03090

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

COMPORTAMIENTO DE LOS NITRATOS PROVENIENTES DE AGUAS NEGRAS EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DEL MEZQUITAL.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE :

DOCTORA EN CIENCIAS
AGUAS SUBTERRÁNEAS

PRESENTA:

ABIGAIL ARACELI CERVANTES MEDEL

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. MA. AURORA ARMIENTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, DF 2004

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Agradecimientos

A Enrique, Enrique Uriel y Saúl por existir, por ser parte integral de mi vida y por que los amo.

Hay Tres personas a quienes en primer lugar quiero darles las gracias por su apoyo para realizar este trabajo, la primera es por supuesto mi tutora y amiga, la Dra. Ma. Aurora Armienta, por que siempre estuvo de acuerdo conmigo, la segunda es el Ing. Oscar Escolero por su enorme apoyo durante mis muestreos, y en tercer lugar a mi esposo Enrique Martínez Pérez por que al igual que en mi tesis de maestría me ha ayudado enormemente.

También agradezco al Dr. Oscar Campos por sus comentarios sobre este trabajo y por el tiempo que le dedico a su revisión, así como al grupo de profesores y asesores que leyeron y revisaron ésta tesis

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Abigail Benceli Cervantes Mondl

FECHA: 3-Sept-2004

FIRMA:

Índice

Introducción 11
I. Antecedentes 14
I.1 Fundamentación teórica 14
I.1.1 Ciclo del Nitrógeno 14
I.1.2 Compuestos del Nitrógeno 16
I.1.3 Nitrógeno en Suelos 27
I.1.4 Nitrógeno en Agua Subterránea 34
I.2 Antecedentes Históricos 36
I.2.1. Resultados Analíticos previos 38
I.2.2.Evolución del uso de aguas negras y la calidad del agua subterránea 41
II. Geología 43
II.I Marco Geológico 43
II.2. Geología del Subsuelo 50
II.3 Esquema estructural de la porción central del Valle 51
II.4. Hidrogeología 56
II.4.1 Unidades Hidrogeológicas. 57
II.4.2 Flujo Subterráneo 59
III. Muestreo y Análisis 65
III.1 Muestreo de Agua Subterránea 65
III.2 Muestras de suelo 70
III.3 Técnica de Muestreo 71
IV Modelación del Sistema 74
IV.1 Modelo Hidrogeológico Conceptual 74
IV.1.1 Parámetros Hidrogeológicos 75
IV.2 Desarrollo de un modelo de simulación 77
IV.3 Modelación Hidrogeológica 77
IV.3.1 Descripción del modelo 79
IV.3.2 Modelo de transporte 83
IV.4 Modelación Hidrogeoquímica 84
IV.4.1 Objetivos de la Modelación Hidrogeoquímica 85
V. Discusión General 89
V.1. Calidad del agua subterránea 89
V.2 Control estructural y flujo subterráneo 106
V.3 Funcionamiento del modelo 111
V.4 Resultados del Modelo de Transporte 113
V.5 Conclusiones de la Modelación Hidrogeológica. 114
V.6 Resultados de la modelación Hidrogeoquímica 115
V.7 Conclusiones 126
Bibliografía 129

Índice de Tablas

Tabla I.1 Compuestos del Nitrógeno 17
Tabla I.2 Procesos de fijación 27
Tabla I.3 Concentración de NH_4^+ en diferentes rocas * Young y Aldag, (1982)..... 30
Tabla I.4 Propiedades de componentes orgánicos e inorgánicos * Seager y Slabaugh, (1987) 32
Tabla I.5 Características de zonas aerobias y anaerobias 33
Tabla I.6 Calidad del agua subterránea * CNA y BGS (1998) 39
Tabla I.7 Concentración de coliformes totales (cfu/100 ml) en agua subterránea dentro del área de irrigación con aguas negras *Modificado de Gallegos et al. (1999).. 40
Tabla I.8 Calidad de las aguas negras de descarga en el Valle del Mezquital en 1994 (CNA-BGS, 1998) 40
Tabla I.9 Características generales del agua de irrigación * Siebe y Cifuentes (1995) reportados como SARH 1985 41
Tabla I.10 Extracción de aguas subterráneas vs. volumen de aguas negras irrigadas.. 42
Tabla II.1 Estratigrafía de la región 47
Tabla II.2 Unidades Hidrogeológicas 59
Tabla II.3 Incremento de metales pesados en suelo por el uso de aguas negras *extraído de BGS-CNA (1995) 63
Tabla III.1 Puntos de muestreo 67
Tabla III.2 Parámetros medidos en campo 69
Tabla III.3 Precisión y Error 70
Tabla III.4 Muestras de suelo 71
Tabla III.5 Datos de Laboratorio de Mecánica de Suelos 73
Tabla IV.1 Volúmenes Drenados * INEGI 1992 75
Tabla IV.2 Recarga estimada en estudios previos. 76
Tabla IV.3 Censos de Pozos 76
Tabla IV.4 Propiedades de las unidades 80
Tabla IV.5 Caudal de extracción promedio por áreas *BGS y CNA (1995) 80
Tabla IV.6 Volumen de extracción 81
Tabla IV.7 Concentración de NO_3 en las áreas de riego 84
Tabla IV.8 Transformación de nitratos a nitrógeno en los datos 87
Tabla IV.9 Valores de Eh 87
Tabla IV.10 Valores de pe 87
Tabla V.1 Parámetros medidos en campo 89
Tabla V.2 Resultados de Alcalinidad 89
Tabla V.3 Sitios y Datos de Muestreo (mg/l), Junio 1998 90
Tabla V.4 Datos comparativos 92
Tabla V.5 Contenido de COT, de MO y de CO en suelos 103
Tabla V.6 Determinaciones de CIC 103
Tabla V.7 Coeficientes de Uniformidad y curvatura 104
Tabla V.8 Prueba de Infiltración 105
Tabla V.9 Volumen anual escurrido * DETENAL (1992) 108
Tabla V.10 Resultados previos en zonas de fallas 108
Tabla V.11 Resultados fuera de las zonas de fallas 108
Tabla V.12 Recarga del valle 111
Tabla V.13 Cargas profundas 111
Tabla V.14 Composición de las soluciones 115

