



UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

**“ANÁLISIS DEL ESCURRIMIENTO DE LA CUENCA DEL
RÍO SAN MIGUEL, SONORA, MÉXICO, DURANTE EL
2004”**

T E S I S

Que para obtener el Grado de:

Maestro en Ciencias-Geología

P R E S E N T A :

FÁTIMA BEATRIZ FÉLIX SALAS



HERMOSILLO, SONORA, ABRIL, 2009

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

DEDICO ESTA TESIS:

A mi querida hija Ambar, a mi esposo y
a mis padres.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por haberme dado su voto de confianza y todo el apoyo económico al brindarme una beca con registro 208890, en un período que comprende del 01 agosto del 2006 al 31 julio del 2008, haciendo posible el poder estudiar la Maestría en Ciencias en Geología en la Universidad de Sonora

A la **M. I. Eva Lourdes Vega Granillo**, por su tutoría, ayuda y paciencia en la realización de esta tesis, así como por las valiosas ideas aportadas para la mejora de este trabajo.

Al **Dr. Juan Arcadio Saiz Hernández**, por la ayuda, guía y sugerencias brindadas en todo momento para salir adelante en todos los procesos de la tesis.

A los doctores **Christopher Watts** y **José Castillo Gurrola** por la revisión de esta tesis y sus acertadas observaciones.

A la **Geol. Grisel Alejandra Gutiérrez Anguamea**, por la grandísima ayuda que me dio en todo momento para llevar a cabo este trabajo, así como por alentarme a estudiar una maestría.

Al **Departamento de Geología de la Universidad de Sonora**, por los conocimientos adquiridos y la disposición de ayudar cuando lo necesité.

En general, **a todas las instituciones, archivos, bibliotecas**, que de alguna manera contribuyeron a facilitarme el acceso a la información requerida para alcanzar los objetivos trazados en esta tesis.

En especial agradezco a **Carmen mi madre**, a **Gilberto mi esposo** quien me animo a seguir estudiando y a **Lupita mi hermana**, de quienes siempre recibí un grande apoyo.

Finalmente, **a todas aquellas personas**, que me brindaron su ayuda, tiempo e información para el logro de mis objetivos.

ANÁLISIS DEL ESCURRIMIENTO DE LA CUENCA DEL RÍO SAN MIGUEL, SONORA, MÉXICO DURANTE EL 2004

Tesista:

Fátima Beatriz Félix Salas

Directores de tesis:

Eva Lourdes Vega Granillo
Juan Arcadio Saiz Hernández

ÍNDICE

	Pág.
Resumen	1
I. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Generales	3
1.2.2. Específicos	3
1.3. Localización del área de estudio	4
1.4. Población del área	6
1.5. Situación administrativa del acuífero	7
II. TRABAJOS PREVIOS	
2.1. Hidrología superficial y subterránea	9
2.2. Calidad del agua	16
2.3. Marco geológico y suelos	20
2.3.1. Paleozóico	20
2.3.2. Mesozóico	21
2.3.3. Cenozoico (Terciario)	21
2.3.4. Cenozoico (Cuaternario)	22
2.3.5. Geología estructural	23
2.3.6. Geología del subsuelo	24
2.3.7. Tipos de suelos	25
2.4. Provincias hidrogeológicas	26
III. MATERIALES Y METODOS	
3.1. Materiales	27
3.2. Métodos	27
IV. DETERMINACIÓN DEL ESCURRIMIENTO	
4.1. Tipos de escurrimiento	29
4.2. Coeficiente de escurrimiento	30
4.3. Proceso del escurrimiento	33
4.4. Factores que afectan el escurrimiento	35
4.4.1. Climáticos	35
4.4.2. Fisiográficos	37

4.4.3. Humanos	39
V. ANÁLISIS CLIMATOLOGICO DE LA CUENCA	
5.1. Clima	44
5.2. Vegetación	44
5.3. Temperatura	49
5.4. Precipitación	54
5.5. Evaporación potencial	61
5.6. Esguerrimiento	65
5.7. Balance hídrico	66
VI. CARACTERIZACIÓN FISIAGRÁFICA DE LA CUENCA	
6.1. Clasificación hidrológica	69
6.2. Fisiografía y Geomorfología	69
6.3. Unidades geohidrológicas	71
6.4. Área de la cuenca	72
6.5. Coeficiente de compacidad	73
6.6. Relación de elongación	73
6.7. Relación de circularidad	75
6.8. Curva hipsométrica	75
6.9. Elevación media de la cuenca	79
6.10. Rectángulo equivalente	79
6.11. Características de la red de drenaje	80
6.11.1. Tipos de drenaje	81
6.11.2. Longitud de los tributarios	83
6.11.3. Orden de la cuenca	84
6.11.4. Densidad de corriente	84
6.11.5. Densidad de drenaje	85
6.11.6. Longitud del cauce principal	86
6.11.7. Pendiente del cauce principal	86
6.12. Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI)	88
VII. EL MODELO HEC-HMS	
7.1. Generalidades	91
7.2. Componentes	92
7.2.1. Modelo de cuenca	92
7.2.2. Modelo meteorológico	93
7.2.3. Especificaciones de control	94
7.2.4. Datos de entrada	95
VIII. RESULTADOS	96
IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
9.1. Conclusiones	110
9.2. Recomendaciones	111
X. LITERATURA CITADA	113
ANEXOS	118

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Río San Miguel	4
Figura 2. Límites, drenaje y poblaciones de la cuenca	5
Figura 3. Río San Miguel en su porción baja, cerca de Rayón Sonora	6
Figura 4. Tipos de aprovechamiento	8
Figura 5. Usos del agua	8
Figura 6. Zonas acuíferas y poblaciones de la Cuenca del Río San Miguel	11
Figura 7. Geología de la Cuenca del Río San Miguel	22
Figura 8. Sección Pesqueira	25
Figura 9. Sección Zamora	25
Figura 10. Diagrama que explica el escurrimiento	29
Figura 11. Tipos de corrientes: (a) Río efluente (toma agua del acuífero), (b) Río influente (cede agua al acuífero)	34
Figura 12. Reconocimiento en campo de la actividad ganadera en Opodepe, Sonora	39
Figura 13. Porcentaje de la producción ganadera y avícola en la Cuenca del Río San Miguel	40
Figura 14. Volumen total de material forestal utilizado en los municipios de la Cuenca del Río San Miguel	42
Figura 15. Minerales producidos en los municipios delimitados dentro del área de estudio	43
Figura 16. Vegetación desértica de la cuenca	44
Figura 17. Diversos tipos de vegetación (matorral, mezquite, pastizal y selva)	45
Figura 18. Vegetación de la Cuenca del Río San Miguel	49
Figura 19. Localización de estaciones climatológicas dentro y fuera de la cuenca	50
Figura 20. Promedios de temperaturas anuales (°C) desde 1941 a 2007	52
Figura 21. Isotermas de la Cuenca del Río San Miguel	53
Figura 22. Promedios de precipitaciones anuales (mm) desde el año 1941 a 2007, Cuenca del Río San Miguel	56
Figura 23. Estación hidrométrica El Cajón	57
Figura 24. Localización y nombres de las estaciones de la Unison	58
Figura 25. Estación climatológica La Torre en Rayón, Sonora	58
Figura 26. Controladores y sensores de la estación La Torre (Rayón, Sonora)	59

Figura 27. Pluviógrafo de balancín, ubicado en la estación La Torre	59
Figura 28. Isoyetas de precipitación (mm) de la Cuenca del Río San Miguel	60
Figura 29. Evaporación anual promedio (mm) desde 1941 a 2007 en la Cuenca del Río San Miguel	63
Figura 30. Evaporación total media anual (mm) en la cuenca	64
Figura 31. Elementos del balance de agua superficial de la cuenca en estudio	68
Figura 32. Fisiografía de la Cuenca del Río San Miguel	71
Figura 33. Unidades geohidrológicas de la Cuenca del Río San Miguel	72
Figura 34. Longitud máxima de la Cuenca del Río San Miguel	74
Figura 35. Curva hipsométrica	76
Figura 36. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión	77
Figura 37. Curva hipsométrica y elevaciones media y mediana de la Cuenca del Río San Miguel	79
Figura 38. Modelos de drenaje	81
Figura 39. Orden de corrientes de la Cuenca del Río San Miguel	83
Figura 40. Cauce principal de la Cuenca del Río San Miguel	86
Figura 41. Perfil hidráulico del Río San Miguel	88
Figura 42. Gráfica de tiempo contra NDVI y gasto de una cuenca en estudio	90
Figura 43. Modelos de cuenca (“Basin models”)	93
Figura 44. Modelo meteorológico con las subcuencas y sus pluviógrafos	94
Figura 45. Especificaciones de control del HEC-HMS	94
Figura 46. Datos de tiempo contra lluvia	95
Figura 47. Modelo digital de elevación (MDE) de la cuenca	96
Figura 48. Microcuencas obtenidas con el programa IDRISI	97
Figura 49. Tipos de vegetación	99
Figura 50. Tipos de suelo de la Cuenca del Río San Miguel	100
Figura 51. Mapa que combina los tipos de suelos y vegetación de la cuenca	101
Figura 52. Números de curva para cada microcuenca obtenida con IDRISI	102
Figura 53. Polígonos de Thiessen en la Cuenca del Río San Miguel	104
Figura 54. Precipitación registrada en un año	106
Figura 55. Ejemplo de los hidrogramas generados por el modelo HEC-HMS	107
Figura 56. Tipo de vegetación para cada una de las microcuencas del área estudiada	109

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cantidad de habitantes en los poblados de la Cuenca del Río San Miguel	7
Tabla 2. Geología del subsuelo de los ríos Zanjón y San Miguel	24
Tabla 3. Números de la curva de escurrimiento para áreas agrícolas cultivadas y zonas urbanas	32
Tabla 4. Números de curva para condiciones seca y húmeda	33
Tabla 5. Producción ganadera y avícola por Municipio	39
Tabla 6. Superficie agrícola (hectáreas) según tipo de agricultura	41
Tabla 7. Superficie sembrada y cosechada por tipo de cultivo y riego del año 2006	41
Tabla 8. Volumen de producción forestal según grupo de especies (m ³ rollo)	42
Tabla 9. Tipos y superficies de bosque en hectáreas (2002-2005)	42
Tabla 10. Volumen y valor de la producción minera	43
Tabla 11. Superficie de pastizal (ha) de 2002 a 2005	46
Tabla 12. Superficie total según uso de suelo y vegetación en hectáreas	49
Tabla 13. Temperaturas medias anuales (°C) de las estaciones de la Cuenca del Río San Miguel y áreas cercanas	51
Tabla 14. Cálculo de la temperatura media anual por el Método de las Isoyetas	53
Tabla 15. Precipitación media anual (mm) de las estaciones de la Cuenca del Río San Miguel y áreas cercanas	55
Tabla 16. Cálculo de la precipitación total media anual (Pp)	60
Tabla 17. Evaporación media anual (mm) de las estaciones encontradas en la Cuenca del Río San Miguel	61
Tabla 18. Cálculo de la evaporación total media anual (Evap)	64
Tabla 19. Balance superficial de la cuenca del río San Miguel, Sonora	67
Tabla 20. Clasificación de cuencas hidrográficas por su tamaño	73
Tabla 21. Áreas y elevaciones para la construcción de la curva hipsométrica	78
Tabla 22. Mediciones fisiográficas de la cuenca	84
Tabla 23. Valores de NDVI de una microcuenca del Río San Miguel	89
Tabla 24. Obtención de los números de curva y tiempo de concentración de las microcuencas	103
Tabla 25. Precipitación registrada en un día	105
Tabla 26. Comparación entre los datos del Cajón y el modelo HEC-HMS	108

RESUMEN

En este trabajo se aplicó el modelo HEC-HMS para modelar el comportamiento hidrológico de la Cuenca del Río San Miguel, Sonora, México.

Se utilizaron datos de pluviógrafos ubicados en estaciones climatológicas propiedad de la Universidad de Sonora.

Para realizar la presente tesis se hizo uso de imágenes digitales para la construcción de mapas de elevación, vegetación, tipo de suelo y uno combinado de estos últimos.

Con base en las características fisiográficas e hidrológicas de la cuenca, se dividió en 40 microcuencas, nombradas c1, c2,...c40 y de acuerdo al Método del Número de Curva, se obtuvo un número de curva para cada una de ellas, tanto en condición seca como húmeda.

Se calcularon las características morfométricas, resultando valores que son indicadores de que la Cuenca del Río San Miguel es de forma alargada y se encuentra en una etapa de madurez y equilibrio.

De acuerdo a los requerimientos del programa HEC-HMS, los datos de precipitación de las estaciones climatológicas se dividieron por periodos de lluvia a lo largo del año.

Se hicieron varias corridas del modelo y los resultados nos rebelaron que el mayor gasto registrado fue de 83.68 m³/s en el mes de Julio, que corresponde a la llegada al estado del monzón de verano. Asimismo, los mayores gastos provienen de las microcuencas ubicadas en las partes alta y media de la cuenca.

Una vez obtenidos los gastos de las microcuencas, se relacionaron con los datos del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI), para ver la evolución de la vegetación en los periodos de lluvia y sequía de la cuenca y determinar cómo afecta al escurrimiento.

I. INTRODUCCIÓN

El Río San Miguel constituye una subcuenca del Río Sonora, el cual alimenta a los acuíferos de la Costa de Hermosillo y Mesa del Seri-Zanjón, entre otros. El primer acuífero ha sido usado en la agricultura del Distrito de Riego Costa de Hermosillo, y el segundo provee de agua a la ciudad de Hermosillo Sonora, con más de 650,000 habitantes.

La confrontación del medio físico y de los usos del agua conduce a identificar tres zonas en la Cuenca del Río Sonora: la cuenca alta que recibe la mayoría de las precipitaciones y cuya agua se usa para uso doméstico, agricultura y minería; la cuenca media que comprende la ciudad de Hermosillo y sus necesidades de agua potable; y la cuenca baja dedicada esencialmente a la agricultura.

Hidrológicamente, la Cuenca del Río Sonora comprende las subcuencas de los ríos: Zanjón, San Miguel, Sonora y Costa de Hermosillo. La Cuenca del Río San Miguel es importante para dotar de agua a una población de más de 10,000 habitantes, para desarrollar la agricultura a mediana escala y por ser la transición entre las provincias hidrogeológicas Planicie Costera del Pacífico y Sierra Madre Occidental.

Se ubica en la porción centro-septentrional de la entidad y posee una superficie de 3,845.98 km²; está limitada al norte por la Sierra Azul, al oeste por las sierras La Madera, Cucurpe y San Jerónimo, al este por las sierras San Antonio, Los Locos, El Jucaral y El Aconchi y al sur, por la Presa Abelardo L. Rodríguez.

Los materiales acuíferos de esta zona están representados por depósitos aluviales recientes cuya granulometría varía desde boleos y gravas hasta limos y arcillas, los cuales conforman un acuífero de tipo libre con transmisividad que varía de 1×10^{-4} a 7×10^{-2} m²/s. Estos depósitos presentan profundidades máximas de 60 m y espesores saturados de 20 m en promedio.

En esta zona existen alrededor de 285 aprovechamientos, principalmente norias que descargan un volumen medio anual de 65 millones de m³, con gastos promedios para cada obra de 27 L/s.; los pozos tienen diámetros de tubería de descarga que van de 10.2 a 25.4 cm (4 a 10"). La recarga media anual del acuífero alcanza los 63 millones de m³, generados esencialmente por la infiltración que ocurre a lo largo del cauce del Río San Miguel.

La calidad del agua varía de dulce a tolerable con un rango de contenido de sales que fluctúa entre los 200 y 900 mg/L. De acuerdo a la clasificación de Chase-Palmer, la familia de agua predominante es la bicarbonatada cálcica-magnésica.

1.1. Planteamiento del problema

El escurrimiento del Río San Miguel puede ser insuficiente para dotar de agua a la población y desarrollar actividades agrícolas. El desarrollo de la vegetación está relacionado con la precipitación y con el escurrimiento que se producen en la cuenca.

Se ha observado que tiempo después de iniciada la lluvia, ocurre la escorrentía. Sin embargo, la vegetación puede ser un factor que inhiba el escurrimiento. Por ello, se propone modelar el comportamiento hidrológico de la Cuenca del Río San Miguel con el objeto de relacionar la vegetación con la lluvia-escurrimiento.

1.2. Objetivos

1.2.1. Generales

Modelar el comportamiento hidrológico de la Cuenca del Río San Miguel durante el año 2004, para simular el escurrimiento y la capacidad de aportación de agua de las distintas microcuencas propuestas.

1.2.2. Específicos

- a) Dividir la cuenca en microcuencas considerando que sean zonas fisiográficas homogéneas (topografía e hidrología principalmente).
- b) Hacer una distribución espacial de la precipitación registrada en los pluviógrafos de las estaciones consideradas, durante el año 2004.
- c) Determinar los parámetros hidráulicos de flujo en cauce necesarios para alimentar el modelo HEC-HMS.
- d) Simular el escurrimiento bajo distintas condiciones de humedad del suelo (húmedo y seco).
- e) Analizar los hidrogramas de escurrimiento generados por el modelo y compararlos con los datos proporcionados por la CONAGUA.

- f) Estudiar el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada de (NDVI) para conocer el comportamiento de la vegetación en período de lluvia y de sequía. Posteriormente se puede usar para calibrar el modelo.
- g) Elaborar las conclusiones y recomendaciones.

1.3. Localización del área de estudio

La Cuenca del Río San Miguel se encuentra en la porción centro-norte del estado, cuenta con una extensión territorial de 3,845.98 km² y tiene una forma alargada con dirección preferencial Norte-Sur; limita al Norte con la Cuenca del Río de 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 Cuenca de la Costa de Hermosillo, Zona Centro y Sur (Figura 1).

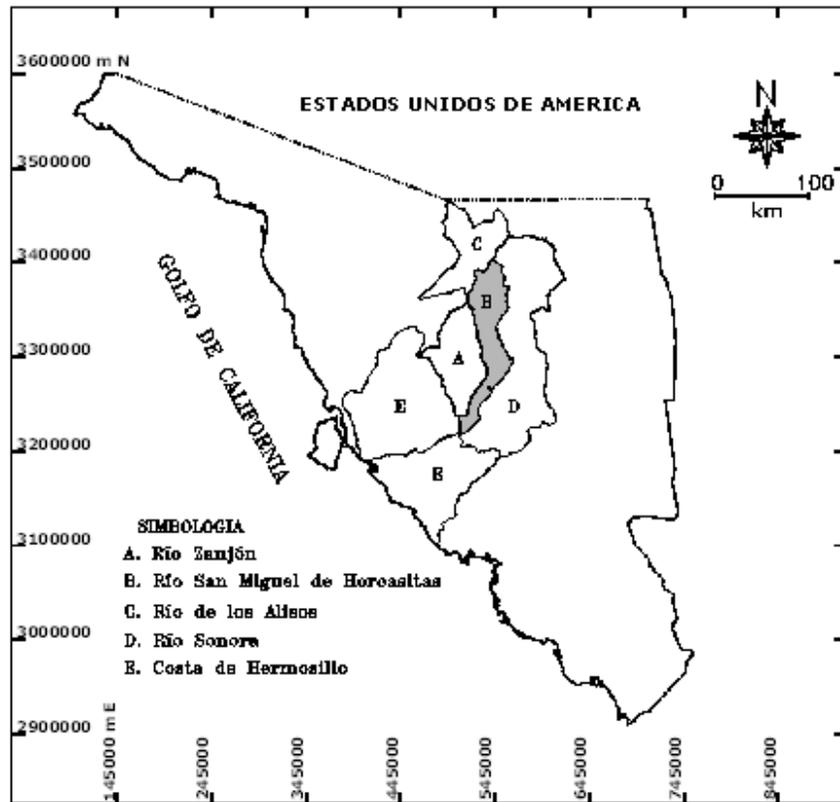
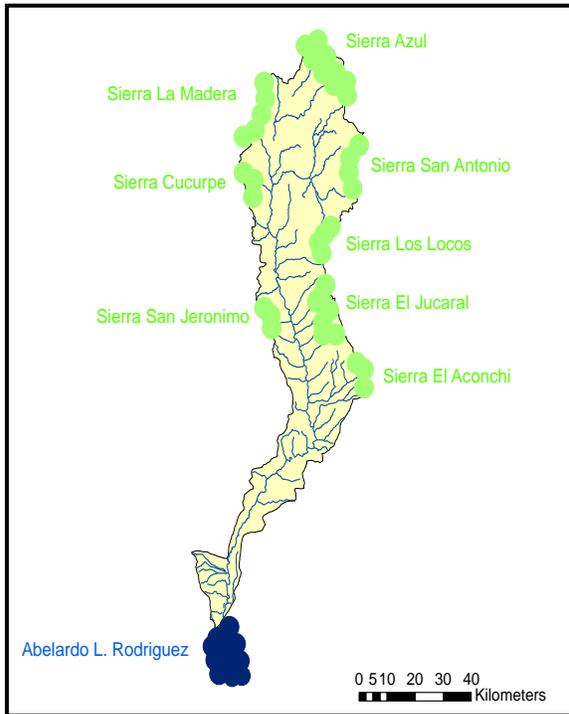


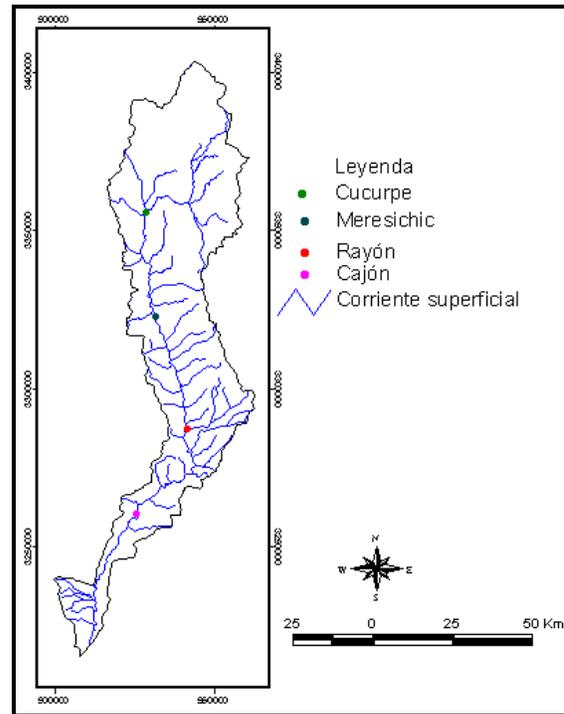
Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Río San Miguel

La Cuenca del Río San Miguel está limitada al norte por la Sierra Azul, al oeste por las sierras La Madera, Cucurpe y San Jerónimo, al este por las sierras San Antonio, Los Locos, El Jucaral y El Aconchi y al sur, por la Presa Abelardo L. Rodríguez (Figura 2).

Localización de las sierras que limitan la subcuenca



Fuente: D'hombres *et al.* (2007)



Fuente: Propia

Figura 2. Límites, drenaje y poblaciones de la cuenca

El rasgo hidrológico más importante es el Río San Miguel (Figuras 2 y 3), que nace en la Sierra Azul a una altitud de 2,000 metros sobre el nivel del mar, y tiene un desarrollo de 220 km. Su caudal es intermitente ya que solamente en temporadas de lluvia es cuando logra tener un caudal notable.

El valle del río se localiza en la porción central de la cuenca siguiendo su labrado al pie de las Sierras La Madera y El Torreón, corriendo a través de grandes escarpes y acantilados hasta el poblado del Carrizal. De este punto hasta su confluencia con el Río Zanjón, cruza por los valles de Opodepe-Rayón y San Miguel de Horcasitas, teniendo el cauce del río, al igual que el río Sonora, varios estrechamientos de rocas impermeables.



Figura 3. Río San Miguel en su porción baja, cerca de Rayón Sonora
(Coordenadas: 540,993, 3'287,185; altitud: 534 msnm)

Los aprovechamientos de aguas superficiales son escasos. En efecto, la mayor parte del Río San Miguel y sus afluentes están secos la mayor parte del tiempo, excepto durante el periodo de lluvias. Sin embargo, existen lugares donde el Río San Miguel mantiene un caudal constante, como por ejemplo cerca de la ciudad de Rayón. Esta presencia constante de agua se debe a la existencia de un flujo subterráneo (D'hombres *et al.*, 2007).

Los municipios más importantes son los de Cucurpe, Opodepe, Rayón y San Miguel de Horcasitas, siendo los mismos las cabeceras municipales. El resto de la población se ubica en pequeñas rancherías dispersas en los mismos municipios.

1.4. Población del área

Dentro de la Cuenca del Río Sonora se encuentran las poblaciones de Arizpe, San Felipe de Jesús, Aconchi, Banámichi, Huépac, Baviácora y Ures, así como poblaciones menores como La Estancia, Ranchito de Huépac, San José de Baviácora, Mazocahui, San Pedro de Ures, San José de Ures, Topahue y Molino de Camou. La población global se calcula en 22,937 habitantes, según cifras del INEGI del año de 1995, sin contar la población de Hermosillo de 545,000 habitantes para ese año. La razón de no incluir a la población del municipio de la ciudad capital es que no se considera muy impactante para este acuífero.

Los poblados más importantes en la Cuenca del Río San Miguel son Cucurpe, Opodepe, Rayón y San Miguel de Horcasitas con una población total de 10,985 habitantes en el año 2000 (Tabla 1).

Tabla 1. Cantidad de habitantes en los poblados de la Cuenca del Río San Miguel

Ciudad	Población en 2000
Cucurpe	937
Opodepe	2,831
Rayón	1,591
San Miguel de Horcasitas	5,626
TOTAL	10,985

Fuente: INEGI (2000)

1.5. Situación administrativa del acuífero

El Acuífero del Río San Miguel se considera parte de la zona de veda, publicada en el decreto del Diario Oficial de la Federación del 2 de junio de 1967, para la apertura de nuevos aprovechamientos de aguas subterráneas. Esta disposición fue ratificada en el decreto del 19 de septiembre de 1978 (CONAGUA, 2002).

La CONAGUA (2007a) a través de la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua ha agrupado los municipios del país en 9 zonas de disponibilidad para la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, en las cuales se pagará el derecho sobre agua por cada metro cúbico extraído de aguas superficiales, subterráneas, excepto las del mar, de conformidad con las cuotas establecidas por dicho organismo.

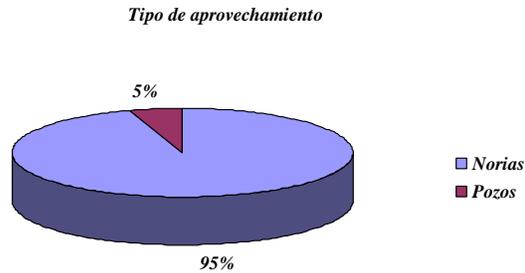
El Acuífero del Río San Miguel abarca parcialmente los municipios de: Hermosillo, San Miguel de Horcasitas, Rayón, Opodepe, Cucurpe y Carbó. El Municipio de Hermosillo pertenece a la zona de disponibilidad 4 (pero no impacta de manera importante al acuífero), el de San Miguel de Horcasitas a la 5, Carbó a la 6, y el resto a la 7.

Los usuarios del sector agrícola del Acuífero del Río San Miguel de Horcasitas son en su mayoría ejidales; se encuentran afiliados a Organizaciones Campesinas como la CCI, CNC, etc. La SAGAR brinda apoyo técnico agropecuario a estos usuarios en forma permanente a través de Centros de Apoyo Agropecuario. Por otra parte, la Comisión Nacional del Agua, ha venido sosteniendo reuniones con los distintos usuarios del agua para la Integración del Consejo de Cuenca el cual forma parte del Consejo del Alto Noroeste. El usuario agrícola es el de mayor importancia y está representado por las distintas Unidades de Riego; el uso público

urbano está representado por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Sonora (COAPAES), y por Organismos Operadores Municipales.

La zona de este acuífero queda dentro de la jurisdicción de los Distritos de Desarrollo Rural No. 142 Ures y 144 Hermosillo, ambos dependientes de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Estructuralmente, la SAGAR cuenta con la oficina del Distrito de Desarrollo Rural con sede en la población de Ures, además de Centros de Apoyo Técnico en San Miguel de Horcasitas y en Carbó. La propia dependencia ha organizado a los usuarios del sector agrícola en Unidades de Riego, las cuales se benefician con obras de aguas subterráneas como norias, galerías y pozos someros.

En la Cuenca del Río San Miguel se tienen un total de 1,301 aprovechamientos subterráneos; el 95% de éstos



(Figura 4).

Figura 4. Tipos de aprovechamiento (D'hombres *et al.*, 2007)

El agua se destina principalmente al uso agrícola con el 35% de los aprovechamientos registrados, seguido por el uso pecuario con un 22 % y el uso público urbano con un 15 %. Las demandas: industrial, doméstico, múltiples y otros son menos frecuentes (Figura 5).

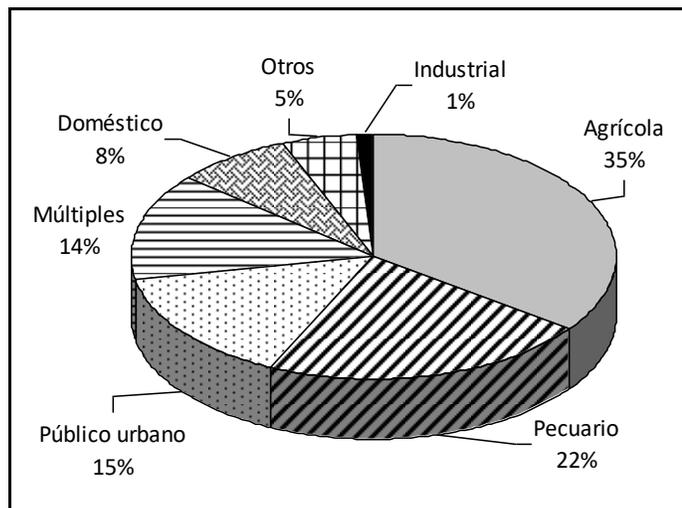


Figura 5. Usos del agua (D'hombres *et al.*, 2007)

II. TRABAJOS PREVIOS

2.1. Hidrología superficial y subterránea

En el estudio: “Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero Río San Miguel, Sonora” publicado por la CONAGUA (2002), se enlistan los trabajos que se han realizado en la cuenca. Entre ellos, 2 trabajos que la compañía Ariel Construcciones, S.A. hizo en 1970 para la Secretaría de Recursos Hidráulicos: “Estudio de Hidrología Superficial de los valles de los ríos San Miguel, Sonora, Zanjón, Bacoachi y Mátape, Sonora”, y: “Censo de aprovechamientos hidráulicos (superficiales y subterráneos) en los valles del Río Sonora, desde Mazocahui hasta Arizpe, Sonora”. Por último mencionan que la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos encomendó en 1977 a la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería el “Estudio geohidrológico de las cuencas altas de los ríos Sonora, Zanjón y San Miguel”.

El trabajo de la CONAGUA (2002) tiene 8 capítulos, entre los que se cuentan, uno de geohidrología, censo de aprovechamientos, balance y disponibilidad de aguas subterráneas. En esta investigación se concluye que la recarga al acuífero es de 52.5 hm³/año y que no existe volumen disponible para nuevas concesiones en la unidad hidrogeológica denominada Acuífero Río San Miguel, en el Estado de Sonora.

De acuerdo a la SAGARPA (2004), el Acuífero del Río San Miguel tenía una recarga en el año 2002 de 52.514 hm³ (millones de metros cúbicos), un volumen de extracción real de 57.000 hm³ y un volumen de extracción concesionado de 54.090 hm³. Dicho trabajo menciona algunas debilidades en el diagnóstico de agua a nivel estatal, como: Precipitaciones erráticas y bajas, Legislación en agua deficiente, Deficiencia en el uso de agua para servicio doméstico, industrial y agrícola e Información hidrometeorológica insuficiente, entre otras.

D’hombres *et al.* (2007) elaboraron parte del proyecto: “Estudio para una gestión integral mejorada del recurso en agua de la Cuenca del Río Sonora, México”, financiado por la SEP-CONACYT-ANUIES. Se enfocaron en la determinación del número de curva en la Subcuenca del Río San Miguel de Horcasitas, aplicando el método del US Soil Conservation Service. Sus resultados son diferentes a los datos de escurrimiento registrados por la estación hidrométrica El Cajón, por lo que sugieren se realicen más estudios.

Algunas investigaciones sobre la Cuenca del Río Sonora y el Acuífero de la Costa de Hermosillo, que incluyen la Cuenca del Río San Miguel, han sido realizados por la Universidad de Sonora: “Estudio geohidrológico del comportamiento del acuífero mediante la realización de pruebas de bombeo y conceptualización a detalle de la intrusión salina en el acuífero de la Costa de Hermosillo” (UNISON, 2000), “Estudio de cuantificación de la recarga del acuífero "Costa de Hermosillo", Municipio de Hermosillo, Sonora” (UNISON, 2001), “Estudio geohidrológico de las Cuencas de los Ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri – La Victoria y Cuenca Bacoachito” (UNISON, 2005a), y “Estudio de piezometría y evolución de niveles, en la cuenca media y alta del Río Sonora y Río Bacoachi” (UNISON, 2005b).

En el estudio de la UNISON (2005a) se mencionan dos zonas acuíferas, la llamada Rayón-Opodepe y la Horcasitas (Figura 6), las que se describen brevemente a continuación.

- **Zona acuífera Rayón-Opodepe.** En esta zona acuífera, la profundidad de los niveles estáticos varía entre 3.0 m y 30.0 m, presentándose el nivel más somero en la cabecera municipal de Rayón, y el más profundo en el Rancho Los González, 2.0 km al norte de la comunidad de La Palma. De la configuración del nivel estático realizada, se observa que la profundidad tiende a incrementarse aguas abajo del poblado La Mesa de San Juan, sin ser muy brusca su variación hasta llegar al Rancho Los González que es donde se nota un ligero abatimiento de 20.0 m, para aguas abajo notar un decremento en las profundidades, llegando éstas a 2.0 m en la población de Rayón, a partir de ahí las profundidades se mantienen en valores entre 2.0 y 5.0 m, hasta llegar al límite inferior de la zona acuífera (Figura 6).

- **Zona acuífera Horcasitas.** En esta zona acuífera, la profundidad de los niveles estáticos varía entre 2.0 m y 7.9 m, presentándose el nivel más somero a 4.1 km al NE del poblado Los Ángeles, y el más profundo en la población de San Miguel de Horcasitas. De la configuración del nivel estático se observa que la profundidad tiende a decrecer aguas abajo del Río San Miguel (Figura 6).

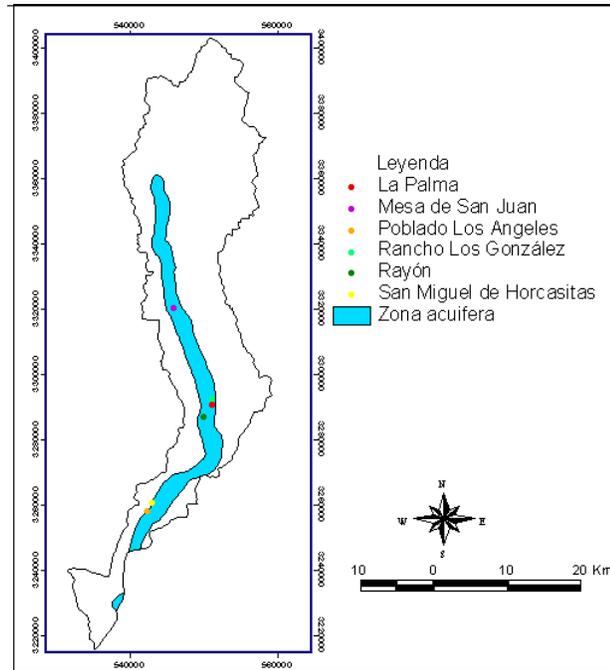


Figura 6. Zonas acuíferas y poblaciones de la Cuenca del Río San Miguel

- **Tipo de acuífero.** El Acuífero del Río San Miguel es del tipo libre, cuyas fronteras laterales corresponden a rocas ígneas intrusivas del tipo granítico y extrusivas del tipo riolítico y andesítico; el acuífero está contenido en un medio poroso y permeable, constituido de boleos, gravas y arenas, no consolidados, restringidos a los cauces del río y arroyos tributarios, presentan buena porosidad granular y por tanto son sedimentos regularmente de buena permeabilidad y más aún cuando presentan buena clasificación. Estos sedimentos constituyen actualmente el acuífero de la localidad (CONAGUA, 2002).

En las partes altas y profundas de los rellenos, el Acuífero del Río San Miguel, está contenido en rocas extrusivas fracturadas del tipo riolítico. En algunos pozos perforados en esta unidad litológica, se han encontrado aguas con temperatura anormal (superiores a 35 °C), por lo que se les atribuye en cierta forma que son las causantes de transmitir la alta temperatura a las aguas subterráneas. Estos casos se presentan en áreas del Cerro Pelón, Ejido San Miguel de Horcasitas, Fábrica de los Ángeles y en las estribaciones de la Sierra de San Miguel.

La profundidad del basamento impermeable varía desde unos 15 m en los estrechamientos del cauce, hasta más de 200 m en las partes bajas del acuífero.

En la Cuenca del Río San Miguel se realizaron algunas pruebas de bombeo para conocer la transmisividad, la cual fue calculada entre 0.0001 y 0.072 m²/s. La interpretación de estas pruebas fue mediante el método de Jacob, Hantush y Papadopoulos (CONAGUA, 2002).

- **Profundidad al nivel estático.** En esta cuenca al igual que en la del Río Sonora, existen dos unidades hidrogeológicas que constituyen acuíferos: los depósitos aluviales y fluviales del Río San Miguel y los materiales conglomeráticos del Terciario de la Formación Báucarit. El acuífero constituido por los conglomerados, es explotado únicamente en la zona comprendida desde la confluencia de los ríos San Miguel y Zanjón hasta el Rancho Cerro Pelón; las perforaciones que captan el agua de este acuífero, se encuentran localizadas dentro de los límites de los depósitos aluviales del río, pero atraviesan totalmente el espesor de estos depósitos y captan el agua contenida en los conglomerados (CONAGUA, 2002).

Por esta razón en ese tramo del Río San Miguel se establecen dos niveles de agua subterránea: un nivel correspondiente al acuífero constituido por los depósitos aluviales y fluviales del río (Acuífero superior) que es explotado principalmente por norias de poca profundidad, y otro nivel que corresponde al del acuífero constituido por los conglomerados (Acuífero inferior) que es explotado por los pozos profundos. A partir de la confluencia de los ríos San Miguel y Zanjón hasta la confluencia con el Río Sonora, la diferencia entre las profundidades al nivel del agua de los acuíferos superior e inferior, disminuyen gradualmente hasta confundirse en un solo nivel, el cual es lógico suponer que corresponde a un acuífero único.

En la parte alta de la Cuenca del Río San Miguel, desde el Cerro Pelón hasta Opodepe, existen únicamente dos tramos del río, donde la extensión y espesores de los depósitos aluviales, tienen importancia en la explotación del agua subterránea; encontrándose uno de ellos, aguas arriba de San Miguel de Horcasitas y el otro, entre las poblaciones de Rayón y Opodepe.

En el tramo del Río San Miguel, entre Cerro Pelón y su confluencia el Río Zanjón, los niveles del agua del acuífero superior se encuentran a profundidades que varían entre 10 y 15 m, mientras que los correspondientes al acuífero inferior varían entre 20 y 30 m, aumentando la profundidad en ambos, hacia la mencionada confluencia.

En el acuífero único, identificado desde la confluencia de los ríos San Miguel y Zanjón, hasta la confluencia con el Río Sonora, los niveles del agua se encuentran a profundidades entre 8 y 15 m; en términos generales la profundidad aumenta.

Al noroeste del poblado La Victoria, fuera de los límites de los depósitos aluviales del Río San Miguel se han perforado algunos pozos en las terrazas erosionadas; el nivel del agua subterránea en esta zona se encuentra a profundidades entre 20 y 40 m, incrementándose hacia el borde de la cuenca.

Por último, en el poblado San Miguel de Horcasitas, los niveles del agua se encuentran a profundidades entre 0 y 14 m, encontrándose las profundidades mayores en las márgenes del río y las menores en el cauce. En el tramo Rayón Opodepe, la profundidad al nivel del agua varía entre 0 y 25 m, también por regla general, las profundidades mayores se encuentran en las márgenes del río y las menores en las inmediaciones del cauce. En la parte más alta de la cuenca, entre Opodepe y Cucurpe, los niveles del agua son muy someros, su profundidad varía entre 3 y 10 m.

- Elevación del nivel estático. Con apoyo de los datos de niveles del agua subterránea referidos al nivel del mar, se trazaron curvas de igual elevación del nivel estático. Las configuraciones así obtenidas permiten inferir las direcciones del flujo subterráneo: en el subsuelo el agua sigue trayectorias normales a dichas curvas y en el sentido en que decrece la carga hidráulica (CONAGUA, 2002).

El Río San Miguel ha dado lugar a tres valles: el más alto, localizado entre Opodepe y Rayón, 25 km aguas abajo; el de San Miguel de Horcasitas; y por último, siguiendo el curso del río a unos 10 km aproximadamente, el que se define entre el Rancho Cerro Pelón y la confluencia de los ríos San Miguel y Zanjón. Estos valles tienen extensión muy reducida, y están limitados superficialmente por los depósitos cuaternarios aluviales del río; en los dos primeros la explotación se lleva a cabo en el acuífero constituido por los depósitos cuaternarios y en el tercero definido entre Cerro Pelón y la confluencia, además de explotarse dichos depósitos, también se explota el acuífero constituido por materiales conglomeráticos del Terciario.

En términos generales, el flujo subterráneo en estos tres valles, sigue sensiblemente las mismas direcciones que el escurrimiento superficial. El valle Rayón-Opodepe tiene una longitud de unos 21 km y un ancho promedio de 1.5 km. Las elevaciones del nivel estático

varían entre 615 msnm en la cabecera del valle, y 532 metros sobre el mismo nivel a la salida del mismo, en las proximidades del poblado de Rayón. El gradiente medio de flujo es de 4 al millar.

La explotación no ha modificado el esquema natural del flujo subterráneo, presentándose todavía descargas naturales del acuífero. Estas descargas afloran sobre el cauce del Río San Miguel en las proximidades de Rayón, a una elevación de unos 530 msnm donde el río se encañona y desaparece el relleno aluvial.

El valle de San Miguel de Horcasitas, es el más pequeño de los tres valles definidos en esta cuenca, tiene una longitud de unos 10 km y una amplitud de 1.6 km en promedio. Las elevaciones del nivel estático varían entre 395 msnm en la cabecera del valle y 370 m a la salida del mismo en las proximidades de San Miguel de Horcasitas. El gradiente medio de flujo es de 2.5 al millar.

El esquema natural de flujo no se ha visto modificado por la explotación del agua subterránea, existiendo descargas naturales del acuífero, que afloran a unos 2 km aguas abajo de San Miguel de Horcasitas en el último encañonamiento del río, a una elevación de unos 570 msnm.

En el valle comprendido entre el Rancho Cerro Pelón y la confluencia con el Río Zanjón; la posición de los niveles del agua define dos superficies piezométricas que corresponden a sistemas acuíferos aluviales del río y el otro, constituido por los materiales conglomeráticos del Terciario. Al primero, se le ha denominado “acuífero superior” y al segundo “acuífero inferior”.

- Evolución del nivel estático. Aguas arriba del Cerro Pelón, en las partes altas de la Cuenca del Río San Miguel, se localizan dos pequeños valles donde se efectúan aprovechamientos de aguas subterráneas; estos valles son el de San Miguel de Horcasitas y el de Rayón, este último comprendido entre las poblaciones de Rayón y Opodepe (CONAGUA, 2002).

El comportamiento de los niveles del agua subterránea en estos valles altos es muy similar a todos los del área estudiada; en el intervalo de Octubre 1970 a Mayo 1977, los niveles descendieron, y en el de Mayo a Octubre de 1977, se recuperaron.

La evolución del nivel estático en el intervalo Octubre 1970-Octubre 1977 en el valle de San Miguel de Horcasitas, los abatimientos provocados fueron entre 1 y 9 m; los mayores

en la cabecera de la cuenca y en el área de mayor concentración de pozos, los menores en la porción media del valle donde se localiza una sola obra de captación.

El abatimiento medio de toda el área analizada -13.5 km² - fue de 4.6 m, los cuales representan un abatimiento medio anual de unos 70 cm.

En el Valle Rayón-Opodepe, los abatimientos provocados en ese mismo intervalo variaron entre 1 y 8 m, presentándose los mayores en las áreas de concentración del bombeo. El abatimiento medio en el área fue de 4.1 m, los cuales representan una velocidad de unos 62 cm/año, en el intervalo Octubre 1970-Mayo 1977. La evolución de los niveles estáticos en estos valles para el intervalo Mayo-Octubre 1977 puede apreciarse que en el valle de San Miguel de Horcasitas, los niveles se recuperaron entre 0.5 y 2 m, presentándose los mayores en la cabecera del valle y los menores en la salida del mismo. Por lo que respecta al valle Rayón-Opodepe, las recuperaciones observadas están entre 0.5 y 4 m, presentándose las mayores en el extremo sur del valle, por donde el Río San Miguel recibe al Arroyo La Cabaña, uno de los afluentes más importantes.

En el 2004 se llevó a cabo la campaña del experimento de la humedad del suelo (SMEX04) los cuales fueron basados, e integrados con los objetivos complementarios del experimento del monzón de Norte América (NAME), para saber el desarrollo y la evaluación de los resultados detectados de la superficie de la Tierra en la hidrología terrestre.

Una hipótesis del NAME es que la humedad del suelo al suroeste de los Estados Unidos y el norte de México es una condición de límite de la superficie de la Tierra que controla el inicio y la intensidad del sistema norteamericano del monzón (NAMS). Entre las condiciones de límite más importantes de la superficie de la Tierra que contribuyen a NAMS son la humedad y la temperatura superficiales. Antes de la campaña conocida como SMEX04, pocas observaciones de humedad del suelo habían sido conducidas en el suroeste de los Estados Unidos y no se había efectuado ninguna en el norte de México. Además, las medidas de la precipitación que se podrían utilizar para derivar estimaciones de la humedad superficial no existieron o eran inadecuadas (Vivoni *et al.*, 2004).

En el 2006 y 2007 se llevaron a cabo mediciones como parte del experimento SMEX04, algunas de ellos son: humedad diaria del suelo, muestreo de la vegetación, instalación de 5 nuevas estaciones, propiedades del suelo, medidas del agua subterránea, salida, precipitación, etc. (Vivoni, 2006).

En el estudio realizado por Watts *et al.* (2006), denominado Changes in Vegetation Condition and Surface Fluxes during NAME 2004, se establece la relación entre la superficie de tierra y las propiedades atmosféricas usando datos de satélites y estaciones micrometeorológicas durante el Experimento del Monzón de Norteamérica (NAME) en el verano del 2004. El inicio del monzón ocurre en tiempos levemente diversos en estos sitios y está en función de la latitud y elevación. El resultado de este estudio contribuye a un mejor entendimiento sobre el papel de la cubierta superficial en la dinámica del monzón y las regeneraciones de la atmósfera de la Tierra.

El monzón de Norteamérica (NAM) es un importante fenómeno regional el cual proporciona la mayoría de la lluvia anual que cae sobre gran parte del oeste de México y suroeste de Estados Unidos. Las condiciones del premonzón en esta región son de extrema sequedad, con muy altas temperaturas de aire y poco o nada de lluvia en los meses antes de la llegada de las lluvias del monzón.

El inicio del monzón normalmente comienza a principios de junio en las áreas costeras de los estados de Jalisco y Colima antes de moverse hacia el norte, llegando a Arizona a principios de julio.

En el estudio realizado por Mekonne *et al.* (2006), llamado Submesoscale Spatiotemporal Variability of North American Monzón Rainfall over Complex Terrain, los autores analizan la información de los calibradores de lluvia, de los satélites infrarrojos geoestacionarios, y del radar que se mueve en órbita alrededor de la Tierra para describir y caracterizar el patrón espacial y la dinámica temporal de la precipitación en un área de estudio de 50 km x 75 km situadas en Sonora, abarcando del 1 de julio al 31 agosto del 2004.

La lluvia total durante el periodo de dos meses varía de 132 a 246 mm dependiendo de la locación. Los autores delinearon 4 régimen de lluvia: I, Sierra Aconchi; II, Valle del Río Sonora; III, Valle del Río San Miguel; y IV, Cucurpe.

2.2. Calidad del agua

Los siguientes datos hidrogeoquímicos se tomaron del Informe Final del “Estudio geohidrológico de las Cuencas de los Ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri-La Victoria y Cuenca Bacoachito” que la Universidad de Sonora (2005a) elaboró para la Comisión Estatal del Agua.

Sólidos totales disueltos. El límite máximo permisible (LMP) que establece la Norma Oficial Mexicana (NOM, 1994) para sólidos totales disueltos (STD) en el agua potable es de 1,000 ppm. En la Cuenca del Río San Miguel, las concentraciones superiores al límite máximo permisible se ubican en San Pedro con concentraciones de 1,043.2 y 1,056 ppm; en un pozo ubicado en El Tronconal se midieron 1,222.4 ppm; y concentraciones de 1,254.4 y 1,337.6 ppm se ubican en el poblado de Zamora.

Temperatura. La temperatura de las aguas subterráneas para la Cuenca del Río San Miguel oscila entre 12.9°C y 36.4°C. Este amplio rango de temperaturas es producido por una también amplia y variada gama de mecanismos de descarga de gran extensión, debido tanto a la tectónica y la hidroestratigrafía que establece las diferencias en captación de pozos (profundidad de circulación) y los valores locales del gradiente térmico.

Es importante mencionar que las temperaturas elevadas en pozos y norias pueden ser también producto de la radiación solar, es decir, en pozos o norias en donde los niveles freáticos están muy cercanos a la superficie del terreno. Otro factor importante que interviene en las variaciones de la temperatura del agua es la permeabilidad, ya que controla el rendimiento específico de los materiales o facilidad con la que fluye el agua a través del medio.

Potencial hidrógeno (pH). Para la Cuenca del Río San Miguel, el rango de potencial hidrogeno se mantiene por encima de la neutralidad, las muestras analizadas corresponden con valores de pH en el rango de 6.7 a 9.2, lo que indica que en general para toda el área de estudio el agua es ligeramente alcalina, es decir, la presencia de carbonatos en la zona de estudio muestra un claro predominio sobre el contenido de sulfatos en el agua. En La Victoria se detectó un pH de 6.7.

Dureza total. El agua se puede clasificar por su dureza, pero esta clasificación varía con las localidades de acuerdo con las aguas disponibles. Agua con menos de 50 ppm de CaCO₃ se denomina blanda, hasta 100 ppm ligeramente dura, hasta 200 ppm moderadamente dura y mayor de 200 ppm muy dura. El LMP es 500 mg/l según la NOM (1994).

Dentro de la Cuenca del Río San Miguel la dureza del agua es de blanda a muy dura. En el rango de agua blanda se tienen concentraciones de 2.06 ppm a 44.20 ppm en las poblaciones de San Pedro y La Victoria; el agua ligeramente dura se ubica en las poblaciones La Victoria, Cucurpe y San Pedro; el agua moderadamente dura se localiza en San Pedro,

Zamora, El Jarrito, Cucurpe, El Tronconal, Tuape y Rayón; el agua muy dura asciende hasta concentraciones de 698.83 ppm, sobrepasando el LMP. En general la dureza del agua de esta cuenca tiende a ser de moderadamente dura a muy dura.

Boro. La NOM y la EPA no tienen establecido un LMP para el boro, por lo que se utiliza el máximo tolerable de la OMS de 0.3 ppm para agua potable. La Cuenca del Río San Miguel tiene 41 aprovechamientos con concentraciones por arriba de 0.3 ppm, en las poblaciones de Zamora, El Tronconal, La Victoria, San Pedro y Real del Alamito. Estos valores varían de 0.31 a 0.79 ppm, siendo esta última la concentración mayor, ubicada en el Ejido Zamora localidad Las Playitas.

Calcio. La Norma Oficial Mexicana no establece un LMP para el Ca, pero las concentraciones en agua potable pueden llegar hasta 250 ppm (Custodio y Llamas, 1996). Dentro de la Cuenca del Río San Miguel, las concentraciones varían de 3.91 ppm a 223.41 ppm consideradas aptas para consumo humano.

Sodio. La Norma Oficial Mexicana (NOM, 1994), establece que el LMP para concentraciones de sodio en agua potable es de 200 ppm. Considerando el límite establecido por esta dependencia, las concentraciones de sodio en la Cuenca del Río San Miguel que sobrepasan este límite están en las poblaciones de Zamora, con 362.09, 231.85 y 369.42 ppm; en el Tronconal localidad Las Pitahayas hay concentraciones de 223.41 ppm; y en San Pedro se tienen concentraciones hasta de 365.10 ppm.

Magnesio. Debido a que la Norma Oficial Mexicana no establece LMP para el magnesio, se usó la norma de la OMS que establece que las concentraciones máximas permisibles de magnesio, en agua para uso y consumo humano son de 50 ppm. Los valores en la Cuenca del Río San Miguel oscilan entre 0.04 a 30 ppm, dentro del rango establecido.

Potasio. Las concentraciones de potasio aptas para consumo humano son de 10 ppm (Custodio y Llamas, 1996). En la Cuenca del Río San Miguel, únicamente una noria localizada en la Victoria presenta concentraciones de 17.60 ppm, que sobrepasa el LMP. Las demás concentraciones oscilan entre 0.262 y 17.60 ppm.

Cloruros. La Norma Oficial Mexicana (NOM, 1994) establece que el LMP de las concentraciones de cloruros (Cl⁻) es de 250 ppm para consumo humano. En la Cuenca del Río San Miguel las concentraciones de cloruro oscilan entre 1.22 y 326.35 ppm, siendo esta última

concentración la que se encuentra por encima de la norma y se ubica en El Tronconal, localidad Las Pitahayas.

Sulfatos. El LMP para sulfatos (SO_4^-) establecido por la Norma Oficial Mexicana (NOM, 1994), es de 400 ppm para agua potable. En la Cuenca del Río San Miguel las concentraciones de sulfatos están por debajo de este límite, y varían de 5.60 a 385.82 ppm.

Bicarbonatos. En la Cuenca del Río San Miguel las concentraciones más altas de bicarbonatos se encuentran en la población de Cucurpe con concentraciones de 405.64, 420.39, 422.85 y 430.22 ppm; en Codorachic hay 415.25 ppm; en el Zanjón se tienen 437.17 ppm; Zamora 455.08 y 488.86 ppm; Rayón 408.50 ppm; y San Pedro 445.74 ppm.

Nitratos. El LMP de nitratos según la Norma Oficial Mexicana (NOM, 1994) es de 45 ppm (en términos de nitrato). En la Cuenca del Río San Miguel, los aprovechamientos que sobrepasan este límite corresponden a norias y a pozos someros, los cuales se encuentran en las poblaciones de Zamora con concentraciones de 51.79 a 67.78 ppm; en San Pedro las concentraciones anómalas son de 45.45 a 103 ppm; en La Victoria van de 88.51 y 151.86 ppm; y en Rayón los aprovechamientos tienen concentraciones de 58.70 y 1755.48 ppm, siendo este último valor el de mayor concentración de nitrato dentro de la cuenca, su uso es para riego de plantas, todos los demás son de uso agrícola.

Metales. En el análisis químico de las muestras de agua obtenidas en la Cuenca del Río San Miguel, se consideraron los siguientes metales: As, Ba, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Mn, Mo, Ni, Se, Sr, Tl, V y Zn. En la mayoría de los casos se compararon con los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-2000), sin embargo existen elementos que no se incluyen en ésta, por lo que se tomaron en cuenta los LMP establecidos por organizaciones como la Agencia de Protección al Medio Ambiente (EPA, 2000).

Dentro de esta cuenca, los metales que exceden los LMP establecidos son el As, Cd, Fe, Mn, Se y Tl. El resto de los metales, no presentan concentraciones anómalas en ninguno de los sitios de muestreo, incluso existen muestras en las que no se detectó su presencia.

La NOM (1994) en el caso del **arsénico** tiene como límite máximo permisible 0.05 ppm. En la cuenca se encuentran cantidades desde “no detectadas” hasta una concentración máxima de 0.099 ppm, estando 14 aprovechamientos por arriba de la norma. La cantidad mínima detectada fue de 0.005 ppm.

Las concentraciones de **cadmio** en los aprovechamientos van desde cantidades “no detectadas” hasta concentraciones por arriba de la norma, donde el límite máximo permisible es de 0.005 ppm, las cantidades detectadas oscilan entre 0.005 y 0.1 ppm. Sólo dos aprovechamientos están dentro de la norma, los demás son valores anómalos.

