo, en los tres modelos, fue de 1 ton/año, mientras que los máximos fueron de 110 ton/año con los datos del SMN, 114 ton/año con los de la red de pluviógrafos UNISON y 111 ton/año con los valores de TRMM.

Los resultados obtenidos son coherentes en los tres modelos y muy similares. Los valores máximos ocurren en las subcuencas de mayor altitud, entre ellas en la cuenca experimental del arroyo “La Ramada” y las menores aportaciones, en las subcuencas de la porción baja de la vertiente.

La magnitud de los volumen erosionados en las cuencas de la porción alta, sobre todo en las localizadas al norte y oriente de la vertiente, tiene que ver con la profundidad de sus suelos, típicamente delgados que se saturan rápidamente ante la ocurrencia de precipitación, de tal modo que el agua que no puede infiltrarse, comienza a correr por la superficie, erosionándola.

En las subcuencas que predomina el Litosol, que también es el suelo más abundante en la cuenca y su susceptibilidad a la erosión es muy variable dependiendo de los factores ambientales; el segundo tipo de suelo con mayor erosión es Regosol, y cubre las subcuencas noreste de la cuenca.

Las subcuencas localizadas al norte, también con un importante volumen de erosión, tienen suelos clasificados como Luviosol, suelo con alta susceptibilidad a la erosión.

En cuanto a las subcuencas de la porción sur que resultaron con menor erosión, prevalece el suelo tipo Xerosol, que se caracteriza por su baja susceptibilidad a la erosión, salvo en laderas o si están directamente sobre caliche o tepetate a escasa profundidad que se encuentran en la base de elevaciones topográficas importantes.

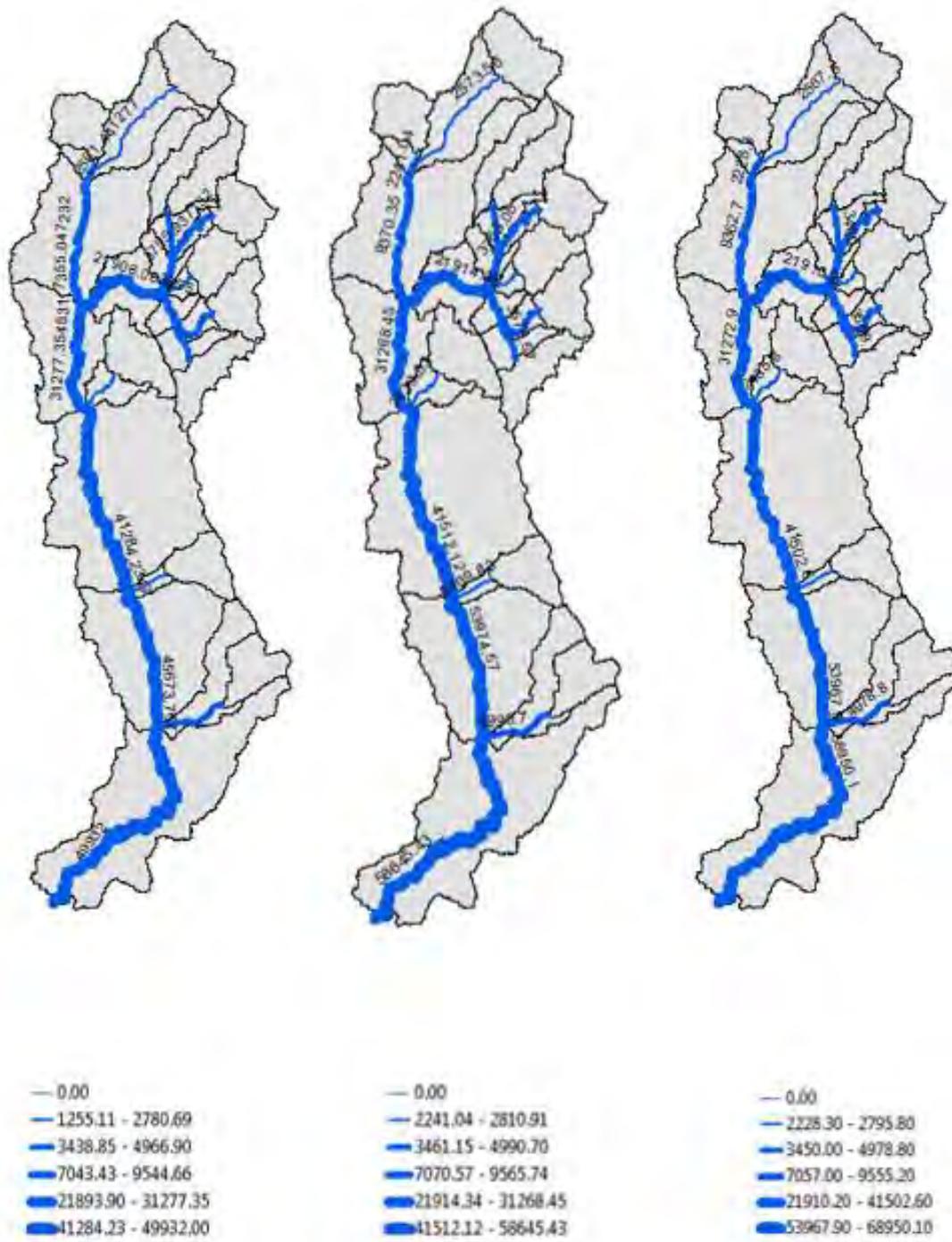
4.10 Descarga de canales

El cauce principal de cada cuenca aguas arriba descarga, en m³/día hacia cauces de cuencas aguas abajo, acumulando el flujo en los tramos de cauce en m³ al día.

