



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE
INGENIERÍA CIVIL**



**“MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA INCLUYENDO
ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES”**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADA POR:

ALEJANDRA CORREA GONZÁLEZ

ASESOR:

DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

**TESIS APOYADA POR EL CONSEJO ESTATAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEL ESTADO DE MICHOACÁN**



MORELIA MICHOACÁN

MAYO 2012

DEDICATORIA

Dios por darme las oportunidades que he tenido, así como todas sus bendiciones.

Mis padres Oliva González Téllez y J. Sacramento Correa Correa, por estar a mi lado, su amor, la formación y persona que soy.

Mis abuelitos Francisca Téllez Sandoval e Isidro González Bernal, por su amor y apoyo.

Mis hermanas Claudia y Evelyn, por apoyarme, creer en mí y estar conmigo en las buenas y en las malas.

El amor de mi vida Gerardo Ávila Ávila, por creer en mí, su apoyo y amor.

Mi hermosa niña, Lia Alejandra por ser una alegría en mi vida y motivarme a terminar mi tesis

Mis hermanos por estar siempre conmigo, su apoyo y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del estado de Michoacán por la beca otorgada para la realización del presente trabajo.

Al Ing. Wilfrido Vallejo Domínguez, Jefe Del Departamento De Aguas Superficiales E Ingeniería De Ríos, Ing. Juan Rangel Camarena, Jefe del Departamento de Calidad del Agua y Miguel Ángel Negrete Meza, Jefe Del Departamento De Aguas Subterráneas, por su atención e información proporcionada por parte de la CONAGUA.

Al Ing. Guillermo Eugenio Pérez-Negrón, Gerente Operativo de la Comisión de Cuenca del Lago de Cuitzeo, por su buena disposición y datos.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe por todo la paciencia, el apoyo y el conocimiento que me ha tenido, ya que sin esto no fuera posible el desarrollo de la presente tesis.

A M.C. Mario Alberto Hernández Hernández y Dr. Miguel Ángel Pérez, de la Universidad Politécnica de Valencia, por toda su ayuda y conocimiento.

A todos los profesores que corroboraron en mi formación profesional.

A mi familia, padres y hermanos, por todo su apoyo, comprensión para que yo pudiera realizar este proyecto.

ÍNDICE

1. Introducción	9
2. Antecedentes	12
2.1. Modelación Matemática	13
2.1.1. Modelación Hidrológica	14
2.1.1.1. Clasificación de los modelos hidrológicos.....	14
2.1.1.1.1. Modelos empíricos	16
2.1.1.1.2. Modelos conceptuales.....	16
2.1.1.1.3. Modelo Teóricos o Físicamente basados.....	19
2.1.2. Modelos de simulación de la calidad del agua.....	20
3. Calidad del agua y transporte de contaminantes	24
3.1. Calidad del agua en México	25
3.1.1. Nitrógeno	28
3.1.1.1. Ciclo del Nitrógeno	29
3.1.1.2. Nitrato lixiviado	33
3.1.2. Conductividad eléctrica	34
4. Cuenca del Río Grande de Morelia.....	36
4.1. Localización y descripción del área de estudio	37
4.2. Acuífero Morelia-Queréndaro	39
4.3. Geología	42
4.3.1. Fisiografía	44
4.3.2. Geomorfología.....	45

4.4. Hidrología.....	46
5. Modelo Hidrológico Distribuido.....	48
5.1. Modelo de lluvia escorrentía “SIMPA”.....	49
5.2. Modelo de calidad del agua “PATRICAL”.....	61
5.2.1. Modelación de Nitratos.....	62
5.2.2. Modelación de La Conductividad Eléctrica.....	67
6. Aplicación del modelo hidrológico y de calidad del agua	72
6.1. Preparación de la Información.....	72
6.1.1. Capas o mapas digitales básicos del área en estudio.	73
6.1.2. Series de datos.	86
6.2. Régimen natural.....	90
6.3. Régimen alterado.....	91
7. Conclusiones	93
Bibliografía.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los modelos hidrológicos..... 15

Figura 2 . Esquema conceptual de un modelo de balance de humedad de reducido numero de parámetros. (Adaptado de Estrela, 1993b) 17

Figura 3. Diagrama de flujo del modelo STANFORD IV 18

Figura 4. Balance de humedad del suelo. 20

Figura 5. Esquema y relaciones de los modulo de simulación del AnnGNP (AnnAGNPS, 2003)..... 22

Figura 6. Fisiografía distribuida de una cuenca hidrológica con uso de suelo (izquierda) y agrupación de subcuencas para el modelo subagregado del modelo SWAT..... 23

Figura 7. Nitrato total en aguas superficiales por región hidrológico-administrativa. (SEMARNAT, 2006) 26

Figura 8. Ciclo del Nitrogeno (Miljostyrelsen, 1984)..... 29

Figura 9. Procesos del ciclo del nitrógeno en e suelo, (modificado de Havlin et al., 1999). 30

Figura 10. Localización de la Cuenca del Río Grande de Morelia y el Acuífero Morelia-Queréndaro..... 38

Figura 11. Municipios de la Cuenca y el Acuífero 39

Figura 12. Pozos dentro del acuífero Morelia Querendaro 40

Figura 13. Situación de los acuíferos por región hidrológico-administrativa 42

Figura 14. Geología del acuífero y cuenca..... 43

Figura 15. Geomorfología del área que conforma el acuífero. 45

Figura 16. Usos del agua dentro del área de estudio (CNA, 2007). 47

Figura 17. Modelación del ciclo en dos capas, zona superficial y zona profunda o acuífero. 50

Figura 18. Esquema de flujo del modelo conceptual del ciclo hidrológico Patrical..... 51

Figura 19. Transformacion de la precipitación liquida en excedente y balance en el suelo. 52

Figura 20. Conexión del acuífero con el rio. 57

Figura 21. Transferencias laterales entre acuíferos. 58

Figura 22. Transmisividad equivalente de dos acuíferos conectados en serie..... 58

Figura 23. Obtencion aproximada del ancho del acuífero para laaplicacion de la formulación..... 60

Figura 24. Division del terreno para la simulación de la calidad química del agua. 62

Figura 25. Modelo Digital de Elevaciones (MDE) 75

Figura 26. Código de la información del área de estudio escala 1:50,000..... 76

Figura 27. Codigo de la información del área de estudio en escala 1:250,000. 77

Figura 28. Delimitación de la cuenca, acuífero y división del acuífero. 78

Figura 29. Estaciones climatológicas, hidrométricas y pozos del acuífero (UTM)..... 80

Figura 30. Concentraciones de la Conductividad Electrica en la red Superficial 81
Figura 31. Concentraciones de Nitratos en la red Superficial 82
Figura 32. Concentraciones de la Conductividad Electrica en el acuífero 83
Figura 33. Concentraciones de Nitratos en el acuífero 84
Figura 34. Concentraciones de Nitratos por abono mineral y excedente. 86
Figura 35. Doble curva masa 89

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tabla Límites Máximos Permisibles Para Uso Y Consumo Humano Expresados En mg/l (NOM-127-SSA1-1994)</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2. Conductividad eléctrica según el tipo de roca (USGS,1985).</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 3. Balance de entradas y salidas del acuífero.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 4. Cálculo de las aportaciones y excedentes de Nitratos.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 5. Estaciones climatológicas del área de estudio</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 6. Estaciones de aforo hidrométricas dentro del acuífero.....</i>	<i>90</i>

1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta. Los seres humanos dependemos de su disponibilidad no sólo para el consumo doméstico, sino también para el funcionamiento y la continuidad de la actividad agrícola e industrial. En las últimas décadas y con el objetivo de producir más alimentos, energía y proporcionar servicios a una población cada vez más numerosa, la demanda por el líquido ha crecido significativamente y no ha podido ser cubierta. Ejemplo de ello es que en el año 2007 alrededor de 2 mil 600 millones de personas en el mundo no tuvieron acceso a servicios relacionados con el agua, entre ellos el aprovisionamiento de agua potable (UNEP, 2007). La situación podría ser más grave en el futuro ya que, según pronósticos, alrededor del año 2025 cerca de mil 800 millones de personas vivirán en países o regiones con completa escasez de agua, y dos terceras partes de la población mundial podrían estar sujetas a condiciones de estrés hídrico (UNEP, 2007).

La disponibilidad no es el único problema relacionado con el agua. Su contaminación es el otro aspecto importante, ya que agrava el problema de la escasez. Las aguas de los cuerpos superficiales y subterráneos se contaminan por las descargas sin tratamiento de las aguas municipales e industriales, lo que además de perjudicar a los ecosistemas naturales y a su biodiversidad, disminuye e impide su uso para consumo humano. Se estima que en los países en vías de desarrollo se vierten a los ríos u otras corrientes superficiales cerca de 90% de las aguas residuales sin previo tratamiento, lo que acarrea problemas de salud: 80% de las enfermedades en los países en desarrollo tiene su origen en el agua contaminada, así como la muerte anual de 2.2 millones de personas (de las cuales 50% son niños menores de 5 años) y de 400 millones de casos de malaria (citado en Carabias y Landa, 2005).

A pesar de que el tema del agua se ha enfocado principalmente hacia las necesidades humanas, resulta esencial destacar su importancia como elemento clave para el funcionamiento y el mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad. En ausencia del agua que garantice su función y mantenimiento, los ecosistemas naturales se degradan, pierden su biodiversidad y con ello dejan de proveer o reducen la calidad de los bienes y servicios ambientales que sostienen a las sociedades actuales. Por todo ello, la humanidad enfrenta también, a través de la pérdida y deterioro de los ecosistemas (causados, entre otros factores por la deforestación, la sobrexplotación y contaminación de acuíferos y aguas superficiales, la degradación de los ecosistemas acuáticos y la sobrexplotación pesquera), la escasez y contaminación del agua.

El tema del agua es hoy día uno de los más importantes de la agenda ambiental mundial. Además de su importancia para el funcionamiento de los ecosistemas y el mantenimiento de la biodiversidad, se relaciona íntimamente con aspectos sociales relativos a la salud, la seguridad alimentaria y humana, la subsistencia y el desarrollo socioeconómico.

Se ha estimado que existen alrededor de mil 400 millones de kilómetros cúbicos de agua en el planeta, de los cuales sólo 2.5% es agua dulce. Este pequeño porcentaje se localiza principalmente en los ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos del planeta. Casi tres cuartas partes del agua dulce del planeta están contenidas en los glaciares y mantos de hielo, de los cuales alrededor de 97% son inaccesibles para su uso, ya que se encuentran en la Antártica, el Ártico y Groenlandia. Los glaciares continentales, así como el hielo y las nieves perpetuas de volcanes y cadenas montañosas constituyen una fuente explotable de

agua, por lo que son parte importante de los recursos hídricos de muchos países.

El agua subterránea representa 96% del agua dulce no congelada del planeta. Esta fuente resulta importante como abastecimiento para arroyos, manantiales y humedales, así como un recurso fundamental para satisfacer las demandas de agua de muchas sociedades en el mundo. Por su parte, aunque las aguas superficiales (es decir, lagos, embalses, ríos, arroyos y humedales) retienen un pequeño porcentaje del total de los recursos de agua dulce de la Tierra (0.3%), representan cerca de 80% de las aguas superficiales renovables anualmente. Los lagos del mundo almacenan el mayor volumen de agua dulce superficial (91 mil km³), más de 40 veces el volumen presente en ríos y arroyos (2 120 km³) y aproximadamente 9 veces el contenido en los pantanos y humedales. No debe dejarse de lado el agua contenida en la atmósfera que, aunque no representa un volumen comparable a los mencionados anteriormente, es muy importante por su papel en la regulación del clima.

El problema fundamental con la disponibilidad del agua es que la cantidad del líquido es prácticamente invariable y no así la demanda de una población creciente que requiere mayor cantidad de alimentos, productos manufacturados y energía. El tema de la escasez es por tanto uno de los más importantes de la agenda ambiental global. Las Naciones Unidas (2007) reconocen cuatro fuerzas fundamentales que podrían incrementar la escasez de agua en las décadas siguientes. La primera de ellas corresponde al crecimiento de la población. En 2005, la población mundial alcanzó los 6 mil 400 millones, esperan significativamente la disponibilidad per cápita. Se estima que en el 2025 cerca de mil 800 millones de personas vivirán en países o regiones en condición de completa escasez de agua, mientras que dos terceras partes de la población mundial podrían estar sujetas a condiciones de estrés hídrico (UNEP, 2007), que para el año 2050, la población del mundo podría contabilizar los 8 mil 900 millones de personas, lo que reducirá.

2. ANTECEDENTES

2.1. MODELACIÓN MATEMÁTICA

Los modelos de simulación matemática son cada vez más empleados al reproducir los procesos naturales y los efectos que producen las actividades humanas en los mismos, como por ejemplo el ciclo hidrológico y los fenómenos físico-químicos y biológicos asociados. Intentan realizar una aproximación certera de la realidad y permiten abordar con objetividad problemas de gran complejidad y con alta interdependencia de unos procesos con otros.

La utilización de los modelos de simulación matemática, cada vez más complejos y con mayor cantidad de procesos y variables o parámetros, obliga al análisis pormenorizado de los fenómenos naturales y la influencia del ser humano sobre estos; tratando de reproducir de la manera mas fiel la realidad de forma matemática, mediante variables, hipótesis y cálculos.

La evolución histórica que han tenido los modelos de simulación es una muestra de la utilidad que han tenido para entender mejor los procesos relacionados con los recursos naturales y de su importancia en la actualidad. Pudiendo realizar, actualmente una modelación con un mayor numero de variables de entrada y obtener una aproximación mucho mas precisa de fenómenos muy complicados, llegando a tal punto de realizar una modelación de las condiciones actuales de tal fenómeno además de obtener un cálculo o vista a futuro del comportamiento de dicho fenómeno.

Los primeros modelos de simulación matemática surgieron entre los inicios y la mitad del siglo XX, y permitieron simular de forma sencilla y con un mínimo de variables las componentes fundamentales del ciclo hidrológico, lo que permitió mejorar el conocimiento del mismo. Con el transcurso de los años, y lejos de desaparecer, estos primeros modelos han ido incorporando nuevas componentes de mayor grado de detalle y que afectan al ciclo hidrológico, como son: la variabilidad temporal, la variabilidad espacial, el impacto del hombre, etc..., de manera que hacia finales del siglo XX ha sido posible conocer de forma muy detallada todas las componentes del ciclo hidrológico y las interdependencias con la actividad humana.

Una vez más, y lejos de ser esta situación el fin de estos modelos de simulación, los modelos han evolucionado para entender otros fenómenos que se producen en la naturaleza, ya sean, procesos propiamente naturales o procesos derivados de la intervención humana. Esta evolución, acaecida hacia finales del siglo XX y principios del siglo XXI, ha consistido en la incorporación a los modelos de la simulación de sustancias químicas, el transporte de sedimentos, el transporte de contaminantes, y de otros procesos que afectan a las condiciones del agua, de las actividades humanas y de los ecosistemas naturales. De forma que los modelos de simulación actuales se han convertido en plataformas, donde se reproducen de forma secuencial o interrelacionada: el ciclo hidrológico, la calidad química del agua, las pérdidas de suelos.

2.1.1. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La modelación hidrológica consiste en utilizar un modelo matemático y adaptarlo para reproducir lo más cercano a la realidad los fenómenos que se presentan en el ciclo hidrológico (infiltración, evaporación, escorrentía); en la actualidad se han adaptado una serie de modelos que pueden determinar el comportamiento hidrológico, afectado por una serie de factores ajenos, ocasionados por la actividad humana; como son el transporte de sedimentos, la calidad del agua, la influencia, extracciones de agua del acuífero entre otros.

Existe una gran cantidad de modelos de simulación del ciclo hidrológico, de la gestión de cuencas, de las componentes químicas del agua, y de los efectos sobre el resto de elementos naturales o antrópicos, que responde a diferentes formas de abordar el análisis del ciclo hidrológico y sus interrelaciones, a lo largo de la historia y en la actualidad. Esta diversidad se debe a la gran variabilidad que existe entre los problemas y diferentes factores que puedan afectar o no la cuenca hidrográfica o el fin para que se requiera la modelación.

A finales del siglo XX de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la forma que tienen los mismos de trabajar con grandes volúmenes de información. Estos sistemas han permitido considerar en su totalidad la variabilidad espacial de las variables que afectan al ciclo hidrológico (precipitación, temperaturas, usos de suelos, relieve, etc...), por lo que se han constituido en las mejores plataformas para realizar estos análisis a gran escala.

Como consecuencia de todos estos factores existe, en la actualidad, una cantidad difícilmente numerable de modelos de simulación del ciclo hidrológico y del resto de aspectos relacionados con él. Su evolución futura es que siga aumentando su número y los procesos que en ellos se simulen, lo cual genera una base científica muy importante que permitirá en el futuro, gracias ala facilidad en el intercambio de información, mejorar de forma significativa el conocimiento de los fenómenos naturales y las interdependencias con las actividades humanas.

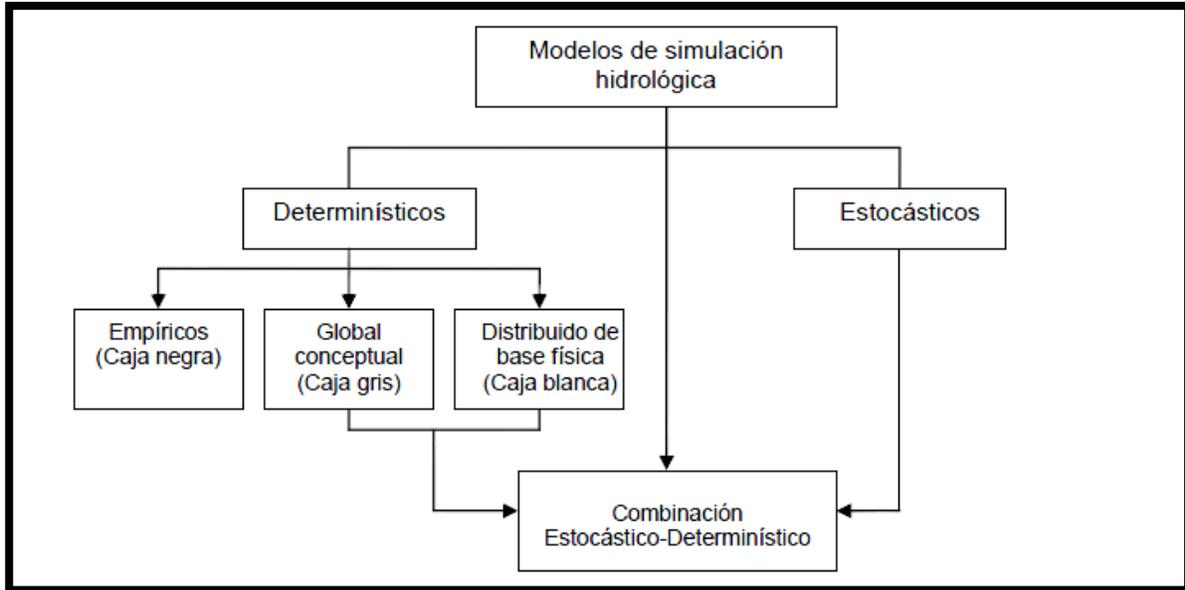
2.1.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS

HIDROLÓGICOS.

En la actualidad existen una infinidad de modelos hidrológicos muchos comparten ciertas similitudes y otros son totalmente distintos en su estructura. El tipo de relación que se introduce entre la precipitación y la generación de escorrentía, y la forma de aplicar esta relación, define la clase de modelo. Esta relación puede estar basada: en leyes físicas, como es el caso de los modelos determinísticos, ya sean conceptuales o físicamente basados; o en estructuras de tipo caja negra “*black-box*”, donde únicamente se busca encontrar la relación matemática entre la variable de entrada y la de salida, teniendo menor o nula influencia las leyes físicas que gobiernan ese proceso, como es el caso de los modelos estocásticos y estadísticos respectivamente. Esto ha generado que los modelos se puedan clasificar de

distintas formas, dependiendo de la estructura y enfoque que le haya dado el autor.

En los diversos tipos de modelos de simulación hidrológica podemos notar una gran diferencia en el planteamiento de las variables de este y de ahí realizar clasificarlos en modelos determinísticos y estocásticos



*Figura 1. Clasificación de los modelos hidrológicos
(Adaptada de Abbot y Refsgaard, 1996).*

Los modelos determinísticos son aquellos en los que las variables están determinadas por leyes físicas (empíricas, conceptuales o teóricas) consideradas como exactas y que explican toda su variabilidad, mientras que en los modelos estocásticos las variables son regidas, en todo o en parte, por las leyes del azar, y por lo tanto caracterizadas en términos de probabilidad

Ejemplos de modelos estocásticos son: el ARMAX (Box and Jenkins, 1976), la ecuación de Tsykin (1985), o la metodología de Pinault et al (1997).

Dentro de los modelos determinísticos existen distintas clasificaciones, que en algún caso también son válidas para modelos estocásticos, según la forma de operar con las variables temporales o la forma de aplicación espacial de la formulación. En las líneas que siguen se exceptuaran los modelos estocásticos, que salen del objeto del presente trabajo.

Centrados en los modelos determinísticos, estos se pueden dividir en tres grandes grupos de los que hablaremos a continuación.

2.1.1.1.1. MODELOS EMPÍRICOS

Estos modelos se utilizaron desde los comienzos de la hidrológica, cuando las herramientas informáticas no estaban lo suficientemente desarrolladas para abordar modelos conceptuales. Consisten en una serie de formulas que, de mayor o menor complejidad, y en función de pocos datos medios representativos de la cuenca, permiten obtener el recurso hídrico medio en un periodo de tiempo largo. Son formulas de fácil manejo, pero que ofrecen un cuadro demasiado global del comportamiento hídrico de la cuenca. No permiten simular el sistema en el tiempo y su interés radica en que ofrecen una primera aproximación sencilla y fácil al problema de evaluación de recursos hídricos. Desde el primer momento se apreciaron sus fuertes limitaciones, por lo que utilización se reduce en la actualidad a la de ser complemento de trabajos mas precisos desarrollados con una escala temporal mas reducida. Algunos de los modelos mas utilizados son (Vallarino,1980), la formula de Coutagne, de Turc, de Keller, de Becerril, Budiko (Schriber;1978), Seyhan (Seyhan, 1976), etc.

Estas formulaciones se obtuvieron gracias a la realización de estudios estadísticos en los que se buscaban formulas de correlación, en diferentes regiones, entre precipitación y algún otro dato (temperatura media, etc.) y la aportaciones. En la actualidad estas formulas se emplean para obtener un valor muy aproximado delas aportaciones medias en un periodo largo de tiempo, pero para estudios mas detallados suelen ser sustituidos por modelos conceptuales o teóricos.

2.1.1.1.2. MODELOS CONCEPTUALES

Estos modelos tratan de simular el comportamiento hidrológico de una cuenca estableciendo ecuaciones de balance hídrico y de transferencia entre diversos compartimentos, cuya mayor o menor complejidad dependerá de a escala temporal empleada en las simulación del fenomenos hidrológico a modelizar. Algunos de ellos o sus variantes son los más utilizados en la actualidad debido a su operatividad y sencillez. Pueden dividirse en dos tipologías en función del grado de detalle con que simulen el ciclo hidrológico, y por lo tanto del número de parámetros que empleen: modelos simplificados de reducido número de parámetros, y modelos de mayor detalle con gran número de parámetros

A principios de los años `50 se confecciono el primero de los modelos hidrológicos continuos de tipo conceptual con reducido numero de parámetros, llamado THORNTHWAITE (Thornthwaite, 1955), que reproduce el ciclo hidrológico de una manera muy sencilla utilizando pocas ecuaciones de transferencia de balance de agua. Resulta especialmente adecuado para simular con una periodicidad temporal o mensual o semanal, y es empleado en cuencas en las que la variabilidad fisiográfica no es muy acusada. Su desarrollo conceptuales es similar al de los modelos que le sucedieron en el tiempo, lo que ha hecho que se haya convertido no los en el punto de referencia obligada

de todos los modelos conceptuales con un reducido numero de parámetros, sino también de los que emplean un numero mayor.

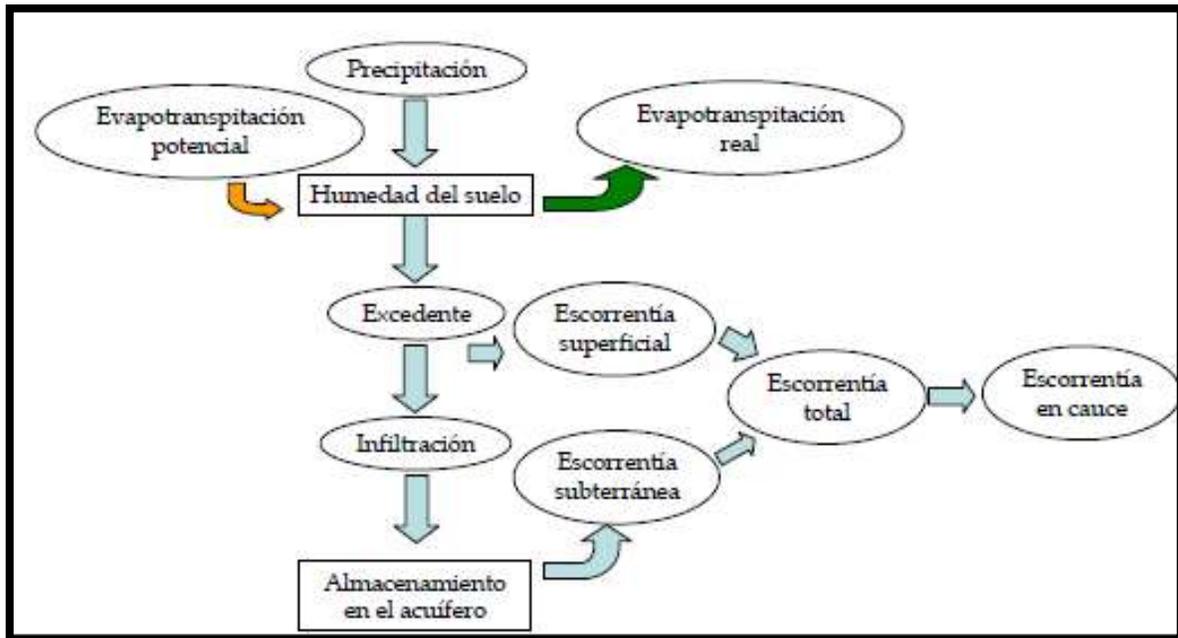


Figura 2 . Esquema conceptual de un modelo de balance de humedad de reducido numero de parámetros. (Adaptado de Estrela, 1993b)

En el modelo se considera el almacenamiento en el suelo similar al de una presa, que tan solo deja escapar agua cuando se encuentra totalmente saturado de humedad. Su escurrimiento, llamado excedente, se reparte entre un agua que discurre superficialmente y un agua que recarga el acuífero y que será drenada diferida en el tiempo. El modelo no considera ningún tipo de fenómeno de propagación, ni en ladera ni en cauces, y la aportación de origen subterráneo la simplifica considerándola proporcional a la escorrentía, un factor que depende de las características del suelo y del acuífero (Alley, 1984).

En lo que se refiere a modelos de mayor detalle con gran número de parámetros, el precursor fue el modelo SWM-IV (Stanford Watershed Model IV) (Crawford and Linsley, 1966). Fue diseñado por Crawford y Linsey a finales de los años '50 y se ha convertido en uno de los modelos más utilizados, constituyéndose en el fundamento de multitud de modelos que le han sucedido en el tiempo.

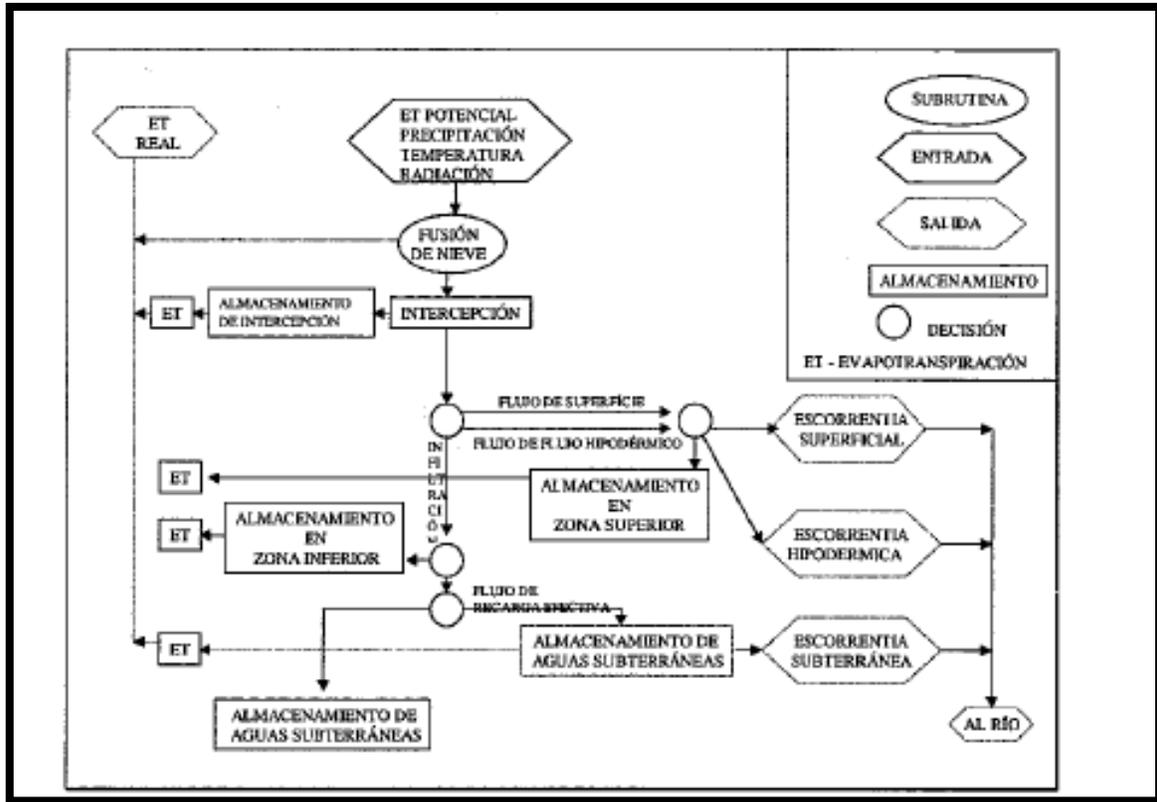


Figura 3. Diagrama de flujo del modelo STANFORD IV (Estrela, 1993b)

Este modelo reconstruye con gran detalle el ciclo hidrológico y permite, por tanto, que las simulaciones se puedan realizar a escala temporales mucho más reducidas, llegando incluso al orden de día o la hora. Esta trabaja con 19 parámetros que están sujetos a calibración por tanto, su grado de complejidad es muy superior al de otros modelos, por lo que el conocimiento que se debe tener de la cuenca a modelar resulta muy grande.

Otros modelos que le siguieron, la mayoría basados en estos STANFORD IV y THORNTHWAITE fueron PALMER (Palmer, 1965), ABCD (Thomas, 1962), SACRAMENTO, NWSRFS, “Número de Curva” del Soil Conservation Service (SCS, 1972, o MCCuen, 1982), y Temez (1977) entre otros.

Todos estos modelos conceptuales tenían una característica en común, que trabajan de forma agregada, es decir en él se considera que toda la variabilidad espacial de la cuenca se puede expresar en una serie de parámetros y de datos representativos, cuyo valor se mantiene constante en toda la superficie.