El **hierro**, presenta concentraciones que oscilan entre 0.006 y 5.8 ppm, y una cantidad no detectada. La NOM (1994) establece un LMP de 0.3 ppm para agua potable, 14 aprovechamientos de la cuenca lo sobrepasan.

El LMP que establece la NOM (1994) para el **manganeso** es de 0.15 ppm. En la cuenca la mayoría de las cantidades no fueron detectadas, las cantidades detectadas oscilan entre 0.003 y 0.476 ppm, 9 aprovechamientos están por arriba de la norma.

La EPA (2000) establece que el LMP para el **selenio** es 0.05 ppm. En la cuenca se tienen 4 pozos con cantidades no detectadas; las detectadas van de 0.01 a 0.073 ppm; 31 aprovechamientos presentan concentraciones anómalas.

En el caso del **talio**, no fue detectado en 46 aprovechamientos, en 60 están por arriba de la norma (EPA, 2000), los valores oscilan entre 0.005 y 0.043 ppm.

Los resultados obtenidos muestran que en general, las concentraciones de metales en el agua subterránea dentro de la Cuenca del Río San Miguel son bajas a excepción de arsénico, cadmio, selenio y talio, en donde el agua se encuentra afectada por la presencia de altas concentraciones de estos elementos y que rebasan los límites máximos establecidos, considerándose no aptas para consumo humano.

En los puntos que presentan concentraciones anómalas es necesario realizar estudios hidrogeoquímicos más detallados y a nivel más local, además de otros complementarios, con el fin de detectar la presencia de contaminantes como los orgánicos e industriales.

2.3. Marco geológico y suelos

En el estudio de disponibilidad de agua del Acuífero del Río San Miguel de la CONAGUA (2002), se muestra la geología de la zona, de la cual se tomaron los siguientes extractos. La distribución de los afloramientos puede verse en la Figura 7.

2.3.1. Paleozoico

Las rocas más antiguas que afloran en el área de estudio son las correspondientes al Paleozoico. Por su antigüedad, estas rocas se encuentran cubiertas por depósitos más jóvenes o

muy erosionados, por lo cual sus afloramientos se encuentran distribuidos en poca proporción con respecto a la columna geológica del área. Los afloramientos en el área de estudio tienen su mayor expresión en el borde norte de la cuenca y en una línea de dirección sensiblemente norte-sur, siguiendo aproximadamente la traza del cauce del Río San Miguel; esta alineación se debe probablemente a los movimientos originados hacia fines del Mesozoico y principios del Terciario, que elevaron el bloque tectónico sobre el que se encontraban estos afloramientos, por lo que actualmente se hallan expuestos sobre una traza de falla. Por sus características físicas de compacidad, estas rocas son de naturaleza impermeable.

2.3.2. Mesozoico

Sobreyaciendo a las rocas del Paleozoico, se encuentran las correspondientes al Mesozoico, las que en el área de estudio tienen una distribución muy restringida y están representadas por sedimentos clásticos del Grupo Barranca, cuya edad ha sido asignada al Triásico y por calizas y areniscas del Cretácico Inferior. Los afloramientos de rocas triásicas se encuentran expuestos en el extremo noreste de la cuenca y los del Cretácico Medio en su porción sur.

Hacia fines del Periódico Cretácico tuvo lugar la aparición de rocas plutónicas representadas por granitos y granodioritas que intrusieron a las rocas paleozoicas y a las correspondientes a la parte inferior y media del Mesozoico. Estas masas intrusivas tienen una extensa distribución en el área, sobre todo en la parte oriental y central donde forman cadenas montañosas. Estas rocas constituyen el basamento geológico regional; sobre ellas, se depositó una potente columna de sedimentos Cenozoicos, que transformó notablemente sus propiedades físicas debido al peso ejercido sobre ellas, anulando prácticamente la permeabilidad intersticial de los sedimentos y sellando las fracturas de los granitos y calizas.

2.3.3. Cenozoico (Terciario)

Dentro del área de estudio, son las rocas del Cenozoico las que tienen mayor distribución horizontal, ya que entre rocas sedimentarias y volcánicas cubren aproximadamente dos terceras partes 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, existen piroclastos finos que dieron lugar a la formación de las tobas volcánicas que afloran en la porción 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 Báucarit, 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.

2.3.4. Cenozoico (Cuaternario)

Sobreyaciendo a los conglomerados de la Formación Báucarit, se encuentran los depósitos aluviales y fluviales del Cuaternario, formados por boleos, gravas, arenas, arcillas y limos.

Tienen una distribución horizontal muy reducida, ya que se encuentran supeditados a los cauces de los ríos y arroyos y a las planicies de inundación de los mismos.

Estos materiales aluviales y fluviales del Cuaternario, 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.

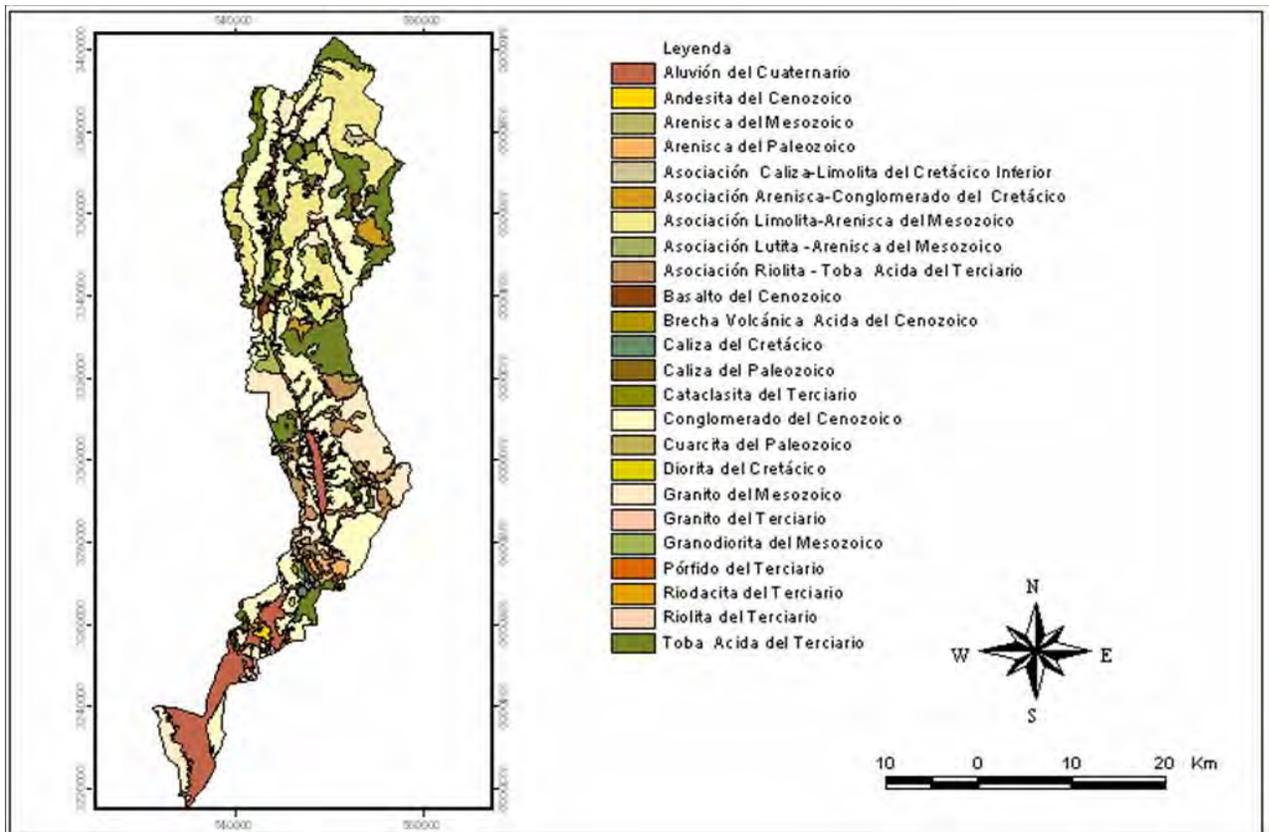


Figura 7. Geología de la Cuenca del Río San Miguel

2.3.5. Geología estructural

Hacia fines del Cretácico y principios del Terciario, el paisaje geológico de la región estaba conformado por enormes plegamientos de rocas Paleozoicas, Triásicas y Cretácicas, que se extendían hacia el oriente, casi hasta la Cuenca de Chihuahua. Hacia esa misma época, la Orogenia Laramide con su fase compresiva dio origen a un proceso de fallamiento en bloques debilitando la corteza terrestre, lo que permitió la intrusión de enormes masas de rocas graníticas que levantaron los bloques fallados. Las profundas y extensas fisuras producidas por la deformación de la corteza terrestre, sirvieron de vía de escape a emisiones de lavas riolíticas y andesíticas que cubrieron con sus emisiones extensas superficies.

Al rejuvenecerse el paisaje y por el efecto de las pulsaciones de la gran revolución, se inició una intensa y prolongada 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.

Hacia la parte media del Terciario, Eoceno-Oligoceno, las últimas pulsaciones de la Revolución Laramide, propiciaron el asentamiento y nuevo fallamiento de los bloques tectónicos, formándose así el “graben” de la Cuenca del Río Zanjón, y los bajos tectónicos de los ríos San Miguel y Sonora.

La última etapa del proceso geológico de la región está representada por un nuevo ciclo de erosión, cuyo mayor desarrollo se ubica dentro del Terciario, pues abarcó todo el Oligoceno y parte del Mioceno, cubriendo aproximadamente unos 30 millones de años, tiempo durante el cual tuvo lugar el depósito de la parte superior de la Formación Báucarit, bajo diversos ambientes de depósito y condiciones climatológicas alternadas de humedad y sequías prolongadas, que dieron como resultado, los cambios de facies litológicas que se encuentran expuestos en esta formación, dentro de los que destacan por su funcionamiento hidrogeológico, fuertes espesores de arcillas que producen un confinamiento hidráulico en algunos pozos de la zona de Pesqueira. Con la información que se dispone sobre la geología del subsuelo en esta zona, se puede inferir que los paquetes arcillosos de hasta 100 m de espesor que confinan los lentes arenosos ó antiguos cauces sepultados, tuvieron su origen en áreas bajas inundadas, hacia donde se acumularon materiales finos predominantemente. Estas condiciones de depósito sólo se han encontrado en esta zona, tal vez por ser ella donde se localizan los pozos más profundos de la cuenca y donde existe mayor información sobre

geología del subsuelo. En el resto de la cuenca no se cuenta con esta información, no pudiéndose asegurar que la zona de Pesqueira represente una anomalía local ó que por el contrario, en toda la cuenca existan a profundidad las mismas condiciones de depósito, lo cual podría esperarse dado que esta cuenca fue la más baja de las tres. En las cuencas de los ríos San Miguel y Sonora no se ha detectado esta condición hidrogeológica.

El término del depósito de la Formación Báucarit, en las postrimerías del Mioceno, marca el fin de los efectos de la Revolución Laramide, terminando la época Terciaria con emisiones de tobas riolíticas y andesíticas en el Plioceno. Al abrirse el Cuaternario, ya se encontraba prácticamente delineado el sistema de drenaje actual, iniciándose el modelado del paisaje de las tierras altas y de corte y depósito sobre los cauces rellenos de conglomerados, de depósitos aluviales y fluviales cuaternarios, los que forman una cubierta de poco espesor sobre el relleno terciario.

2.3.6. Geología del subsuelo

En el estudio de piezometría y evolución de niveles que la UNISON (2005b) realizó en las cuencas media y alta de los ríos Sonora y Bacoachi, se muestran 2 secciones geológico-geofísicas con base en 8 sondeos eléctricos verticales (SEV's) efectuados en la parte baja de las cuencas de los ríos Zanjón y San Miguel, nombradas "Sección Pesqueira" y "Sección Zamora". En ambos lugares se encontraron 5 unidades, cuya descripción y espesores se consignan en la Tabla 2.

Tabla 2. Geología del subsuelo de los ríos Zanjón y San Miguel

Unidad: Composición	Espesor Pesqueira (m)	Espesor Zamora (m)
1: Suelo seco compacto	9-63	23-54
2: Arena fina arcillosa	18-350	57-273
3: Paquete arena media-gruesa	63	700
4: Arena gruesa-grava (semiconsolidada de tipo conglomerático)	109-145	81-173
5: Basamento ígneo intrusivo alterado y fracturado	100-536	176

Fuente: UNISON (2005b)

La Sección Pesqueira se localiza 5 km al sur del poblado del mismo nombre y tiene una orientación de NE-SW 60° con una longitud de 12.6 km (Figura 8). La Sección Zamora se ubica al oriente del poblado, orientada NW-SE con una longitud de 8.2 km (Figura 9).

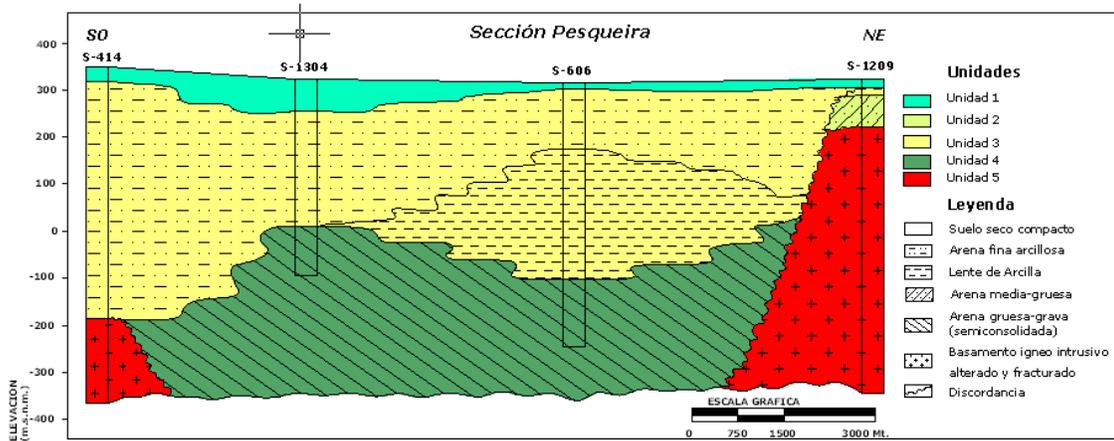


Figura 8. Sección Pesqueira (UNISON, 2005b)

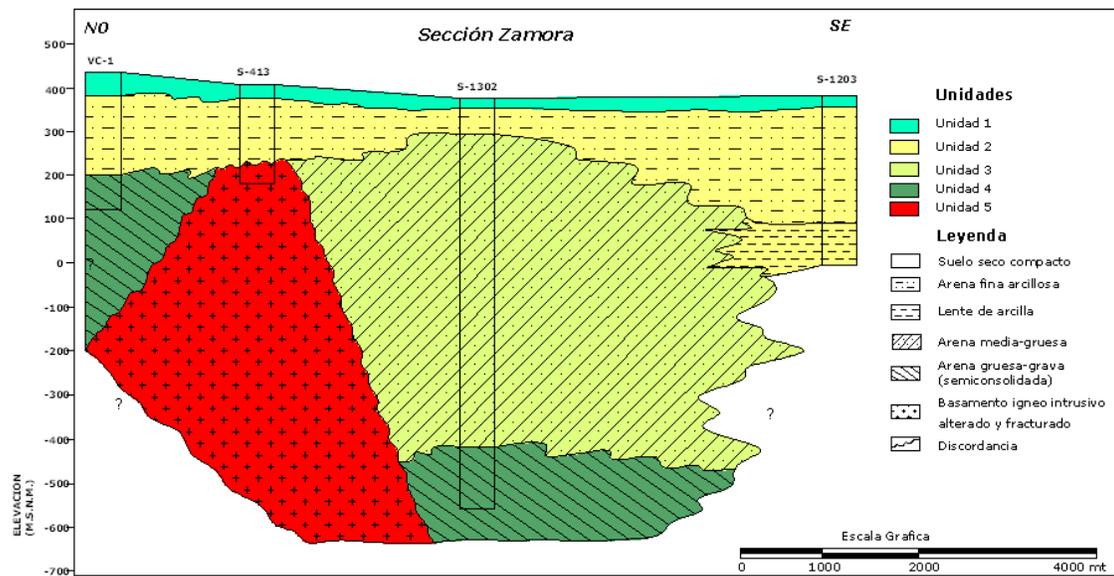


Figura 9. Sección Zamora (UNISON, 2005b)

2.3.7. Tipos de suelos

Los tipos de suelos de la Cuenca del Río San Miguel fueron obtenidos con el programa IDRISI con base en las Cartas Edafológicas del INEGI (escala 1:250,000), siendo de manera resumida los siguientes:

- a) Suelos de textura gruesa, generalmente muy delgados con velocidades de infiltración altas.
- b) Suelos de textura media, profundos, poseen velocidades moderadas de infiltración.

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

d) Suelos de textura muy fina, con 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, rica en materia orgánica y en nutrientes. Cubren cerca del 10% del área de estudio y se pueden localizar predominantemente 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. Cubren cerca del 3% del área de estudio.

Litosol. Hace referencia a los suelos más delgados, de menos de 10 cm de profundidad y de textura gruesa. Cubren el 40% del área de estudio y se localizan principalmente en las sierras.

Regosol. Representa los suelos que más dominan en la cuenca, con cerca del 31% de la superficie del área de estudio. Se trata de suelos sin capas distintivas, de textura gruesa.

Xerosol. Presenta una capa superficial de color, de textura media y pobre en humus. Cubren cerca del 14% del área de estudio 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.

2.4. Provincias hidrogeológicas

Las provincias hidrogeológicas consideran las propiedades hidráulicas de los materiales (permeabilidad, conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, porosidad, etc).

Velázquez y Ordaz (1993-1994) propusieron 11 provincias hidrogeológicas para México, de las cuales 3 se ubican en Sonora: Planicie Costera del Pacífico, Sierra Madre Occidental y Cuencas Aluviales del Norte. La Cuenca del Río San Miguel se ubica en la zona de transición entre las 2 primeras.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

Los materiales que se utilizaron fueron los enlistados a continuación:

1. Consulta de diversos trabajos bibliográficos previos (tesis, informes de proyectos de investigación, leyes, textos, internet, etc).
2. Revisión del censo de diversos años de las poblaciones del INEGI que se encuentran dentro de la Cuenca del Río San Miguel.
3. Consulta de diversas estadísticas (cantidad y tipo de vegetación, actividades agrícolas, ganaderas, mineras, etc).
4. Apoyo en imágenes de elevación digital, de uso y tipo de suelo y vegetación, escala 1:250,000 de la Cuenca del Río San Miguel.
5. Uso de diversos mapas del INEGI, escala 1:250,000 (fisiografía, hidrología, geología, etc).
6. Datos de precipitación, evaporación y temperatura medias anuales de las estaciones hidrométricas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y de la UNISON que se encuentran dentro y cerca de la Cuenca del Río San Miguel.
7. Datos de Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) tomados del satélite TERRA a través del sensor MODIS. Consulta de su página web.
8. Toma de fotos en campo, resaltando algunos rasgos característicos de la cuenca, como pendiente, drenaje, tipo de vegetación y suelo, entre otros.
9. Aplicación de diversos software: IDRISI, ArcView, AutoCAD, HEC-HMS, Excel, Word, etc.

3.2. Métodos

La metodología utilizada para realizar la presente tesis consistió en:

1. Uso de imágenes digitales para trabajarlas en el programa IDRISI.
2. Con dicho programa, se dividió en microcuencas la Cuenca del Río San Miguel con base en sus características fisiográficas, topográficas, hidrológicas y edafológicas.
3. Con datos históricos de 12 estaciones de la CONAGUA, se elaboraron en ArcView mapas de isolíneas de temperatura (1941-2007), precipitación (1941-2007) y evaporación (1941-2006) medias anuales.

4. En ArcView se realizaron diversos mapas basados en los de INEGI (fisiografía, unidades geohidrológicas, geología, etc)
5. Se calcularon las características fisiográficas de la cuenca (área, coeficiente de compacidad, relación de elongación, relación de circularidad, curva hipsométrica, pendiente de la cuenca, etc).
6. Una vez que la cuenca se dividió en microcuencas con ayuda del IDRISI, se elaboraron mapas digitales de elevación del terreno (MDE), corrientes, uso de suelo (vegetación), tipos de suelo y combinados.
7. Con la información anterior se asignó un número de curva a cada microcuenca con base en el Método del Número de Curva propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (USSCS) citado por SARH (1982) y Maidment (1993).
8. Para asignar el número de curva se consideraron 2 condiciones para la zona de estudio: húmeda y seca.
9. Con el método de los Polígonos de Thiessen se distribuyeron los datos de lluvia del año 2004, registrados en pluviógrafos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y de la Universidad de Sonora (UNISON).
10. Los datos de precipitación, área, número de curva y tiempo de concentración, se introdujeron al modelo HEC-HMS para el análisis del escurrimiento.
11. Para mejorar la eficiencia de los resultados, se optó por agrupar los datos de precipitación en intervalos de ≤ 15 días.
12. Se modeló el comportamiento hidrológico de la Cuenca del Río San Miguel durante el año 2004, para simular el escurrimiento y la capacidad de aportación de agua de las distintas microcuencas.
13. Se compararon los datos calculados por el programa HEC-HMS con los datos medidos por la CONAGUA en la Estación El Cajón durante el año 2004.
14. Se estudió el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI en inglés) para conocer el comportamiento de la vegetación y en un futuro, calibrar el modelo. Se hicieron gráficas del NDVI contra el tiempo y se compararon con gráficas de la lluvia y el escurrimiento de la cuenca.
15. Se elaboraron las conclusiones y recomendaciones.

IV. DETERMINACIÓN DEL ESCURRIMIENTO

4.1. Tipos de escurrimiento

El escurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores. Dicho de otra manera, es el deslizamiento virgen del agua, que no ha sido afectado por obras artificiales hechas por el hombre. De acuerdo con las partes de la superficie terrestre en las que se realiza el escurrimiento, éste se puede dividir en: superficial, subsuperficial y subterráneo (Figura 10).

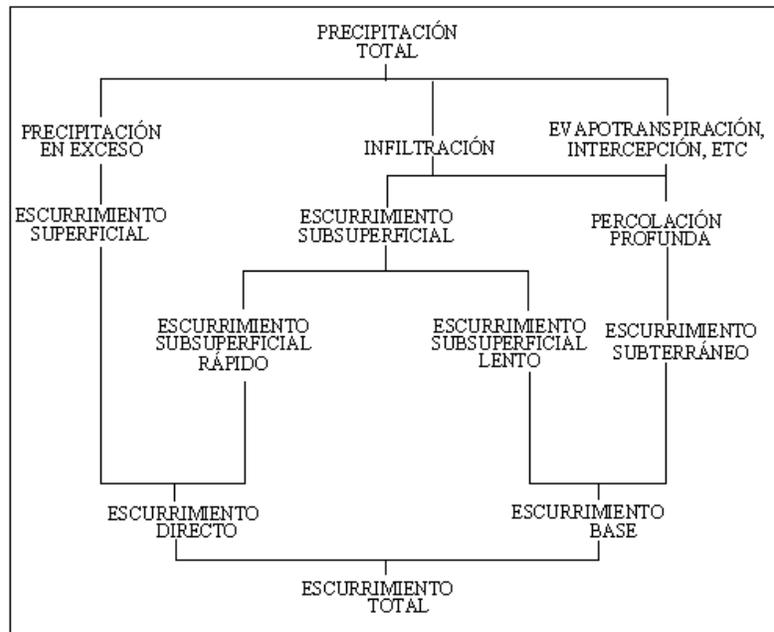


Figura 10. Diagrama que explica el escurrimiento (Chow, 1964)

- **Escorrimento o esorrentía superficial.** Es la parte del agua que escurre sobre el suelo y después por los cauces de los ríos.

- **Escorrimento subsuperficial.** Es la parte del agua que se desliza a través de los horizontes superiores del suelo hacia las corrientes. Una parte de este tipo de escurrimiento entra rápidamente a formar parte de las corrientes superficiales y a la otra le toma bastante tiempo el unirse a ellas.

- **Escorrimento subterráneo.** Es aquél que, debido a una profunda percolación del agua infiltrada en el suelo, se lleva a cabo en los mantos subterráneos y que, posteriormente, por lo general, descarga a las corrientes fluviales.

A la parte de la precipitación que contribuye directamente al escurrimiento superficial se le llama *precipitación en exceso*.

El escurrimiento subterráneo y la parte retardada del escurrimiento subsuperficial constituyen el *escurrimiento base* de los ríos.

La parte de agua de escurrimiento que entra rápidamente en el cauce de las corrientes es a lo que se llama *escurrimiento directo* y es igual a la suma del escurrimiento subsuperficial más la precipitación que cae directamente en los cauces.

4.2. Coeficiente de escurrimiento (Ce)

El coeficiente de escurrimiento depende de las características y condiciones del suelo; a continuación se hace mención de algunos de los procesos más importantes del ciclo hidrológico para reconocer la cantidad de factores involucrados en el Ce; en principio, se tienen: intercepción, detención superficial, almacenamiento de la humedad en el suelo, escurrimiento superficial, infiltración, flujo subsuperficial, evapotranspiración y percolación. La intercepción es el primer proceso que actúa redistribuyendo y modificando la precipitación sobre un área. La cantidad de precipitación que finalmente llega a la superficie del terreno depende en gran parte de la naturaleza y de la densidad de la cubierta vegetal (si existe), o de las características de la cobertura artificial (casas, edificios, estacionamientos, carreteras con pavimentos, etc). La cobertura, natural o artificial, intercepta parte de la precipitación, deteniéndola temporalmente en su superficie, de donde se evapora para regresar a la atmósfera durante o después de la tormenta, o bien cae al terreno.

Otros factores que influyen en el coeficiente de escurrimiento son: intensidad de la lluvia, pendiente del terreno y proximidad del nivel freático; por todo lo anterior, debe seleccionarse con rigurosidad un coeficiente de escurrimiento razonable que logre representar los efectos integrados de todos estos factores.

Uno de los métodos para calcular el coeficiente de escurrimiento fue desarrollado por los hidrólogos del U.S. Soil Conservation Service (Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos) y es conocido como el “Método del número de curva” o “N” (valor relativo de escurrimiento directo que produce cada complejo hidrológico). Entre mayor sea el “N”, mayor será el volumen de escurrimiento de una tormenta en la cuenca. Por comodidad, los números de curva se tabulan en un rango de 0 a 100; para condiciones combinadas o

especiales de la cuenca, los “N” pueden ser “pesados” o estimados por interpolación (SARH, 1982, Maidment, 1993).

Para calcular el “N” (escurrimiento directo o lluvia en exceso) por este método, se necesitan datos de: uso del terreno, tratamiento o práctica, condición hidrológica y tipos de suelo (Tabla 3).

El uso del terreno se refiere a la cobertura de cualquier material (generalmente vegetal) que cubre el suelo y lo protege del impacto de la lluvia.

El tratamiento tiene que ver con las diversas prácticas agrícolas usadas en los ranchos (surco, nivel, terraza).

La condición hidrológica indica el efecto que tienen en la infiltración y el escurrimiento, el tipo de cubierta y tratamiento; generalmente se estima de la densidad y cubierta de plantas. Una condición hidrológica “buena” indica que el suelo favorece la infiltración, por lo que tiene un potencial bajo de escurrimiento; una condición “pobre” tiene baja infiltración, por lo que se incrementa el escurrimiento.

Los tipos de suelo a partir de los cuales se obtiene “N”, pueden ser 4 de acuerdo a la velocidad con que se infiltra el agua: A (alta), B (moderada), C (baja) y D (muy baja).

Tabla 3. Números de la curva de escurrimiento para áreas agrícolas cultivadas y zonas urbanas
(Para cuencas en condición II: media entre seca y húmeda)

Uso del terreno	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	N según tipo de suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	Surco recto	Pobre	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surco recto	Pobre	72	81	88	91
	Surco recto	Buena	67	78	85	89
	Surco o nivel	Pobre	70	79	84	88
	Surco o nivel	Buena	65	75	82	86
	Surco o nivel y terraza	Pobre	66	74	80	82
	Surco o nivel y terraza	Buena	62	71	78	81
Cereales finos	Surco recto	Pobre	65	76	84	88
	Surco recto	Buena	63	75	83	87
	Surco o nivel	Pobre	63	74	82	85
	Surco o nivel	Buena	61	73	81	84
	Surco o nivel y terraza	Pobre	61	72	79	82
	Surco o nivel y terraza	Buena	59	70	78	81
Legumbres (sembradas con maquinaria)	Surco recto	Pobre	66	77	85	89
	Surco recto	Buena	58	72	81	85
	Surco o nivel	Pobre	64	75	83	85
	Surco o nivel	Buena	55	69	78	83
	Surco o nivel y terraza	Pobre	63	73	80	83
	Surco o nivel y terraza	Buena	51	67	76	80
Pradera natural o pastizal		Pobre	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	Surco o nivel	Pobre	47	67	81	88
	Surco o nivel	Regular	25	59	75	83
	Surco o nivel	Buena	6	35	70	79
Pradera permanente		Buena	30	58	71	78
Bosque		Pobre	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Cascos de hacienda			59	74	82	86
Caminos de terracería			72	82	87	89
Caminos con pavimentos duros			74	84	90	92
Superficie impermeable			100	100	100	100

Fuente: SARH (1982), Maidment (1993)

Los números de curva de la Tabla 3 son valores considerados en condición de humedad media del suelo de la cuenca (entre seca y húmeda). Con este valor se pueden obtener los correspondientes a condiciones secas o húmedas (Tabla 4).

Se sabe que el escurrimiento que se produce en una cuenca, dependerá de la condición de humedad antecedente (humedad que contiene el suelo en el instante en que se presenta una tormenta). De acuerdo a la cantidad de lluvia ocurrida en los 5 días previos al analizado, se tienen 3 niveles para la condición de humedad antecedente (SARH, 1982):

I (seca, bajo potencial de escurrimiento, los suelos de la cuenca están secos pero en buen estado para ararse y cultivarse).

II (media, condición promedio).

III (húmeda, alto potencial de escurrimiento, cuenca prácticamente saturada por las lluvias previas).

Tabla 4. Números de curva para condiciones seca y húmeda

N para condición			N para condición			N para condición		
II: media	I: seca	III: húmeda	II: media	I: seca	III: húmeda	II: media	I: seca	III: húmeda
100	100	100	72	53	86	44	25	64
98	94	99	70	51	85	42	24	62
96	89	99	68	48	84	40	22	60
94	85	98	66	46	82	38	21	58
92	81	97	64	44	81	36	19	56
90	78	96	62	42	79	34	18	54
88	75	95	60	40	78	30	15	50
86	72	94	58	38	76	25	12	43
84	68	93	56	34	75	20	9	37
82	66	92	54	32	73	15	6	30
80	63	91	52	30	71	10	4	22
78	60	90	50	31	70	5	2	13
76	58	89	48	29	68			
74	55	88	46	27	66			

Fuente: SARH (1982)

4.3. Proceso del escurrimiento

Hoyt (1942) describe el ciclo del escurrimiento en cinco fases:

Primera fase

1. Comprende la época seca en la que la precipitación es escasa o nula.
2. La corriente de los ríos es alimentada por los mantos de agua subterránea.
3. La evapotranspiración es bastante intensa, y si esta fase no fuera interrumpida, llegarían a secarse las corrientes.
4. En regiones de clima frío, donde la precipitación es en forma de nieve, si la temperatura permite el deshielo, habrá agua disponible para mantener las corrientes fluviales, interrumpiéndose así la primera fase e iniciándose la segunda.

Segunda fase

1. Caen las primeras precipitaciones cuya misión principal es la de satisfacer la humedad del suelo.

2. Las corrientes superficiales, si no se han secado, siguen siendo alimentadas por el escurrimiento subterráneo.
3. Si se presenta escurrimiento superficial, éste es mínimo.
4. La evapotranspiración se reduce.
5. Cuando existe nieve, ésta absorbe parte de la lluvia caída y su efecto de almacenamiento alargará este segundo período.
6. A través del suelo congelado puede infiltrarse el agua precipitada si su contenido de humedad es bajo.

Tercera fase

1. Comprende el período húmedo en una etapa más avanzada.
2. El agua de infiltración satura la capa del suelo y pasa, por gravedad, a aumentar las reservas de agua subterránea.
3. Se presenta el escurrimiento superficial, que puede o no llegar a los cauces de las corrientes, lo cual depende de las características del suelo sobre el que el agua se desliza.
4. Si el cauce de las corrientes aún permanece seco, el aumento del manto freático puede ser, en esta fase, suficiente para descargar en los cauces.
5. Si la corriente de agua sufre un aumento considerable, en lugar de que sea alimentada por el almacenamiento subterráneo (corriente efluente), la corriente contribuirá al incremento de dicho almacenamiento (corriente influente) (Figura 11).

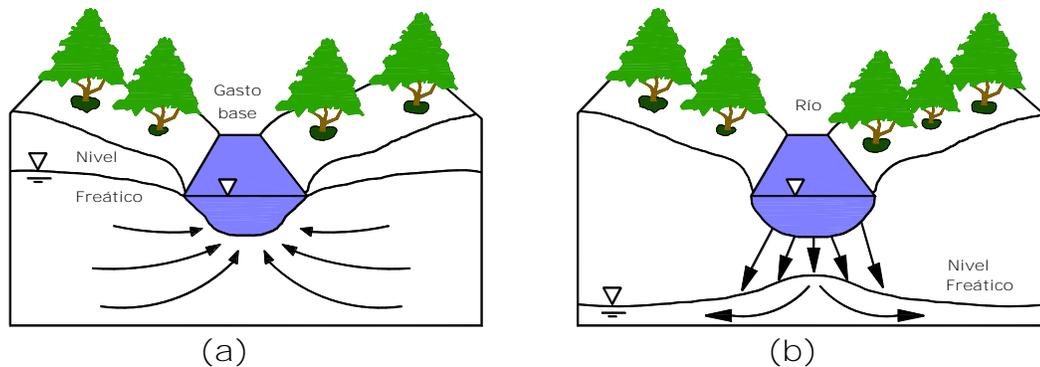


Figura 11. Tipos de corrientes: (a) Río efluente (toma agua del acuífero),
(b) Río influente (cede agua al acuífero)

6. La evapotranspiración es lenta.
7. En caso de que exista nieve y su capacidad para retener la lluvia haya quedado satisfecha, la lluvia caída se convertirá directamente en escurrimiento superficial.

8. Si el suelo permanece congelado, retardará la infiltración, lo que favorecerá al escurrimiento, pero en cuanto se descongele, el escurrimiento superficial disminuirá y aumentará el almacenamiento subterráneo.

Cuarta fase

1. Continúa el período húmedo.
2. La lluvia ha satisfecho todo tipo de almacenamiento hidrológico.
3. En algunos casos el escurrimiento subsuperficial llega a las corrientes tan rápido como el escurrimiento superficial.
4. El manto freático aumenta constantemente y puede llegar a alcanzar la superficie del suelo, o bien la velocidad de descarga hacia las corrientes puede llegar a ser igual a la de recarga.
5. Los efectos de la nieve y el hielo son semejantes a los de la tercera fase.

Quinta fase

1. El período de lluvia cesa.
2. Las corrientes de agua se abastecen del escurrimiento subsuperficial, del subterráneo y del almacenamiento efectuado por el propio cauce.
3. La evapotranspiración empieza a incrementarse.
4. En caso de existir nieve, cuando la temperatura está bajo 0° C, produce la prolongación de esta fase.
5. Esta fase termina cuando las reservas de agua quedan reducidas de tal forma que se presentan las características de la primera fase.

4.4. Factores que afectan el escurrimiento

Los factores que afectan al escurrimiento se refieren a las características del terreno (cuencas hidrográficas), y se dividen en dos grandes grupos: los climáticos y los relacionados con la fisiografía.

4.4.1. Climáticos

Son aquéllos que determinan, de la cantidad de agua precipitada, la destinada al escurrimiento. Entre éstos se encuentran la lluvia y otros factores climáticos (temperatura, viento, etc).

- **Precipitación.** Es el elemento climático de más importancia para el escurrimiento, debido a que depende de ella. Varios de los aspectos de este elemento son importantes para el conocimiento del escurrimiento.

a) Forma de precipitación. Si la precipitación es en forma líquida, el escurrimiento se presenta con relativa rapidez; si es en forma sólida no hay ningún efecto, a menos que la temperatura permita la rápida licuefacción.

b) Intensidad de la precipitación. Cuando la precipitación es suficiente para exceder la capacidad de infiltración del suelo, se presenta el escurrimiento superficial y cualquier aumento en la intensidad repercute rápidamente en dicho escurrimiento.

c) Duración de la precipitación. Entre más dure la precipitación mayor será el escurrimiento, independientemente de su intensidad. Una lluvia prolongada, aun cuando no sea muy intensa, puede causar gran escurrimiento superficial, ya que con la lluvia decrece la capacidad de infiltración.

d) Distribución de la precipitación en el espacio. Generalmente la lluvia nunca abarca toda la superficie de la cuenca; para cuencas pequeñas, los mayores escurrimientos superficiales resultan de tormentas que abarcan áreas pequeñas, y para cuencas grandes, resultan de aguaceros poco intensos que cubren una mayor superficie.

e) Dirección del movimiento de la precipitación. La dirección del centro de la perturbación atmosférica que causa la precipitación tiene influencia en la lámina y duración del escurrimiento superficial. Si la tormenta se mueve dentro del área de la cuenca, el escurrimiento será mayor que si únicamente la atraviesa. Por otro lado, si el temporal avanza en sentido contrario al drenaje, el escurrimiento será más uniforme y moderado que si se mueve en el sentido de la corriente.

f) Precipitación antecedente y humedad del suelo. Cuando el suelo posee un alto contenido de humedad, la capacidad de infiltración es baja y se facilita el escurrimiento.

- **Otras condiciones del clima.** Además de la precipitación existen otros elementos que se deben tomar en cuenta, pues aunque indirectamente, también afectan al escurrimiento; entre ellos la temperatura, el viento, la presión y la humedad relativa.

4.4.2. Fisiográficos

Se relacionan por una parte con la forma y características físicas del terreno y por la otra con los canales que forman el sistema fluvial. Entre los factores fisiográficos se tienen los morfométricos, los físicos y la red de drenaje.

- **Factores morfométricos.** Son aquellas particularidades de las formas terrestres que influyen en el agua de la lluvia al caer a la superficie, por la velocidad que adquiere, por los efectos que produce y por el tiempo que tarda en llegar al punto de desagüe.

a) *Superficie.* La superficie de las cuencas hidrográficas está limitada por la divisoria topográfica o parteaguas que determina el área de la cual se derive el escurrimiento superficial. Las cuencas pequeñas se comportan de manera distinta a las cuencas grandes en lo que se refiere al escurrimiento. No existe una extensión definida para diferenciar a las cuencas pequeñas de las grandes, sin embargo, hay ciertas características que distinguen a unas de otras. Las cuencas pequeñas son más sensibles al uso del suelo y a las precipitaciones de gran intensidad que abarcan zonas de poca extensión. En las cuencas grandes es muy importante el efecto de almacenamiento en los cauces de las corrientes.

b) *Forma.* Interviene principalmente en la manera como se presenta el volumen de agua escurrido a la salida de la cuenca. Generalmente los volúmenes escurridos en cuencas alargadas son más uniformes a lo largo del tiempo, en cambio, en cuencas compactas el agua tarda menos en llegar a la salida, en donde se concentra en un tiempo relativamente corto. Existen índices que expresan la forma de las cuencas hidrográficas, como el de *Gravelius* y el factor de forma.

c) *Pendiente.* La pendiente del terreno está relacionada con la infiltración, con el escurrimiento superficial, con la contribución del agua subterránea a la corriente y con la duración del escurrimiento.

d) *Orientación.* La orientación de la cuenca y la de sus vertientes se relaciona con el tipo de precipitación, los vientos predominantes y la insolación.

e) *Altitud.* Influye principalmente en la temperatura y en la forma de precipitación.

- **Factores físicos.** Se refieren a las características físicas del terreno con su estructura y utilización.

a) *Uso y cubierta del suelo.* Cuando el terreno es virgen y está cubierto por vegetación, especialmente de bosques, contribuye a la estabilización de los regímenes de las corrientes;

cuando el terreno está desforestado, el agua corre rápidamente por la superficie. Por otra parte, también son importantes las obras que se efectúan en los mismos cauces de las corrientes, por ejemplo la construcción de una presa puede producir una sobreelevación del nivel del agua en el tramo anterior al embalse, esto genera un aumento en el nivel del cauce por el depósito de acarreo (azolve), lo cual influye aguas arriba de la corriente; además, afecta el perfil de las capas freáticas.

b) Tipo de suelo. Se refiere a la capacidad de infiltración del suelo. Entre más poroso sea y menor contenido de material coloidal posea, tendrá una mayor capacidad de infiltración, lo cual retardará la aparición del escurrimiento superficial.

c) Geología. Condiciona el escurrimiento en cuanto a la permeabilidad de las estructuras que forman el terreno. Cuando el terreno es permeable, el sistema fluvial, durante la época de estiaje, se encuentra bien abastecido por el escurrimiento subterráneo. Cuando el terreno es impermeable, el volumen de escurrimiento se concentra más pronto en el punto de desagüe y en la época de estiaje el nivel de la corriente disminuye considerablemente o bien desaparece.

d) Topografía. A este respecto son importantes las ondulaciones del terreno y los límites superficiales de la cuenca hidrográfica. Las ondulaciones pueden ser la causa de la presencia de depresiones en donde se acumula el agua, disminuyendo la cantidad destinada al escurrimiento. En relación con la divisoria topográfica, puede ser que haya disparidad entre ésta y la freática, de manera que parte del escurrimiento subterráneo contribuya al escurrimiento de la cuenca vecina atravesando el límite topográfico o bien que reciba parte del escurrimiento subterráneo de esa cuenca vecina.

- **Red de drenaje.** Se refiere a las características de los canales que comprenden el sistema fluvial de la cuenca. Refleja las condiciones del terreno sobre el que se desarrolla.

a) Densidad hidrográfica. Es la relación de la cantidad de corrientes que existen en la cuenca entre la superficie de ésta. Uno de los métodos para ordenar y contar el número de canales es el de Strahler (1964), que considera canales de primer orden a las corrientes formadoras. Cuando se unen dos canales de primer orden, forman otro de segundo orden, cuando se unen dos canales de segundo orden, forman otro de tercer orden y así sucesivamente.

b) *Densidad de drenaje.* Resulta de dividir la longitud total de las corrientes de agua entre la superficie de la cuenca. Entre mayor sea este índice, más desarrollada estará la red de drenaje.

c) *Otras características relacionadas con la red de drenaje.* Son las que se refieren a la capacidad de almacenamiento de las corrientes y a la capacidad de transporte de las mismas.

4.4.3. Humanos

- **Actividad ganadera.** Según datos de la SAGARPA publicados por el INEGI (2008), la población ganadera y avícola existente en los municipios que comprenden el área de estudio con datos del año 2007, está caracterizada por ganado bovino (Figura 12), porcino, ovino, caprino y aves, predominando el bovino excepto en los municipios de San Miguel de Horcasitas y Hermosillo, en los cuales abunda el porcino (Tabla 5).



Figura 12. Reconocimiento en campo de la actividad ganadera en Opodepe, Sonora

Tabla 5. Producción ganadera y avícola por Municipio (toneladas)

Municipio	Bovino	Porcino	Ovino	Caprino	Aves
Carbó	1,503	0	10	2	0
Cucurpe	451	0	5	0	0
Opodepe	1,255	8	13	6	0
Rayón	1,249	306	0	0	0
San Miguel de Horcasitas	251	454	11	6	0
Hermosillo	31,691	97,904	115	17	5,267

Fuente: INEGI (2008)

La producción de ganado en pie de la Tabla 5 se expresa en toneladas y se obtiene del peso vivo del ganado registrado en la entidad para sacrificar, exportar y movilizar a otros estados.

Se sumó la producción total ganadera y avícola de todos los municipios de la cuenca (excepto Hermosillo), y se calcularon sus porcentajes respecto al total, con lo cual se construyó la gráfica siguiente (Figura 13).

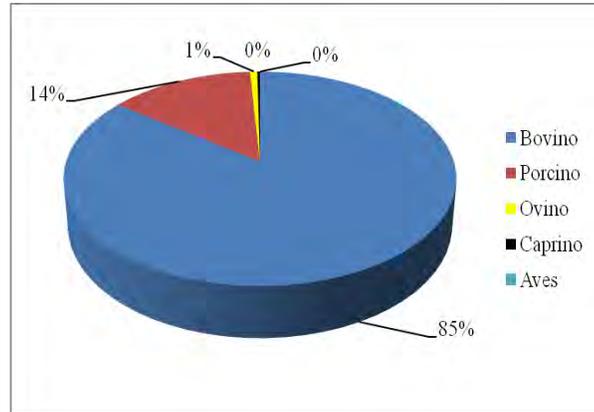


Figura 13. Porcentaje de la producción ganadera y avícola en la Cuenca del Río San Miguel (Sin considerar el Municipio de Hermosillo)

- **Actividad agrícola.** En Sonora los terrenos habilitados con riego comprenden aproximadamente 96.5% de la superficie total cosechada. Es asimismo importante, el alto nivel tecnológico que mantiene, ya que cuenta con varias presas de abastecimiento, gran número de pozos profundos, infraestructura para riego, implementos mecanizados para las labores, utilización de fertilizantes, pesticidas y semillas mejoradas.

Además, las buenas condiciones agrológicas donde se ubican las áreas de riego, con extensos terrenos de llanuras aluviales, con suelos profundos y con buen drenaje favorecen el desarrollo de una amplia gama de cultivos, entre los que destacan: trigo, algodón, cártamo, sandía, ajonjolí, garbanzo y sorgo.

Las posibilidades de uso agrícola en la porción oriental se reducen a la agricultura mediante tracción animal, en lomeríos y bajadas, y con instrumentos manuales para la labranza, en las sierras.

De acuerdo con la forma de realizar las labores de labranza y la permanencia de los cultivos en las áreas agrícolas, el Sistema de Evaluación de Tierras, elaborado por la Dirección General de Geografía, determinó seis clases de capacidad de uso de la tierra.

Con base en esa clasificación y mediante el análisis de las características medioambientales del terreno, entre ellas la pendiente, pedregosidad, afloramientos rocosos, profundidad del suelo y tipo de clima; se determinan sus posibilidades de uso agrícola. El área

de estudio está clasificada como agricultura continua con maquinaria y sin posibilidades de uso agrícola. Esta agricultura se localiza en la zona más seca del Estado, por lo que es indispensable la aplicación de riego en cualquier época del año para garantizar el desarrollo de los cultivos.

En las tablas 6 y 7 se muestra el tipo de agricultura que se utiliza en el área de estudio y las superficies que se encuentran trabajadas, así como el tipo de cultivos sembrados. Los datos mostrados son el resultado de sumar la información de los años 2002 a 2005.

Tabla 6. Superficie agrícola (hectáreas) según tipo de agricultura, datos de 2002 a 2005

Población	Total	Temporal	Humedad	Riego	Pastizal cultivado	Bosque cultivado
Cucurpe	14,747	43	0	313	14,391	0
Opodepe	29,928	84	0	4,054	25,790	0
Rayón	3,470	0	0	3,470	0	0
San Miguel de Horcasitas	13,637	0	0	8,413	5,225	0
Hermosillo	189,056	0	0	151,971	37,085	0

Fuente: INEGI (2007)

Tabla 7. Superficie sembrada y cosechada por tipo de cultivo y riego del año 2006

Cultivo cíclico/ Municipio	Superficie sembrada (ha)			Superficie cosechada (ha)		
	Riego	Temporal	Total estatal	Riego	Temporal	Total estatal
Tomate rojo	2,347	12	2,359	2,317	12	2,329
Hermosillo	125	0	125	125	0	125
Resto municipios del edo.	854	12	866	824	12	836
Garbanzo grano	28,841	0	28,841	28,841	0	28,841
Hermosillo	10,500	0	10,500	10,500	0	10,500
Resto municipios del edo.	7,967	0	7,967	7,967	0	7,967
Chile verde	2,728	0	2,728	2,709	0	2,709
Hermosillo	378	0	378	378	0	378
Resto municipios del edo.	922	0	922	903	0	903
Calabacita	4,394	20	44,114	4,369	20	4,389
Hermosillo	1,659	0	1,659	1,659	0	1,659
San Miguel de Horcasitas	200	0	200	200	0	200
Resto municipios del edo.	750	20	770	725	20	745
Melón	2,493	0	2,93	2,474	0	2,474
Hermosillo	864	0	864	864	0	864
Resto municipios del edo.	427	0	427	413	0	413

Fuente: INEGI (2007) Mod. (Se tomó sólo lo correspondiente a los municipios del presente trabajo)

- **Aprovechamiento forestal.** De acuerdo a datos de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Delegación en el Estado de Sonora, Subdelegación de Gestión para la Protección Ambiental (INEGI, 2008), el volumen de producción forestal maderable de los municipios en cuestión es de los más bajos en relación con el resto del Estado, de acuerdo a datos del año 2007 (Tabla 8, Figura 14).

Tabla 8. Volumen de producción forestal según grupo de especies (m³ rollo), datos del 2007

Municipio	Total	Coníferas	Latifoliadas		Comunes tropicales***
			Encino*	Otras**	
Carbó	10,977	0	0	10,977	0
Cucurpe	1,210	0	0	1,210	0
Opodepe	1,536	0	0	1,536	0
Rayón	474	0	0	474	0
San Miguel de Horcasitas	3,638	0	0	3,638	0
Hermosillo	7,562	0	0	7,562	0

* Se refiere a Encino (*Quercus* spp), varias especies.

** Comprende: Mezquite (*Prosopis* spp), Tesota (*Acacia occidentalis*), Chino (*Pithecellobium mexicanum*), Mauto (*Lysiloma livaricata*) y Palo verde (*Cercidium microphyllum*).

*** Se refiere a Vara blanca (*Croton reflexifolius*).

Fuente: INEGI (2008)

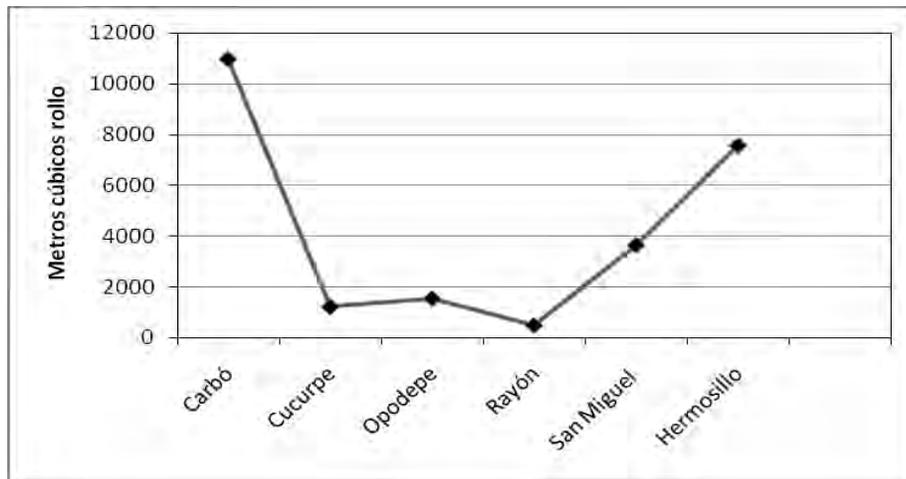


Figura 14. Volumen total de material forestal utilizado en los municipios de la Cuenca del Río San Miguel

En la cuenca se tienen diversos tipos de bosques, cuyas superficies sumadas de los años de 2002 a 2005, se pueden observar en la Tabla 9.

Tabla 9. Tipos y superficies de bosque en hectáreas (2002-2005)

Población	Total	Coníferas	Encino	Encino-Pino	Mesófilo de montaña	Inducido
Cucurpe	11,037	0	11,037	0	0	0
Opodepe	12,098	0	12,098	0	0	0
Rayón	4,352	0	4,352	0	0	0
San Miguel de Horcasitas	0	0	0	0	0	0
Hermosillo	231	0	0	0	0	231

Fuente: INEGI (2007)

- **Minería.** De acuerdo a datos de la Secretaría de Economía del Gobierno del Estado, Dirección General de Fomento Minero publicados por el INEGI (2007), el área de interés no

es relativamente productiva en minería, sin embargo, algunos de los municipios dan una importante aportación en ciertos minerales, como se muestra en la Tabla 10 y en la Figura 15.

Tabla 10. Volumen y valor de la producción minera

Municipio	Mineral	Volumen (tonelada)	Valor (pesos)
Hermosillo	Cal viva hidratada	98,748	84,799
Hermosillo	Carbonato de calcio	277,227	11,871
Rayón	Puzolana y arcilla	20,000	900
Cucurpe	Puzolana y arcilla	43,800	876

Fuente: INEGI (2007)

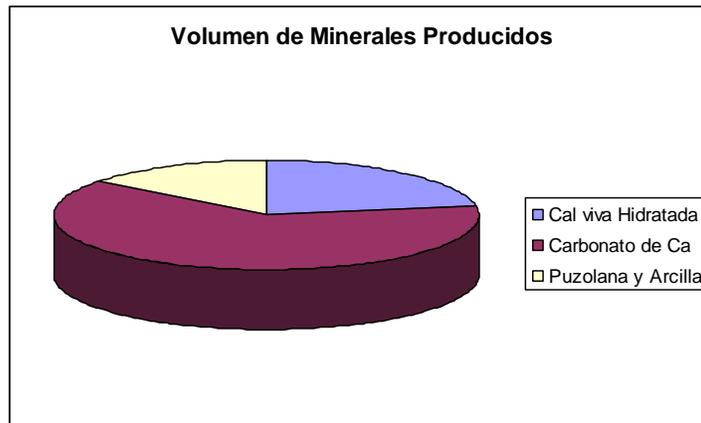


Figura 15. Minerales producidos en los municipios delimitados dentro del área de estudio

V. ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO DE LA CUENCA

5.1. Clima

El área estudiada cuenta con una variedad de climas, los que van de muy secos, secos a semisecos (García de Miranda, 1986).

- **Muy secos.** También llamados desérticos, abarcan cerca del 46% de la superficie de Sonora, y se caracterizan por su precipitación inferior a los 400 mm al año y su temperatura media anual de 18 a 26 °C, son considerados muy extremos, ya que su oscilación térmica es mayor a 14 °C. Los climas en esta región van de los cálidos en el sur, a los semicálidos en el noroeste.

- **Secos.** Influyen en los terrenos 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.

- **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.

5.2. Vegetación

En la Cuenca del Río San Miguel se tienen diferentes tipos de vegetación desértica como pitahaya, matorral, palo fierro y choya (Figura 16). Asimismo, se pueden observar matorral desértico micrófilo, mezquite, pastizal inducido y selva baja caducifolia (Figura 17).



A) Pitahaya



B) Palo fierro



Figura 16. Vegetación desértica de la cuenca

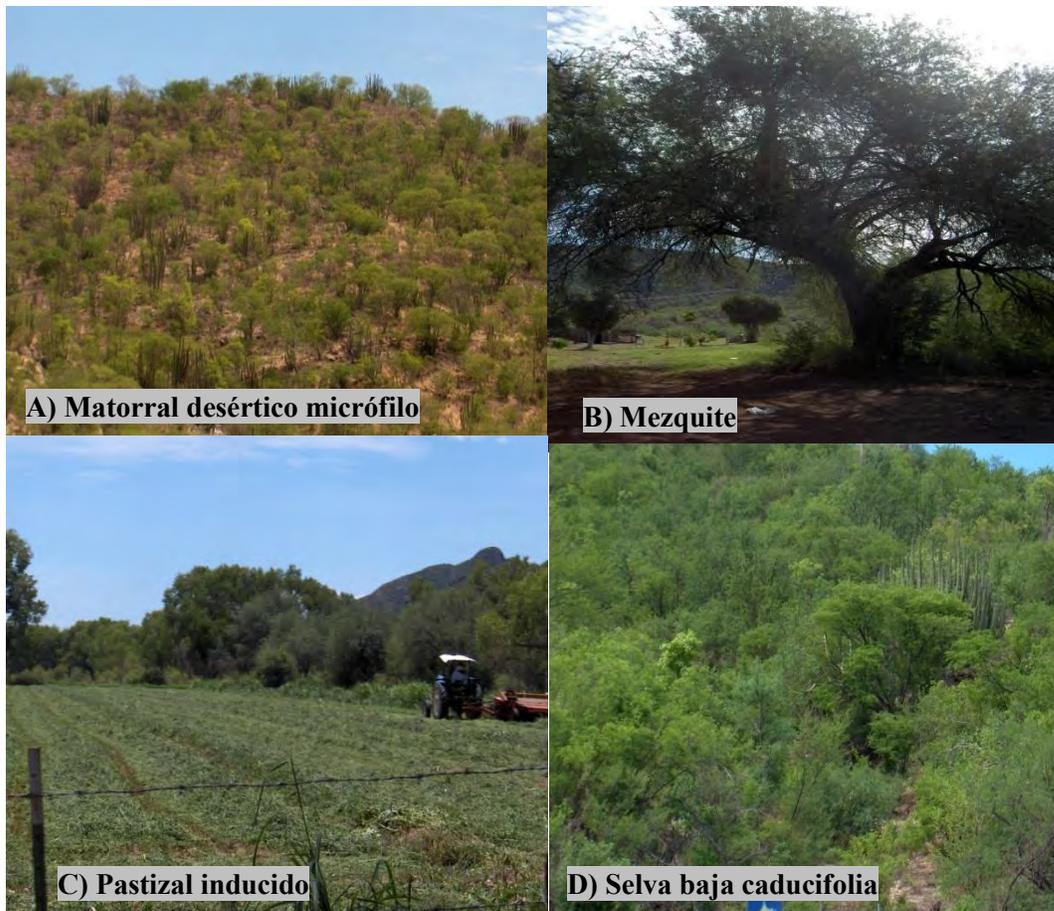


Figura 17. Diversos tipos de vegetación (matorral, mezquite, pastizal y selva)

Dentro del pastizal, existe el natural y el inducido. La Tabla 11 muestra las hectáreas (ha) reportadas.