En la figura 68 se muestra el volumen de descarga en los cauces principales delineados por el proceso de discretización. El caudal mínimo, en el tramo que da origen al cauce principal, en la modelación con datos del SMN fue de 2561.4 m³/día y en la salida de 49,932.0 m³/día; en los resultados del modelo con los datos de la red de pluviógrafos UNISON, en el primer tramo, fue de 2573.6 m³/día y en el de salida de 58645.4 m³/día y, con los valores de TRMM, en el tramo inicial fue de 2567.5 m³/día y en el de descarga 68950.1 m³/día. Los resultados obtenidos son coherentes en los modelos. En general, como se puede observar en la tabla 8, las diferencias más notables se presentan en los dos tramos aguas arriba del punto de salida. La mayor discrepancia se observa entre los resultados obtenidos con los datos del SMN y los de TRMM, con 15.37% y 32.43%; los resultados que más se acercan, son los obtenidos con la red de pluviógrafos de la UNISON y TRMM, donde solo hay una diferencia 17.57% en el tramo de descarga de la cuenca y en todos los demás tramos aguas arriba, la diferencia es no significativa.

Tabla 8. Comparación de descarga en canales de la cuenca

SMN-Red UNISON		SMN-TRMM		Red UNISON-TRMM	
Diferencia	(%)	Diferencia	(%)	Diferencia	(%)
-12.16	-0.47%	-6.1	-0.24%	6.06	0.24%
-2015.25	-27.40%	-2007.6	-21.43%	7.65	0.08%
10.95	0.04%	4.5	0.01%	-6.45	-0.02%
-227.92	-0.55%	-218.4	-0.53%	9.52	0.02%
-8300.77	-18.17%	-8294.1	-15.37%	6.67	0.01%
-8713.43	-17.45%	-19018.1	-32.43%	-10304.67	-17.57%



Juan Alejandro Saiz Rodríguez
 Maestría en Ciencias Geología



Figura 68. Distribución de la descarga de canales.

4.11 Comparación con otros estudios

En la tabla 9, se muestran los resultados de precipitación, evapotranspiración, percolación y escurrimiento, así como el área de la cuenca utilizada en la modelación con los tres productos de precipitación y en los estudios realizados por Valencia (2009) y CEA (2005). En este apartado, se comparan los resultados de salida (Evapotranspiración, percolación, escurrimiento y caudal) del modelo con los obtenidos en los estudios citados, con el fin de discernir y determinar de manera objetiva, cuál de los modelos representa con mayor precisión el comportamiento hidrológico de la cuenca de estudio.

Tabla 9. Comparación de resultados con estudios previos en la cuenca del Río San Miguel.

Estudios	Área (km ²)	Precipitación (hm ³)	ETR (hm ³)	Percolación (hm ³)	Escurrecimiento (hm ³)	Caudal m ³ /s
CEA (2005)	4,044.8	1,871.0	1,689.1	147.1	34.8	1.1
Valencia (2009)	3,979.6	1,878.0	1,784.9	66.1	27.0	0.85
TRMM	4,175.1	1,812.0	1,645.0	133.6	33.4	0.8
Red UNISON	4,175.1	1,871.7	1,690.9	145.9	34.9	0.61
Estaciones SMN	4,175.1	1,723.4	1,588.4	104.4	30.7	0.6

Comparando los resultados de la modelación con los datos del *Servicio Meteorológico Nacional* con los estudios previos (Tabla 10), se observa que los resultados más aproximados se obtienen en evapotranspiración y escurrimiento, con una diferencia mínima de 6.34% en ETR y un máximo de 13.37% en escurrimiento; las mayores diferencias se tienen en percolación, con un 40.93% y escurrimiento con 83.33%.

Tabla 10. Diferencia en resultados de la modelación con datos del SMN con relación a estudios previos en la cuenca del Río San Miguel

	Área	P	ETR	Percolación	Escurrecimiento	Caudal
CEA (2005)	3.12%	-8.56%	-6.34%	-40.93%	-13.37%	-83.33%
Valencia Coronado (2009)	4.68%	-8.97%	-12.37%	36.69%	12.10%	-41.67%

En el caso de los resultados de la modelación con los datos de la red de pluviógrafos operada por la Universidad de Sonora con los estudios citados (Tabla 11), se observa que los resultados más aproximados se obtienen en los valores de evapotranspiración, percolación y

escurrimiento plasmados en el estudio de CEA (2005), con una diferencia máxima menor a 0.87%; sin embargo, la diferencia con el escurrimiento resultante es de 80.33%.

Tabla 11. Diferencia en resultados de la modelación con datos de red UNISON con relación a estudios previos en la cuenca del Río San Miguel

	Área	P	ETR	Percolación	Escorrento	Caudal
CEA (2005)	3.12%	0.03%	0.10%	-0.87%	0.46%	-80.33%
Valencia Coronado (2009)	4.68%	-0.34%	-5.56%	54.68%	22.82%	-39.34%

La comparación los resultados de la modelación con la estimación de precipitación de TRMM con los estudios citados (Tabla 12), se observa que los resultados más aproximados se obtienen en evapotranspiración y escurrimiento de CEA (2005), con una diferencia máxima de 10.13% en percolación. El escurrimiento medio también es la variable con la que hay mayor diferencia; sin embargo, esta se reduce hasta un 37.50%

Tabla 12. Diferencia en resultados de la modelación con datos de TRMM con relación a estudios previos en la cuenca del Río San Miguel

	Área	P	ETR	Percolación	Escorrento	Caudal
CEA (2005)	3.12%	-3.26%	-2.69%	-10.13%	-4.07%	-37.50%
Valencia Coronado (2009)	4.68%	-3.64%	-8.51%	50.52%	19.31%	-6.25%

Los resultados sugieren que el modelo con TRMM es el que más se aproxima a los resultados de los estudios previos y también es el que tiene los datos medidos con una red de medida con lo que se tiene una precipitación más representativa de la cuenca del Río San Miguel.