El modelo más utilizado en España es el modelo de Temez (1977) que deriva del modelo de THORNTHWAITE-T y es similar al método planteado por el “Número de Curva” del Soil Conservation Service (SCS, 1972, o MCCuen, 1982), ya que es un modelo conceptual de

pocos parámetros que simula de forma sencilla el ciclo hidrológico y, a su vez, la ley que gobierna la generación de excedente, es decir, el agua que no es interceptada por el suelo. Es similar a la ley planteada en el método del Número de Curva (SCS-CN).

La aplicación del modelo de Témez de forma distribuida dio lugar al modelo SIMPA (Sistema Integrado Precipitación Aportación) (Ruiz, 1998), que es un modelo hidrológico conceptual distribuido de simulación continua mensual integrado con un sistema de información geográfica GRASS (Estrela, 1996b), por sus características al modelo SIMPA se le puede denominar modelo cuasi distribuido, ya que es un modelo conceptual que trabaja de manera distribuida espacialmente. Este modelo ha sido aplicado en la evaluación de los recursos hídricos en España, con una resolución de 1km x 1km, realizada durante la elaboración del “Libro Blanco del Agua en España” (MIMAM, 2000).

Actualmente existe una nueva generación de modelos incorporados en los sistemas de información geográficos que se aplican de forma distribuida espacialmente, teniendo en cuenta la variabilidad espacial de datos y de parámetros, pero sus formulaciones de cálculo se basan en los modelos desarrollados a mediados del siglo XX.

2.1.1.1.3. MODELO TEÓRICOS O FÍSICAMENTE BASADOS

Los modelos físicamente basados, también denominados teóricos, plantean las funciones teóricas que gobiernan cada proceso y resuelven dichas ecuaciones diferenciales de flujo y de conservación de masa, como la ecuación de Richards para el movimiento en la zona no saturada o la ecuación de Saint Venant en la simulación de los caudales máximos. Ejemplos de este tipo de modelos son: el SMDR (Soil Mixture and Distributed and Routing model) (Cornell U., 2003) del Laboratorio de Agua y Suelos del Departamento de Ingeniería Biológica y Ambiental de la Universidad de Cornell, USA; el SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1993) del ARS, EPA y NRCS; el modelo TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979); el Sistema Hidrológico Europeo SHE (Abbot et al., 1987) del Instituto de Hidrología Danés DHI (Danish Hydrological Institute); el modelo ANSWERS-2000 (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation) (Bouraoui and Dillaha, 1996); el IHDM (Beven et al., 1987), el SWATCH (Morel-Seytoux and Al Hassoun, 1989) y el IHC (Ragab and Cain, 1997; basado en el modelo FRLM de Ragab et al. 1997).

En algunas ocasiones, y dada la complejidad de las ecuaciones, se resuelve el problema simplificado como es el caso de la onda cinemática. Estos modelos requieren una gran cantidad de datos para su aplicación lo que hace que en la actualidad, para grandes cuencas, sean poco utilizados en casos reales.

Concretamente se han centrado en una serie de estudios experimentales en pequeñas cuencas en las que se poseía una elevada cantidad de información fisiográfica, meteorológica y de caudales aforados (Ruiz, 1998)

Los modelos físicamente basados se denominan así porque se fundamentan en plantear la ecuación de balance de humedad del suelo

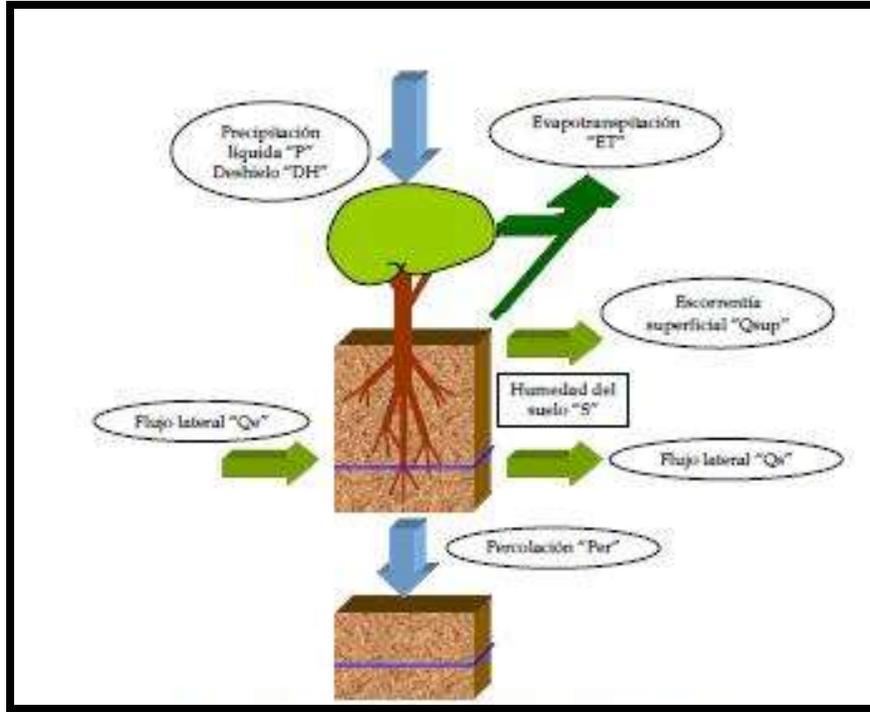


Figura 4. Balance de humedad del suelo.

2.1.2. MODELOS DE SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

Gran parte de los modelos de simulación hidrológica que existen actualmente constituyen el núcleo de cálculo de modelos de simulación de generación y transporte de sedimentos, del ciclo de los nutrientes generados por las actividades agrícolas, fundamentalmente nitrógeno y fósforo, del movimiento de pesticidas, etc.

Los principales modelos existentes que reproducen el ciclo del nitrato y otras sustancias químicas son: el modelo GLEAMS (Knisel, 1994); CREAMS (Knisel, 1980; Thomas et al., 1989); el modelo NLEAP (Shaffer et al., 1991); el modelo AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution computer model) de simulación continua y diaria, que incluye el efecto de la vegetación riparia (Thomas et al., 1989); el modelo SWAT (Arnold et al., 1993); el modelo ANSWERS 2000 (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation 2000) (Bouraoui et al., 1994); el modelo MIKE SHE (DHI, 2004); el modelo RZWQM (Root Zone Water Quality Model) (Hanson et al., 1998; Hanson, 1999); el modelo WAVE (Water and Agrochemicals in soil, crop and Vadose Environment) (Vancloster M., 1995); y el modelo OPUS (Integrated Simulation Model for Transport of Non- Point Source Pollut.) (Smith, 1992; Ferreira and Smith, 1992).

El modelo GLEAMS (Knisel, 1993) (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems), es un modelo para la evaluación a nivel de parcela de los efectos de

las prácticas agrícolas que producen el movimiento de nutrientes, pesticidas, agua y sedimentos en la zonas radicular del suelo. Constituye la evolución del modelo CREAMS (Knisel, 1980) al incorporar la posibilidad de existencia de flujo vertical de pesticidas y nutrientes.

El modelo NLEAP (Shaffer et al., 1991) (Nitrate Leaching and Economic Package), es un modelo sencillo para la determinación rápida, a escala de parcela, de la cantidad de nitrato que puede lixiviar en suelos agrícolas. Este modelo puede utilizarse con tres escalas temporales diferentes: análisis anual, análisis mensual y análisis de eventos. Actualmente puede utilizarse de forma subagregada con los SIG.

El modelo ANSWERS 2000 (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation 2000) (Bouraoui et al., 1994), es la evolución del modelo distribuido en celdas ANSWERS (Beasley and Huggins, 1980) desarrollado a finales de los 70 para la evaluación del efecto de las mejores prácticas agrícolas en los flujos de agua y en las pérdidas de sedimentos, durante eventos de precipitación en pequeñas cuencas hidrográficas. Estaba basado en uno de los primeros modelos hidrológicos distribuidos (Huggins and Monke, 1966) utilizando para la infiltración el método de Holtan (Holtan, 1961). Posteriormente se le incluyó el transporte de nitrógeno (Dillaha et. al., 1988) y de fósforo (Storm et al., 1988).

Actualmente, el modelo ANSWERS 2000 (Bouraoui et al., 1994; Bouraoui and Dillaha, 1996), es un modelo de simulación continua que utiliza la formulación de Green and Ampt para la determinación de filtraciones, realiza la evaluación de la humedad del suelo y el crecimiento de la vegetación. Realiza la simulación del nitrógeno incluyendo los aportes y extracciones de nitrógeno y las interacciones entre las cuatro formas de nitrógeno: el orgánico estable, el orgánico activo, el nitrato y el amonio. La simulación del fósforo la realiza considerando también los aportes y extracciones de fósforo y el equilibrio entre cuatro formas de fósforo: el mineral estable, el mineral activo, el orgánico en el suelo y el disponible. La simulación se realiza con lapso de tiempo de 30 segundos durante eventos de lluvia, y lapsos de tiempo de 1 día entre los diferentes eventos de lluvia. El modelo ha sido probado con éxito en diversas cuencas de Estados Unidos: en dos de Watkinsville (Georgia), en Owl Run (Virginia) de 1.153 ha., y durante más de diez años en Nomini Creek (Virginia) de 225 ha.

El modelo llamado “ANSWERS-2000 NPS decision support system” fue desarrollado en 1995 como un sistema soporte a la decisión (Wolfe et al. 1995), incluido en el SIG arcInfo en un primer momento y actualmente en el SIG ArcView o GRASS, que facilita la definición de parámetros y el manejo de bases de datos con información climatológica etc... Actualmente el modelo se está evolucionando para incluir la simulación de las aguas subterráneas (Bouraoui et al., 1997), y en el futuro, el transporte de nutrientes a lo largo de la cuenca hidrográfica.

El actual modelo subagregado AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non- Point Source Pollution computer model) de simulación continua y diaria, y que incluye el efecto de la vegetación riparia (Cronshey and Theurer, 1998), permite la simulación de los ciclos de

fertilizantes en el suelo, de la erosión de suelos, del transporte de pesticidas, del crecimiento vegetativo y eliminación de nutrientes, etc...

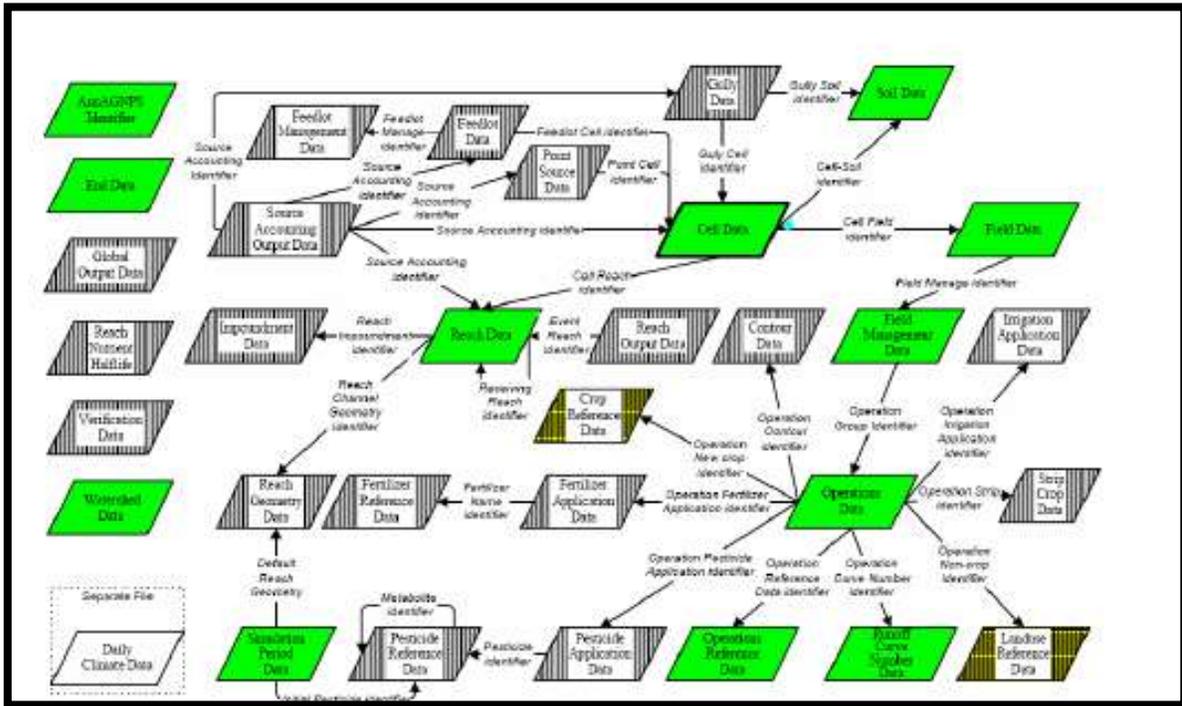


Figura 5. Esquema y relaciones de los modulo de simulación del AnnGNP (AnnAGNPS, 2003)

Otro de los modelos más conocidos es el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1993), modelo subagregado (Figura 26) que incluye la simulación del ciclo del nitrógeno y del fósforo en el suelo, considerando el equilibrio entre las distintas formas de estos compuestos, el transporte de pesticidas y de sedimentos, y el crecimiento vegetativo en la cuenca hidrográfica. Además incluye el transporte de contaminantes a través de la red fluvial, considerándolos como elementos unidimensionales, y en lagos y presas, considerándolos como depósitos.

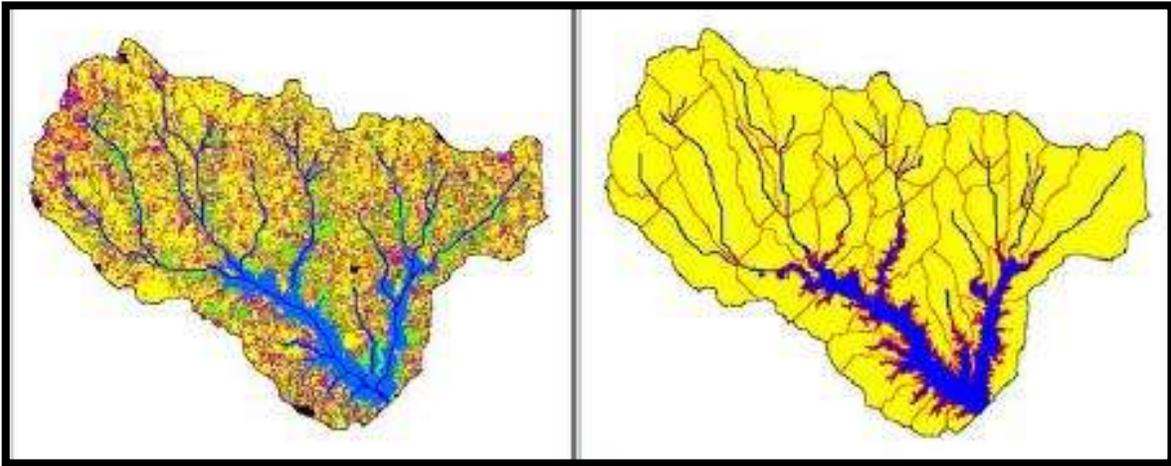


Figura 6. Fisiografía distribuida de una cuenca hidrológica con uso de suelo (izquierda) y agrupación de subcuencas para el modelo subagregado del modelo SWAT

(Di Luzio et al. 2002)

3. CALIDAD DEL AGUA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

3.1. CALIDAD DEL AGUA EN MÉXICO

Las características físico químicas de las aguas naturales dependen fuertemente del recorrido que tengan las mismas a lo largo de la cuenca hidrográfica, ya que a través de ese recorrido van disolviendo sustancias y modificando su calidad y composición química.

En México, la calidad del agua se controla mediante La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) realiza la medición sistemática de la calidad del líquido a través de su Red Nacional de Monitoreo (RNM). En 2007, la RNM contó con mil 14 sitios, de los cuales 389 corresponden a la red primaria, con 207 ubicados en cuerpos de agua superficiales, 52 en zonas costeras y 130 en acuíferos. En la red secundaria se tenían 285 estaciones, de las cuales 241 estaban estudios especiales y a la red de referencia de agua subterránea. Es importante mencionar que los sitios con monitoreo de calidad del agua están ubicados en los principales cuerpos de agua del país, incluyendo zonas con alta influencia antropogénica.

Actualmente, la Conagua publica entre sus principales indicadores de la calidad del agua, la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO5), la demanda química de oxígeno (DQO) y la concentración de sólidos suspendidos totales (SST). Estas variables muestran la influencia humana por la presencia de centros urbanos e industriales. Otros parámetros que se registran en la mayoría de los sitios de la RNM de la calidad del agua son las concentraciones de nitratos y fosfatos, dureza, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y pH.

Otro contaminante detectado frecuentemente en los cuerpos de agua son los fosfatos, que provienen, por lo general, de los compuestos que se aplican como fertilizantes en zonas agrícolas y de los detergentes que se emplean en las zonas urbanas, aunque también se generan por la erosión del suelo y la materia orgánica en descomposición que descargan industrias, hogares y granjas de animales domésticos. Aun cuando no se considera tóxico para los humanos y los animales, los fosfatos pueden tener efectos negativos indirectos a través de la eutrofización de los cuerpos de agua superficiales, lo que implica el crecimiento explosivo de algas y el posterior abatimiento del oxígeno disuelto (Carpenter *et al.*, 1998). En 2006, en más de 88% de los sitios de monitoreo del país la concentración de fosfato total fue superior a 0.1 mg/L3. En el caso de las regiones hidrológico-administrativas Noroeste, Pacífico Norte, Balsas, Golfo Centro y Aguas del Valle de México se superó este límite en 100% de los sitios monitoreados.

Los nitratos son componentes importantes de los fertilizantes que pueden originarse

también de la oxidación del amonio (NH_4^+) y de otras fuentes presentes en los restos orgánicos. Los nitratos tienen efectos adversos en la salud humana, causando cianosis y hasta asfixia. En 2006 se detectaron concentraciones superiores a 0.2 mg/L en 74% de los sitios de monitoreo de la RNM.

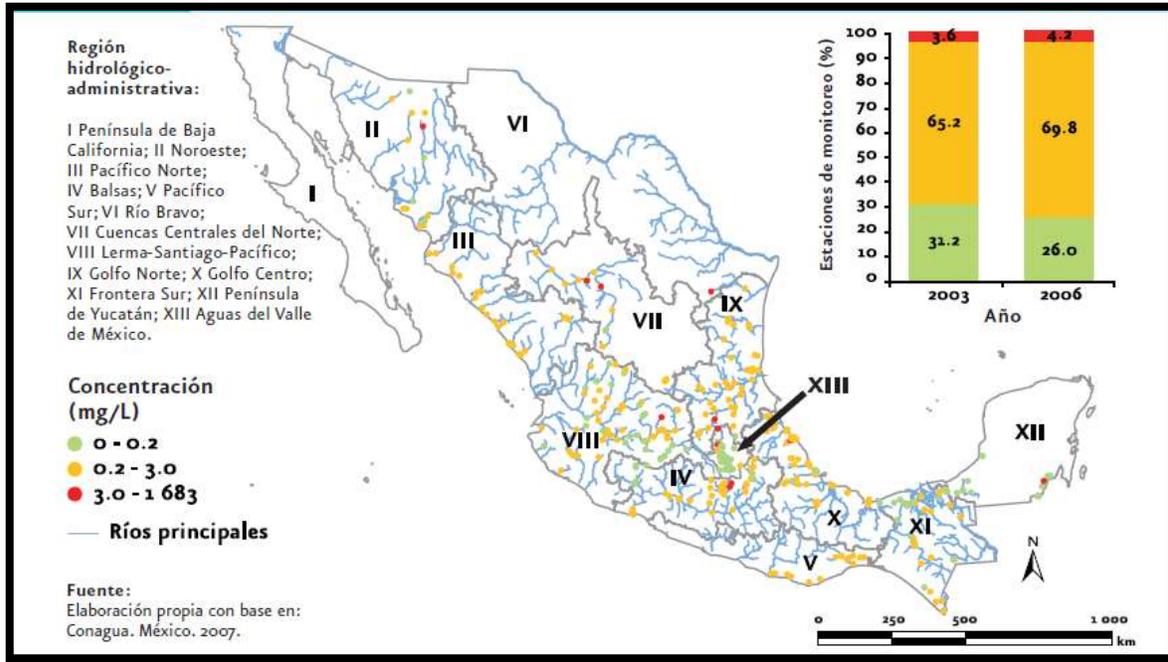


Figura 7. Nitrato total en aguas superficiales por región hidrológico-administrativa. (SEMARNAT, 2006)

Los sedimentos se depositan en las masas de agua de forma natural y por causa de las actividades humanas. Cuando esto ocurre de manera excesiva, puede tener efectos graves sobre los recursos hídricos de una región. La tala de bosques, la transformación de los ecosistemas naturales en tierras de cultivo o pastoreo, la urbanización y la construcción de nuevas carreteras con frecuencia se traducen en una mayor erosión del suelo y en un intenso transporte de sedimentos y contaminantes a los arroyos. El aumento de la cantidad de sedimentos tiene consecuencias para los ecosistemas acuáticos (afecta a los organismos del fondo de los ríos, altera la disponibilidad de alimento y la supervivencia de los peces), pero también para el manejo del agua: aumenta el desgaste de bombas y turbinas, reduce el ciclo de vida de las instalaciones hidroeléctricas y aumenta el costo de mantenimiento de los sistemas de riego. En el país, en 2007, de las 501 estaciones de monitoreo que registran sólidos suspendidos totales, 40 se consideraron que están contaminadas (5.8%) o fuertemente contaminadas (2.2%).

La conductividad eléctrica del agua mide la facilidad con que la electricidad puede atravesar este medio. Los principales iones que influyen en la conductividad eléctrica del agua son: los cloruros, los sulfatos y la dureza de agua (representados por la suma de iones de calcio y de magnesio). La relación entre la concentración de iones en el agua y la

conductividad eléctrica, es una relación compleja que depende del tipo de sales, de la temperatura del agua y de la cantidad de sólidos disueltos en el agua. Y puede ser un indicador que existe intrusión marina.

Otro tipo de contaminación de la que se cuenta con información es la que ocurre por aceite y petróleo, derivada de derrames accidentales, fugas en las redes de transporte o por la descarga rutinaria durante las operaciones petroleras. Este tipo de contaminación es muy dañina para el ambiente, ya que la mayoría de las especies acuáticas son muy susceptibles al contacto directo con los hidrocarburos y sus compuestos derivados disueltos en agua. En general, la descarga de agua congénita y la de contaminantes derivados de la actividad petrolera han disminuido entre 2000 y 2004. En cambio, el volumen de los derrames y fugas tuvo, en 2002, un aumento considerable.

El agua contaminada que corre por ríos y arroyos no sólo tiene efectos sobre la población y los ecosistemas que la usan o se establecen en ellos, sino también en las zonas costeras en donde desembocan. Muchos de los contaminantes llegan al mar y pueden generar un efecto negativo sobre los ecosistemas marinos y la salud humana, dependiendo de su concentración y tiempo de exposición.

El agua que encontramos superficialmente, se encuentra muy contaminadas por todo tipo de vertidos urbanos, transporte de sedimentos, aguas de riego, que en la mayoría de los casos traen consigo restos de fertilizantes, por esta razón el agua para consumo humano, se extrae de acuíferos pues estamos asegurando de una mejor manera que se encuentre en mejores condiciones de calidad, sin embargo, al extraer de un acuífero no estamos asegurando que tenga una calidad para ser consumida, pues muchas veces puede tener grandes contaminantes y muy nocivos para la salud humana, por problemas tales como lixiviados, intrusión marina, mal diseño de l pozo, transporte de sedimentos y filtración de nitratos y fósforos por causa de fertilizantes.

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas, la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, Agua Para Uso Y Consumo Humano-Limites Permisibles De Calidad Y Tratamientos A Que Debe Someterse El Agua Para Su Potabilización"; Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS	
CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml; 2 UFC/100 ml

Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml; Cero UFC/100 ml		
Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.			
LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ORGANOLÉPTICAS			
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto		
Olor y sabor	Agradable		
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método		
LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS (Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad)			
CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE	CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20	pH (unidades de pH)	6.5-8.5
Arsénico	0.025*	Aldrín y dieldrín	0.03 (□ g/l)
Bario	0.70	Clordano (total de isómeros)	0.30 (□ g/l)
Cadmio	0.005	DDT (total de isómeros)	1.00 (□ g/l)
Cianuros (como CN ⁻)	0.07	Gamma-HCH (lindano)	2.00 (□ g/l)
Cloro residual libre	0.2-1.50	Hexaclorobenceno	0.01 (□ g/l)
Cloruros (como Cl ⁻)	250.00	Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03 (□ g/l)
Cobre	2.00	Metoxicloro	20.00 (□ g/l)
Cromo total	0.05	2,4 - D	50.00 (□ g/l)
Dureza total (como CaCO ₃)	500.00	Plomo	0.025
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001	Sodio	200.00
Hierro	0.30	Sólidos disueltos totales	1000.00
Fluoruros (como F ⁻)	1.50	Sulfatos (como SO ₄ ⁼)	400.00
Manganeso	0.15	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Mercurio	0.001	Trihalometanos totales	0.20
Nitratos (como N)	10.00	Zinc	5.00
Nitritos (como N)	0.05	Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50

Tabla 1. Tabla Límites Máximos Permisibles Para Uso Y Consumo Humano Expresados En mg/l (NOM-127-SSA1-1994)

3.1.1. NITRÓGENO

Es un nutriente esencial para el crecimiento de los vegetales, ya que es un constituyente de todas las proteínas. Es absorbido por las raíces generalmente bajo las formas de NO_3^- y NH_4^+ . Su asimilación se diferencia en el hecho de que el ión nitrato se encuentra disuelto en la solución del suelo, mientras que gran parte del ión amonio está adsorbido sobre las superficies de las arcillas.

El nitrógeno y el fósforo son los principales aportes de nutrientes que se producen por las actividades humanas, fundamentalmente en las actividades agrícolas y ganaderas, por lo que representan las más importantes fuentes de contaminación difusa que existen en las cuencas hidrográficas.

Gracias a la aplicación de fertilizantes minerales, los cuales en su mayoría son fertilizantes nitrogenados o fosfóricos, están alterando la acidez del suelo, la calidad de acuíferos, las propiedades de la atmosfera y la biodiversidad de sistemas acuáticos.

3.1.1.1. CICLO DEL NITRÓGENO

El ciclo del nitrógeno en el medioambiente, está caracterizado por importantes procesos de transformación de paso de nitrógeno orgánico a inorgánico y a la inversa, junto con aportes externos (abonados o deposición de estiércoles), e insumos del mismo en los procesos biológicos. La forma habitual de evaluar el exceso de nitrógeno, es decir los aportes de nutrientes en forma de nitrógeno que se producirán al medioambiente, consiste en plantear el balance de entradas y salidas de nitrógeno que se produce en una porción de suelo, de forma que una de las salidas del nitrógeno son los aportes al medio ambiente.

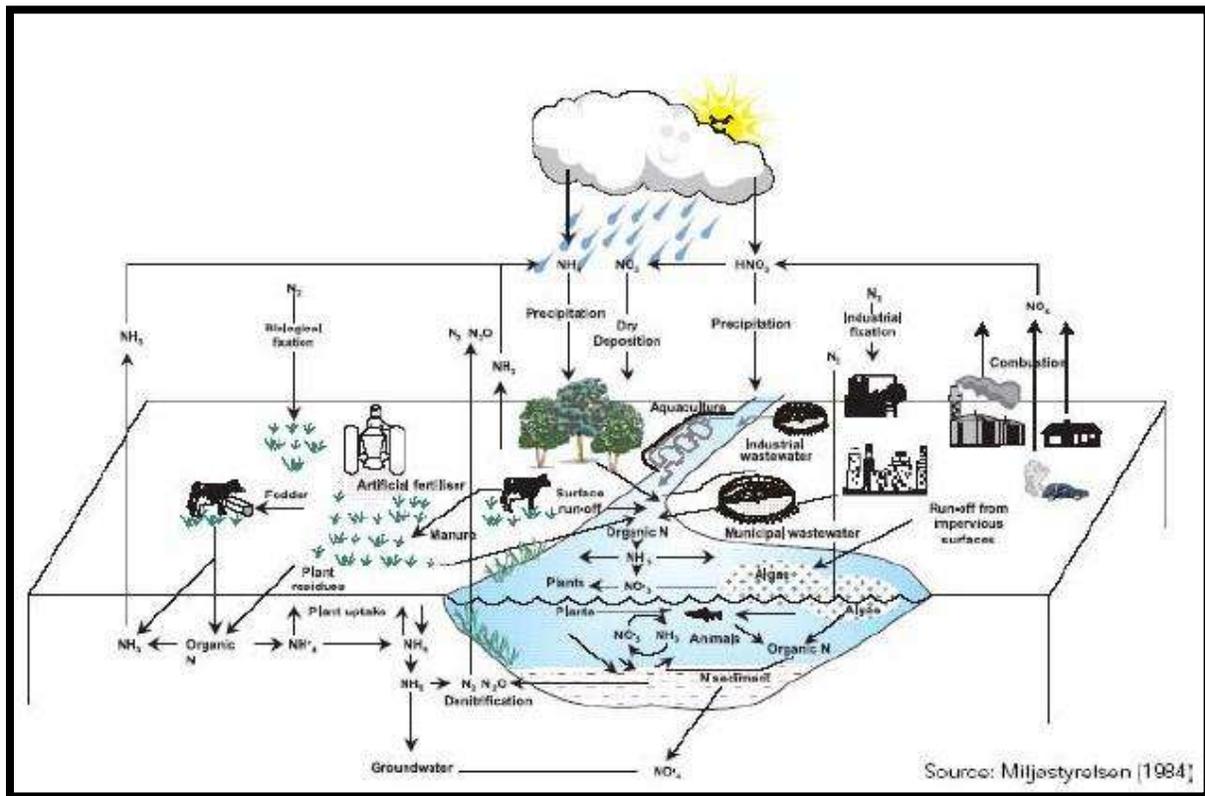


Figura 8. Ciclo del Nitrógeno (Miljostyrelsen, 1984).

El ciclo del nitrógeno en el suelo consta fundamentalmente de nueve procesos

interrelacionados entre si (Havlin et al., 1999): extracción biológica por las plantas, nitrificación, desnitrificación, volatilización, mineralización, inmovilización, fijación de nitrógeno atmosférico, lixiviado y deposición de los residuos orgánicos. Pasando de nitrógeno orgánico a nitrógeno inorgánico y viceversa.

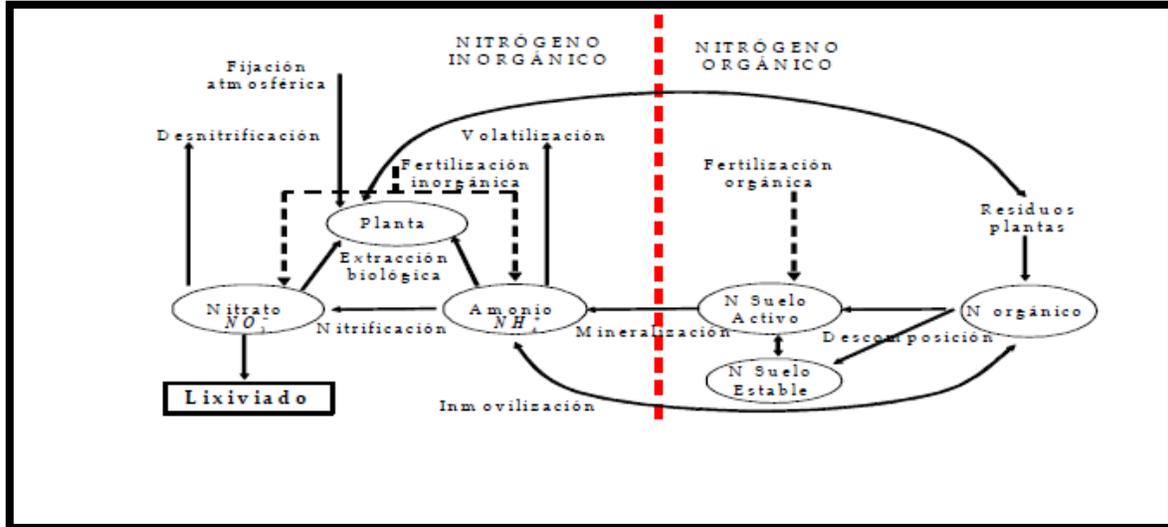


Figura 9. Procesos del ciclo del nitrógeno en e suelo, (modificado de Havlin et al., 1999).