Tabla 11. Superficie de pastizal (ha) de 2002 a 2005

Población	Total	Natural	Inducido
Cucurpe	29,298	24,224	5,074
Opodepe	7,201	3,752	3,449
Rayón	509	509	0
San Miguel de Horcasitas	925	0	925
Hermosillo	104,569	0	104,569

Fuente: INEGI (2007)

- **Pastizal natural.** Es una comunidad dominada por especies de gramíneas, en ocasiones acompañadas por herbáceas y arbustos de diferentes familias como son: compuestas, leguminosas. Se encuentra en la zona de transición entre los matorrales xerófilos y la zona de bosques.

En su composición son frecuentes las asociaciones de *Bouteloua*. Otras gramíneas reportadas son *Chondrosioides*, *Filiformis*, *Hirsuta*, *Asistida*, *Andropogon Contortus*, *Hilaria*, *Muhlenbergia* y *Sporobolus*.

Los componentes arbustivos que se encuentran entre las gramíneas y que forman parte de las comunidades adyacentes son: *Acacia* spp., *Calliandra eriphylla*, *Croton* sp., *Fouquieria splendens*, *Lpomoas* sp., *Kramearia* sp., *Lycium* sp., *Mimosa dysocarpa*, *Nolina* sp. y *Opuntia* sp.

- **Matorral desértico micrófilo.** Comunidad formada por arbustos cuyas hojas o foliolos son pequeños, ocupa con la vegetación de desiertos arenosos, las zonas más áridas de México.

Se encuentra en terrenos con una altitud entre 0 y 1,200 m, en climas muy secos semicálidos con temperaturas medias anuales entre 20 y 24° C y precipitación total anual por debajo de 400 mm 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.

Este matorral ocupa grandes extensiones, pero en algunas zonas forma mosaicos con el matorral sarcocaulé, el mezquital y el pastizal natural.

Presenta principalmente tres fisonomías: la más común es la de matorral subinerte, en la que alrededor del 70% de las plantas no tienen espinas y cerca del 30% son espinosas; le sigue el matorral espinoso donde más de 70% de las especies son espinosas; y por último, el matorral inerme, en el cual más de 70% de las especies carecen de espinas. Lo integran

diversas asociaciones vegetales que varían en composición florística y en el lugar de ubicación de acuerdo con factores físicos y bióticos, de tal manera que solo algunas especies características tienen una amplia distribución y a la vez llegan a dominar, tal es el caso de la gobernadora o hediondilla (*Larrea tridentata*), palo verde (*Cercidium microphyllum*), palo fierro (*Olneya tesota*), ocotillo (*Fouquieria splendens*), gato (*Acacia* spp.), mezquite (*Prosopis glandulosa*), chamizo (*Ambrosía chenopodiifolia*), hierba del burro (*Ambrosía dumosa*) y rama blanca o hierba del vaso (*Encelia farinosa*).

Estas comunidades están compuestas de tres estratos: en el de dos a tres metros hay especies de palo verde, ocotillo, palo fierro, mezquite, sahuaro (*Carnegiea gigantea*), cina (*Lophocereus schottii*), gato o mezquitillo, torote (*Bursera microphylla*), sangregado (*Jatropha* sp.) y *Fouquieria* sp.; en este mismo estrato se presentan los géneros *Lycium* y *Eysenhardtia*, además en las zonas cercanas al pastizal natural se encuentra *Quercus* sp. y táscales (*Juniperus monosperma*) y en las próximas a la vegetación de galería hay especies como el guayacán (*Guaiaacum coulteri*).

En el estrato de 1.0 a 1.5 m, que junto con lo anterior contiene las especies dominantes, se encuentran principalmente: *Larrea tridentata*, *Acacia vernicosa*, *Sangregados*, *Vinorama* (*Lycium*), cholla (*Opuntia cholla*) y tasajillo (*Leptocaulis*); pero en terrenos menos secos o en las zonas de escurrimiento se presentan *Prosopis glandulosa* y *Cercidium* sp., al igual que mimosa.

En el estrato más bajo (0.5 m) dominan las compuestas, entre ellas hierba del vaso y hierba del burro, leguminosas, como *Calliandra eriophylla*, *Mimosa* sp., y *Dalea* sp., gramíneas, tal es el caso de zacate, y varias especies de *Jatropha*.

En la parte central de Sonora se reporta una comunidad, también subinerme como la anterior, dominada por *Encelia farinosa* y *Larrea tridentata*, en la cual, al extenderse hacia el sur los árboles predominan sobre los arbustos llegando a formar selvas espinosas.

En las zonas planas generalmente se encuentran *Larrea* y *Ambrosia*, mientras que en los lugares con mayor pendiente, *Acacia* sp., *Lycium* sp., *Olneya tesota*, y otras especies formando una comunidad espinosa principalmente.

El matorral espinoso se distribuye en los lomeríos situados en los alrededores del Río San Miguel de Horcasitas y sus afluentes.

Estas comunidades se usan principalmente en la alimentación del ganado bovino, actividad que las ha afectado en gran medida, de tal manera que en muchos sitios presentan disturbio, observable en la baja cobertura y diversidad de especies propias de este tipo de vegetación, y en la erosión.

- **Mezquital.** Se encuentra desde el nivel del mar hasta 1,200 m de altitud. En climas muy secos, secos y semisecos; con temperaturas medias anuales de 18 a 24 °C y lluvia total anual de 180 a 400 mm.

Este tipo de vegetación se caracteriza por la dominancia de diferentes especies de prosopis, acompañadas por otros arbustos espinosos e inermes que también se encuentran en los matorrales adyacentes, ya sea micrófilo o sarcocaulé. Su altura varía de 3 a 5 m, los elementos que lo constituyen están agrupados en dos o tres estratos. Se localiza en suelos profundos de los valles, en zonas de escurrimiento o en bajadas, sobre yermosoles, regosoles, fluviosoles o xerosoles.

Respecto al uso del suelo, se consultaron las cartas del INEGI (1981) y mediante el programa ArcView se elaboró un mapa, en el cual se puede ver que en el área de estudio existe agricultura de riego, de temporal, bosque, matorral, mezquital y pastizal (Figura 18).

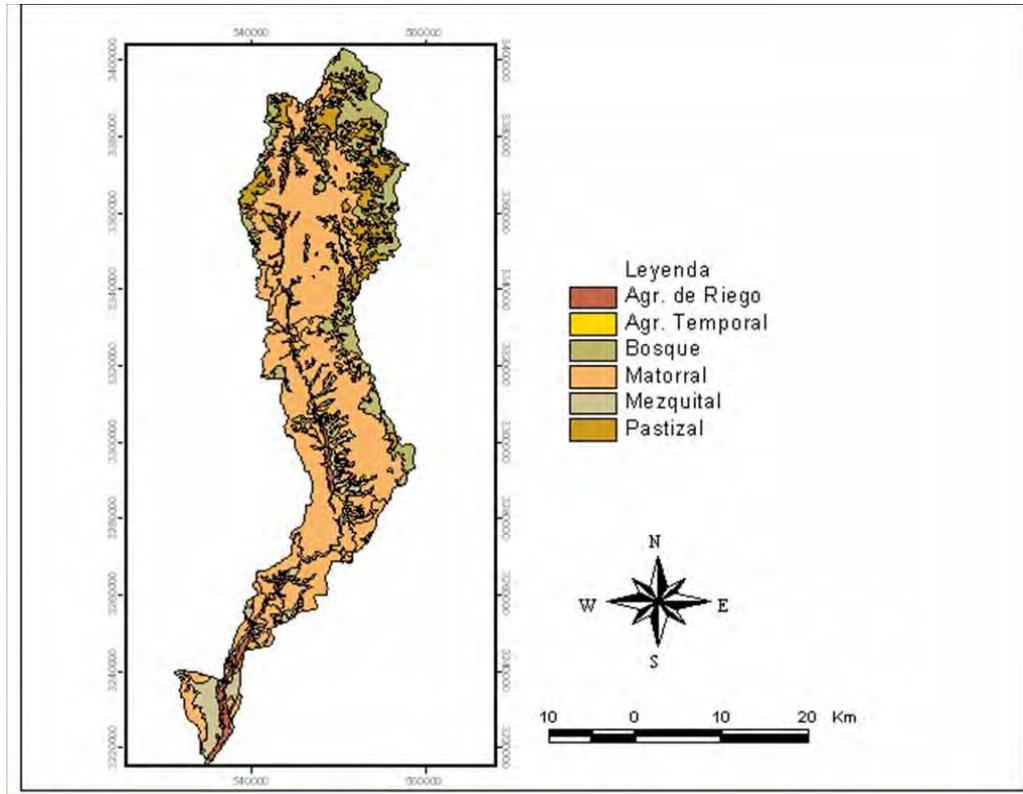


Figura 18. Vegetación de la Cuenca del Río San Miguel (INEGI, 1981)

Según el Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos del INEGI (2007), en la cuenca se tienen registradas diversas superficies con vegetación variable (Tabla 12).

Tabla 12. Superficie total según uso de suelo y vegetación en hectáreas (2002-2005)

Población	Total	Agricultura	Pastizal	Bosque	Selva	Matorral
Cucurpe	157,343	3,460	29,298	11,037	0	88,485
Opodepe	224,127	29,928	7,201	12,098	37,739	118,705
Rayón	88,104	3,470	509	4,352	49,053	11,289
San Miguel de Horcasitas	111,947	13,637	925	0	8,463	80,476
Hermosillo	1,684,225	189,056	104,569	231	25,699	1,235,119

Fuente: INEGI (2007)

5.3. Temperatura

Para conocer la temperatura, precipitación y evaporación media anual del área de estudio, se consultaron los datos registrados por la CONAGUA (2007b) en 12 estaciones climatológicas ubicadas dentro y fuera de la Cuenca del Río San Miguel para el período de 1941-2007 (Figura 19). Es importante anotar que los valores dudosos fueron omitidos en el presente trabajo.

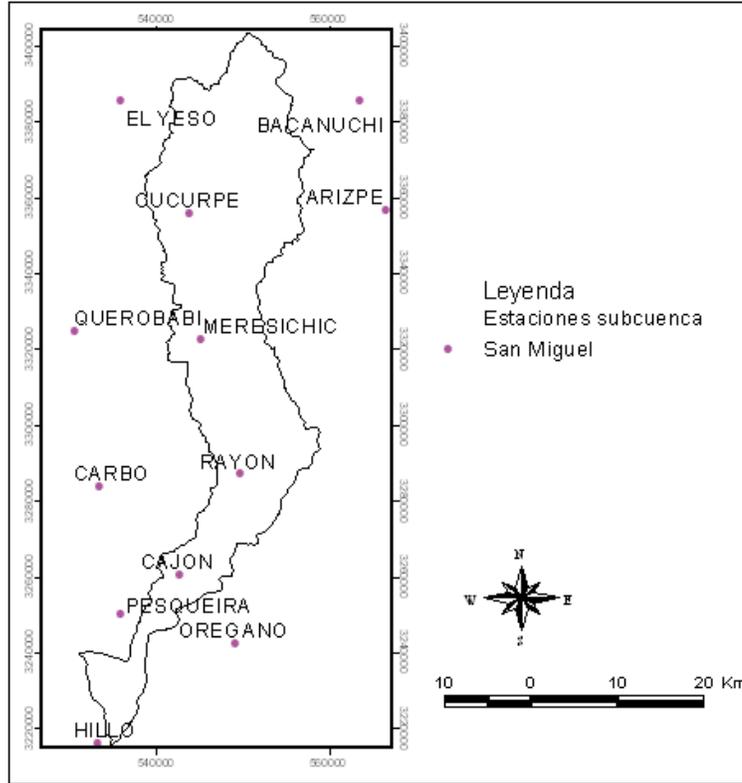


Figura 19. Localización de estaciones climatológicas dentro y fuera de la cuenca

En la Tabla 13 se consignan las temperaturas medias anuales ($^{\circ}\text{C}$) de las estaciones de la Cuenca del Río San Miguel y áreas cercanas; estas temperaturas se obtuvieron como el promedio de las temperaturas mensuales de cada año.

El promedio aritmético de las temperaturas medias anuales de todas las estaciones fue de 30.7°C . La temperatura media anual mínima se presentó en 1999 en la Estación Meresichic y fue de 18.5°C , la máxima de 38.3°C ocurrió en 1941 en la Estación Orégano y en 1989 en la Querobabi.

Tabla 13. Temperaturas medias anuales (°C) de las estaciones de la Cuenca del Río San Miguel y áreas cercanas

AÑO	MERESI- CHIC	CUCUR- PE	RAYÓN	HILLO	ORÉ- GANO	ARIZPE	PESQUEI- RA	QUERO- BABI	CARBÓ	YESO	CAJÓN	BACA- NUCHI
1941					38.3							
1942					37.0							
1943					36.7							
1944					35.7							
1945					36.7							
1946					36.2							
1947					36.3							
1948					35.7							
1949					35.3							
1950					37.7							
1951					36.0							
1952					35.9							
1953					36.5							
1954					37.0							
1955					35.9							
1956					36.5							
1957					35.6							
1958					35.3			25.5				
1959					36.0			30.2				
1960					35.5			31.6	30.9			
1961				26.2	35.2	31.3		29.3	31.0			
1962					36.1	29.5		35.9	31.3			
1963					35.7	29.9		32.8	31.5			
1964					35.1	28.7		28.3	30.5			27.0
1965				34.3	35.9	29.6		29.6	31.0			27.8
1966				32.0	36.1	28.7		30.7	31.2			27.6
1967				31.9	36.1	28.8		30.4	31.4			27.8
1968				32.3	35.3	27.8		30.1	30.7			27.2
1969				32.9	35.9	29.5		31.1	31.4			28.9
1970				33.6	35.9	28.6		31.6	30.9			27.5
1971				31.9	34.5	29.8		29.6	30.4			26.7
1972				32.8	35.4	26.5		30.7	31.8			27.6
1973				31.2	35.1	27.7		30.2	30.7			26.5
1974			31.8	31.0	35.0	29.3	32.3	30.4	30.7		32.3	27.7
1975			30.5	30.8	34.0	28.4	27.3	29.7	30.9		31.9	26.1
1976			29.9	30.7	32.0	28.2	34.2	29.7	30.5		32.2	26.0
1977		31.6	30.3	31.3	32.5	28.6	31.5	29.4	31.5		35.4	26.5
1978		29.1	29.2	30.2	32.1	29.1	30.5	29.2	29.5		31.9	26.5
1979		29.7	29.3	30.6	32.4	29.5	29.9	29.9	29.6		32.3	27.1
1980	30.3	28.6	29.2	31.6	32.8	30.3	32.5	30.6	31.1		32.9	28.8
1981	31.1	22.7	29.8	32.5	32.6	30.1	33.2	30.1	31.2		32.4	28.1
1982	29.1	29.8	32.6	32.3	32.4	29.6	30.9	29.4	31.5		32.1	27.8
1983	27.8	28.2	27.7	31.5	31.4	29.8	28.7	28.6	30.6		30.6	26.9
1984	28.5	27.8	29.5	31.9	31.4	27.3	31.1	29.3	31.2		31.2	27.2
1985	23.9	28.3	30.8	32.3	31.9	28.5	30.7	30.3	31.5		31.5	27.2
1986	32.5	29.3	31.7	32.9	32.9	31.1	32.9	30.8	32.4		32.8	27.9
1987		27.3	31.1	32.0	33.0	24.9	33.1	30.3	31.8		33.6	27.7
1988	27.1	30.6	32.2	32.0	32.6	28.2	28.5	30.6	32.0		32.7	28.1

AÑO	MERESI- CHIC	CUCUR- PE	RAYÓN	HILLO	ORÉ- GANO	ARIZPE	PESQUEI- RA	QUERO- BABI	CARBÓ	YESO	CAJÓN	BACA- NUCHI
1989		32.7	29.1	32.3	33.5		30.6	38.3	32.3		32.5	29.5
1990		28.6	29.6	31.2	32.6		30.1		30.6		30.7	27.6
1991	27.1	30.7	27.9	31.2	32.8		29.6		30.3	26.8	30.9	27.3
1992	27.5	29.3	31.9	31.1	33.9		30.2		30.4	26.8	30.6	27.0
1993	28.9	28.9	29.8	31.3			31.1	31.9	30.7		31.4	27.6
1994	27.2	24.9	31.8	31.7			31.1	31.4	31.1	32.9	31.9	28.1
1995	30.9	29.6	32.5	33.4	35.1		32.0	30.1	31.5	29.3	31.5	28.7
1996	27.3	30.9	32.7	33.5	35.9	31.1	31.1	33.5	32.4	30.2	32.9	29.6
1997	26.9	29.7	30.9	32.4	35.1	35.3	30.6	32.1	31.4	24.2	32.0	28.6
1998	30.9	28.9	31.3	33.2	34.3	27.8	32.5	31.3	32.0		31.5	27.2
1999	18.5	30.3	32.3	34.3	35.5		31.8	33.3	28.3	33.3	32.7	31.2
2000	20.4	30.6	31.3	32.5	32.8	23.7	31.4	32.2	32.6	31.6	32.3	29.2
2001	26.7	26.0	30.7	32.0	34.1	29.6	32.5	31.2	30.7	29.6	31.6	28.2
2002	26.9	29.6	31.0	32.5	35.0	30.2	32.9	32.2	31.6	30.2	32.4	28.9
2003	28.9	30.2	31.0	32.5	35.5	31.2	31.9	31.8	31.1	30.2	32.3	29.3
2004	28.8	28.9	29.9	32.1	34.6	29.0	33.4	30.7	30.2	28.8	31.5	
2005	26.6	30.6	31.2	33.0	35.1	30.0	36.9	31.9	30.8	29.6	32.3	
2006	26.4	35.4	31.8	33.8	35.0	29.6		34.1	29.7	30.7	32.3	
2007	27.1			21.0								
Mínima	18.5	22.7	27.7	21.0	31.4	23.7	27.3	25.5	28.3	24.2	30.6	26.0
Máxima	32.5	35.4	32.7	34.3	38.3	35.3	36.9	38.3	32.6	33.3	35.4	31.2
Media	26.9	29.7	31.1	31.9	34.6	29.8	31.9	32.0	30.9	29.6	31.9	28.5

Fuente: CONAGUA (2007b)

Las medias anuales de cada estación (Tabla 13), se graficaron en Excel (Figura 20).

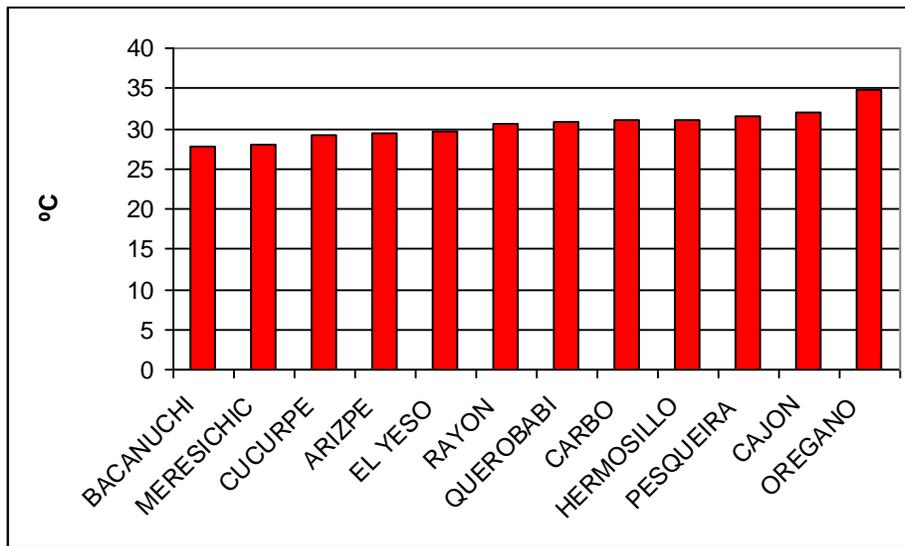


Figura 20. Promedios de temperaturas anuales (°C) desde 1941 a 2007

Para calcular de manera más aproximada la temperatura media anual de la cuenca, se utilizó el Método de las Isoyetas con los datos de temperatura de la Tabla 13. Con ayuda del

programa ArcView se interpolaron los datos y se calcularon las áreas entre isoyetas, que en el caso de líneas de igual temperatura, son isotermas (Figura 21).

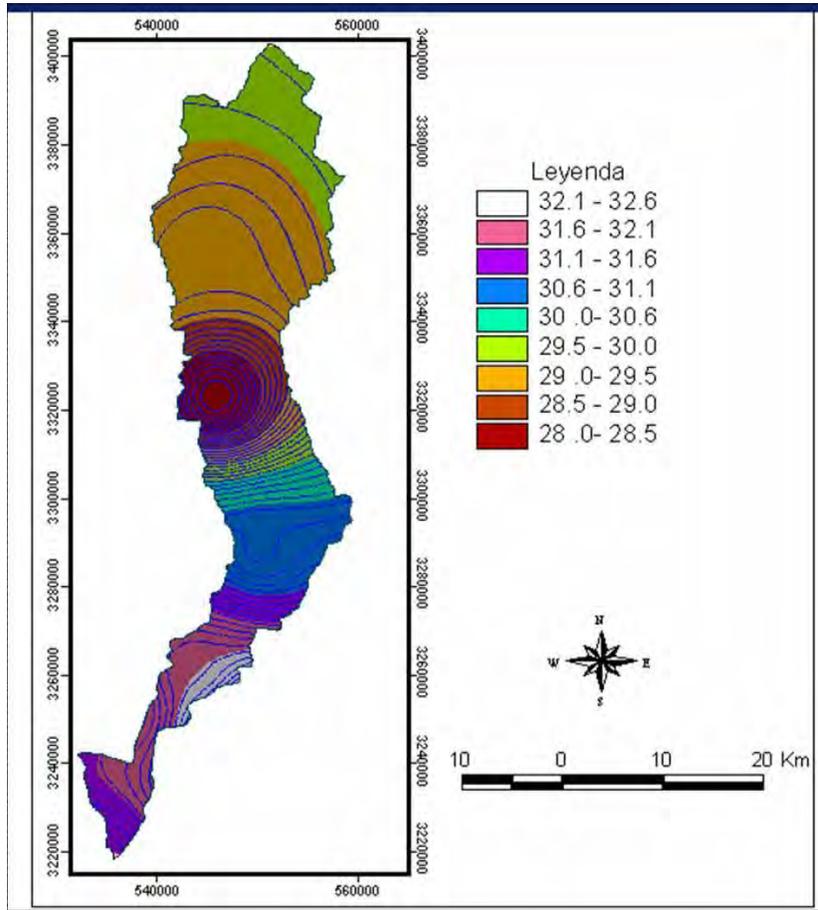


Figura 21. Isotermas de la Cuenca del Río San Miguel

Todos los cálculos pueden observarse en la Tabla 14.

Tabla 14. Cálculo de la temperatura media anual por el Método de las Isoyetas

Isoterma (°C)	Isoterma (°C)	Temp media/isotermas (°C)	Área/isotermas (km ²)	Temp * Área (°C * km ²)
28.0	28.5	28.3	274.145	7,744.597
28.5	29.0	28.8	303.668	8,730.464
29.0	29.5	29.3	1,327.339	38,824.673
29.5	30.0	29.8	669.193	19,908.494
30.0	30.6	30.3	196.123	5,942.512
30.6	31.1	30.9	445.141	13,732.588
31.1	31.6	31.4	129.172	4,049.552
31.6	32.1	31.9	382.717	12,189.544
32.1	32.6	32.4	118.482	3,832.882
			3,845.980	114,955.306

La temperatura media de la cuenca se obtuvo con la fórmula:

$$\overline{Temp} = \frac{\sum Temp * A}{A_T}$$

Donde:

\overline{Temp} = temperatura media (°C)

$Temp$ = temperatura media entre isotermas (°C)

A = área entre isotermas (km²)

A_T = área total (km²)

Sustituyendo los valores de la Tabla 14 en la fórmula anterior queda:

$$\overline{Temp} = \frac{114,955.306}{3,845.980} = 29.890 \text{ °C}$$

5.4. Precipitación

La precipitación es la principal fuente de suministro de agua. Se forma principalmente por el vapor de agua en el aire. El término precipitación como se usa en hidrología incluye todas las formas de agua depositadas sobre la superficie de la Tierra como son: niebla, lluvia, granizo, nieve.

En la Tabla 15 se muestran los datos registrados en las 12 estaciones consideradas desde el año 1941-2007 por la CONAGUA (2007b). El promedio aritmético de las precipitaciones medias anuales de todas las estaciones fue de 420.4 mm. La precipitación media anual mínima se presentó en 1998 en la Estación Bacanuchi y fue de 105.8 mm, la máxima de 993 mm ocurrió en 1993 en la Estación Querobabi.

Tabla 15. Precipitación media anual (mm) de las estaciones de la Cuenca del Río San Miguel y áreas cercanas

AÑO	MERESI- CHIC	CUCUR- PE	RAYÓN	HILLO	ORÉ- GANO	ARIZPE	PESQUEI- RA	QUERO- BABI	CARBÓ	YESO	CAJÓN	BACA- NUCHI
1942					308.6							
1943					364.0							
1944					257.1							
1945					321.1							
1946					451.9							
1947					286.9							
1948					303.0							
1949					293.3							
1950					179.8							
1951					370.9							
1952					282.8							
1953					273.2							
1954					336.9							
1955					383.7							
1956					362.8							
1957					355.8							
1958					516.5							
1959					298.4			451.8				
1960					455.0			276.0	240.7			
1961					439.1	404.0		123.6	312.5			
1962					350.5	505.0			215.0			
1963					377.9	403.0		302.5	230.8			
1964					298.8	436.2		417.2	278.0			401.7
1965				257.8	254.5	495.6		270.4	350.0			610.3
1966				334.2	327.9	547.0		277.1	287.0			512.8
1967		565.3		252.9	393.7	528.5		264.2	451.0			722.4
1968				284.9	364.8	397.0		295.0				445.6
1969		560.0		346.2	349.6	303.5		382.6	270.5			324.3
1970		499.0		275.3	245.6	282.0		313.6	303.5			397.5
1971		595.1		396.6	385.5	355.4		377.4	425.9			573.8
1972		353.0		186.4	266.0	515.1		214.1	159.0			430.0
1973		424.5		208.0	288.9	367.4		257.0	237.1			415.0
1974		350.3	269.9	303.3	341.6	376.5	216.7	156.0	292.5		301.9	491.5
1975		407.5	292.1	270.0	270.3	333.5	205.0	176.8	204.0		212.3	435.9
1976		365.5	385.6	278.2	305.1	362.5	435.0	216.5	326.0		212.0	436.2
1977		314.3	478.3	291.4	342.3	581.3	312.0	265.0	264.3		482.8	742.6
1978		740.8	599.6	325.2	463.6	666.7	467.0	623.0	525.0		589.3	619.2
1979		371.5	302.1	294.5	257.6	374.3	383.0	390.5	499.0		381.7	374.8
1980		305.0	375.7	253.9	284.2	519.9	248.0	142.0	184.0		292.9	341.2
1981	558.5	576.5	572.0	293.2	362.3	769.1	234.0	431.3	368.5		463.4	504.0
1982	420.6	444.5	521.2	221.5	377.1	502.9	403.8	396.0	157.9		389.6	431.6
1983	805.0	841.5	663.7	449.2	527.0	803.8	531.0	722.6	475.1		692.1	586.1
1984	939.5	775.6	809.3	512.8	613.8	597.5	536.0	813.3	642.6		678.5	785.6
1985	125.5	558.5	395.2	382.9	352.2	212.4	157.4	370.8	380.2		462.9	531.9
1986	479.5	508.8	591.1	449.1	476.9	510.0		540.0	433.0		468.0	594.2
1987	429.5	365.4	166.9	219.5	188.0		166.0	306.1	229.5		229.4	376.4
1988	482.0	484.2	559.4	464.1	430.4		304.5		367.0		438.6	555.2
1989		498.1	185.0	296.7	386.1			339.6	399.7		373.9	361.3
1990		807.8	633.4	578.4	729.6		568.5		542.0		828.0	532.1
1991	588.3	555.2	152.2	333.2	440.4		494.0		471.5	472.5	445.7	533.5
1992	125.5	647.5	447.9	570.2	536.0		700.0		539.0	616.2	755.0	659.2

AÑO	MERESI- CHIC	CUCUR- PE	RAYÓN	HILLO	ORÉ- GANO	ARIZPE	PESQUEI- RA	QUERO- BABI	CARBÓ	YESO	CAJÓN	BACA- NUCHI
1993		883.9	464.4	505.1			464.0	993.0	553.5		435.5	491.1
1994	639.0	684.3	698.4	497.3	429.9		533.0	774.0	629.3	578.7	581.2	720.3
1995	446.5	377.7	355.1	333.2	288.6		294.0	312.9	345.0	355.4	320.5	340.1
1996	333.0	335.5	425.1	305.8	364.0		333.0	355.1	392.7	267.2	337.2	418.2
1997	559.0	680.2	408.7	391.1	374.7		414.9	268.2	333.2	382.5	376.6	386.3
1998	111.0	332.4	487.4	278.5	242.5		266.0	341.1	317.0		323.8	105.8
1999		464.4	448.7	321.8	369.3		233.0	333.8	232.1	108.5	395.9	343.7
2000	451.0	836.4	867.3	531.7	655.0		469.0	421.5	470.2	438.0	601.3	811.9
2001	550.0	516.0	241.0	298.5	350.8	449.2	374.7	465.6	332.6	496.2		434.6
2002	453.0	442.6	306.7	422.8	347.1	377.0	145.5	208.0	259.7	312.5	106.1	375.7
2003	419.8	494.0	498.0	414.4	426.9	325.2	215.7	438.4	239.3	392.7	392.9	178.0
2004	718.0	549.5	529.0	304.8	355.2	454.0	307.0	412.9	357.0	374.8	351.6	
2005	584.0	456.5	496.5	287.6	330.5	501.0	181.5	404.7	332.0	462.8	309.8	
2006	507.0	423.5	563.2	569.9	564.3	520.2	326.0	303.7		373.0	434.9	
2007				3.9								
Mínima	111.0	305.0	152.2	186.4	179.8	212.4	145.5	123.6	157.9	108.5	106.1	105.8
Máxima	939.5	883.9	867.3	578.4	729.6	803.8	700.0	993.0	642.6	616.2	828.0	811.9
Media	487.5	522.9	460.3	352.2	367.6	461.8	352.2	375.5	352.3	402.2	427.0	483.3

Fuente: CONAGUA (2007b)

Con el promedio aritmético de las precipitaciones anuales de cada estación de los años de 1942 a 2007 (Tabla 15), se elaboró una gráfica de barras en Excel (Figura 22).

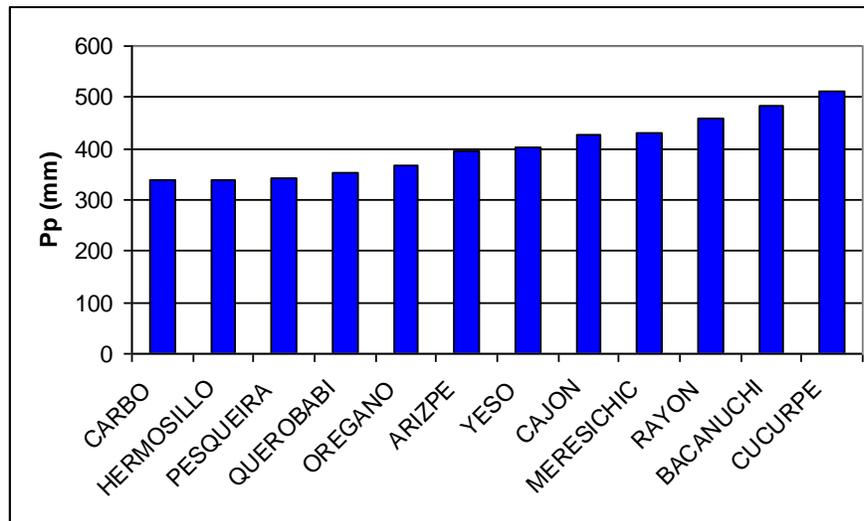


Figura 22. Promedios de precipitaciones anuales (mm) desde el año 1941 a 2007, Cuenca del Río San Miguel

De una manera general, respecto a los datos de precipitación, se ha observado que el tipo de lluvias en la zona de estudio es característica de invierno y verano, similar a la mayor parte de la región norte del país. En invierno la precipitación es frontal, debido a las masas de aire polar que intrusionan las masas de aire semi-tropical existente. En verano el tipo de lluvia

es una conjugación de tipo orográfico y por convección, debido a su posición fisiográfica, así la lluvia es de carácter chubasco, de gran intensidad y corta duración.

Dentro de la Cuenca del Río San Miguel existen solamente 4 estaciones climatológicas (Figura 19): Cucurpe, Meresichic, Rayón y El Cajón, siendo esta última también estación hidrométrica (Figura 23). Estas estaciones no son suficientes para obtener un mapa de precipitaciones sobre toda la cuenca, así que para la realización de esta tesis se usó información de 12 estaciones climatológicas en y alrededor de la Cuenca del Río San Miguel (Figura 19), todas ellas administradas por el Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2007b).



Figura 23. Estación hidrométrica El Cajón

También se consideró información generada por 15 estaciones climatológicas automáticas propiedad de la Universidad de Sonora (Figura 24), entre ellas una llamada “La Torre” ubicada cerca del poblado de Rayón, instalada en el año 2004 (Figuras 25, 26 y 27), y otra en las inmediaciones de la Sierra Los Locos, la cual funciona a partir de este año (2008).

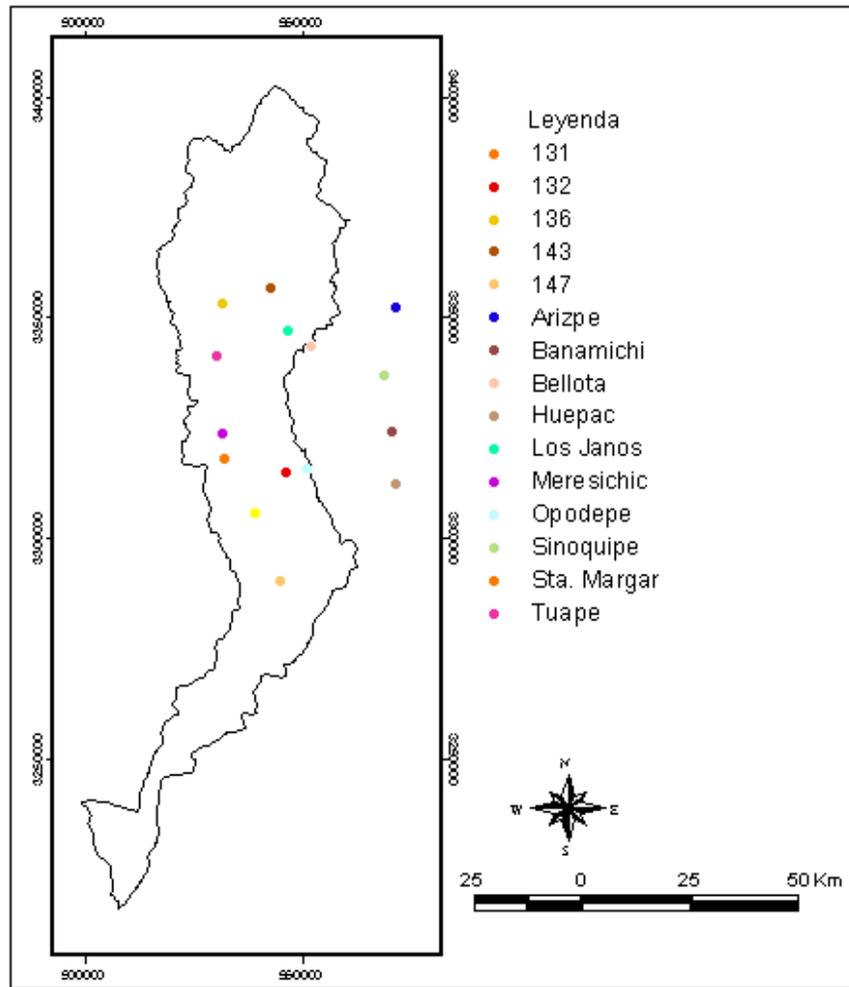


Figura 24. Localización y nombres de las estaciones de la Unison



Figura 25. Estación climatológica La Torre en Rayón, Sonora
(Coordenadas: 544,815, 3'290,174)



Figura 26. Controladores y sensores de la estación La Torre (Rayón, Sonora)



Figura 27. Pluviógrafo de balancín, ubicado en la estación La Torre

Usando de nuevo el Método de las Isoyetas (Figura 28), se calculó la precipitación media entre isoyetas, se midió el área entre isoyetas por medio del programa ArcView, se multiplicaron los valores anteriores y se hizo su sumatoria (Tabla 16).

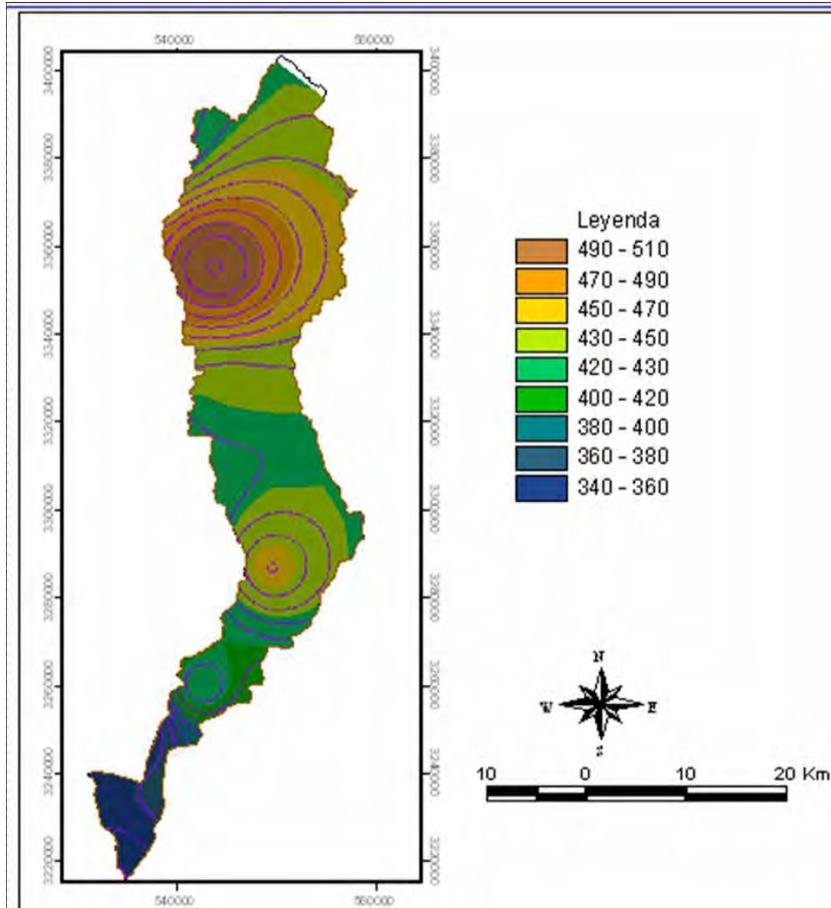


Figura 28. Isoyetas de precipitación (mm) de la Cuenca del Río San Miguel

Tabla 16. Cálculo de la precipitación total media anual (Pp)

Isoyeta (mm)	Isoyeta (mm)	Pp media/isoyetas (mm)	Área/isoyetas (km ²)	Pp * Área (mm * km ²)
340	360	350	204.419	71,546.575
360	380	370	83.310	30,824.678
380	400	390	33.633	13,116.769
400	420	410	153.244	62,830.121
420	430	425	860.909	365,886.353
430	450	440	1,272.266	559,796.986
450	470	460	625.627	287,788.417
470	490	480	331.243	158,996.771
490	510	500	281.329	140,664.564
			3,845.979	1'691,451.233

La precipitación media de la cuenca se obtuvo con la fórmula:

$$\overline{Pp} = \frac{\sum Pp * A}{A_T}$$

Donde:

\overline{Pp} = precipitación media (mm)

Pp = precipitación media entre isoyetas (mm)

A = área entre isoyetas (km²)

A_T = área total (km²)

Sustituyendo los valores de la Tabla 16 en la fórmula anterior queda:

$$\overline{Pp} = \frac{1'691,451.233}{3,845.979} = \underline{439.797 \text{ mm}}$$

5.5. Evaporación

La mayoría de las estaciones climatológicas del área de estudio, no miden la evaporación potencial. Sin embargo, de acuerdo con la información disponible en 11 de ellas, se estima que la evaporación potencial promedio es de 2,104.84 mm/año. En la Tabla 17 se muestran los datos registrados en el período de 1941-2006. En la misma se observa que la evaporación media anual mínima de 1,024.78 mm se presentó en el año 2002 en la Estación Rayón, la máxima de 3,520.84mm ocurrió en el año 2000 en la Estación Pesqueira.

Tabla 17. Evaporación media anual (mm) de las estaciones encontradas en la Cuenca del Río San Miguel

AÑO	MERESI- CHIC	CUCUR- PE	RAYÓN	HILLO	ORÉ- GANO	ARIZPE	PESQUEI- RA	QUERO- BABI	CARBÓ	CAJÓN	BACA- NUCHI
1941					1,365.06						
1942					2,383.86						
1943					2,319.69						
1944					2,219.04						
1945					2,168.49						
1946					2,177.10						
1947					2,507.26						
1948					1,976.91						
1949					2,407.18						
1950					2,737.68						
1951					2,351.57						
1952					2,451.44						
1953					2,542.36						
1954					2,427.41						
1955					2,331.95						
1956					2,410.67						
1957					2,303.71						
1958					2,110.14						
1959					2,287.92			2,824.86			
1960					2,290.15			2,137.27	2,686.22		
1961					2,333.81	1,841.70		1,894.94	2,531.45		

Análisis del escurrimiento de la Cuenca del Río San Miguel, durante el 2004

AÑO	MERESI- CHIC	CUCUR- PE	RAYÓN	HILLO	ORÉ- GANO	ARIZPE	PESQUEI- RA	QUERO- BABI	CARBÓ	CAJÓN	BACA- NUCHI
1962					2,463.39	2,223.40		1,594.42	2,677.85		
1963					2,518.74	2,154.60		1,937.83	2,779.20		
1964					2,471.98	2,354.50		2,433.99	2,737.55		1,879.31
1965					2,479.30	2,408.70		2,547.58	2,676.00		1,929.63
1966					2,332.91	2,329.70		2,401.92	2,489.90		1,811.03
1967				2,313.80	2,407.15	2,348.60		2,605.91	2,629.23		1,943.00
1968				2,262.75	2,154.87	2,171.10		2,405.71	2,304.84		1,754.89
1969				2,031.57	2,298.30	2,475.40		2,289.24	2,394.50		2,000.77
1970				2,980.10	2,347.40	2,360.90		2,419.33	2,549.30		1,977.00
1971				2,170.50	2,223.36	2,647.40		2,532.20	2,468.00		2,037.70
1972				2,577.40	2,397.09	2,604.90		2,144.62	2,666.60		2,006.60
1973				2,692.40	2,587.40	2,274.50		2,476.83	2,503.60		2,122.40
1974			2,363.20	2,660.40	2,584.06	2,189.40	1,936.20	2,295.73	2,299.10	2,406.70	1,995.20
1975			2,187.60	2,450.90	2,304.85	2,377.20	2,197.20	2,339.38	2,326.30	2,556.90	1,916.20
1976			2,116.00	2,703.80	2,446.25	2,062.90	2,303.80	2,351.26	2,284.60	3,026.70	1,882.90
1977			1,880.20	2,815.80	2,389.04	2,074.60	2,083.00	2,316.47	2,608.20	2,648.10	1,852.40
1978		1,843.90	1,980.90	2,735.90	2,322.38	2,050.40	2,007.30	2,305.58	2,105.20	2,405.10	1,816.80
1979		1,918.00	2,150.60	2,681.50	2,371.39	2,115.80	2,181.80	2,425.56	2,493.50	2,508.30	1,903.30
1980		1,819.10	1,963.43	2,657.50	2,566.47	2,070.70	2,134.23	2,424.57	2,293.00	2,631.46	1,978.83
1981		1,374.38	1,861.80	2,508.05	2,209.83	1,988.80	1,663.30	2,378.74	2,155.20	2,312.10	1,712.81
1982	1,992.70	1,924.80	2,281.70	2,553.50	2,362.33	2,197.10	1,824.10	2,419.30	1,605.40	2,496.30	1,978.50
1983	1,827.60	1,556.70	1,185.80	2,354.69	1,824.86	1,820.60	1,664.10	1,970.82		2,104.30	1,746.30
1984	1,778.00	1,903.60	1,790.80	2,363.00	2,034.49	1,359.30	1,975.20	1,958.00	1,469.00	2,241.10	1,771.60
1985		1,697.90	1,617.40	2,309.20	2,065.70		1,339.80	1,931.10	2,014.80	2,236.90	1,609.60
1986		1,912.20	1,724.90	2,547.30	2,151.70			2,080.00	2,302.90	2,406.90	1,735.80
1987				2,778.50	2,383.90			1,735.40	2,448.32		1,863.40
1988	1,440.17			2,934.69							1,627.26
1989				2,846.72							
1990				2,745.72	1,846.70					2,114.07	
1991				2,848.85						2,023.97	
1992				2,552.55						2,124.07	
1993				2,826.24						2,323.22	
1994				2,714.03						1,717.11	
1995					1,431.80						
1996					2,143.48						
1997					2,136.70						
1998					1,796.42		1,429.32			2,423.99	
1999					2,078.41		1,155.61			2,465.75	
2000			1,730.03		1,908.12		3,520.84			2,541.59	
2001			1,489.61		1,907.58		1,263.23				1,573.53
2002			1,024.78		1,153.02					1,554.47	1,938.57
2003			2,232.89		1,602.61					2,561.57	1,269.50
2004			2,294.82		1,712.93		1,522.37			2,555.78	
2005			2,303.35		1,493.19		1,475.08			2,546.97	
2006			2,235.44		1,527.81					2,477.61	
Mínima	1,440.17	1,374.38	1,024.78	2,031.57	1,153.02	1,359.30		1,594.42	1,469.00	1,554.47	1,269.50
Máxima	1,992.70	1,924.80	2,363.20	2,980.10	2,737.68	2,647.40	3,520.84	2,824.86	2,779.20	3,026.70	2,122.40
Media	1,759.62	1,772.29	1,920.76	2,593.48	2,192.36	2,187.59	1,870.92	2,261.33	2,388.88	2,361.96	1,844.10

Fuente: CONAGUA (2007b)

Se calcularon los promedios anuales de las evaporaciones de las estaciones de la Tabla 17 y se graficaron en Excel (Figura 29).

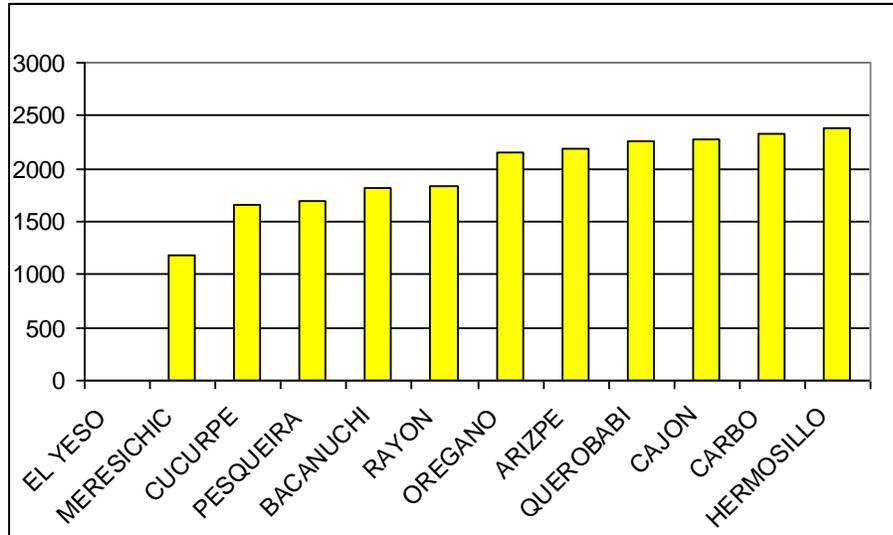


Figura 29. Evaporación anual promedio (mm) desde 1941 a 2007 en la Cuenca del Río San Miguel

Con los promedios anuales de las estaciones de la Tabla 17 se trazaron las isolíneas de evaporación (Figura 30) con ayuda del programa ArcView, se obtuvieron las evaporaciones medias entre isolíneas y las áreas entre isolíneas (Tabla 18).

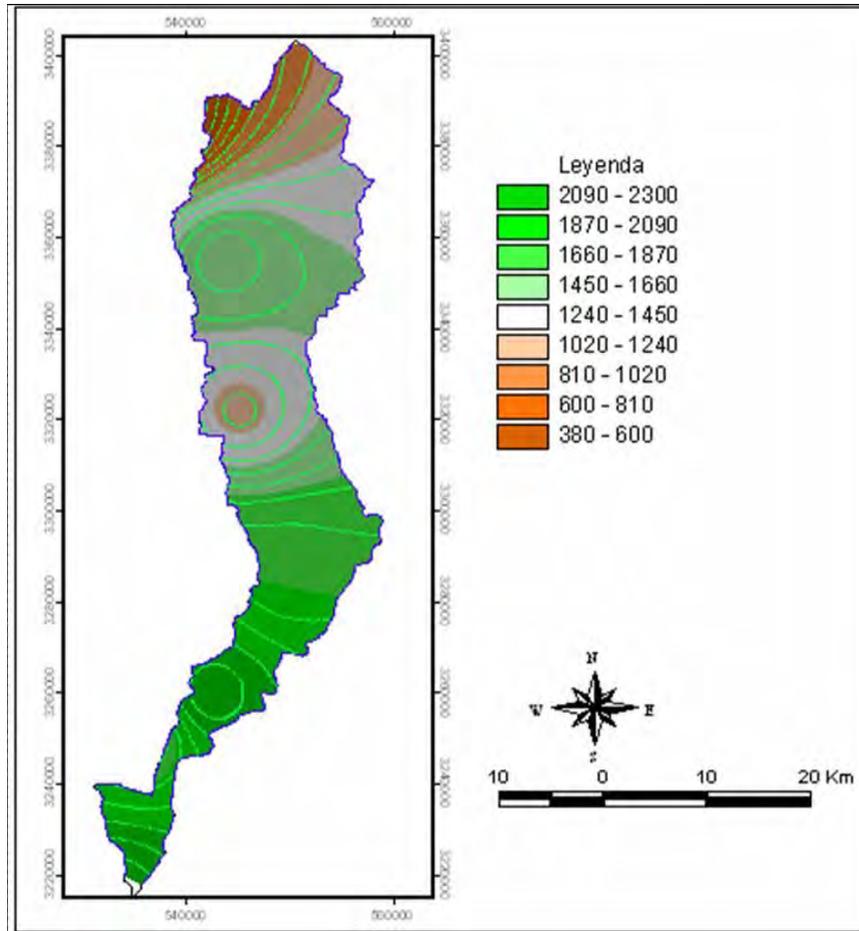


Figura 30. Evaporación total media anual (mm) en la cuenca

Tabla 18. Cálculo de la evaporación total media anual (Evap)

Isolínea (mm)	Isolínea (mm)	Evap media/isolíneas (mm)	Área/isolíneas (km ²)	Evap * Área (mm * km ²)
380	600	490	28.417	13,924.405
600	810	705	50.542	35,632.188
810	1020	915	170.940	156,409.981
1020	1240	1130	383.585	433,451.516
1240	1450	1345	986.624	1,327,009.263
1450	1660	1555	943.772	1,467,565.168
1660	1870	1765	217.549	383,974.204
1870	2090	1980	756.109	1,497,095.257
2090	2300	2195	308.442	677,029.782
			3,845.980	5'992,091.765

La evaporación media de la cuenca se obtuvo con la fórmula:

$$\overline{Evap} = \frac{\sum Evap * A}{A_T}$$

Donde:

\overline{Evap} = evaporación media (mm)

$Evap$ = evaporación media entre isolíneas (mm)

A = área entre isolíneas (km²)

A_T = área total (km²)

Sustituyendo los valores de la Tabla 18 en la fórmula anterior queda:

$$\overline{Evap} = \frac{5'992,091.765}{3,845.980} = \underline{1,558.014 \text{ mm}}$$

5.6. Escurrimiento

Los escurrimientos del Río Sonora se determinaban antes de la construcción de la Presa Abelardo L. Rodríguez, en la Estación Hidrométrica Hermosillo, con la suma de los escurrimientos registrados sobre el río y el canal principal. El escurrimiento medio anual total observado en 1945-46 fue de 216.2 hm³ (millones de metros cúbicos), la avenida máxima fue de 1,240 m³/s y el gasto mínimo de 0.68 m³/s (CONAGUA, 2002).

Los principales aportadores del Río San Miguel son los ríos Saracachi y Zanjón, que nacen en el parteaguas común con el Río San Miguel y el Arroyo La Tinaja, situados al oriente de la Cuenca del Río Asunción en el Cerro Encarnado, a una elevación de 1,780 msnm. Su curso general es hacia el sur, pasando por los poblados de Querobabi y Carbó, para confluir con el Río San Miguel. Los principales aportadores del Río Zanjón son el Arroyo El Pinito por la margen derecha, a 17 km aguas abajo de Carbó y el Arroyo Moreno que desemboca por la margen izquierda, a 18 km aguas arriba de Zamora.

El volumen escurrido durante 1944-47 se estimó del orden de 28.7 hm³ y contribuyó con el 12% del volumen total escurrido. Comparando el volumen de flujo base entre las estaciones hidrométricas El Orégano y Hermosillo para los mismos años, por la Estación El Orégano pasaron 2.4 hm³, contra los 28.7 hm³ que se registran en la Estación Hermosillo. Es muy factible que la alimentación del acuífero del Río San Miguel por el escurrimiento superficial, en la actualidad, sea inferior debido al fuerte incremento de la extracción de agua subterránea por norias y pozos a lo largo de los valles intermontanos en la Cuenca del Río San Miguel.

El volumen de flujo base que contribuye al escurrimiento anual es un porcentaje muy bajo, únicamente constituye el 1.6% del escurrimiento superficial.

La infraestructura hidráulica que se tiene en el Acuífero Río San Miguel consiste de obras de captación de agua subterránea del tipo pozos profundos y someros, así como norias en su mayoría, algunos manantiales y obras de toma directa del río. Los pozos se utilizan para fines agrícolas, domésticos y pecuarios; las norias son en general para usos domésticos. Hacia la parte baja del acuífero, se localiza la zona agrícola de frutales y forrajes que se benefician con pozos profundos los cuales operan con energía eléctrica (CONAGUA, 2002).

5.7. Balance hídrico.

El balance de agua en un sitio, es la cuantificación de los elementos del *Ciclo Hidrológico* y del impacto del consumo producido por la actividad antropogénica en un período de tiempo y en un área o cuenca determinada. El resultado de un estudio consiste en un diagnóstico de la relación y el estado del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en dicha área. Dado que presenta un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en un área en particular, permite tomar medidas y establecer lineamientos y estrategias para su protección y utilización de una manera integrada, de tal forma que se garantice su aprovechamiento sostenible.