Tabla V.15 Relación de valores con respecto al tiempo, sitio MD1 a 2.5 m 116
Tabla V.16 Relación de valores para el sitio MD2 a 5m de profundidad, (molaridad). 117
Tabla V.17 Solución ejemplo 2 118
Tabla V.18 Solución de la Mezcla 119
Tabla V.19 Solución ejemplo 3 120
Tabla V.20 Solución de la mezcla 120
Tabla V.21 Indices de Saturación 121
Tabla V.22 Solución ejemplo 4 122
Tabla V.23 Índices de saturación ejemplo 4 122
Tabla V.24 Solución Ejemplo 5 123
Tabla V.25 Mezcla ejemplo 5 123
Tabla V.26 Índices de Saturación, ejemplo 5 124
Tabla V.27 Soluciones ejemplo 6 124
Tabla V.28 Solución Inicial Pozo CFE12 125
Tabla V.29 Solución 2 piezómetro MC5-1 125
Tabla V.30 Índices de saturación ejemplo 6 125

Índice de Figuras

Figura I.1 Área de estudio. 13
Figura I.2 Ciclo del nitrógeno (Modificado de Canter, 1997) 16
Figura I.3 Diagrama pe/pH (Appelo y Postma, 1996) 19
Figura I.4 Predominio de compuestos nitrogenados gaseosos *Pourbaix (1963) 20
Figura. I.5 El ciclo del nitrógeno en el ambiente subsuperficial (modificado de Canter, 1997) 33
Figura I.6 Extracción de aguas subterráneas / volumen de aguas residuales 42
Figura II.1 Mapa geológico. 45
Figura II.2 Mapa structural. 52
Figura II.3 Sección A – B. 53
Figura II.4 Sección C– D. 54
Figura II.5 Diagrama de frecuencia de fallas y fracturas 55
Figura III.1 Sitios de muestreo. 66
Figura IV.1 Diagrama de flujo 77
Figura IV.2 Configuración del nivel estático 1970 82
Figura IV.3 Configuración 1982 (BGS y CNA, 1998). 83
Figura V.1 HCO_3 y SO_4 en los sitios de muestreo (mg/l) 90
Figura V.2 Clasificación del agua subterránea. 91
Figura V.3 Configuración de NO_3 para febrero 1994, Datos CNA (1995) 93
Figura V.4 Configuración de NO_3 en Octubre 1996, *Datos CNA (1997) 93
Figura V.5 Concentración de NO_3 en los sitios MC5 y MD 94
Figura V.6 Relaciones de HCO_3, SO_4 y Eh en el sito MC5 94
Figura V.7 Relaciones de HCO_3, SO_4 y Eh en el sitio MD 95
Figura V.8 Relaciones de Temperatura, conductividad y alcalinidad en el sitio MC5 .. 95
Figura V.9 Relaciones de Temperatura, conductividad y alcalinidad en el sitio MD 96
Figura V.10 NO_3/ SO_4 97
Figura V.11 Variación del pH con la profundidad sitio MC5 y MD 98
Figura V.12 Sitio MC5 98
Figura V.13 Relación entre NO_3^- /HCO_3/pH en el sitio MC5 99
Figura V.14 Sitio MD, relación de NO_3/HCO_3/pH/NH_3 99
Figura V.15 Relación a profundidad de los sitios MC3 y MC4 100
Figura V.16 MC5 y MD Relación de O_2 a profundidad 100
Figura V.17 Gráficas de distribución 102
Figura V.18 Distribución de CIC 103
Figura V.19 Curvas de Infiltración 105
Figura V.20 Sección MChda-MC4-MC1-MC3 106
Figura V.21 Sección MC5-MD 107
Figura V.22 Relación flujo superficial con flujo subterráneo 109
Figura V.23 Relación flujo subterráneo con falla y fracturas 110
Figura V.24 Resultados del modelo sección E-W con direcciones de flujo. 112
Figura V.25 Resultados del modelo sección del río Tula hacia Ajacuba 112
Figura V.26 Resultado del modelo en condiciones iniciales (1970), ubicando las secciones 112
Figura V.27 Resultado del modelo en condiciones transitorias (1982) 113

Figura V.28 Transporte de Nitratos 1984-1987 114
Figura V.29 Nitratos en Solución 115
Figura V.30 Composición de las soluciones 116

Resumen

El Valle del Mezquital, localizado aproximadamente 50 km al norte de la ciudad de México, ha sido irrigado por más de 100 años con aguas residuales urbanas procedentes en su mayoría de México D.F. Sin embargo, el impacto en la calidad del agua ha sido menor al esperado. Este bajo impacto se ha atribuido a procesos de purificación del suelo y de tratamiento natural en presas y canales. En este trabajo se propone a la hidrogeología y a la estructura geológica de la cuenca del Mezquital, como otras causas que influyen en la calidad del agua observada.

Se revisó y reinterpretó la información hidrogeológica y estratigráfica reportada por la CFE (Comisión Federal de Electricidad) en 1985; así como la descripción litológica de núcleos de 29 perforaciones efectuadas por la CFE, además de 15 perforaciones efectuadas por PEMEX (Petróleos Mexicanos). La descripción geológica del subsuelo también tomó en cuenta los reportes técnicos del programa del muestreo de núcleos efectuado por la SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos) en 1984. Se encontró una relación estrecha entre el comportamiento hidrogeológico del valle del Mezquital y sus características estructurales. En el valle, las fallas y fracturas actúan como sitios de recarga profundos y someros.

Para estudiar la evolución de la calidad del agua, se revisaron diversos reportes de la calidad del agua residual y subterránea. Además, se efectuaron 4 muestreos entre julio de 1997 y febrero de 2000. Se colectaron muestras de agua de manantiales, piezómetros y pozos. Los aniones y cationes principales se determinaron por titulación, turbidimetría, potenciometría con electrodos selectivos, y espectroscopía de emisión, mediante métodos estandarizados (APHA, 1995). Los nitratos se analizaron por cromatografía de iones. En cada punto de muestreo se midieron la temperatura, el pH y la conductividad, *in situ.* A pesar de inundar los suelos del valle con agua residual rica en nitratos, se encontraron mayores concentraciones cerca de las fracturas.

Las fallas y fracturas actúan como sitios de recarga para el agua subterránea en el acuífero somero. Al mismo tiempo, el flujo del agua subterránea profunda desde las calizas, recarga el acuífero volcánico principal. Las fallas permiten también la descarga del acuífero principal a través de sitios específicos. Se utilizó el código visual MODFLOW para modelar el comportamiento hidrogeológico propuesto para el valle.