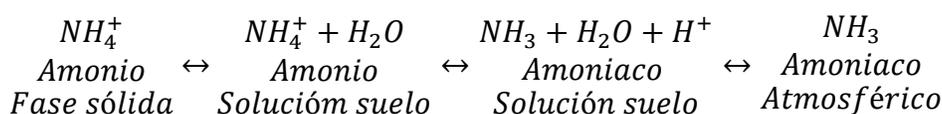
Según Novontny and Olem (1994) las principales fuentes de nitrógeno en el suelo proceden de la aplicación de fertilizantes (46%), de la aplicación de residuos orgánicos (7%), de la fijación del nitrógeno atmosférico por bacterias simbióticas y no-simbióticas (20%), de los residuos procedentes de las plantas(17%) y de la precipitación (10%). La mayor parte del nitrógeno en el suelo se encuentra en forma de nitrógeno orgánico, procedente de materiales biológicos como raíces, microflora, fauna y procesos de descomposición (Stevenson, 1982).

El nitrógeno orgánico y el amonio están inmovilizados en el suelo, pudiendo ser utilizado únicamente el amonio por las plantas. Sin embargo, cuando el amonio se transforma en nitrato, pasa a ser altamente movilizable y es asimilado por las plantas o transportado por el agua (superficialmente o infiltrándose). Esto quiere decir que únicamente el nitrógeno inorgánico en forma de nitrato, NO_3^- , puede ser arrastrado por el agua, lo que se denomina lixiviación del nitrato del suelo.

La mineralización del nitrógeno consiste en el paso de formas de nitrógeno orgánico a inorgánico y concretamente a iones de amonio NH_4^+ , realizada por los microorganismos del suelo con la generación de dióxido de carbono $2 CO$ en ese proceso (Vinten and Smith, 1993). El proceso inverso y simultáneo es la inmovilización del nitrógeno, mediante el cual el amonio se transforma en formas orgánicas de nitrógeno, y consiste en la asimilación del amonio por parte de la biomasa del suelo (Jansson y Persson, 1982). El resultado global entre mineralización e inmovilización, se conoce como mineralización neta y se rige fundamentalmente por la relación Carbono: Nitrógeno (C:N) de los materiales que

nitrate del suelo, pudiendo alcanzar valores del 70% del fertilizante aplicado (Firestone, 1982; Vinten y Smith, 1993). Este proceso ocurre habitualmente en subsuelos con baja permeabilidad y suelos altamente saturados como humedales (Carter and Allison, 1960; Havlin et al., 1999). Un aspecto adicional consiste, en que si la reducción del nitrato no se produce en su totalidad a $2N$ y se emite óxido nitroso NO_2 produce otros problemas medioambientales, ya que el NO_2 es uno de los factores causantes de la reducción de la capa de Ozono y contribuye al calentamiento global del planeta (Vinten y Smith, 1993).

Otro de los procesos relacionados con la atmósfera es la volatilización, que consiste en las pérdidas del amonio del suelo a la atmósfera, ya que el amonio $+4 NH$ se convierte más fácilmente en amoníaco $3 NH$ cuanto mayor es el pH y el contenido de amonio en el suelo. Valores elevados de pH desplazan el equilibrio existente en la solución del suelo entre el ión amonio y el amoníaco hacia la producción de amoníaco que se volatiliza a la atmósfera (Fenn and Hossner, 1985; Schepers and Fox, 1989). También el viento y la temperatura favorecen la volatilización (Havlin et al., 1999), mientras que la incorporación de abonos en el suelo, justo antes de las épocas de lluvias que introduzcan el amonio a las capas profundas del suelo, reducen drásticamente este proceso (Reddy et al., 1979; Jones and Jacobson, 2002).



Mientras que la nitrificación puede tardar desde horas a semanas, la volatilización sucede en un periodo muy corto de tiempo tras la aplicación de amonio como fertilizante, sin embargo una vez convertido el nitrógeno en nitrato finaliza el proceso de volatilización.

La fijación del nitrógeno atmosférico es un proceso por el que las bacterias nitrificadoras (*Rhizobium*), que habitan simbióticamente con plantaciones de leguminosas, fijan el nitrógeno atmosférico pudiendo llegar a grandes cantidades (Haynes, 1986; Schepers y Fox, 1989; Havelka et al., 1982). La fijación depende de varios factores como: el contenido de nitrógeno, el pH, la humedad del suelo y las condiciones de la vegetación. Según Havlin et al. (1999) en los Estados Unidos de América, la fijación es el tercer factor más importante de aportación de nitrógeno en el suelo.

La descomposición consiste en la degradación de los residuos orgánicos vegetales en nitrógeno orgánico en el suelo que permitirá la posterior mineralización del mismo.

Todos estos procesos que son interdependientes entre sí, afectan al balance del nitrógeno en el suelo, contenido y forma iónica con que queda en el suelo, y a su vez el balance afecta al desarrollo de los propios procesos, como por ejemplo: el lixiviado o la volatilización del nitrógeno.

La única forma movilizable del nitrógeno por el agua es el nitrato, por lo que la salida de nitrógeno del suelo mediante lixiviación que se produzca dependerá del contenido de nitrato que tenga el suelo, el cual, como ya se ha indicado, depende del resto de componentes del ciclo del nitrógeno en el suelo. Todas estas circunstancias hacen que la determinación de los flujos del nitrógeno en el suelo sea un proceso de cálculo iterativo.

Finalmente, una vez conocidos los aportes de nitrógeno en el suelo y las salidas que se producen en el mismo, se realiza el balance de nitrógeno en la zona superior del suelo (concretamente en la zona radicular), ya que este balance permite conocer la cantidad de nitrógeno disponible para que se produzca el lixiviado o la desnitrificación.

Las formulaciones del balance de nitrógeno contabilizan las entradas y las salidas de nitrógeno que se producen, obteniendo como resultado el nitrato disponible en el suelo. De esta forma el ciclo del nitrógeno, y concretamente el contenido de nitrógeno en el suelo en el instante de tiempo “ t ”, N_{its} , puede descomponerse atendiendo a Polson (Polson, 1993) y a Vintem y Smith (Vintem y Smith, 1993) en:

- * Aportes
- * Transformaciones
- * Salidas

$$Nits_t = Nits_{t-1} + \sum AportesNit - \sum SalidasNit + \sum Transformaciones$$

3.1.1.2. NITRATO LIXIVIADO

Como ya se ha mencionado, únicamente el nitrógeno inorgánico en forma de nitrato es soluble y puede ser movilizado por el agua en grandes cantidades a través del perfil del suelo, por lo que para conocer el nitrato que puede ser lixiviado en el suelo (ya sea infiltrándose o escurriéndose superficialmente) debe obtenerse el contenido de nitrato disponible en el suelo en cada instante, para lo cual se realiza el balance del nitrógeno existente en el suelo en cada instante de tiempo.

Las principales formas de aplicación de nitrógeno como fertilizante son en forma inorgánica: nitrato, amonio, la urea; y en forma orgánica. El nitrato tiene gran facilidad de lixiviación, mientras que el amonio es absorbido fuertemente por las arcillas y la materia orgánica del suelo. La urea por su parte tiene un comportamiento similar al nitrato pero se transforma rápidamente en amonio. Por otra parte, el nitrógeno en forma orgánica está inmovilizado en el suelo, no pudiendo ser asimilable por las plantas, y tras la mineralización se convierte en nitrato aumentando la posibilidad de lixiviación.

El movimiento del nitrato en el suelo es un proceso complejo que depende del tipo de suelo y de la cantidad de agua que circula por él, a lo que se suma, cuando hay altos contenidos de humedad, el movimiento dispersivo del nitrato si existen variaciones importantes de concentración en el suelo. Existen diferentes modelos de transporte de nitratos en el perfil del con paso de tiempo de una hora o menores, para los cuales no se suele disponer de datos medidos para el contraste.

Existen muchos otros factores que afectan a la cantidad de nitratos que pueden lixiviar como: la cantidad y el tipo de fertilización, la textura del suelo, el uso del suelo, la rotación de cultivos, el instante en que se realiza la fertilización, etc... Juergens-Geschwind (1989) indican que los tres factores principales son: la dosis, el tipo de abono y la época en que se

aplica.

3.1.2. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica del agua como ya se mencionó mide la facilidad con que la electricidad puede atravesar este medio. Es el inverso de la resistencia eléctrica que ejerce un centímetro cúbico de solución a una determinada temperatura. La conductividad eléctrica o inverso de la resistividad se mide actualmente, según el sistema internacional (SI), en “siemens”, por lo que la forma estandarizada de expresar la conductividad eléctrica del agua es en “microsiemens/cm a t °C” (microS/cm), y preferentemente a una temperatura de 25 °C. Es un para metro que se mide en campo y la mayoría de los aparatos con que se mide la determinan a 25 °C (Antiguamente la conductividad eléctrica se medía en la unidad “mho”, como inverso de la resistividad eléctrica que se medía en “ohm”, pero la equivalencia de siemens a mho es de 1.

La relación entre la concentración de iones en el agua y la conductividad eléctrica, es una relación compleja que depende del tipo de sales, de la temperatura del agua y de la cantidad de sólidos disueltos en el agua. La cantidad de sólidos disueltos en el agua también modifica la conductividad eléctrica de la misma.

Los principales iones que influyen en la conductividad eléctrica del agua son: los cloruros, los sulfatos y la dureza de agua (representados por la suma de iones de calcio y de magnesio). Las concentraciones de bicarbonatos son mucho menos determinantes en la conductividad eléctrica (USGS, 1985). La conductividad eléctrica del agua pura puede aproximarse a 0,05 microS/cm, pero el agua destilada común o desionizada tiene conductividades de al menos 1,0 microS/cm. El agua de lluvia antes de alcanzar la superficie de la tierra puede disolver gases atmosféricos, como el dióxido de carbono y otras partículas arrastradas por el aire, por lo que la conductividad eléctrica del agua de lluvia puede ser bastante superior a la del agua destilada, especialmente cerca de zonas costeras o de zonas con alta contaminación atmosférica.

Las características químicas de las aguas subterráneas dependen en gran medida de las formaciones litológicas que atraviesa el agua en su recorrido por el medio no saturado y por los acuíferos. Sin embargo, no todos los compuestos químicos del agua subterránea proceden de la disolución de sustancias químicas de las rocas o suelos. Los bicarbonatos presentes en la mayor parte del agua proceden, en la mayoría de los casos, de la disolución del dióxido de carbono atmosférico y éste es liberado en el suelo a través de la actividad biológica. Algunas rocas son fuentes de cloruros y sulfuros por disolución. La circulación de sulfuros puede estar fuertemente influenciada por los procesos biológicos de oxidación-reducción, y la circulación atmosférica de cloruros y otros iones es un factor significativo de la concentración de aniones en las aguas naturales. Los aniones presentes en el agua se compensan con cationes, a parte del H^+ , por lo que una parte de los cationes presentes en las aguas naturales no tienen origen litológico. La presencia de cationes en el agua de origen no litológico, es habitualmente pequeña respecto a la de origen litológico (USGS, 1985).

Las diferentes formaciones litológicas generan fuertes diferencias en los iones y cationes presentes en el agua. Las litologías ígneas y metamórficas son las que contienen menor presencia de iones y cationes, frente a las litologías sedimentarias y fundamentalmente, dentro de éstas, las de tipo evaporítico.

Tipo de rocas	Subtipo	Ejemplos	Conductividad eléctrica del agua (microS/cm)
Ígneas		Granito, doritas, gabros, basaltos,...	200-600
Metamórficas		Mármoles, pizarras, cuarcita, etc.	200-500
Sedimentarias	Meteorizadas de grano grueso	Conglomerado, etc.	500-1500
	Meteorizadas de tamaño pequeño o fino	Areniscas, limos, arcillas, etc.	600-6000
	Precipitación química	Calizas, carbonatos, carbones, etc.	500-1500
	Evaporítico	Evaporizas, yesos, etc.	>3000

Tabla 2. Conductividad eléctrica según el tipo de roca (USGS, 1985).

4. CUENCA DEL RÍO GRANDE DE MORELIA

4.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río grande de Morelia se localiza en la porción centro-norte del estado de Michoacán, esta comprendida casi en su totalidad en el acuífero Morelia Queréndaro.

El Río Grande de Morelia, es la corriente principal que alimenta el Lago de Cuitzeo el cual fluye de suroeste a noreste; durante su recorrido alimenta la presa Cointzio y recibe, aguas abajo, el caudal del Río Chiquito, su principal afluente, el de los manantiales de la Mintzita, Itzícuaru y La Quemada y las aguas negras de la ciudad de Morelia.

Uno de los municipios más importantes de la zona de estudio es Morelia (capital del estado), la importancia económica que tiene es relevante; por las industrias establecidas en la ciudad y los servicios que se prestan en ella, como son hoteles, restaurantes, clubes deportivos, balnearios, instituciones de docencia, recintos culturales y central de abasto; las actividades pesqueras en las zonas aledañas y el Distrito de Riego 020.

En el resto de la zona de estudio la actividad predominante es la agricultura, le siguen las agropecuarias, fruticultura, artesanías, silvicultura y en menor medida la explotación forestal.

Predomina el clima del subtipo templado de humedad media, con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 25° C, aunque ha subido hasta 38° C. La precipitación media anual (mm) reportada en la zona es de 757 mm. Los vientos dominantes provienen del suroeste y del noroeste, con variables en julio, agosto y octubre, con intensidad de 2 a 14.5 km por hora.

Los servicios públicos con que cuenta la población son: agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, alumbrado, recolección de basura, rastros, mercados, parques y jardines, canchas deportivas, panteones y seguridad pública. Las localidades menores sólo cuentan con los servicios elementales.

Las localidades con mayor concentración de población en la zona son: Morelia (608,049 hab.), Cuitzeo del Porvenir (9,633 hab.), Acuitzio del Canje (5,948 hab.), Charo (4,823 hab.) y Tarímbaro (4,647 hab.).

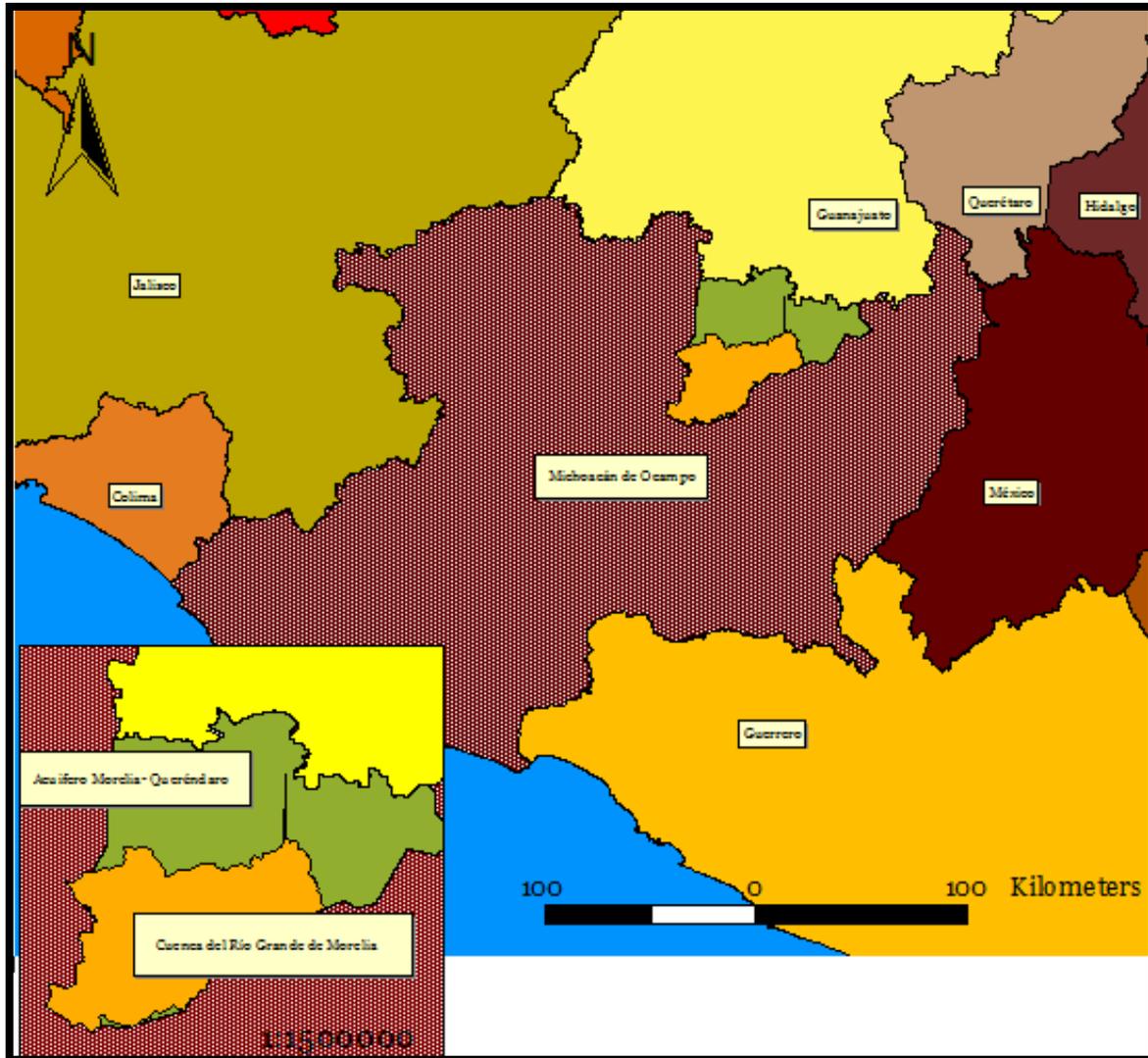


Figura 10. Localización de la Cuenca del Río Grande de Morelia y el Acuífero Morelia-Queréndaro

La cuenca del río grande de Morelia se localiza en la porción centro-norte del estado de Michoacán entre los paralelos $19^{\circ} 35'$ y $29^{\circ} 05'$ de latitud norte y los meridianos $100^{\circ}45'$ $101^{\circ} 25'$ de longitud oeste. Colinda con el estado de Guanajuato al norte, con el poblado de Quiroga Michoacán al occidente, con el municipio de Zinapécuaro al oriente y al sur con la sierra alta y mil cumbres. Tiene una extensión de 1200 Km² aproximadamente. Las elevaciones de la zona van los 1920 m en la parte baja a los 2500 m en la parte alta de la cuenca. La altitud media del valle es de 2200 msnm aproximadamente.

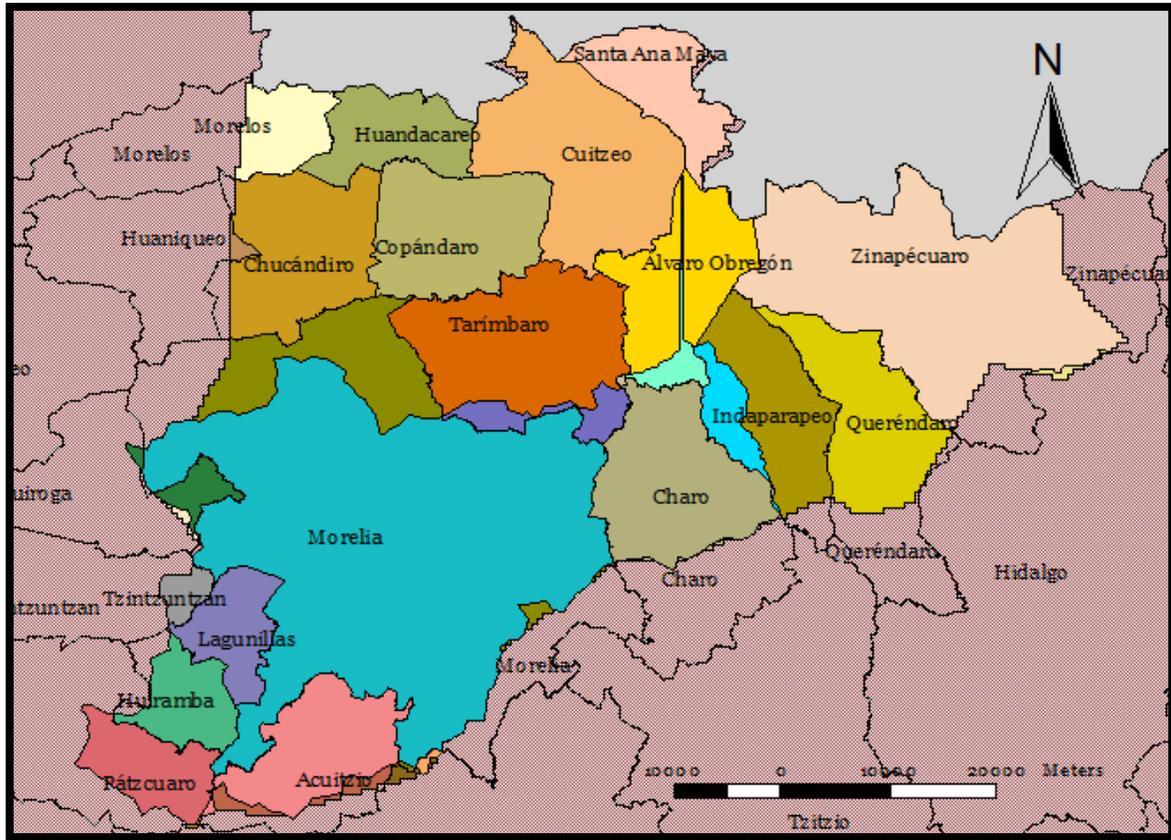


Figura 11. Municipios de la Cuenca y el Acuífero

El Río Grande nace en la parte sureste de Acuitzio, tiene un trayecto de 26.0 km con rumbo norte hasta Morelia. Su principal afluente es el Río Chiquito que confluye con el Río Grande en la parte oeste de la ciudad de Morelia. El Río Grande atraviesa la ciudad de Morelia y desemboca en el lago de Cuitzeo. Los principales escurrimientos que alimentan al Río Grande son el Arroyo de Lagunillas, los arroyos de Tirio y de la Barranca de San Pedro.

4.2. ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO

El acuífero Morelia-Queréndaro se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán, se encuentra localizado entre los paralelos 19°35' a 20°05' de longitud oeste y los meridianos 100°45' a 101°25' de latitud norte; el acuífero abarca parcialmente o totalmente a 21 municipios del estado, cuenta con una superficie aproximada de 3,507 km².

El acuífero se localiza en la porción noreste del estado de Michoacán y queda comprendido dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo. El acuífero se ubica en la Región Hidrográfica 12, conocida como Lerma-Santiago, particularmente en el Distrito de Riego Morelia-Queréndaro. Forma parte de una serie de sistemas lacustres localizados en el Cinturón

Volcánico TransMexicano que son producto de la evolución tectónica y magmática intra-arco relacionada a la subducción de la Placa del Pacífico en la de Norteamérica. La región se encuentra afectada por sistemas de fallas con dirección E-W y NE-SW que dieron origen al valle donde se aloja el sistema acuífero. Están presentes ígnimbritas, brechas y tobas de composición riolítica que datan desde el Mioceno Inferior y depósitos lacustres y de aluvión del Cuaternario Reciente (Corona y Birgit, 2001).

Dentro del acuífero se tienen 963 pozos y 23 manantiales en la zona de estudio. La profundidad del nivel estático de los pozos se encuentra entre los rangos de 0 a 250 m.

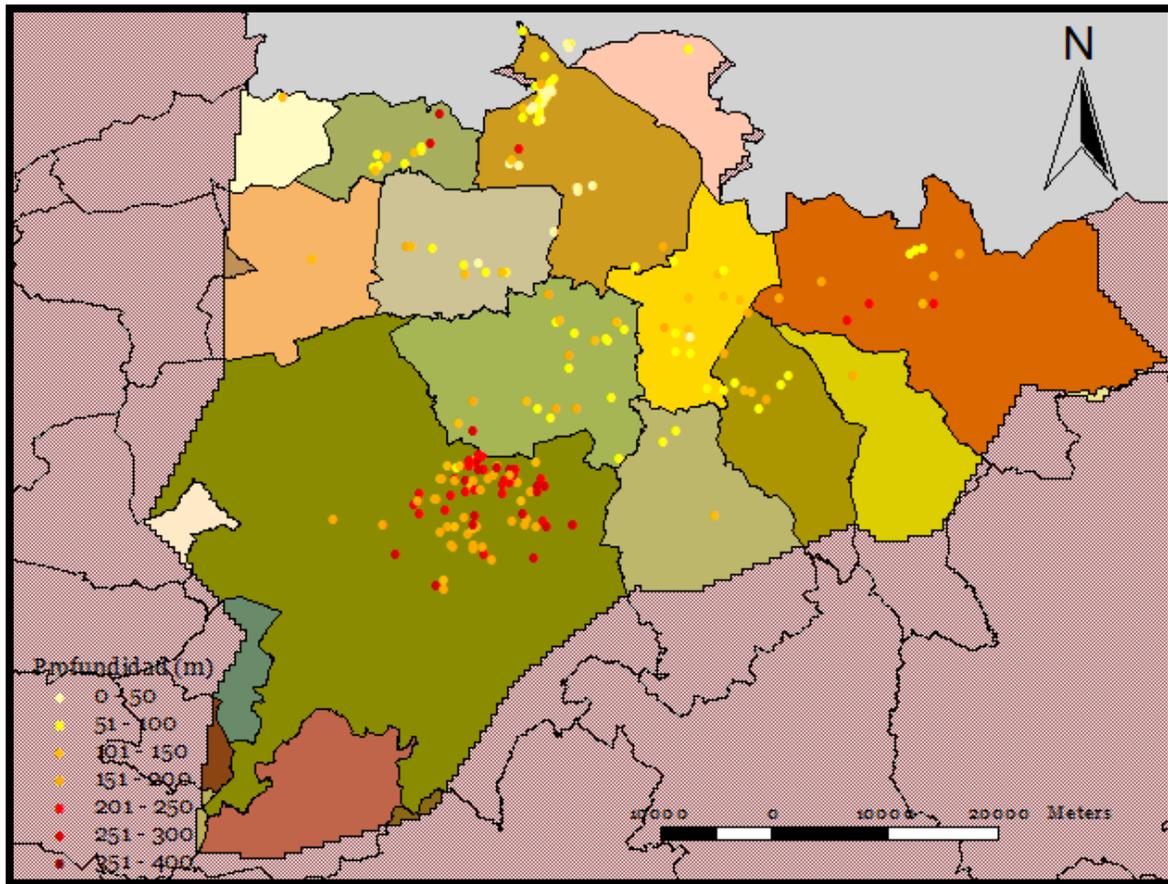


Figura 12. Pozos dentro del acuífero Morelia Queréndaro

La profundidad igual o menor de 10 m se presenta en 88 pozos, destacando el valle de Álvaro Obregón y Huandacareo. En la zona de alrededor del lago de Cuitzeo y los municipios de Santa Ana Maya y Morelia se tienen pozos que presentan profundidades mayores a los 10 m o de hasta 40 m. Los pozos de mayor profundidad se localizan en Morelia, alcanzando los 214 m.

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el

Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte 31 de mayo del 2007 es de 162'228,770.98 m³ anuales.

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas ocasionado e inscrito en el REPGA.

$$DAS = 286.7 - 145.4 - 162.228771$$

$$DAS = -20.948316 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

El resultado indica que existe un déficit de 20'948,316 m³ anuales; por tal déficit el acuífero se encuentra con sobre explotación.

Entradas	Volumen [hm ³ /año]	Salidas	Volumen [hm ³ /año]
Recarga vertical	160.2	Evapotranspiración	81.8
Recarga inducida	38.5	Bombeo	162.2
Entrada subterránea	88.0	Salidas subterráneas	3.3
		Descarga de manantiales	60.3
		Cambio de almacenamiento	-20.9
Total de entradas	286.7	Total de salidas	286.7

Tabla 3. Balance de entradas y salidas del acuífero (CNA, 2007)

La situación de las aguas subterráneas es grave en el país, debido principalmente a la fuerte explotación que se hace de ellas en muchas regiones. A partir de la década de los 70, ha venido aumentando el número de acuíferos sobreexplotados. En 1975 existían 32 acuíferos sobreexplotados, cifra que se elevó a 36 en 1981, 80 en 1985, 102 en 2003 y 104 en el 2006. Sin embargo, en el año 2007 se redujo el número a 101, lo que representa 15% de los 653 acuíferos en que se ha dividido el país. Los acuíferos sobreexplotados se concentran en las regiones hidrológicas de Baja California, Noroeste, Cuencas Centrales del Norte, Río Bravo y Lerma-Santiago-Pacífico. De estos acuíferos se extrae 58% del agua subterránea para todos los usos (Conagua, 2007).

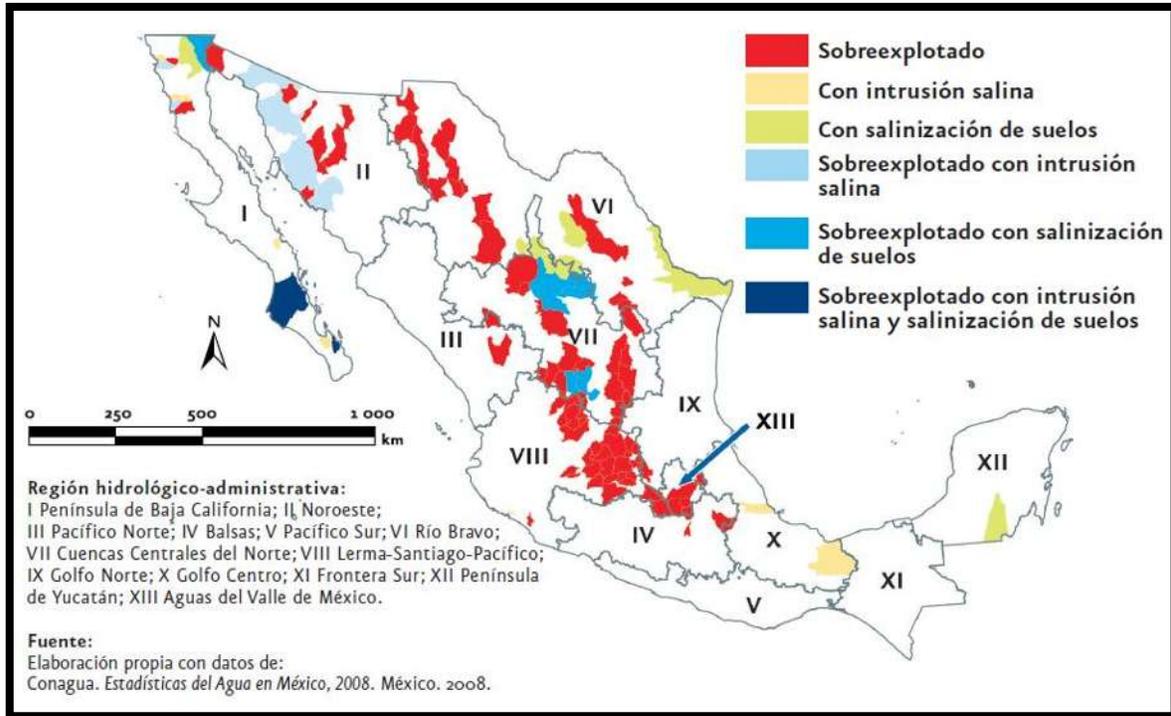


Figura 13. Situación de los acuíferos por región hidrológico-administrativa (SEMARNAT, 2007)

4.3. GEOLOGÍA

El estado de Michoacán de Ocampo está comprendido en dos provincias geológicas: Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico. La primera provincia, la comparte con los estados de Colima, Jalisco, Guerrero y México; y con Jalisco, Guanajuato, Querétaro y México, los del Eje Neovolcánico.