La ecuación de balance hídrico establece, de acuerdo al principio de conservación de la materia y la energía que:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

Para elaborar un balance de agua es necesario cuantificar y relacionar adecuadamente las entradas y las salidas de agua en el sistema hidrológico, las cuales pueden ser:

Entradas al sistema:

- Precipitación.
- Retornos de la demanda.
- Importaciones superficiales de otra cuenca.

Salidas del sistema:

- Evapotranspiración real.
- Evaporación de cuerpos de agua.

- Evaporación en áreas urbanas.
- Escurrimiento superficial.
- Demanda interna en la cuenca.
- Demanda externa de la cuenca.

Cambio de almacenamiento en el sistema:

- Recarga de acuíferos,
- Variación de nivel en cuerpos de agua (lagos, lagunas, embalses)

Un estudio de balance hidrológico superficial de la Cuenca del Río San Miguel fue elaborado por la Universidad de Sonora en el año 2005 a petición de la Comisión Estatal del Agua. Otro balance fue realizado por Valencia en 2009. Los cálculos de ambos se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Balances superficiales de la Cuenca del Río San Miguel, Sonora

Estudio	Área acuífero (km ²)	Pp. total (hm ³)	ETR total (hm ³)	Pp. efectiva (hm ³)	Coef. esc.	Esc. Directo (hm ³)	Esc. Base (hm ³)	Esc. Total (hm ³)	Caudal esc. (m ³ /s)	Infiltración total (hm ³)
UNISON (2005)	4,044.83	1,871.03	1,689.14	181.89	0.09	16.01	18.76	34.76	1.10	147.13
Valencia (2009)	3,979.57	1,877.98	1,784.93	93.05	0.088	8.19	18.76	26.95	0.85	66.10

Según Valencia (2009), la cuenca del Río San Miguel tiene como única entrada al sistema la *precipitación* (P). Las salidas son: *evapotranspiración* (ETP), el *flujo superficial de salida* (Es) y la *infiltración* (I), que puede ocurrir durante el escurrimiento por tierra o durante el flujo en el cauce. El río es de tipo intermitente, por lo que no registra escurrimiento durante todo el año; sin embargo, en la estación hidrométrica *El Cajón*, se observa escurrimiento base o subsuperficial gran parte del año. En la figura 31 se muestra un diagrama con los elementos del balance de agua superficial en la zona.



Figura 31. Elementos del balance de agua superficial de la Cuenca del Río San Miguel (Valencia, 2009)

VI. CARACTERIZACIÓN FISIAGRÁFICA DE LA CUENCA

6.1. Clasificación hidrológica

Las cuencas hidrológicas son unidades morfológicas integrales y además de incluir todo el concepto de cuenca hidrográfica, abarcan en su contenido, toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo. La cuenca de drenaje de una corriente es el área que contribuye al escurrimiento y que proporciona parte o todo el flujo de la corriente principal y sus tributarios. Está delimitada por el parteaguas, que es una línea imaginaria que divide las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento. El parteaguas está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida.

La Cuenca del Río San Miguel es parte de la Cuenca del Río Sonora, que a su vez está comprendida dentro de la Región Hidrológica RH-9, Sonora Sur. La RH-9 es la región que abarca mayor superficie en Sonora (63.6% de la superficie estatal), se extiende en la porción oriental desde Agua Prieta hasta Yavaros, prolongándose hasta Chihuahua.

El Río San Miguel nace en la Sierra Azul a una altitud de 2,000 msnm y tiene un desarrollo de 220 km a través de una superficie de cuenca hidrográfica de 3,845.98 km². El río mantiene un rumbo preferencial N-S, pero a la altura de Rayón cambia su dirección hacia el SW atravesando el Valle de San Miguel, para después continuar hacia la planicie de Estación Zamora donde se incorpora con el Zanjón, para descargar finalmente y unirse al Río Sonora.

Las elevaciones máximas del área están localizadas a 10.80 km al NE del Rancho El Cabrero y ascienden hasta los 1,106.20 msnm, las mínimas se localizan a lo largo de la parte sur de la cuenca y son de 173.05 msnm.

6.2. Fisiografía y geomorfología

De acuerdo al trabajo publicado por la CONAGUA (2002), la parte alta de la Cuenca del Río Sonora que comprende las cuencas hidrográficas de los ríos Sonora, San Miguel y Zanjón, se ubica en las provincias fisiográficas de la Zona Desértica de Sonora y la Sierra Madre Occidental, propuestas por Álvarez en 1958; tiene una superficie de 21,195 km². Esta última provincia fisiográfica en su porción norte, está dividida en tres subprovincias o zonas, que la separan longitudinalmente. Estas son, de oriente a occidente: 1) la Zona de Altiplanicie,

2) la Zona de Barrancas y 3) la Zona de Sierras y Valles Paralelos, siendo en esta última, donde se ubica la porción oriental del área de estudio y que fue descrita por Raisz en 1959 de la siguiente forma: “La zona presenta cadenas de montañas longitudinales, que están separadas por valles paralelos intermontanos menos extremosos. Las cadenas montañosas están compuestas por rocas metamórficas y sedimentarias, coronadas de lavas e intrusionadas por granito y otras rocas plutónicas. Los valles están cubiertos por conglomerados del Terciario Superior y rellenos fluviales y aluviales del Cuaternario”.

El valle del río se localiza en la porción central del área estudiada, siguiendo su labrado al pie de las sierras La Madera y El Torreón, corriendo a través de grandes escarpes y acantilados hasta el poblado El Carrizal. De este punto hasta su confluencia con el Río Zanjón, cruza por los valles de Opodepe-Rayón y San Miguel de Horcasitas, teniendo el cauce del río, al igual que el río Sonora, varios estrechamientos de rocas impermeables. Además de las grandes fallas longitudinales que dieron lugar a la formación de los valles, existen algunas secundarias de dirección E-W que tienen su mayor expresión en la Cuenca del Río Sonora; son precisamente estas fallas, las que propician los estrechamientos y controlan el sistema de drenaje de muchos arroyos y el propio cauce del Río San Miguel.

En el mapa del INEGI (Figura 32), se observa que las principales formas morfológicas expuestas en el área de estudio están representadas por: abanico aluvial, bajada, lomerío, sierra y valle abierto. Los valles, abanico aluvial y bajada están constituidos por materiales de relleno Terciarios y Cuaternarios; las sierras por rocas intrusivas, sedimentarias, volcánicas y metamórficas y las terrazas (lomeríos) por los conglomerados de la Formación Báucarit (King, 1939). Se caracteriza geomorfológicamente por la presencia de una serie de sierras y lomas paralelas, con orientación NE-SW y separadas entre sí por valles angostos.

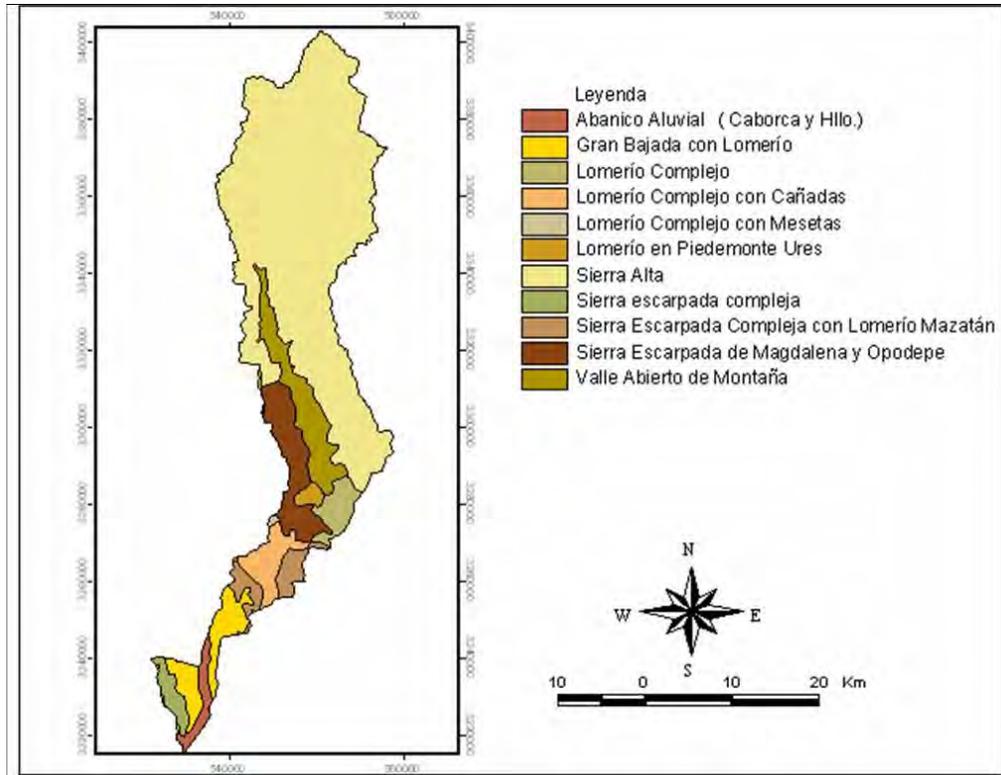


Figura 32. Fisiografía de la Cuenca del Río San Miguel (INEGI, 1981)

6.3. Unidades geohidrológicas

De acuerdo a las cartas hidrológicas de aguas subterráneas del INEGI (1981), en la Cuenca del Río San Miguel se tienen 4 unidades geohidrológicas: material consolidado (posibilidades bajas) y no consolidado (posibilidades baja, media y alta), con permeabilidades variables para constituir acuíferos (Figura 33).

En general, el material consolidado con posibilidades bajas de formar acuíferos está formado por las sierras del área, y el material no consolidado por los rellenos sedimentarios depositados en los valles de la cuenca.

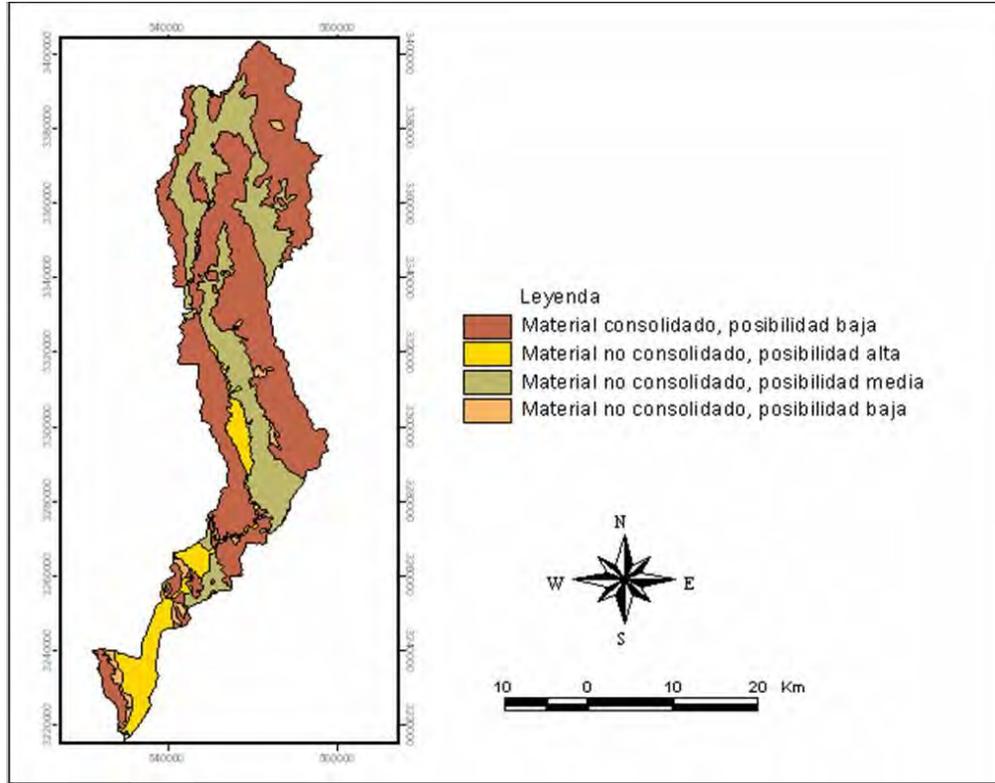


Figura 33. Unidades geohidrológicas de la Cuenca del Río San Miguel (INEGI, 1981)

6.4. Área de la cuenca (A)

El área de una cuenca es probablemente la característica geomorfológica más importante para una caracterización fisiográfica. Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de esorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural.

Generalmente el área (*A*) se determina con un planímetro y se expresa en kilómetros cuadrados. En el presente trabajo el área de la Cuenca del Río San Miguel fue calculada con el programa ArcView y fue de 3,845.98 km².

El INEGI (2005) cuenta con una cobertura nacional de división hidrográfica a nivel de Subcuenca, Cuenca y Región, la base de esta división fue tomada de la clasificación que hizo SRH en la década de los setenta (Tabla 20). Según dicha clasificación de cuencas por tamaño, la Cuenca del Río San Miguel, es mediana.

Tabla 20. Clasificación de cuencas hidrográficas por su tamaño

Clasificación	Tamaño (km ²)	% del total del país
Muy chicas	< 500	4.2
Chicas	500-1,000	2.5
	1,000-2,000	4.0
Medianas	2,000-5,000	7.1
	5,000-10,000	9.6
Medianamente grandes	10,000-20,000	14.1
Grandes	20,000-100,000	43.1
Muy grandes	>100,000	19.7

Fuente: INEGI (2005)

6.5. Coeficiente de compacidad ó índice de *Gravelius* (K_c)

El coeficiente de compacidad es indicador de la regularidad geométrica de la forma de la cuenca. El índice de compacidad de *Gravelius* (K_c) es la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia de un círculo que tenga igual superficie que la de la cuenca (Díaz *et al.*, 1999). Su fórmula es:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

K_c = coeficiente de compacidad ó índice de *Gravelius* (adimensional)

P = perímetro de la cuenca (km)

A = área de la cuenca (km²)

Si el valor del coeficiente de compacidad es uno, la cuenca es perfectamente circular, si es igual a 1.128 la cuenca es cuadrada. El K_c puede alcanzar hasta el valor de 3, en el caso de cuencas muy alargadas.

Para conocer el K_c de la Cuenca del Río San Miguel se obtuvieron con ArcView, tanto el perímetro (494.11 km) como el área (3,845.98 km²), que sustituidos en la fórmula, queda:

$$K_c = 0.282 \frac{494.11}{\sqrt{3,845.98}} = 2.24$$

Por lo tanto se concluye que la cuenca es muy alargada.

6.6. Relación de elongación (R_e)

Esta relación fue definida por S. A. Schumm como el cociente entre el diámetro de un círculo con la misma superficie de la cuenca y la longitud máxima de la cuenca, definida como

la más grande dimensión de la cuenca, a lo largo de una línea recta desde la salida hasta el límite extremo del parteaguas, paralela al río principal (Díaz *et al.*, 1999).

Su expresión matemática es:

$$Re = \frac{D}{Lm} = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{Lm}$$

Donde:

Re = relación de elongación (adimensional)

D = diámetro de un círculo de igual área que la cuenca (km)

Lm = longitud máxima de la cuenca (km)

A = área de la cuenca (km²)

La Re se acerca a la unidad cuando la cuenca es plana; para cuencas con relieve pronunciado, el valor está entre 0.6 y 0.8.

La longitud de la cuenca (Lm) obtenida con el programa ArcView fue de 44.86 km (Figura 34), y el área de 3, 845.98 km². Sustituyendo los valores en la fórmula, queda:

$$Re = 1.128 \frac{\sqrt{3,845.98}}{44.86} = 1.559385$$

De acuerdo a la relación de elongación de 1.559385, se puede inferir que la cuenca es plana con porciones accidentadas.

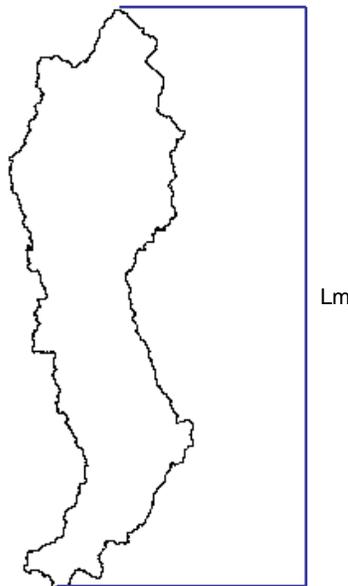


Figura 34. Longitud máxima de la Cuenca del Río San Miguel

6.7. Relación de circularidad (*Rci*)

Este coeficiente es la relación entre el área de la cuenca y la del círculo cuya circunferencia es igual al perímetro de la cuenca (Díaz *et al.*, 1999). Se expresa con la fórmula:

$$Rci = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Donde:

Rci = relación de circularidad (adimensional)

A = área de la cuenca (km²)

P = perímetro de la cuenca (km)

Tiene un valor unitaria cuando la cuenca es circular, cuando es cuadrada su valor será 0.785. Para conocer la relación de circularidad en el área estudiada, se introdujeron los datos de la cuenca en la fórmula, habiendo obtenido previamente el perímetro por medio del programa ArcView, quedando de la siguiente manera:

$$Rci = \frac{4(\pi)3,845.98}{(494.11)^2} = \underline{0.1979564}$$

Como los resultados de la relación de circularidad de la cuenca en estudio, no son ni 1 ni 0.785, se concluye que la cuenca no es circular, ni cuadrada.

6.8. Curva hipsométrica

Los datos de elevación de una cuenca son importantes para relacionar la acción de la altitud con el comportamiento de la temperatura y precipitación. La curva hipsométrica refleja con precisión el comportamiento global de la altitud de la cuenca. Para generarla es necesario reclasificar el modelo de elevación digital del terreno (MEDT), según los intervalos deseados y calcular el área en cada rango (Díaz *et al.*, 1999).

Cada punto de la curva, es el porciento de área de la cuenca sobre una determinada curva de nivel (Figura 35). El porcentaje de elevación se define como el cociente entre el área sobre o bajo la curva hipsométrica. Se obtiene mediante la fórmula:

$$Rh = \frac{Ss}{Si} \times 12$$

Donde:

Rh = porcentaje de elevación (adimensional)

S_s = área sobre la curva hipsométrica (m^2)

S_i = área bajo la curva hipsométrica (m^2)

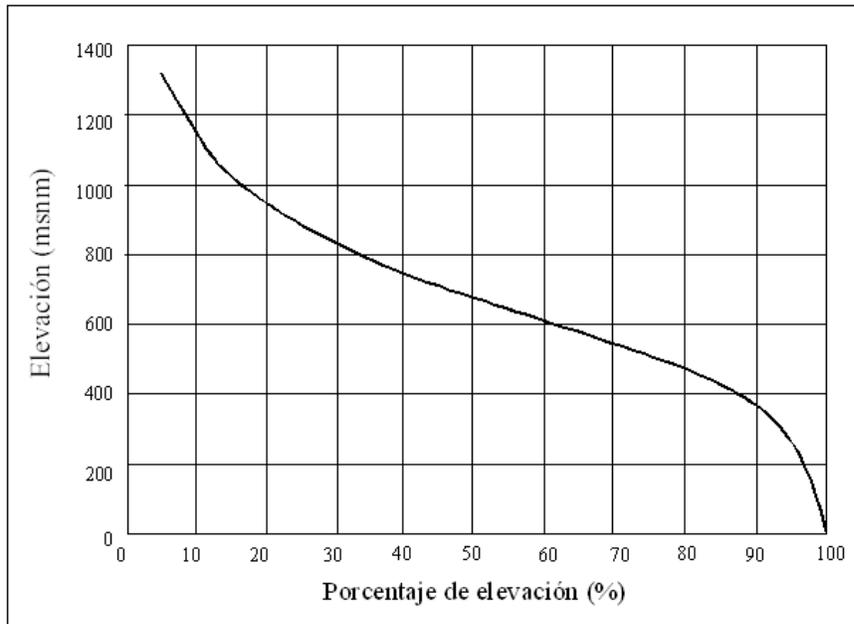


Figura 35. Curva hipsométrica (Strahler, 1964)

Según Strahler (1964), la importancia de esta relación reside en que es un indicador del estado de equilibrio dinámico de la cuenca. Así, cuando $Rh = 1$, se trata de una cuenca en equilibrio morfológico. La siguiente ilustración (Figura 36) muestra tres curvas hipsométricas correspondientes a otras tantas cuencas que tienen potenciales evolutivos distintos.

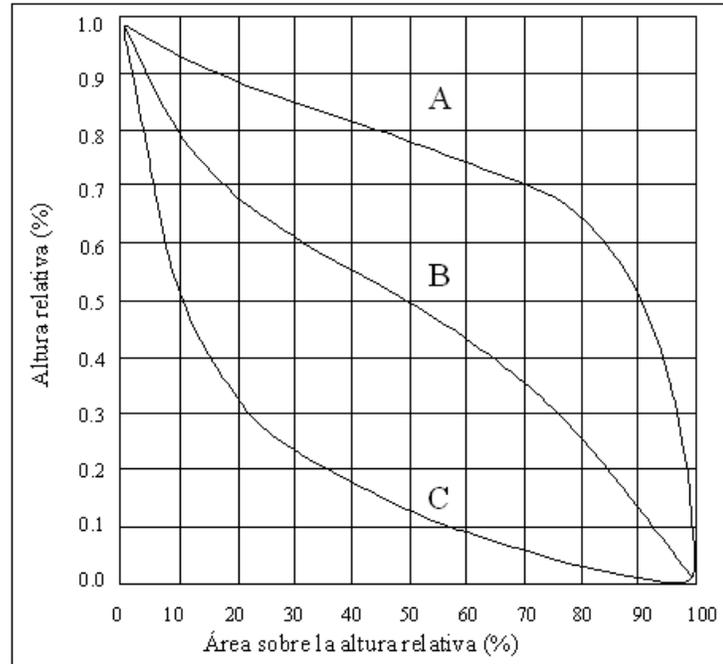


Figura 36. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión (Strahler, 1964)

La curva superior (A) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (B) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (C) es típica de una cuenca sedimentaria (Figura 36). Quedarían, así, representadas distintas fases de la vida de los ríos:

- Curva A: fase de juventud
- Curva B: fase de madurez
- Curva C: fase de vejez

Scheidegger (1987) rechaza esta clasificación aduciendo que el levantamiento (*uplifting*) tectónico es un proceso continuo y que, a lo largo de la historia de la cuenca, hay una tendencia a equilibrar las fuerzas antagónicas de construcción tectónica y degradación por erosión u otros mecanismos. Si un paisaje muestra un carácter permanente, estos dos procesos opuestos están en equilibrio dinámico. Scheidegger (1987) entonces atribuye las diversas formas de la curva hipsométrica a los niveles de actividad de los procesos citados. Así, la curva A corresponde con una alta actividad, la curva B con una actividad media y la curva C con una actividad baja. El nivel de actividad no tiene por qué estar relacionado con la edad de la cuenca.

Ahora tomando los datos del área de estudio, medidos con el programa ArcView (Tabla 21), se puede construir la curva hipsométrica para la Cuenca del Río San Miguel (Figura 37).

Tabla 21. Áreas y elevaciones para la construcción de la curva hipsométrica

Elevación (msnm)	Altura relativa (%)	Área (km²)	Área acumulada (km²)	Área acumulada relativa (%)
2300	1.000	4.849	4.849	0.126
2200	0.957	4.849	9.698	0.252
2100	0.913	4.849	14.547	0.378
2000	0.870	8.849	23.396	0.608
1900	0.826	19.849	43.245	1.124
1800	0.783	42.849	86.094	2.239
1700	0.739	65.849	151.943	3.951
1600	0.696	101.849	253.792	6.599
1500	0.652	165.849	419.641	10.911
1400	0.609	237.849	657.490	17.096
1300	0.565	345.849	1,003.339	26.088
1200	0.522	448.849	1,452.188	37.759
1100	0.478	524.849	1,977.037	51.405
1000	0.435	503.849	2,480.886	64.506
900	0.391	367.849	2,848.735	74.070
800	0.348	285.849	3,134.584	81.503
700	0.304	274.849	3,409.433	88.649
600	0.261	279.849	3,689.282	95.926
500	0.217	138.849	3,828.131	99.536
400	0.174	17.849	3,845.980	100.000

La curva hipsométrica es una gráfica que lleva en el eje de las X el área acumulada relativa (%), y en el eje de las Y la altura relativa (%) que se muestran en la Tabla 21. El área relativa es el cociente entre cada área y el área total; la altura relativa es la división entre cada elevación entre la elevación total de la cuenca.

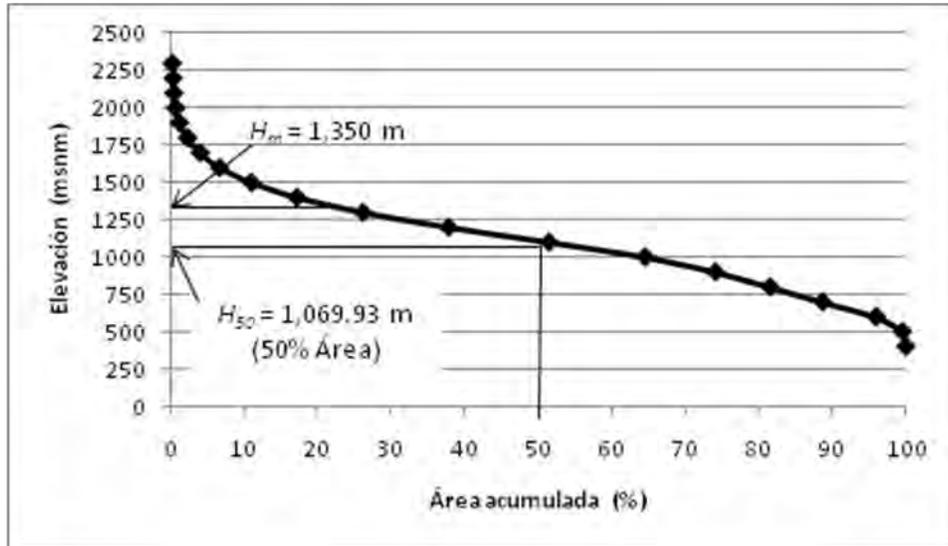


Figura 37. Curva hipsométrica y elevaciones media y mediana de la Cuenca del Río San Miguel

Comparando las curvas hipsométricas característica (Figura 36) con la de la Cuenca del Río San Miguel (Figura 37), se deduce que la cuenca se encuentra en una etapa de madurez y equilibrio, con fase de río tipo B, representando una actividad erosiva media.

6.9. Elevación media (H_m) y mediana (H_{50})

Se pueden obtener varias elevaciones en una cuenca. En el presente trabajo se obtuvieron la media y la mediana.

La elevación media (H_m) es la ordenada media de la curva hipsométrica. Para la cuenca en estudio, la elevación media fue de 1,350 msnm (Figura 37).

La elevación mediana de la cuenca (H_{50}) es la altura para la cual, el 50% del área de la cuenca se encuentra debajo de la misma. En la Figura 37, el 50% del área acumulada, se proyectó mediante una recta vertical hasta la curva hipsométrica y de ahí se buscó la elevación mediana correspondiente, que fue de 1,069.93 msnm.

6.10. Rectángulo equivalente

Para poder comparar el comportamiento hidrológico de dos cuencas, se construye el rectángulo equivalente o de *Gravelius*, que es un rectángulo que tiene el mismo perímetro, área, coeficiente de compacidad y curva hipsométrica que los de la cuenca.

Para la construcción del rectángulo equivalente, se utilizan las fórmulas (Nanía, 2003):

$$\frac{L}{\sqrt{A}} = \frac{Kc}{1.12} + \sqrt{\left(\frac{Kc}{1.12}\right)^2 - 1}$$

Y:

$$\frac{l}{\sqrt{A}} = \frac{Kc}{1.12} - \sqrt{\left(\frac{Kc}{1.12}\right)^2 - 1}$$

Donde:

L = lado mayor del rectángulo (km)

l = lado menor del rectángulo (km)

Kc = índice de *Gravelius* (adimensional)

A = área de la cuenca (km²)

Para el área de estudio, el rectángulo equivalente tendría un lado mayor de:

$$\frac{L}{\sqrt{3,845.98}} = \frac{2.24}{1.12} + \sqrt{\left(\frac{2.24}{1.12}\right)^2 - 1} = \underline{231.44673 \text{ km}}$$

Y un lado menor de:

$$\frac{l}{\sqrt{3,845.98}} = \frac{2.24}{1.12} - \sqrt{\left(\frac{2.24}{1.12}\right)^2 - 1} = \underline{16.617128 \text{ km}}$$

Cuya multiplicación nos da el área de la cuenca.

6.11. Características de la red de drenaje

Otras características importantes de cualquier cuenca son las trayectorias o el arreglo de los cauces de las corrientes naturales dentro de ella. La razón de su importancia se manifiesta en la eficiencia del sistema de drenaje en el escurrimiento resultante. Por otra parte la forma de drenaje proporciona indicios de las condiciones del suelo y de la superficie de la cuenca.

Se llama red de drenaje, al sistema de cauces por el que fluyen los escurrimientos superficiales, subsuperficiales y subterráneos de manera temporal o permanente.

Las características de una red de drenaje pueden describirse principalmente de acuerdo con el orden de las corrientes, longitud de tributarios, densidad de corriente y densidad de drenaje.

Así, una corriente puede ser efímera, intermitente o perenne. La corriente **efímera** es aquella que sólo lleva agua cuando llueve e inmediatamente después. La **intermitente** lleva agua la mayor parte del tiempo, pero principalmente en época de lluvias; su aporte cesa cuando el nivel freático desciende por debajo del fondo del cauce. La corriente **perenne** contiene agua todo el tiempo, ya que aun en época de sequía es abastecida continuamente, pues el nivel freático siempre permanece por arriba del fondo del cauce.

El Río San Miguel es intermitente, es decir, lleva agua casi siempre, pero especialmente cuando llueve.

6.11.1. Tipos de drenaje

Existen diferentes tipos de drenaje que reflejan los controles e interrelaciones de sus componentes: energía solar, gravedad, clima, litología, topografía, cubierta vegetal y de los suelos, usos del territorio, etc. Todos los tipos de drenaje (Figura 38) se pueden agrupar en los cuatro más comunes: drenaje dendrítico, paralelo, enrejado y rectangular.

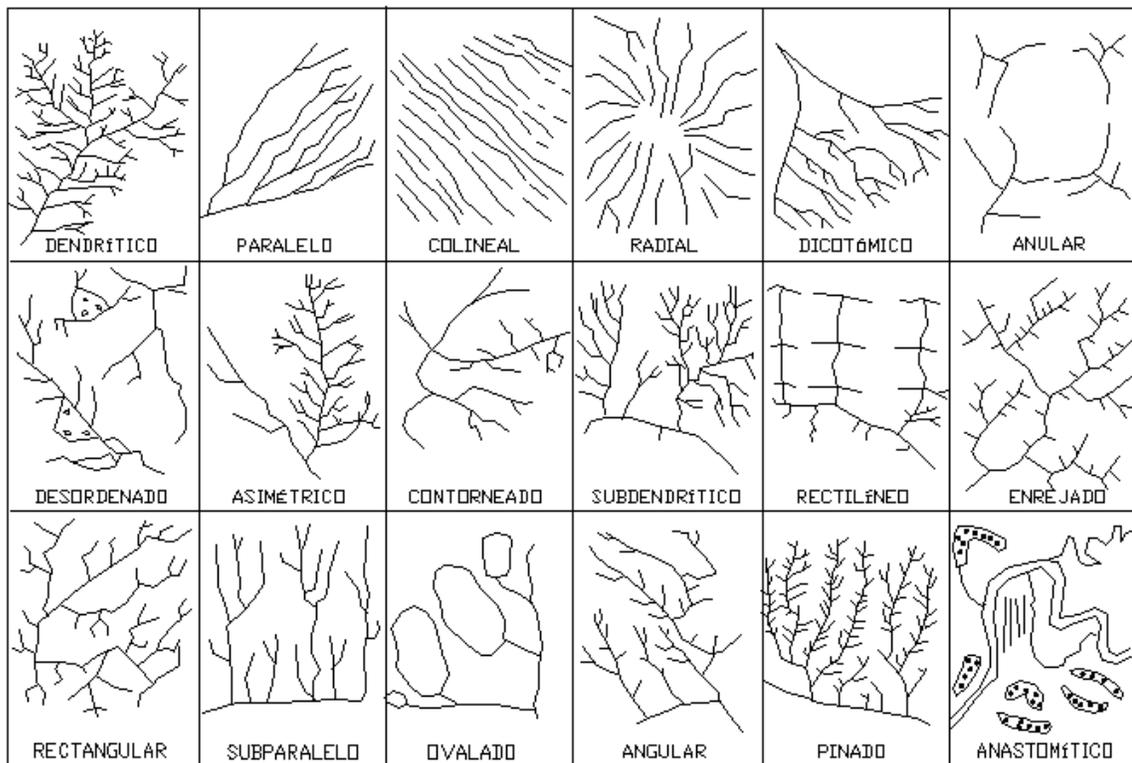


Figura 38. Modelos de drenaje

El drenaje **dendrítico** tiene una ramificación tipo árbol, los arroyos tributarios se unen a la corriente principal con ángulos agudos. Es el más frecuente y se presenta en suelos homogéneos, rocas sedimentarias blandas, tobas volcánicas, antiguas llanuras costeras, etc.

El llamado **paralelo** es típico de zonas homogéneas, con pendientes uniformes y fuertes; las corrientes principales siguen fracturas o fallas y los tributarios se unen formando ángulos generalmente iguales.

El de tipo **enrejado** refleja más la estructura de los afloramientos rocosos que el tipo de roca. Los arroyos tributarios pequeños se juntan en ángulos rectos, e indica rocas sedimentarias plegadas o intercaladas, en las que las corrientes principales siguen las uniones de las capas.

El drenaje **rectangular** se considera una variante del dendrítico; los arroyos secundarios se juntan a la corriente principal en ángulo recto o casi recto, forman rectángulos controlados por fracturas.

En un mapa de ArcView, escala 1:250,000 se resaltaron los drenajes (Figura 39). Comparando este mapa con el de los tipos de drenaje (Figura 38), se puede considerar que la Cuenca del Río San Miguel presenta una combinación de drenaje entre los tipos dendrítico y enrejado.

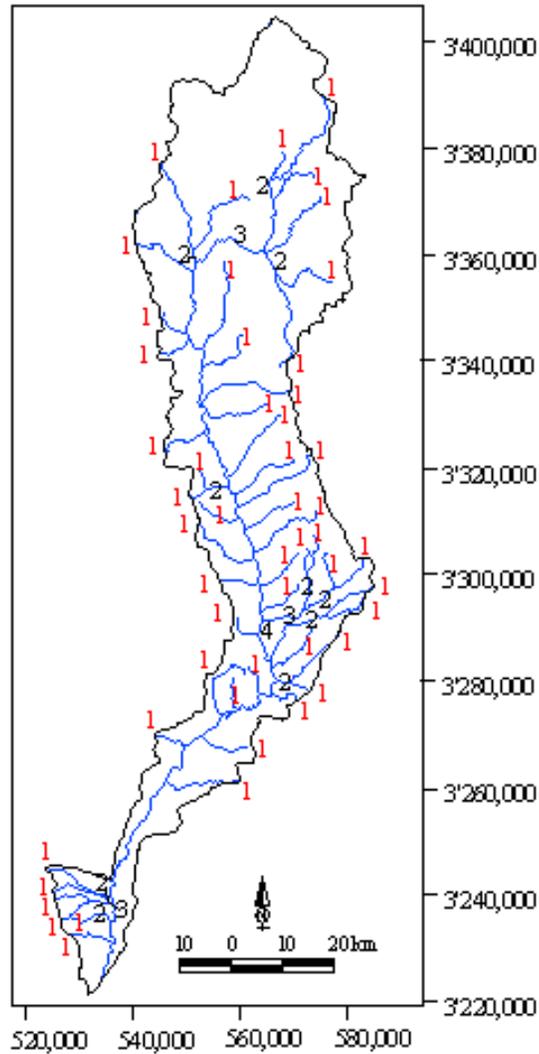


Figura 39. Orden de corrientes de la Cuenca del Río San Miguel

6.11.2. Longitud de tributarios

Lo que nos indica la longitud de los tributarios es la pendiente de la cuenca, así como el grado de drenaje. Las áreas escarpadas y bien drenadas usualmente tienen numerosos tributarios pequeños. La longitud de las corrientes, en general, se mide a lo largo del eje del valle y no se toman en cuenta sus meandros. Además, la longitud que se mide consiste en una serie de segmentos lineales trazados lo más próximo posible a las trayectorias de los cauces de las corrientes.

Con ayuda del programa AutoCAD se midieron todas las longitudes de los tributarios dentro de la Cuenca del Río San Miguel, resultando de 4,138.46 km.

6.11.3. Orden de la cuenca

El esquema de órdenes de corrientes o primer método cuantitativo de análisis de las redes de drenaje, fue desarrollado a principios de la década de los cuarenta por el ingeniero hidráulico e hidrólogo americano Robert Horton. El método consiste en clasificar jerárquicamente las corrientes fluviales: las que constituyen las cabeceras, sin corrientes tributarias, pertenecen al primer orden o categoría; dos corrientes de primer orden que se unen forman una de segundo orden, que discurre hacia abajo hasta encontrar otro cauce de segundo orden para constituir otro de tercera categoría, y así sucesivamente. En resumidas palabras, dos órdenes iguales constituyen el orden inmediato superior.

Para conocer el orden de la Cuenca del Río San Miguel, se elaboró la Tabla 22, donde se contabilizaron todas las corrientes de acuerdo al mapa de la Figura 38, escala 1:250,000. Es necesario anotar, que el orden de una cuenca depende de la escala a la que se trabaja. El orden resultante en la cuenca de estudio fue de 4, con un total de 68 corrientes.

Tabla 22. Mediciones fisiográficas de la cuenca

Orden	No. corrientes
1	54
2	10
3	3
4	1
Total	68

6.11.4. Densidad de corriente

Se expresa como la relación entre el número de corrientes y el área drenada. Para determinar el número de corrientes sólo se consideran las corrientes perennes e intermitentes. La corriente principal se cuenta como una desde su nacimiento hasta su desembocadura. Después se tendrán todos los tributarios de orden inferior, desde su nacimiento hasta la unión con la corriente principal, y así sucesivamente hasta llegar a los tributarios de orden uno.

Esta relación entre el número de corrientes y el área drenada proporciona una medida real de la eficiencia de drenaje, pues puede suceder que se tengan dos cuencas con la misma densidad de corriente y estén drenadas en muy diferente forma, dependiendo de la longitud de sus corrientes. Matemáticamente se expresa como:

$$Dc = \frac{Nc}{A}$$

Donde:

D_c = densidad de corrientes (1/km²)

N_c = número de corrientes dentro de la cuenca

A = área total de la cuenca (km²)

Para conocer la densidad de corriente se necesita el número de corrientes de la cuenca; el cual se puede obtener en base al orden de corrientes (Figura 39).

Sustituyendo los valores de la Tabla 22 en la fórmula y conociendo que el área de la Cuenca del Río San Miguel es de 3,845.98 km², la densidad de corrientes calculada fue de:

$$D_c = \frac{65}{3,845.98 \text{ km}^2} = \underline{0.0169007 / \text{km}^2}$$

6.11.5. Densidad de drenaje

Esta característica proporciona una información más real que la anterior, ya que se expresa como la longitud de las corrientes por unidad de área,

$$D_d = \frac{L}{A}$$

Donde:

D_d = densidad de drenaje (1/km)

L = longitud total de las corrientes perennes e intermitentes (km)

A = área total de la cuenca (km²)

La densidad de drenaje es un indicador de la respuesta de la cuenca ante un aguacero, por la relación entre la infiltración y la escorrentía, y por lo tanto condiciona la forma del hidrograma resultante en el desagüe de la cuenca. A mayor densidad de drenaje, más dominante es el flujo en el cauce frente al flujo en ladera, lo que se traduce en un menor tiempo de respuesta de la cuenca y por tanto, un menor tiempo al pico del hidrograma.

Mediante el programa ArcView se midió la longitud total de las corrientes dentro de la cuenca, que fue de 4,138.46 km; sustituyendo los valores en la fórmula queda:

$$D_d = \frac{4,138.46 \text{ km}}{3,845.98 \text{ km}^2} = \underline{1.059 \text{ km} / \text{km}^2}$$

6.11.6. Longitud del cauce principal

En la Figura 40 se puede ver el cauce principal del área de estudio, el cual se midió con el programa AutoCAD resultando una longitud de 178.06 km.

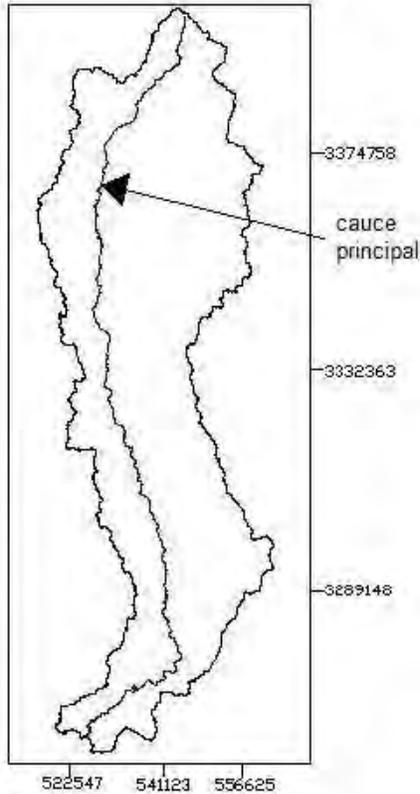


Figura 40. Cauce principal de la Cuenca del Río San Miguel

6.11.7. Pendiente del cauce principal

La pendiente de un tramo de río se considera como el desnivel entre los extremos del tramo dividido, por la longitud horizontal de dicho tramo.

La definición anterior se aproxima más a la pendiente real del cauce conforme disminuye la longitud del tramo por analizar. Una manera más real de valuar la pendiente de un cauce es compensándola, al aceptarla como la pendiente de una línea que se apoya en el extremo final del tramo por estudiar y cuya propiedad es contener la misma área debajo de ella como en su parte superior, respecto al perfil del cauce.

Otra forma de valuar la pendiente, y que trata de ajustarse a la pendiente real, es usando la ecuación que proponen Taylor y Schwarz, la cual se basa en considerar que el río

está formado por una serie de canales con pendiente uniforme, cuyo tiempo de recorrido es igual al del río.

De manera general, la pendiente del cauce principal se puede obtener con la fórmula:

$$S = \frac{H}{L}$$

Donde:

S = pendiente del cauce (adimensional)

H = desnivel entre los extremos del cauce (m)

L = longitud horizontal del cauce (m)

En el área de estudio se tienen curvas de nivel que van de los 400 a los 2,300 msnm, por lo que el desnivel entre los extremos del cauce resulta de 1,900 m. La longitud del cauce principal fue de 178.60 km equivalente a 178,600 m. Sustituyendo ambos valores en la fórmula de la pendiente queda:

$$S = \frac{1,900 \text{ m}}{178,600 \text{ m}} = 0.0106382 = \underline{1.06 \%}$$

D'hombres *et al.* (2007) elaboraron el perfil hidráulico del Río San Miguel con base en el mapa topográfico escala 1:50,000 (Figura 41), encontrando 3 pendientes: la primera y más fuerte, es la del trayecto desde donde nace el río en la Sierra de Cucurpe; este trayecto de aproximadamente 10 km, tiene un coeficiente de escurrimiento del 10 al 20% y se encuentra en un estado de juventud transitoria. En el siguiente trayecto, la pendiente disminuye a moderada en los siguientes 180 km y con ella baja el coeficiente de escurrimiento. Finalmente, los últimos 10 km hasta su confluencia con el Río Sonora, la pendiente disminuye. A partir del poblado de Cucurpe el cauce del río cambia su estado a estable. En general, encontraron que el Río San Miguel presenta una pendiente promedio de 0.64%, parecida a la que calculamos en este trabajo.

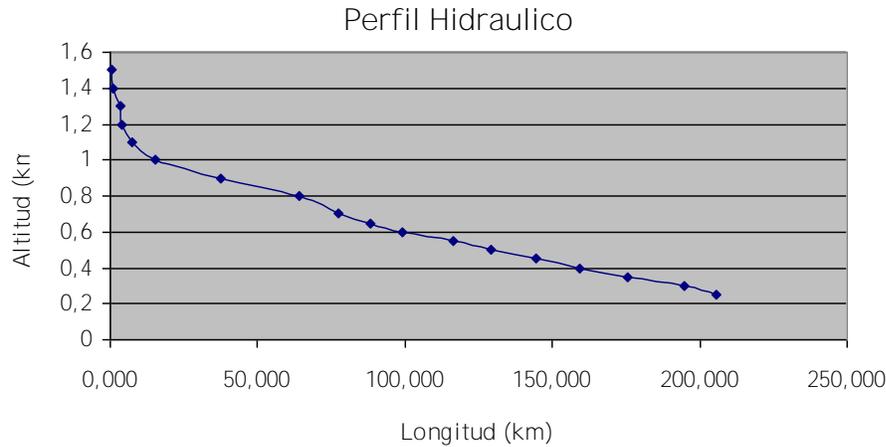


Figura 41. Perfil hidráulico del Río San Miguel (D'hombres *et al.*, 2007)

6.12. Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI)

Es típico que la vegetación refleje la dinámica estacional y anual. La cobertura temporal y global de los sensores del satélite TERRA, hace posible monitorear la vegetación, a diferentes resoluciones espaciales y temporales. El sensor MODIS colecta datos del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI en inglés), los cuales han sido ampliamente usados en estudios de dinámica de la vegetación en la Tierra (Zhang y Chen, 2009).

El NDVI es la relación entre los términos (NIR - Rojo) y (NIR + Rojo), donde NIR es la respuesta espectral en la banda infrarroja cercana (0.73-1.1 μm), y Rojo es la respuesta espectral de la banda roja (0.55-0.68 μm). El NDVI ha mostrado ser sensible a los cambios de las condiciones de vegetación debido a que es directamente influenciado por la absorción de la clorofila por la radiación solar (Szilagyi *et al.*, 1998).

La Cuenca del Río San Miguel es importante para dotar de agua a una población de más de 10,000 habitantes y para desarrollar la agricultura a mediana escala. Asimismo, es importante porque se encuentra en la zona de transición entre las Provincias Hidrogeológicas Planicie Costera del Pacífico y la Sierra Madre Occidental. Por ello, instituciones nacionales, como la Universidad de Sonora, e internacionales como el Tecnológico de Nuevo México, la Administración Nacional de Océanos y Atmósfera y la Universidad de Arizona se han preocupado por instrumentar la cuenca.

El estudio del NDVI cobra importancia porque con esta información se pueden correlacionar la vegetación por un lado, con factores meteorológicos, como el escurrimiento, por el otro.

Para conocer los valores de NDVI se obtuvieron por medio del AutoCAD, las coordenadas de los centroides de cada microcuenca. Cada longitud y latitud se introdujeron en las casillas correspondientes de la página web: MODIS Lands Subsets (http://daac.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GLBVIZ_1_Glb/modis_subset_order_global_col5.pl), con lo que se obtuvo un valor de NDVI para cada microcuenca. Un ejemplo de asignación de valores de NDVI a una microcuenca del Río San Miguel se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Valores de NDVI de una microcuenca (C1) del Río San Miguel

Fecha	NDVI
May, 2004	0.19
Jun, 2004	0.21
Jun, 2004	0.21
Jul, 2004	0.32
Jul, 2004	0.38
Ago, 2004	0.30
Ago, 2004	0.36
Sep, 2004	0.36
Sep, 2004	0.32
Oct, 2004	0.27
Oct, 2004	0.27
Nov, 2004	0.28
Dic, 2004	0.29
Dic, 2004	0.27
Ene, 2005	0.29
Ene, 2005	0.32

Para cada microcuenca se elaboró una gráfica de tiempo contra NDVI y contra gasto (Figura 42). Todas las gráficas se encuentran en el Anexo I.

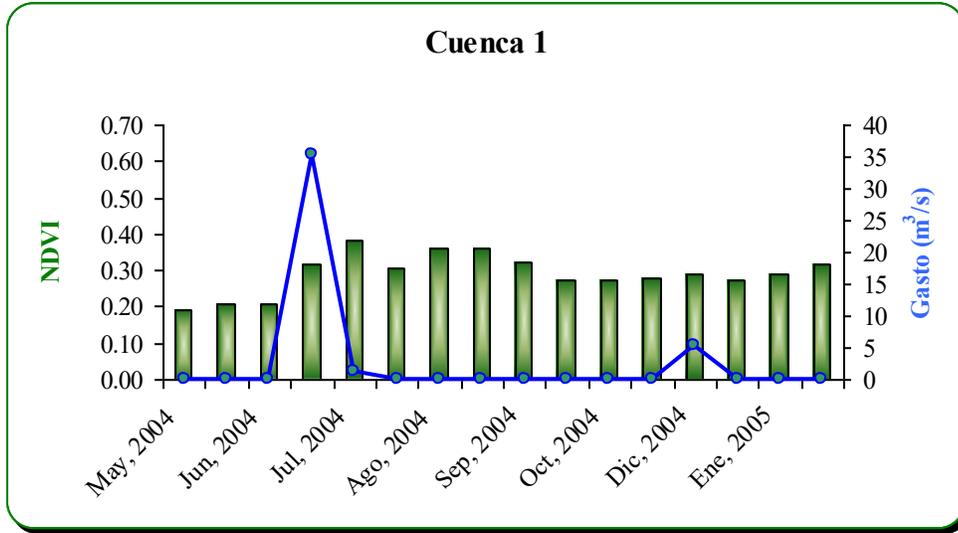


Figura 42. Gráfica de tiempo contra NDVI y gasto de una cuenca en estudio

Asimismo, se elaboraron gráficas de tiempo contra precipitación y contra NDVI. Dichas gráficas se encuentran en el anexo II.

VII. EL MODELO HEC-HMS

7.1. Generalidades

El modelo HEC-HMS (“Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System”) fue diseñado para simular procesos de lluvia-escurrimiento en sistemas dendríticos de cuencas. Se usa en estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronósticos de flujo, futuras urbanizaciones, reducción del daño por inundaciones, etc.

Es un programa gratuito, de dominio público y fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. Surge como evolución del programa HEC-1 pero incluye muchas mejoras, como una interfase gráfica que facilita al usuario las labores de pre y post-proceso y la posibilidad de conectarse a un sistema de información geográfica (ArcGIS).

El HEC-HMS se usa para simular la respuesta hidrológica de una cuenca. Incluye los modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. El programa crea una corrida de simulación, combinando los modelos y las especificaciones. Puede hacer corridas de precipitación o de la proporción de flujo, tiene la capacidad de salvar toda la información de estado de la cuenca en un punto de tiempo, y la habilidad de comenzar una nueva corrida de simulación, basada en la información de estado previamente guardada.

Los resultados de la simulación se pueden ver en el mapa de la cuenca. Se generan tablas sumarias globales y de elemento, que incluyen la información sobre el flujo máximo y el volumen total. También están disponibles, una tabla de serie de tiempo, el gráfico por elementos, los resultados de múltiples elementos y corridas de simulación. Finalmente, el programa HEC-HMS tiene la capacidad de imprimir todos los gráficos y tablas (http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/features.html#Hydrologic_Simulation).

El modelo contiene:

- a) Descripción física de la cuenca
- b) Descripción meteorológica
- c) Simulación hidrológica
- d) Estimación de parámetros
- e) Análisis de simulaciones
- f) Conexión con SIG

El lapso de tiempo de una simulación es controlado por las especificaciones de control que incluyen: la fecha y hora de inicio, de terminación y un intervalo de tiempo.

Las fases de trabajo del programa son:

- a) Separación de la lluvia neta, es decir, se calcula qué parte de la precipitación va a producir escurrimiento directo.
- b) Cálculo del escurrimiento directo producido por esa lluvia neta.
- c) Suma del escurrimiento directo y el base, si existía previamente. Cálculo de la evolución del escurrimiento base a lo largo del tiempo.
- d) Cálculo de la evolución del hidrograma a medida que discurre a lo largo del cauce.

El HEC-HMS permite establecer varias subcuencas, en las cuales realiza los cálculos de las 3 primeras fases mencionadas. Luego, suma todos los caudales generados y transitados a lo largo del recorrido, y proporciona el hidrograma de salida de la cuenca.

7.2. Componentes

7.2.1. Modelo de cuenca

El modelo de cuenca representa la cuenca física, el usuario lo desarrolla agregando y conectando elementos hidrológicos. Para definir la estructura de las cuencas, el programa considera los siguientes elementos:

- a) Subcuencas (subbasins)
- b) Tramos de tránsito (routing reach)
- c) Uniones (junctions)
- d) Embalses (reservoirs)
- e) Fuentes (Sources)
- f) Sumideros (sinks)
- g) Derivaciones (diversions)

En los modelos de cuenca, se informa al programa de las distintas subcuencas y sus características, como el área, el método que se usará para la obtención del hidrograma, número de curva y el tiempo de retraso o “lag time” (Figura 43).

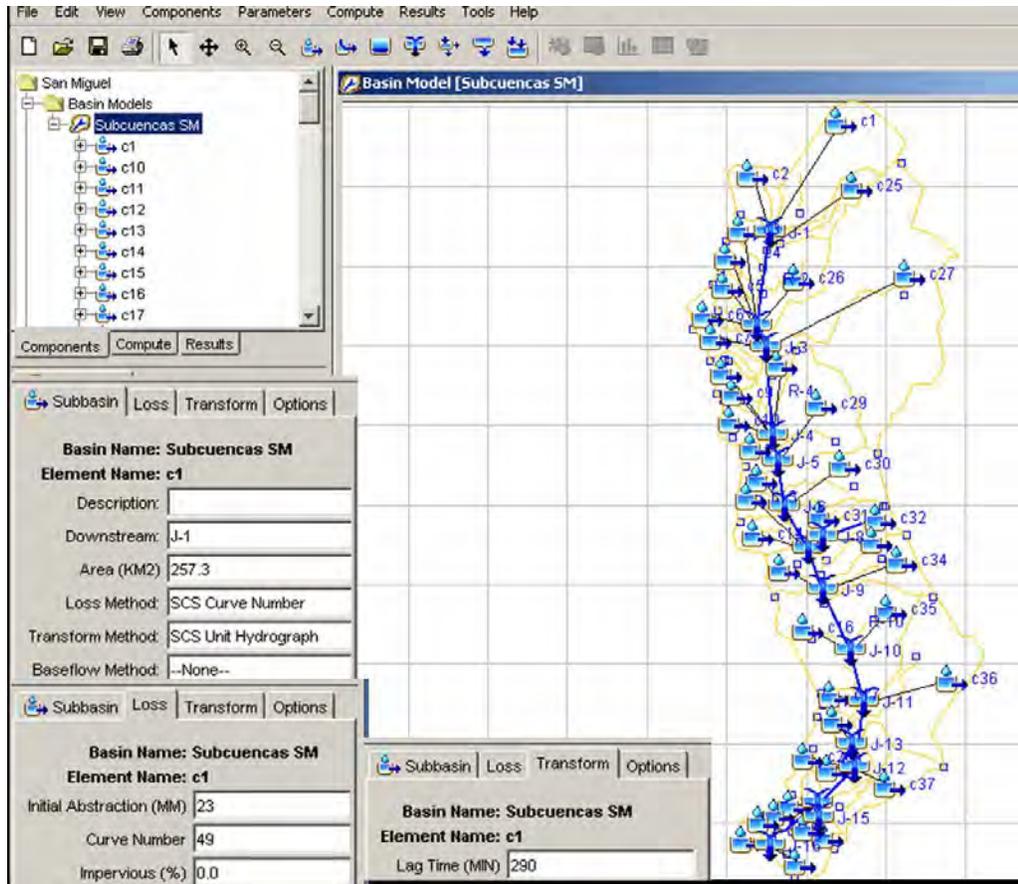


Figura 43. Modelos de cuenca (“Basin models”)

7.2.2. Modelo meteorológico

El modelo meteorológico calcula la entrada de precipitación requerida por un elemento subcuenca. El programa puede usar datos de lluvia puntual o en malla y puede modelar lluvia congelada o líquida junto con evapotranspiración. Incluye varios métodos de precipitación (tormenta frecuente, medidores de lluvia, precipitación en malla, distancia inversa y otros).

Dentro del modelo meteorológico introducimos los datos de los pluviógrafos que se van a utilizar y los asignamos a cada subcuenca (Figura 44).