La recarga profunda proveniente de las calizas puede ser una de las causas de la relativa estabilidad en la calidad del agua, a pesar del incremento en la irrigación con aguas residuales.

Los análisis realizados indicaron que las reacciones de oxido-reducción se producen principalmente en función del tipo de suelo y de la profundidad de los niveles estáticos, y que el proceso de denitrificación ocurre en forma importante en el acuífero, lo que ayuda en gran medida a la protección de la calidad del agua subterránea.

ABSTRACT.

The Valle del Mezquital area, about 50 km north of Mexico city has been irrigated for more than 100 years with urban wastewater mostly from Mexico city. However, the impact on groundwater quality has been less than would be expected. This low impact has been explained by soil purification processes, and natural treatment in dams and channels. In this work the hydrogeology and geological structure of the Mezquital basin are proposed as another cause influencing the observed groundwater quality.

The geologic, hydrogeologic and stratigraphic information reported by CFE (National Power Comission) in 1985; along with the lithology reported in logs from 29 boreholes drilled by CFE, besides 15 boreholes drilled by PEMEX (Mexican Oil Company); were reinterpreted. Based on that information, a geologic and hydrogeological survey of the study area was performed. The underground geological description also took into account the technical reports from a core-sampling program developed by SARH, (Hydraulic and Agriculture Secretary) in 1984. A strong relation was observed between the hydrogeological behavior of the Mezquital valley and its structural framework The various faults and fractures act as deep and shallow recharge sites in the Valley.

Various reports on the wastewater and groundwater quality were reviewed to study groundwater quality evolution. Besides, four sampling campaigns were performed from July 1997, to February 2000. Water samples were collected from springs, piezometers and wells. Major anions and cations were determined by titration, turbidimetry, potentiometry with selective electrodes, and emission spectroscopy following standard methods (APHA, 1995). Nitrate was measured by ion cromatography . At each sampled point, temperature, pH and conductivity were measured *in situ*. In spite of flooding with nitrate-rich wastewater over the valley soils; higher concentrations of nitrates were measured near than far from faults. The faults and fractures act as recharge sites of wastewater into the shallow aquifer. At the same time, deep groundwater flow from the limestones recharges the main volcanic aquifer. The faults allow also the main aquifer discharge through specific sites. The visual MODFLOW code was used to model the proposed hydrogeological behavior of the basin.

Deep recharge coming from the limestones may be one cause of the lack of worsening on the groundwater quality, in spite of the increase of wastewater irrigation. The distribution of nitrates in groundwater may be explained by a shallow recharge from the wastewater through faults. The underlying limestones of the Doctor Formation constitute a deep aquifer that supplies the overlying aquifer. The springs act as discharge sites of deep groundwater.

Oxidation-reduction reactions take place as a function of the soil characteristics, and in relation with the depth of the static levels. Occurrence of denitrification within the aquifer contributes also to protect the groundwater quality.

Introducción

El Valle del Mezquital se localiza en el estado de Hidalgo, 80 Km al norte de la ciudad de México (Figura I.1), el área de estudio comprende la parte sur-oriental del valle, limitada por el valle de Actopan al oriente, el río Tula al norte, Apaxco al sur, y Tula de Allende al occidente, se encuentra ubicado entre los 20° 00' y 20° 15' N y 99° 05' y 99° 20' W.

La contaminación del agua subterránea ocurre generalmente en acuíferos someros los cuales tienen una continuidad hidráulica directa o indirecta con la fuente principal de contaminación, es decir la superficie del terreno, ya que esta implica aguas de desecho, prácticas agrícolas y confinamiento animal a gran densidad. Un indicador de esta contaminación es la presencia de nitratos en el agua subterránea; la concentración y distribución de estos permite conocer el grado de afectación al acuífero.
En el Valle del Mezquital se encuentran extensas zonas de cultivo que se irrigan con aguas negras, las presas Requena y Endho (v. Figura. I.1) forman parte de este sistema, captando gran parte de las aguas residuales provenientes de la Ciudad de México. Este valle emplea 40 m^3/s de aguas negras para cultivar 45,000 Ha de tierras anteriormente áridas. La irrigación en el valle se inició en 1912, y hoy en día es el sistema agrícola con mayor uso de aguas negras para riego. Estas aguas representan una fuente importante de compuestos de nitrógeno para el acuífero, así como de otros elementos contaminantes. El empleo de estas aguas residuales ha provocado el ascenso de los niveles freáticos y con ello el riesgo potencial de contaminación al agua subterránea.

El preservar la calidad del agua subterránea de un valle en donde la carencia del líquido es un problema de primer orden, obliga a proteger y conservar este recurso. Sin embargo, la contaminación del sistema debido al uso de aguas negras para riego y aguas con alto contenido de fertilizantes se incrementa continuamente. Este trabajo pretende definir el grado de contaminación a partir de la determinación de nitratos en el agua subterránea, así como conocer el comportamiento de éstos tanto hidráulicamente como hidrogeoquímicamente empleando datos de análisis hidrogeoquímicos previos y datos obtenidos durante este estudio; se efectuó también un análisis del funcionamiento del flujo hidrodinámico del sistema y su relación con el marco estructural.
Las descripciónes geológica y estructural del área se efectuaron en base a recorridos de campo y a la descripción de perfiles y datos litológicos observados por el autor de este trabajo.

Objetivos

Determinar la evolución de los nitratos en el agua subterránea del Valle del Mezquital, en base a datos previos, y a un muestreo sistemático previsto.
Evaluar los factores que influyen en el comportamiento y la distribución de los nitratos en el acuífero.