El relieve estructural original de la provincia del Eje Neovolcánico está constituido esencialmente por rocas volcánicas jóvenes (del Cenozoico Superior), aunque también están presentes ignimbritas, brechas y tobas de composición riolítica que datan desde el Mioceno Inferior y depósitos lacustres y de aluvión del Cuaternario Reciente (Corona y Birgit, 2001).

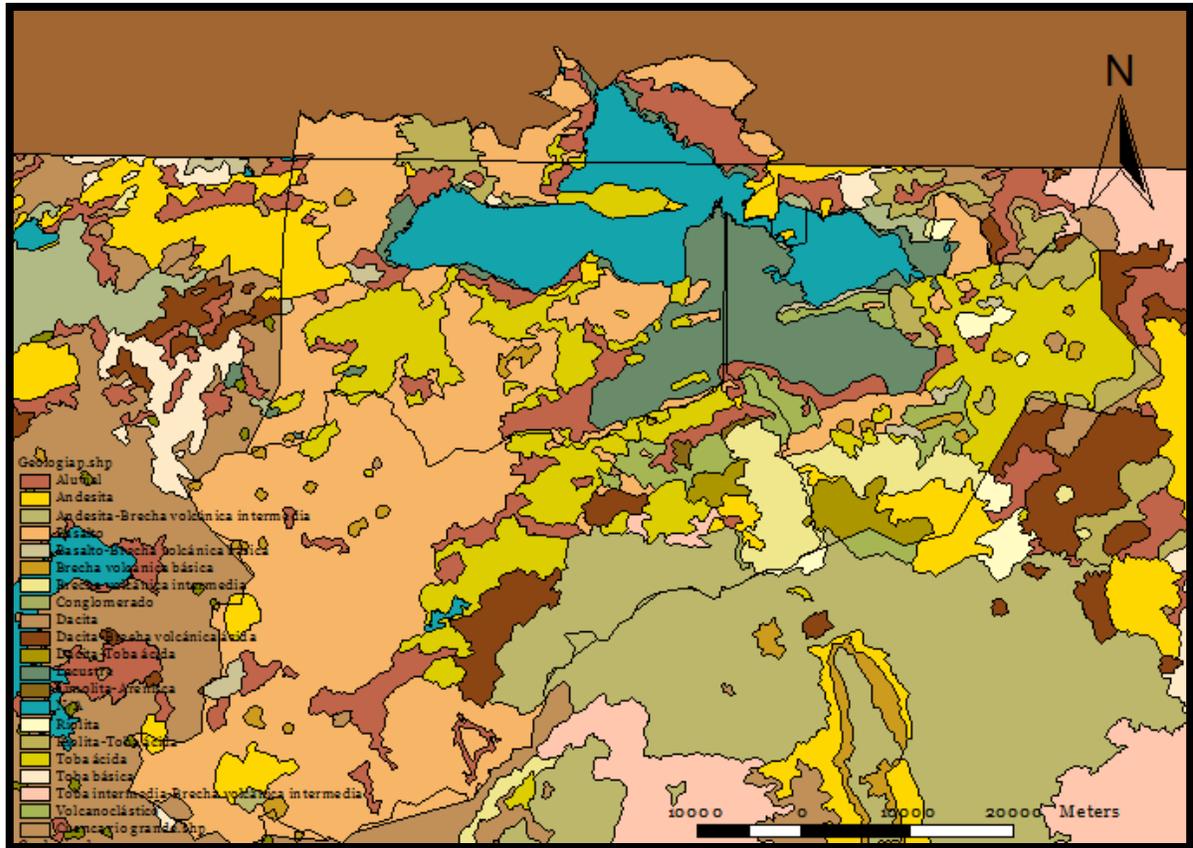


Figura 14. Geología del acuífero y cuenca

En Michoacán son muy importantes las zonas lacustres, geológicamente están relacionadas con una serie de eventos tectónicos relativamente recientes asociados con los fenómenos volcánicos.

La energía geotérmica es uno de los recursos más importantes de esta provincia, ya que existen numerosos focos con manifestaciones hidrotermales que reflejan una zona privilegiada en este tipo de recurso (INEGI, 2007).

En el área afloran rocas de origen ígneo extrusivo y sedimentario continental, las primeras están constituidas por derrames de lavas, escorias, aglomerados, tobas y flujos de tobas soldadas, cuyas composiciones varían desde ácidas hasta básicas; esto es ignimbritas, andesita y basaltos, sus edades van desde el Mioceno Inferior al Reciente, siendo las más antiguas unas tobas riolíticas de edad del Mioceno Inferior, siguiéndole en edad unas rocas de composición andesítica del Mioceno Medio, que manifiestan ser las de mayor distribución en el área y que están cubiertas parcialmente por derrames, aglomerados y conglomerados de composición andesítica y basáltica, de edad del Mioceno Superior y por ignimbritas o tobas soldadas de composición primordialmente riolítica de edad Mioceno-

Plioceno.

A las rocas ignimbríticas le siguen en edad emisiones volcánicas de composición andesítico-basáltica y basáltica, de edad Plioceno, a los que le suceden otra serie de derrames, y edad Plioceno-Cuaternario y composición basáltica y basalto-andesítico para finalmente, definirse la unidad volcánica más joven del área, a la cual se le asignó una edad del Cuaternario al Reciente y cuyos productos tienen una composición primordialmente basáltica.

Las rocas de origen sedimentario continental están constituidas por sedimentos lacustres que gradúan hacia las partes altas a arenas, gravas y conglomerados intercalados con tobas, rio líticas y son cubiertas por los basaltos del Plioceno Superior. Los depósitos más recientes están constituidos por limos y arcillas de origen lacustre, gravas, y arenas de tipo residual y aluviales constituidos por boleos, gravas y limos mezclados en diferentes proporciones.

4.3.1. FISIOGRAFÍA

La zona de estudio pertenece a la Provincia del Eje Neovolcánico, ésta se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Terciario (unos 35 millones de años atrás) hasta el presente.

La integran grandes sierras volcánicas, grandes coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas.

Presenta también la cadena de grandes estrato-volcanes denominada propiamente "Eje Neovolcánico" integrado por: Volcán de Colima, Tancítaro, Zinatlécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéytl (Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos sobre el paralelo 19. Dan el trazo de la gran Falla Clarión, cuya existencia fuera postulada desde el siglo pasado por el Barón Von Humboldt.

Otro rasgo esencial de la provincia es la existencia de las amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos (Pátzcuaro, Cuitzeo, Texcoco, El Carmen, etc.) o por depósitos de lagos antiguos (Zumpango, Chalco, Xochimilco, diversos llanos en el Bajío Guanajuatense, etc.). Estos lagos se han formado por bloqueo del drenaje original, debido a lavas u otros productos volcánicos, o por el afallamiento, que es otro rasgo característico de la provincia. Un área rodeada de fallas se hunde y forma una depresión llamada graben que se llena de agua; éste es el origen del lago de Chapala.

En lo que se refiere a subprovincias fisiográficas cubre parte de tres subprovincias, la Neovolcánica Tarasca, Sierras y Bajíos Michoacanos, y Mil Cumbres.

4.3.2. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología en la zona es el resultado de fuerzas tectónicas y actividad volcánica muy intensas, que actuaron combinadamente y alternadamente con la erosión.

La zona se caracteriza por topografía preponderantemente montañosa, sólo una porción central situada en la parte baja de la cuenca, presenta topografía sumamente plana. En la zona se localiza el Sistema de Fallas Morelia-Acambay (SFMA), orientado W-E, corta de manera longitudinal la parte central de la Faja Volcánica Mexicana (FVM). El SFMA controla la topografía, la deformación y la sedimentación de la región desde el Mioceno (Szyrkaruk y colaboradores, 2004).

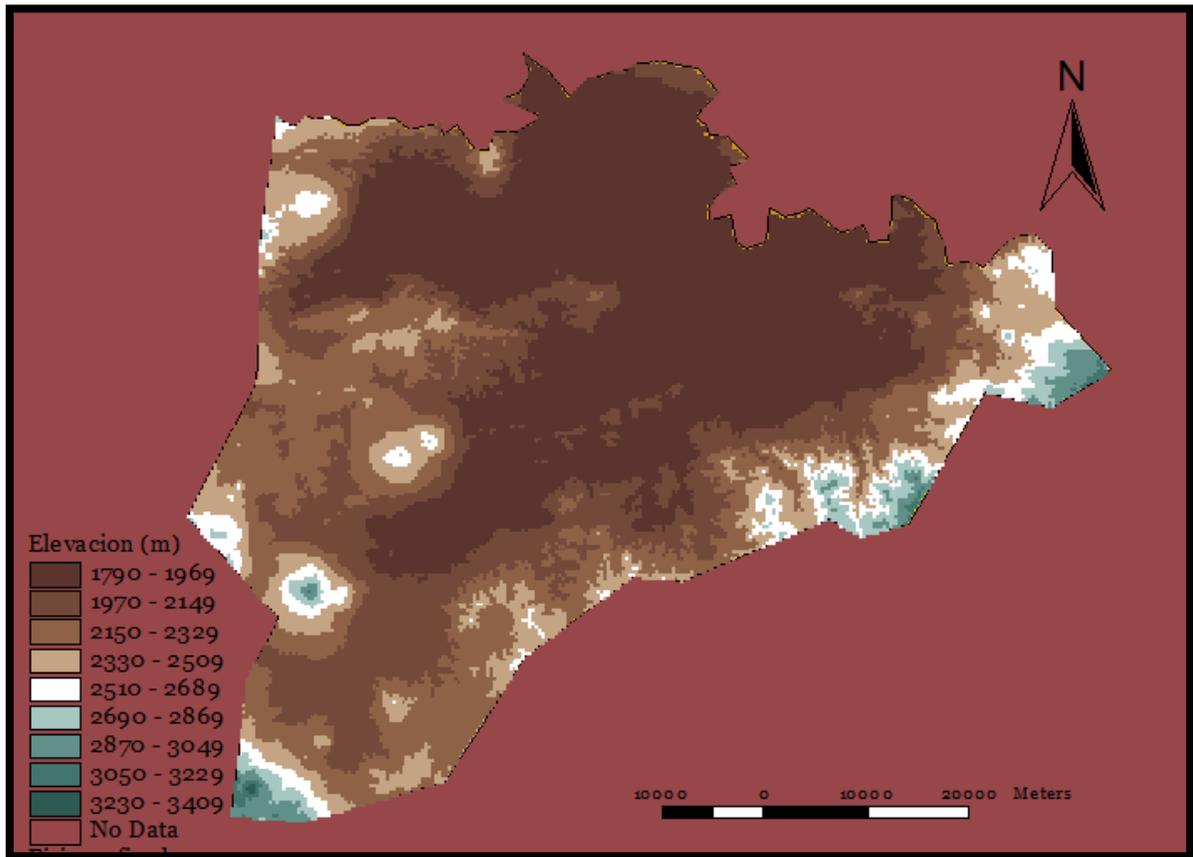


Figura 15. Geomorfología del área que conforma el acuífero.

La corriente superficial más importante es el río Grande de Morelia, corre por un estrecho

valle fluvial, situado en la porción occidental de la zona y desemboca en una extensa planicie, ubicada en la porción central de la misma.

Esta planicie ocupa la mitad sur de una gran fosa tectónica, en cuya parte más alta se encuentra el lago de Cuitzeo y la planicie “Álvaro Obregón-Queréndaro”. Hay dos unidades morfológicas presentes en la zona: a) montañas y lomeríos y, b) valles

4.4. HIDROLOGÍA

La red hidrográfica está constituida por tres ríos, los cuales son: el río Grande, el río Chiquito y el río la Hoya o arroyo de Tierras. El río Grande de Morelia nace en la unión de varios arroyos en la zona montañosa que se extiende al sur de la ciudad y mantienen un curso suroeste-noreste, además recibe varios tributarios por su margen derecha, antes de cruzar por la ciudad de Morelia. En Sacapendo, cambia bruscamente su dirección hacia el norte, entrando a la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro con un curso divagante, para desembocar en el lago de Cuitzeo.

La escorrentía del río Chiquito y la Hoya o arroyo de Tierras, corren de sureste a noreste. Nacen en la Sierra de Mil Cumbres y se unen al río Grande después de recorrer su tramo urbano (Arreygue y otros, 2004).

Sus arroyos más conocidos son La Zarza y La Pitaya. Su presa más importante es la de Cointzio, aunque cuenta con otras menores como las de Umécuaro, Laja Caliente y La Mintzita. También son importantes sus manantiales de aguas termales que son aprovechados como balnearios, el Cointzio, El Ejido, El Edén y Las Garzas. Existen amplias llanuras de inundación alrededor de su principal cuerpo de agua, la laguna de Cuitzeo, que confirman la reducción del nivel de las aguas; situación observada en todos los cuerpos de agua del país (SEPLADE, 2002-2008).

En esta porción del estado se localiza el mayor número de obras de almacenamiento, entre las que sobresalen: la de Cointzio sobre el río Grande de Morelia, que tiene una capacidad total de 84'800,000 m³ y es usada para abastecer de agua potable a la ciudad de Morelia.

Los almacenamientos de esta región son aprovechados también en la generación de energía eléctrica, por lo que esta porción tiene una gran importancia dentro del marco económico del estado (INEGI, 2007).

El uso principal del agua es agrícola (53.69%), el segundo lugar lo ocupa el público urbano (40.21%) y en menor medida los demás usos (6.1%); para este análisis se utilizaron los

pozos activos.

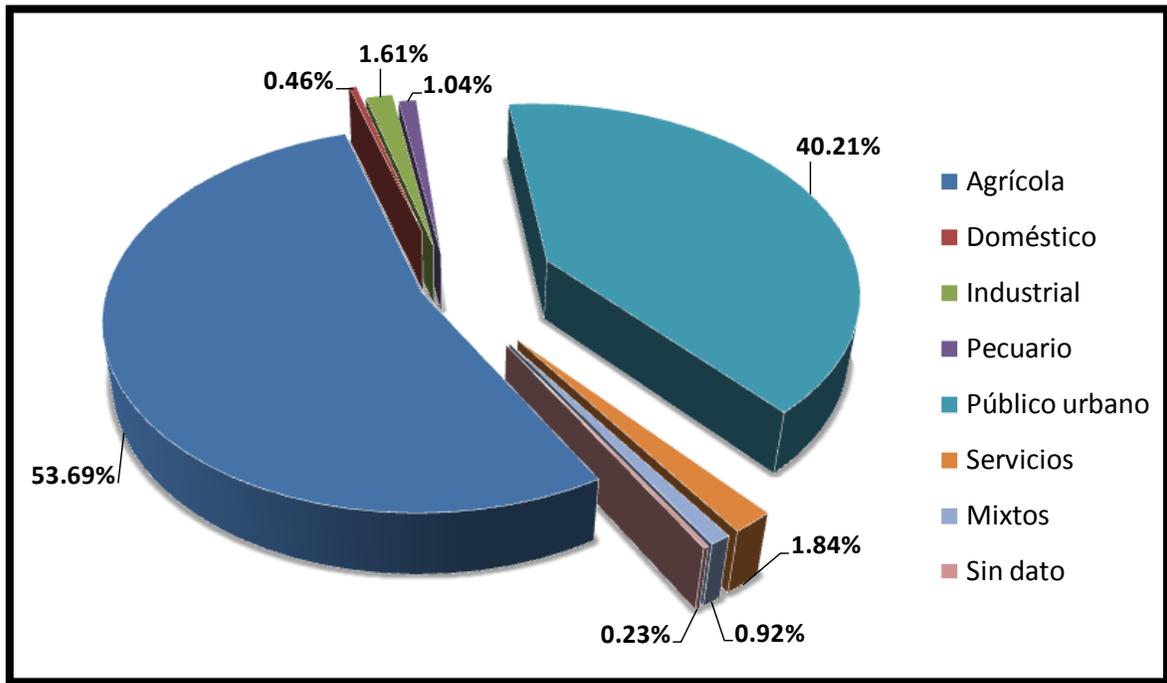


Figura 16. Usos del agua dentro del área de estudio (CNA, 2007).

5. MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO

5.1. MODELO DE LLUVIA ESCORRENTÍA “SIMPA”

El Sistema Integrado para la Modelización de la Precipitación-Aportación (SIMPA) es un modelo hidrológico conceptual cuasidistribuido de simulación continua mensual, integrado en un sistema de información geográfica, desde el cual es posible gestionar y analizar la información temporal y espacial procedente de las bases de datos de los Organismos de Cuenca.

El modelo cuasidistribuido lluvia-escorrentía SIMPA, evalúa los recursos hídricos a escala mensual en el ámbito de las grandes cuencas hidrográficas; simula los procesos implicados en la producción de escorrentía mediante ecuaciones de balance y de transferencia (esquema conceptual), que se aplican en cada una de las celdas en las que el territorio se discretiza (esquema distribuido). Se ejecuta, mediante la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG) de tipo matricial, las ecuaciones del ciclo hidrológico y evalúa los recursos hídricos superficiales y subterráneos, ofreciendo información distribuida y agregada de las principales variables implicadas: evaporación real, infiltración, humedad del suelo, volumen de agua almacenada en los acuíferos, aportaciones superficiales, aportaciones subterráneas y aportaciones totales.

El modelo calcula las variables a escala mensual, por lo cual se han simplificado algunos procesos del ciclo hidrológico, que a dicha escala tienen poca incidencia. Por este motivo, no se consideran los procesos de interceptación, de flujo subsuperficial, ni la propagación en ladera y en cauce. Además, el flujo subterráneo se ha simplificado, adoptando un modelo unicelular agregado en cada una de las masas de agua.

La cuenca que se modela se divide en dos capas o zonas en vertical: una zona superior, formada por la superficie del terreno y discretizada en celdas; y una zona inferior, formada por los acuíferos que, de forma agregada, reciben agua de las celdas superiores. Estas zonas se caracterizan porque:

- * La zona superior representa la superficie del terreno hasta donde alcanza la capacidad de extracción de agua de la vegetación, y se corresponde con la parte de la zona no saturada, donde en sus poros coexisten el agua y el aire, y su contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo.
- * La zona inferior, o acuífero, representa los almacenamientos de agua subterránea que se producen en la cuenca, se encuentra saturada y las salidas de agua que se producen de la misma son: el desagüe a la red de drenaje superficial, las salidas directas al mar y las transferencias laterales entre acuíferos.

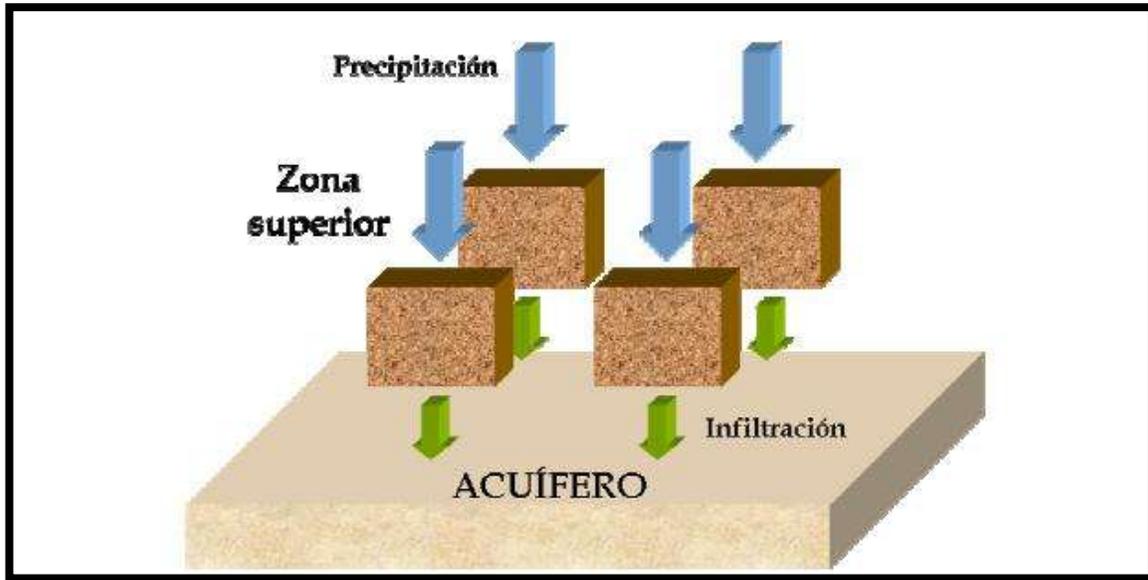


Figura 17. Modelación del ciclo en dos capas, zona superficial y zona profunda o acuífero.

El modelo es de tipo conceptual, de paso de tiempo mensual, y reproduce los principales flujos y almacenamientos de agua del ciclo hidrológico en cada una de las celdas en que se ha discretizado la cuenca, preservando en todo momento el principio de continuidad o de conservación de la masa.

Los datos iniciales necesarios para el posterior funcionamiento del modelo de simulación son los valores de lluvia total mensual y de temperatura diaria media mensual, procedentes de las estaciones meteorológicas, con los cuales se calcula por interpolación los mapas mensuales de lluvia y temperatura, del que se derivan los mapas de evapotranspiración potencial mensual. Los mapas mensuales de precipitación y de evaporatranspiración potencial son la información de partida para el modelo de simulación y se calcula: en primer lugar, la porción de lluvia líquida que cae en cada celda, manteniéndose el resto en forma de nieve sobre la superficie de terreno; en segundo lugar, con dicho valor de lluvia líquida y con las características fisiográficas de la cuenca en cada celda mediante la formulación de Témez: el flujo de excedente generado, la evaporación real producida y el volumen en forma de humedad retenido por el terreno. El excedente, a su vez, se descompone en escorrentía superficial directa y en infiltración a los acuíferos, que interactúan entre sí y se transfieren agua en función de las diferencias de altura piezométrica que tengan. Finalmente, los acuíferos generan la escorrentía subterránea que se suma a la escorrentía superficial formando la escorrentía total, que se acumula a través de la red de drenaje de la cuenca y permite conocer el volumen de agua en cada tramo de la red de drenaje, del que se calcula la reinfiltración a los acuíferos y se obtiene la escorrentía en los cauces.

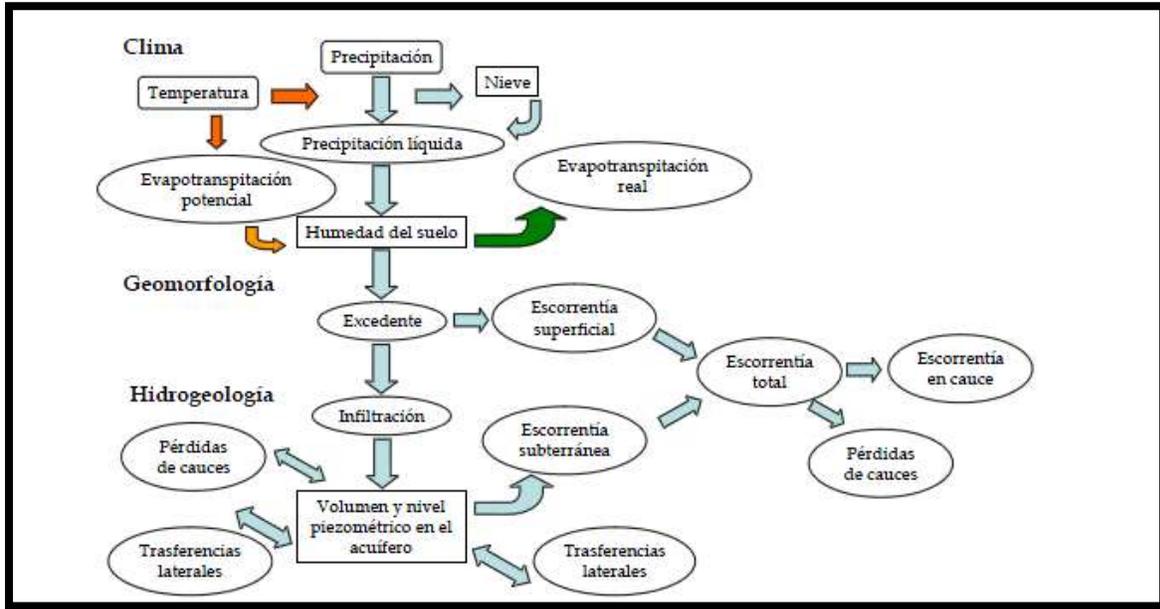


Figura 18. Esquema de flujo del modelo conceptual del ciclo hidrológico Patricial

La formulación aplicada para obtener cada una de las componentes del ciclo hidrológico se inicia con la obtención del volumen de agua en forma de nieve y el volumen de precipitación líquida en cada celda “ij” en el mes “t”. Para ello, se utilizan los datos mensuales en cada celda de precipitación y temperatura, a los que se les aplica una ley exponencial que representa el deshielo producido en meses posteriores. La hipótesis establecida consiste en un deshielo lineal cuando la temperatura es superior a 0 °C, con un coeficiente de deshielo rápido de valor $\alpha=0,6$ mes⁻¹:

$$\text{Si } T > 0 \text{ Pl} = \alpha \cdot V_n$$

Donde (Pl) es la precipitación líquida, (α) el coeficiente de deshielo, (V_n) el volumen de nieve y (T) la temperatura.

Aplicando esta formulación de forma discretizada para cada mes “t” se obtiene, a partir de los datos de precipitación y temperatura registrada en la celda “ij” del mes “t”, ($P_{ij,t}$) y ($T_{ij,t}$), la precipitación líquida en la celda “ij” del mes “t”, ($Pl_{ij,t}$), y el volumen almacenado en forma de hielo en ese mes, ($V_{nij,t}$), tal y como se muestra a continuación.

$$\text{Conocido } P_{ij,t} \rightarrow \begin{cases} \text{si } T_{ij,t} \leq 0 \rightarrow \\ \text{ó} \\ \text{si } T_{ij,t} > 0 \rightarrow \end{cases} \begin{cases} V_{nij,t} = V_{nij,t-1} + P_{ij,t} \\ Pl_{ij,t} = 0 \\ V_{nij,t} = V_{nij,t-1} \cdot e^{-\alpha} \\ Pl_{ij,t} = (V_{nij,t-1} - V_{nij,t}) + P_{ij,t} \end{cases}$$

Conocido el volumen de agua líquida en cada mes (precipitación líquida), el siguiente paso consiste en aplicar la formulación de Témez, en cada una de las celdas de la cuenca,

mediante la cual se reproduce las componentes del ciclo hidrológico relacionadas con la superficie del terreno: humedad del suelo (que incluye la intercepción), infiltración y generación de escorrentía superficial (que incluye la subsuperficial).

La ley de Témez consiste en la aplicación de un modelo conceptual sencillo y de pocos parámetros que permite obtener el volumen de agua neta que genera un fenómeno de precipitación, y que se denomina “excedente”. Dicha ley es matemáticamente muy similar a la del modelo del Número Curva del Soil Conservation Service (SCS, 1954).

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \text{ con } P > I_a$$

Donde:

- * Q , es la cantidad de escorrentía generada (mm).
- * P , es la precipitación (mm).
- * S , es la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (mm).
- * I_a , es la abstracción inicial (mm), almacenamiento en depresiones, infiltración y evaporación.

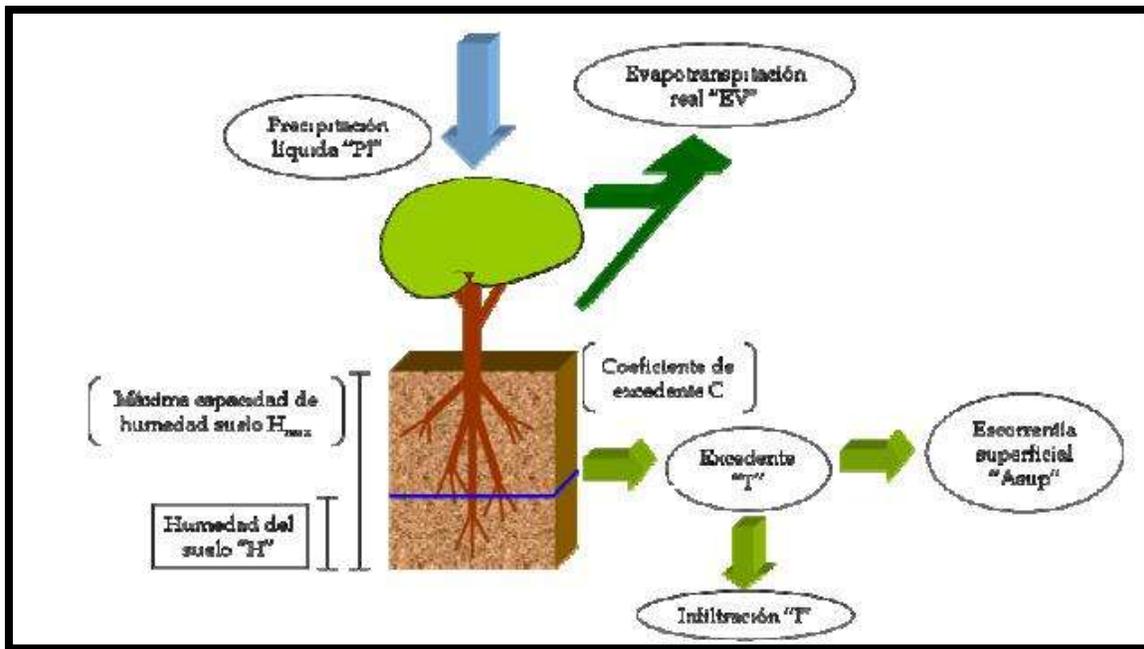


Figura 19. Transformación de la precipitación líquida en excedente y balance en el suelo.

En el modelo de Témez la zona más superficial del terreno está formada por la porción del suelo a la que alcanzan las raíces de las plantas y, por lo tanto, se corresponde con la zona donde se produce extracción de agua por evapotranspiración. De esta forma una fracción

del agua líquida que precipita sobre cada celda ($Pl_{ij,t}$) es almacenada en la zona superior del suelo en forma de humedad ($H_{ij,t}$), evaporándose otra porción muy importante ($EV_{ij,t}$), y el resto, el excedente ($T_{ij,t}$), se distribuye entre la aportación de origen superficial ($Asup_{ij,t}$) y la infiltración hacia el acuífero ($I_{ij,t}$)

La ley de excedentes, en cada celda sobre la que cae precipitación líquida, adopta la siguiente expresión (estando todas las unidades expresadas en milímetros):

$$1) \text{ Si } Pl_{ij,t} \leq Po_{ij,t} \quad T_{ij,t} = 0$$

$$2) \text{ Si } Pl_{ij,t} > Po_{ij,t} \quad T_{ij,t} = \frac{(Pl_{ij,t} - Po_{ij,t})^2}{Pl_{ij,t} + \delta_{ij,t} - 2 \cdot Po_{ij,t}}$$

Donde:

$$\delta_{ij,t} = C \cdot Hmax_{ij} - H_{ij,t-1} + EP_{ij,t}$$

$$Po_{ij,t} = C \cdot (Hmax_{ij} - H_{ij,t-1})$$

Siendo:

- * $P_{lij,t}$, la precipitación líquida sobre cada celda “ij” durante el mes “t”.
- * $T_{lij,t}$, el excedente en cada celda “ij” durante el mes “t”.
- * H_{maxij} , el parámetro capacidad máxima de almacenamiento hídrico en el suelo en cada celda “ij”.
- * $H_{ij,t-1}$, la humedad en la zona superior del suelo en cada celda “ij” en el mes “t-1”.
- * $EP_{ij,t}$, la evapotranspiración potencial en la celda “ij” en el mes “t”, es la evapotranspiración que se produciría en condiciones óptimas de suministro de agua en cada una de las celdas.
- * C , el coeficiente de excedente.
- * $(H_{maxij} - H_{ij,t-1})$ el hueco libre existente en el suelo en el mes “t”.