Subbasin ...	Gage	Total Dept...
c1	pluv 143	
c10	pluv 144	
c11	pluv 130	
c12	pluv 130	
c13	pluv 130	
c14	pluv 131	
c15	pluv 131	
c16	pluv 133	
c17	pluv 147	
c18	pluv 147	
c19	pluv 147	
c2	pluv 143	
c20	pluv 147	
c21	pluv 147	
c22	pluv 147	
c23	pluv 147	
c24	pluv 147	
c25	pluv 148	

Figura 44. Modelo meteorológico con las subcuencas y su pluviógrafos

7.2.3. Especificaciones de control

En las especificaciones de control se fija el lapso de tiempo de una corrida de simulación. Se establece la fecha y hora de inicio de la lluvia y el término de la misma con un intervalo de tiempo que puede variar según nuestra conveniencia (Figura 45).

Control Specifications	
Name: Control 1	
Description:	
Start Date (ddMMMYYYY)	22jun2004
Start Time (HH:mm)	10:00
End Date (ddMMMYYYY)	23jun2004
End Time (HH:mm)	06:00
Time Interval:	1 Hour

Figura 45. Especificaciones de control del HEC-HMS

7.2.4. Datos de entrada

La información que necesita el programa está relacionada directamente con los métodos de cálculo que maneja. Existen cinco grupos básicos de información que deben suministrarse a HEC-HMS para efectuar las simulaciones:

1. Precipitación histórica o de diseño.
2. Características del suelo.
3. Información morfométrica de las subcuencas.
4. Datos hidrológicos del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.
5. Características hidráulicas de los tramos de canal y de la capacidad de los embalses (métodos de tránsito).

Para la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo, además de la información anterior se necesitan:

1. Registros concordantes de precipitación y caudales de salida (hietogramas e hidrogramas).
2. Determinación de las condiciones iniciales de humedad en los suelos (difícil de lograr).

(http://ingenieria.udea.edu.co/~jecanon/hojadevidajecb_archivos/HTML/taller%20HEC-HMS/informaci%F3n.htm)

Para alimentar los datos de precipitación, se introduce el tiempo y la lluvia registrada por cada pluviógrafo localizado en las estaciones climatológicas ya mencionadas (Figura 46).

Time (ddMMYYYY...)	Precipitation (MM i...)
21jul2004, 06:00	
21jul2004, 07:00	0.000
21jul2004, 08:00	0.000
21jul2004, 09:00	0.000
21jul2004, 10:00	0.000
21jul2004, 11:00	0.000
21jul2004, 12:00	0.000
21jul2004, 13:00	0.000
21jul2004, 14:00	0.000
21jul2004, 15:00	0.000
21jul2004, 16:00	0.000
21jul2004, 17:00	0.000
21jul2004, 18:00	10.160
21jul2004, 19:00	0.000
21jul2004, 20:00	0.000
21jul2004, 21:00	0.000
21jul2004, 22:00	0.000
21jul2004, 23:00	0.000

Figura 46. Datos de tiempo contra lluvia

VIII. RESULTADOS

De acuerdo a la metodología propuesta para el presente trabajo, se realizaron los pasos siguientes para modelar hidrológicamente la Cuenca del Río San Miguel con el programa HEC-HMS:

1. Elaboración con ayuda de IDRISI de mapas de elevación digital del terreno.

Utilizando el programa IDRISI, se elaboró el modelo digital de elevación (MDE), con base en las características topográficas de la cuenca tomadas de mapas topográficos del INEGI escala 1:50,000 (Figura 47).

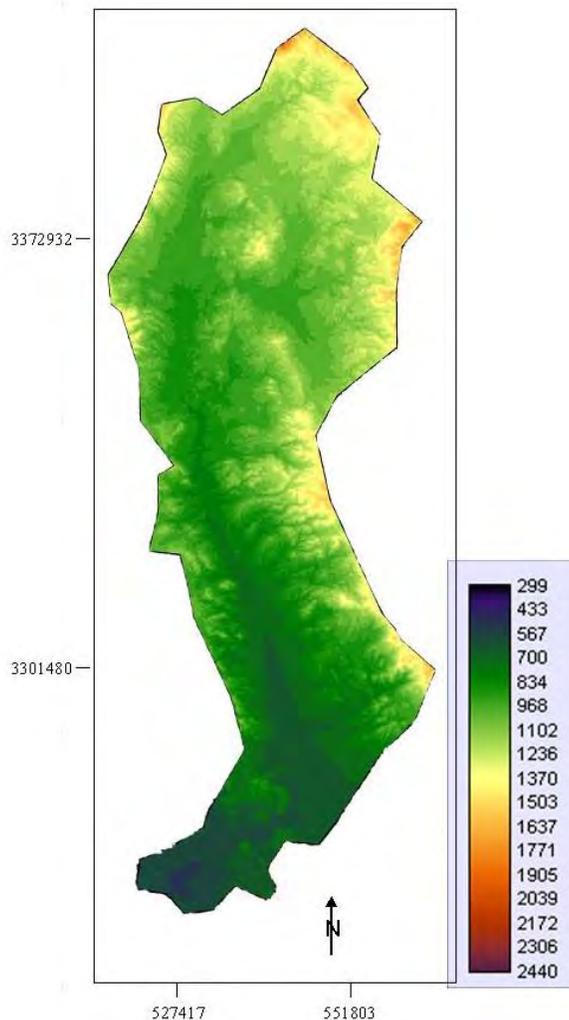


Figura 47. Modelo digital de elevación (MDE) de la cuenca

2. Con IDRISI dividir la cuenca en microcuencas con base en la topografía e hidrología, y elaborar mapas de uso del terreno (vegetación), tipos de suelo y combinados. Asignar un Número de Curva a cada microcuenca, con base en el

método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USSCS).

Con ayuda del programa IDRISI se dividió la cuenca en microcuencas, con base en las características topográficas e hidrológicas (cauces de los arroyos), resultando 40 microcuencas las cuales fueron denominadas como: c1, c2,...c40 (Figura 48).

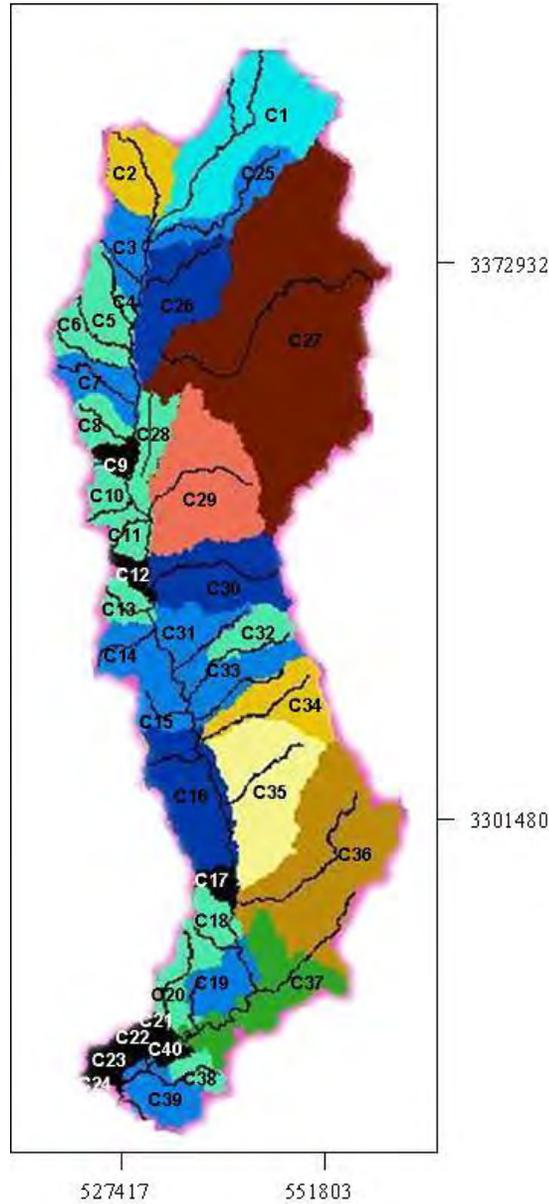


Figura 48. Microcuencas obtenidas con el programa IDRISI

A cada microcuenca se le asignó un valor de “N” (escurrimiento directo o lluvia en exceso), en base a datos de: uso del terreno, tratamiento o práctica, condición hidrológica y tipos de suelo.

Para conocer el uso del terreno se consultaron las cartas de vegetación del INEGI (Figura 49), cuyas especies vegetales se correlacionaron con las propuestas por el USSCS para el Método del Número de Curva (Tabla 3) quedando como:

INEGI (1981)	USSCS (SARH, 1982; Maidment, 1993)
Bosque	Bosque (regular)
Agricultura de riego	Cultivos en surco (regular)
Pradera natural	Pradera natural y pastizal (regular)
Matorral	Bosque (pobre)

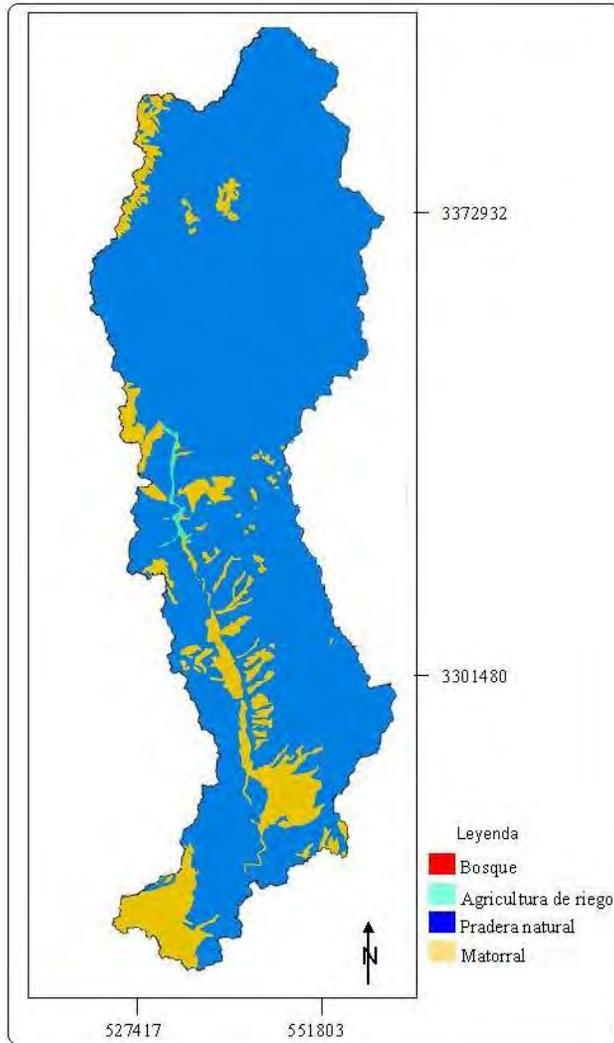


Figura 49. Tipos de vegetación (INEGI, 1981)

Nota: el bosque no se alcanzan a ver en esta escala.

El tratamiento o práctica y la condición hidrológica fueron variables.

En lo que respecta a los tipos de suelo a partir de los cuales se obtiene “N”, pueden ser 4 de acuerdo a la velocidad con que se infiltra el agua: A (alta), B (moderada), C (baja) y D (muy baja).

Los tipos de suelo de la Cuenca del Río San Miguel fueron obtenidos con el programa IDRISI con base en las Cartas Edafológicas del INEGI (escala 1:250,000), siendo de manera resumida los siguientes (Figura 50):

- a) Suelos de textura gruesa, generalmente muy delgados con velocidades de infiltración altas (tipo A). Son escasos y pequeños por lo que no alcanzan a verse en el mapa.
- b) Suelos de textura media, profundos, poseen velocidades moderadas de infiltración (tipo B).

- c) Suelos de textura fina, delgados, limitados por roca, tienen muy bajas velocidades de infiltración (tipo C).
- d) Suelos de textura muy fina, con velocidades muy bajas, casi nulas de infiltración (tipo D).

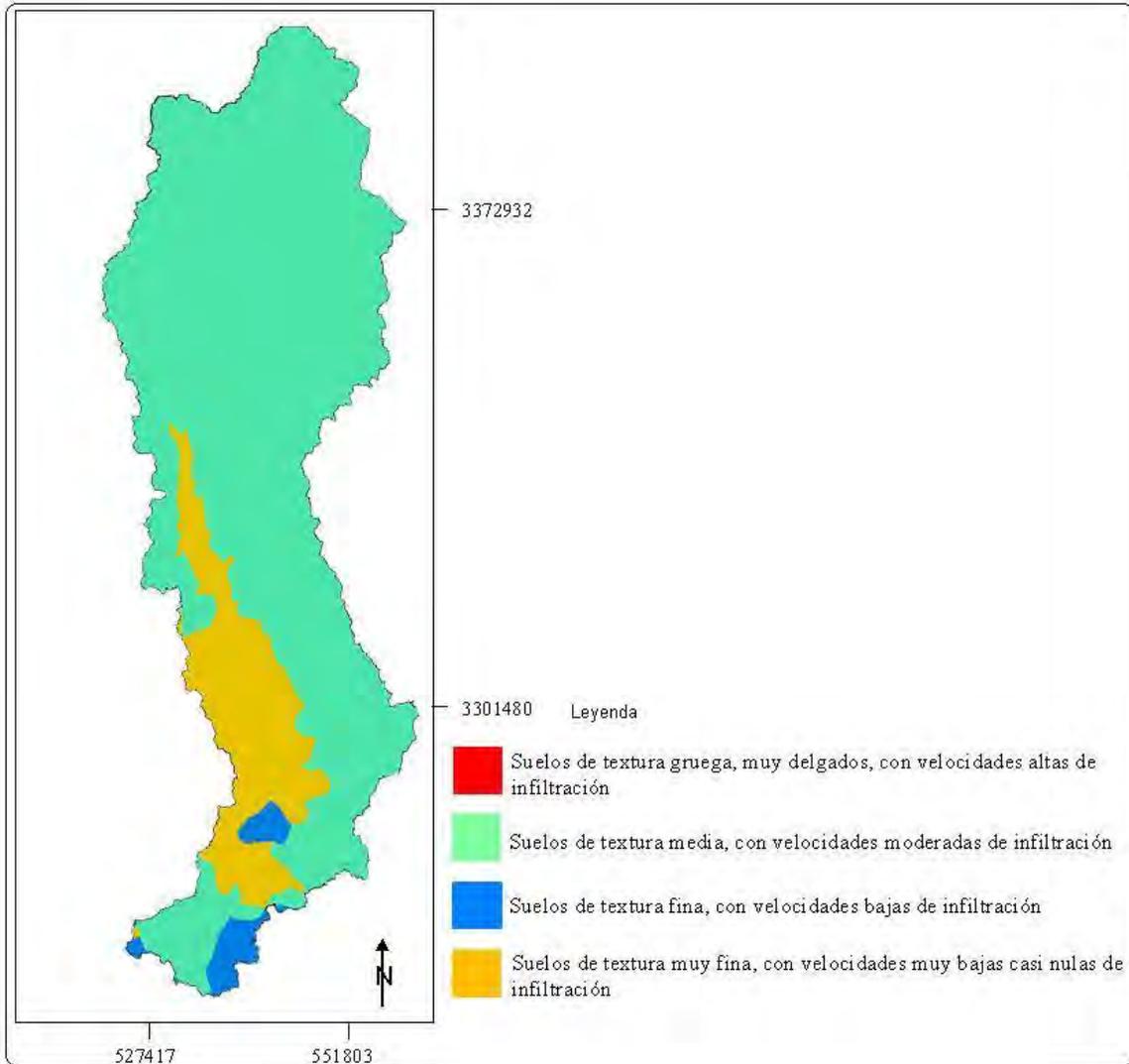


Figura 50. Tipos de suelo de la Cuenca del Río San Miguel (INEGI, 1981).

Nota: los suelos de textura gruesa no se alcanzan a ver en esta escala.

Una vez obtenidos con IDRISI los mapas de tipo de vegetación y de suelo, se elaboró un mapa combinado (Figura 51).

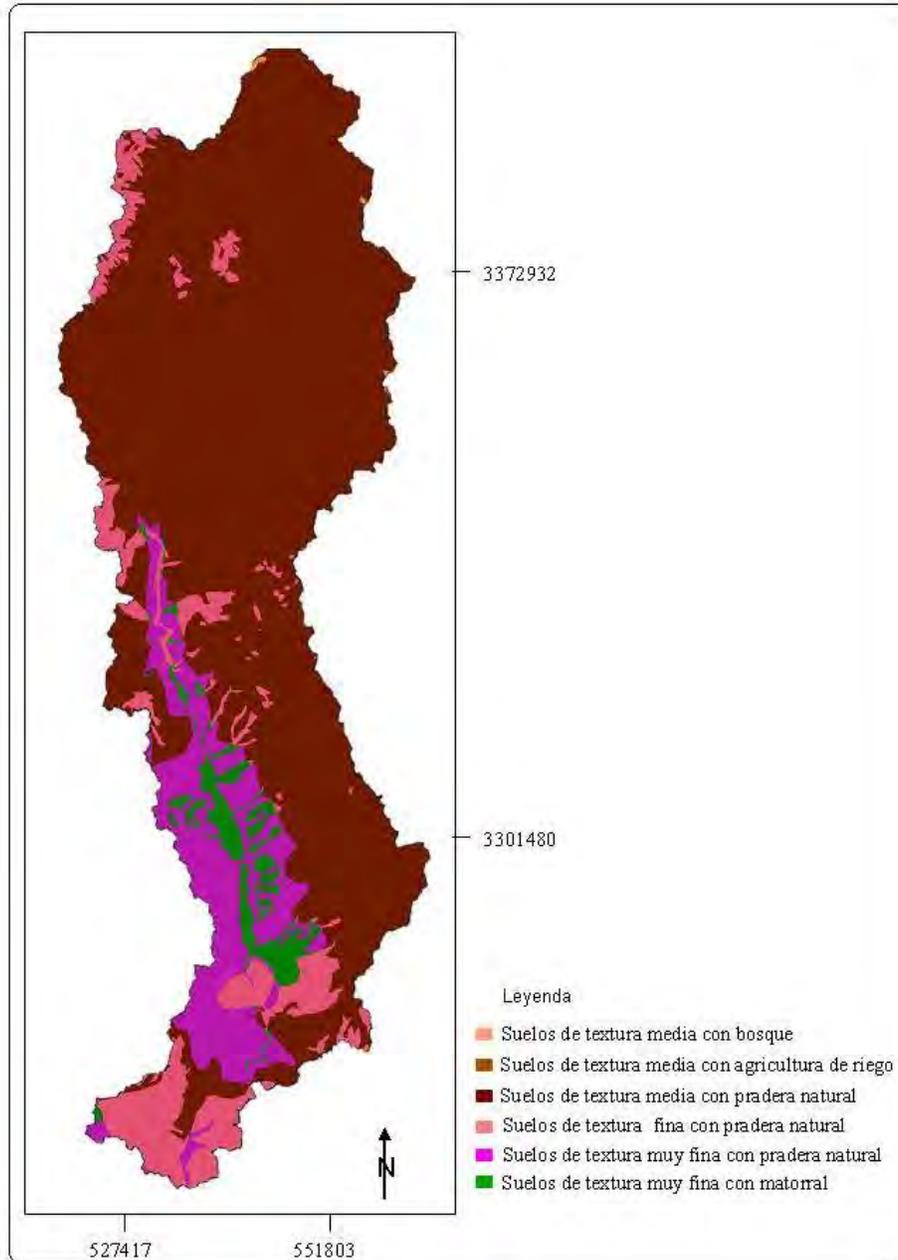


Figura 51. Mapa que combina los tipos de suelos y vegetación de la cuenca

3. Para asignar el número de curva se consideraron 2 condiciones para la zona de estudio: húmeda y seca.

Como se mencionó anteriormente, a cada microcuenca obtenida con el programa IDRISI se le asignó un valor de acuerdo al Método del Número de Curva (Figura 52). Los números de curva asignados a las microcuencas se tomaron de la Tabla 3, los cuales representan condiciones de humedad media del suelo (entre seca y húmeda); con estos valores

Tabla 24. Obtención de los números de curva y tiempo de concentración de las microcuencas

Cuenca	Área (km ²)	N para condición II (media)	N para condición I (seca)	Longitud del cauce principal (m)	Pendiente (m/m)	Tiempo de concentración (H)	Tiempo de retraso (min)
c1	257.30	69	49	11,671.00	2.027400	8.046298	482.78
c2	92.00	68	48	19,496.00	0.652900	18.477222	1,108.63
c3	63.50	68	48	8,656.00	0.682800	9.719096	583.15
c4	43.70	68	48	13,542.00	0.404200	16.786138	1,007.17
c5	35.30	69	49	13,653.00	0.550700	14.995741	899.74
c6	33.30	69	49	11,613.00	0.415400	14.756801	885.41
c7	63.00	69	49	16,317.00	0.460600	18.426715	1,105.60
c8	41.00	69	49	11,794.00	0.303300	16.855933	1,011.36
c9	23.10	69	49	6,494.00	0.307600	10.588985	635.34
c10	39.40	68	48	9,531.00	0.345500	13.605945	816.36
c11	34.15	73	54	10,177.00	0.272000	15.691079	941.46
c12	19.80	74	55	6,387.00	0.272100	10.959803	657.59
c13	33.47	71	52	8,774.00	0.265400	14.130415	847.82
c14	65.24	72	53	13,888.00	0.489900	15.894095	953.65
c15	57.40	77	59	9,649.00	0.437600	12.540972	752.46
c16	159.42	84	68	10,201.00	0.684800	11.016851	661.01
c17	23.20	84	68	6,551.00	0.158900	13.747343	824.84
c18	33.40	82	66	9,032.00	0.180700	16.754032	1,005.24
c19	66.20	82	66	9,043.00	0.301000	13.778665	826.72
c20	55.50	78	60	21,177.00	0.461000	22.515695	1,350.94
c21	20.60	66	46	6,270.00	0.187500	12.470536	748.23
c22	7.50	67	47	5,687.00	0.114700	13.977283	838.64
c23	20.10	68	48	5,809.00	0.137600	13.245994	794.76
c24	11.50	71	52	6,567.00	0.110600	15.835124	950.11
c25	78.00	69	49	35,256.00	0.992100	24.819338	1,489.16
c26	141.00	69	49	19,004.00	0.953000	15.662263	939.74
c27	822.00	69	49	49,986.00	4.000500	18.984268	1,139.06
c28	52.60	69	49	11,026.00	0.592200	12.369613	742.18
c29	233.60	69	49	21,228.00	1.141100	15.912740	954.76
c30	150.80	69	49	24,559.00	1.068600	18.258411	1,095.50
c31	62.70	74	55	16,029.00	0.736700	15.169304	910.16
c32	51.40	69	49	20,970.00	0.680600	19.233663	1,154.02
c33	75.80	70	51	16,629.00	0.934000	14.242229	854.53
c34	96.90	71	52	20,988.00	1.039800	16.348828	980.93
c35	207.50	76	58	16,735.00	1.287600	12.647967	758.88
c36	322.00	70	51	31,956.00	1.782000	18.365404	1,101.92
c37	148.20	71	52	22,232.00	0.805500	18.855274	1,131.32
c38	26.20	78	60	13,063.00	0.197900	21.493940	1,289.64
c39	66.60	67	47	6,167.00	0.316400	10.066083	603.96
c40	11.60	68	60	3,374.00	0.127900	8.966463	537.99
Total	3,845.98						

Como los números de curva para condición húmeda salieron muy grandes, se optó por hacer las corridas con los números de curva para condición seca.

4. Con el método de los Polígonos de Thiessen se distribuyeron los datos de lluvia del año 2004, registrados en pluviógrafos de la Universidad de Sonora (Unison).

Con base en las 15 estaciones climatológicas automáticas de la Unison se construyeron los Polígonos de Thiessen para la Cuenca del Río San Miguel (Figura 53), con el fin de obtener la precipitación media anual de cada microcuenca.

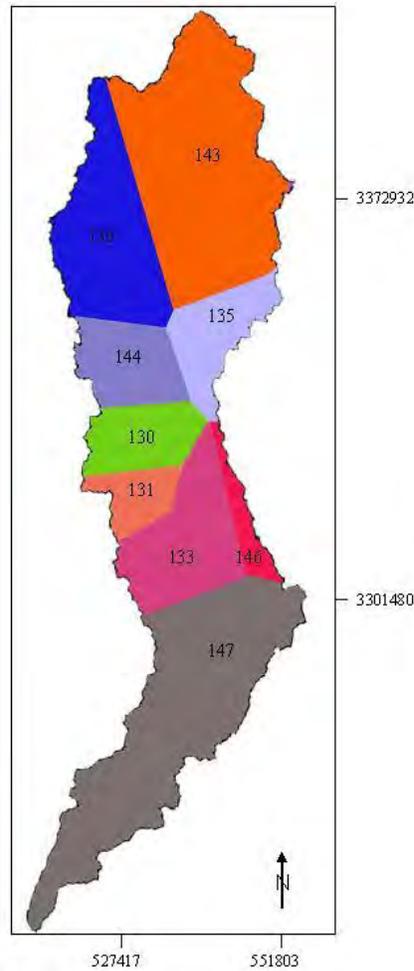


Figura 53. Polígonos de Thiessen en la Cuenca del Río San Miguel

5. Se obtuvieron datos de precipitación, área, número de curva y tiempo de concentración, los cuales se introdujeron al modelo HEC-HMS para el análisis del escurrimiento.

Con el programa IDRISI se obtuvieron datos de las microcuencas, como el área, longitud del cauce principal y elevación de las curvas de nivel con las que se calculó la pendiente.

Con la Ecuación de Kirpich se obtuvo el tiempo de concentración o retraso en horas y minutos (Tabla 24). La Ecuación de Kirpich (1940) fue desarrollada para pequeñas cuencas agrícolas, examinando el tiempo requerido por un arroyo para ir del mínimo al máximo estado

durante una tormenta. A ese tiempo requerido se le llamó tiempo de concentración o retraso. En la bibliografía existen numerosas ecuaciones de Kirpich; la usada en este trabajo fue la siguiente:

$$tc = \frac{0.0078 (L^{0.77})}{S^{0.385}}$$

Donde:

tc = tiempo de concentración o retraso (H)

L = longitud del cauce principal (m)

S = pendiente promedio (m/m)

6. Para mejorar la eficiencia de los resultados, se optó por agrupar los datos de precipitación en intervalos de ≤ 15 días.

Los datos registrados por los pluviómetros se agruparon en intervalos menores a 15 días, ya que este rango es el utilizado por el programa HEC-HMS. En la Tabla 25 se muestra la lluvia registrada por el pluviógrafo 147, durante las 24 horas del día 15 de Junio de 2004.

Tabla 25. Precipitación registrada en un día

Pluviógrafo	Año	Fecha	Día	Hora	Lluvia (mm)
147	2004	15/06/2004	167	1	0
147	2004	15/06/2004	167	2	0
147	2004	15/06/2004	167	3	0
147	2004	15/06/2004	167	4	0
147	2004	15/06/2004	167	5	0
147	2004	15/06/2004	167	6	0
147	2004	15/06/2004	167	7	0
147	2004	15/06/2004	167	8	0
147	2004	15/06/2004	167	9	0
147	2004	15/06/2004	167	10	0
147	2004	15/06/2004	167	11	0
147	2004	15/06/2004	167	12	0
147	2004	15/06/2004	167	13	0
147	2004	15/06/2004	167	14	0
147	2004	15/06/2004	167	15	0
147	2004	15/06/2004	167	16	0
147	2004	15/06/2004	167	17	0
147	2004	15/06/2004	167	18	0
147	2004	15/06/2004	167	19	0

Pluviógrafo	Año	Fecha	Día	Hora	Lluvia (mm)
147	2004	15/06/2004	167	20	0
147	2004	15/06/2004	167	21	0
147	2004	15/06/2004	167	22	0
147	2004	15/06/2004	167	23	0
147	2004	15/06/2004	167	24	0

Una vez agrupados los datos, se graficaron en Excel (Figura 54). Todos los resultados se muestran en el Anexo II.

c1	Pp (mm)
May, 2004	0.00
Jun, 2004	0.00
Jun, 2004	15.75
Jul, 2004	69.09
Jul, 2004	34.29
Ago, 2004	22.86
Ago, 2004	6.86
Sep, 2004	18.29
Sep, 2004	0.00
Oct, 2004	0.00
Oct, 2004	1.27
Nov, 2004	5.84
Dic, 2004	40.39
Dic, 2004	8.64
Ene, 2005	0.00
Ene, 2005	0.00

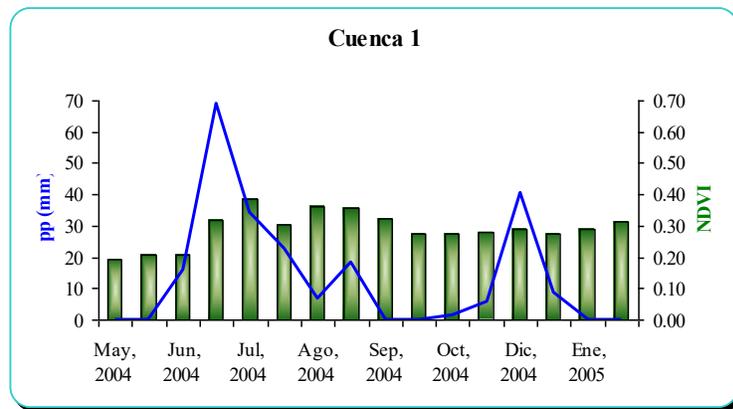
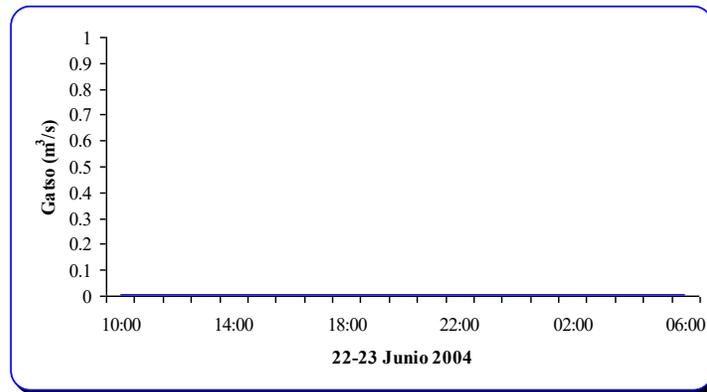


Figura 54. Precipitación registrada en un año

7. Se modeló el comportamiento hidrológico de la Cuenca del Río San Miguel durante el año 2004, para simular el escurrimiento y la capacidad de aportación de agua de las distintas microcuencas.

Se hicieron corridas de acuerdo a las fechas de precipitación previamente agrupadas en rangos de ≤ 15 días. Se muestran algunos ejemplos de las corridas resultantes de aplicar el modelo (Figura 55). Todas las corridas se muestran en el Anexo III.

Escurrecimiento para la corrida 1



Escurrecimiento para la corrida 2

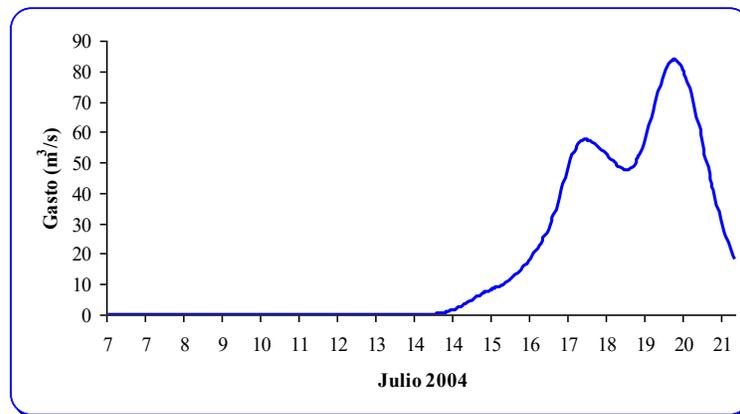


Figura 55. Ejemplo de los hidrogramas generados por el modelo HEC-HMS

8. Se compararon los datos calculados por el programa HEC-HMS con los datos medidos por la CONAGUA en la Estación El Cajón durante el año 2004.

La estación hidrométrica El Cajón es administrada por la Comisión Nacional del Agua, dependencia que proporcionó los datos para el presente trabajo.

Dichos datos de escurrimiento se compararon con los resultados que dio el modelo HEC-HMS. Un ejemplo de la comparación se observa en la Tabla 26.

Tabla 26. Comparación entre los datos del Cajón y el modelo HEC-HMS

Fecha El Cajón	Gasto El Cajón (m ³ /s)	Fecha	Tiempo (hora)	Entrada a c24 (m ³ /s)	Entrada de c39 (m ³ /s)	Entrada de c19 (m ³ /s)	Salida (m ³ /s)	Precipitación media (mm)	Aciertos El Cajón-HEC-HMS
22/06/04		22-jun-04	10:00	0	0	0	0	114.808	sí
		22-jun-04	11:00	0	0	0	0	0.531518	sí
		22-jun-04	12:00	0	0	0	0		sí
		22-jun-04	13:00	0	0	0	0		sí
		22-jun-04	14:00	0	0	0	0		sí
		22-jun-04	15:00	0	0	0	0		sí
		22-jun-04	16:00	0	0	0	0		sí
		22-jun-04	17:00	0	0	0	0		sí
		22-jun-04	18:00	0	0	0	0		sí
		22-jun-04	19:00	0	0	0	0		sí
		22-jun-04	20:00	0	0	0	0		sí
		22-jun-04	21:00	0	0	0	0		sí
		22-jun-04	22:00	0	0	0	0		sí
		22-jun-04	23:00	0	0	0	0		sí
23/06/2004	0.179	23-jun-04	00:00	0	0	0	0	0.508	sí
		23-jun-04	01:00	0	0	0	0	0.002351	sí
		23-jun-04	02:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	03:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	04:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	05:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	06:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	07:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	08:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	09:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	10:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	11:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	12:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	13:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	14:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	15:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	16:00	0	0	0	0		sí
		23-jun-04	17:00	0	0	0	0		sí
24/06/2004	0.165	24-jun-04							no
25/06/2004	0.169	25-jun-04							no

9. Se estudió el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI en inglés) para calibrar el modelo. Se hicieron gráficas del tiempo contra el NDVI y contra el gasto de la cuenca.

Como se dijo previamente, las coordenadas de los centroides de cada microcuenca se conocieron con AutoCAD y se introdujeron en las casillas correspondientes de la página web MODIS. En dicha página se obtuvo un valor de NDVI para cada microcuenca, los cuales se graficaron (Anexo I).

10. Se estableció la relación entre el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) la vegetación y la precipitación.

Para poder ver dicha relación se creó un mapa de vegetación con las divisiones de cada una de las microcuencas obtenidas, mostrando algunas de las gráficas del anexo II (Figura 56).

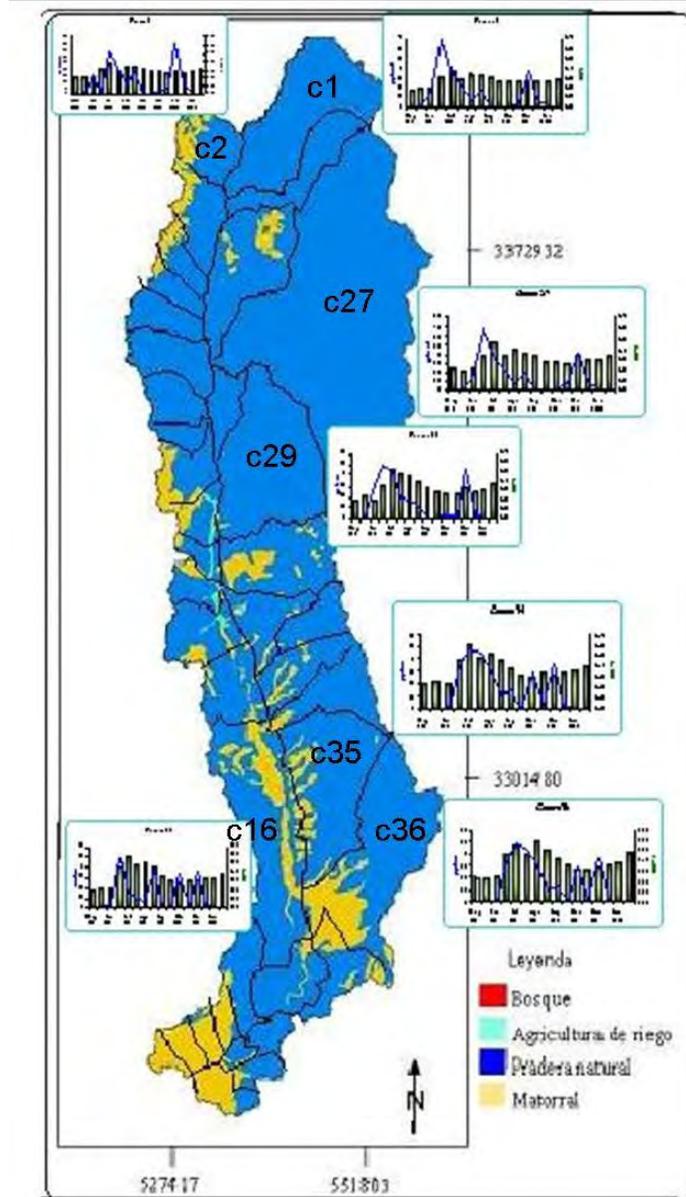


Figura 56. Tipo de vegetación para cada una de las subcuencas del Río San Miguel

11. Se elaboraron las conclusiones y recomendaciones.

Las cuales se muestran en el capítulo siguiente.

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones

Se dividió la Cuenca del Río San Miguel en un total de 40 microcuencas con características fisiográficas homogéneas (topografía e hidrología), con la ayuda del programa IDRISI y de modelos de elevación digital (MDE).

Con los valores obtenidos de las características fisiográficas como el coeficiente de compacidad, relación de elongación y de circularidad, se establece que la Cuenca del Río San Miguel es de forma muy alargada.

Se utilizaron datos de 12 estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y los de 15 pluviógrafos de la Universidad de Sonora, distribuidas a lo largo del área de estudio.

Los datos de lluvia de los pluviógrafos se distribuyeron en cada una de las 40 microcuencas usando el Método de los Polígonos de Thiessen, para así tener una distribución de lluvia más equitativa.

Se usaron mapas de vegetación, uso de suelo, elevación y combinación de suelo y vegetación, para obtener los parámetros necesarios para modelar el escurrimiento de la cuenca; los parámetros utilizados fueron: tiempo de concentración, área, número de curva y precipitación correspondiente.

Se modeló hidrológicamente la cuenca con el programa HEC-HMS, dividiendo las corridas en periodos de lluvia de 14 a 15 días, porque así lo requiere el programa. Se observó que en la corrida 2 correspondiente al periodo que abarca del 07 de Julio al 20 de Julio de 2004, fue donde mayor escurrimiento se produjo con un gasto máximo de 83.68 m³/s.

Se obtuvieron los NDVI de cada microcuenca y se graficaron contra el tiempo y el escurrimiento que arrojó el modelo HEC-HMS.

En dichas gráficas se observó que la vegetación incrementa su biomasa de Junio a Septiembre, un poco más tarde que las lluvias. En cambio los picos mayores de escurrimiento son variables, unas veces ocurren en Julio y otras en Diciembre.

Se puede concluir que el escurrimiento es afectado por la vegetación, es decir, en suelo desnudo hay más escurrimiento que cuando hay vegetación generada en época de lluvia.

Basados en los resultados se puede establecer una relación entre el escurrimiento y NDVI, la cual podemos afirmar que entre mas vegetación hay en el área menor será el escurrimiento registrado.

Al observar las gráficas del anexo I, concluimos que no hubo lluvias significativas en invierno y el NDVI se incremento rápidamente con el inicio de las lluvias de verano y decreció en diciembre; por lo que la precipitación tiene un impacto notable en el NDVI.

Como se observa en las gráficas de NDVI, el tipo de vegetación es variante en la parte alta y baja de la Cuenca, tendiendo una importante influencia en los valores del escurrimiento.

Debido al excesivo pastoreo y deforestación de la Cuenca, solo el 1% del agua es retenida.

En el mes de junio ocurren las primeras precipitaciones debido al monzón, pero la vegetación con un retraso de pocos días entra en una dinámica estacional muy marcada.

Se compararon los datos arrojados con el modelo HEC-HMS con los datos de la CONAGUA registrados en la estación hidrométrica El Cajón. Al comparar los datos del modelo (22 de Junio-30 de Diciembre, 2004) con los gastos registrados por la CONAGUA (mismo periodo), se concluye que hay una confiabilidad del modelo del 92%.

Asimismo, se puede concluir que los mayores escurrimientos se encuentran dados por las microcuencas ubicadas en la parte alta y media de la cuenca, como: la 1, 7, 15, 16, 27 y 30. Inversamente al escurrimiento, se puede concluir que las mayores infiltraciones ocurren en el resto de las microcuencas.

9.2. Recomendaciones

Se recomienda el uso de otros programas que tomen en cuenta todos los datos de lluvia, sin necesidad de hacer separaciones en las fechas.

También es recomendable hacer una modelación que considere más datos, para poder tener un panorama más amplio y generalizado del comportamiento hidrológico de la Cuenca del Río San Miguel.

Con el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) será posible calibrar el modelo HEC-HMS para conocer el comportamiento hidrológico del escurrimiento.

Por medio de los resultados obtenidos del NDVI sería posible hacer variar el número de curva en cada microcuenca a través del tiempo, y así tener un número de curva para las estaciones de lluvia y sequía.

Se recomienda el establecimiento de estructuras de medición del escurrimiento, así como una base de datos de aprovechamiento subterráneo.

Por último se recomienda, establecer más aparatos de medición de lluvia en lugares estratégicos, para continuar la generación de nueva información.

X. LITERATURA CITADA

- Alvarez, Jr., M. 1958, Provincias fisiográficas *in* Comisión Nacional del Agua (2002).
- Aparicio Mijares F. J., 1999, Fundamentos de Hidrología de Superficie, Editorial Limusa, México D. F, 210 pp.
- Chow V.T., 1964, Principios de Hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico *Serie Textos Universitarios*, Núm. 1. Pp. 67-85
(<http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/cp5.pdf>), consulta: 9 enero 2009
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2002, Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Río San Miguel, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, México, D.F., 38 pp.
(http://www.cna.gob.mx/eCNA/espaniol/Programas/Subdirecciones/HTMLGAS/dispgas/pdf_docs/Rio%20Sonora.pdf), consulta: 8 enero 2009.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2007a, Ley Federal de Derechos (Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales) 2007, 70 pp.
(http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Ley_Federal_Derechos.pdf), consulta: 9 enero 2009
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2007b, Base de datos de estaciones climatológicas e hidrométricas localizadas en la Cuenca del Río San Miguel y alrededores. Información proporcionada por el Ing. Gilberto Lagarda V., Serv. Meteorol. Nal.
- Custodio, E. y Llamas, M.R., 1996, Hidrología Subterránea, 2da. Edición, Ed. Omega, S.A., Barcelona, España, Tomos I y II, 2350 pp.
- D'hombres, L., Castillo, J., Vega, E.L., 2007, Estudio para una gestión integral mejorada del recurso en agua de la Cuenca del Río Sonora, México, Proy. SEP-CONACYT-ANUIES Convocatoria 2005, Informe técnico, Depto. Geol. Unison, 64 pp.
- Díaz Delgado, C., Mamadou, K., Iturbe Posadas, A., Esteller, M.V., Reyna, F., 1999, Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alta del río Lerma, Estado de México

- (<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/104/10401504.pdf>), consulta: 12 enero 2009
- Environmental Protection Agency (EPA), 2000, National Water Quality Inventory, 12 capítulos
(<http://www.epa.gov/305b/2000report/>), consulta: 13 enero 2009.
 - Food and Agriculture Organizations of the United Nations (FAO), 1985, Manual de Ordenación de Cuencas, Serie Montes No. 35, Roma, Italia, 134 pp.
(http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/ecosistemas/areas_protegidas/en_a10.pdf), consulta: 13 enero 2009.
 - Flores, Emigdio Z., 1978, Apuntes de Hidrología Superficial, Editor: Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, 183 pp.
 - García de Miranda, Enriqueta, 1986, Apuntes de Climatología: según el programa vigente en las carreras de biólogos, UNAM de la F.E.S. de Cuautitlán, UNAM y de la Universidad Autónoma Metropolitana, 3ª Edición, México D. F, 155 pp.
(<http://ola.icmyl.unam.mx/biblio/libros-Aut.asp?st=g>), consulta: 9 enero 2009.
 - Hoyt, W., 1942, Principios de Hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico *Serie Textos Universitarios*, Núm. 1. Pp. 67-85
(<http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/cp5.pdf>), consulta: 9 enero 2009.
 - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1981, Cartas de hidrología de aguas subterráneas, superficiales, geología, topografía, uso de suelo, fisiografía, escala 1:250,000, SPP, México
 - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1993, Estudio Hidrológico del estado de Sonora: México, 81 pp.
 - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2000, Síntesis de Información Geográfica del Estado de Sonora: México, 88 pp.
 - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007, Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos, Cobertura temporal: 2006, Edición 2007, ISSN: 0188-8633,
(<http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/aee06/estatal/son/index.htm>), consulta: 9 enero 2009

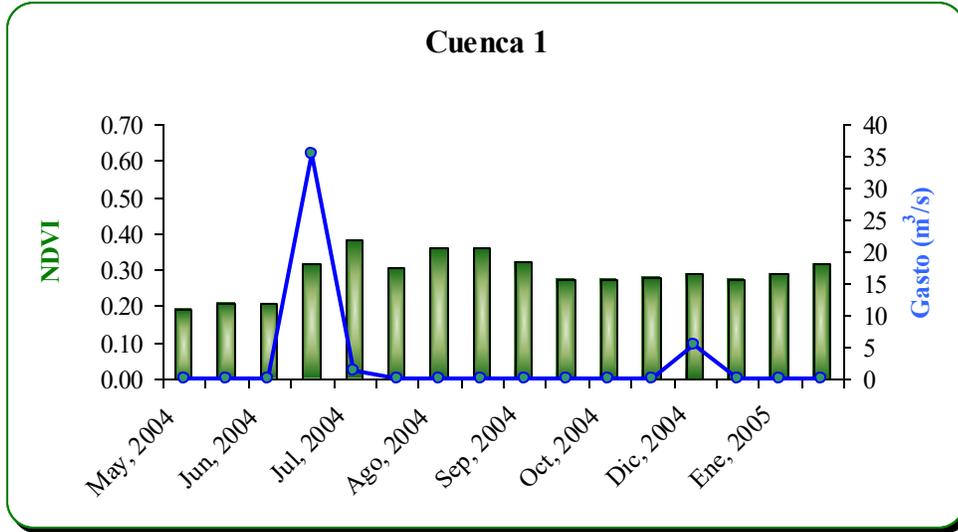
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2008, Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos, Cobertura temporal: 2007, Edición 2008, ISSN: 0188-8633, (<http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/ae07/estatal/son/index.htm>), consulta: 9 enero 2009
- Maidment, D.R., 1993, Handbook of Hydrology, Ed. McGraw-Hill, Inc., 1.47 pp.
- Mekonnen G., Vivoni E., Watts C., Rodríguez J., 2006, Submesoscale Spatiotemporal Variability of North American Monsoon Rainfall over Complex Terrain: American Meteorological Society, 20, 1751-1773.
- Miranda Rodríguez, F. A., 2004, Actualización geohidrológica y modelación de la parte centro sur del acuífero Río Zanjón: Hermosillo Sonora, México, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de licenciatura, 71 pp.
- Nanía, Leonardo S., 2003, Apuntes de clase: La cuenca y los procesos hidrológicos, Universidad de Granada, 62 pp. (http://www.puertosycostas.com/pyc/html/docente/apuntes/Lacuencaylos_2003.pdf), consulta: 14 enero 2009.
- Norma Oficial Mexicana (NOM), 1994, MODIFICACIÓN a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. 11 pp.
- Organización Mundial de la Salud (OMS), 2004, Guías para la calidad del agua potable, Tercera Edición, Vol. 1, Recomendaciones, Ginebra, 101 pp.
- Rangel, et al. (2005). *Estudio de piezometría y evolución de niveles, en la cuenca media y alta del río sonora, y río Bacoachi*". Comisión Estatal del Agua, Hermosillo, Sonora
- Romero Padilla F., Valencia Saucedo J., 2003, Aplicación de métodos geofísicos (gravimetría y resistividad) sobre el cauce del Río Sonora, Ejido La Habana: Hermosillo, Sonora, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de licenciatura, 98 p.
- Scheidegger, A.E., 1987, The connection of geodynamics with seismicity patterns, Natural Hazards, Vol. 1, No. 1, Marzo, 1988, pp. 5-13 (<http://www.springerlink.com/content/hq04352p7221n308/>), consulta: 12 enero 2009

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Recursos Hidráulicos, Pesca y Acuicultura (SAGARPA), 2004, Programa Estatal de Mediano Plazo Aprovechamiento Sustentable del Agua 2004 – 2009, 42 pp.
(<http://www.sonora.gob.mx/biblioteca/documentos/pmp/agua.pdf>), consulta 6 enero 2009
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1982, Manual para la estimación de avenidas máximas en Cuencas y Presas pequeñas, Dirección Gral. de Obras Hidráulicas y de Ing. Agric. para el Desarrollo Rural, 225 pp.
- Springall, R., 1970, Hidrología, Primera parte, Publicación D-7, Instituto de Ingeniería UNAM, México, D.F., 209 pp.
- Strahler (1964), Densidad hidrográfica en red de drenaje, Curva hipsométrica (<http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/cp5.pdf>), consulta 18 noviembre 2008
- Szilagi, J., Rundquist, D.C., Gösselin, D.C., 1998, NDVI relationship to monthly evaporation, Geophysical Research Letters, Vol. 25, No. 10, pp. 1753-1756.
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 2007, Principios de Hidrogeografía, estudio del ciclo hidrológico, (<http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/cp5.pdf>), consulta: 25 enero 2007.
- Universidad de Sonora (UNISON), 2000, Estudio geohidrológico del comportamiento del acuífero mediante la realización de pruebas de bombeo y conceptualización a detalle de la intrusión salina en el acuífero de la Costa de Hermosillo: México, Comisión Nacional del Agua, Tomos I y II., V-6 pp.
- Universidad de Sonora (UNISON), 2001, Estudio de cuantificación de la recarga del acuífero "Costa de Hermosillo", Municipio de Hermosillo, Sonora, Contrato SGT-GRNO-SON-01-026-CE-13, Comisión Nacional del Agua, Tomos I y II, XII-7 pp.
- Universidad de Sonora (UNISON), 2005a, Estudio geohidrológico de las Subcuencas de los Ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri-La Victoria y Cuenca Bacoachito, Informe Final, Comisión Estatal del Agua, 11-9 pp.

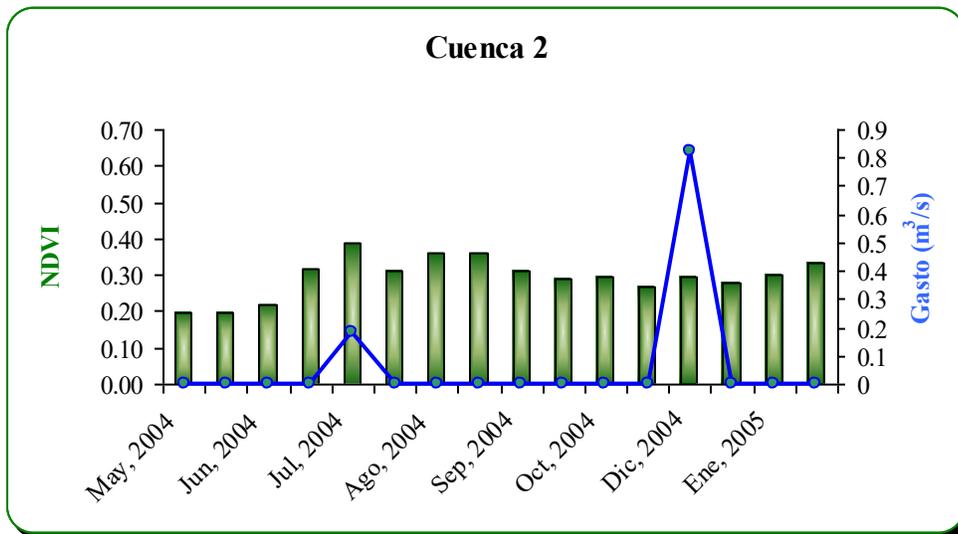
- Universidad de Sonora (UNISON), 2005b, Estudio de piezometría y evolución de niveles, en la cuenca media y alta del Río Bacoachito, Informe Final, Comisión Estatal del Agua, 10 caps.
- Valencia Coronado M., 2009, Análisis del efecto de la mejora en la distribución espacial de la precipitación en los elementos del balance de agua en la Cuenca del Río San Miguel, Sonora, Universidad de Sonora, Tesis de licenciatura, 64 p.
- Velázquez, L. y Ordaz, A., 1993-1994, Provincias hidrogeológicas de México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo L11, No. 1 y 2, pp. 15-33.
- Vivoni *et al.*, Sonora 2006-2007, Fiel Campaing <http://vivoni.asu.edu/sonora/www/documents/sonora2006.pdf>, consulta 02 de abril del 2009.
- Watts C., Scott R., Garatuza Payán J., Rodríguez J., 2006, Changes in Vegetation Condition and Surface Fluxes during NAME 2004: American Meteorological Society, 20, 1810-1819.
- Zhang, Li y Chen Xiao-Ling, 2009, Spati-temporal changes of NDVI and their relations with precipitation and temperature in Yangtze River catchment from 1992 to 2001, (<http://ncg.nuim.ie/geocomputation/sessions/6C/6C2.pdf>), consulta: 19 febrero 2009.