Metodología

- Recopilar toda la información existente aplicable al estudio del Valle del Mezquital
- Desarrollar una base de datos sobre los diversos parámetros químicos analizados
- Investigar sobre los siguientes puntos del sitio:
  - ✓ Geología del área y propiedades de los diferentes materiales
  - ✓ Propiedades y tipo de suelo
  - ✓ Uso de suelo y vegetación
  - ✓ Características del subsuelo del valle
  - ✓ Comportamiento hidrogeológico del sitio
- Determinar sobre la base de datos previos la concentración y distribución de nitratos en el agua subterránea y su impacto en el acuífero
- Determinar la presencia de otros indicadores de contaminación
- Muestrear y analizar el agua subterránea
- Conocer la evolución de la contaminación a partir de la concentración de nitratos
- Definir la configuración del flujo subterráneo, empleando un modelo matemático de flujo y transporte
- Conocer el comportamiento de los nitratos en el ambiente suelo-agua, empleando un modelo hidrogeoquímico

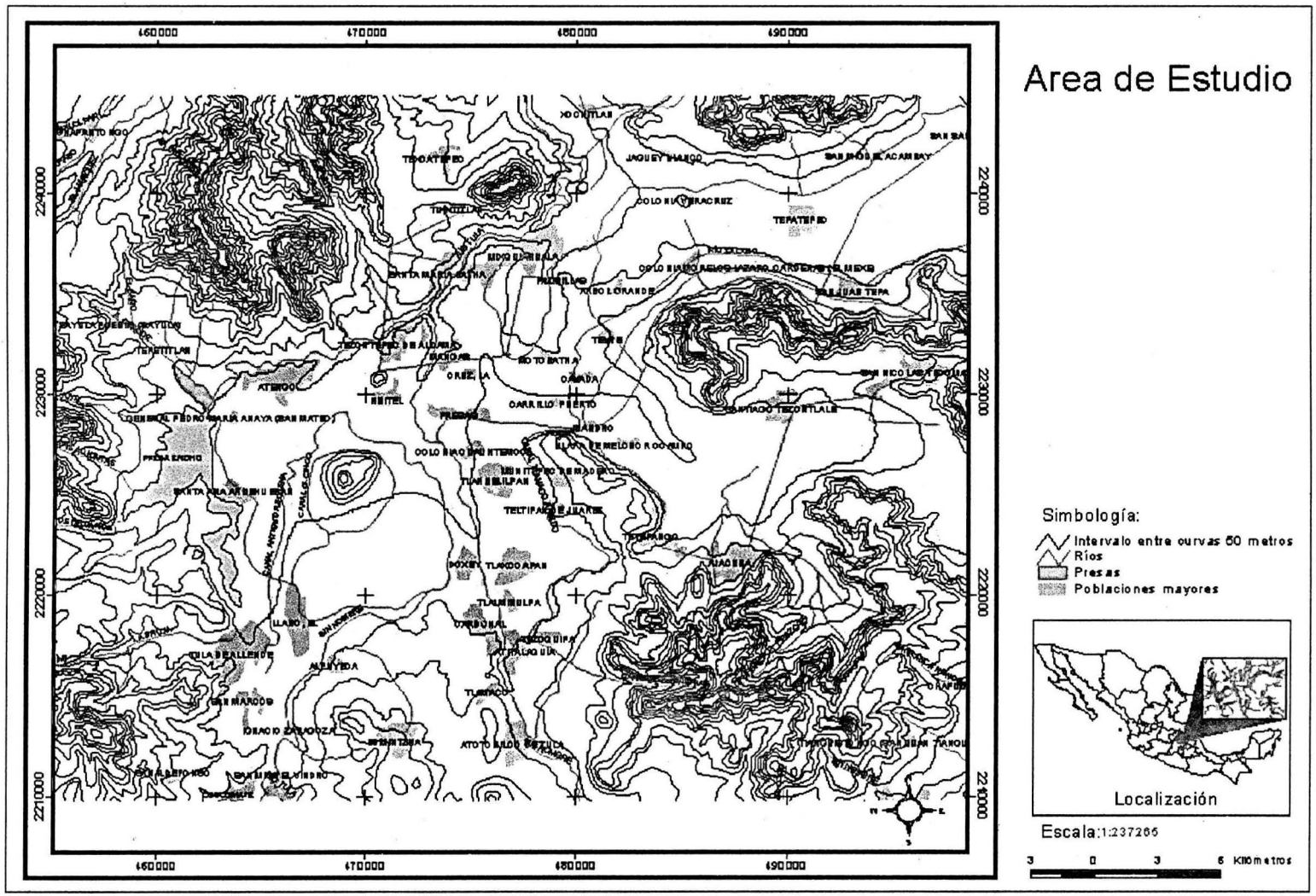


Figura I.1 Área de estudio.

I. Antecedentes

I.1 Fundamentación teórica

El nitrógeno es el elemento mas íntimamente relacionado con reacciones provocadas por organismos vivos, ya que aproximadamente el 98% del nitrógeno total se encuentra en la litósfera. El aire contiene principalmente N, seguido de C, H, y O. En el océano el nitrógeno como N_2 es la forma dominante, mientras que NH_4^+, NO_2^-, N_2O^-, NO_3^- y materia orgánica disuelta se encuentran en estado de quasiequilibrio.
Generalmente las sales de N inorgánico son completamente solubles en aguas naturales (Stevenson 1982).

El gas nitrógeno a 20 °C y 15 ppm es considerado como químicamente inerte. Este se encuentra en muchos compuestos orgánicos tales como proteínas y sus derivados incluyendo purinas, pirimidinas y urea.

Hutchinson (1954) sostiene que uno de los principales gases constituyentes de la atmósfera inicial era el NH_3. Otros expertos especulan que hace aproximadamente entre 2 y 3 billones de años se formaron moléculas orgánicas por actividad no biológica, usando descargas eléctricas (rayos) o luz solar (radiaciones electromagnéticas), como fuentes de energía para reacciones químicas. Algunos bioquímicos creen que los aminoácidos y otros compuestos nitrogenados complejos fueron sintetizados de esta manera. Una vez formados estos compuestos orgánicos, inorgánicos y moléculas, se acumularon lentamente en un océano primitivo caliente y somero. Se cree que en este océano ancestral, hace aproximadamente 2 billones de años evolucionaron organismos vivos. Conforme la vida evolucionó, las plantas verdes emitieron el oxígeno vía fotosíntesis y nuestra ancestral atmósfera compuesta principalmente de metano y amoniaco se convirtió en oxígeno enriquecido, posteriormente al evolucionar los organismos vivos el N se incorporó en transformaciones bioquímicas (Canter, 1997).

Variaciones en la abundancia de las diferentes formas del N ocurren periódicamente con la profundidad, con la actividad biológica, etc., pero finalmente el volumen de cada forma del N permanece constante, es decir que en el balance del N las ganancias son iguales a las pérdidas, las ganancias provienen de la tierra y de la atmósfera (ríos y lluvia), las pérdidas ocurren a través del nitrógeno enlazado orgánicamente en sedimentos y por denitrificación bacterial (Stevenson, op. cit.).