V. Conclusiones

El modelo, con los tres productos de precipitación como datos de entrada, representa apropiadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca del Río San Miguel y, aunque existen diferencias entre los principales datos de entrada y en los parámetros obtenidos con la simulación, los resultados son congruentes y aceptables.

Para adoptar como válido alguno de los modelos, debe considerarse que se tomó como base de comparación, el resultado obtenido de dos trabajos previos, que fueron realizados utilizando los datos de CONAGUA, diferenciándose solo en la metodología aplicada para obtener los demás rasgos del Ciclo Hidrológico, de esta manera, es posible adoptar cada uno de los tres modelos, considerando sus limitaciones y valorando sus bondades.

Aunque apegados a la rigurosidad científica, los resultados que debieran aceptarse como los que representan con mayor fidelidad el comportamiento de la cuenca, son los obtenidos con los datos de la red pluviógrafos de la UNISON, que proporcionan mejores y más datos de precipitación distribuidos en una porción más amplia de la cuenca y que comprende sitios representativos de diferentes condiciones topográficas y fisiográficas. Por otra parte, los resultados del modelo elaborado con los datos de TRMM son los que más se acercan a los obtenidos con los pluviógrafos y también a los de los estudios de referencia y ofrecen una fuente de datos de precipitación permanente y asequible para todos los usuarios. En los resultados del modelo construido con datos del SMN, se observó la mayor diferencia con los obtenidos con los otros dos modelos, lo que refleja la poca densidad de la red de medida y la representatividad espacial y temporal del proceso de precipitación en la cuenca.

Un aspecto de gran relevancia que se debe considerar para decidir que producto de precipitación se debe utilizar para implementar un modelo de la cuenca basado en AGWA, es la disponibilidad de los datos, considerando, calidad y representatividad de los datos,

asequibilidad y costo. En este sentido, los datos de SMN son de buena calidad, están disponibles gratuitamente en formatos digitales, pero no tienen la cobertura espacial suficiente en el sitio de estudio; la red de pluviógrafos registra datos de buena calidad, tiene una mejor cobertura espacial en la cuenca de estudio, pero su operación y mantenimiento es costosa; finalmente, como se mostró en esta tesis, TRMM estima con una precisión aceptable la precipitación, tiene muy buena cobertura espacial y está disponible en formato raster, sin costo para todos los usuarios.

5.1 Investigación futura

Esta tesis constituye un punto de partida para mejorar el modelo propuesto con AGWA y también para ampliar en cantidad y profundidad en el conocimiento de la Hidrología de la cuenca del Río San Miguel y de las zonas áridas del noroeste de México, por lo cual se propone realizar los estudios siguientes:

Correlacionar datos puntuales de medidas de precipitación en tierra con los datos del sensor TRMM. Este estudio tendría como objetivo determinar factores temporales de corrección que se aplicarían a los datos de TRMM, para corregir la tendencia a subestimar los valores de precipitación en temporada de lluvia abundante y sobreestimar en los períodos de lluvia de invierno. Con este estudio se exploraría si existe relación del sensor con el mecanismo de ascenso que produce la precipitación en la zona; además, brindaría la posibilidad de extrapolar estos datos y utilizarlos en cuencas en las que no existe suficiente información climatológica.

Redistribución y ubicación de nuevas estaciones de medida. Es necesario ampliar la red de medida con pluviógrafos, para lo cual es recomendable utilizar los datos de los pluviógrafos existentes y los valores de precipitación estimados con TRMM para desarrollar un modelo geoestadístico que permita desarrollar una metodología con la que se puedan determinar los sitios donde deba medirse para lograr un mejor conocimiento del comportamiento de la precipitación en el sitio de estudio.

Retención en cuerpos de agua de la cuenca. El modelo construido en esta tesis no incorpora la retención del agua en cuerpos de agua naturales o artificiales, por lo que el caudal de salida es la interpretación del modelo en forma natural. Es recomendable identificar, estimar o medir este volumen de retención e incorporar este proceso al procedimiento de modelación, con lo que se tendrán resultados más acordes al funcionamiento de la vertiente.

Ampliación y mejora de la calidad de las bases de datos de edafología y uso de suelo. En esta tesis se utilizó la información disponible sobre los suelos y su uso disponible en INEGI y fue adaptada y utilizada en AGWA para construir los modelos con cada uno de los productos de precipitación. Es recomendable hacer estudios de campo con el fin de mejorar estos datos, sobre todo en lo que respecta a la precisión determinada por la escala. También deben hacerse estudios de campo y en gabinete para hacer más precisa la relación entre las clasificaciones de suelos utilizadas por INEGI y la FAO.

V. Bibliografía

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J., (1986a). An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87: 45-59.
- Abdulla, F.A. and Eshtawi, T. (2007). Application of Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) Tool to Evaluate the Sediment Yield in a Semi-arid Region: Case Study, Kufranja Basin-Jordan. *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 1, No. 3, 2007.
- Alaba, B. (2010). Hydrologic modeling and uncertainty analysis of an ungauged watershed using mapwindowswat. Dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Science in Geospatial Technologies. Universidade Nova de Lisboa, Universitat Jaume I, Westfälische, Wilhelms Universität, Münster.
- Aparicio Mijares Francisco Javier, "Fundamentos de Hidrología de Superficie." Editorial Limusa, 1997.
- Arlen D. Feldman, (March 2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC.
- Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and P. M. Allen, 1999. Continental Scale Simulation of the Hydrologic Balance. *Journal of the American Water Resources Association* 35(5):1037- 1051.
- Arnold, J. G., Srinivasin, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment: Part I. Model Development, *Journal of American Water Resources Association*, 34, 73–89.

- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., Van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N. and Jha, M.K. (2012). Swat: Model use, calibration and validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Vol. 55(4): 1491-1508.
- Benavides-Solorio, J.D., González-Guillén, M.J., López-Paniagua, C. y Valdez-Lazalde, J.R. (2008). Oferta hídrica de la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco, orientada hacia los servicios ambientales. *Madera y Bosques* 14(2). Pp. 5-28.
- Bergström, S., and Forsman, A. (1973) Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model. *Nordic Hydrology*, Vol. 4, No. 3. 147-170.
- Braun, S. A. (2008). Tropical Rainfall Measuring Mission. Obtenido de NASA: <Http://trmm.gsfc.nasa.gov>
- Campos Aranda, D.F. 1998. Procesos del Ciclo Hidrológico. 3ra. Reimpr. Univ. Aut. De San Luis Potosí.
- Comisión Estatal del Agua. (2005). Estudio de piezometría y evolución de niveles, en la cuenca media y alta del río Sonora, y río Bacoachi". Comisión Estatal del Agua de Estado de Sonora.
- Comisión Nacional del Agua. (2009). Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero Rio San Miguel. Disponibilidad media anual de agua subterránea, 44.
- Devkota, L.P. and Gyawali, D.R. (2015). Impacts of climate change on hydrological regime and waterresources management of the Koshi River Basin, Nepal. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. No. 4. Pp. 502–515.
- Fadill, A., Rhinane1, H., Kaoukaya, A., Kharchaf1, Y., Bachir, O.A. (2011). Hydrologic Modeling of the Bouregreg Watershed (Morocco) Using GIS and SWAT Model. *Journal of Geographic Information System*, No. 3, 279-289.
- Félix Salas, F.B. (2009). Análisis del escurrimiento de la cuenca del Rio San Miguel, Sonora, México, durante el 2004. Tesis de Grado. Maestría en Ciencias en Geología. Universidad de Sonora. México.
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. y Arnold, J.G. (2006). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Vol. 50(4): 1211-1250

- Gebremichael, M., E.R. Vivoni, C.J. Watts, J. Garatuza-Payan and J. Cesar-Rodriguez, 2007: Submesoscale spatiotemporal variability of North American monsoon rainfall over complex terrain. *J. Climate*, 20, 1751-1773.
- Goetz, S., Jantz, C.A. and Sunc, M. (2011). Forecasting Future Land Use and Its Hydrologic Implications: A Case Study of the Upper Delaware River Watershed. *Watershed Science Bulletin. Journal of the Association of Watershed & Stormwater Professionals* A program of the Center for Watershed Protection, Inc.
- Goodrich, D.C., Canfield, H.E., Burns, I.S., Semmens, D.J., Miller, S.N., Hernandez, M, Levick, R.L., Guertin, D.P., Kepner, W.G. (2005). Rapid Post-Fire Hydrologic Watershed Assessment using the AGWA GIS-based Hydrologic Modeling Tool. *Proc. ASCE Watershed Manage. Conf.*, July 19-22, Williamsburg, VA.
- Grijalva, F. J. (2012). Cuencas Sedimentarias. Obtenido de Geología, Universidad De Sonora: [Http://geologia.uson.mx/academicos/](http://geologia.uson.mx/academicos/)
- Hamad, J.T., Eshtawi, T.A., Abushaban, A.M. and Habboub, M.O. (2012). Modeling the Impact of Land-Use Change on Water Budget of Gaza Strip. *Journal of Water Resource and Protection*, 2012, 4, 325-333.
- Ivanov, V.Y., Vivoni, E.R., Bras, R.L., and Entekhabi, D., (2004). Catchment hydrologic response with a fully-distributed triangulated irregular network model. *Water Resources Research*, 40(11), W11102, doi:10.1029/2004WR003218.
- Jain, M. and Sharma, S.D. (2014). Hydrological modeling of Vamsadhara River basin India using SWAT. *International Conference on Emerging Trends in Computer and Image Processing (ICETCIP'2014)* Dec. 15-16, 2014 Pattaya, Thailand.
- Jha, M., Arnold, J.G., Gassman, P.W., Giorgi, F. and Gu, R.R. (2006). Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi River basin streamflows using swat. *Journal of the American Water Resources Association* American Water Resources Association. Pp. 997-1015.
- Kepner, W.G., Semmens, D.J., Hernandez, M. y Goodrich, D.C. (2008). Evaluating Hydrological Response to Forecasted Land-Use Change: Scenario Testing with the Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) Tool. *The Third Interagency Conference on Research in the Watersheds*, 8-11 September 2008, Estes Park, CO.

- Kepner, W. G., M. M. Ramsey, E. S. Brown, M. E. Jarchow, K. J. M. Dickinson, and A. F. Mark. (2012). Hydrologic futures: using scenario analysis to evaluate impacts of forecasted land use change on hydrologic services. *Ecosphere* 3(7):69.
- Liria, J. (2008). Sistemas de Información Geográfica y Análisis Espaciales: Un método combinado para realizar estudios Panbiográficos. *Revista Mexicana de Biodiversidad* N° 79, 281-284.
- Méndez-Barroso, L.A., Vivoni, E.R., Watts, C.J., Rodríguez, J.C., 2009. Seasonal and interannual relations between precipitation, soil moisture and vegetation dynamics in the North American monsoon regional. *Journal of Hydrology* 377 (2009) 59–70.
- Miller, S. N., D. J. Semmens, D. C. Goodrich, M. Hernandez, R., C. Miller, W. G. Kepner, and D. P. Guertin. 2007. The automated geospatial watershed assessment tool. *J. Environ. Modeling and Software* 22(3): 365-377.
- Miller, S.N., Kepner, W.G., Mehaffey, M.H., Hernandez, M., Miller, R.C., Goodrich, D.C., Devonald, K.K., Heggem, D.T. and Miller, W.P. (2002). Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 38, no. 4.
- NASA. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Obtenido de <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>. Consultado: (13 de Febrero de 2012).
- NASA. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/background.html. Consultado: 15 de Febrero de 2012.
- NASA. (2011). Curso de Capacitación en Percepción Remota (NASA). Colombia.
- Nedkova, S. and Burkhard, B. (2012). Flood regulating ecosystem services mapping supply and demand in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*. No. 21. Pp. 67-79.
- Oliver, J., & Hidore, J. (2002). *Climatology and Atmospheric Science*. United States of America: Prentice Hall.
- Ortiz Rivera, A., Mendoza Cantú, M.E. & Bravo Espinosa, M. (2011). Implementación del modelo hidrológico SWAT: modelación y simulación multitemporal de la variación de escorrentía en la cuenca del lago de Cuitzeo. Instituto Nacional de Ecología y