De esta forma, si la precipitación caída sobre la celda “ij” durante el mes “t” es menor que el umbral $Po_{ij,t}$, no se producirá excedente ($T_{lij,t}$) y por lo tanto, el agua precipitada ese mes se almacenará en el suelo como humedad ($H_{ij,t}$), siendo susceptible de convertirse en evapotranspiración.

Si la precipitación caída sobre la celda “ij” durante el mes “t” supera el umbral $Po_{ij,t}$, se producirá un excedente ($T_{lij,t}$), el cual se convertirá en infiltración al acuífero o en escorrentía superficial.

De las ecuaciones se deduce, que cuanto menor sea la humedad antecedente en una celda del suelo mayor será el umbral $Po_{ij,t}$, lo que significa que mayor será la capacidad del suelo para absorber agua y no producir excedentes. La curva que expresa los excedentes es no

lineal para lluvias bajas (cuando superan el umbral $P_{o_{ij,t}}$) y tiende hacia una línea recta para lluvias altas que se obtiene como " $P_{ij,t} - \delta_{ij,t}$ ", de forma que, a partir de una cantidad de precipitación el agua que no se convierte en excedente se mantiene prácticamente constante para cualquier lluvia. Es decir, para lluvias elevadas la diferencia entre la precipitación y el excedente es la evapotranspiración potencial en ese mes ($P_{o_{ij,t}}$) y el agua que ha rellenado el hueco libre que existía en el suelo, debido a que el suelo en esa celda estará saturado de humedad durante ese mes y no admitirá mayor cantidad de agua.

Asociado a esta ley de generación de excedentes se calcula la humedad en el suelo y la evapotranspiración real producida. La humedad del suelo en cada una de las celdas al final del mes " t ", se calcula mediante la expresión:

$$H_{ij,t} = \max \left[H_{ij,t-1} + P_{ij,t} - T_{ij,t} - EP_{ij,t}, 0 \right]$$

Que se obtiene por balance de la siguiente forma: a la humedad existente en la celda " ij " en el mes anterior " $t-1$ " se le añade el flujo entrante (la diferencia entre la precipitación $P_{ij,t}$ durante ese mes y el excedente $T_{ij,t}$), y se le sustrae la evapotranspiración potencial en el mes " t ", ($EP_{ij,t}$). Si el balance que se establece entre el agua que entra en la celda ($P_{ij,t}$), la que sale ($EP_{ij,t}$) y la existente en el intervalo anterior ($H_{ij,t-1}$), resulta ser negativo, entonces la humedad del suelo al final del periodo será nula, y la evapotranspiración potencial no se habrá podido desarrollar en su totalidad.

La evaporación real que se produce en la celda " ij " durante el mes " t ", ($E_{ij,t}$), se obtiene mediante la expresión:

$$E_{ij,t} = \min \left[H_{ij,t-1} + P_{ij,t} - T_{ij,t}, EP_{ij,t} \right]$$

La evapotranspiración se desarrolla hasta alcanzar la evapotranspiración potencial si existe suficiente agua en el suelo, en caso contrario la humedad en el suelo al final de mes será nula.

El modelo planteado reproduce la generación de excedente, la evaporación real y la humedad del suelo almacenada, utilizando para ello únicamente dos parámetros: la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (H_{maxij}), y el coeficiente de excedente (C). Estas características le confieren un alto grado de robustez al modelo.

El modelo planteado tiende a agotar el contenido de agua del suelo con la evapotranspiración de la vegetación de toda el agua almacenada en forma de humedad, y únicamente queda humedad en el suelo a partir de lluvias superiores a P_o , o lo que es lo mismo, a partir del momento en que se inicia la generación de excedente. En situaciones de lluvias muy bajas la evapotranspiración real supera a la propia lluvia caída, ya que la vegetación consume la totalidad del agua caída y los contenidos de humedad existentes en el terreno de meses anteriores.

Una vez determinado el excedente, el siguiente proceso consiste en conocer cuál es la componente de infiltración profunda y cuál la de escorrentía superficial directa. La infiltración en cada una de las celdas “*ij*” durante el mes “*t*”, ($I_{ij,t}$) está formada por la fracción de agua que, habiendo penetrado en el suelo, acaba recargando el acuífero, es decir, es la parte del excedente ($T_{ij,t}$) que no discurre superficialmente.

El modelo toma una ley de infiltración al acuífero que es función del excedente y del parámetro de infiltración máxima del terreno ($I_{max_{ij}}$). Dicho parámetro expresa la máxima infiltración que puede producirse en un mes en la celda considerada. La ley se expresa de la siguiente forma:

$$I_{ij,t} = I_{max_{ij}} \cdot \frac{T_{ij,t}}{T_{ij,t} + I_{max_{ij}}}$$

Se considera que la infiltración se convierte en recarga al acuífero en el mismo intervalo de tiempo. Esta hipótesis deriva de suponer que el intervalo de tiempo de simulación (el mes), es superior al tiempo de paso del agua por la zona no saturada. La infiltración sólo se produce en aquellas celdas del territorio donde se hayan definido acuíferos, en el resto de celdas la infiltración es nula y todo el excedente se convierte en escorrentía superficial.

La parte del excedente que no infiltra al acuífero se convierte en escorrentía superficial ($A_{ij,t}^{sup}$) drenando por la red fluvial. En la celda “*ij*” al final del mes “*t*”, se tiene la siguiente expresión:

$$A_{ij,t}^{sup} = T_{ij,t} - I_{ij,t}$$

Con los resultados de infiltración distribuida se obtiene la recarga de lluvia de forma agregada para cada uno de los acuíferos de la cuenca, los cuales se simulan mediante el modelo del acuífero unicelular (López, 1981). El modelo del acuífero unicelular plantea la hipótesis de que el caudal de drenaje es proporcional al volumen almacenado en el acuífero, en función del coeficiente de descarga del acuífero α (mes⁻¹).

$$Q(t) = \alpha \cdot V(t)$$

Con la hipótesis planteada, el volumen del acuífero “*k*” a final del mes “*t*” ($V_{k,t}$), se obtiene a partir del volumen almacenado en el mes anterior ($V_{k,t-1}$), de la recarga de lluvia producida en ese mes ($R_{k,t}$) y del coeficiente de descarga del acuífero α_k .

$$V_{k,t} = (V_{k,t-1} - V_{umb_k}) \cdot e^{-\alpha_k \Delta t} + \frac{R_{k,t}}{\alpha_k} (1 - e^{-\alpha_k \Delta t})$$

Donde:

- * $R_{i,t} = \sum_{acuífero_k}^{i,j} I_{ij,t}$, es la recarga al acuífero *i* en el mes *t*, obtenida mediante la suma de la infiltración de todas las celdas “*ij*” que se encuentran por encima del acuífero.
- * α_k , es el coeficiente de descarga del acuífero (mes⁻¹).
- * Δt , lapso de tiempo de la simulación discretizada en el tiempo, (es igual a uno si la

unidad de tiempo es el mes).

* V_{umbk} , es el volumen umbral del acuífero de conexión con el río, de forma que por debajo de este volumen no existe conexión río-acuífero.

Mientras que el volumen de agua que se drena a la red fluvial ($S_{subk,t}$) se obtiene por balance de masas.

$$S_{subk,t} = (V_{k,t-1} - V_{k,t}) + R_{k,t}$$

Las salidas de los acuíferos de la cuenca se producen en una zonas muy concretas: manantiales, tramos de río, zonas húmedas, etc... Por este motivo los resultados agregados de salidas de los acuíferos ($S_{subk,t}$) se distribuyen espacialmente en la red fluvial atendiendo a las características topográficas del terreno, lo que permite obtener en cada celda “ ij ” la escorrentía subterránea ($A_{subij,t}$) que sumada a la superficial proporciona la escorrentía total ($A_{totalij,t}$).

$$A_{ij,t}^{total} = A_{ij,t}^{sub} + A_{ij,t}^{sup}$$

Obtenidos los valores de escorrentía total distribuidos en la cuenca, se acumulan estos valores, utilizando el modelo digital del terreno en la red de drenaje, de forma que es posible conocer la aportación provisional en cada punto de la red de drenaje ($ApoRed'_{ij,t}$). La acumulación de las aportaciones en la red fluvial se realiza con el algoritmo “AT Search Algorithm” (Ehlschlaeger, 1989) que se encuentra implementado en el SIG GRASS.

Una vez obtenidas las aportaciones acumuladas en la red fluvial, y dado que algunos tramos de río son claramente perdedores de agua, se ha realizado la estimación de pérdidas potenciales de agua en los cauces que reinfiltrará al acuífero subyacente en función del nivel piezométrico del acuífero.

Este cálculo está basado en los resultados de la aportación en los tramos de red fluvial ($ApoRed'_{ij,t}$), a los que en función de la máxima capacidad de infiltración del terreno (I_{ij}^{max}) junto con el parámetro “capacidad de pérdidas en cauces, “ b ” ($b = 10\%$), se obtiene el volumen de agua que se reinfiltra al acuífero.

$$PerdPot_{ij,t} = b \cdot \left(I_{ij}^{max} \cdot \frac{ApoRed'_{ij,t}}{I_{ij}^{max} + ApoRed'_{ij,t}} \right)$$

Conocidas las pérdidas potenciales en cauces, y en función de si el nivel piezométrico del acuífero supera el umbral de conexión del mismo con la red fluvial, se determinan las pérdidas reales en el cauce. El nivel piezométrico del acuífero se determina mediante la expresión:

$$h_{k,t} = h_{ok} + \frac{V_{k,t}}{S_k}$$

Donde:

- * $h_{k,t}$ es la altura piezométrica en el acuífero “ k ” en el mes “ t ”.
- * h_{ok} es la altura del suelo del acuífero, es decir, la cota a la que se encuentra el

estrato impermeable del acuífero.

- * $V_{k,t}$ es el volumen del acuífero resultado de la simulación en mm.
- * sk es el coeficiente de almacenamiento del acuífero (porción de agua que cabe en un metro cúbico de suelo)

El nivel piezométrico se compara con la altura de desconexión del acuífero “ k ” con el río, $h_{kconexión}$, de forma que si el nivel del acuífero es inferior a esta altura, las pérdidas por infiltración en cauces son iguales a las pérdidas potenciales, tal y como se indica en la figura y expresiones siguientes:

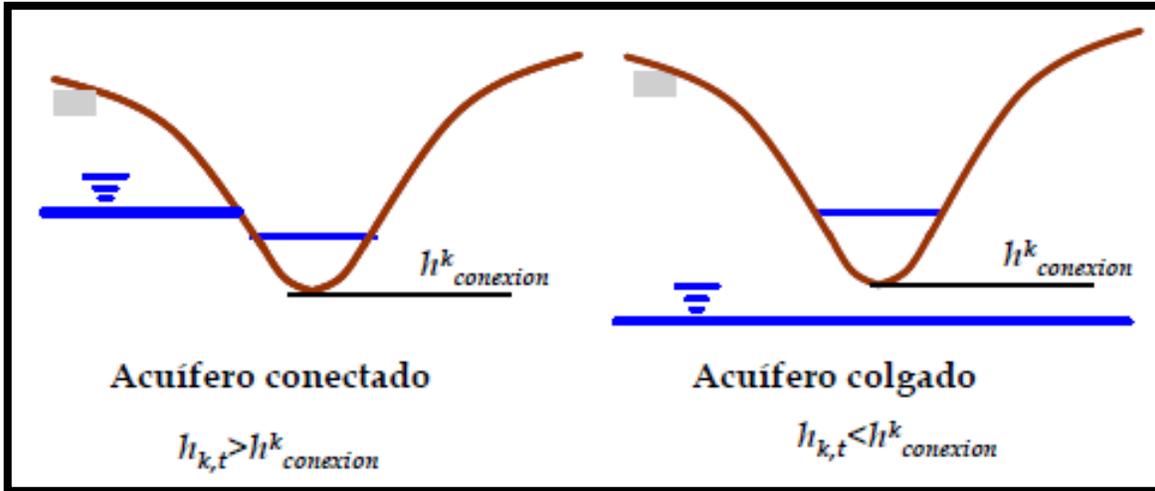


Figura 20. Conexión del acuífero con el río.

1) Si: $h_{i,t} \geq h_{conexión}^i \rightarrow PerdRío_{ij,t} = 0$

2) Si: $h_{i,t} \leq h_{conexión}^i \rightarrow PerdRío_{ij,t} = PerdPot_{ij,t}$

Donde:

- * $h^k conexion$, es la altura umbral a partir de la cual el acuífero descarga agua al río.

Descontando a las aportaciones de la red fluvial ($ApoRed'_{ij,t}$) las pérdidas producidas en la misma ($PerdRío_{ij,t}$), se obtiene la aportación en cauces ($ApoRed_{ij,t}$), que se comparará con los datos de aforos registrados históricamente.

$$ApoRed_{ij,t} = ApoRed'_{ij,t} - PerdRío_{ij,t}$$

Con la información de infiltración a los acuíferos por pérdidas en cauces se actualizan los volúmenes de agua en los acuíferos obtenidos en las fases previas, y se calculan las transferencias laterales que se producen entre los mismos. Estas transferencias están definidas por las diferencias de alturas piezométricas existentes entre los acuíferos y por las transmisividades entre los mismos, siendo la expresión que gobierna estas transferencias la siguiente:

$$Q_{ij,t} = Te_{ij} \cdot \Delta h_{ij,t}$$

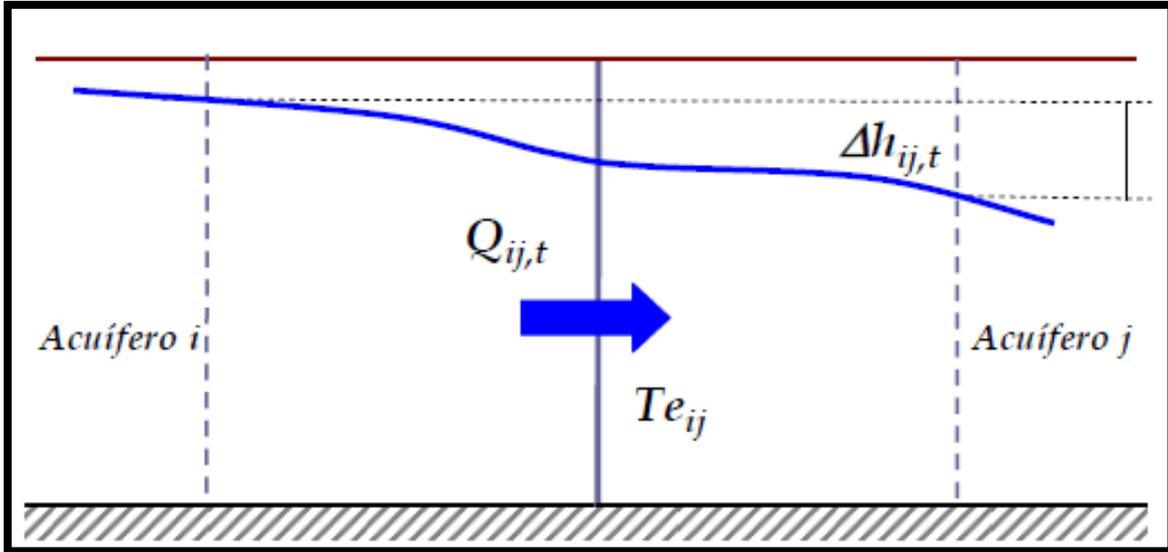


Figura 21. Transferencias laterales entre acuíferos.

Donde:

- * $Q_{ij,t}$ es el volumen de agua de transferencia entre los acuíferos.
- * T_{eij} es la transmisividad equivalente entre los dos acuíferos, y que considera el conjunto de las características de cada uno de ellos y de la tipología del contacto entre los dos, superficie de contacto y características hidrogeológicas del mismo.
- * $\Delta h_{ij,t}$ es la diferencia de alturas entre los dos acuíferos, $\Delta h_{ij,t} = h_{i,t} - h_{j,t}$

La transmisividad equivalente (T_{eij}) correspondiente a la transmisividad entre los acuíferos “i” y “j”, conectados en serie.

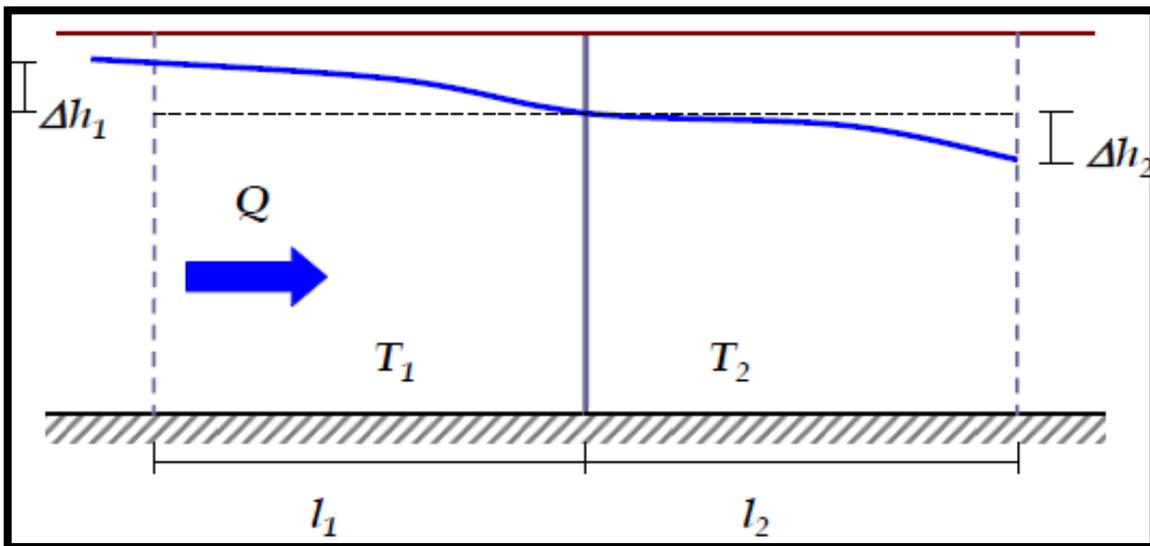


Figura 22. Transmisividad equivalente de dos acuíferos conectados en serie.

Siendo el caudal circulante el que se obtiene con la expresión

$$Q = T e_{12} \cdot \frac{\Delta h}{(l_1 + l_2)} \cdot b$$

Donde:

- * $\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2$
- * b : longitud de contacto entre los dos acuíferos.
- * l_1 y l_2 : distancias en las que se producen los descensos piezométricos Δh_1 y Δh_2 .

Y se deduce que:

$$\frac{1}{T e_{12}} = \frac{1}{(l_1 + l_2)} \left(\frac{l_1}{T_1} + \frac{l_2}{T_2} \right)$$

La transmisividad de cada acuífero es producto de la conductividad por el espesor saturado:

$$T_k = k_k \cdot h_k$$

Dado que los coeficientes de descarga de los acuíferos, α_k , pueden ser obtenidos por calibración a partir de los datos de aforos de manantiales, utilizando las curvas de recesión de los acuíferos, es posible obtener una aproximación de la transmisividad del acuífero aplicando las expresiones del modelo de acuífero rectangular homogéneo perfectamente conectado a un río totalmente penetrante (Sahuquillo, 1981)

Las expresiones que relacionan el parámetro αk con la transmisividad del acuífero son:

- * Río pasando por un lateral del acuífero de ancho “ l ”: $T_k = \frac{\alpha_k 4 s_k l_k^2}{\pi^2}$
- * Río pasando por el centro de un acuífero de ancho “ l ”: $T_k = \frac{\alpha_k 4 s_k \left(\frac{l_k}{2}\right)^2}{\pi^2}$

Donde:

- * s_k : es el coeficiente de almacenamiento del acuífero (adimensional).
- * l_k : es el ancho del acuífero (m).
- * α_k : es el coeficiente de descarga del acuífero (mes⁻¹).

La aplicación de estas expresiones requiere conocer el coeficiente de almacenamiento, el ancho del acuífero y la configuración geométrica del acuífero respecto del río. El coeficiente de almacenamiento se obtendrá por calibración mediante el contraste de los resultados del modelo con los datos de piezometría de los acuíferos. Los otros dos datos pueden obtenerse de forma aproximada por la geometría del acuífero.

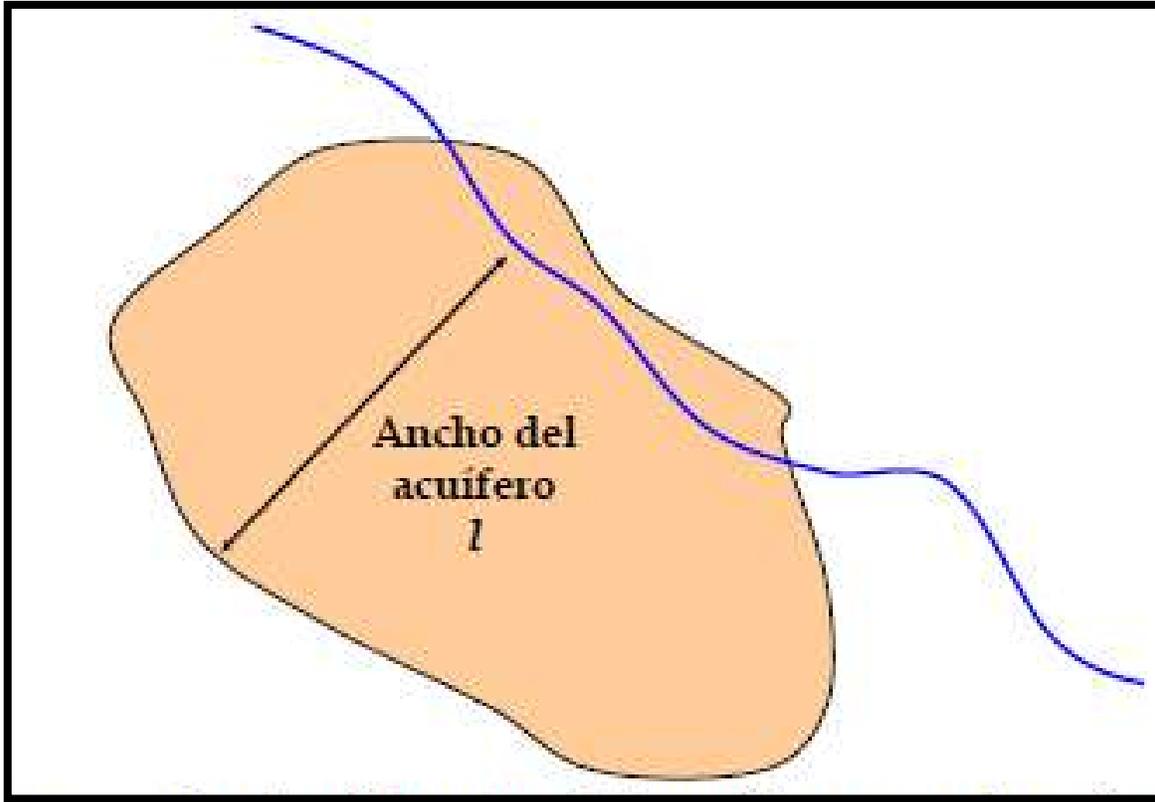


Figura 23. Obtención aproximada del ancho del acuífero para la aplicación de la formulación.

Conocidas las transmisividades de cada acuífero (T_k) se obtienen las transmisividades equivalentes (Te_{ij}) entre ellos y se construye la matriz de transferencias entre todos los acuíferos del sistema “ Te ”

$$\mathbf{Te} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{acuífero 1} \\ 2 \\ \dots \\ i \\ \dots \\ j \\ \dots \\ n \end{matrix} & \begin{bmatrix} Te_{11} & -Te_{12} & -Te_{1i} & -Te_{1j} & -Te_{1n} \\ -Te_{21} & Te_{22} & -Te_{2i} & -Te_{2j} & -Te_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Te_{i1} & -Te_{i2} & \dots & Te_{ii} & -Te_{ij} & -Te_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Te_{j1} & -Te_{j2} & \dots & -Te_{ji} & -Te_{jj} & -Te_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Te_{n1} & -Te_{n2} & -Te_{ni} & -Te_{nj} & -Te_{nn} \end{bmatrix} & \begin{matrix} \text{acuífero 1} & 2 & \dots & i & \dots & j & \dots & n \end{matrix} \end{matrix}$$

Donde:

* $\frac{1}{Te_{ij}} = \frac{1}{(l_i + l_j)} \left(\frac{l_i}{T_i} + \frac{l_j}{T_j} \right)$

* $Te_{ii} = Te_{i1} + Te_{i2} + \dots + Te_{i,j-1} + Te_{i,j+1} + \dots + Te_{in} + Te_{exterior}$

Siendo “ $T_{exterior}$ ” la transmisividad del acuífero con elementos externos del sistema: acuíferos de otras cuencas hidrográficas no modelados o el mar.

Una vez construida la matriz de transmisividad se obtiene, por un proceso iterativo, la variación del volumen de agua en cada acuífero a partir de las alturas piezométricas, mediante la expresión:

$$\Delta V_{i,j} = T e \cdot h_{i,t}$$

Donde el caudal que se transfiere entre acuíferos es el que se obtiene mediante la expresión:

$$Q_{trans_{i,j}} = (-T e_{ij} \cdot h_{i,t}) - (-T e \cdot h_{j,t})$$

Para finalizar el proceso se actualiza el valor del volumen en los acuíferos. Estos valores serán los datos de partida, volúmenes iniciales, de la simulación del mes siguiente.

5.2. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA “PATRICAL”

Actualmente no basta con conocer el agua que esta escurriendo en una cuenca o el agua que se esta almacenando en un acuífero, es necesario tener datos del agua que se esta cuantificando, para que es apta o en que se puede aprovechar.

El recorrido que realice el agua será una variable determinante en la buena o mala calidad de esta, por tal motivo es necesario saber que tipo de contaminantes se tienen en el área de estudio. Al módulo de simulación hidrológica se le han incorporado dos módulos de simulación del transporte de elementos químicos por las diferentes zonas de la cuenca hidrográfica. Este transporte se produce a través de los flujos de agua obtenidos con la simulación hidrológica. Los módulos desarrollados son: transporte de nitrógeno en su forma movilizarle, nitrato, y transporte de sales, utilizando como variable representativa la conductividad eléctrica del agua a 25 °C.

Estas sustancias químicas tienen origen antrópico y origen natural, por lo que su introducción en el modelo de simulación se realiza de diferentes formas. Los nitratos proceden principalmente del uso de fertilizantes en la agricultura y de los vertidos de las aguas residuales urbanas. Es uno de los problemas más importantes de contaminación que tienen las cuencas mediterráneas. Cuando su origen es agrícola y ganadero, es el principal foco de contaminación difusa, y su modelación se realiza a partir del exceso de nitrógeno que se produce por la fertilización orgánica e inorgánica de las zonas agrícolas, o por el exceso de nitrógeno que se produce en las zonas ganaderas y de pastoreo.

La conductividad eléctrica es la principal variable representativa del contenido total de sales que tiene el agua: sulfatos, cloruros, carbonatos, etc... Su origen es natural, en su mayor parte, salvo en zonas con altos volúmenes de vertidos urbanos o importantes retornos de riego, o acuíferos costeros con problemas de intrusión marina. La modelación de esta variable se realiza considerando su incorporación por la disolución de sales que realiza el agua de lluvia en la superficie del terreno, la disolución de sales originada por el

agua subterránea al pasar por las diferentes formaciones geológicas, y por la incorporación de origen antrópico debida a los retornos de riego, en forma de retorno superficial o recarga al acuífero, o a los vertidos de las zonas urbanas.

Para simular el transporte de sustancias químicas en la cuenca hidrográfica se definen tres zonas en la cuenca hidrográfica: la zona superficial del suelo, donde existe agua en forma de humedad del suelo y las sustancias químicas pueden ser arrastradas por la escorrentía superficial o por la infiltración al acuífero; el medio no saturado, formado por la porción de terreno desde el acuífero hasta donde alcanza la zona radicular de la vegetación y que varía a lo largo de la simulación en función del nivel piezométrico que exista en el acuífero; y el acuífero, medio saturado donde se ha considerado que se produce el mezclado total del agua. Esta definición atiende a los diferentes puntos donde se pueden depositar y acumular las sustancias químicas

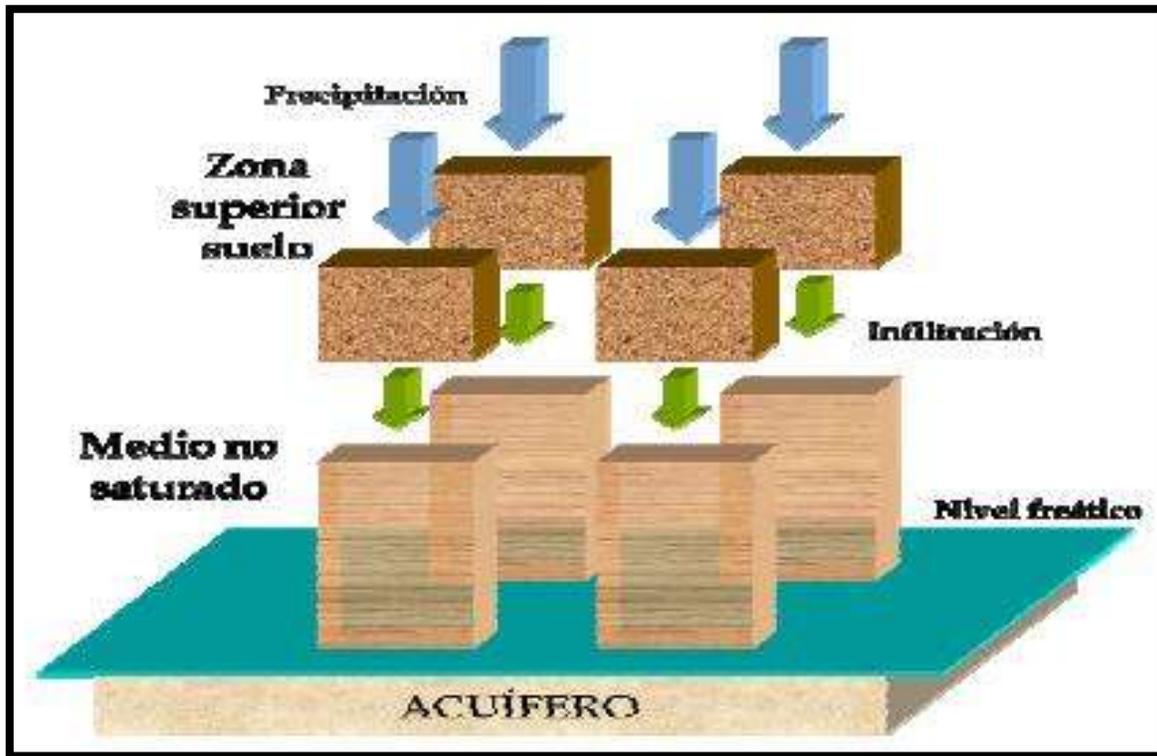


Figura 24. División del terreno para la simulación de la calidad química del agua.