I.1.1 Ciclo del Nitrógeno

El N ocupa un lugar importante en el ecosistema, y pasa de un sistema regulado a otro a través de una serie de procesos químicos y bioquímicos. Las características básicas de las transformaciones biológicas del N se centran sobre las reacciones de oxidación y reducción.

Las plantas consumen compuestos nitrogenados orgánicos tales como proteínas. Los animales consumen las proteínas de las plantas transformándolas en proteínas animales. Después de morir, las proteínas de plantas y de animales se descomponen biológicamente

en formas inorgánicas simples de nitrógeno, principalmente por la actividad de bacterias y hongos.

La acción de microorganismos transforma el N atmosférico en formas compuestas tales como amonio y nitrato. Usualmente más del 90% del nitrógeno presente en el suelo es orgánico, proveniente de plantas o animales, originado por la descomposición de plantas y residuos animales.

Sin embargo no todas las transformaciones del nitrógeno en suelos ocurren por medio de microorganismos, también las reacciones químicas tienen un lugar importante en este ciclo.

La Figura I.2 define los mayores aspectos del ciclo del nitrógeno asociados con el ambiente suelo-agua. El nitrógeno puede entrar al suelo por la aplicación de aguas negras o aguas residuales de plantas de tratamiento, fertilizantes comerciales, residuos de plantas y animales, agua de lluvia, y caída de polvo. En adición a esto se da la fijación de nitrógeno por bacterias en el suelo, que convierte el gas nitrógeno a formas disponibles para la vida de las plantas. La actividad humana ha aumentado la fijación biológica del nitrógeno por el cultivo de leguminosas.

El contenido de nitrato en el subsuelo es generalmente bajo, porque surge a partir de la síntesis, por la lixiviación de agua que percola a través del suelo, o se elimina por denitrificación bajo la capa aerobia del suelo. Sin embargo la síntesis y la denitrificación raramente remueven todo el nitrato agregado al suelo a partir de fertilizantes y efluentes de aguas negras. De acuerdo a esto la lixiviación de nitratos del suelo, es un problema grave en áreas muy amplias (Canter, 1997).

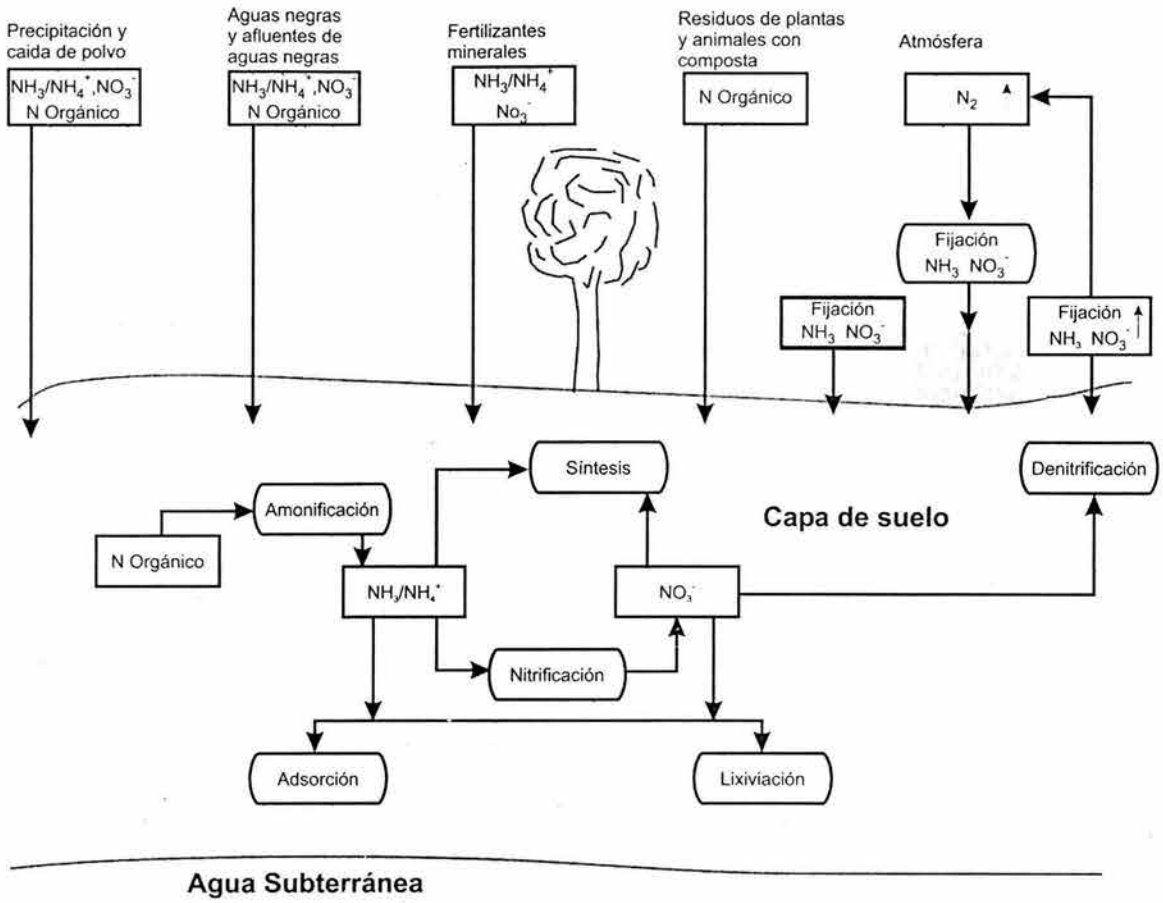


Figura I.2 Ciclo del nitrógeno (Modificado de Canter, 1997)

I.1.2 Compuestos del Nitrógeno

El nitrógeno es un importante componente del ciclo biogeoquímico, y se encuentra en la materia orgánica, como especie disuelta y gases. En contraste, los minerales que contienen nitrógeno son generalmente muy solubles y en consecuencia raros en la naturaleza.

El nitrógeno se encuentra en la naturaleza en valencias que van de +5 en NO_3^-, a -3 en NH_4^+ , una serie de reducción puede escribirse como:

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow N_{2(g)} \rightarrow NH_4^+$$

La mayoría de los cambios de un estado de oxidación a otro son biológicamente inducidos.