- Cambio Climático. SEMARNAT. Consulta en línea, 23 de mayo de 2014.
http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/2011_cnch2_cc_aortiz.pdf
- Ponce, V.M. (1989). "Engineering Hydrology", Editorial Prentice Hall.
- Robles Morúa, A. (2010). Integrated Water and sanitation risk assessment and modeling in the upper Sonora River Basin. Michigan: Michigan Technological University.
- Sánchez, J. (2011). Medidas puntuales de permeabilidad. Universidad de Salamanca.
<Http://hidrologia.usal.es>. Consultado: 13 de marzo de 2012.
- The Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA), watershed runoff and erosion models obtenido de <http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/about-agwa/>
- Todini, E. & Ciarapica, L. (2001). The TOPKAPI model. (Chapter 12). Mathematical models of large watershed hydrology. V.P. Shing, et al. Eds. Water Resources Publications. Littleton, Colorado, USA.
- USDA-ARS. (2015). AGWA: Description and uses. Consultado el 17 de mayo de 2015.
- Valencia Coronado, M. 2009. Análisis del efecto de la mejora en la distribución espacial de la precipitación en los elementos del balance de agua en la Cuenca del Río San Miguel, Sonora. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil y Minas. Universidad de Sonora. México.
- Vega Granillo, E. L. (2011). Hidrogeología. Universidad de Sonora. Colección de textos académicos. Hermosillo, 207 p.
- Watts, C.J., R.L. Scott, J. Garatuza-Payan, J.C. Rodriguez, J.H. Prueger, W.P. Kustas and M. Douglas, 2007: Changes in vegetation condition and surface fluxes during NAME 2004. *J. Climate*, 20, 1810-1820.
- Watts, C.J., Saiz Hernández, J.A., Rodríguez, J.C. y Cuevas Navarro J.F. 2006. Corrección a las medidas de precipitación de los pluviógrafos de balancín en el noroeste de México. XIX Congreso Nacional de Hidráulica. Cuernavaca Morelos, 7 a 10 de noviembre.
- Wurbs, R., & James, W. (2002). *Water Resources Engineering*. Upper Saddle River, United states of America: Prentice Hall.
- Xu, C. Y. (2002). *Textbook of hydrologic models (Lärobok i Avrinningsmodeller)*. Uppsala University Department of Earth Sciences Hydrology.

VI. Anexos

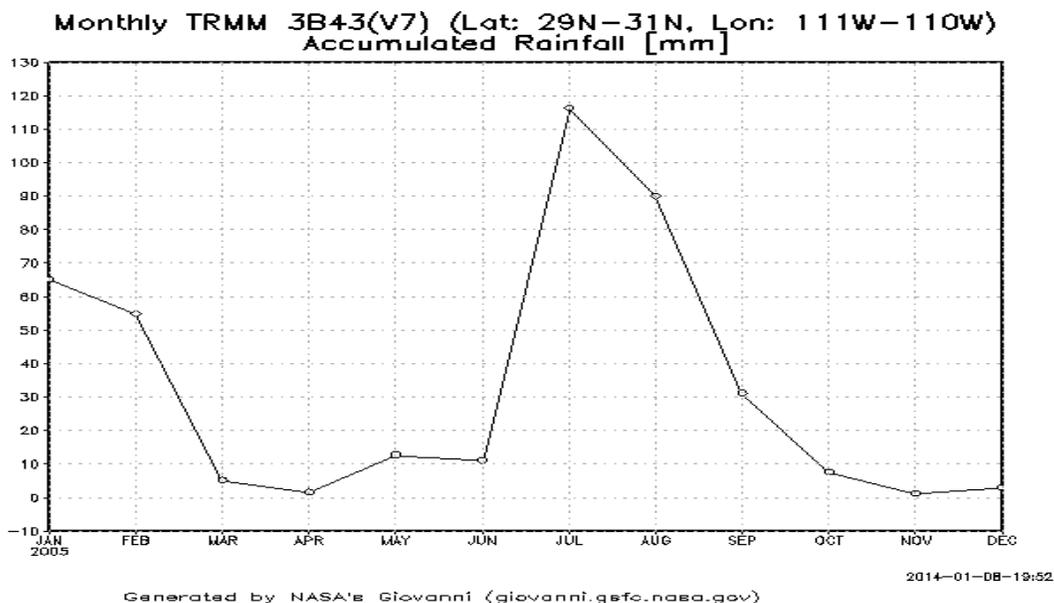
Anexo A. Selección de producto de precipitación y año.

La base de datos de precipitación consta de las estaciones operadas por la USON, SMN y de percepción remota de TRMM.

Los productos más utilizados de TRMM son el 3B42 y 3B43, ambos productos Versión 7 a la fecha considerando que podrían ser una buena opción para la modelación hidrológica.