5.2.1. MODELACIÓN DE NITRATOS

Los aportes de nitrógeno requieren un tratamiento diferenciado según el origen que tenga el mismo. En el caso de los aportes debidos a los vertidos urbanos, el nitrógeno se encuentra en forma de nitrato y es transportado directamente por la escorrentía superficial de forma que su modelación únicamente requiere de su acumulación en la red fluvial. Diferente tratamiento requieren los aportes de nitrógeno en la agricultura y ganadería, ya que éstos se

encuentran depositados en la zona superficial del suelo y es movilizado únicamente en forma de nitrato por los arrastres e infiltraciones generados por la lluvia y por los retornos de riego, ya sean superficiales o en forma de recarga al acuífero. Por este motivo es necesario modelar el balance de nitrato en el suelo y su movimiento a través del medio no saturado, de los acuíferos, de la descarga por manantiales y de su movimiento a través de la red fluvial.

El modelo consta de un módulo de simulación simplificado que reproduce el transporte de nitrato en el suelo, en el medio no saturado, en los acuíferos y en las masas de agua superficiales. El modelo desarrollado incorpora como aportes antrópicos de nitrógeno, en su forma movilizable (nitrato): los generados por los vertidos urbanos (fuentes de contaminación puntual), y los generados por la agricultura, ganadería, etc... (Fuentes de contaminación difusa).

El exceso de nitrógeno que se produce cada año en la zona más superficial del suelo procede fundamentalmente de la agricultura y la ganadería, pero también de la deposición atmosférica o la fijación biológica. El exceso de nitrógeno es la cantidad de nitrógeno que no es aprovechada por la vegetación o que no se volatiliza, etc..., y que por lo tanto es potencialmente movilizable por el agua.

Existen diferentes formas y modelos que permiten determinar el nitrato que es arrastrado por el agua en el suelo, el lixiviado, o que potencialmente puede ser movilizado, como los modelos que plantean el balance del nitrógeno en el suelo y que determinan el exceso de nitrógeno que se produce en el suelo. El modelo de desarrollado realiza la simulación del movimiento del nitrato, por lo que para este modelo la cantidad de nitrato que se genera cada año es un dato de partida para la simulación.

A partir del exceso de nitrógeno (o de nitrato) que se genera cada año, se obtiene el excedente en cada mes $N_{exec\ ij\ t}$, mediante la aplicación de una distribución mensual. Estos valores son los datos de partida con los que se inicia la simulación del movimiento del nitrato a través de la cuenca hidrográfica.

El nitrato (denominado N en las ecuaciones) retenido en la zona superficial del suelo se obtiene por balance del existente anteriormente $iN_{suel\ ij,t}$, más el exceso de nitrógeno generado en ese mes $N_{exec\ ij,t}$, menos el nitrato que sale del suelo en ese mes $N_{sal\ ij,t}$, ya sea arrastrado por la escorrentía superficial o infiltrándose al acuífero.

$$N_{suel\ ij,t} = (N_{suel\ ij,t-1} + N_{exec\ ij,t} - N_{sal\ ij,t}) \cdot e^{-k_{desn}}$$

Donde:

- * $N_{suel\ ij,t}$, es el contenido de nitrato en el suelo (kg - 3 NO /ha) en la celda "ij" en el mes "t".
- * $N_{exec\ ij,t}$, es el exceso de nitrato generado en la superficie del terreno en el mes (kg - 3 NO /ha) en la celda "ij" en el mes "t".
- * k_{desn} , es la constante de desnitrificación por larga estancia del nitrato en el suelo.

* $Nsal_{ij,t}$, es el nitrato arrastrado por el agua en el mes “t”, superficial y subterráneo, y se obtiene mediante la expresión:

$$Nsal_{ij,t} = (Nsuel_{ij,t-1} + Nexec_{ij,t}) \cdot \left[1 - e^{\left(-kss \frac{Hidro_{ij,t}}{Hmax_{ij}} \right)} \right]$$

Siendo:

* kss , es el coeficiente de velocidad de paso del nitrato en el suelo o de eficiencia de lavado.

* $Hidro_{ij,t}$, es el excedente hidrológico (mm) en la celda “ij” en el mes “t”, correspondiente a la escorrentía superficial y a la infiltración en régimen natural, y en régimen alterado deben sumarse los retornos y recargas de agua producidos por la agricultura, ya que éstos favorecen el lavado del suelo.

* $Hmax_{ij,t}$, es la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (mm)

La formulación definida atiende al mayor lavado del nitrato que se produce cuando el agua que atraviesa el suelo es mayor, y está gobernada por la relación entre el agua circulante $Hidro_{ij,t}$ y la máxima capacidad de retención de agua en el suelo $Hmax_{ij,t}$, ya que en suelos donde hay más capacidad de retener agua el nitrógeno retenido es mayor.

La constante de desnitrificación por larga estancia del nitrógeno en el suelo kss , reproduce aquellas situaciones en las que el nitrógeno se encuentra almacenado en el suelo sin que se produzcan lluvias o riegos, por lo que con el transcurso de los meses el contenido de nitrógeno en el mismo se va reduciendo por desnitrificación. Debe tenerse en cuenta que en el cálculo del exceso de nitrógeno ya se había considerado la desnitrificación a corto plazo, por lo que este concepto se corresponde a estancias de varios meses o años del nitrógeno en el suelo.

Para obtener la concentración de nitratos que tiene el suelo debe dividirse el contenido de nitratos en el suelo ($kg NO_3^- /ha$) por el contenido de humedad del suelo (mm), mediante la siguiente expresión:

$$CNsuel_{ij,t} = 100 \cdot \frac{Nsuel_{ij,t}}{H_{ij,t}}$$

Donde:

* $CNsuel_{ij,t}$, es la concentración de nitrato en la celda “ij” en el mes “t”, (mg/l).

* $Nsuel_{ij,t}$, es el contenido de nitrato en el suelo en la celda “ij” en el mes “t” (kg/ha).

* $H_{ij,t}$, es la humedad del suelo en la celda “ij” en el mes “t” (mm).

El nitrato que es movilizado del suelo es arrastrado por la escorrentía superficial o se infiltra al acuífero con la misma concentración de nitratos en ambos casos, por lo que las expresiones quedan de la siguiente forma:

$$Nesc_{ij,t} = Nsal_{ij,t} \cdot \frac{Hidrosup_{ij,t}}{Hidro_{ij,t}}$$

$$Ninf_{ij,t} = Nsal_{ij,t} \cdot \frac{Hidroinf_{ij,t}}{Hidro_{ij,t}}$$

Donde:

- * $Nesc_{ij,t}$, es el nitrato arrastrado (kg NO_3^- /ha) por el agua de escorrentía superficial de la celda “ij” en el mes “t”.
- * $Ninf_{ij,t}$, es el nitrato arrastrado (kg NO_3^- /ha por el agua que percola en la celda “ij” en el mes “t”.
- * $Hidrosup_{ij,t}$, es la escorrentía superficial (mm) de la celda “ij” en el mes “t”, compuesta por la escorrentía de lluvia y los retornos agrícolas superficiales.
- * $Hidroinf_{ij,t}$, es el agua que percola (mm) en la celda “ij” en el mes “t”, compuesta por la infiltración de lluvia y las infiltraciones de agua por riegos.
- * $Hidro_{ij,t}$, es el agua que sale (mm) de la celda “ij” en el mes “t”, compuesta por la infiltración total $Hidroinf_{ij,t}$ y la escorrentía superficial total $Hidrosup_{ij,t}$,

El nitrato que se infiltra alcanza lo que se ha denominado almacenamiento en medio no saturado, donde parte de él queda retenido y el resto viaja por este medio hasta alcanzar el nivel freático donde se encuentra el acuífero. El balance del nitrato retenido en el medio no saturado atiende a la siguiente expresión:

$$Nns_{ij,t} = Nns_{ij,t-1} + Ninf_{ij,t} - NsalNs_{ij,t}$$

Donde:

- * $Nns_{ij,t}$, es el contenido de nitrato (kg NO_3^- /ha) en medio no saturado en la celda ij en el mes t.
- * $NsalNs_{ij,t}$, es el contenido de nitrato (kg NO_3^- /ha) que sale del medio no saturado en la celda ij en el mes t, y que alcanza el acuífero. Se obtiene mediante la expresión:

$$NsalNs_{ij,t} = (Nns_{ij,t-1} + Ninf_{ij,t}) \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-kns \cdot Hidroinf_{ij,t} \cdot Imax_{ij}}{1 + dpiezo_{ij,t}} \right)} \right]$$

- * $Imax_{ij}$, es la máxima capacidad de infiltración (mm) de agua de la celda “ij”.
- * $dpiezo_{ij,t}$, es la distancia a la que se encuentra el nivel piezométrico de la superficie (mm) en la celda “ij” en el mes “t”.
- * kns , es el coeficiente de facilidad de paso del agua a través del medio no saturado (mm-1).

La expresión anterior atiende a que una mayor capacidad de infiltración del terreno, $Imax_{ij}$, elevado, favorece el paso del nitrato por el mismo y por otra parte, que la

profundidad a la que se encuentre el acuífero, es decir la distancia a recorrer en el medio no saturado, ralentiza la incorporación de nitrato en el acuífero y además incrementa la capacidad de almacenar nitrato en la zona no saturada. Además, subidas del nivel freático provocarán lavados de la zona no saturada, por lo que movilizarán grandes cantidades de nitrato en plazos reducidos de tiempo.

El acuífero se ha considerado como un medio totalmente dispersivo por lo que todo el nitrato que alcanza el acuífero se mezcla con el agua allí almacenada en su totalidad.

$$CNacu_{k,t} = \frac{Nacu_{k,t-1} + Nrec_{k,t} - Nsalacu_{k,t}}{V_{k,t}}$$

Donde:

- * $CNacu_{k,t}$, es la concentración de nitrato ($\text{mg NO}_3^-/\text{l}$) en el acuífero “ k ” en el mes “ t ”.
- * $Nacu_{k,t-1}$, es el contenido de nitrato (kg NO_3^-) en el acuífero “ k ” en el mes anterior.
- * $Nrec_{k,t} = \sum_{acuifero_{o,k}}^{i,j} NsalNs_{ij,t}$, es la suma del nitrato infiltrado al acuífero
- * (kgNO_3) por el agua que percola en las celdas “ ij ” en el mes “ t ”, situadas sobre el acuífero “ k ”.
- * $Nsalacu_{k,t}$, son las salidas de nitrato (kg NO_3^-) del acuífero “ k ” en el mes “ t ” a la red superficial.
- * $V_{k,t}$, volumen de agua almacenado en el acuífero “ k ” en el mes “ t ”.

El nitrato que sale de los acuíferos va unido a la escorrentía subterránea, de forma que descarga por las zonas de drenaje de cada acuífero. Una vez en la red superficial se une al nitrato arrastrado por la escorrentía superficial y el procedente de los vertidos superficiales, formando el contenido total de nitrato en la red superficial.

$$Ntotal_{ij,t} = Nsalacu_{ij,t} + Nesc_{ij,t} + Nvert_{ij,t}$$

Donde:

- * $Nsalacu_{ij,t}$, nitrato procedente de la descarga de los acuíferos sobre la superficie del terreno (kg NO_3^-) en la celda “ ij ” en el mes “ t ”.
- * $Nesc_{ij,t}$, nitrato arrastrado por la escorrentía superficial (kg NO_3^-) en la celda “ ij ” en el mes “ t ”.
- * $Nvert_{ij,t}$, nitrato procedente del vertido de aguas urbanas (kg NO_3^-) en la celda “ ij ” en el mes “ t ”.

El nitrato total se acumula en la red de drenaje mediante el modelo digital de elevaciones, de forma que puede obtenerse, al dividir por la aportación, la concentración de nitrato mensual en toda la red fluvial.

$$CNred_{ij,t} = \frac{Ntotal_{ij,t}^{acum}}{ApoRed_{ij,t}}$$

Donde:

- * $CNred_{ij,t}$, concentración de nitrato ($mg\ NO_3^-/l$) en la red fluvial “*ij*” en el mes “*t*”.
- * $Ntotal_{ij,t}^{acum}$, nitrato acumulado ($kg\ NO_3^-$) en la red fluvial en la celda “*ij*” en el mes “*t*”.
- * $ApoRed_{ij,t}$, aportación en régimen alterado en la red fluvial “*ij*” en el mes “*t*”.

5.2.2. MODELACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica es un parámetro indicativo del contenido de sales del agua, que pueden tener: origen natural, como es el caso de formaciones geológicas ricas en sales, o del arrastre de sales de la zona superficial del suelo; u origen antrópico, como son las sales procedentes de los excedentes del regadío, de las áreas urbanas o las sales que arrastra el agua de lluvia en las áreas de cultivo de secano.

El agua de lluvia al pasar por la superficie del suelo aumenta su contenido en sales, aumentando por lo tanto la conductividad eléctrica del agua, escurriendo superficialmente o infiltrándose al acuífero. La cantidad de sales que se disuelvan en el agua depende del tipo de suelo y del tipo de uso del suelo por donde discurre, especialmente en las zonas agrícolas de temporal y de regadío.

La incorporación de sales que alteran la conductividad eléctrica del acuífero se realiza mediante la utilización del mapa de geología, donde se asigna una conductividad a capa tipo geológico del mismo. Para cada acuífero se obtienen los distintos tipos geológicos existentes en el mismo, y dado que el acuífero se considera como una celda totalmente mezclada, se calcula el nivel de conductividad de base del acuífero. Las afecciones antrópicas y la infiltración por lluvia pueden aumentar la conductividad del acuífero por encima de su nivel base.

El modelo desarrollado incorpora como aportes de sales: los aportes antrópicos, generados por los vertidos urbanos, como fuentes de contaminación puntual, y los generados por la agricultura, como fuentes de contaminación difusa; y los aportes naturales de sales procedentes de la disolución de sales en la superficie terrestre y en las formaciones geológicas al paso del agua por los acuíferos.

Las sales en la zona superficial del suelo se obtienen por balance de masas en la zona superficial. Las componentes del balance son: el agua existente anteriormente en el suelo, la humedad $H_{ij,t}$, con una conductividad $Csuel_{ij,t}$; más la cantidad de sales incorporadas

en ese mes por los aportes de agua $HidroApo_{ij,t}$, con una conductividad $Cext_{ij,t}$, que proceden de la cantidad de agua incorporada por la generación de escorrentía, el excedente $T_{ij,t}$, con una conductividad dependiente de los usos de suelo $Cusos_{ij,t}$ y por las recargas agrícolas $Rec_agri_{ij,t}$ con una conductividad $Crec_{ij,t}$; menos las sales que salen del suelo en ese mes correspondientes a las salidas de agua $HidroSal_{ij,t}$, con una conductividad $Csal_{ij,t}$

$$Csuel_{ij,t} = \frac{(Csuel_{ij,t-1} \cdot H_{ij,t-1} + Cext_{ij,t} \cdot HidroApo_{ij,t} - HidroSal_{ij,t} \cdot Csal_{ij,t}) \cdot e^{-k_{vol}}}{H_{ij,t}}$$

Donde:

- * $H_{ij,t}$, es la humedad del suelo (mm) en la celda “ij” en el mes “t”.
- * $Csuel_{ij,t}$, es la conductividad eléctrica del agua en el suelo (microS/cm) en la celda “ij” en el mes “t”.
- * $HidroApo_{ij,t}$, es el agua incorporada al suelo (mm) en la celda “ij” en el mes “t”.
- * $Cext_{ij,t}$, es la conductividad eléctrica del agua incorporada al suelo (microS/cm) en la celda “ij” en el mes “t”.

Estando formada por:

El aporte de agua de lluvia con la conductividad debida a los usos de suelo, y el aporte de agua de la recarga de riegos con la conductividad de estas zonas agrícolas:

$$Cext_{ij,t} \cdot HidroApo_{ij,t} = Cusos_{ij,t} \cdot T_{ij,t} + Crec_{ij,t} \cdot Rec_agri_{ij,t}$$

Donde:

- $T_{ij,t}$, es el excedente generado (mm) en la celda “ij” en el mes “t”.
- $Cusos_{ij,t}$, es la conductividad eléctrica del agua debida a los diferentes usos del suelo, que se obtiene a partir del mapa de usos de suelo (microS/cm) en la celda “ij” en el mes “t”.
- $Rec_agri_{ij,t}$, es la recarga del regadío (mm) en la celda “ij” en el mes “t”.
- $Crec_{ij,t}$, es la conductividad eléctrica del agua de los retornos de riego en forma de recarga (microS/cm) en la celda “ij” en el mes “t”.
- * k_{vol} , constante de volatilización por larga estancia de las sales en el suelo, que al ser sustancias conservativas, es decir, que no se degradan o volatilizan, su valor es igual a cero.
- * $Csal_{ij,t}$, la conductividad del agua que sale del suelo, $Hidro_{ij,t}$, en el mes “t”, y se obtiene:

$$Csal_{ij,t} = \frac{(Csuel_{ij,t-1} \cdot H_{ij,t-1} + Cext_{ij,t} \cdot HidroApo_{ij,t}) \cdot \left(1 - e^{\left(-k_{SS} \frac{Hidro_{ij,t}}{H_{max_{ij}}}\right)}\right)}{Hidro_{ij,t}}$$

Siendo:

k_{SS} , es el coeficiente de velocidad de paso de las sales en el suelo o de eficiencia de lavado.

$Hidro_{ij,t}$, es el excedente hidrológico (mm) en la celda “ ij ” en el mes “ t ”, correspondiente a la escorrentía superficial y a la infiltración en régimen natural, y en régimen alterado deben sumarse los retornos y recargas de agua producidos por la agricultura, ya que favorecen el lavado del suelo.

$Hmax_{ij}$, es la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (mm).

La formulación definida es similar a la empleada en el caso del nitrato, y atiende al mayor lavado de sales que se produce cuando el agua que atraviesa el suelo es mayor, y está gobernada por la relación entre agua circulante $iHidro_{ij,t}$, y la máxima capacidad de retención de agua en el suelo $Hmax_{ij}$, ya que en suelos donde hay más capacidad de retener agua la cantidad de sales retenidas es mayor.

Las sales que son movilizadas del suelo son arrastradas por la escorrentía superficial o se infiltran al acuífero con la misma conductividad eléctrica, por lo que las expresiones de conductividad del agua que se infiltra o escurre superficialmente quedan de la siguiente forma:

$$Cesc_{ij,t} = Cinf_{ij,t} = Csal_{ij,t}$$

Donde:

- * $Cesc_{ij,t}$, es la conductividad (microS/cm) del agua de escorrentía superficial de la celda “ ij ” en el mes “ t ”.
- * $Cinf_{ij,t}$, es la conductividad (microS/cm) del agua que percola en la celda “ ij ” en el mes “ t ”.

Las sales que se infiltran alcanzan lo que se ha denominado almacenamiento en medio no saturado, donde parte de las sales quedan retenidas y el resto viaja por este medio hasta alcanzar el nivel freático donde se encuentra el acuífero. El balance del contenido de sales retenidas en el medio no saturado atiende a la siguiente expresión:

$$CSns_{ij,t} = Cns_{ij,t-1} + Cinf_{ij,t} \cdot Hidroinf_{ij,t} - CsalNs_{ij,t} \cdot Hidroinf_{ij,t}$$

Donde:

- * $CSns_{ij,t}$, es el contenido de sales (microS*mm/cm) en medio no saturado en la celda “ ij ” en el mes “ t ”.
- * $Hidroinf_{ij,t}$, es el agua que percola (mm) en la celda “ ij ” en el mes “ t ”, compuesta por la infiltración de lluvia y las infiltraciones de agua por riegos.
- * $CsalNs_{ij,t}$, es la conductividad eléctrica del agua que sale del medio no saturado en la celda “ ij ” en el mes “ t ”, y que alcanza el acuífero. Se obtiene mediante la expresión:

$$CsalNs_{ij,t} = \frac{(Cns_{ij,t-1} + Cinf_{ij,t} \cdot Hidroinf_{ij,t}) \cdot \left(1 - e^{\left(-kns \frac{Hidroinf_{ij,t} \cdot Imax_{ij}}{1 + dpiezo_{ij}}\right)}\right)}{Hidroinf_{ij,t}}$$

Donde:

- * $Imax_{ij}$, es la máxima capacidad de infiltración (mm) de agua de la celda “ij”.
- * $dpiezo_{ij}$, es la distancia a la que se encuentra el nivel piezométrico de la superficie (mm) en la celda “ij” en el mes “t”.
- * kns , es el coeficiente de facilidad de paso del agua a través del medio no saturado (mm-1).

La expresión anterior atiende por una parte, que una mayor capacidad de infiltración del terreno, $Imax_{ij}$ elevado, favorece el paso de las sales por el mismo, y por otra parte, que la profundidad a la que se encuentre el acuífero, es decir la distancia a recorrer en el medio no saturado, ralentiza la incorporación de las sales al acuífero y además incrementa la capacidad de almacenar sales en la zona no saturada. Además, subidas del nivel freático provocarán lavados de la zona no saturada, por lo que movilizarán grandes cantidades de sales en plazos reducidos de tiempo.

El acuífero se ha considerado como un medio totalmente dispersivo por lo que las sales que alcanzan el acuífero se mezclan con el agua allí almacenada en su totalidad. Además, y dado que las formaciones geológicas que configuran el acuífero modifican el contenido de sales en el mismo, se ha considerado que la conductividad mínima que se produce en el acuífero se corresponde a la combinación de las conductividades que aporta cada formación geológica dentro del acuífero.

$$Cacu_{k,t} = \min \left[\frac{Cacu_{k,t-1} \cdot v_{k,t-1} + Crec_{k,t} \cdot Rec_{k,t} + Csalacu_{k,t} \cdot Salacu_{k,t}}{v_{k,t} \cdot \frac{\sum_{acuífero_k}^{ij} Cgeo_{ij}}{Nceldas_k}} \right]$$

$Cacu_{k,t}$, es la conductividad eléctrica (microS/cm) en el acuífero “k” en el mes “t”.

$Crec_{k,t} = \frac{\sum_{acuífero_k}^{ij} CsalNs_{ij,t} Hidrosal_{ij,t}}{Rec_{k,t}}$, es la conductividad media del agua que

recarga el acuífero “k” (microS/cm), es decir, del agua que percola en las celdas “ij” en el mes “t” situadas sobre el acuífero “k”.

Donde:

- * $Rec_{k,t} = \sum_{acuífero_k}^{ij} Hidrosal_{ij,t}$, es la recarga total del acuífero.
- * $Csalacu_{k,t}$, es la conductividad del agua de salida del acuífero a la red superficial $Salacu_{k,t}$

- * $v_{k,t}$, es el volumen de agua almacenado en el acuífero “ k ” en el mes “ t ”
- * $C_{geo_{ij}}$, es la conductividad de los diferentes materiales geológicos en las celdas “ ij ” del acuífero del “ k ”.
- * N_{celdas_k} , es el número de celdas del acuífero del “ k ”.

Las sales que salen del acuífero van disueltas a la escorrentía subterránea, de forma que la descarga se produce por las zonas de drenaje de cada acuífero con la misma conductividad del agua de salida del acuífero $C_{drenac_{ij,t}} = C_{salacu_{k,t}}$

Una vez en la superficie, se unen las sales arrastradas por la escorrentía superficial (que incluía los retornos agrícolas superficiales) y las procedentes de los vertidos superficiales, obteniéndose la conductividad total del agua en la superficie del terreno.

$$C_{Stotal_{ij,t}} = C_{drenacu_{ij,t}} \cdot Drenacu_{ij,t} + C_{esc_{ij,t}} \cdot Hidrosup_{ij,t} + C_{vert_{ij,t}} \cdot C_{ver_{ij,t}}$$

Donde:

- * $C_{Stotal_{ij,t}}$, es el contenido total de sales en la superficie del terreno (microS*mm/cm).
- * $C_{drenacu_{ij,t}}$, es la conductividad del agua procedente de la descarga de los acuíferos sobre la superficie del terreno.
- * $C_{esc_{ij,t}}$, es la conductividad del agua por la escorrentía superficial (microS/cm).
- * $C_{vert_{ij,t}}$, es la conductividad del agua procedente de los vertidos de aguas urbanas (microS/cm).

El contenido en sales se acumula en la red de drenaje mediante el modelo digital de elevaciones, de forma que puede obtenerse, al dividir por la aportación, la conductividad eléctrica (microS/cm) mensual en toda la red fluvial.

$$C_{red_{ij,t}} = \frac{C_{Stotal_{ij,t}^{accum}}}{ApoRed_{ij,t}}$$

- * $C_{red_{ij,t}}$, es la conductividad eléctrica (microS/cm) en la red fluvial “ ij ” en el mes “ t ”.
- * $N_{total_{ij,t}^{accum}}$, es el contenido de sales acumuladas (microS*mm/cm) en la red fluvial en la celda “ ij ” en el mes “ t ”.
- * $ApoRed_{ij,t}$, es la aportación en régimen alterado en la red fluvial “ ij ” en el mes “ t ”.

6. APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO Y DE CALIDAD DEL AGUA

6.1. PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para la realización de una modelación de alguna área determinada es necesario considerar varios factores que van a determinar la calidad y la eficiencia del estudio, algunos son: la información necesaria para la modelación, la extensión del área que se quiere modelar, la cantidad de información con que se va a manejar, el buen manejo de esta, las fuentes de

información, organismo que cuentan con la información que requerimos y si en el área de estudio se tienen registros, y la variabilidad temporal y espacial de la información que es indispensable para la modelación.

Otros problemas con lo que nos encontramos al realizar una modelación son el formato de mapas, las unidades del sistema, formato de tablas y acomodo de datos, etc.

Además de una buena información, es necesario considerar que para una modelación también es necesario calibración de un conjunto de parámetros que permitan reproducir lo más fehacientemente la realidad en el área de estudio.

Para la modelación del Ciclo Hidrológico, con el módulo PATRICAL (Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad del Agua), es necesario contar con diferente tipo de información para ingresar en el programa; dependiendo de la precisión de nuestra información se obtendrán la calidad de los resultados y la precisión de la calibración.

La información que requiere el módulo es de diferente tipo y en México es manejada por diferentes organismos o instituciones, (INEGI, CNA, OOAPAS, etc.) por lo que la adquisición de dicha información puede demorar el progreso de la investigación.

6.1.1. CAPAS O MAPAS DIGITALES BÁSICOS DEL ÁREA EN ESTUDIO.

Existen diferentes tipos de mapas que pueden ser vectoriales o raster (matricial). En los mapas vectoriales existen tres tipos de entidades que componen la estructura de los datos geográficos: puntos, líneas y polígonos (o áreas). Cada una de estas entidades es definida por coordenadas pueden ser UTM, geográficas, etc. Y un identificador. Las líneas y los polígonos vienen definidos a través de una serie de puntos que serán unidos, en su representación espacial mediante rectas. Cada entidad posee un identificador y sus atributos se almacenan en una base de datos alfanuméricos tradicional que será asociada con cada identificador.

Para el caso de mapas matriciales las categorías y atributos correspondientes a una capa de información (ríos, cuencas, usos de suelo y atributos, etc.) se almacenan en una matriz en la que cada elemento de la misma representa una porción del terreno. Por lo tanto, la zona de estudio se discretiza en una serie de celdas de tamaño conocidas (malla de $m \times n$ elementos iguales) y cada elemento así definido se le asigna su categoría y atributos correspondientes.

Cada uno de ellos tiene ventajas y desventajas. Los mapas tipo raster presentan como desventaja, el hecho de que necesitan almacenar información en cada una de las celdas en la que se discretiza el área a estudiar y podría ocurrir gran parte de la información no fuera de interés. Por ejemplo, si tan solo se deseara representar los ríos de una región, habrían una gran cantidad de celdas que no serían atravesadas por ningún río y que sin embargo estarían ocupando espacio con una categoría y atributo asociado a "no data". Por esta razón son más adecuados para el almacenamiento y gestión de grandes bases de datos, mientras que los

sistemas de tipo raster ofrecen posibilidades para el análisis matemático de los datos, sobre aquellos que cambian continuamente en el espacio.

Otro de los problemas de los mapas de tipo raster es el problema al calcular las áreas, longitudes y perímetros de las entidades que contienen y las visualizaciones son mucho más “gruesas” que las desarrolladas con sistemas vectoriales. En estos se tiene la posibilidad de visualizar los mapas con los valores de las características sobre entidades. En los sistemas raster se produce, además, enormes dificultades para trabajar con redes y para enfrentarse a problemas que requieran la información de la topología, corte de mapas, tareas que se realiza fácilmente en los mapas vectoriales. Pero en los sistemas vectoriales no se puede tratar con variables distribuidas espacialmente, además con se sistemas mas complejos y no están especialmente indicados para la modelación de procesos.

Los tipos de archivos mas utilizados de tipo raster son: grid, ascii y binary, etc.; por su parte algunos tipos de mapas vectoriales son: shapefiles con extensión .shp, archivos de CAD, con extensiones .dwg, .dxf, .dgn, etc.

En México toda la información de mapas es manejada por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía); los formatos que maneja para la distribución de mapas con la extensiones .bil para MDE y .dxf, para la mayoría de la información que maneja (por ser compatibles con AutoCad y ArcView).

Para la realización de los mapas del presente trabajo se manejo todo mediante el SIG ArcView Gis 3.2, por se un programa de manejo sencillo en donde se puede visualizar y modificar los mapas mediante una interfaz grafica, este programa puede añadir mapas en formato raster y vectorial, con las extensiones. .shp, y grid, aunque estos son los mapas que se pueden manipular en el SIG, también pueden llamar a mapas con extensión .asc (ascii), y .dxf, entre otros.

El formato necesario para el modulo PATRICAL es el ascii, como ya se menciona es un formato de tipo raster que almacena la información en celdas; Para hacer la generación de este tipo de formato en ArView, solo es necesario realizar un grid de la información necesaria para después exportarlo en este formato. La resolución espacial para la modelación fue de 1000 x 1000.

Los mapas que son comercializados por el INEGI, tienen diferente escala por ejemplo, 1:250000,1:50000 o 1:1000000, entre otras y la mayoría se encuentra en coordenadas geográficas, aunque algunos que se descargan de la página pueden estar en Proyección Cónica de Lambert (CCL); dependiendo del tipo de mapa que requerimos necesitamos ver la escala en que se maneja para la adquisición.

Los mapas que se requieren adquirir para la modelación hidrológica son los siguientes:

- * Modelo digital de elevación (mde)
- * Mapas de usos de suelo
- * Mapa de geología

La forma clásica de obtener un mde se realiza a partir de información contenida en la cartografía convencional, es decir, a partir de las curvas de nivel de un plano, previa digitalización y posterior interpolación, y según casos, tras realizar un filtrado y una depuración de errores.