Compuestos del Nitrógeno	Formula	Estado de oxidación
Amoniaco	NH_3	-3
Ion Amonio	NH_4^+	-3
Gas Nitrógeno	N_2	0
Ion Nitrito	NO_2^-	+3
Ion Nitrato	NO_3^-	+5

Tabla I.1 Compuestos del Nitrógeno

Nitrato
Este ión representa el producto terminal estable de la nitrificación, es altamente soluble en agua y no es significativamente adsorbido por suelos ricos en arcillas. Un aspecto importante de los nitratos es que sólo son inestables ante la denitrificación biológica ocurrida bajo condiciones anaerobias o provocada por plantas.

Los nitratos no forman minerales insolubles que puedan precipitar, su medio de remoción del agua subterránea es por medio de la reducción (Appelo y Postma, 1996)

Nitrito
El nitrito es más bien una especie del nitrógeno inestable, que generalmente será reducido u oxidado; raras veces existirá en concentraciones tan altas como 1 ppm en aguas superficiales.

Una nitro-bacteria puede tomar el nitrito formado y oxidarlo más tarde a nitrato, según la siguiente reacción.

$$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^-$$

En ausencia de oxígeno los nitratos pueden ser reducidos a nitritos por una bacteria heterotrófica, por el proceso de denitrificación (Appelo y Postma, 1996).

Amoniaco (NH_3) y Amonio (NH_4^+):
El amoniaco y el amonio tienden a ser adsorbidos en suelo por partículas de arcilla; el amonio será generalmente desplazado por otros cationes monovalentes que ya ocupaban sitios de adsorción sobre las partículas de arcilla.

El amoniaco es altamente soluble en agua; aproximadamente a 20 °C y 1 atm de presión 525 g/l de amoniaco se disolverán en agua, formando amonio (NH_4^+) y iones hidróxido de acuerdo a la siguiente reacción:

$$NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$$

El amoniaco existe en equilibrio con el amonio. La distribución de estas especies depende del pH y de la temperatura del sistema biósfero. De hecho muy poco amoniaco existe a niveles de pH menores al neutro, mientras que estará presente a un pH alto. Es

por ello que las aguas residuales se ajustan a un pH alto, antes que el sistema de desecho de amoniaco sea usado en tratamientos avanzados de agua.

A un pH neutro en la mayoría de las aguas superficiales, el amonio puede ser convertido en otras formas nitrogenadas por acción biológica (bacteria y plantas): una especie de bacteria autotrófica es la llamada nitrosoma, la cual puede convertir amonio a nitrito de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$NH_4^+ + 3/2\ O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$$

Equlibrio de los compuestos del N

Los efectos de la actividad microbiana y las relaciones de equilibrio sobre el sistema del nitrógeno deben ser siempre el punto de partida para su estudio, por lo que es importante definir en un contexto de reacciones los límites entre NO_3^- y N_2 y entre N_2 y NH_4^+.
Para las fronteras entre NO_3^- y N_2 la reacción es:

$$\frac{1}{2}N_2 + 3H_2O \leftrightarrow NO_3^- + 6H^+ + 5e^-$$

Empleando la ecuación de acción de masas, se define la constante de equilibrio como K:

$$\log K = \log(NO_3^-) - 6pH - 5pe - \tfrac{1}{2}\log P_{N2} = 105.2 \text{ ----(1)}$$

y los límites entre N_2 y NH_4^+

$$NH_4^+ \Leftrightarrow \tfrac{1}{2} N_2 + 4H^+ + 3e^-$$

en donde K:

$$\log K = \tfrac{1}{2}\log P_{N2} - 4pH - 3pe - \log(NH_4^+) = -14.0 \text{------(2)}$$

Con el objeto de graficar (1) y (2) en un diagrama *redox* se substituyen los valores de NO_3^-, N_2, y NH_4^+.

El valor de P_{N2} en la atmósfera es de 0.77 atm, por lo que puede ser un valor razonable a utilizar.

La elección de las actividades de NO_3^- y NH_4^+ es más arbitraria. Un nivel de actividad de 10^{-3} para NO_3^- se encuentra comúnmente en aguas subterráneas contaminadas, por lo que podría ser razonable utilizar este valor.

Por conveniencia, se deberá escoger el mismo nivel de actividad para NH_4^+ aun cuando las actividades en aguas subterráneas por lo general son más bajas. La substitución de estos dos valores simplifican las ecuaciones (1) y (2)

$$\text{Log}\,(10^{-3}) - 6pH - 5pe - \tfrac{1}{2}\log(0.77) = 105.2$$

$$6pH + 5pe = 102.3 \text{ ---------(3)}$$

y

$$\tfrac{1}{2}\text{Log}\,(0.77)-4pH-3pe-\log(10^{-3}) = -14.0$$

$$4pH + 3pe = 16.94\text{------(4)}$$

Estas ecuaciones se representan en la siguiente figura:

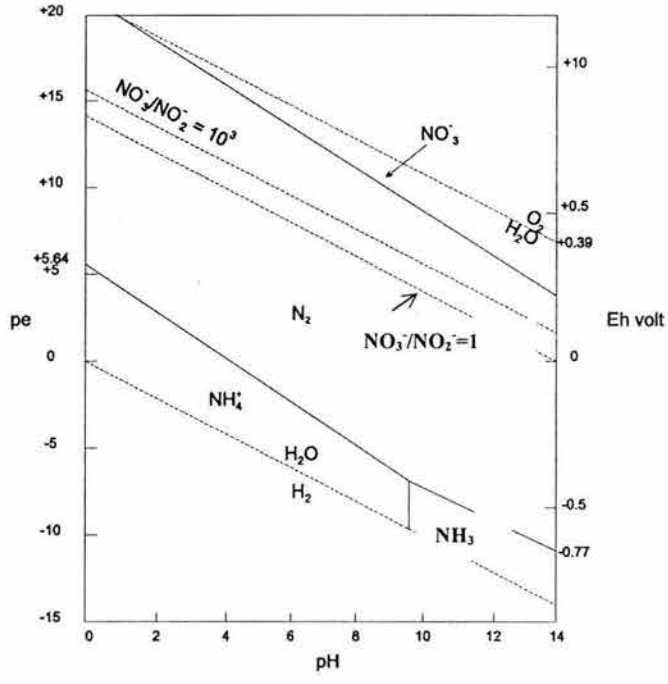


Figura I.3 Diagrama pe/pH (Appelo y Postma, 1996)

Los resultados muestran que los NO_3^- son sólo estables cerca del límite superior de estabilidad del agua, mientras que el NH_4^+ se torna estable inicialmente cerca del límite de estabilidad inferior del agua.