ANEXO I:

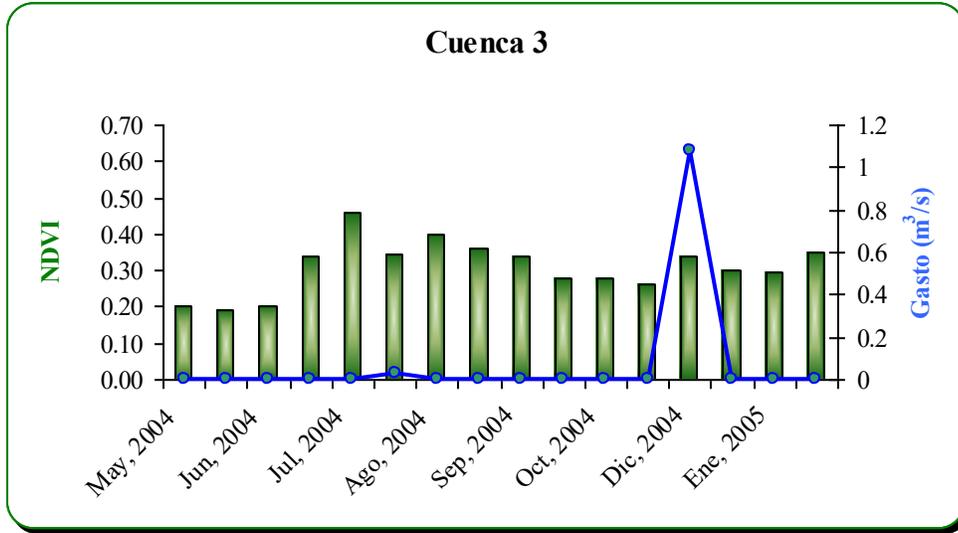
GRÁFICAS DE TIEMPO CONTRA EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE LA DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) Y CONTRA EL GASTO (m³/s)



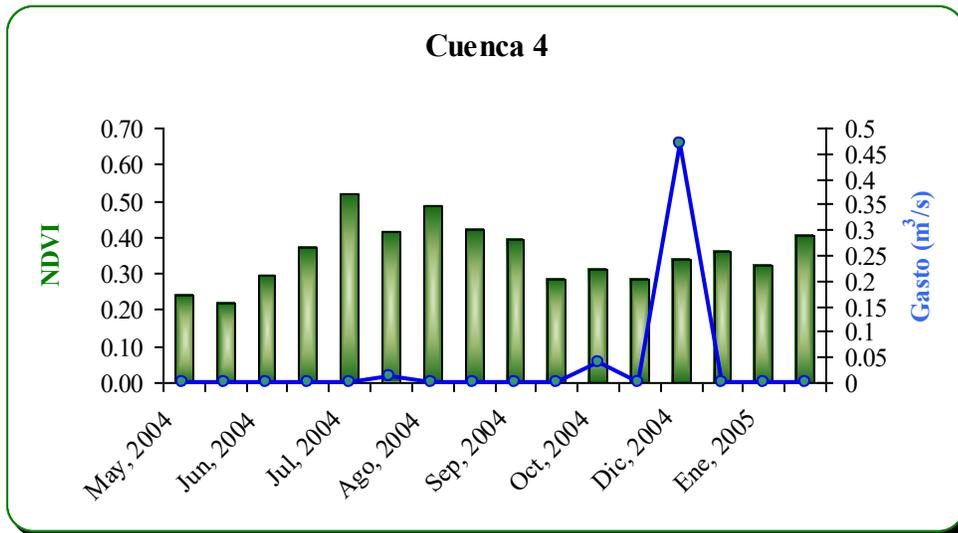
AI.1. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



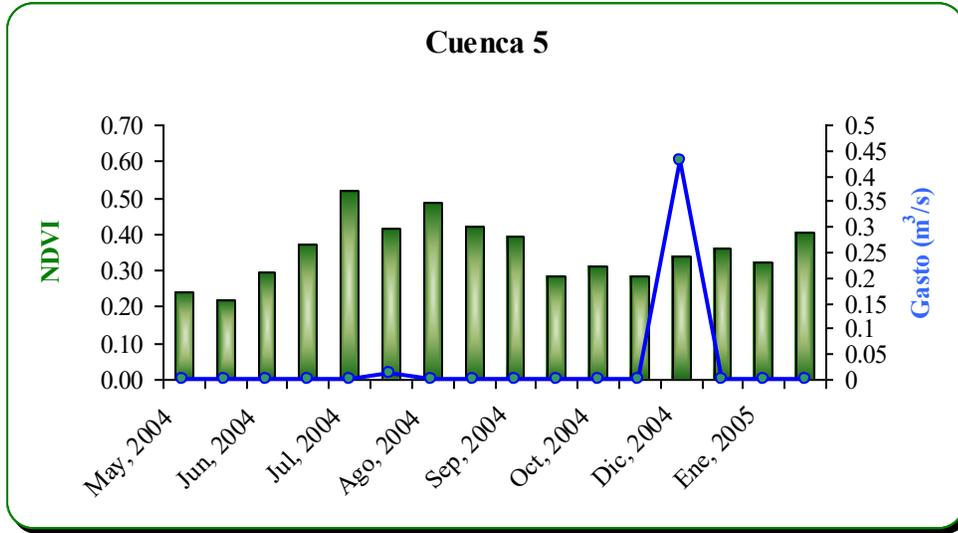
AI.2. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



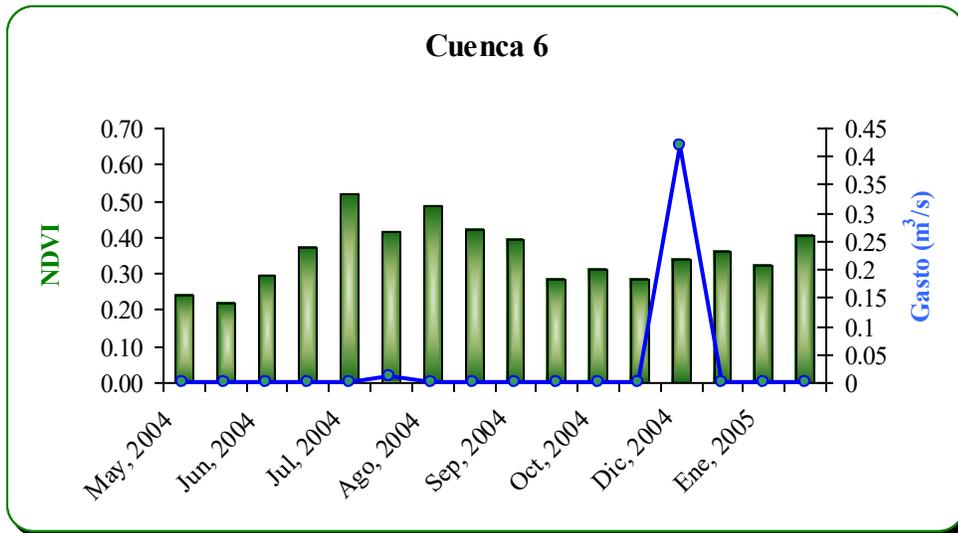
AI.3. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



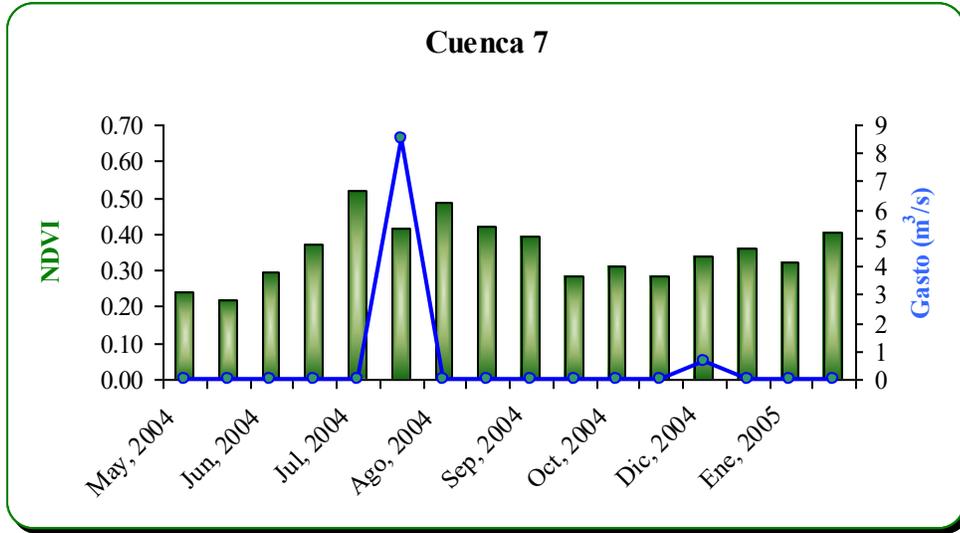
AI.4. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



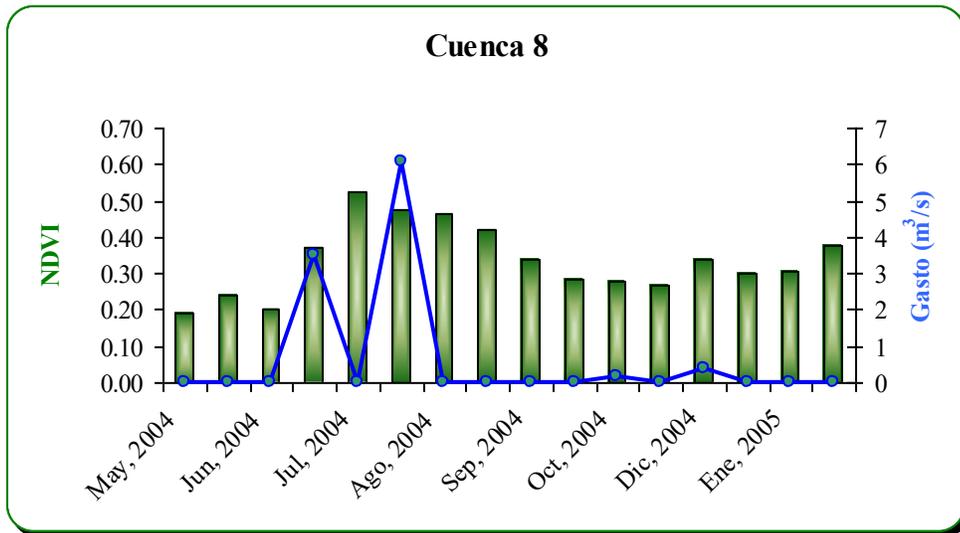
AI.5. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



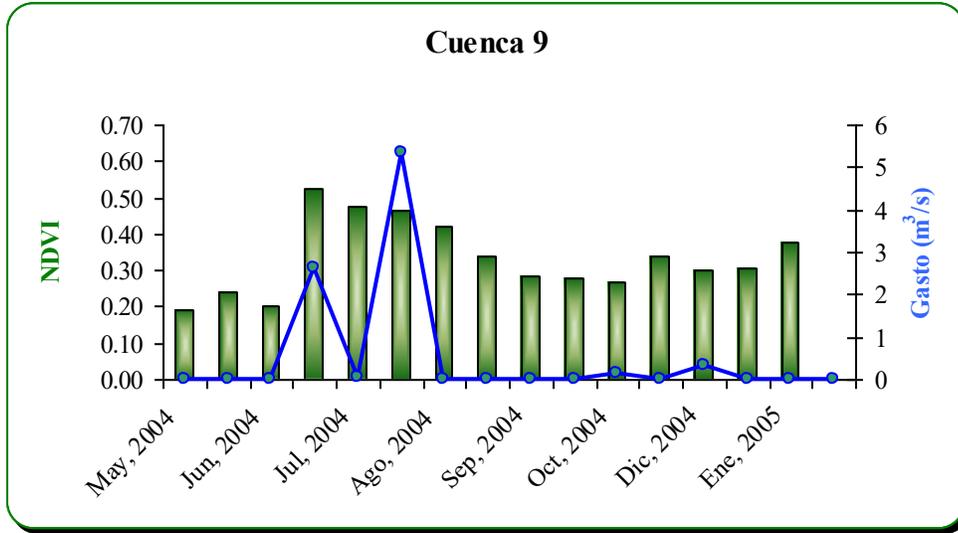
AI.6. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



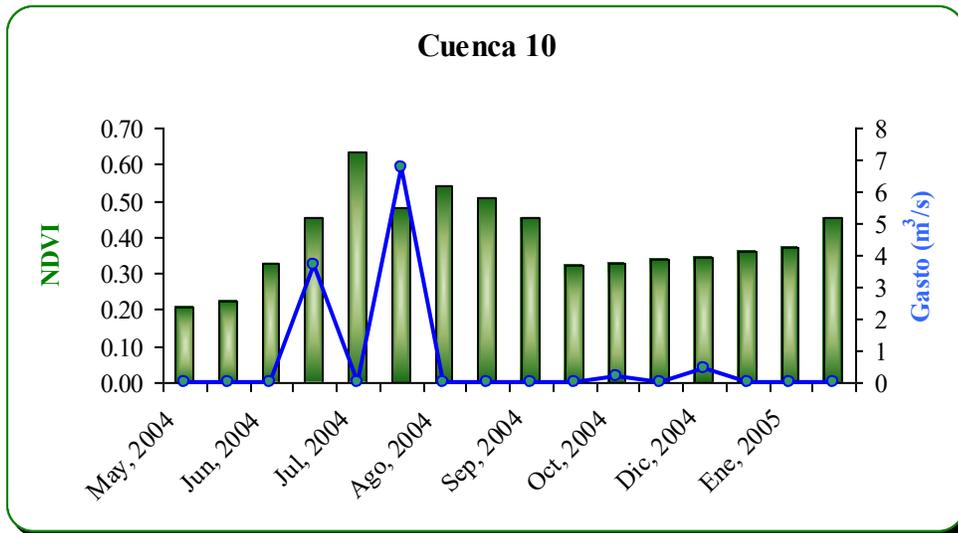
AI.7. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



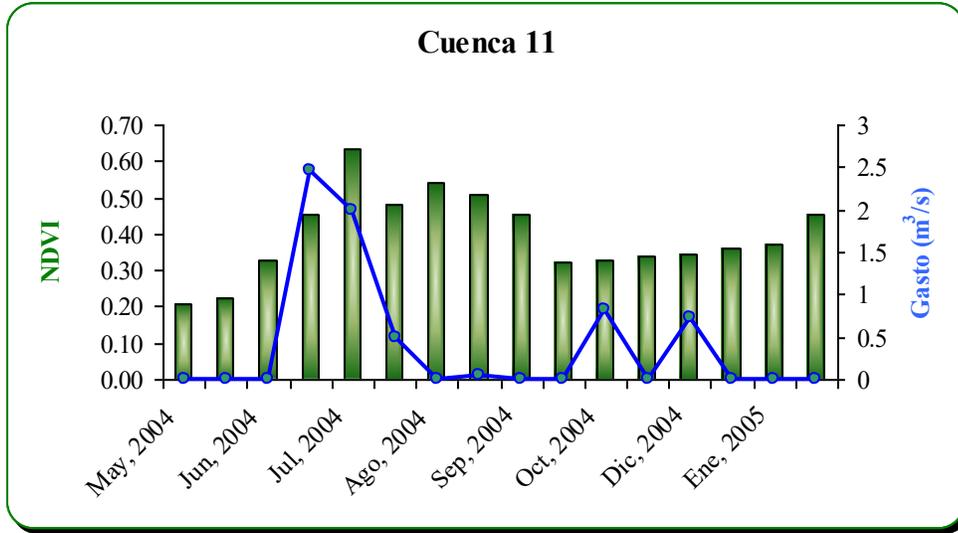
AI.8. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



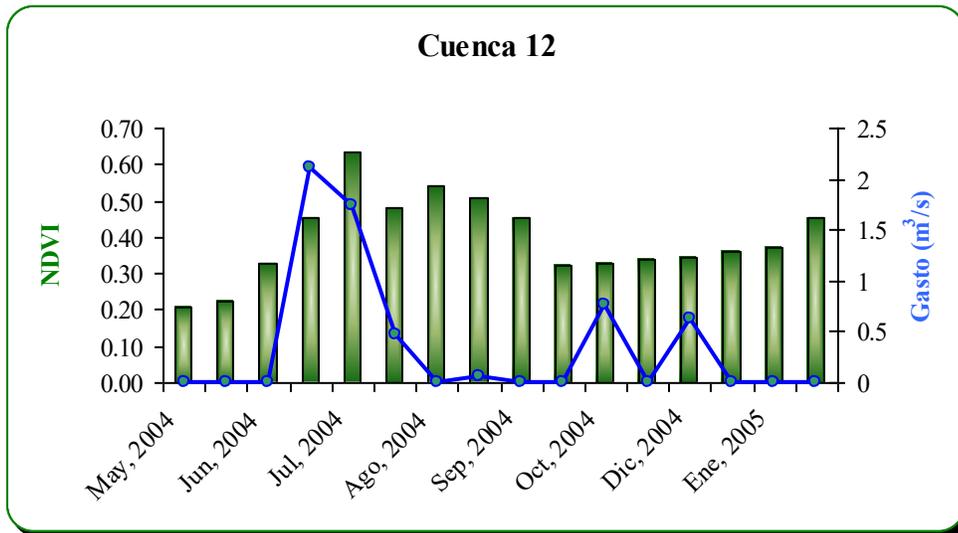
AI.9. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



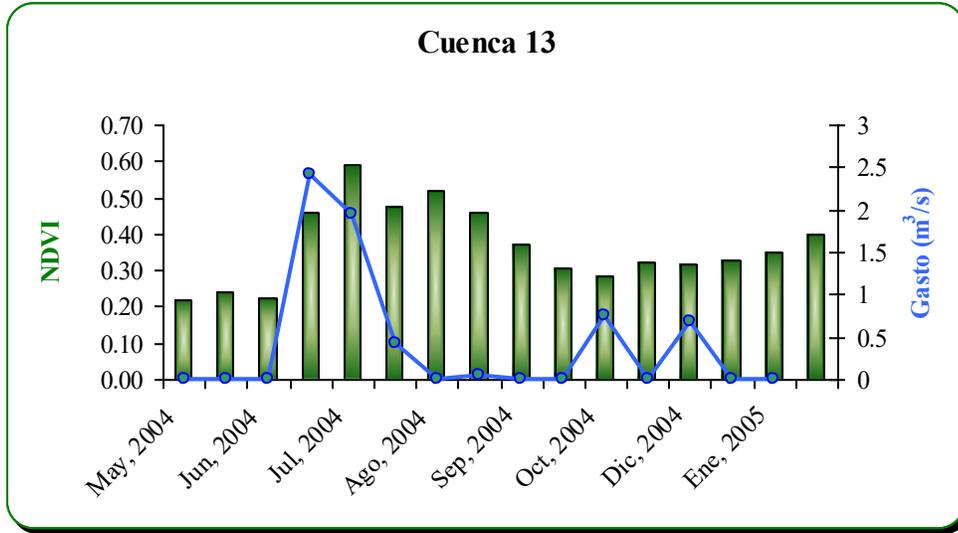
AI.10. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



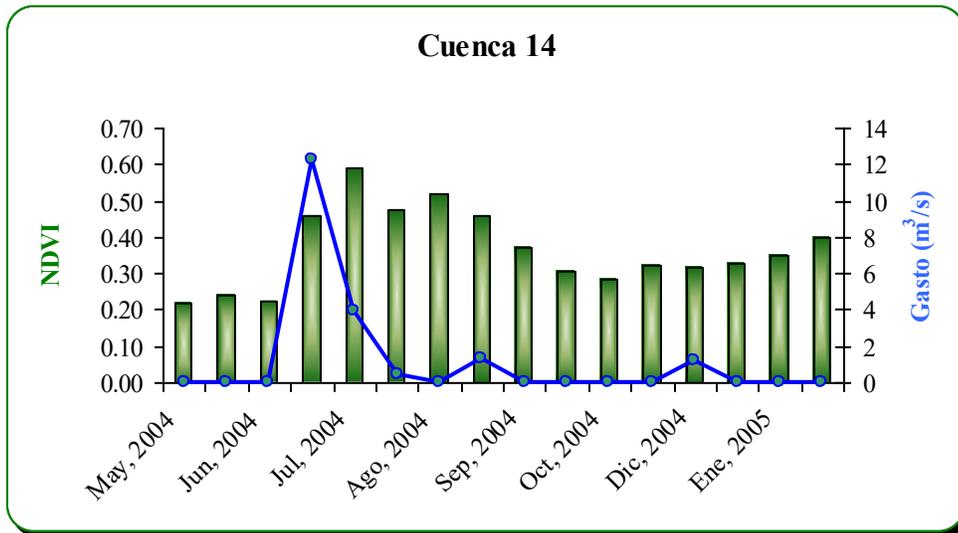
AI.11. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



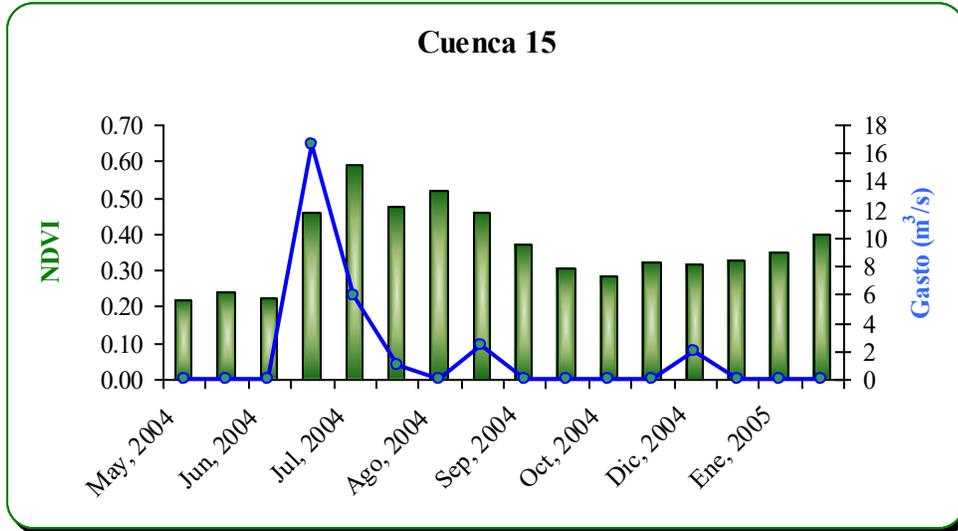
AI.12. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



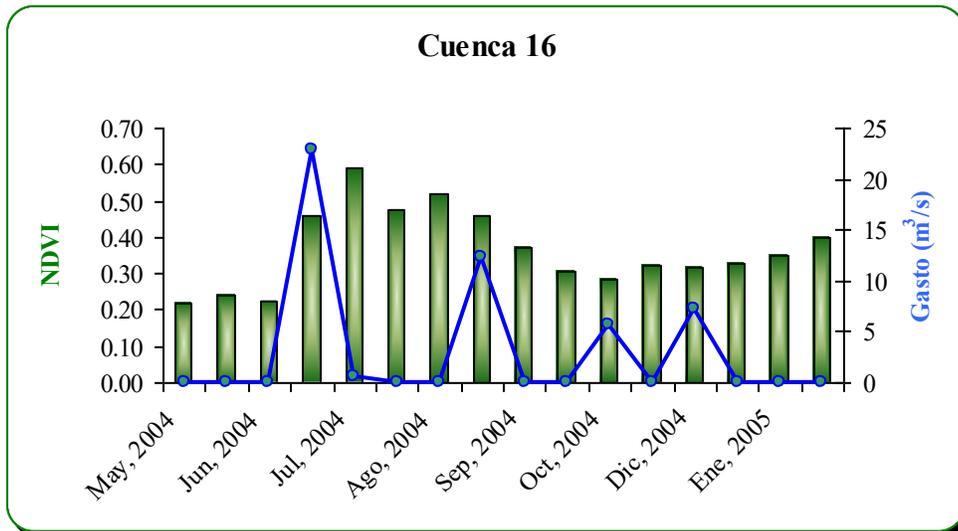
AI.13. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



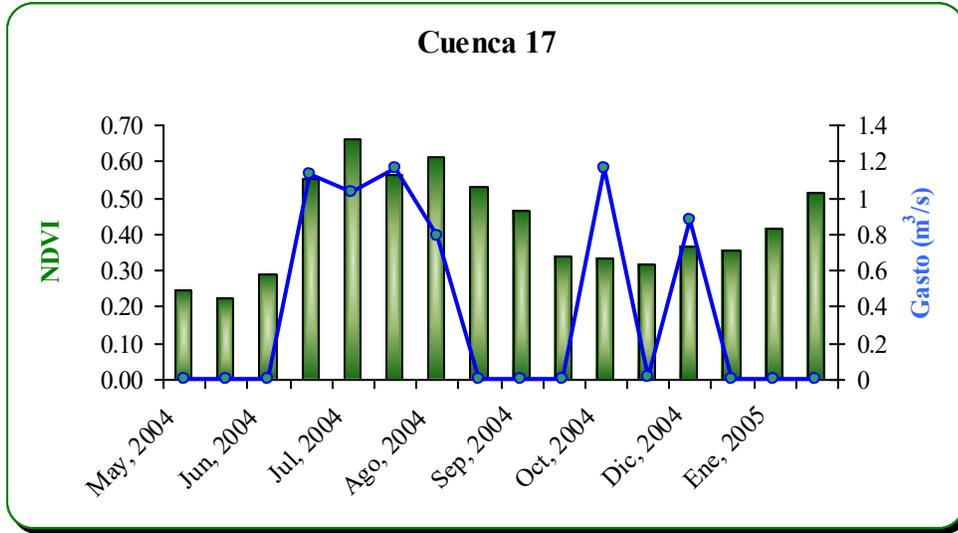
AI.14. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



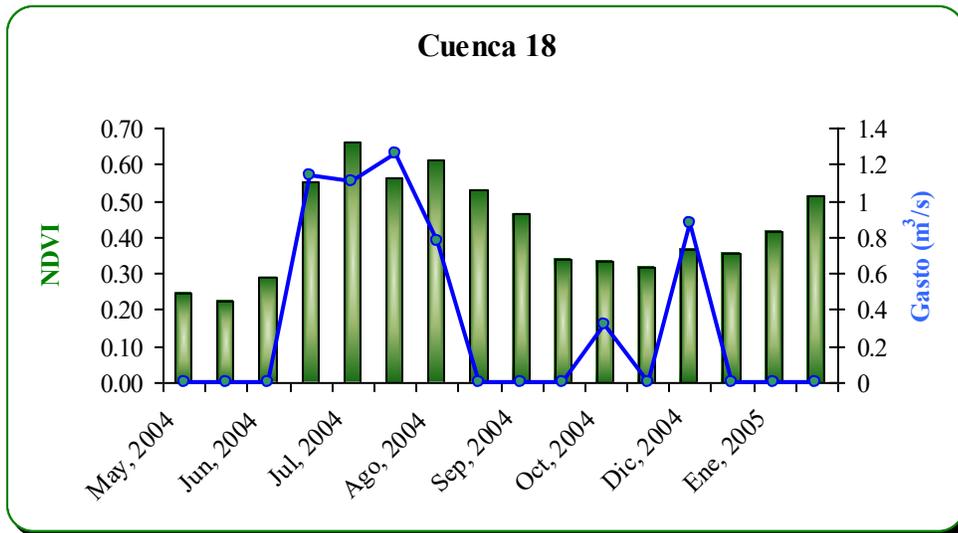
AI.15. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



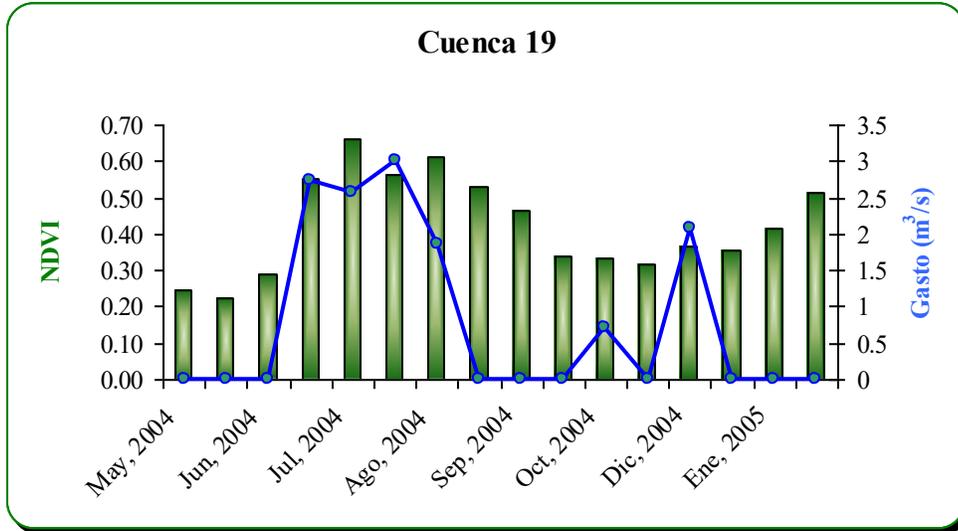
AI.16. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



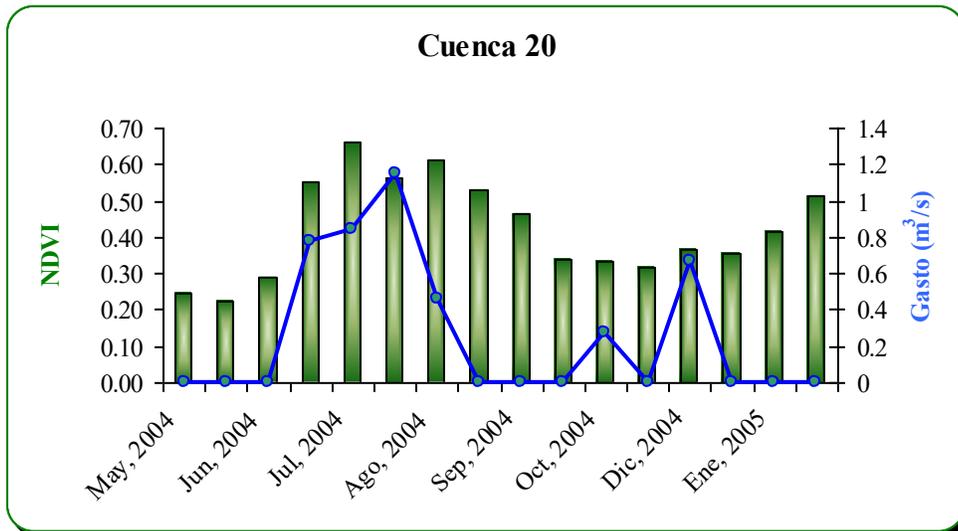
AI.17. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



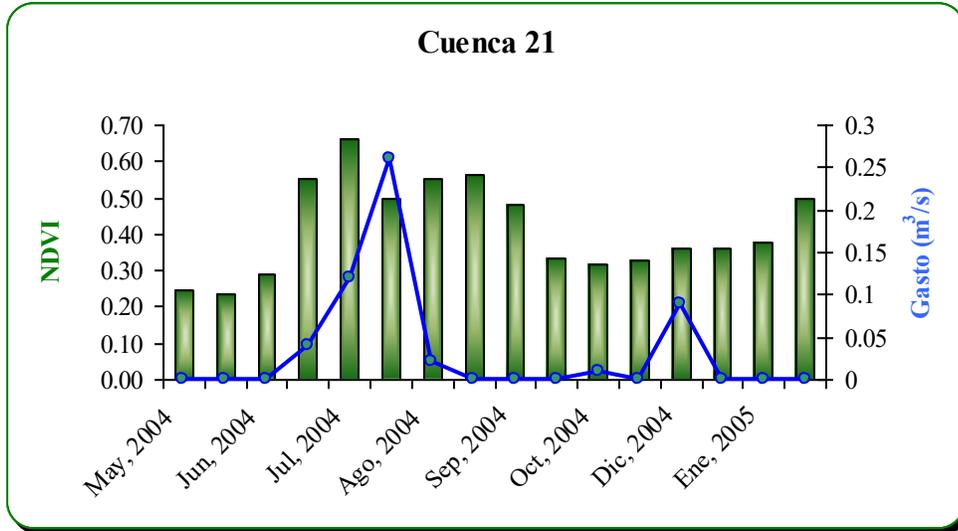
AI.18. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



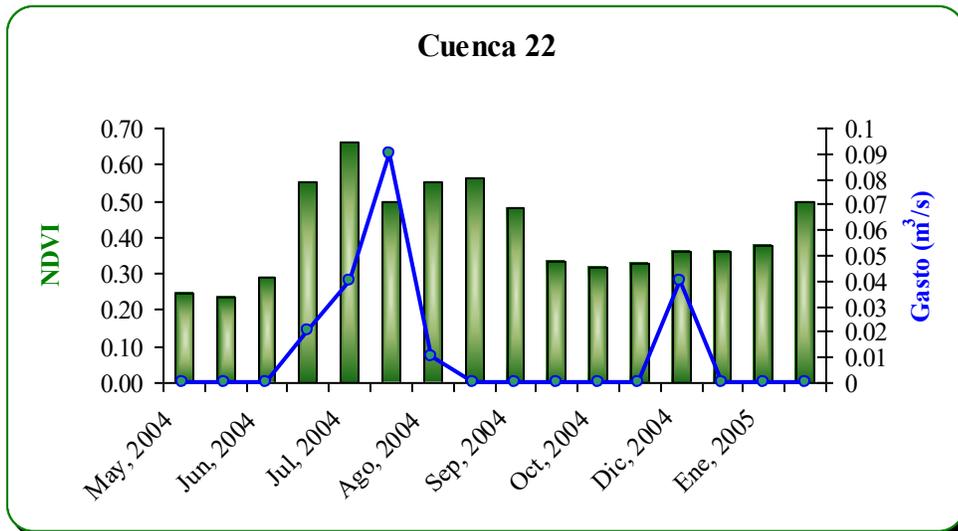
AI.19. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



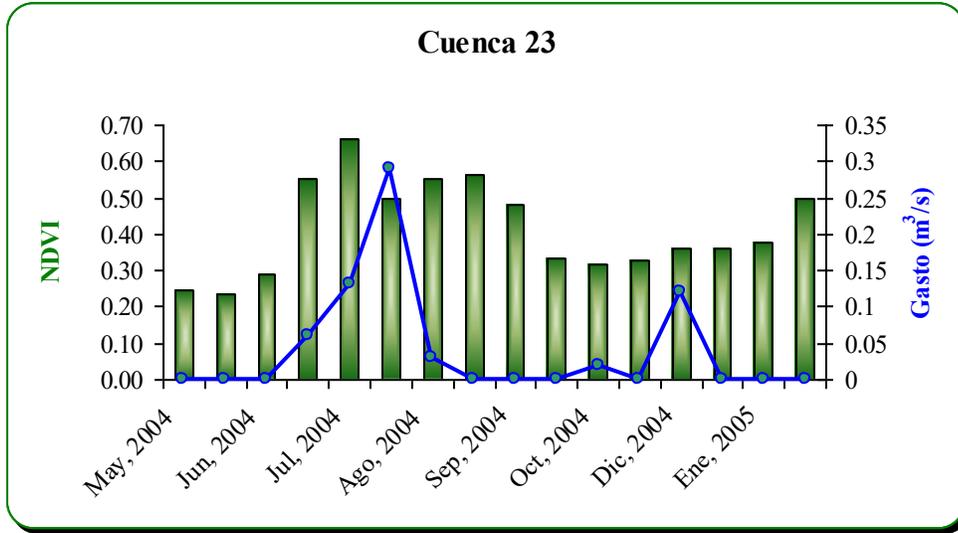
AI.20. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



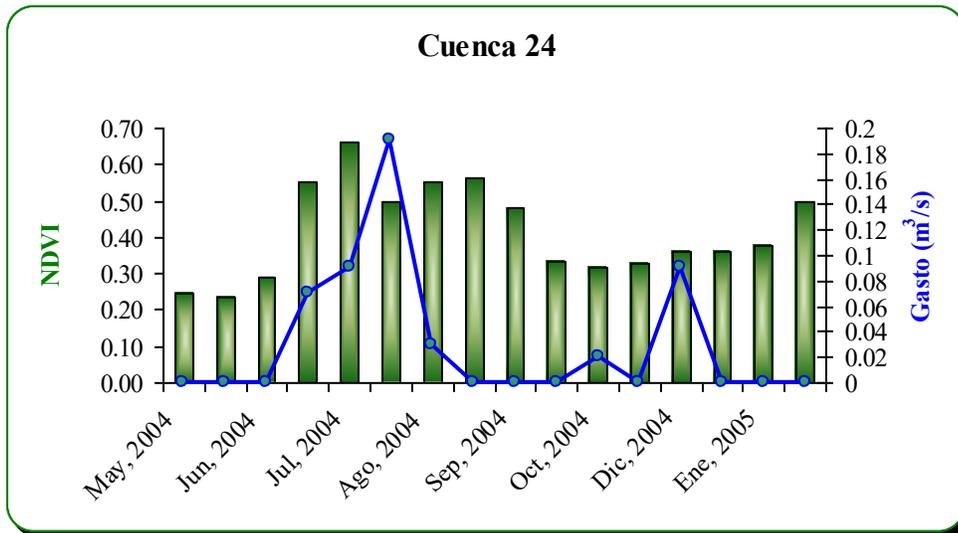
AI.21. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



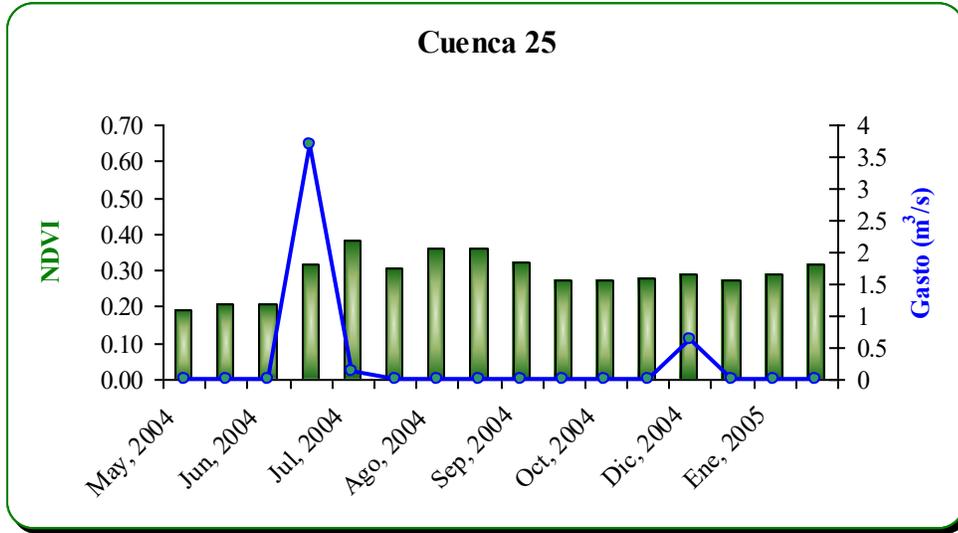
AI.22. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



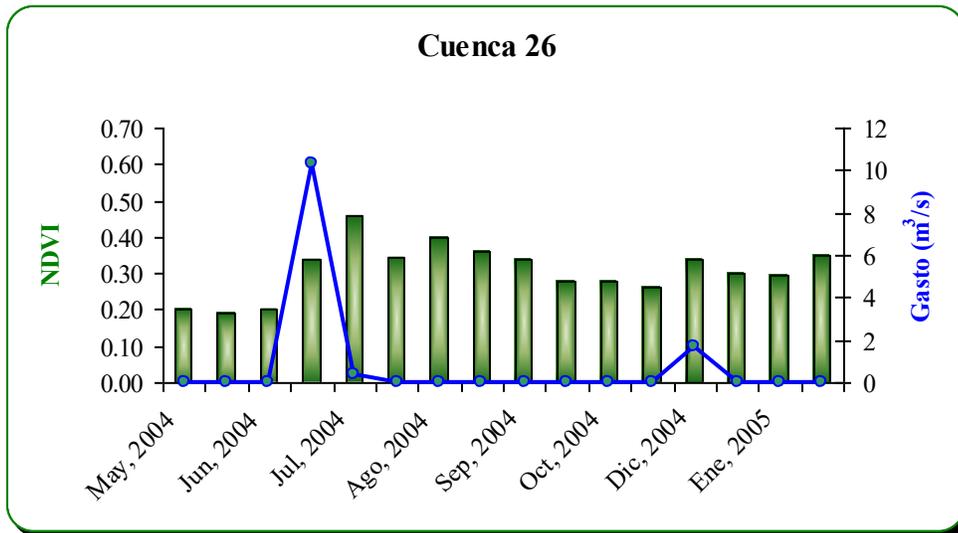
AI.23. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



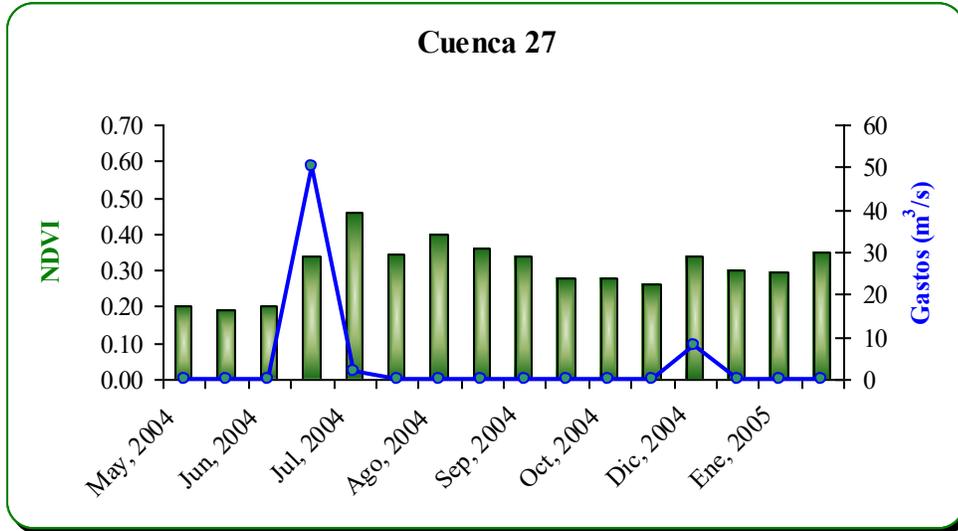
AI.24. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



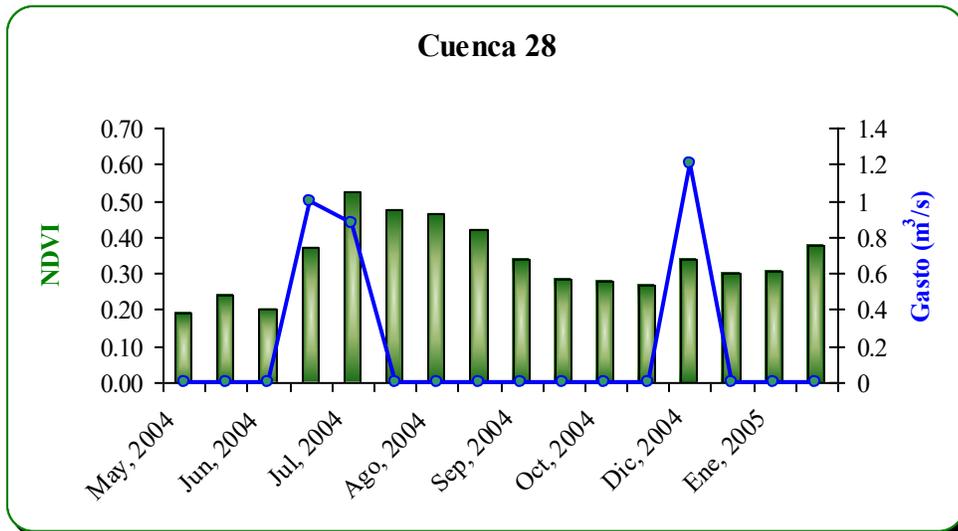
AI.25. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



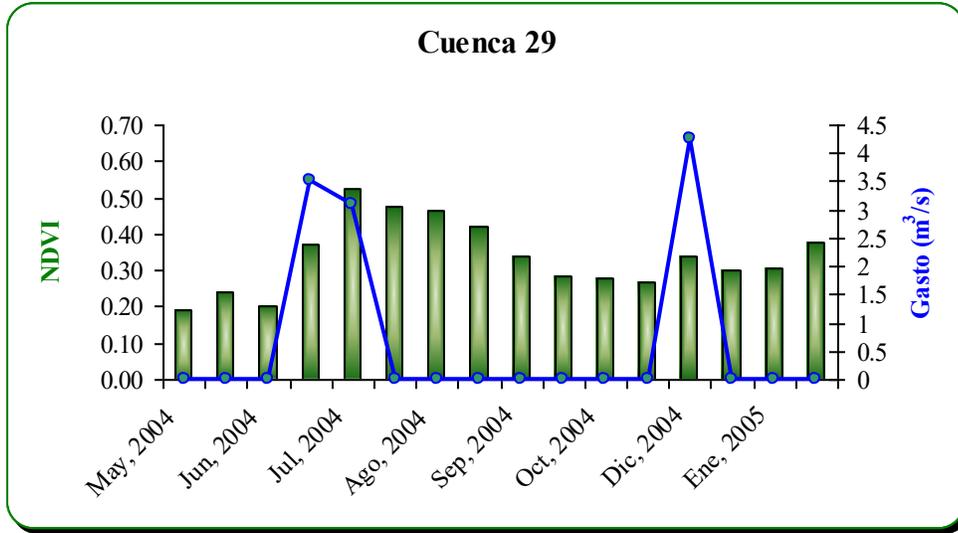
AI.26. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



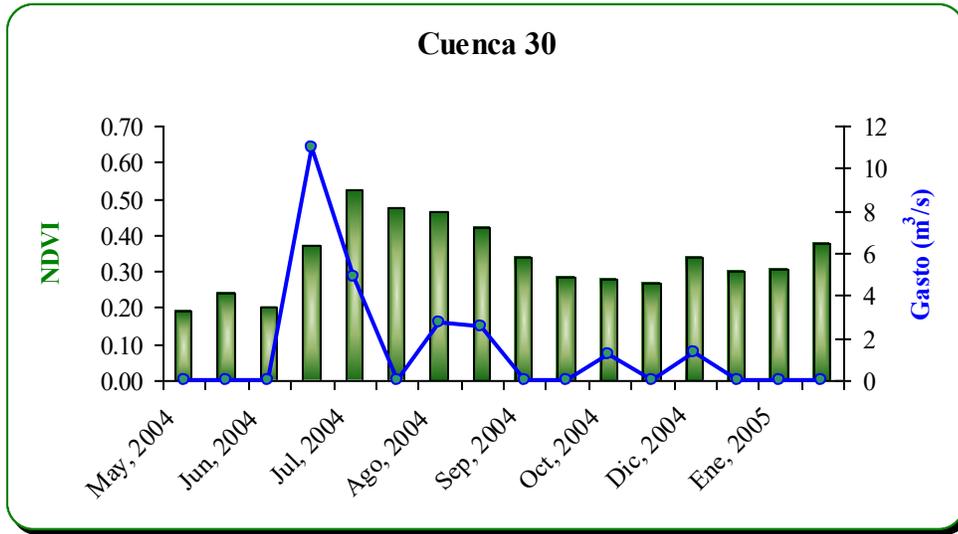
AI.27. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



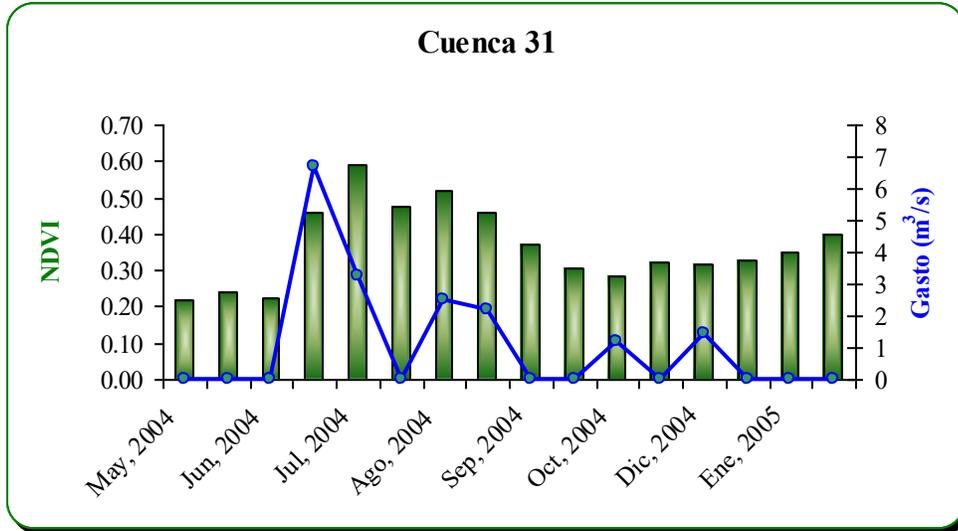
AI.28. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



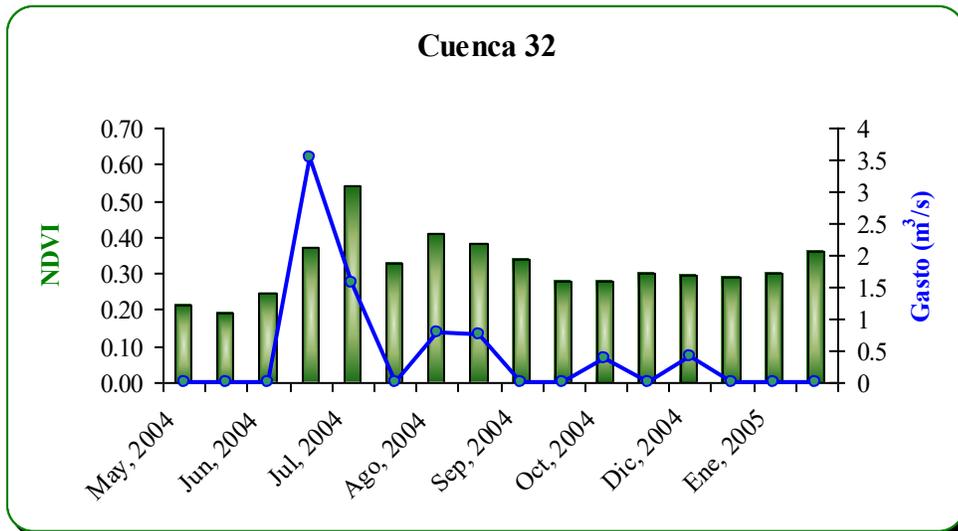
AI.29. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



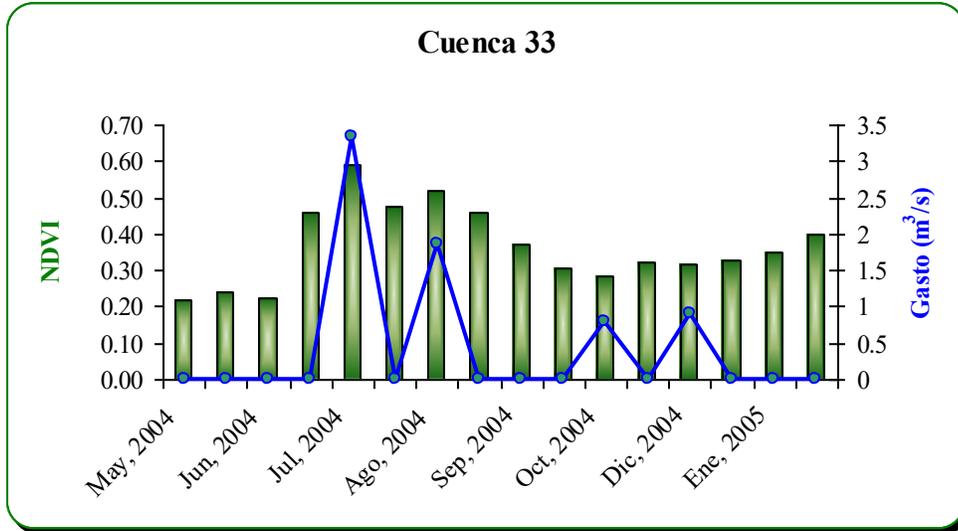
AI.30. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



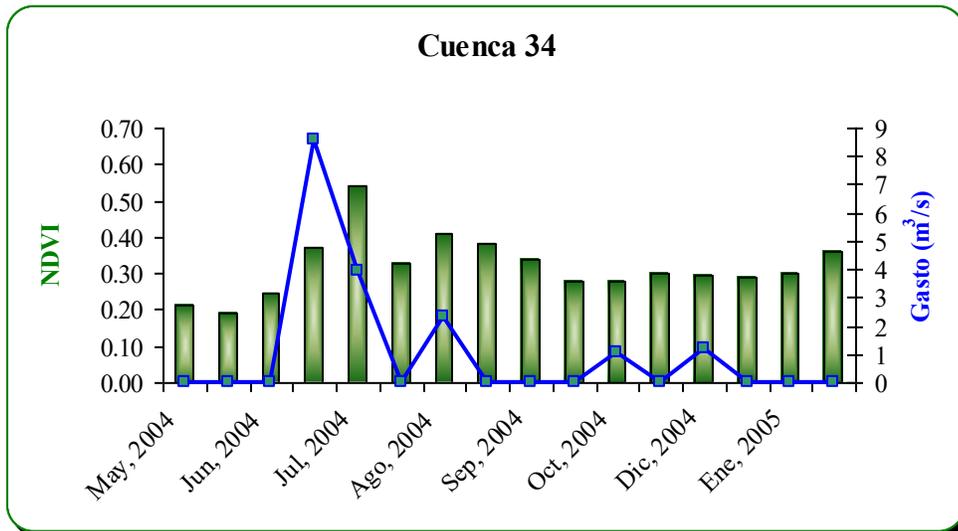
AI.31. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



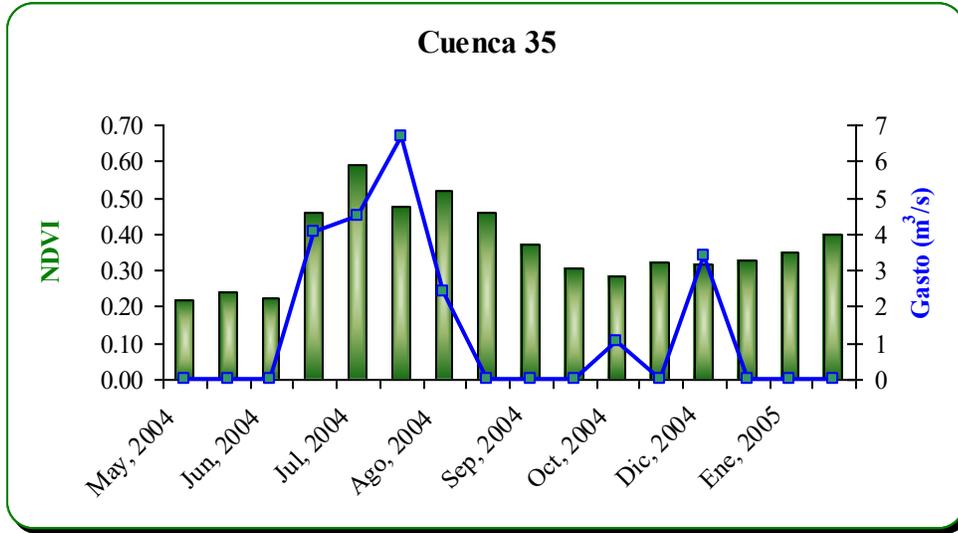
AI.32. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



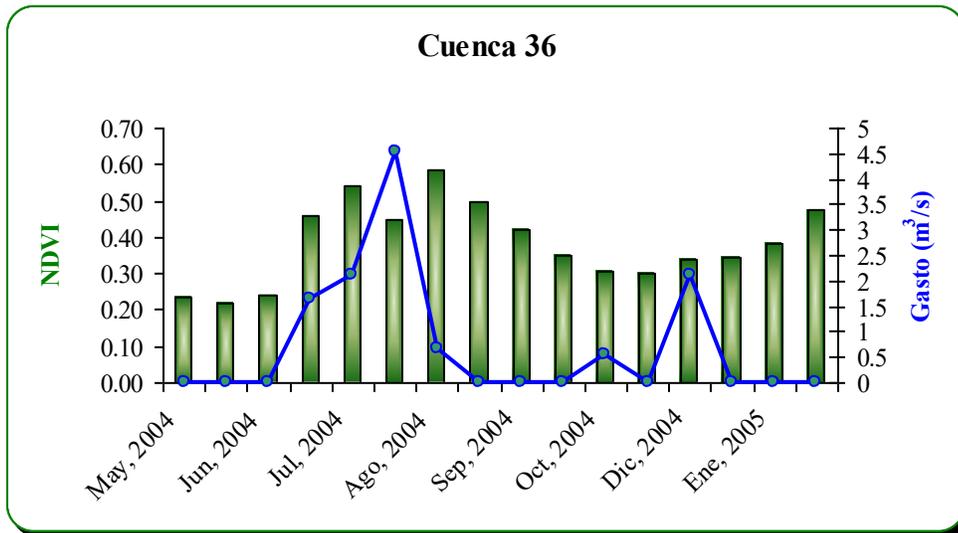
AI.33. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



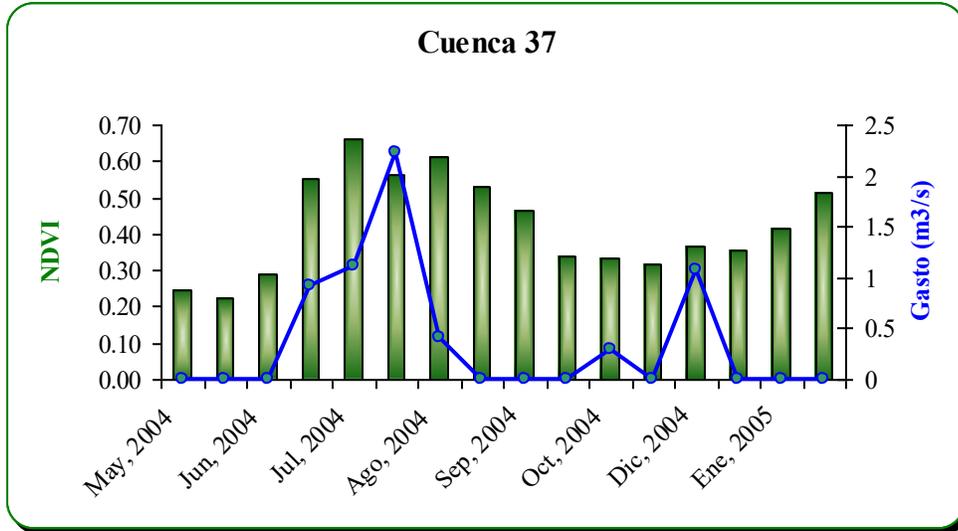
AI.34. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