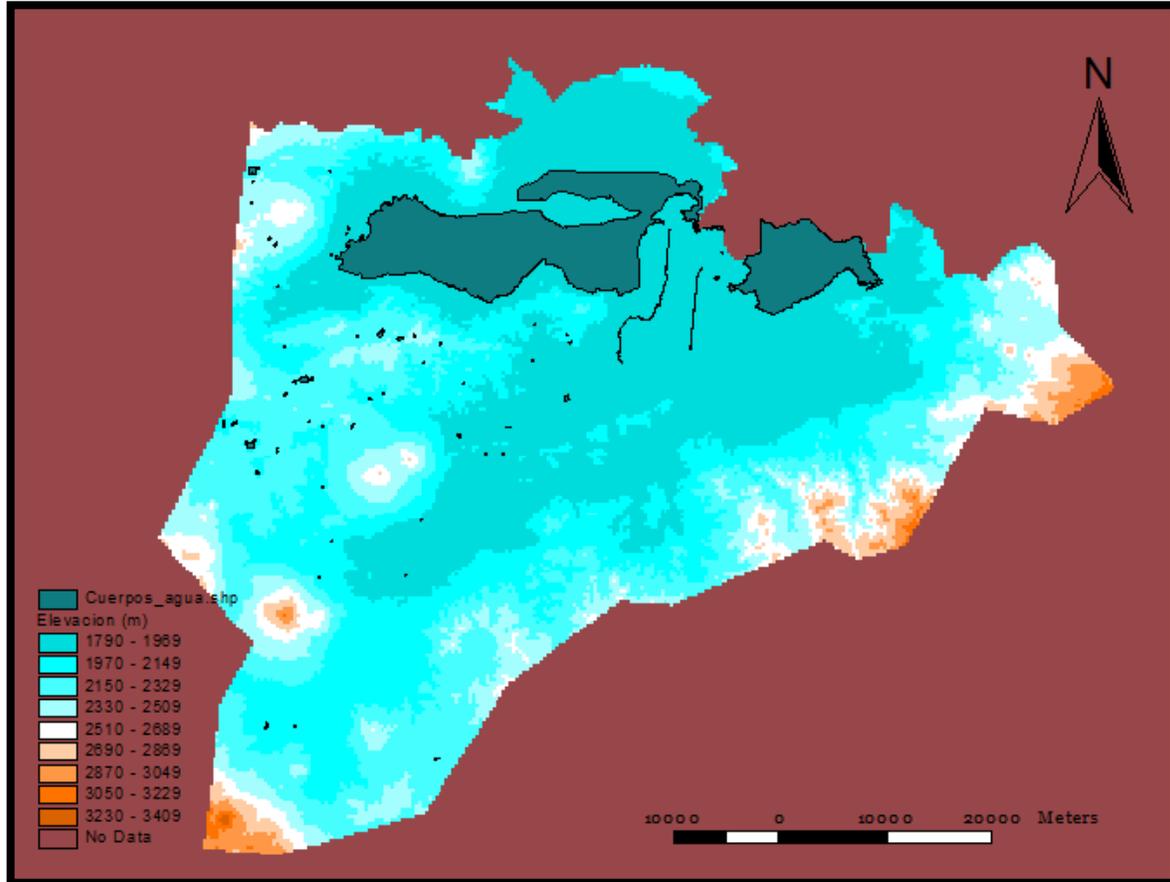


Figura 25. Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

El modelo digital de elevación (mde), se puede descargar directamente de la pagina del INEGI, solo es necesario tener las coordenadas geográficas y/o el código del área que necesitamos estudiar, la escala que se maneja para este tipo de información es de 1:50,000 y se encuentra en coordenadas geográficas; para el caso de mde fue necesaria la unión de 12 mde cuyas claves son F14C82, F14C83, F14C84, E14A12, E14A13, E14A14, E14A15, E14A22, E14A23, E14A24, E14A32, E14A33.

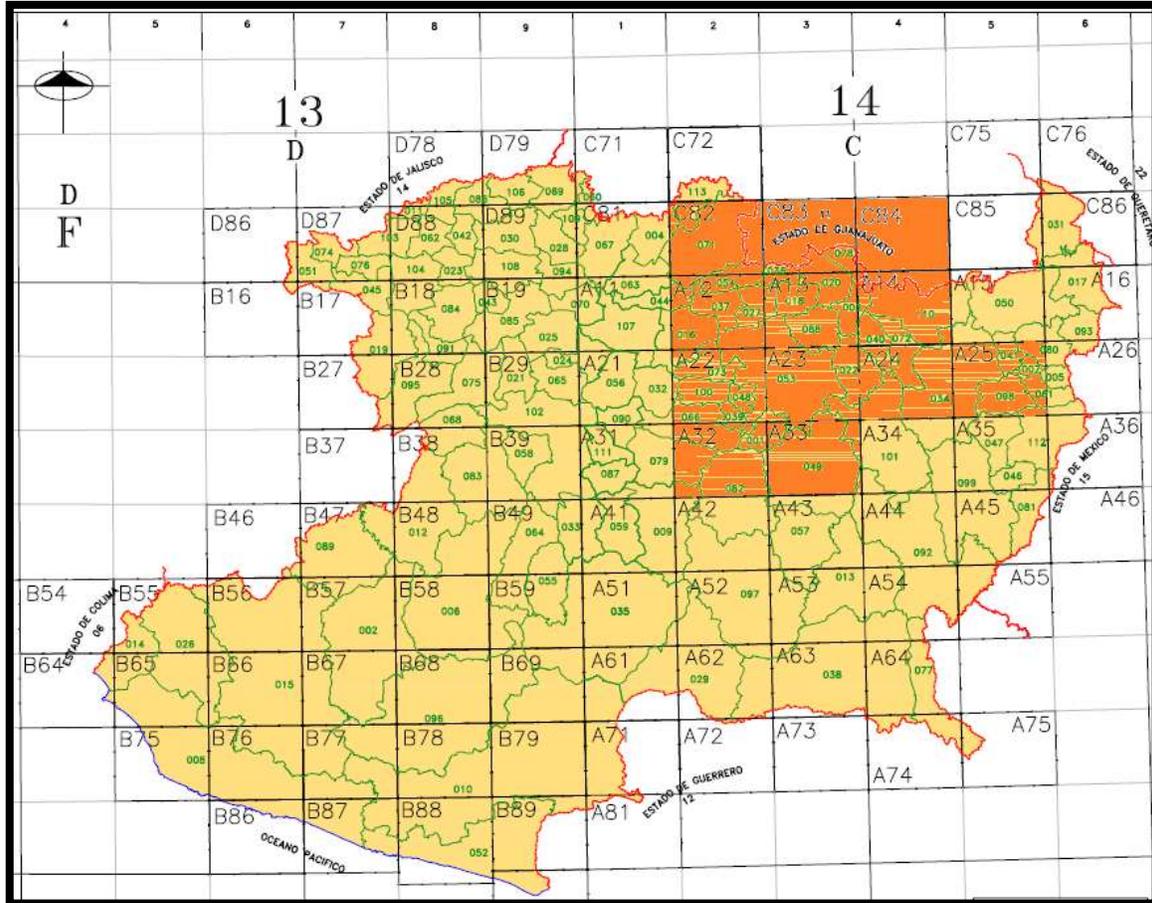


Figura 26. Código de la información del área de estudio escala 1:50,000

Para trabajar con lo mapas de Geología y uso de suelo, estos mapas se encuentran en escala de 1:250,000, por lo que los códigos que se tienen de estos mapas son diferentes; al ser la escala mayor, el área que contiene cada mapa es igualmente mayor, por lo que para el área de estudio solamente fueron necesarios tener los mapas con el código, E1401 Y E1404.

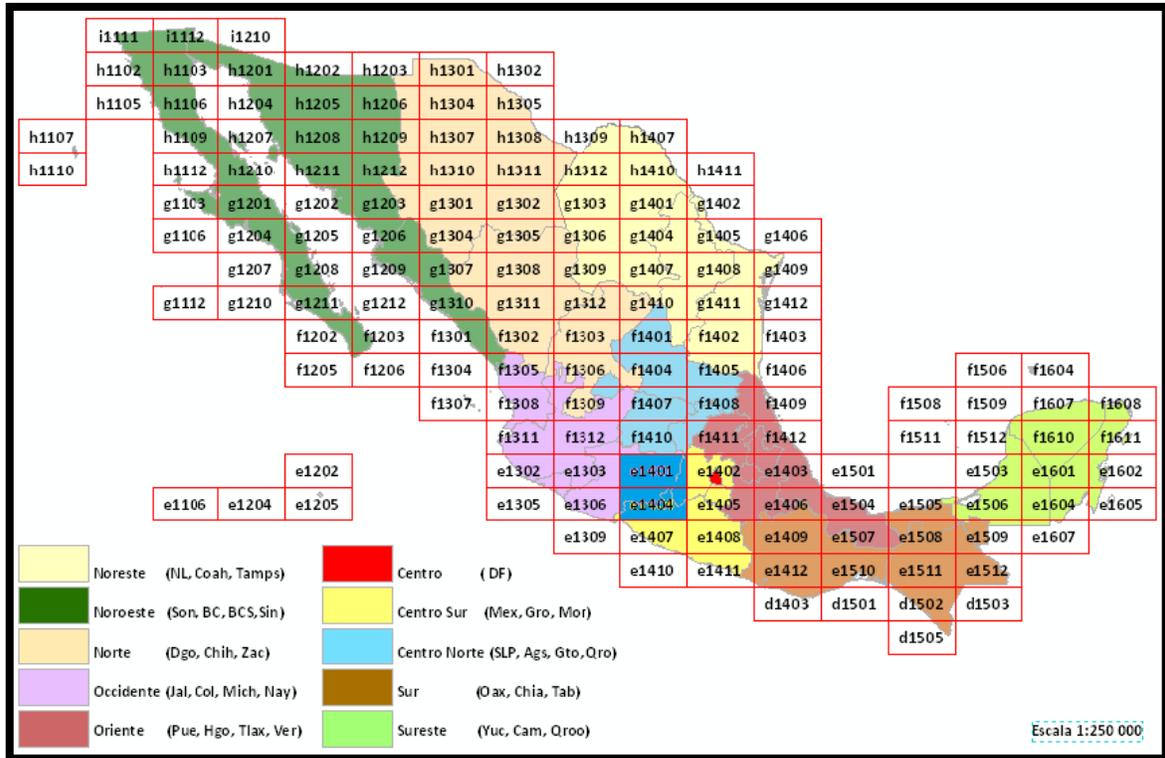


Figura 27. Código de la información del área de estudio en escala 1:250,000.

Además de los mapas ya mencionados, es necesario tener otros mapas; estos mapas son de igual manera indispensable para la modelación, muchos de esta información se obtiene de los ya mencionados, otros proviene de una fuente diferente y es necesario tener un manejo diferente; los mapas son:

- Modelación Hidrológica:
 - * Masas de aguas subterráneas
 - * Delimitación de las Demarcaciones Hidrográficas
 - * Mapa de subdivisión del acuífero
 - * Masas de aguas superficiales o red pluvial
 - * Delimitación de las zonas agrícolas
 - * Estaciones de aforo
 - * Puntos de control piezométrico (Pozos)
 - * Estaciones climatológicas
- Calidad del agua:
 - * Mapa de concentraciones media de Nitratos en el Acuífero
 - * Mapa de concentraciones media de Conductividad Eléctrica en el Acuífero

- * Mapa de concentraciones de Nitratos en la red superficial
- * Mapa de concentraciones de Conductividad Eléctrica en la red superficial
- * Mapa de contaminación por Nitratos en el Acuífero
- * Mapa de concentraciones de Nitratos en las descargas de plantas de tratamiento
- * Mapa de concentraciones de Conductividad Eléctrica en las descargas de plantas de tratamiento

Para los primeros tres mencionados anteriormente (masas subterráneas, demarcaciones hidrográficas y división del acuífero), la obtención de esta información es de suma relevancia pues con esta además de vamos a delimitar el área de estudio, se realizara el corte de la mayoría de los mapas que se necesita para la modelación.

Para el mapa de aguas subterráneas este refiere a la delimitación de los acuíferos que se encuentran dentro de la cuenca, sin embargo la cuenca del Rio Grande es una subcuenca del Lago de Cuitzeo de una extensión de 1200 Km² y el acuífero Morelia Queréndaro tiene un área de 3,507 km² por lo que para el presente estudio solo se trabaja con un solo acuífero.

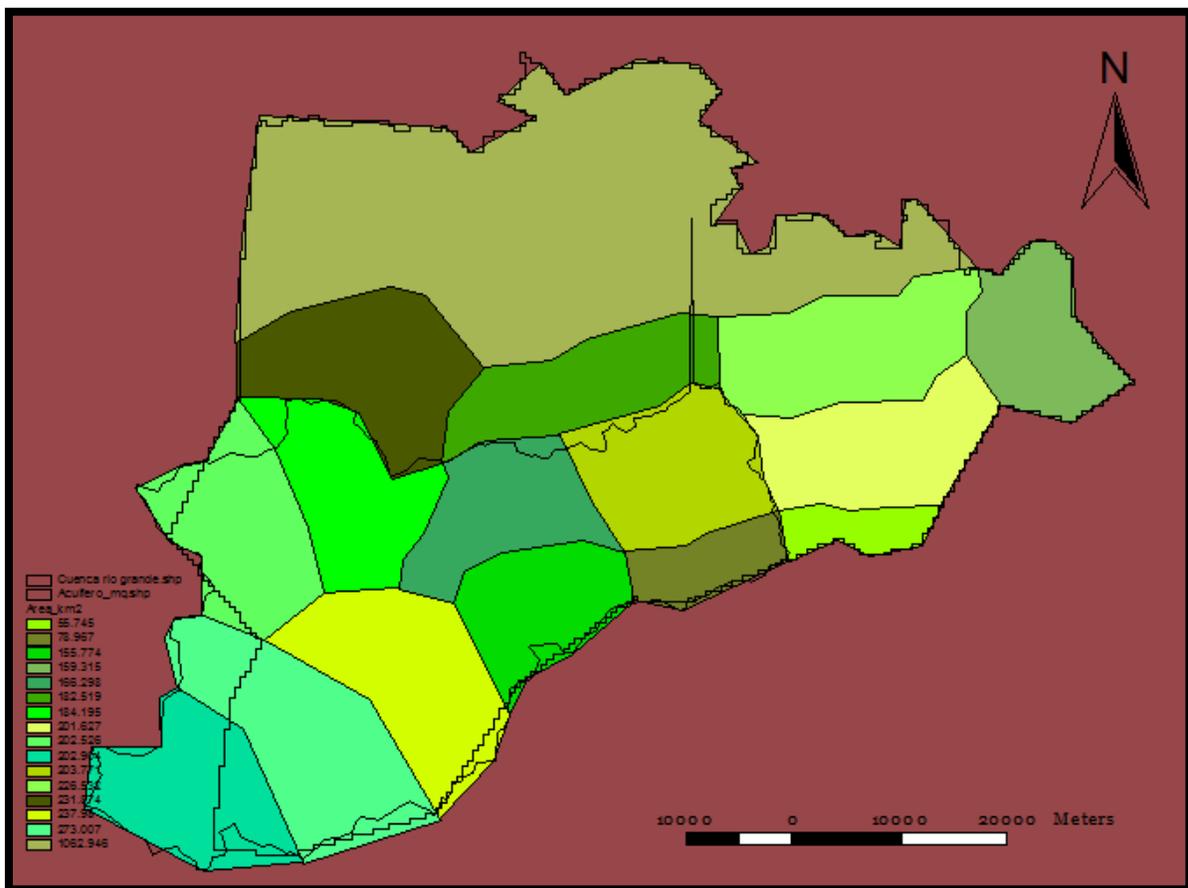


Figura 28. Delimitación de la cuenca, acuífero y división del acuífero.

La CNA en coordinación con el IMTA, en el 2007, realizo varios estudios de acuíferos de

Michoacán, entre ellos el Acuífero Morelia Queréndaro “Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia-Queréndaro y Pastor Ortiz, en el estado de Michoacán Acuífero Morelia-Queréndaro Convenio No. CNA-OCLSP-JAL-CONV-008-2007 Informe final”; en donde contiene los puntos que conforman el polígono del acuífero, entre otros datos importantes del acuífero.

Las demarcaciones hidrográficas es el conjunto de cuencas dentro de una área, actualmente este tipo de estudios en otros países se realiza a una escala mucho mayor en comparación con el área que estamos trabajando, sin embargo en México, la obtención de la información es muy complicada por lo que se dificulta la modelación de un área mayor. Para nuestra investigación las demarcaciones hidrográficas será la cuenca, es decir la delimitación del parteaguas.

La formulación del modelo plantea todas las ecuaciones de transferencia de la cuenca son planteadas en cada una de las celdas, por lo que la información del balance de masas es contenida en cada una de estas; sin embargo para la modelación que se realiza en el acuífero no se aplica por cada celda del acuífero sino que se plantea de manera global para cada acuífero o conjunto de acuíferos; por esta razón es necesario dividir le acuífero en pequeñas áreas, para realizar la modelación del de cada una de estas divisiones.

La división del acuífero se hizo en base de algunas fallas y en función de las subprovincias fisiográficas, del acuífero sin embargo fue necesario implementar otra división, a conciencia para que se pudiera trabajar celdas dentro del acuífero de un área menor de 1000 km²

Para la información de masas de aguas superficiales o red pluvial y delimitación de las zonas agrícolas, se obtiene mediante el mde y el mapa de uso de suelo respectivamente.

Para la ultima información que se requiere en mapa para el modelo hidrológico es información puntual (hidrométricas, pozos y climatológicas) y debe ser información georreferenciada con sus coordenadas que puede ser en tabla o en mapa, para el presente trabajo se trabajo esta información en ambos formatos (tabla y mapas).

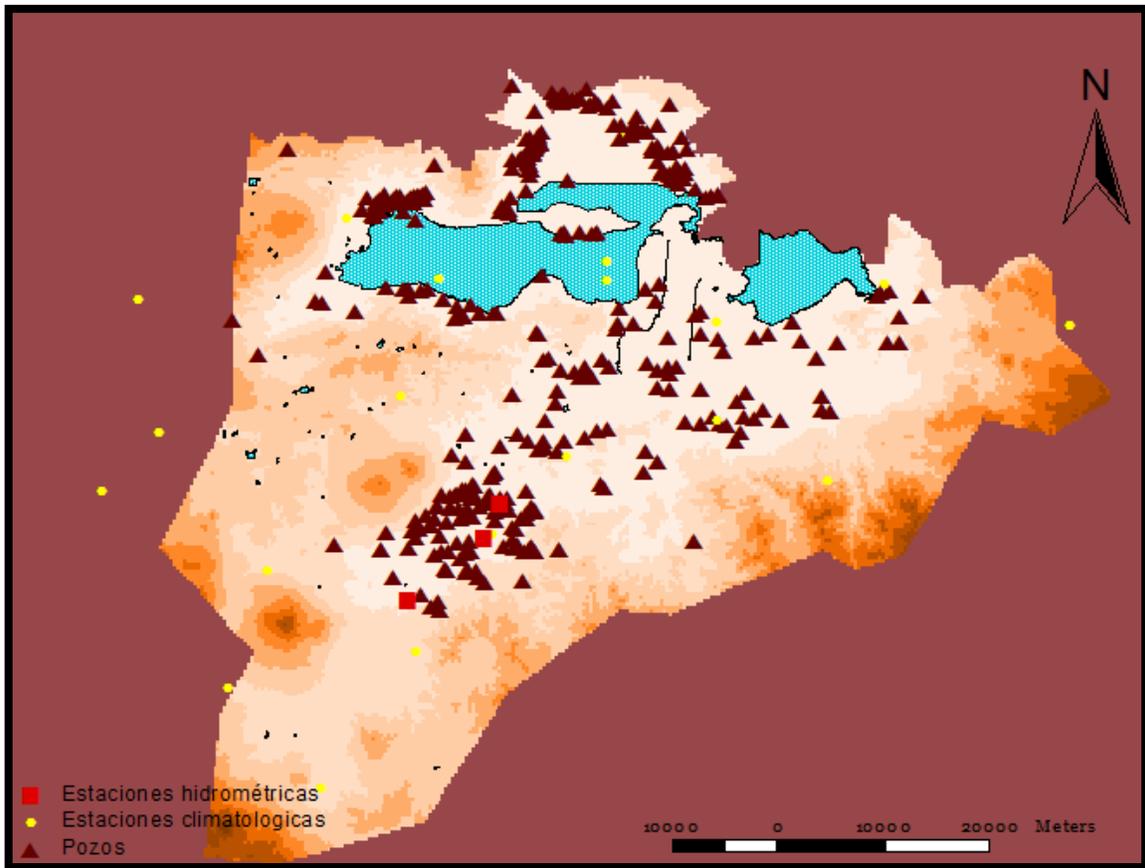


Figura 29. Estaciones climatológicas, hidrométricas y pozos del acuífero (UTM).

Para la elaboración de los mapas de estaciones solamente es necesario contar con las coordenadas de dichos puntos, ya sean geográficas o UTM, por lo general siempre se trabaja en UTM, además de ser un requerimiento para el modulo PATRICAL; sin embargo no hay mayor problema pues en el SIG con el que se trabajo se puede pasar de unas a otras de manera fácilmente.

En ultimo caso tenemos los mapas para le modulo de calidad del agua, toda esta información es manejada media te estaciones que están en la red superficial o se encuentran situadas en algunos de los pozos; las estaciones superficiales pertenecen a la Red Nacional de Monitoreo (RNM), que es operada por el personal de la CNA, y esta trabajando a partir del 2007; en área de estudio cuenta con 7 estaciones de manera superficial, con información de control a partir del 2008.

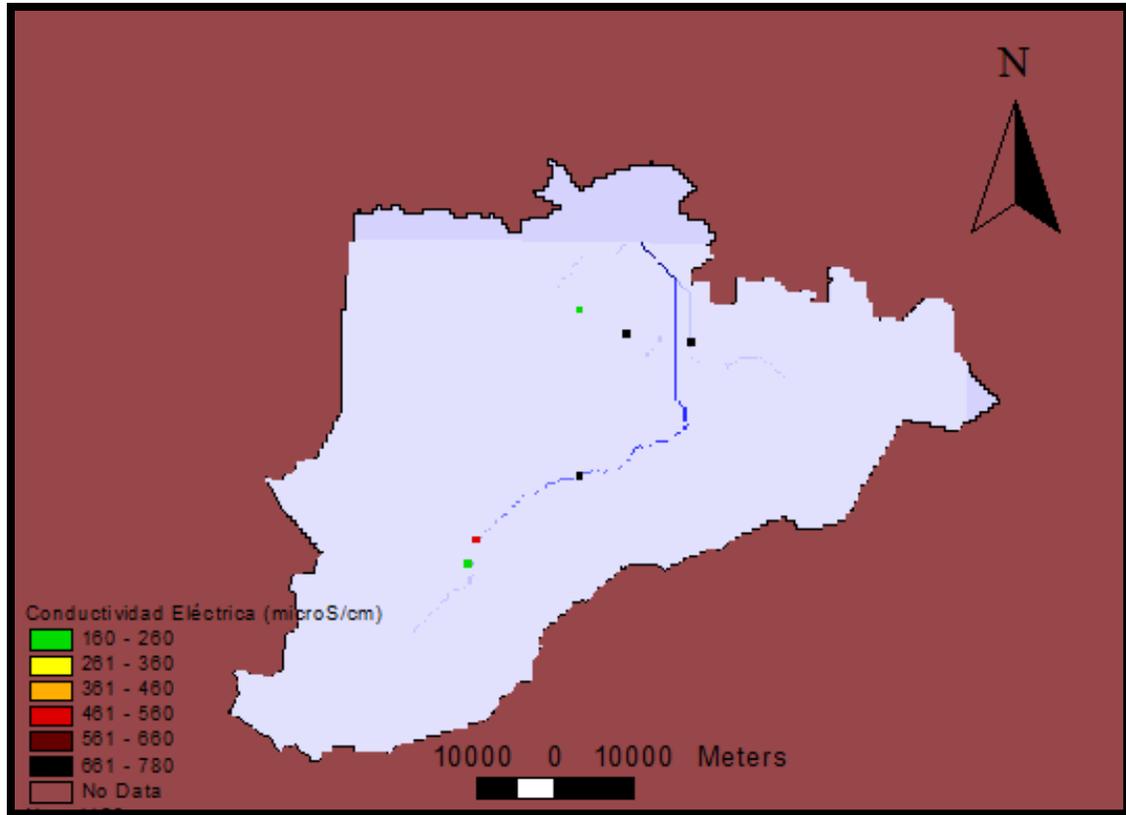


Figura 30. Concentraciones de la Conductividad Eléctrica en la red Superficial

En lo que se refiere a la calidad subterránea, esta información no se monitorea de manera regular en el acuífero; pues la información obtenida se obtuvo gracias al estudio del acuífero realizado en el 2007 por la CNA, esta información fue única y solo se obtuvo un dato para el año 2007.

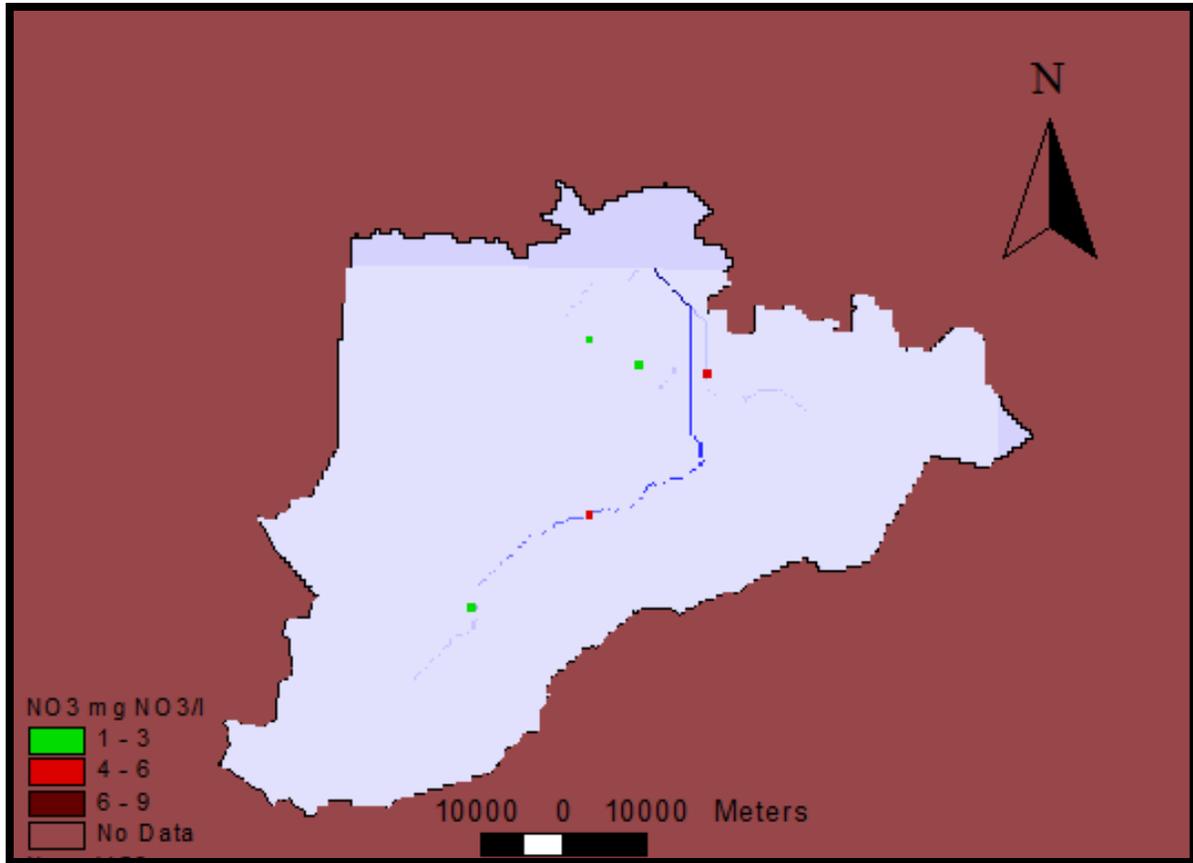


Figura 31. Concentraciones de Nitratos en la red Superficial

Para las concentración del acuífero fue necesario la generación de un mapa de isolíneas de acuerdo a la información que se tenía en las estaciones; en la superficie simplemente con la concentración media puntual, se trabajó.

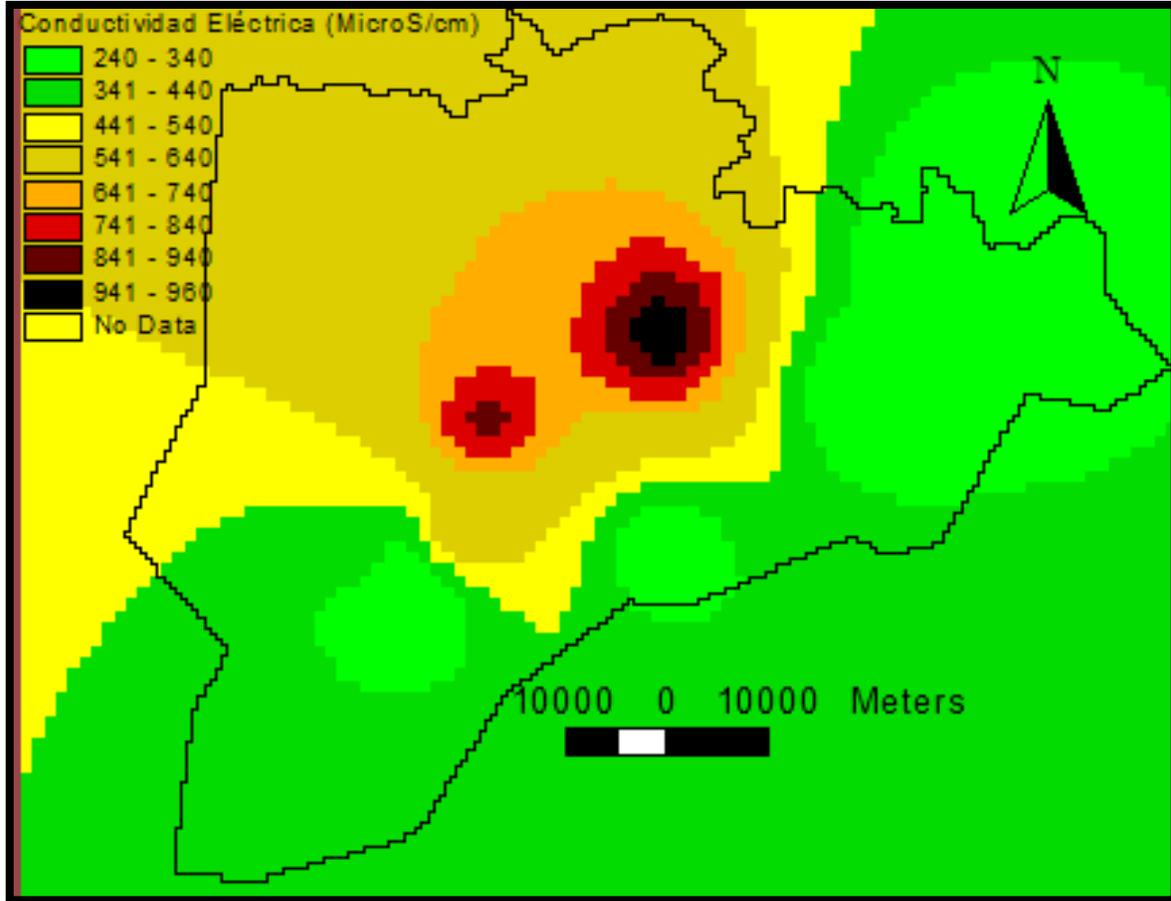


Figura 32. Concentraciones de la Conductividad Eléctrica en el acuífero

En ambos casos (Nitratos, Conductividad Eléctrica) es necesario conocer las concentraciones de descargas de plantas de tratamiento; esta información no es manejada por el mismo organismo, se encuentra dividida por el OOAPAS y la CNA, para la modelación de Nitratos no se logro obtener dicha información.