La Figura I.3 muestra que por encima de un pH de 9.2 el $NH_{3(aq)}$ es estable en relación a NH_4^+, y la pendiente para el límite N_2/NH3 cambia a –1.

Con objeto de evaluar la estabilidad del NO_2^-, el cual es intermedio en la secuencia *redox* entre NO_3^- y N_2, se considera la reacción:

$$NO_2^- + H_2O \leftrightarrow NO_3^- + 2H^+ + 2e-$$

y

$$\text{Log K}= \log (NO_3^-) - 2pH - 2\,pe - \log (NO_2^-) = -28.3 \text{ ----------(5)}$$

La ecuación (5) puede graficarse asumiendo actividades iguales para el NO_3^- y NO_2^-.
La línea resultante para la pareja *redox* NO_3/NO_2 se ubica justo bajo la frontera de NO_3/N_2. Dado que N_2 es una forma más reducida de nitrógeno que NO_2^-, la conclusión debe ser que el nitrito es una especie inestable.

Se podría argumentar que la suposición de actividades iguales de NO_3^- y NO_2^- es ilógica, dado que la concentración de NO_2^- en agua subterránea, normalmente es mucho menor que NO_3^-, por lo que se grafica nuevamente la ecuación (5), bajo la suposición de que la actividad de NO_3^- es miles de veces mayor que el NO_2^-, observando que el límite NO_3^-/NO_2^- aumenta a más de 10^7, el NO_2^- podría no alcanzar su propio campo de estabilidad. Sin embargo en ese caso el nivel de NO_2^- se torna inmensurablemente bajo. Por lo tanto se debe concluir que la presencia de NO_2^- en agua subterránea está cinéticamente controlada como un producto intermedio en la reducción total de NO_3^- a N_2. De la misma forma se puede mostrar que productos intermedios como NO(g) y N_2O (g) son inestables. Generalmente el ejemplo muestra como los límites inestables son identificados durante la construcción de un diagrama *redox*.

Pourbaix et al. (1963) muestra el diagrama de equilibrio de compuestos gaseosos del N para presiones totales de 1 atm., a 25 °C.

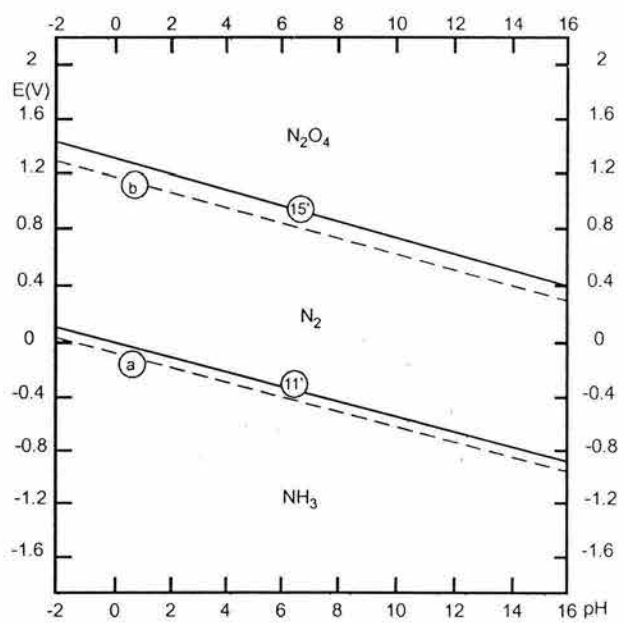


Figura I.4 Predominio de compuestos nitrogenados gaseosos *Pourbaix (1963)

Mecanismos de Transporte:

Los mecanismos de transporte son los principales responsables del movimiento del nitrógeno, estos incluyen precipitación, caída de polvo, sedimentación en sistemas de agua, movimiento de agua subterránea, flujo de corriente, escurrimiento tierras abajo, y volatilización.

Aunque estos no son mecanismos por los cuales la transformación pueda llevarse a cabo, pueden causar cambios en el ambiente, mientras que las condiciones ambientales pueden forzar cambios en las transformaciones a ocurrir. Estas condiciones ambientales que afectan los procesos mencionados, incluyen temperatura, pH, flora microbial, potencial óxido-reducción y la disponibilidad de sustrato, nutrientes y oxígeno.
Aunque el transporte y los mecanismos de transformación son típicamente considerados como procesos individuales, es importante reconocer que esto implica una dinámica continua y que puede no existir un ambiente distinto gobernando la transformación de formas específicas del nitrógeno.

Difusión

La actividad del nitrógeno amoniacal transferido por fenómenos de difusión por unidad de área, por unidad de tiempo es proporcional al coeficiente de difusión y al gradiente de concentración. En la interfase suelo/agua, los gradientes de concentración pueden ser relativamente grandes por lo que la difusión de Nitrógeno de amonio de la capa anaerobia puede ser rápida.

La difusión molecular sigue la ley de Fick

$$F= -D\, dC/ dx$$

En donde:

F representa el flujo de masa
D coeficiente de difusión $[l^2/t]$
dC/dx gradiente de concentración, el cual es negativo en la dirección de la difusión.

Los valores de D para nitratos son típicamente mayores que aquellos del nitrógeno amoniacal, dado que el nitrato es un anión y no es adsorbido en el complejo intercambio subsuperficial.

Adsorción:

El N-amoniacal puede no ser transportado a través de la zona no saturada, ni en el agua subterránea debido a la adsorción, intercambio catiónico, incorporación en la biomasa microbiana, o liberación gaseosa a la atmósfera. Sin embargo la adsorción es probablemente el mayor mecanismo de remoción en el ambiente subsuperficial.

Bajo condiciones anaerobias en el ambiente subsuperficial, los iones de NH_4^+ positivamente cargados son rápidamente adsorbidos por partículas de suelo negativamente cargadas.

Finalmente, como se notó anteriormente, el gas amoniacal puede ser liberado a la atmósfera como una función de las condiciones pH sólido/líquido. Cuando el pH es neutro o bajo, la mayoría del nitrógeno está en la forma de ion amonio. Conforme el pH se torna básico, el ion amonio es transformado en amoniaco y puede ser liberado del suelo como un gas.