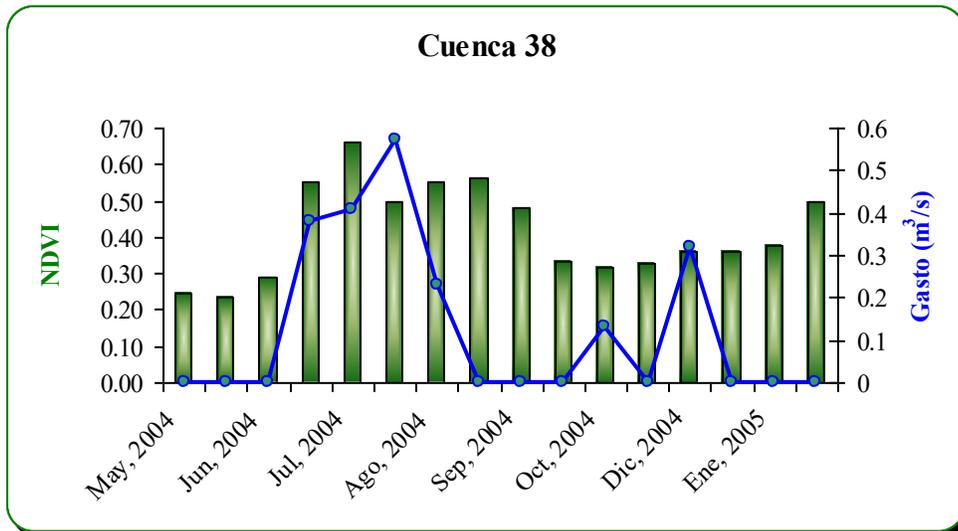
AI.35. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



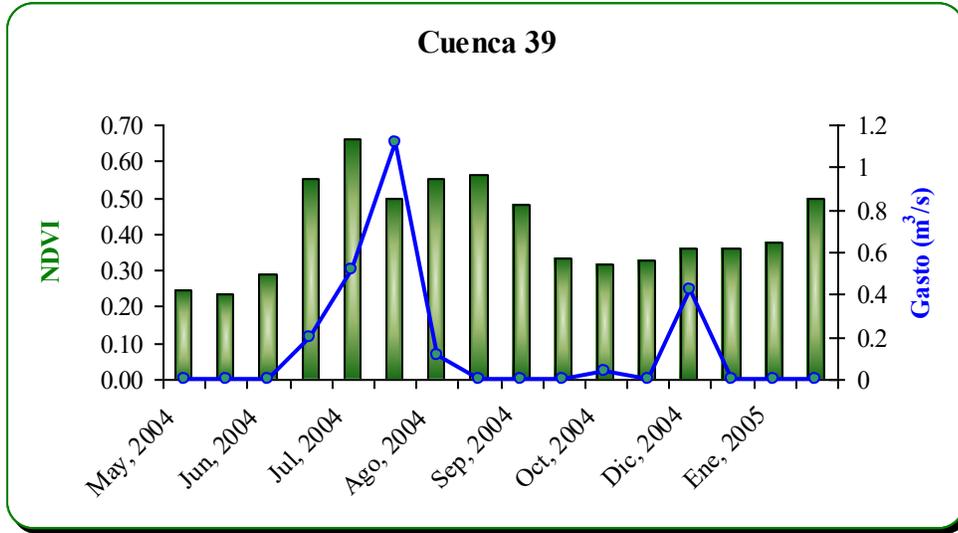
AI.36. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



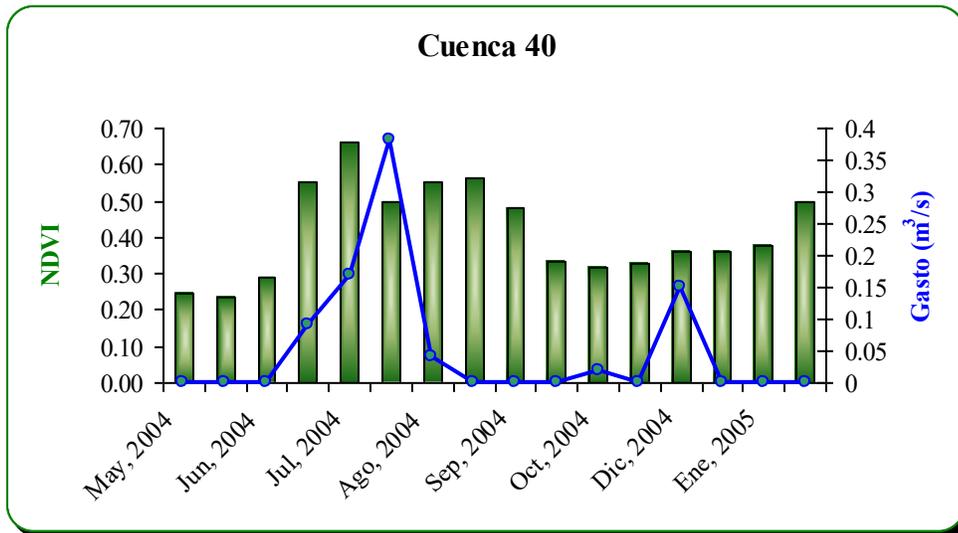
AI.37. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



AI.38. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



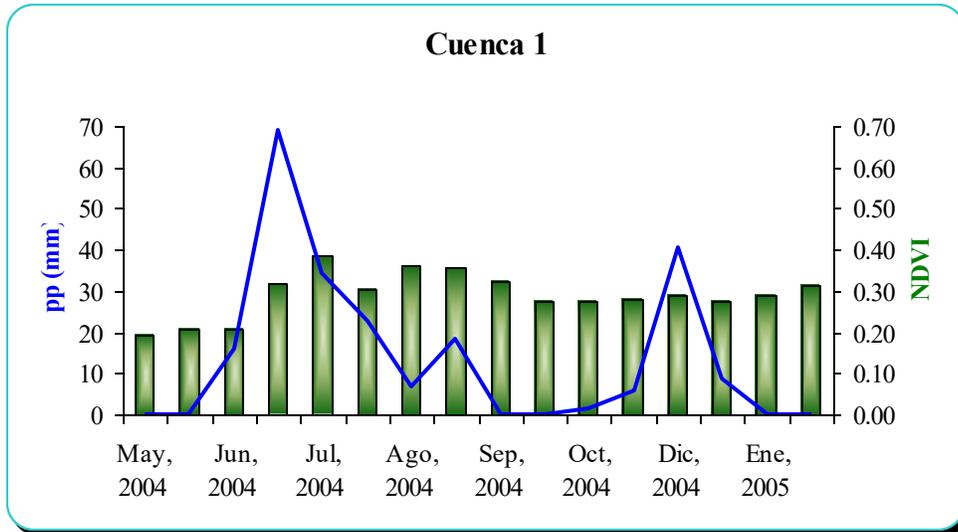
AI.39. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto



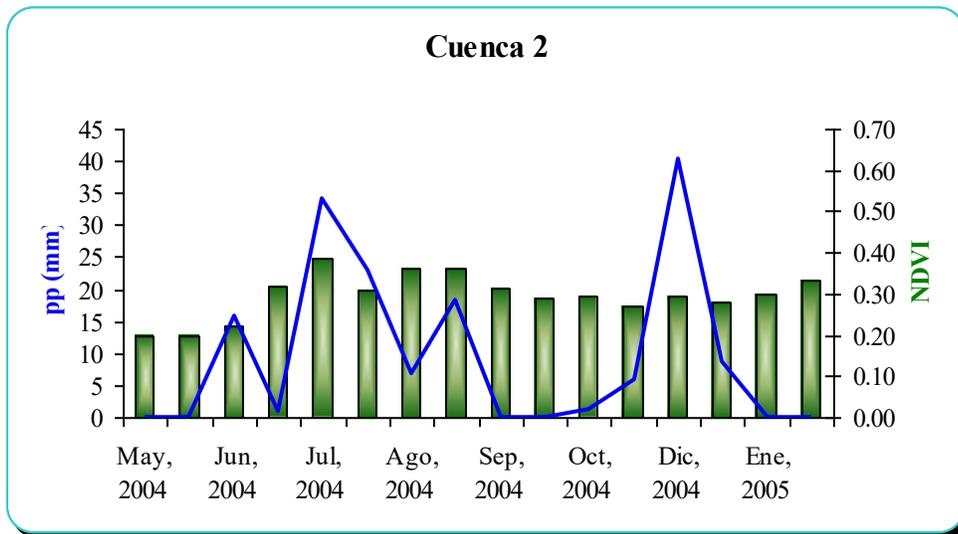
AI.40. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra gasto

ANEXO II:

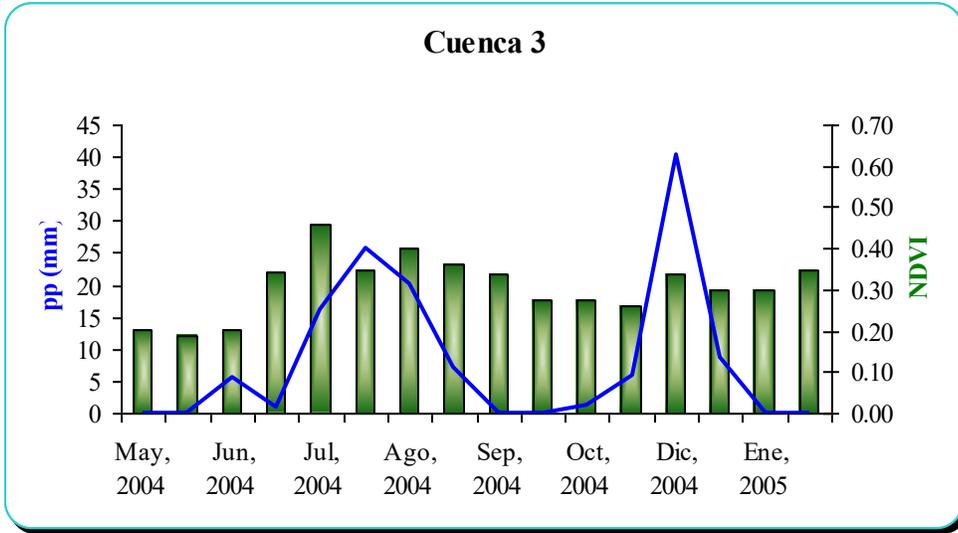
GRÁFICAS DE TIEMPO CONTRA EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE LA DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) Y LA PRECIPITACIÓN (mm)



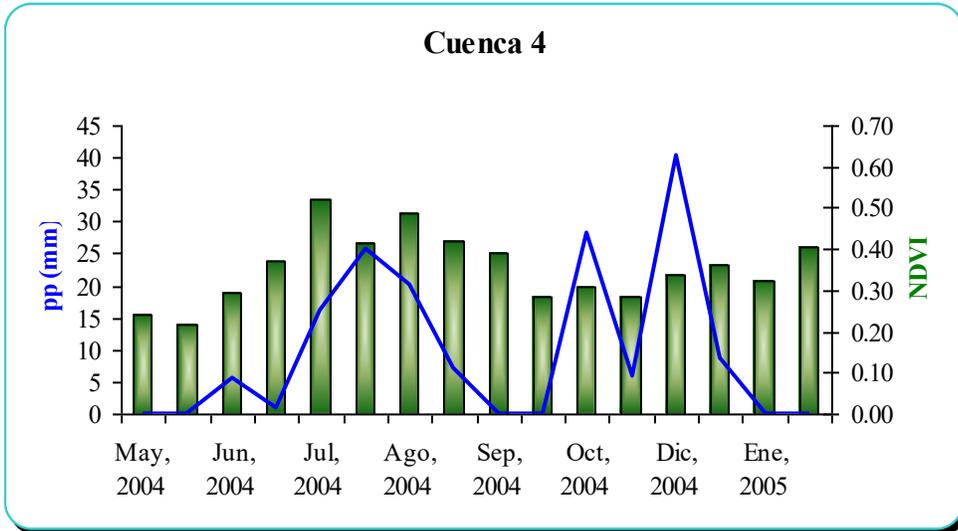
AII.1. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



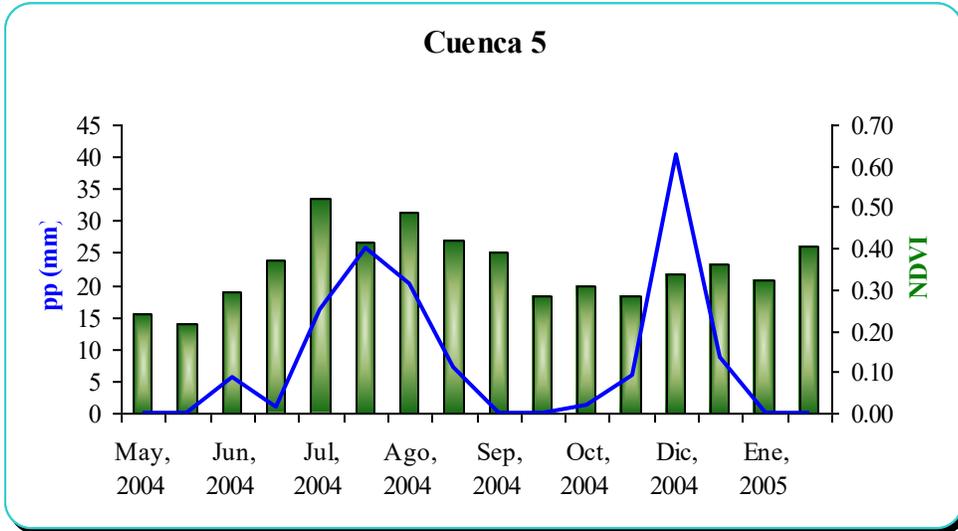
AII.2. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



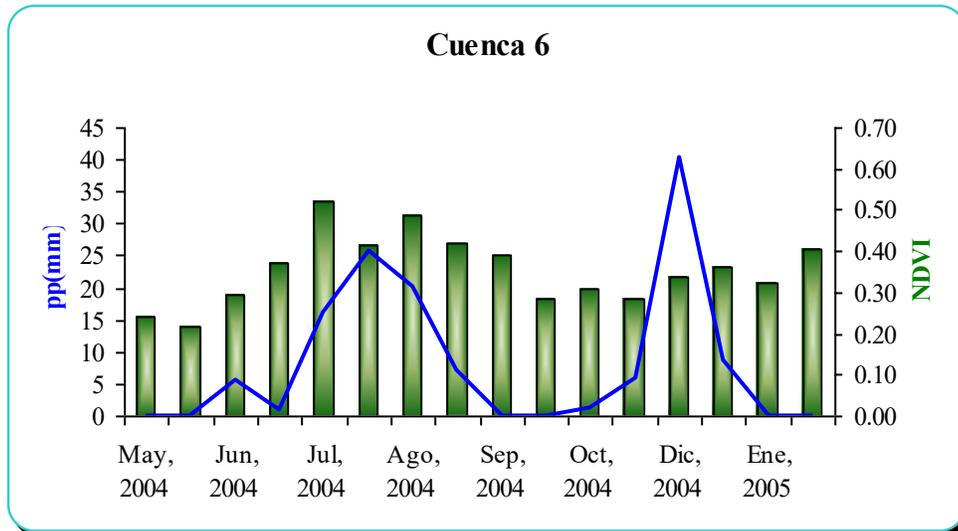
AII.3. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



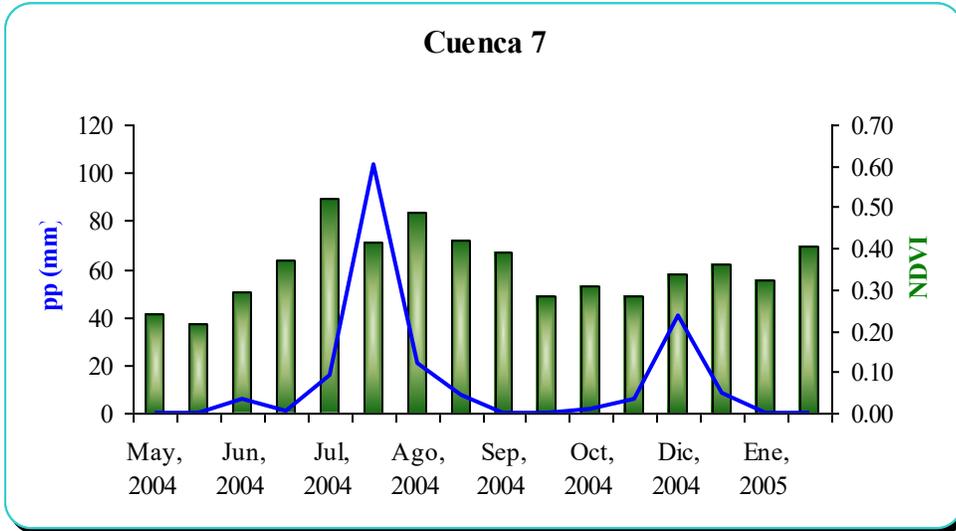
AII.4. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



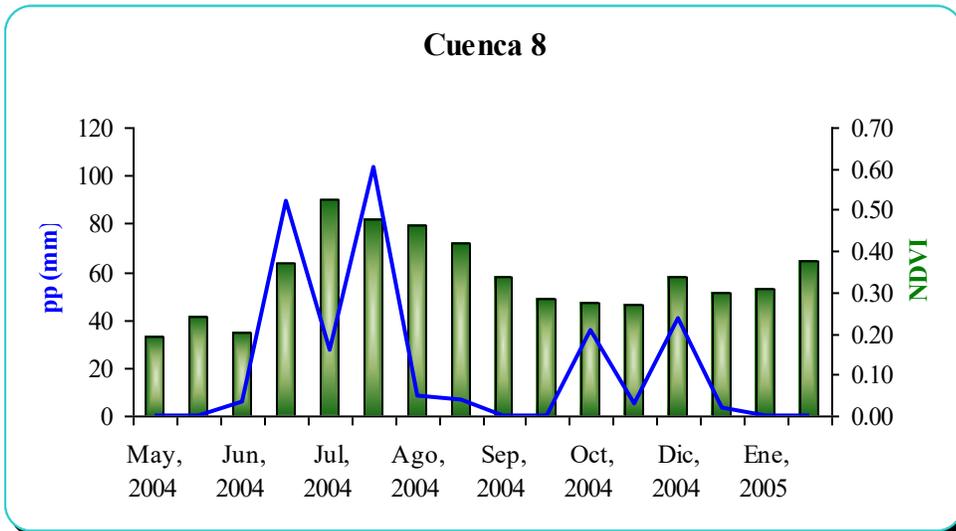
AII.5. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



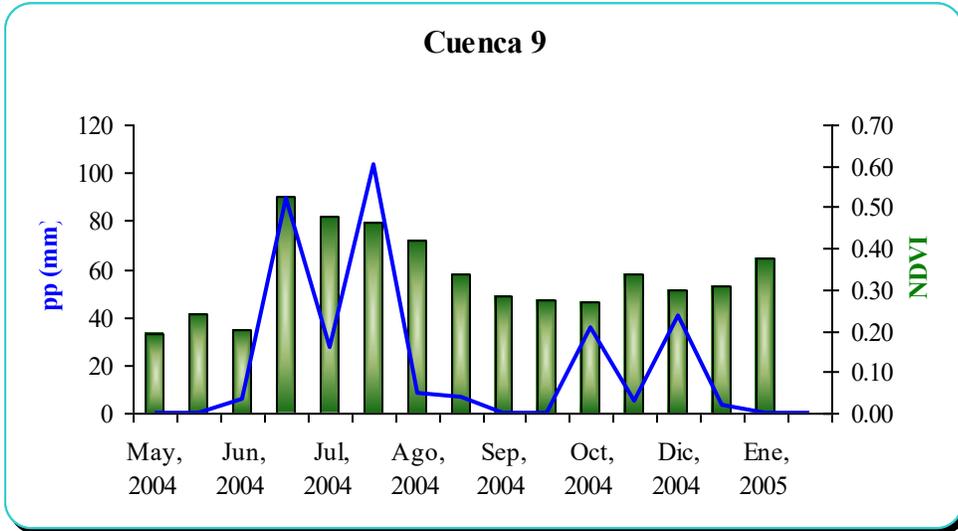
AII.6. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



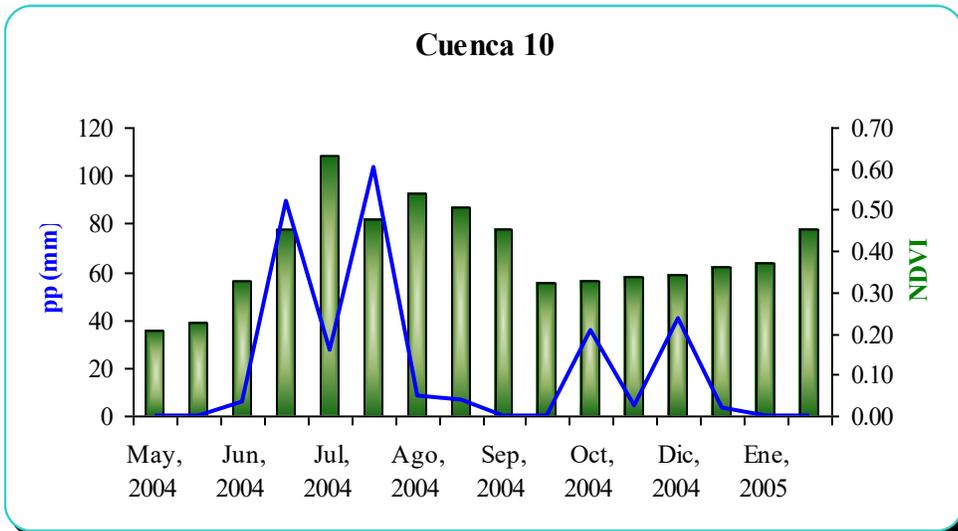
AII.7. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



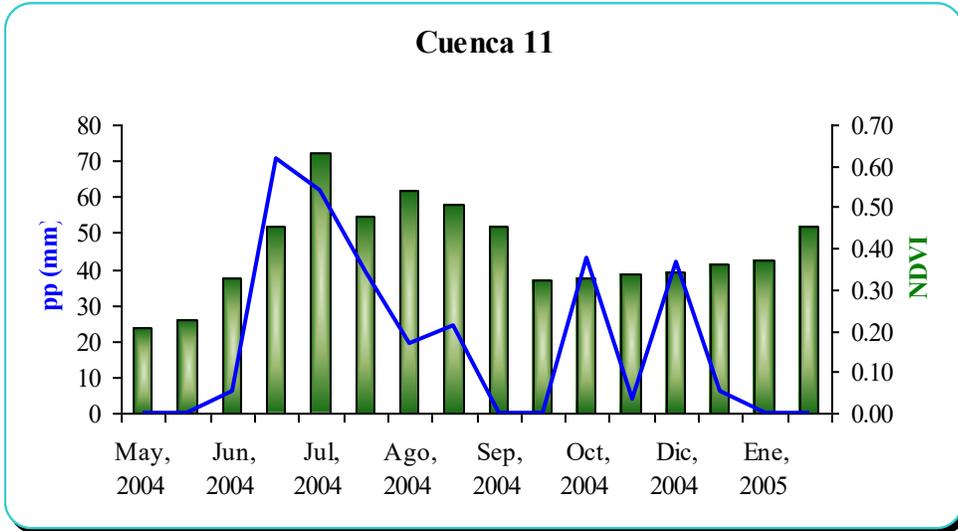
AII.8. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



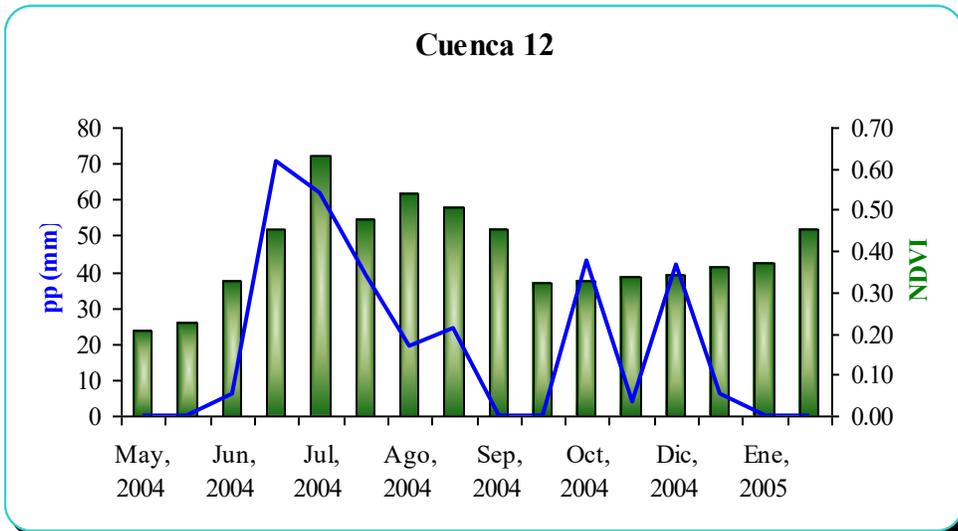
AII.9. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



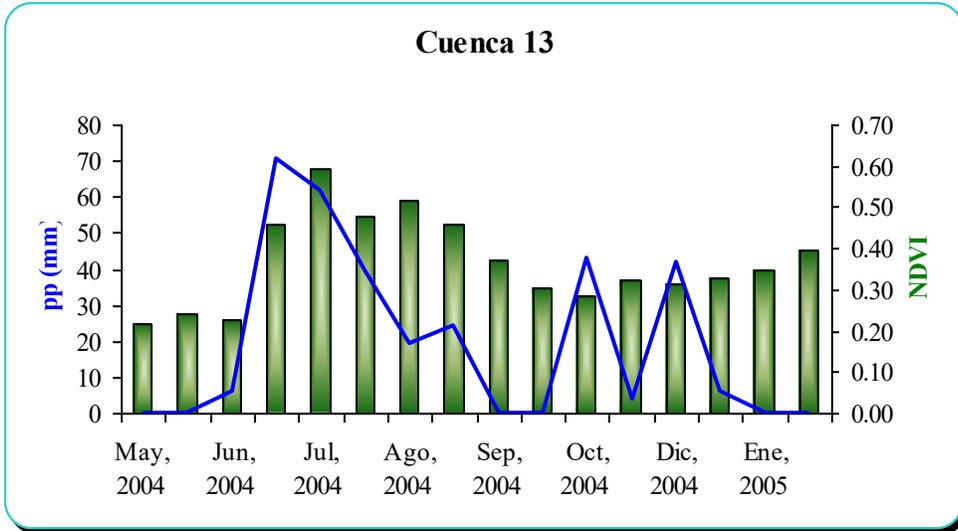
AII.10. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



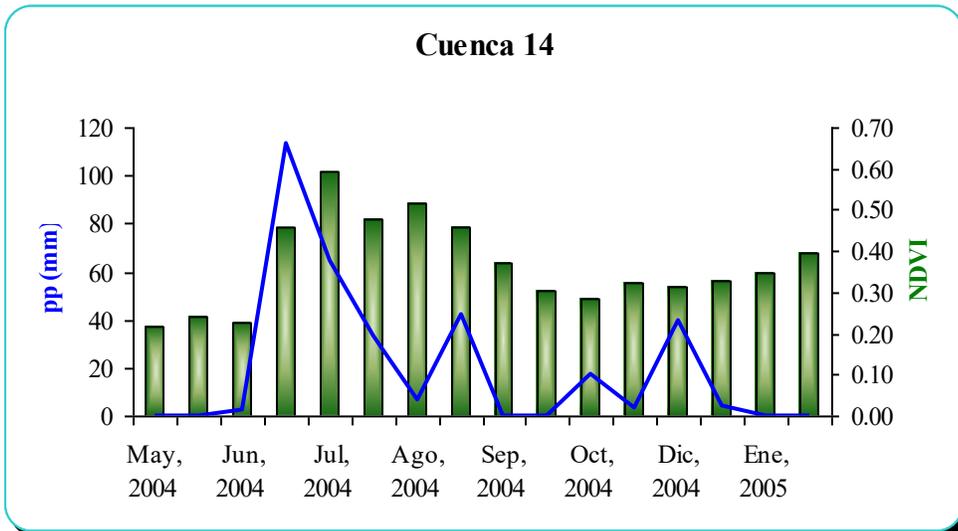
AII.11. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



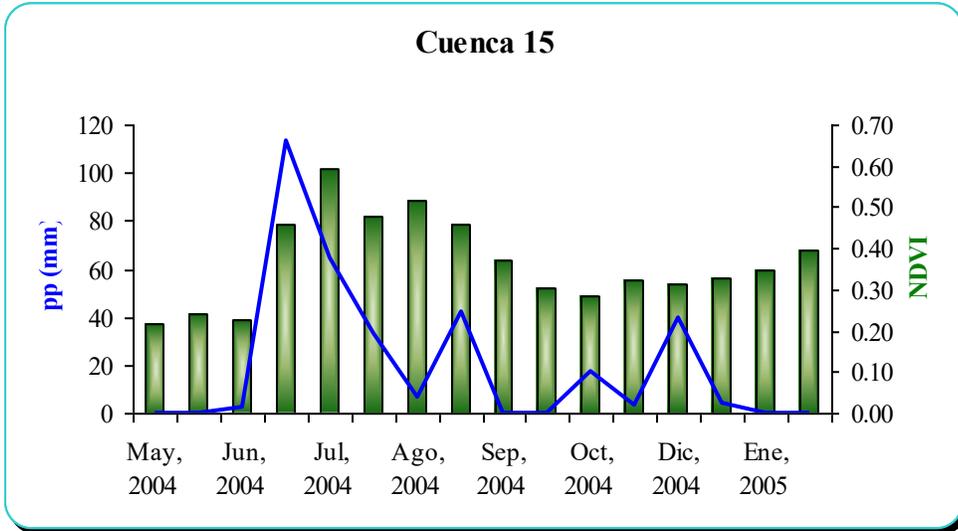
AII.12. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



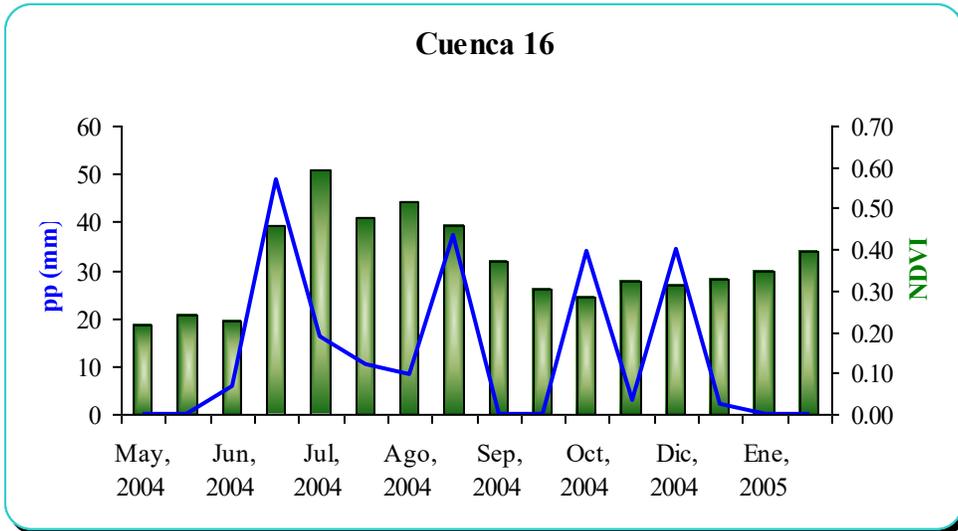
AII.13. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



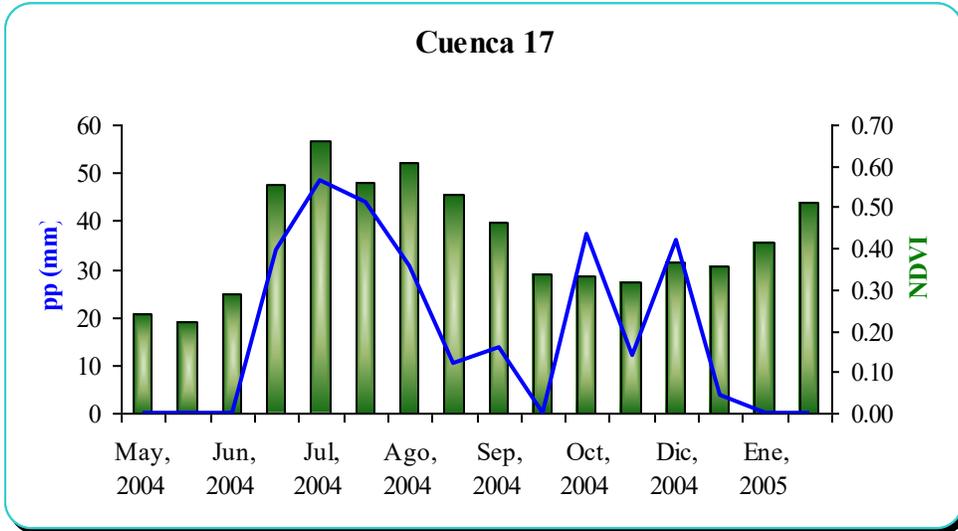
AII.14. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



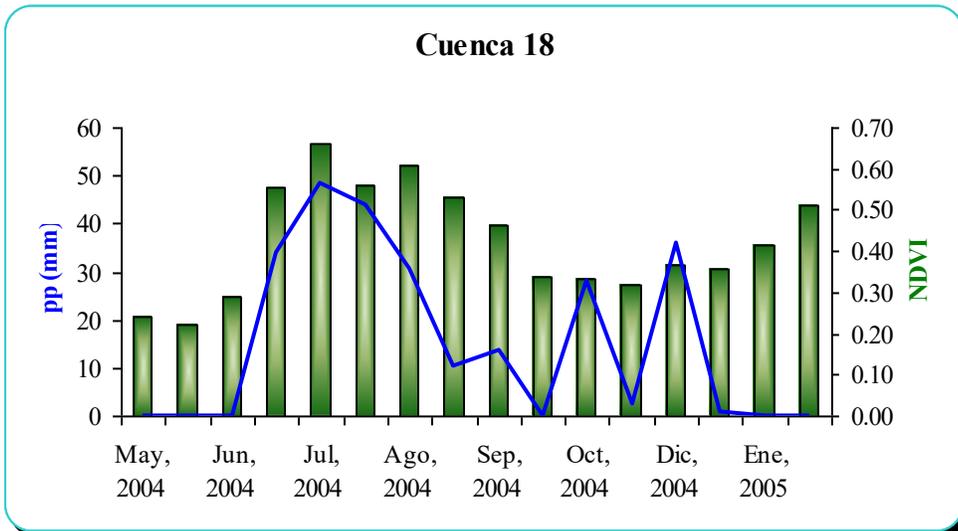
AII.15. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



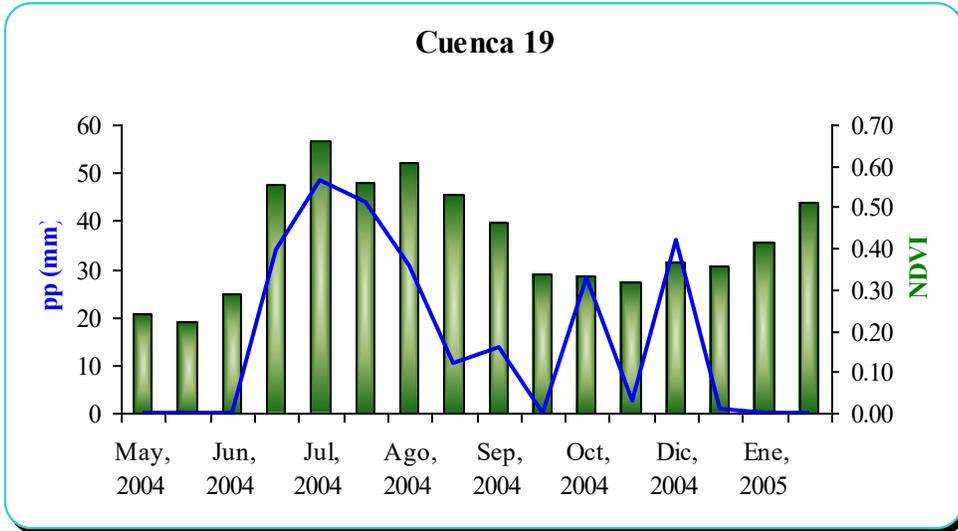
AII.16. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



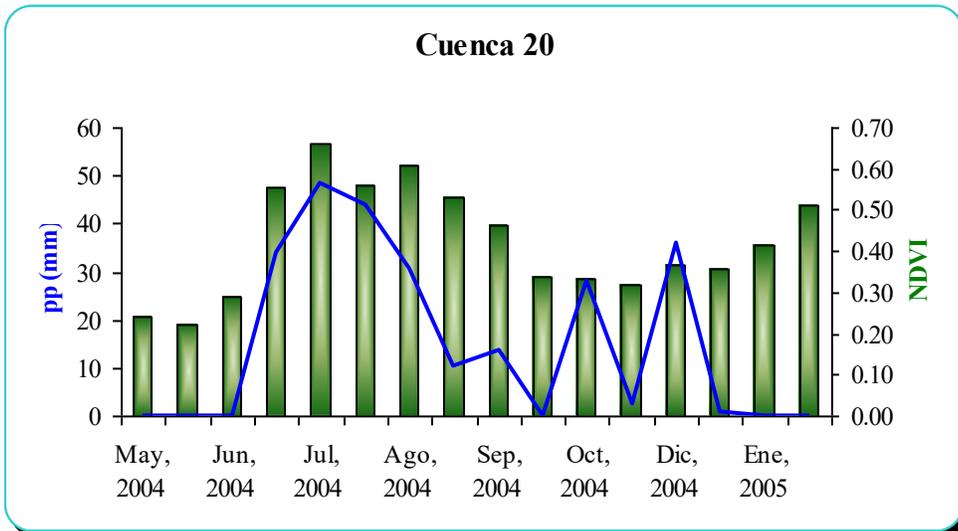
AII.17. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



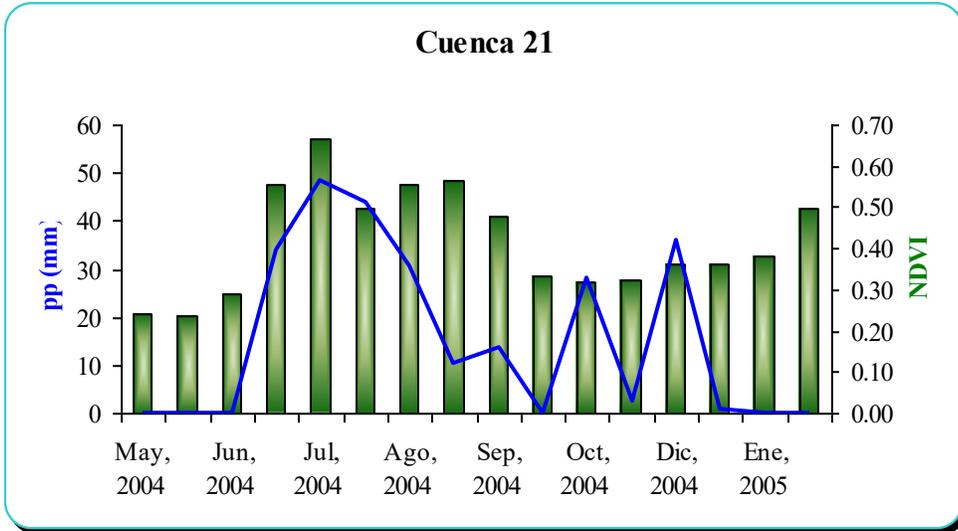
AII.18. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



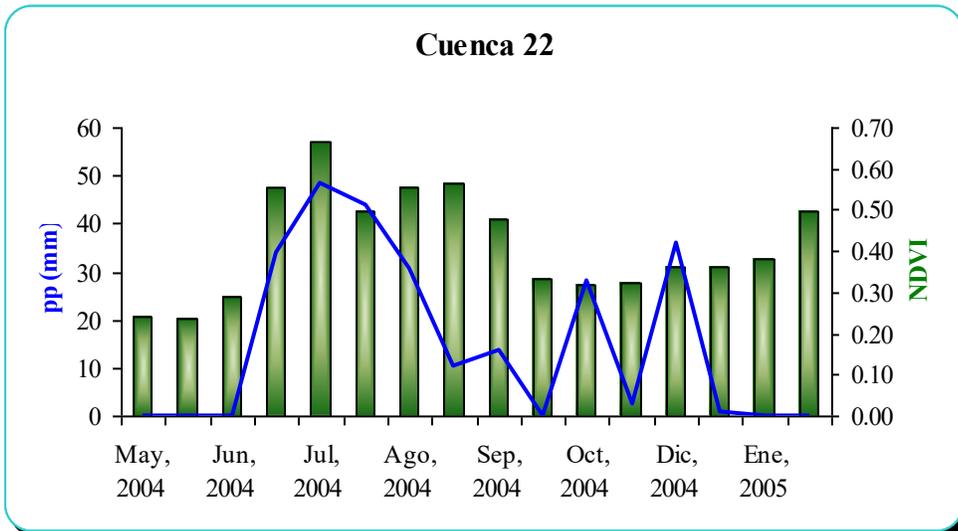
AII.19. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



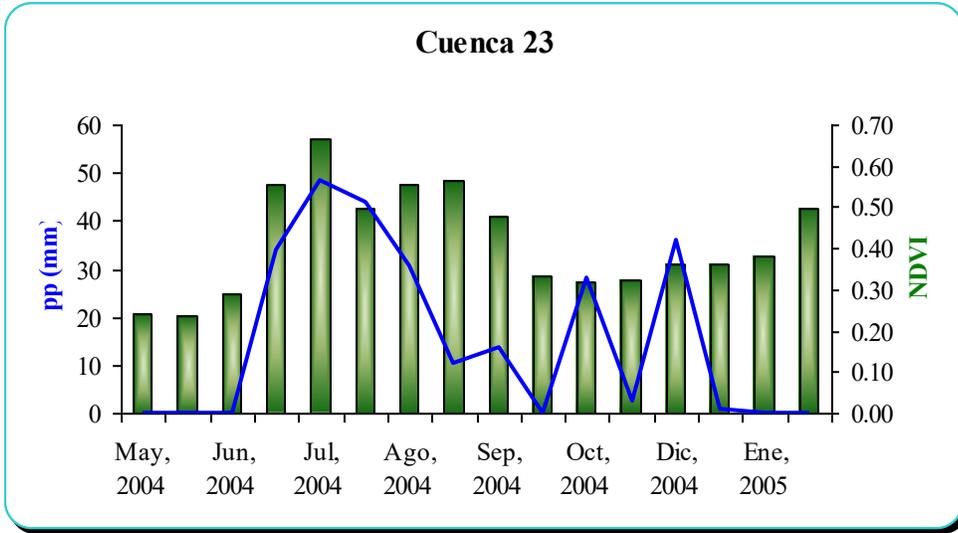
AII.20. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



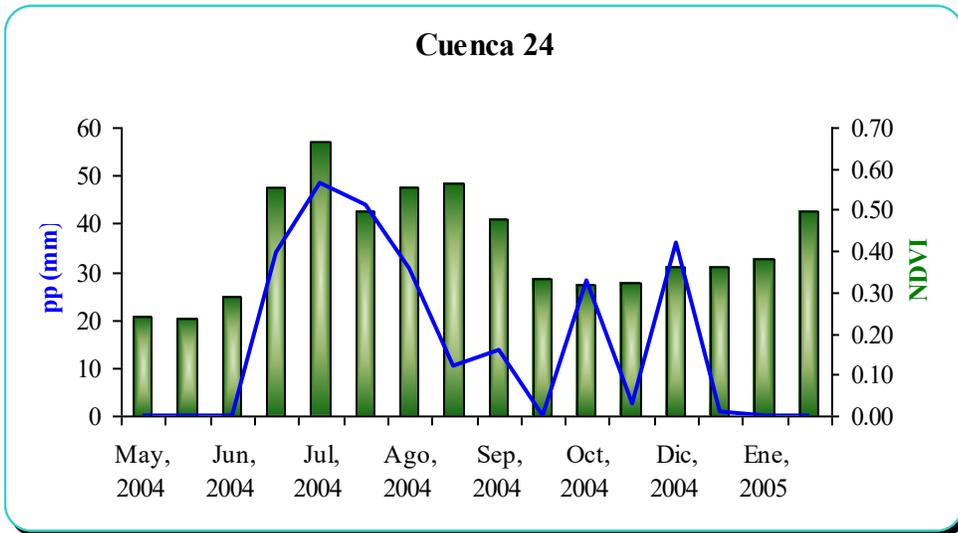
AII.21. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



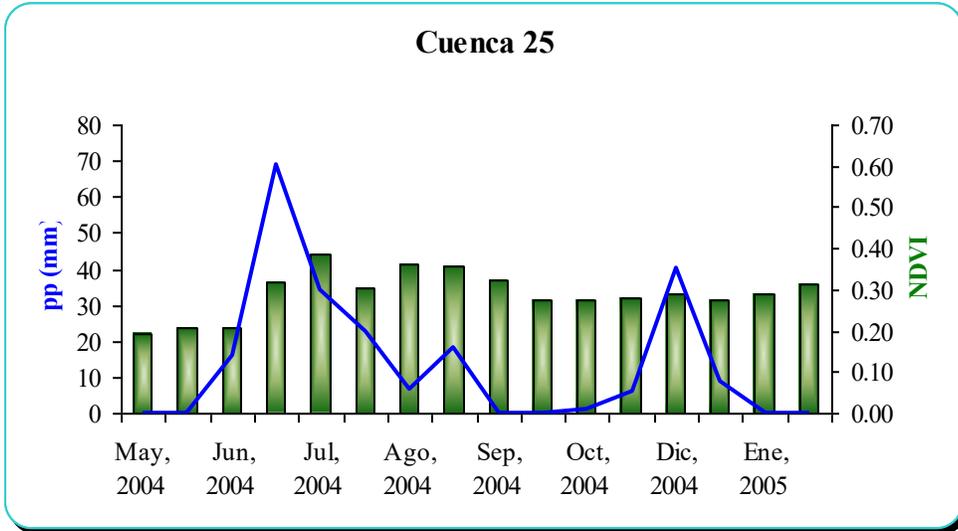
AII.22. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



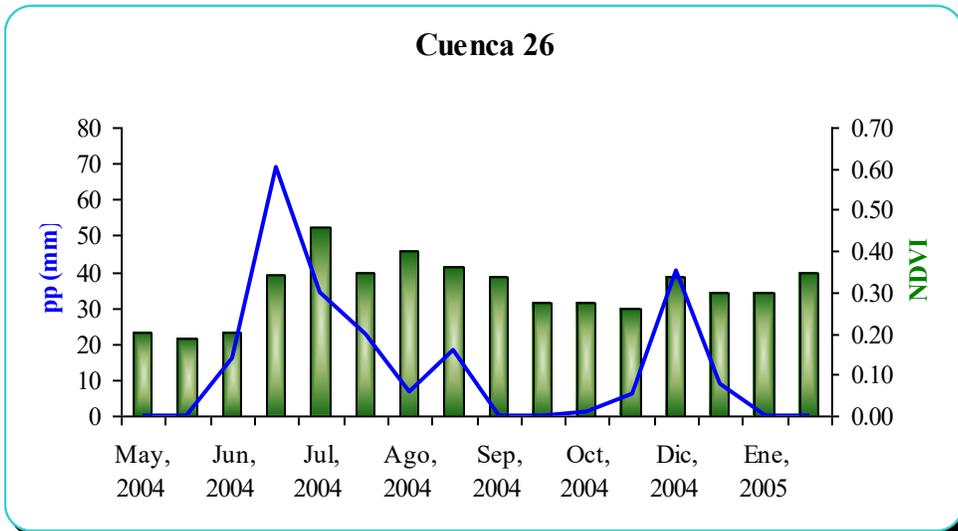
AII.23. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



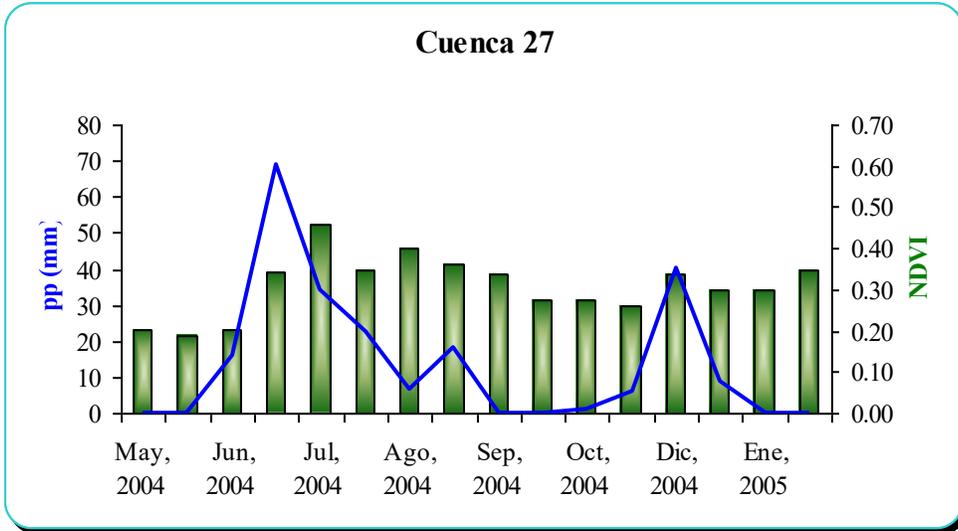
AII.24. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



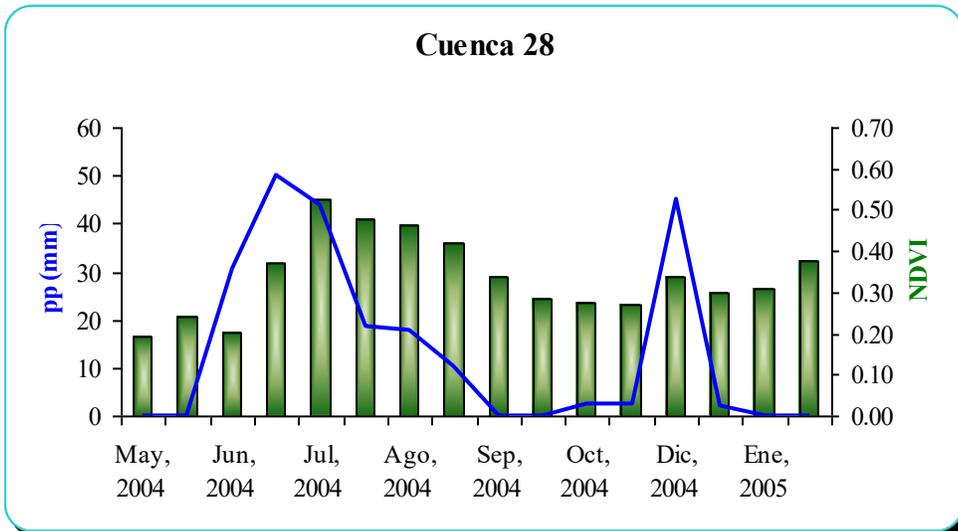
AII.25. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



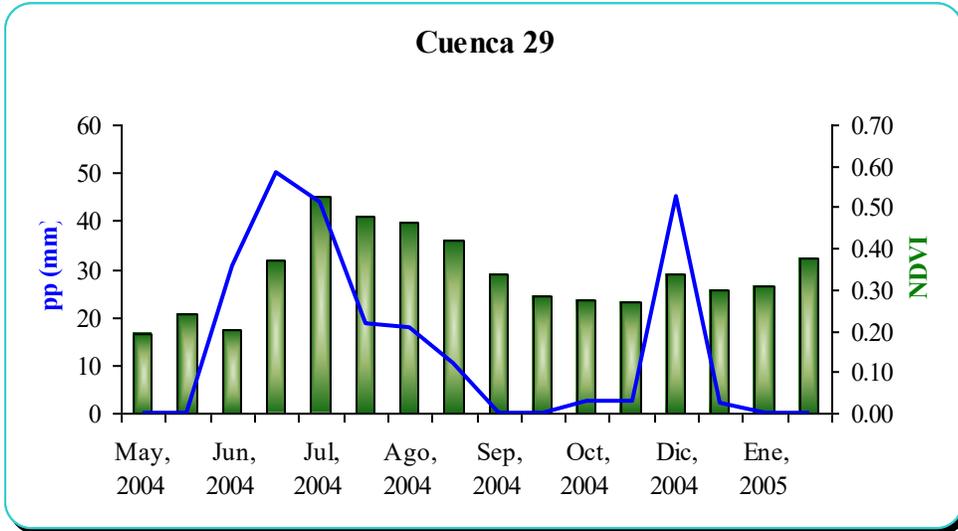
AII.26. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



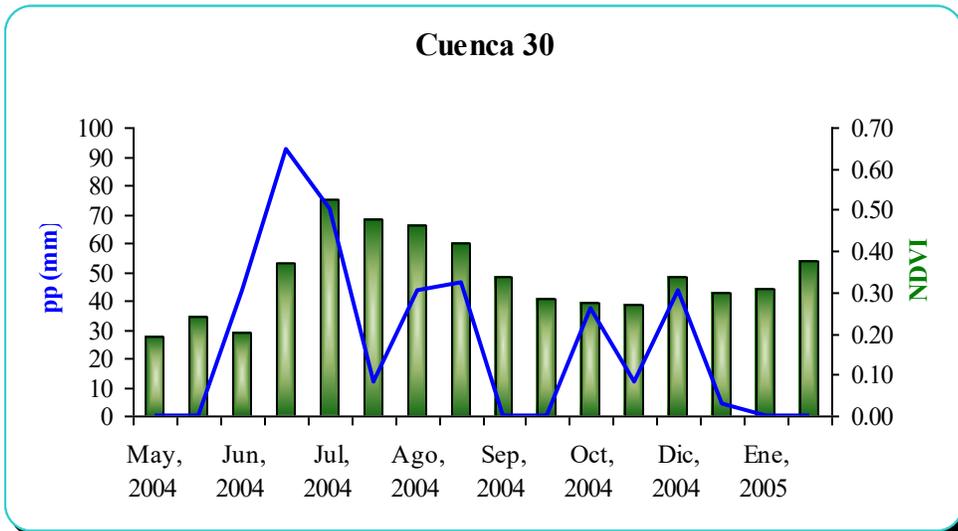
AII.27. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



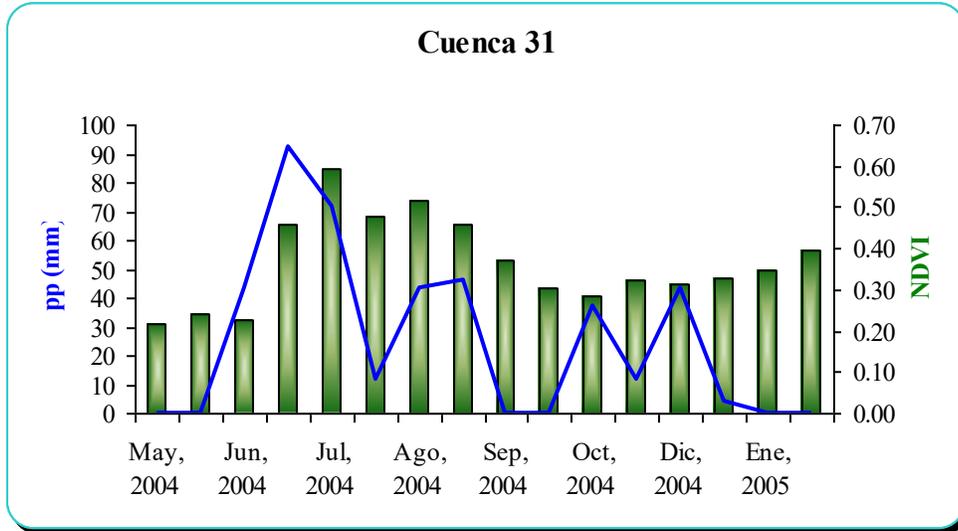
AII.28. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



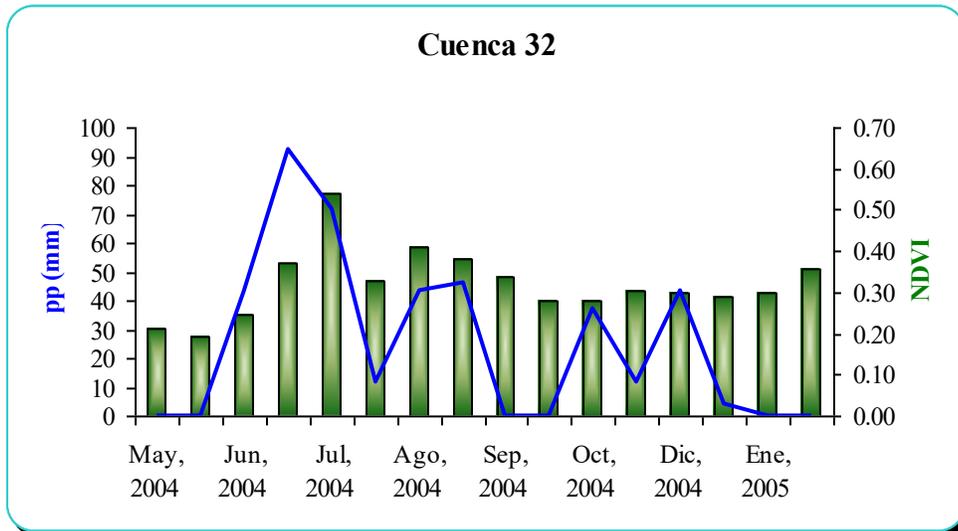
AII.29. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