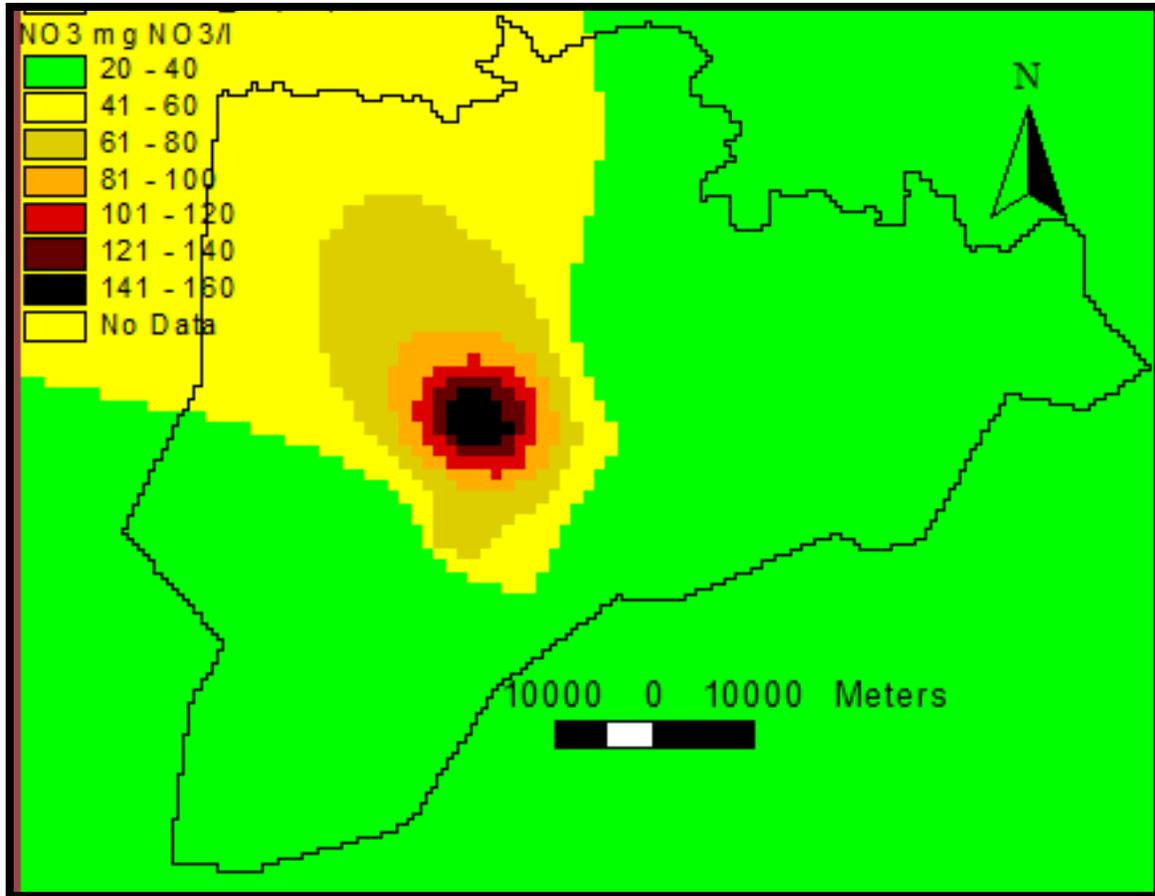


Figura 33. Concentraciones de Nitratos en el acuífero

En el caso de las fuentes de origen difuso de entradas de Nitratos; es necesario realizar un balance de entradas y salidas por municipio y por año, para determinar así la cantidad de nitratos que excedente; que exista Nitrógeno en el suelo no es un problema, el problema viene cuando por causa de fertilizantes, estiércol entre otros, las concentraciones de Nitratos aumentan lo que ocasiona que en el lugar que el Nitrógeno sea aprovechado en su totalidad dentro de su ciclo, este se almacene en el suelo, ocasionando además de contaminación en el suelo, pueda pasar a acuíferos en su forma movilizable que son lo Nitratos.

Para este cálculo se tomo como base el documento “*Balance Del Nitrógeno En La Agricultura Española (Año 2005) Criterios Utilizados*”; Ministerio De Agricultura, Pesca Y Alimentación, que contiene la metodología que como realizar el balance de entradas y salidas de Nitratos en área de estudio. Para la realización de este cálculo es necesario conocer información del área de estudio de fertilizantes, agua de riego, producción de estiércol de ganado, la cantidad de cabezas de ganado que se encuentran por municipio; para al final considerar las siguientes aportaciones y extracciones de Nitratos.

Los aportes de nitrógeno considerados son:

- * Aplicación de fertilizantes inorgánicos en la agricultura de temporal y de regadío.

- * Aplicación de fertilizantes orgánicos en la agricultura de temporal y de regadío.
- * Sobrantes de fertilizantes orgánicos (que se corresponden con la porción de estiércoles generados por la ganadería y que no se aplican en la agricultura).
- * Estiércoles del ganado en pastoreo.
- * Nitrato aportado por las aguas de riego.
- * Nitrógeno aportado por las semillas vegetales.
- * Nitrógeno introducido por la fijación biológica de las bacterias.
- * Deposición atmosférica del nitrógeno con la precipitación.

Las extracciones de nitrógeno que se han considerado son:

- * Extracción de nitrógeno por los cultivo
- * Volatilización del ión amonio +4 NH a la atmósfera
- * Desnitrificación del ión de nitrato - $3NO$ y su incorporación a la atmósfera.

La mayor parte de los datos para el cálculo de extracciones y aportaciones se obtuvieron de la página del INEGI, estos valores se consideraron por cada uno de los municipios que conforman el acuífero.

APORTES	kg N	%	EXTRACCIONES	kg N 2	%
Fertilizantes inorgánicos en la agricultura de temporal y regadío.	4,854,039	42.96	Nitrógeno de los cultivos.	1,102,912	38.93
Fertilizantes orgánicos en la agricultura de temporal y regadío.	70,872	0.63	Volatilización del ión amonio + 4 NH a la atmósfera.	1,664,472	58.75
Estiércoles del ganado en pastoreo.	2,669,949	23.63	Desnitrificación del ión de nitrato -3 NO	65,642	2.32
Nitrato por aguas de riego.	1,012,839	8.96			
Nitrógeno por semillas vegetales.	10,508	0.09			
Fijación biológica de las bacterias.	1,431,624	12.67			
Deposición atmosférica del nitrógeno con la precipitación	1,248,063	11.05			
TOTAL	11,297,894	100.00		2833026	100.00
EXCEDENTE				8,464,868	

Tabla 4. Cálculo de las aportaciones y excedentes de Nitratos

Al comparar los valores de excedentes de Nitratos y la aplicación de fertilizantes inorgánicos se observa que existe una relación directa; pues los municipios con mayores valores de excedentes, tienen un mayor uso de fertilizantes minerales.

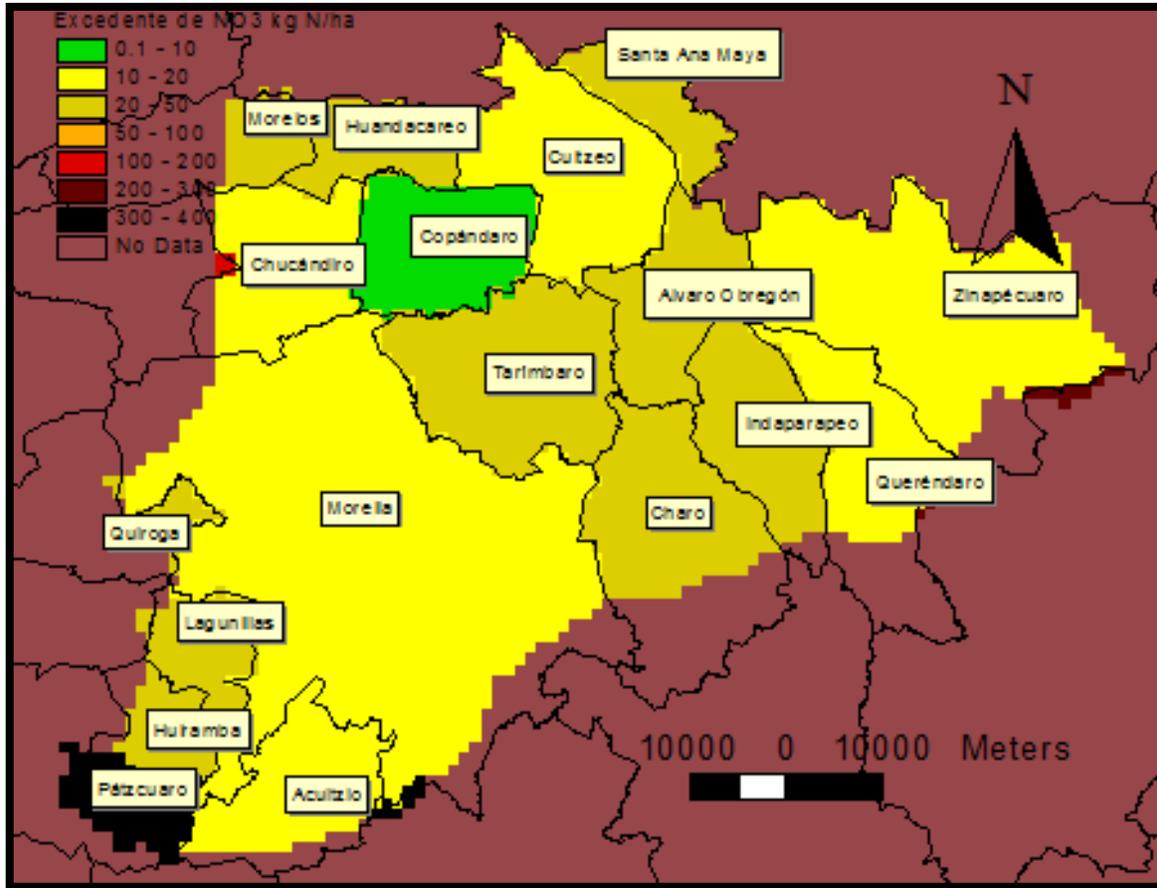


Figura 34. Concentraciones de Nitrato Excedente.

6.1.2. SERIES DE DATOS.

En lo que se refiere a serie de datos, es necesario tener una base de datos organizada de tal modo que el modulo PATRICAL la pueda leer así como un formato adecuado; por lo general es conveniente utilizar el programa Microsoft Access, para el manejo de bases de datos de gran cantidad de información; sin embargo el área de nuestro estudio así como su información es pequeña, en comparación con otros estudios. Al ser la información relativamente pequeña, se realizó el manejo con Microsoft Excel.

Para las bases de datos generadas, se utilizó el formato delimitado por tabulaciones con extensión .txt, por ser un formato que se puede leer en muchos programas apto para PATRICAL.

La información que fue necesaria adquirir para la modelación es la siguiente:

- a) Estaciones climatológicas:
- * Información precipitación total mensual

- * Información temperatura media diaria
- b) Información Puntos de control piezométrico
- * Extracciones de agua subterránea.
- * Información de niveles piezométricos
- c) Estaciones hidrométricas
- * Información de caudales registrados en las estaciones de aforo

La información de las estaciones climatológicas que es necesaria es la referente a la precipitación total mensual y la temperatura media diaria, esta información se puede obtener de bases de datos como son CLICOM o ERIC, que son programas en forma de base de datos en donde podemos obtener información de este tipo.

Para la modelación hidrológica se realizó una actualización de la serie de dato hasta el 2010, información que se obtuvo de la CNA. Las estaciones que se tomaron para la modelación fueron 25 y son las siguientes:

Clave	Nombre	Longitud	Latitud	Periodo
16001	ACUITZIO DEL CANJE.(SMN)	-101.333	19.483	1960-10
16016	CARRILLO PUERTO. A. O.	-101.083	19.917	1970-10
16022	COINTZIO. MORELIA	-101.250	19.600	1940-10
16023	COPANDARO DEGALEANA.	-101.666	19.904	1922-10
16027	CUITZEO. CUITZEO	-101.317	19.967	1968-10
16028	CUITZILLO GRANDE.	-101.117	19.767	1948-10
16045	EL TEMASCAL. CHARO	-101.033	19.683	1965-10
16050	HUANIQUEO. HUANIQUEO	-101.503	19.896	1948-10
16055	JESUS DEL MONTE. MO RELIA	-101.117	19.667	1935-10
16081	MORELIA. Morelia (DGE)	-101.183	19.700	1947-10
16087	PATZCUARO. PATZCUARO	-101.617	19.533	1969-10
16091	PLANTA BOMBEO .ZINZIMEO	-100.983	19.883	1966-10
16096	PSA. MALPAIS. QUERENDARO	-100.883	19.750	1944-10
16105	QUIRIO. INDAPARAPEO	-100.983	19.800	1963-10
16114	S.MIGUEL DEL MONTE. MOR.	-101.133	19.617	1963-10
16118	SANTA FE. QUIROGA	-101.533	19.733	1963-10
16119	STA. RITA.CO PAN DARO DEG.	-101.233	19.917	1975-10
16133	TURICATO, TURICATO	-101.417	19.567	1975-10
16136	TZITZIO. TZITZIO	-100.917	19.583	1969-10
16145	ZINAPECUARO. INAPECUARO	-100.667	19.883	1975-10
16155	COPANDARO. JIMENEZ	-101.083	19.933	1969-10

16221	UCAREO UNION DE FRUT.	-100.833	19.917	1975-10
16247	CAPULA, MORELIA	-101.383	19.667	1975-10
16250	HUANDACARO, CUITZEO	-101.267	19.817	1975-10
16254	TEREMENDO, MORELIA	-101.483	19.783	1975-10

Tabla 5. Estaciones climatológicas del área de estudio

Para el trabajo con las estaciones es necesario realizar una depuración de las estaciones que tienen inconsistencia en sus datos, es decir, que por cambio del operador o algún error en el equipo los datos tomados no son fiables.

Para determinar que estaciones son confiables se utiliza el método de doble curva masa; este método consiste en tomar una estación como estación base en donde la fiabilidad de los datos sea de los mejor para después realizar una grafica con valores de cada una de nuestras estaciones en función de la estación base.

En este grafico podemos darnos cuenta de que estaciones deben de tener una pendiente semejante, pues al ser una área pequeña todas las estaciones deben de tener un comportamiento parecido en los datos; también puede ocurrir que la recta tenga algún cambio de pendiente abrupto, esto también puede ser señal que existe algún problema en las estaciones que seleccionamos.

Para nuestro caso, se tomo como estación base la estación 16081 localizada en Morelia, por ser una estación con un buen periodo de años además por localizarse en la ciudad, los cambios de operadores y problemas en el equipo se suponen que son menores.

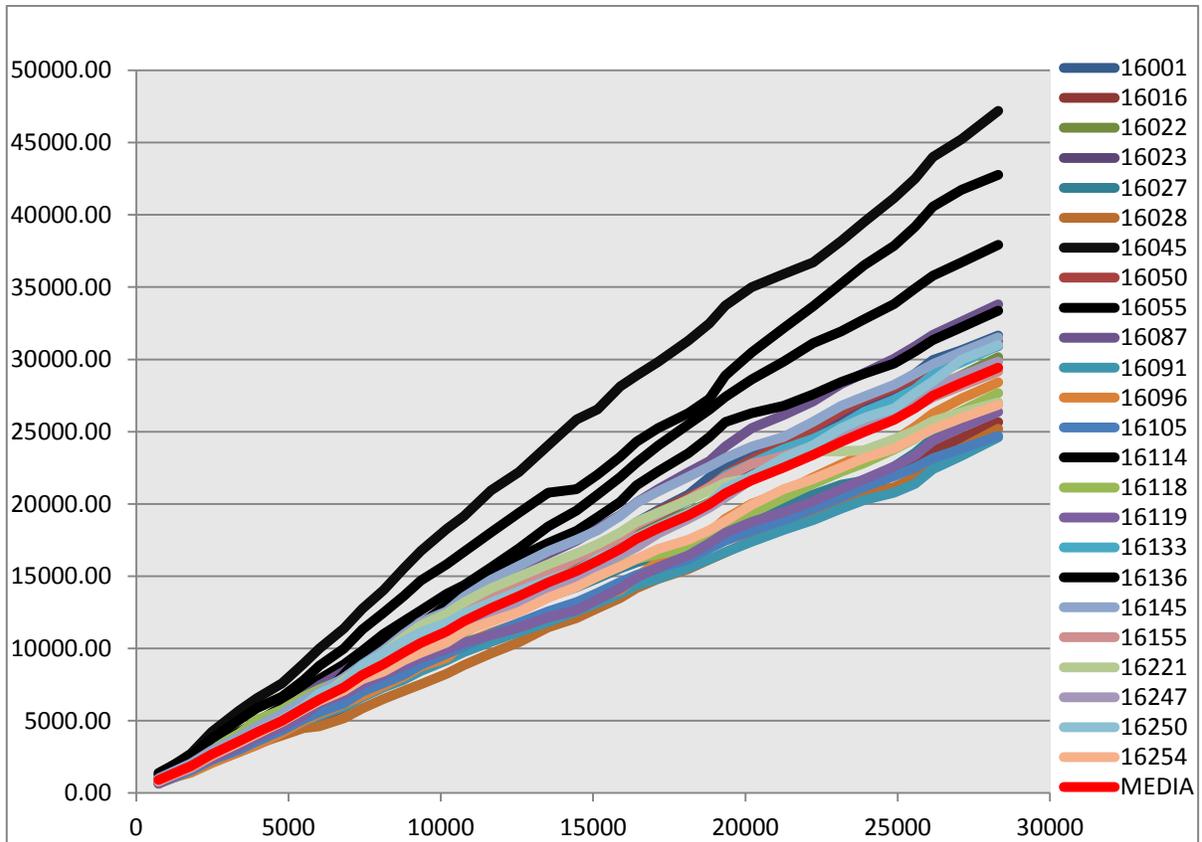


Figura 35. Doble curva masa

Después de graficar la estación 16081 contra las demás estaciones se observa en el gráfico que las estaciones 16045, 16055, 16114 y 16136 (en negro en el gráfico), tienen una pendiente que es mucho mayor en comparación con las demás estaciones, este comportamiento nos indica que el comportamiento es diferente al que tienen el de las demás estaciones, y por lo tanto los datos pueden estar mal, por esta razón se decide no trabajar con estas estaciones por la inconsistencia en sus datos.

Otra información que es necesaria principalmente en modelación a régimen alterado es la serie de datos de puntos de control piezométrico; información referente a los pozos de la acuífero, esta información es manejada por la CNA, aunque no existe una toma mensual o anual en los pozos, se logró obtener un valor anual único de extracción del acuífero y valores del nivel piezométrico de este. Solo existe información concisa del año 2007, pues se obtuvo varia información pero por tener dato erróneo del año no se maneja.

Dentro del área de estudio se tiene un valor de 374 pozos aproximadamente; sin embargo no todos la información completa, poco menos de la mitad carecía de la elevación del nivel piezométrica, por ser un dato indispensable para la modelación se tomó en cuenta solo 230 pozos. Los pozos se dividieron por grupos en forma de todos los que estaban dentro de cada una de las celdas o subdivisiones del acuífero, para manejarlos por grupo en cada una de las

celdas.

La última información puntual que se necesita es la de los puntos de aforo o estaciones hidrométricas, que para este trabajo se considero dos por tener una mayor fiabilidad de datos al considerar que tenia la información menos afectada por alguno factor externo como mediciones erróneas.

Esta información es indispensable para la calibración del modelo, pues con estos puntos podemos verificar que el agua que escurre por el rio grande de Morelia , es el que esta arrojando el modelo, es decir, el volumen de agua que escurre en la modelación se asemeja mucho al que se tiene históricamente.

NOMBRE	LONGITUD	LATITUD
Santiago Undameo	-101.2583333	19.64166667
Rio Chiquito	-101.1902778	19.69583333

Tabla 6. Estaciones de control.

6.2. RÉGIMEN NATURAL

El modelo de simulación permite conocer los flujos y almacenamientos de agua que se producen en la cuenca en régimen natural. Durante la calibración del mismo deben contrastarse los resultados con los datos de caudales naturales y de niveles piezométricos registrados históricamente en los acuíferos.

Para la calibración del modelo es necesario cambiar los parámetros del modelo para lograr que los gastos históricos sean iguales a los que arrojan el modelo. Estos parámetros son la infiltración máxima que puede alcanzar la cuenca, la máxima capacidad de almacenamiento, relacionados con la geología y el uso de suelo; también es necesario considerar un volumen umbral del acuífero, coeficiente de descargas y coeficiente de almacenamiento, estas importantes para determinar la elevación y cantidad de agua que escurre.

Las estaciones de control que se consideraron fueron la estación de Santiago Undameo y Rio Chiquito, por considerar que estaban a régimen natural.

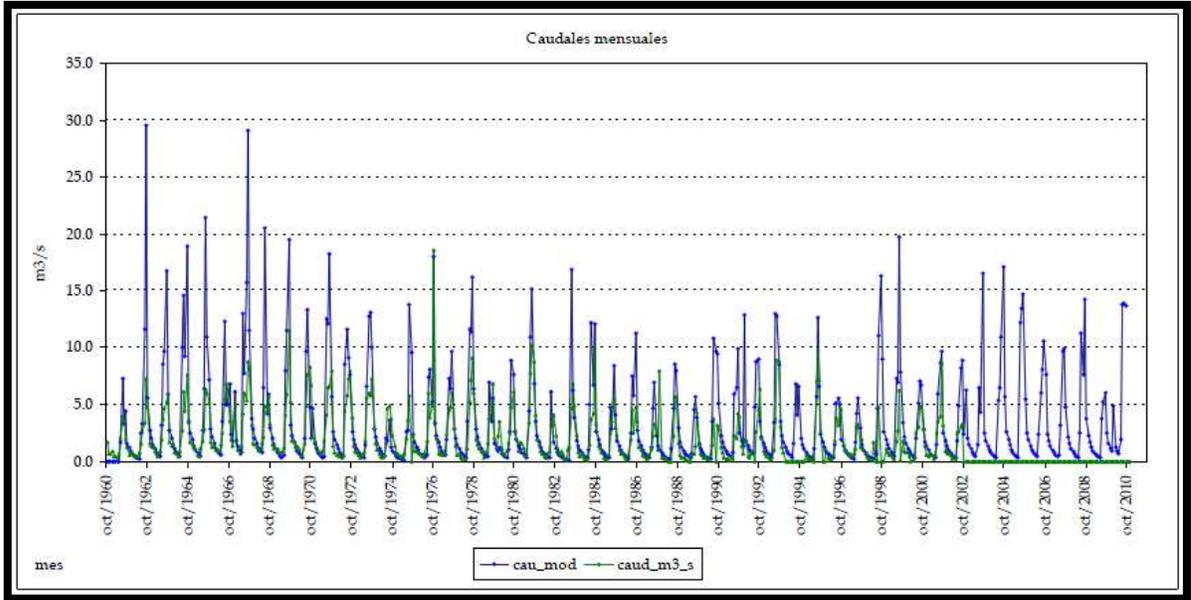


Figura 36. Contraste de gastos históricos y modelados en la estación de Santiago Undameo

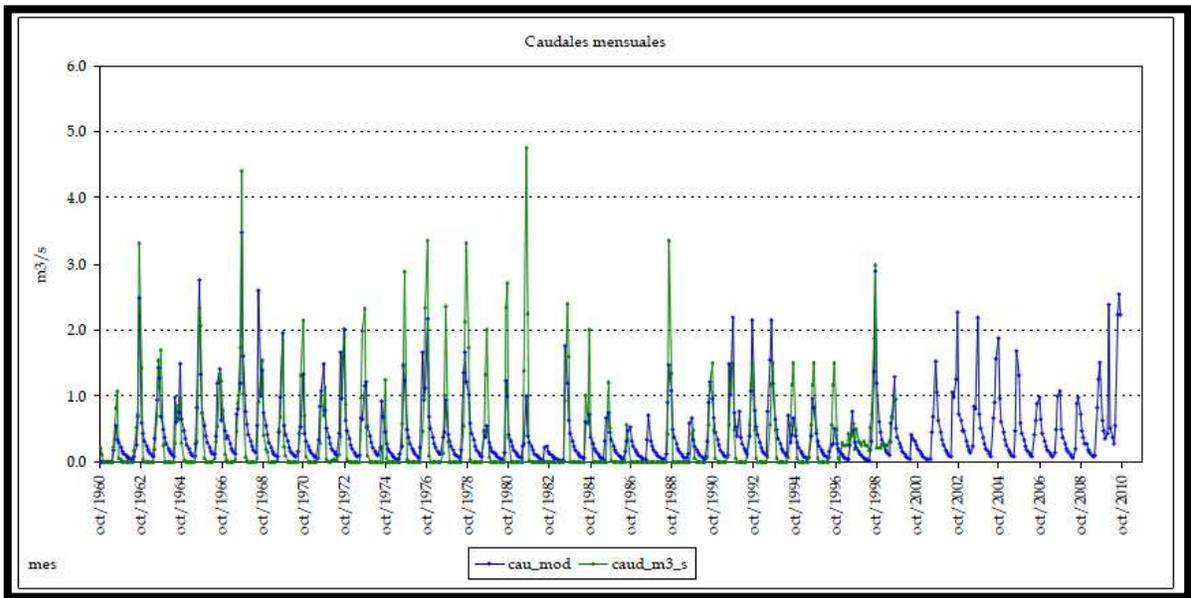


Figura 37. Contraste de gastos históricos y modelados en la estación de Río Chiquito.

6.3. RÉGIMEN ALTERADO

El ciclo hidrológico natural ha sido, históricamente y actualmente, fuertemente modificado debido a las abstracciones y retornos de agua que se producen en el sistema para los usos urbanos, industriales, agrícolas e hidroeléctricos. Estas modificaciones del ciclo hidrológico afectan de una forma importante a los flujos de agua que se producen en la cuenca hidrográfica, aumentando o reduciendo los volúmenes de agua existentes en los acuíferos,

las relaciones río-acuífero, las transferencias laterales y/o las salidas al mar.

Las modificaciones del subsistema superficial son relativamente fáciles de analizar, mediante la restitución a régimen natural o mediante el empleo de modelos de simulación que reproduzcan la gestión de los embalses y las derivaciones realizadas a través de conducciones. Sin embargo, las modificaciones que se producen en el subsistema subterráneo y su influencia en el resto de componentes del sistema, y especialmente en el subsistema superficial, son más complejas de analizar y de evaluar de forma integrada. El ciclo hidrológico actual difiere del natural, y por lo tanto, el transporte de sustancias químicas que en él se produce es diferente al que se produciría en régimen natural. Por estos motivos, es necesario contemplar las modificaciones existentes en el régimen natural lo más fielmente posible tanto para el análisis cuantitativo de los flujos del agua, como para el análisis físicoquímico del agua.

Mediante el modelo de simulación desarrollado se ha realizado la simulación del ciclo hidrológico en régimen alterado, introduciendo las afecciones antrópicas que provocan las actividades humanas en el subsistema subterráneo. Esta simulación permitirá conocer el grado de afección actual del ciclo hidrológico respecto a la situación en régimen natural obtenida anteriormente, tanto desde el punto de vista del comportamiento de los acuíferos, como de los caudales circulantes en los tramos de río, así como las transferencias laterales y las salidas al mar de los acuíferos.

7. CONCLUSIONES

La utilización de herramientas informáticas es una necesidad que actualmente no se debe dejar de lado pues para un sinnúmero de fenómenos podemos si no predecir nos puede dar una proyección de lo que está ocurriendo con algo que no se puede visualizar tan fácilmente.

En la modelación matemática trata de utilizar principios matemáticos para poder predecir fenómenos naturales, aunque existe un gran número de formulaciones matemáticas, no todas pueden ser compatibles con nuestro trabajo.

Para nuestro caso se modeló el ciclo del agua, teniendo buenos resultados de este; se pudo visualizar como se ha ido deteriorando el acuífero por toda la influencia antropogénica, como va variando los datos conforme pasan los años, el transporte de contaminantes como es el nitrógeno y la conductividad eléctrica.

En México, el manejo de la información de este tipo es muy complicada de obtener además una vez que se obtienen te das cuenta que solo se tiene de un periodo de años muy reciente, algunas veces es insuficiente para la modelación por lo que es necesario, tratar de modelar de una buena manera con pocos datos o mediante algunas suposiciones que en ocasiones pueden o no ser verdaderas.

Es necesario que exista un control de los contaminantes que pueden llegar a mantos acuíferos y o corrientes superficiales, todo este tipo de almacenamiento de agua son indispensables para el desarrollo de la humanidad, sin embargo, actualmente es un problema a nivel mundial la protección del agua, pero sin embargo los programas que se impulsan son insuficientes o simplemente adquieren el impacto que podría dar un retroceso a esta problemática que se tiene con un líquido vital como es el agua.

El acuífero Morelia-Queréndaro, es un acuífero sobreexplotado desde hace casi una década, sin embargo se sigue extrayendo más agua de la que el acuífero es capaz de recargar, sumado a esto si consideramos también el crecimiento urbano, favoreciendo al escurrimiento del agua, nos damos cuenta que la problemática con este acuífero es mucho mayor.

Si a la carencia de agua que se puede ver de aquí a algunos años, se tiene también la mala calidad del agua, dentro del acuífero se tienen valores mayores de concentración de nitratos de los valores permisibles para uso y consumo humano, el problema empeora más.

BIBLIOGRAFÍA

SEMARNAT. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Edición 2008. Compendio de Estadísticas Ambientales. México. 2008. P 278-289.

UMSNH, CIGA, UNAM. 2010 Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su Geografía y Entorno Socio ambiental.

CNA, IMTA. 2007. Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatío-Contepec-Epítacio Huerta, Zacapu, Morelia-Queréndaro y Pastor Ortiz, en el estado de Michoacán Acuífero Morelia-Queréndaro Convenio No. CNA-OCLSP-JAL-CONV-008-2007 Informe final

Ruiz, J.M., 1998. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual-distribuido de simulación continua integrado en un sistema de información geográfica. Tesis Doctoral presentada en la Universidad Politécnica de Valencia.

Miguel Ángel Pérez Martín. 2005. Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado es sistemas de información geográfica, para grandes cuencas. Aportación Al Análisis De Presiones E Impactos De La Directiva Marco Del Agua. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis Doctoral.

Aparicio Mijares, Francisco Javier; Fundamentos de Hidrología de Superficial. Limusa. México, 2001.

Maria Valero Villarroya. 2007. Evaluación de los efectos del cambio en los usos del suelo mediante el uso de un modelo de simulación del ciclo hidrológico aplicado en la cuenca del Júcar. Universidad Politécnica de Valencia. Proyecto Final de Carrera.

Alejandro Soto Castro. 2009. Modelación Hidrológica Cuasi-Distribuida Para Su Aplicación A Las Condiciones Mexicanas, Caso Cuenca Del Rio Grande De Morelia. Procedimientos De Preparación De Información, Calibración Y Puesta En Marcha Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Licenciatura.

M. en C. Víctor Hugo Guerra Cobián. 2007. Análisis del efecto de discretización espacial en el modelado de cuencas hidrológicas utilizando el modelo distribuido CEQUEAU-ONU. Universidad Autónoma Del Estado De México. Tesis Doctoral.

Ministerio De Agricultura, Pesca Y Alimentación. 2005. Balance Del Nitrógeno En La Agricultura Española

Alejo Hipolito, Maybeloth. 2010. Procedimientos para la generación de mapas necesarios en un estudio hidrológico, en entorno de Sistemas de Información Geográfica. Universidad

Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Licenciatura.

INEGI. 2010. Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía.

<http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>

<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/default.aspx>

Jose Manuel Navarro Jover. 2006. Practicas de SIG con ArcView. Universidad de Politecnica de Valencia.

Montserrat Serrano Medrano. 2005. Aplicación De Un Sistema De Información Geográfica Para El Cálculo De Escurrimiento Con El Método De Los Números De Curva Del USSCS (Caso: Cuenca Del Lago De Cuitzeo). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Licenciatura.