TRMM	
Cobertura espacial	50°S – 50°N
Resolución espacial	0.25° x 0.25°
Resolución temporal	Mensual
Producto	3B43 V7

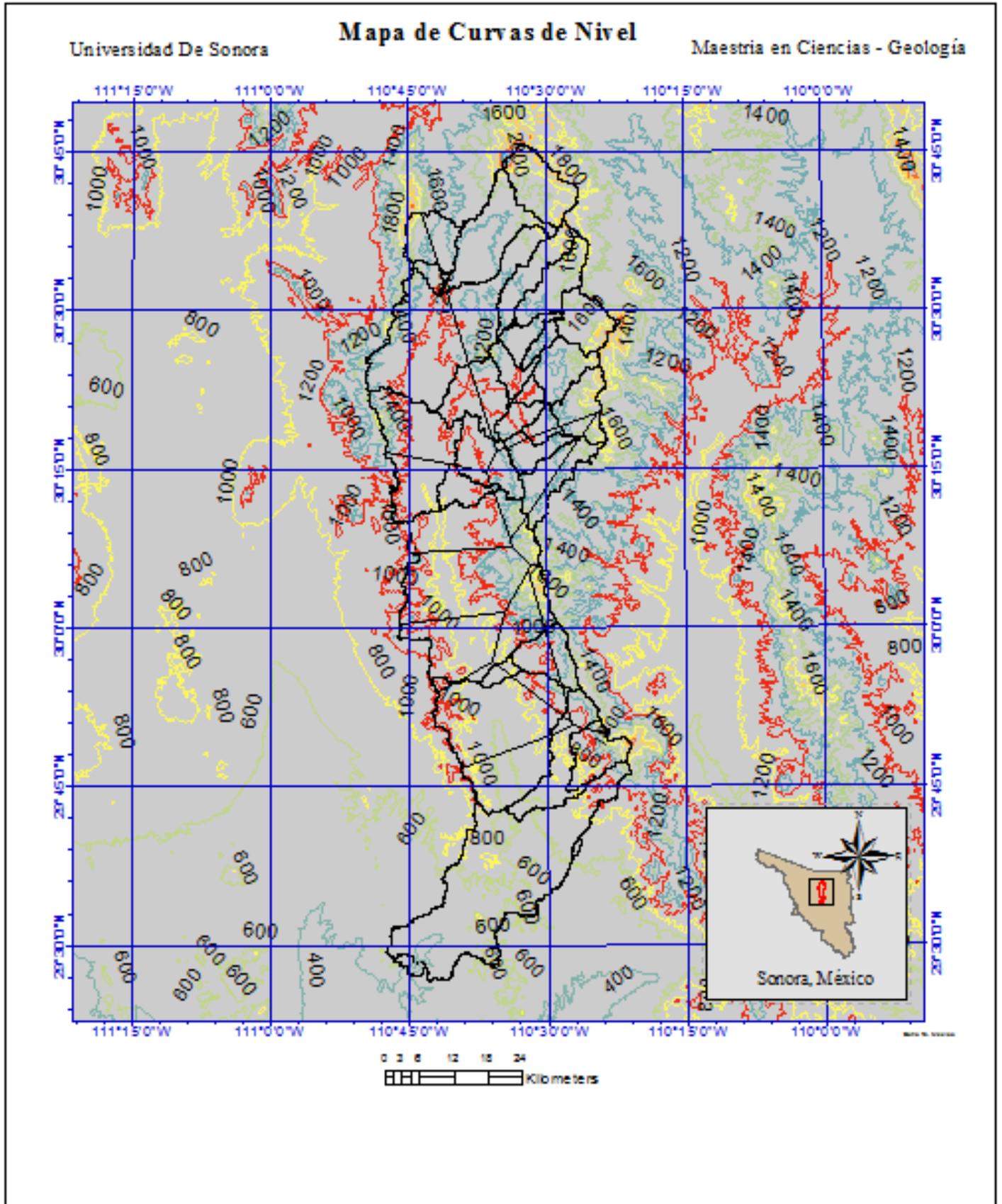
TRMM	
Cobertura espacial	50°S – 50°N
Resolución espacial	0.25° x 0.25°
Resolución temporal	3 horas, diaria
Producto	3B42 V7