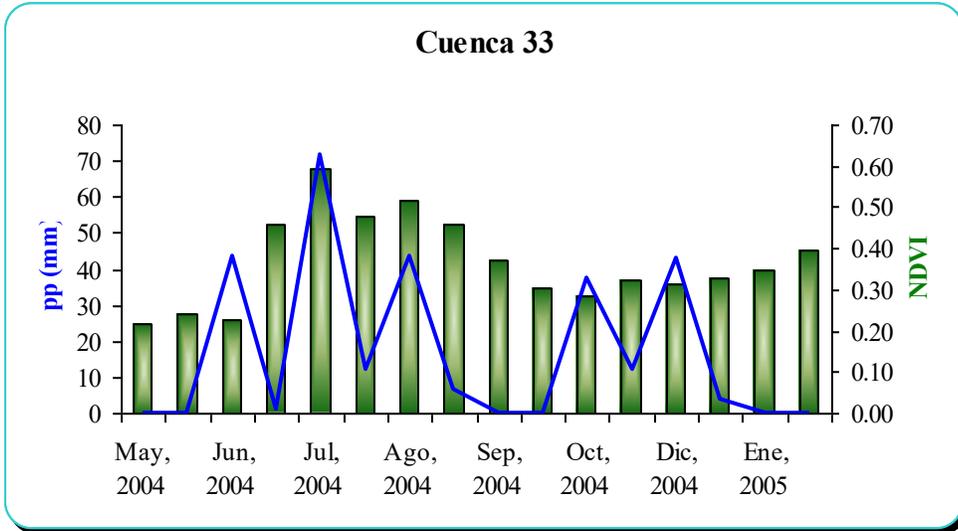
AII.30. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



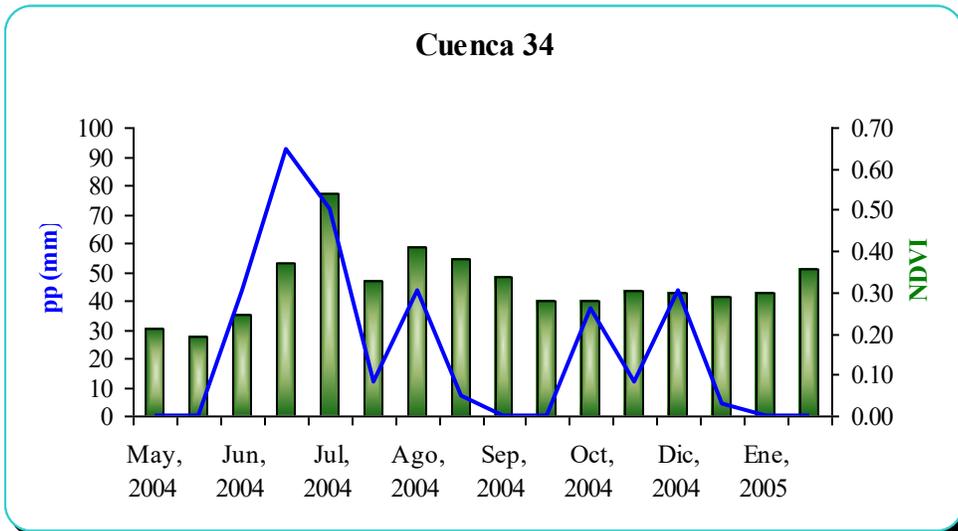
AII.31. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



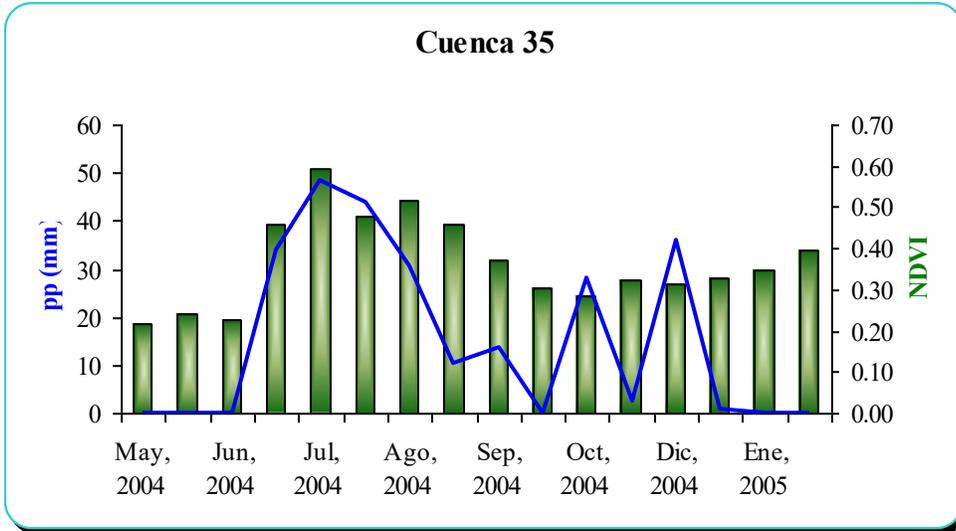
AII.32. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



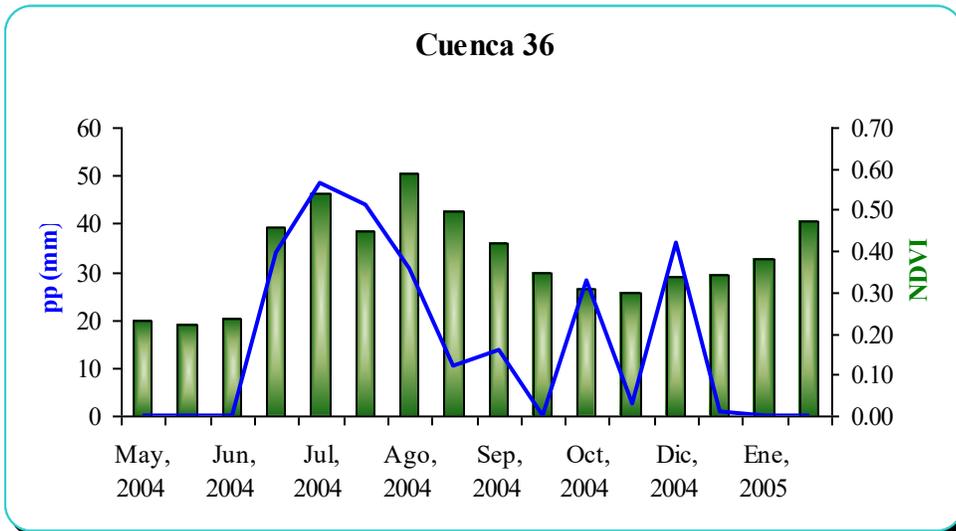
AII.33. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



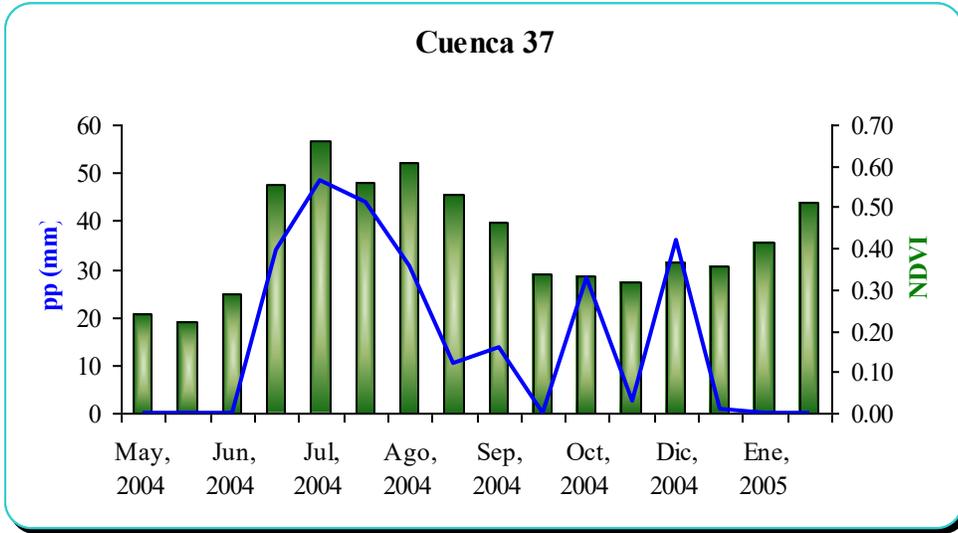
AII.34. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



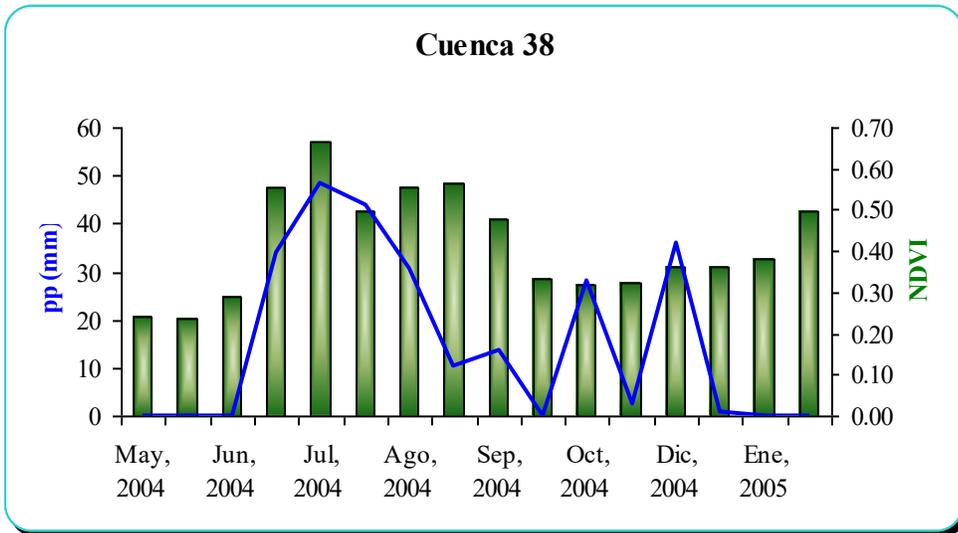
AII.35. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



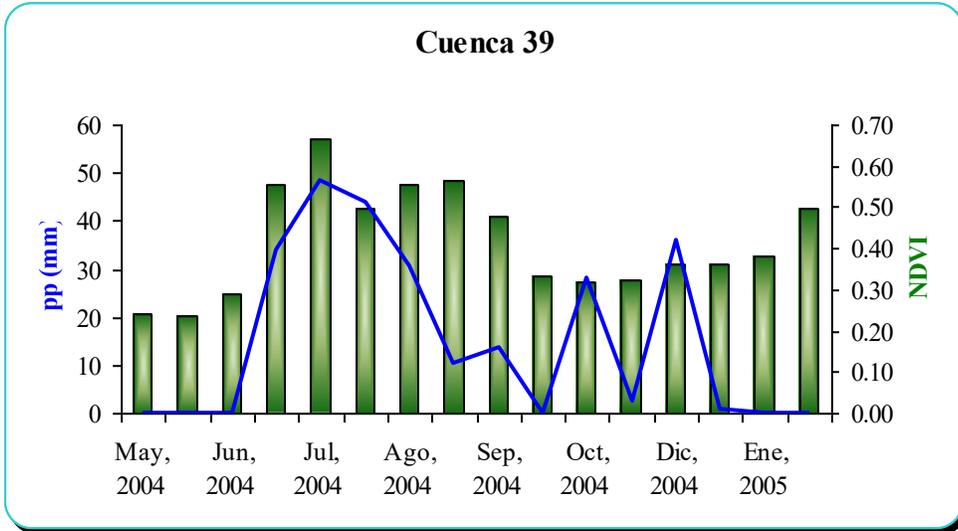
AII.36. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



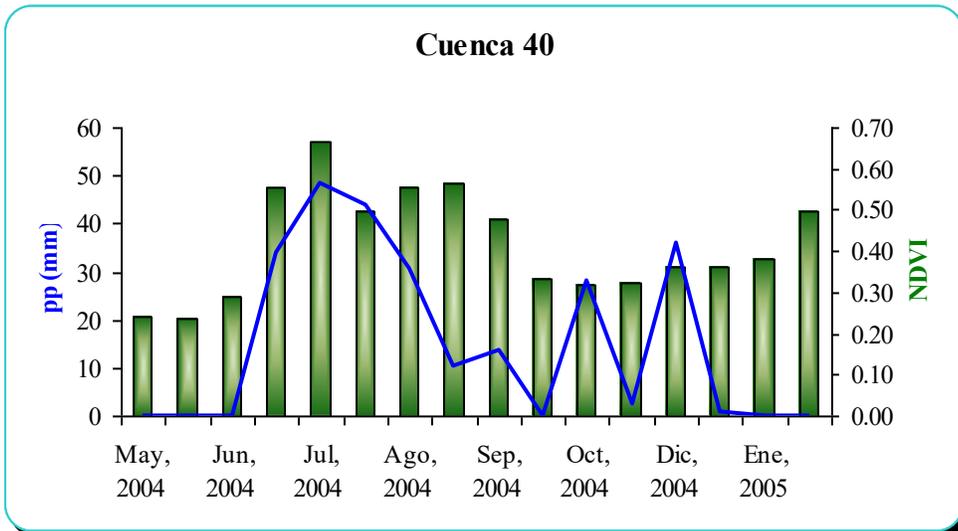
AII.37. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



AII.38. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación



AII.39. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación

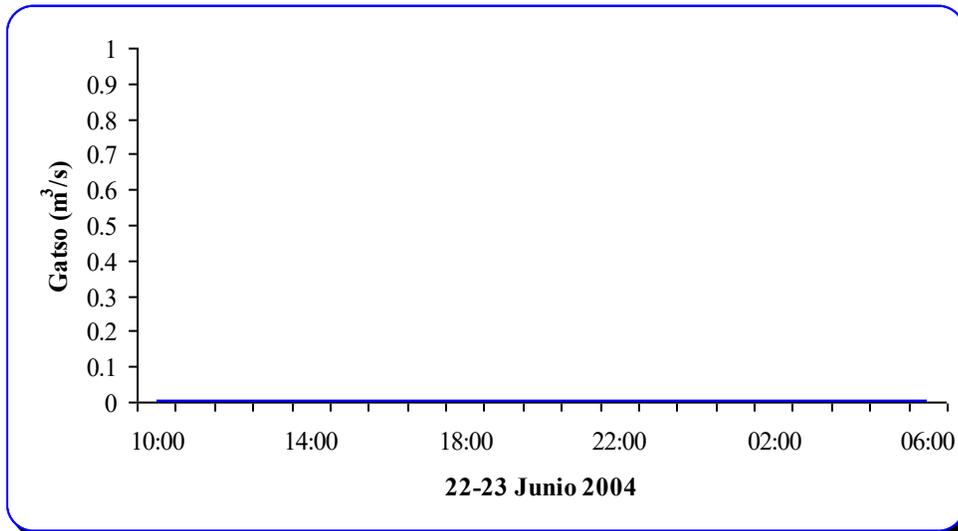


AII.40. Gráfica obtenida de los datos de NDVI contra precipitación

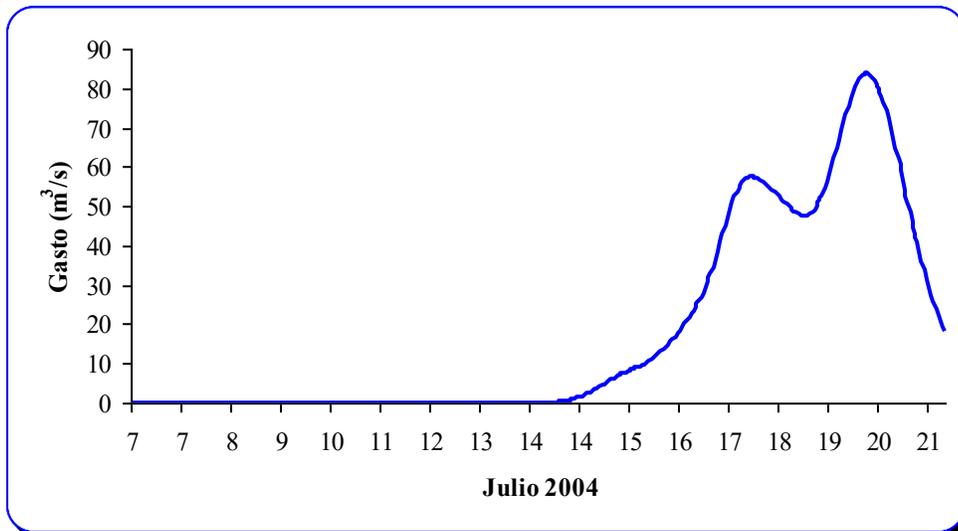
ANEXO III:

**GRÁFICAS DE ESCURRIMIENTO DE LAS
CORRIDAS DEL PROGRAMA HEC-HMS**

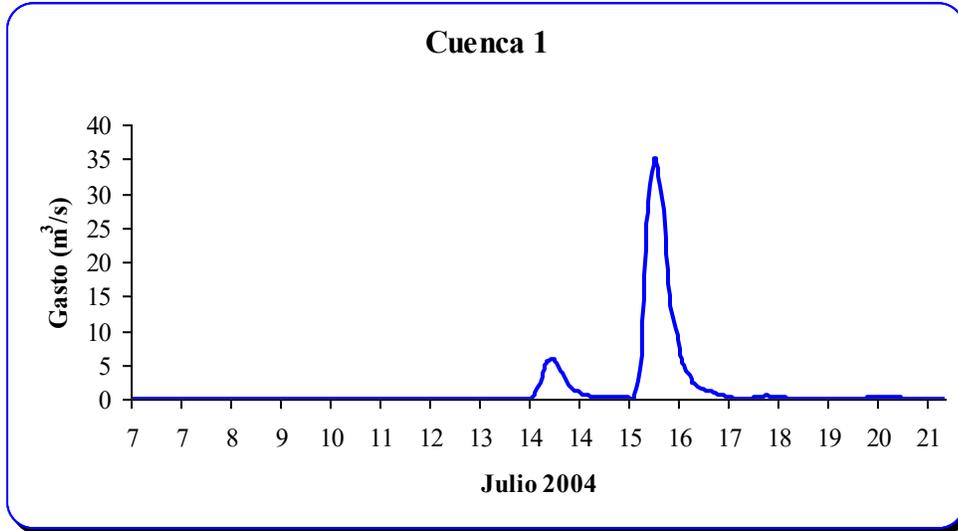
Para las corridas donde se presento gasto, se muestran algunos ejemplos de las cuencas en las cuales se presento el gasto.



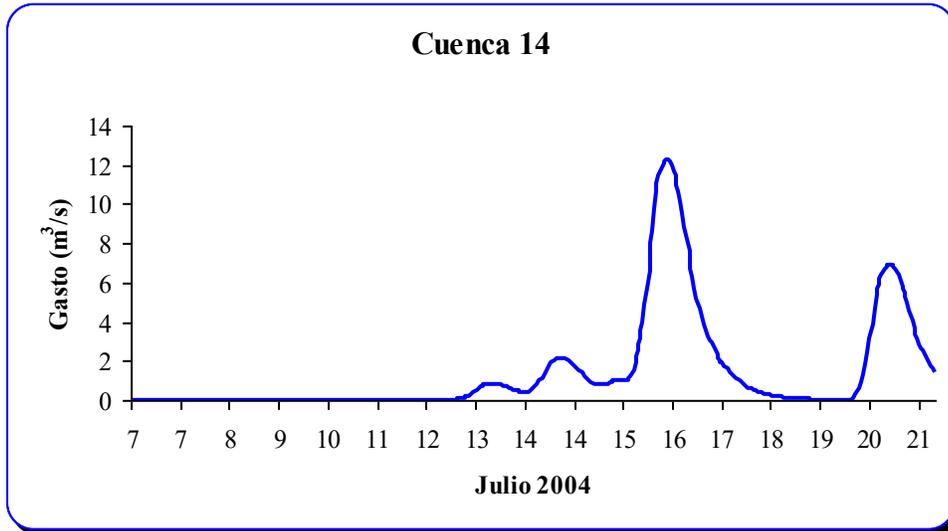
AIII.1. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 1



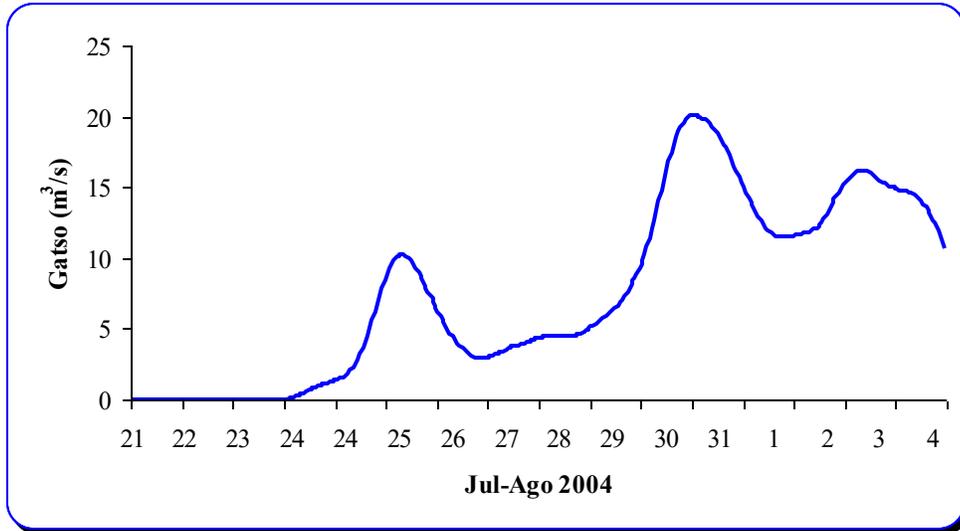
AIII.2. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 2



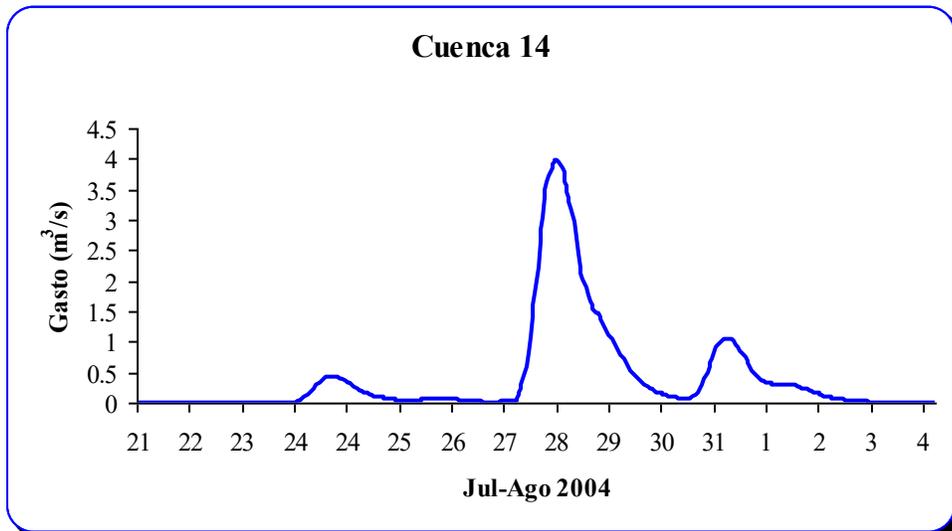
AIII.3. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 2, cuenca 1



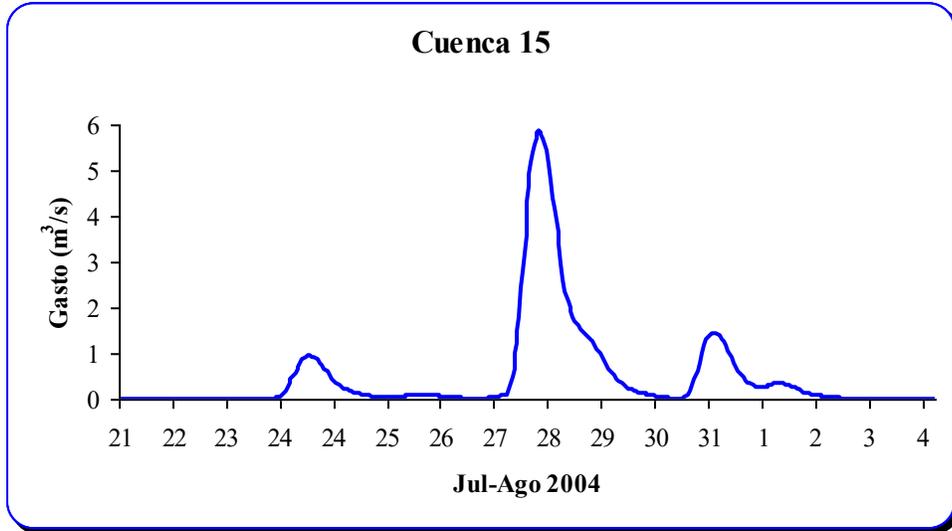
AIII.4. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 2, cuenca 14



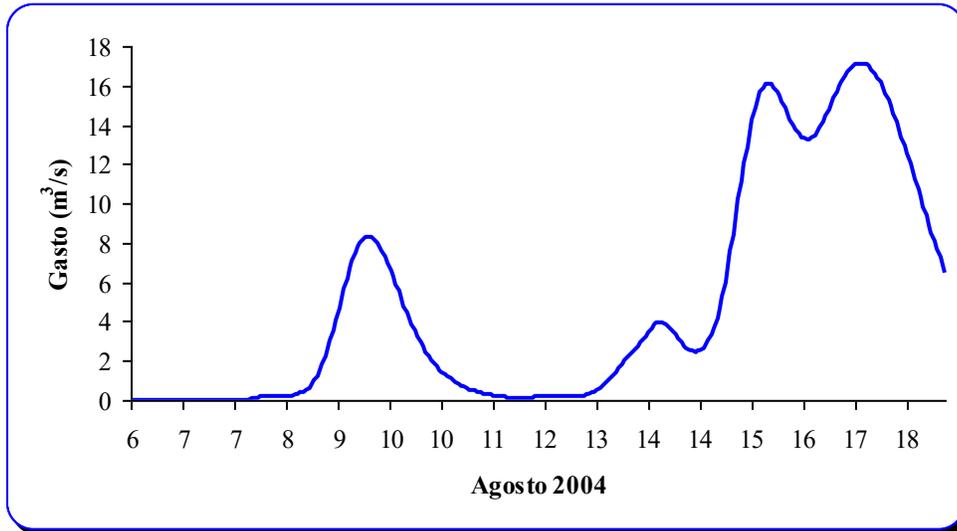
AIII.5. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 3



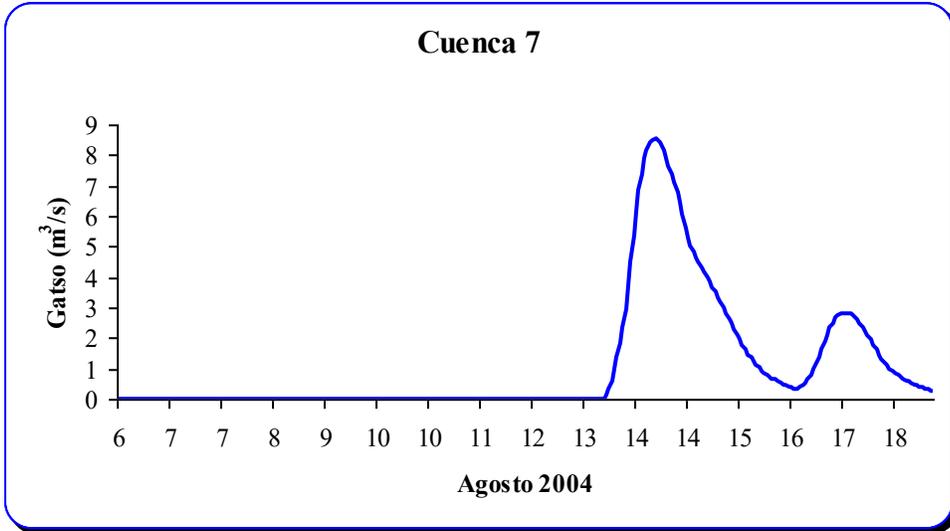
AIII.6. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 3, cuenca 14



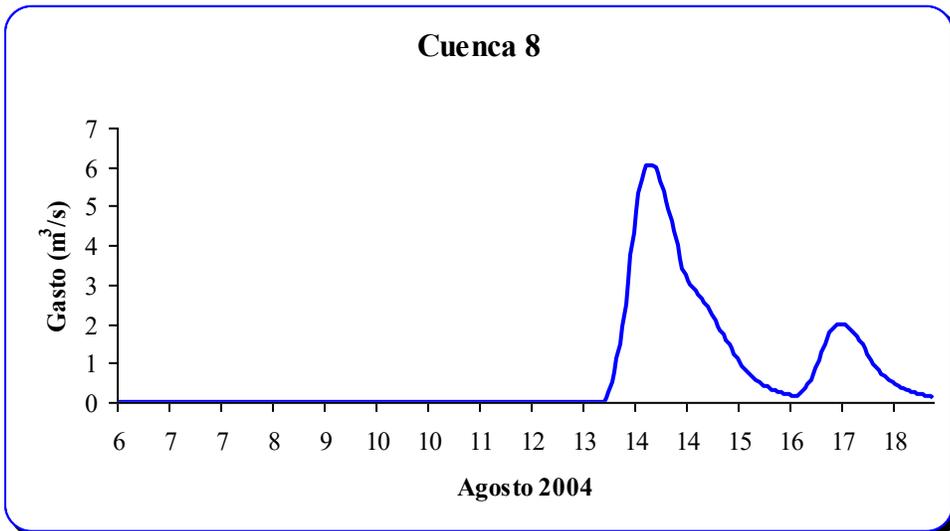
AIII.7. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 3, cuenca 15



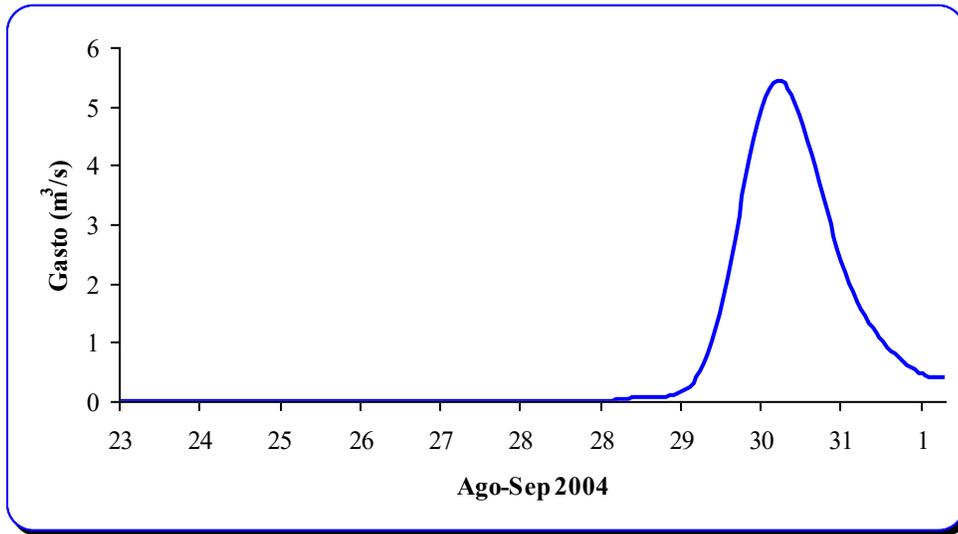
AIII.8. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 4



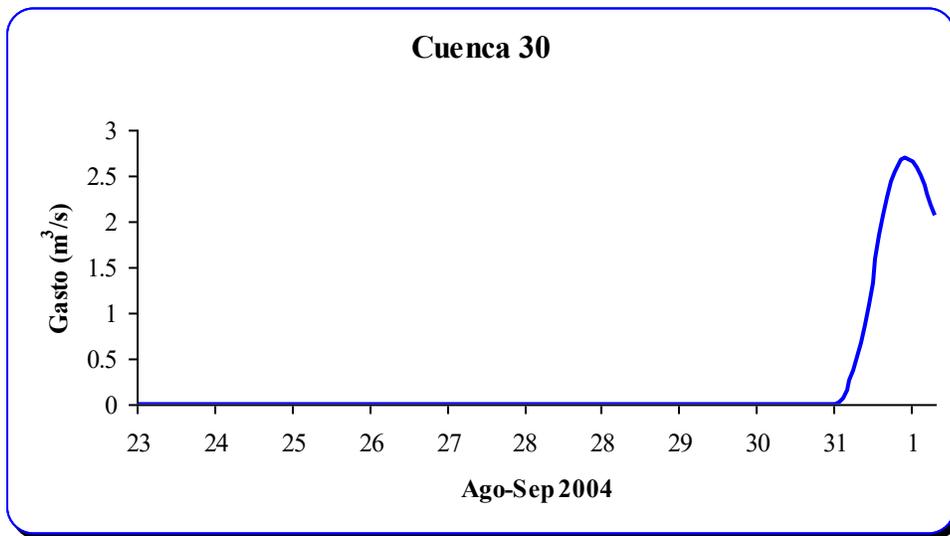
AIII.9. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 4, cuenca 7



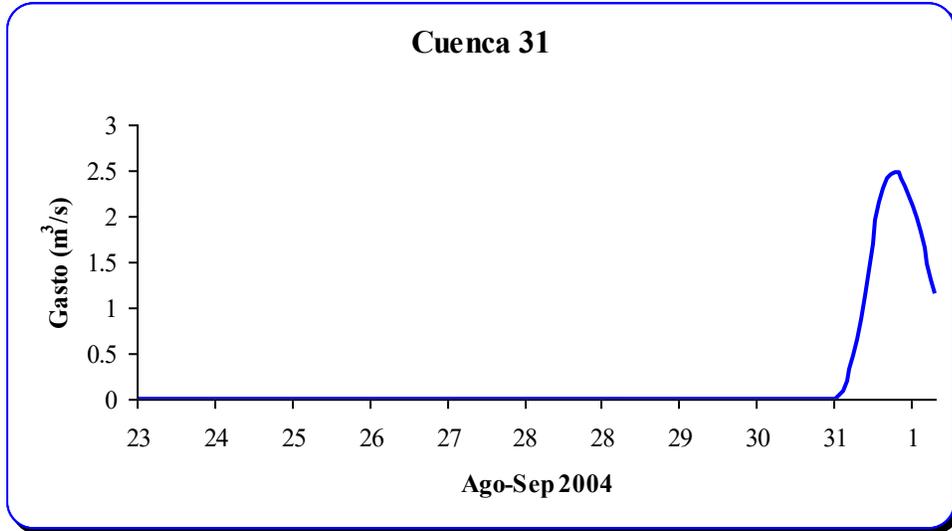
AIII.10. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 4, cuenca 8



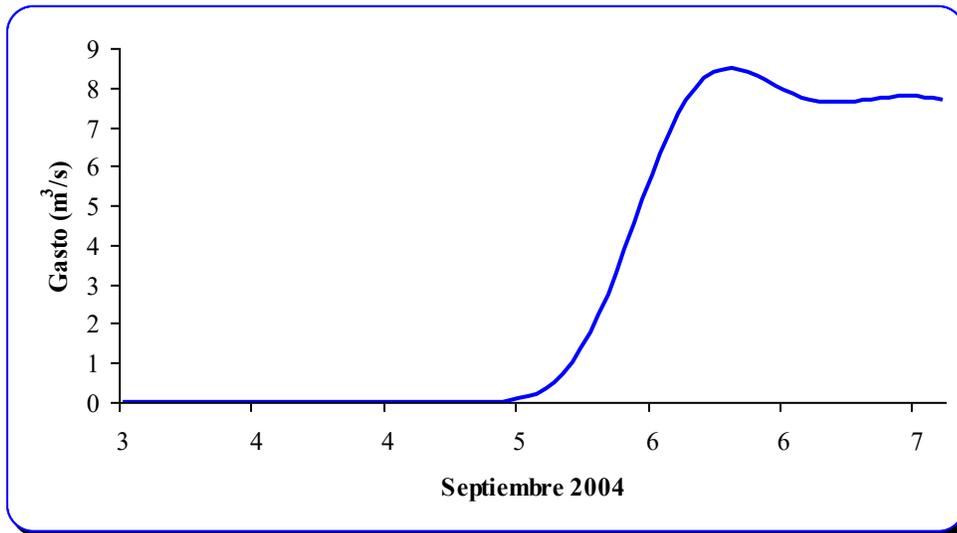
AIII.11. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 5



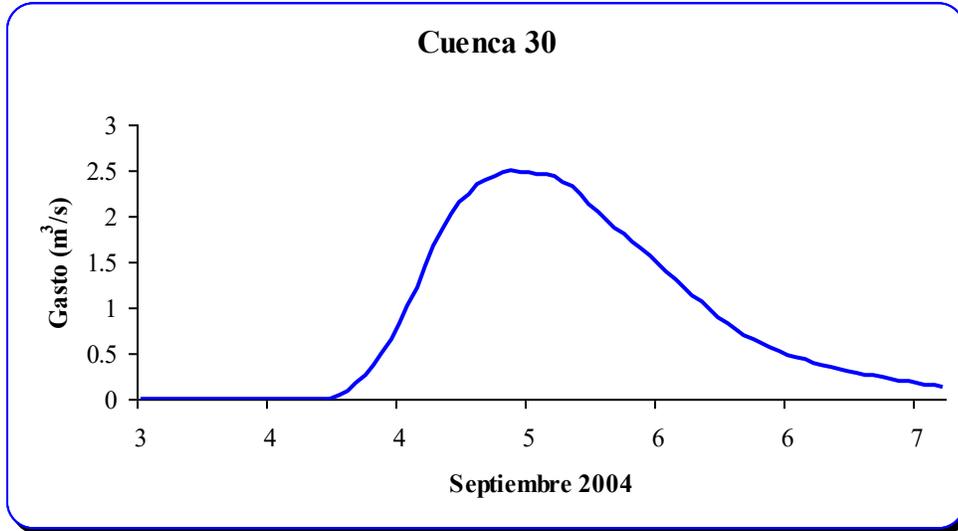
AIII.12. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 5, cuenca 30



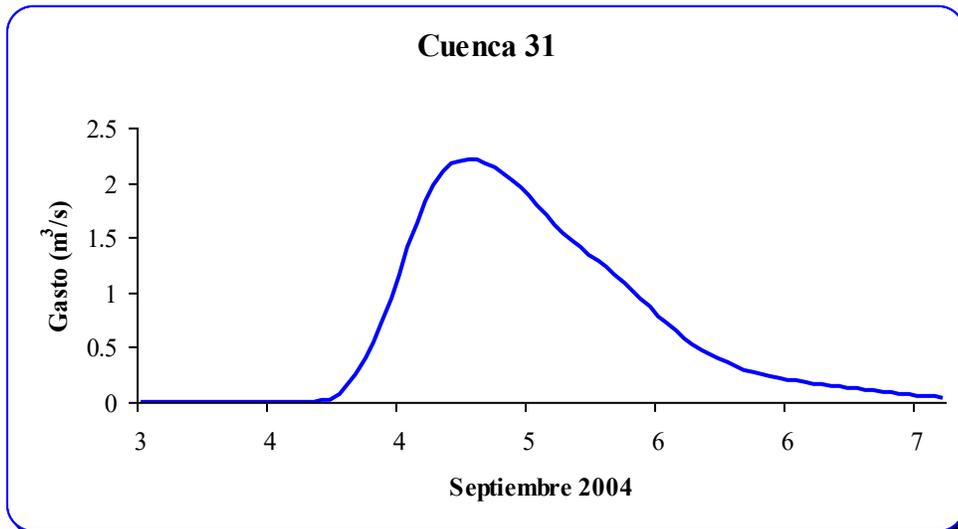
AIII.13. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 5, cuenca 31



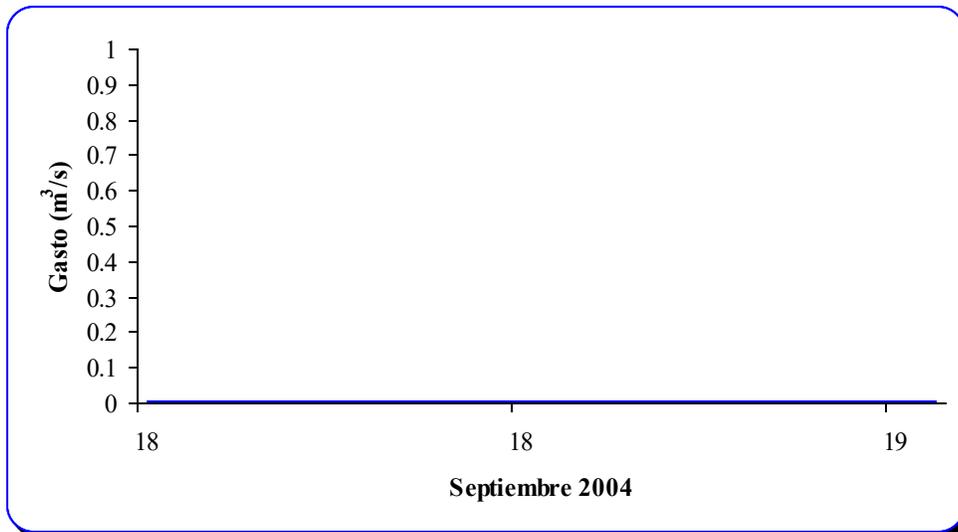
AIII.14. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 6



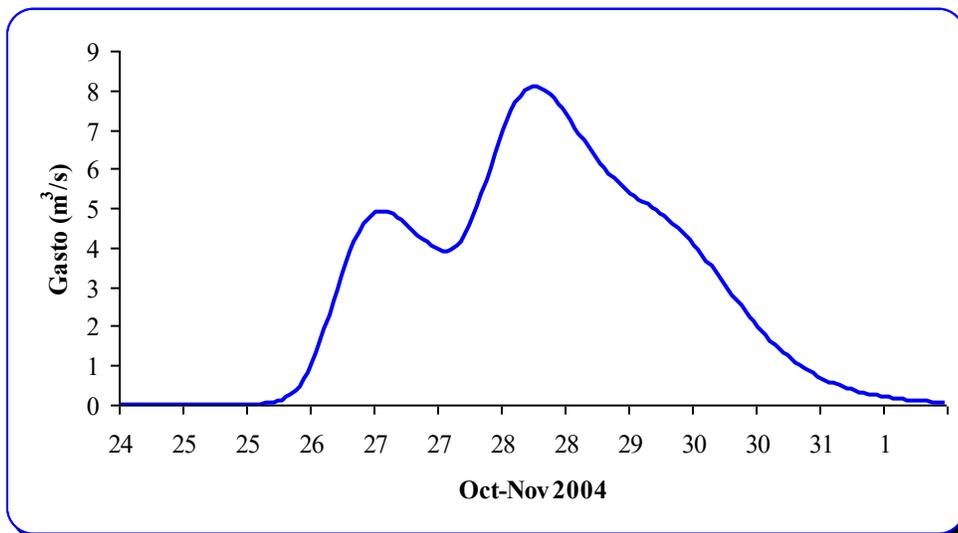
AIII.15. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 6, cuenca 30



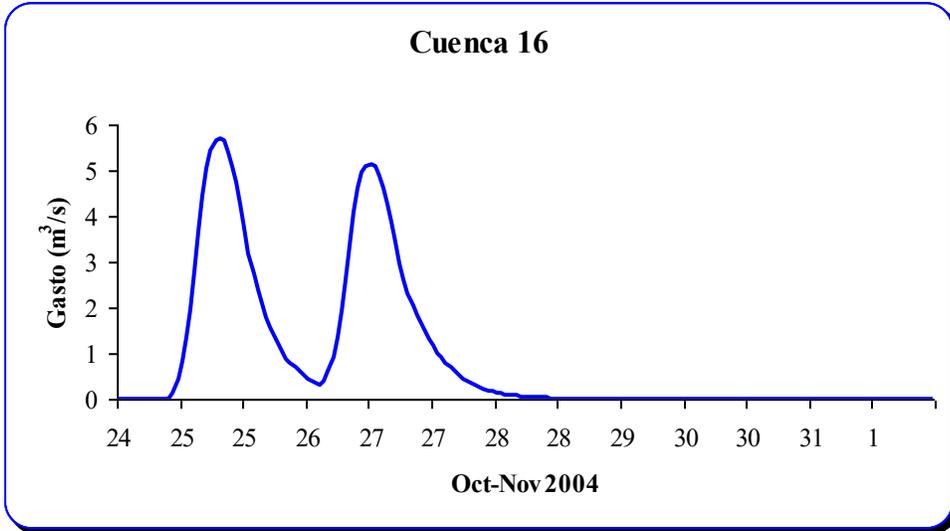
AIII.16. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 6, cuenca 31



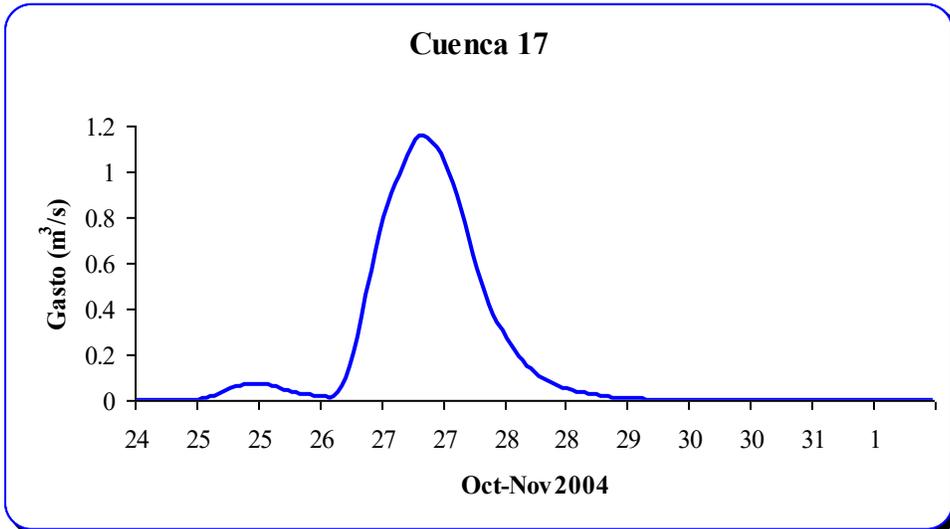
AIII.17. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 7



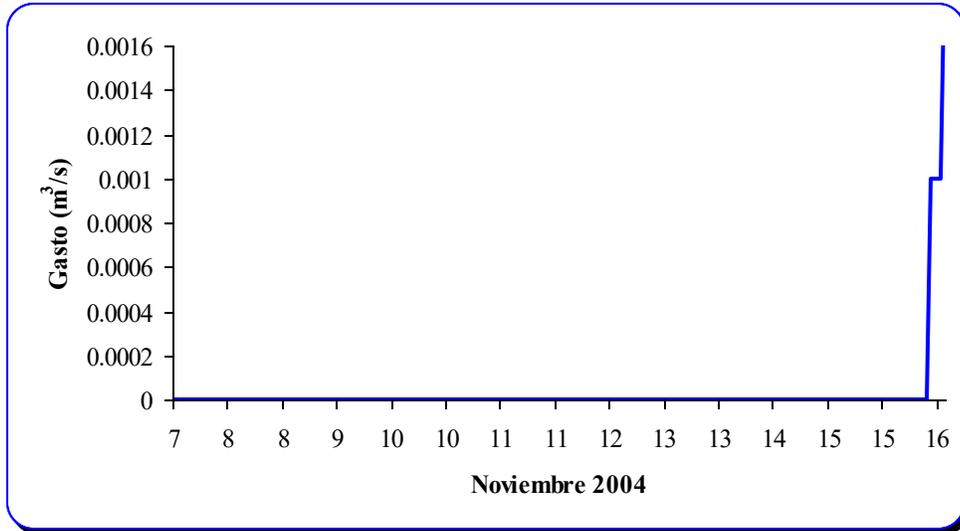
AIII.18. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 8



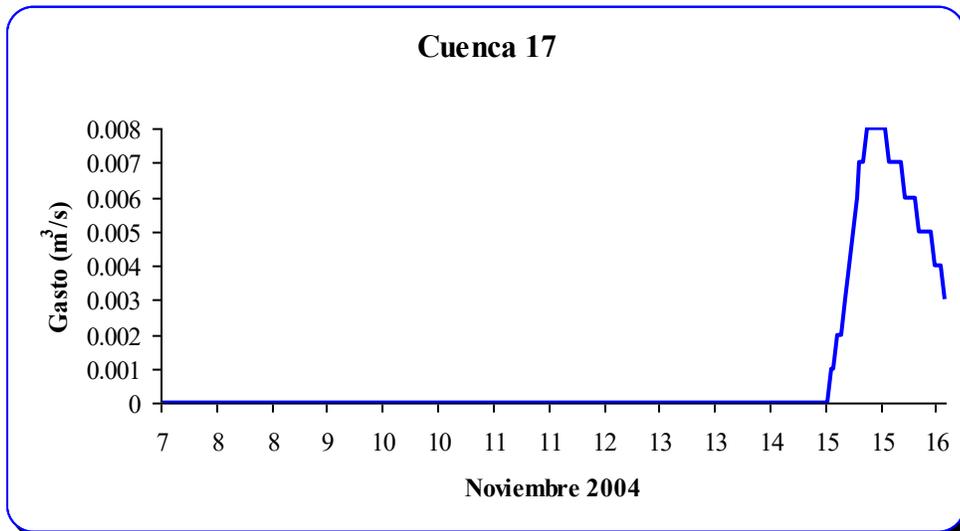
AIII.19. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 8, cuenca 16



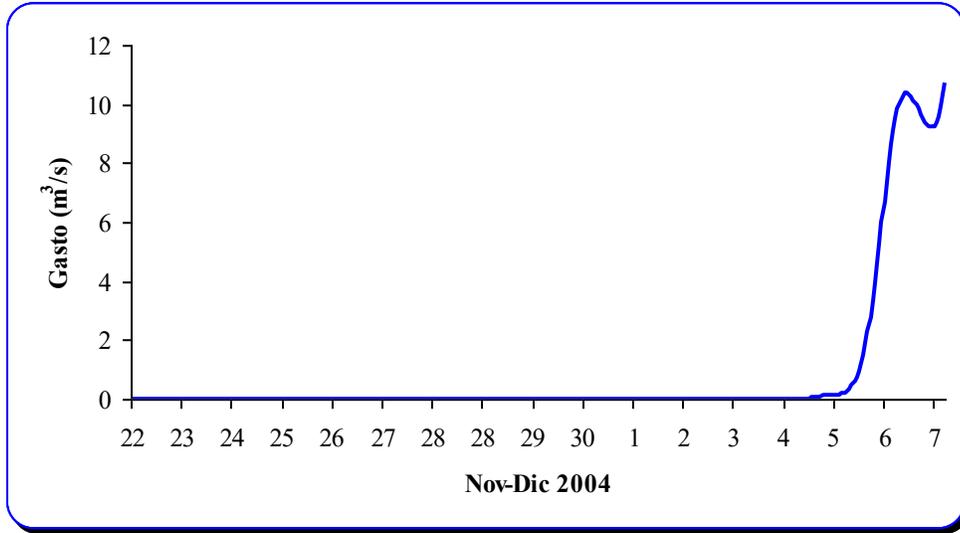
AIII.20. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 8, cuenca 17



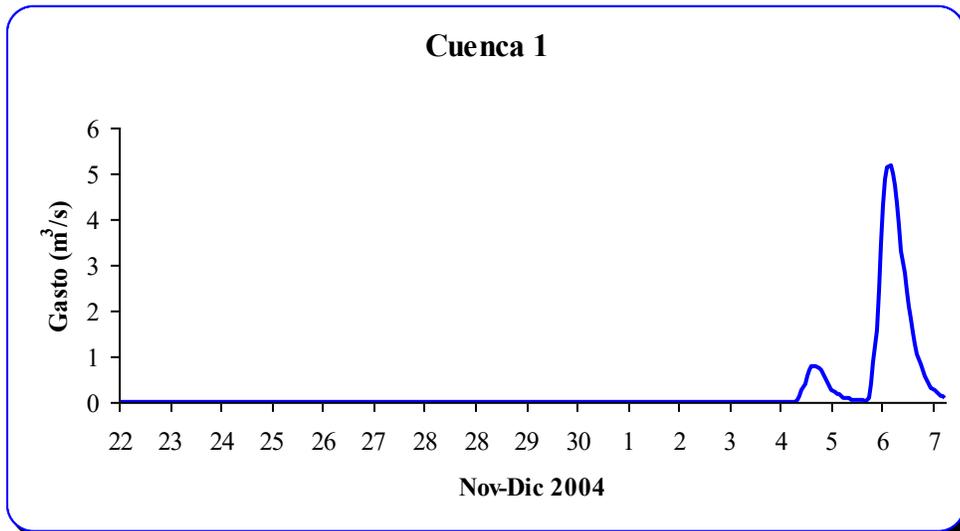
AIII.21. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 9



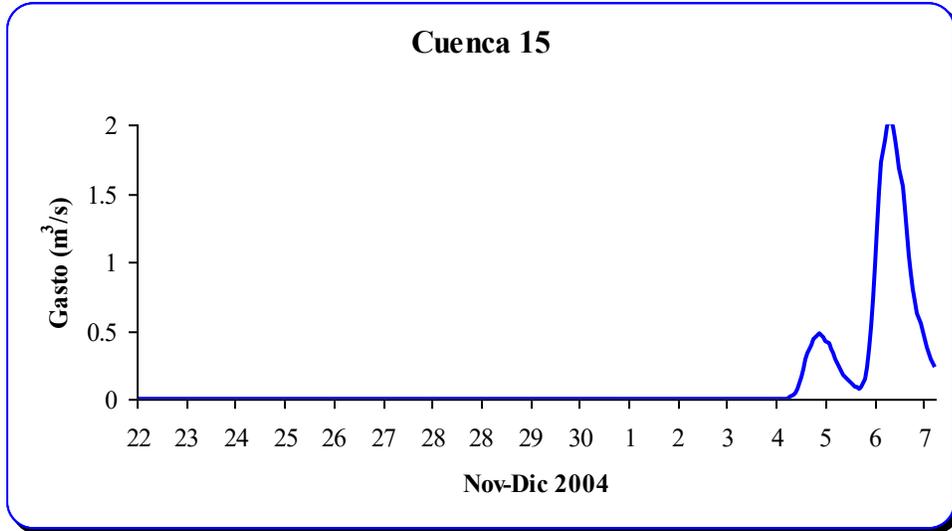
AIII.22. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 9, cuenca 17



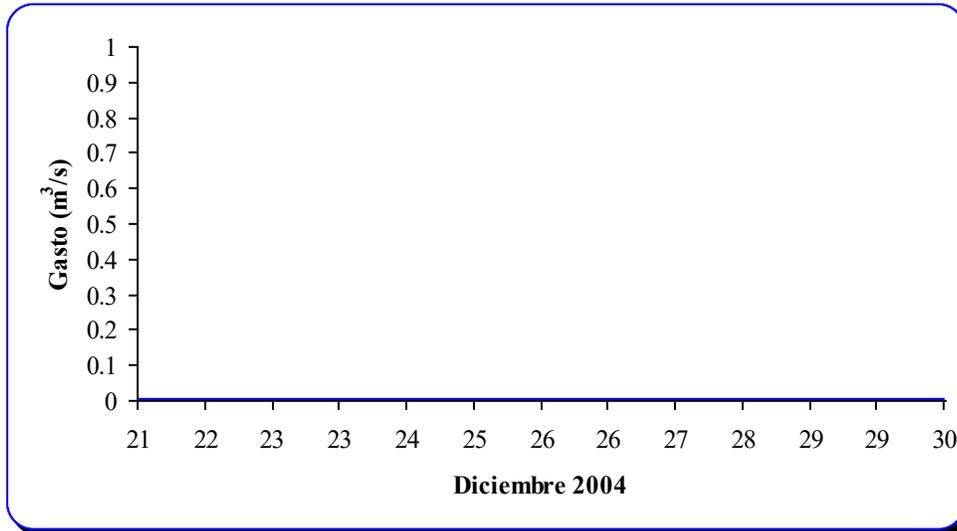
AIII.23. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 10



AIII.24. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 10, cuenca 1



AIII.25. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 10, cuenca 15



AIII.26. Hidrograma generado por el modelo HEC-HMS durante la corrida 11