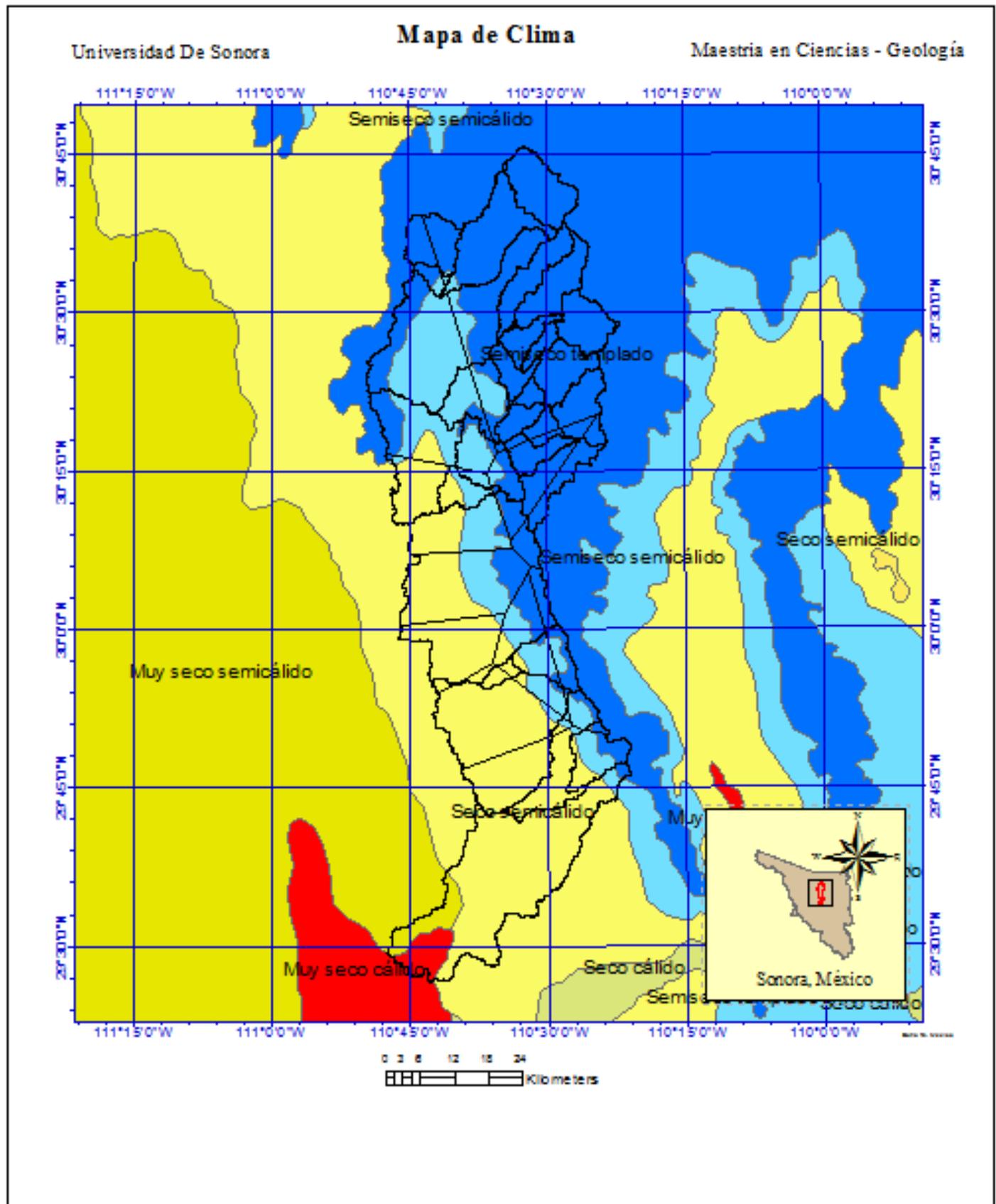
Anexo B. Ubicación de las estaciones

		grados	minutos	segundos		grados	minutos	segundos
1	N	28	54	48.9	W	111	18	38
4	N	28	54	51.2	W	111	18	40.9
6	N	29	48	22.8	W	110	26	52.6
7	N	29	57	21	W	111	52	9.5
8	N	29	57	16	W	111	52	7.1
9	N	29	57	15.5	W	111	52	5.5
10	N	30	35	57.1	W	111	49	19.8
11	N	30	43	19.5	W	112	4	18.1
12	N	30	30	40.2	W	112	17	12.9
13	N	30	36	1.7	W	112	22	37.5
14	N	30	44	37.6	W	112	27	25.8
15	N	30	48	16.1	W	112	38	57
16	N	30	48	15	W	112	45	40
17	N	30	58	20	W	113	1	19.1
18	N	30	47	21.5	W	112	53	3.5
19	N	29	0	55.4	W	111	8	25.5
20	N	29	0	55.4	W	111	8	25.6
21	N	29	0	55.1	W	111	8	25.2
22	N	29	0	55.1	W	111	8	25.2
23	N	29	0	55.5	W	111	8	25.6
24	N	29	0	55.4	W	111	8	25.6
25	N	28	55	46.1	W	111	20	54.1
26	N	29	7	7.5	W	111	0	5.7
27	N	30	27	59.4	W	110	42	17.6
28	N	30	27	59.4	W	110	42	17.5
Torre	N	29	44	27.8	W	110	32	11.6

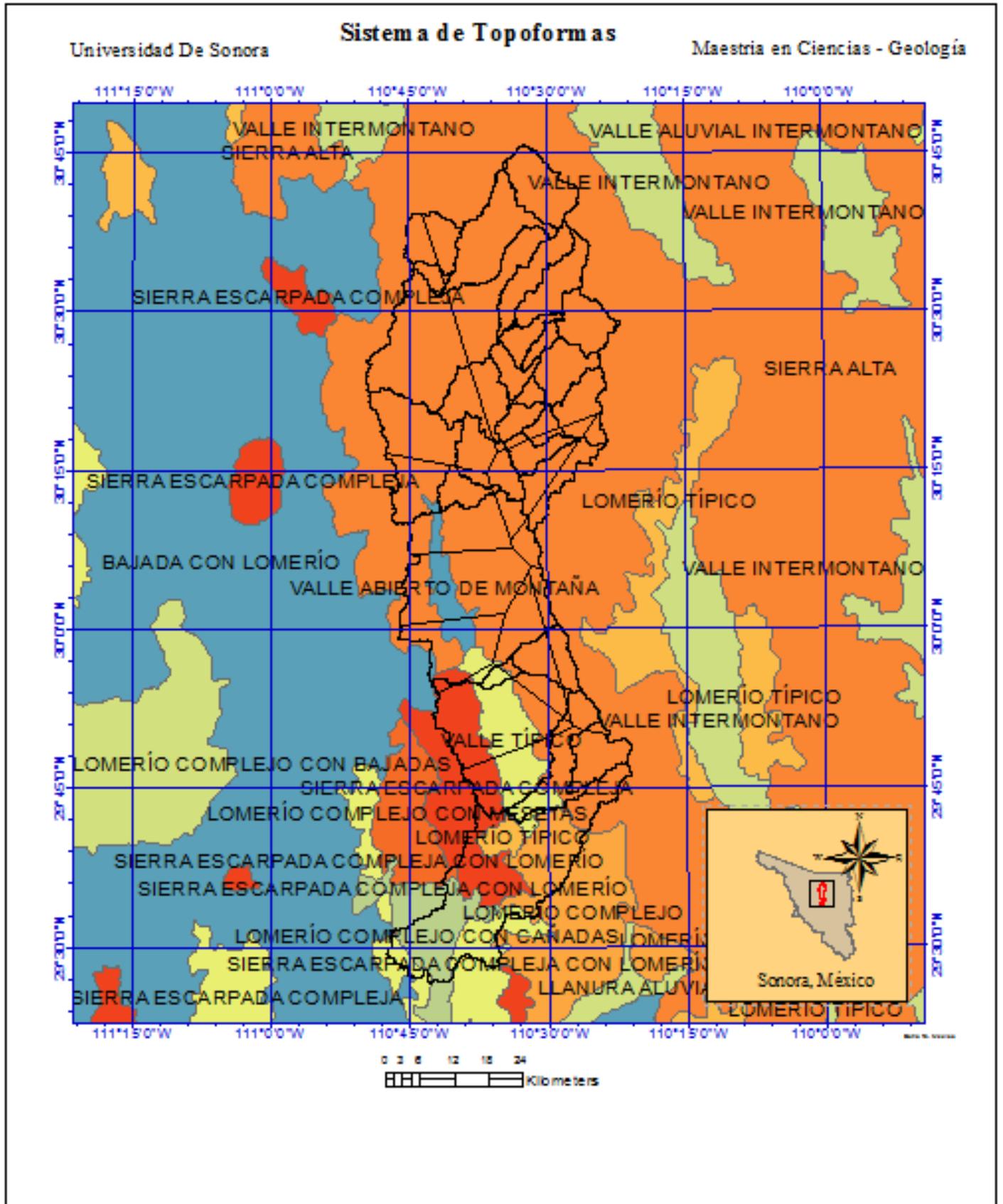
Anexo E



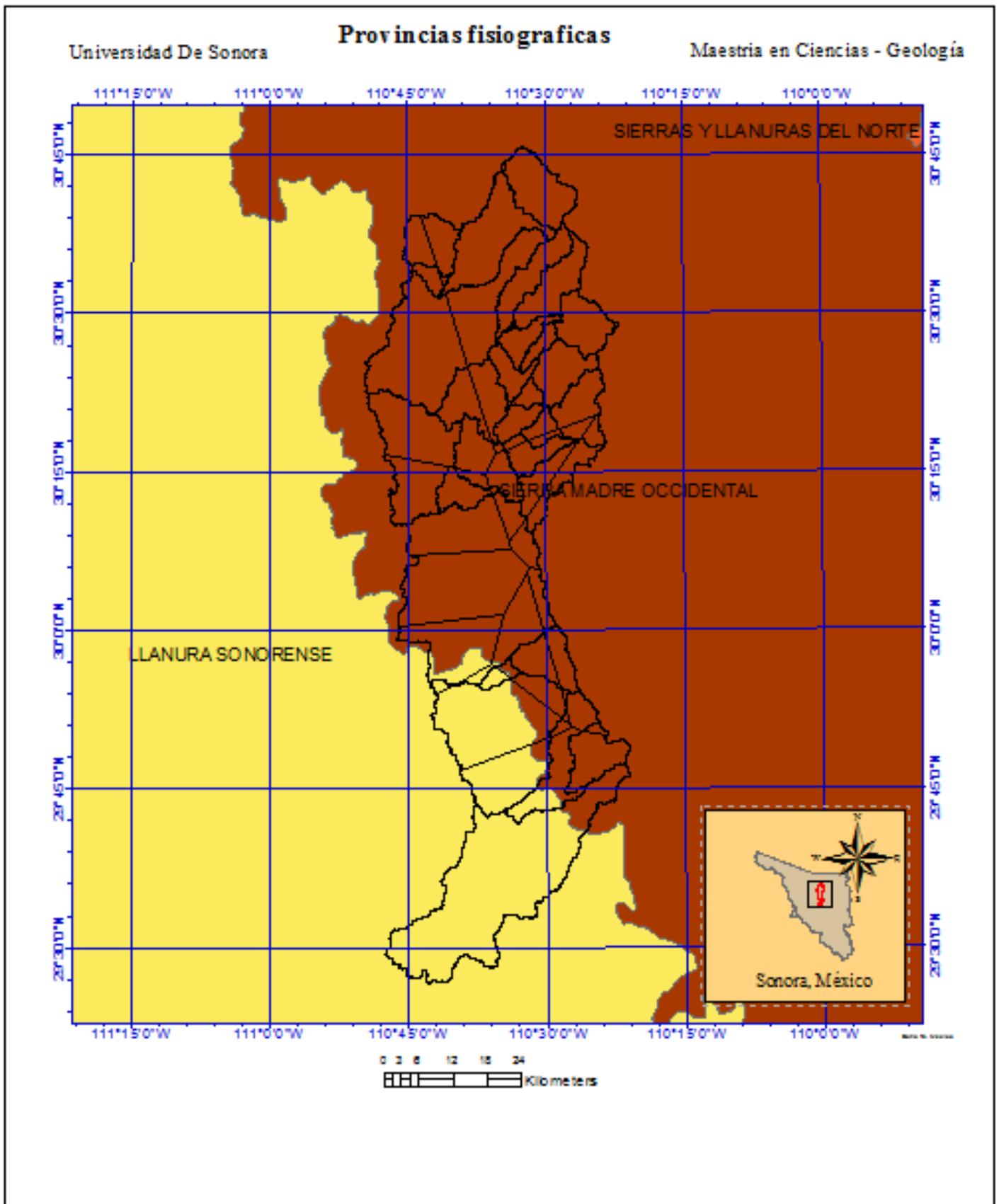
Anexo F



Anexo G



Anexo H



Anexo J.
CD Modelo CRSM