El nitrato es típicamente más móvil en el ambiente subsuperficial que el nitrógeno de amonio. Cuando el nitrógeno en la forma de nitrato alcanza al agua subterránea, éste se torna muy móvil debido a su solubilidad y puede moverse en el agua subterránea con una transformación mínima, migrando largas distancias en áreas con aporte, siempre y cuando exista una alta permeabilidad de los materiales subsuperficiales con oxígeno disuelto. La única condición que puede afectar este proceso es el declive en el potencial *redox* del agua subterránea, en el cual puede ocurrir el proceso de denitrificación (Canter et al., 1990).

Procesos del Nitrógeno

El transporte y destino del nitrógeno en el ambiente subsuperficial depende de la forma en que el nitrógeno y varios procesos bioquímicos y fisicoquímicos se involucran en la transformación de una forma a otra del nitrógeno.

Los procesos de transformación en el subsuelo se agrupan en:

a) Mineralización
b) Amonificación
c) Volatilización de amonio
d) Nitrificación
e) Denitrificación
f) Fijación
g) Síntesis o asimilación

Los procesos de amonificación, síntesis, nitrificación y denitrificación son los mecanismos primarios empleados en el tratamiento de aguas contaminadas para el control y/o remoción del nitrógeno.

a) Mineralización: Es la conversión de las formas orgánicas del N a NH_4^+ y NO_3^-

b) Amonificación

Este proceso es el primer escalón en la mineralización del N orgánico. La amonificación es definida como la conversión biológica del nitrógeno orgánico a nitrógeno-amoniacal.

$$\underset{\text{Urea}}{H_2NCONH_2} + 2H_2O \xrightarrow{\text{enzima-ureasa}} \underset{\text{carbonato de amonio}}{(NH_4)_2CO_3}$$

La descomposición de proteínas, ácidos nucleicos, y otras substancias orgánicas nitrogenadas en suelo permite la liberación de NH_3 el cual equilibra a la especie iónica

NH_4^+. En general la amonificación ocurre durante la descomposición del tejido animal y vegetal y se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Nitrógeno orgánico} + \text{Microorganismos} \rightarrow NH_3/NH_4^+$$

c) Volatilización del amoniaco
Proceso físico-químico en donde el N amoniacal está en equilibrio entre la fase gaseosa y la forma de hidrófilo es decir:

$$NH_3(aq)+H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$$

Esta reacción es dependiente del pH, ya que con un pH alcalino se favorece la presencia de la forma acuosa de NH_3 en solución.

d) Nitrificación
El proceso por el cual NH_4^+ es oxidado a NO_3^- se denomina nitrificación. Durante la nitrificación las bacterias oxidan aminas de materia orgánica a nitrito y nitrato; esta se lleva a cabo en dos etapas como un resultado de actividad bacterial quematotrófica del genero nitrosomas ($NH_4^+ \rightarrow NO_2^-$) y nitrobacteria ($NO_2^- \rightarrow NO_3^-$). La oxidación del amonio a nitrito puede escribirse como:

$$NH_4^+ + 3/2\ O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$$

La oxidación de nitrito a nitrato es:

$$NO_2^- + ½\ O_2 \rightarrow NO_3^-$$

Combinando ambas reacciones

$$NH^+_4 + O_2 \dashrightarrow NO_2^- + O_2 \rightarrow NO_3^-$$

Las reacciones de transformación son generalmente acompañadas y procesadas rápidamente a la forma nitrato ya que los niveles de nitrito en cualquier momento son relativamente bajos.

El nitrato puede ser usado en síntesis para promover el crecimiento de plantas o puede ser reducido por denitrificación.

Aunque la nitrificación no es el único proceso que contribuye a la formación de nitrato, sí es el más importante.

Otra fuente es el óxido nítrico producido en la atmósfera circundante que se convierte a NO_3^- por descargas eléctricas, alcanzando la tierra con el agua de lluvia. Se ha estimado un incremento anual a la biósfera en promedio de 10^7 ton. NO_3^- -N.

La oxidación de NO_2^- es más rápida que la de NH_4^+, por lo que raramente en suelos naturales existen más que trazas de NO_2^-.

e) Denitrificación

En forma general la denitrificación se define como la reducción biológica del nitrato al gas N_2O, o a un producto terminal gaseoso tal como N_2. La bacteria responsable de la denitrificación es facultativa anaerobia, que usa nitrato en lugar de oxígeno para su proceso respiratorio bajo condiciones anaerobias. Esta transformación requiere una fuente de alimento de carbono orgánico para que la bacteria metabolice y se forme el CO_2 como producto final de este metabolismo.

La reducción puede ocurrir a través de varias etapas en un patrón bioquímico. Un amplio rango de bacterias heterotróficas están involucradas en los procesos, requiriendo como en la nitrificación, una fuente de carbono orgánico para obtener energía es decir:

$$NO_3^- + \text{carbón orgánico} \rightarrow NO_2^- + \text{carbón orgánico} \rightarrow N_2 + CO_2 + H_2O$$

Un camino comúnmente aceptado para la denitrificación biológica es:

$$\overset{(+5)}{NO_3^-} \rightarrow \overset{(+3)}{NO_2^-} \overset{(ag)}{\rightarrow} \overset{(+2)}{NO} \rightarrow \overset{(+1)}{N_2O} \rightarrow \overset{(0)}{N_2}$$

Se podría notar que si ambos oxígeno y nitrato están presentes, la bacteria típicamente usará oxígeno en la oxidación de la materia orgánica porque aporta más energía, por lo que para que proceda la denitrificación deben existir condiciones anóxicas, aunque no es estrictamente el caso para todas las bacterias.

Se han publicado diversos estudios sobre denitrificación en diferentes acuíferos, basándose en diversas líneas de evidencia incluyendo perfiles verticales, concentración de nitratos, y oxígeno disuelto. Con ello se ha comprobado que la denitrificación es un proceso activo y mitigante de la contaminación por nitratos.

Henry et al. (1984), concluyen que un declive vertical en la concentración de nitratos es la consecuencia del proceso de denitrificación.

La denitrificación a altos niveles ocurre en zonas de baja concentración de NO_3^-, y la denitrificación limitada ocurre en zonas de alta concentración de NO_3^-.

Bajo condiciones anaerobias o libres de oxígeno y en la presencia de sustrato orgánico disponible, los organismos denitrificadores pueden usar nitrato como un aceptor de electrones durante la respiración.

Gillham y Cherry (1978) en sus estudios sobre denitrificación, subrayan que la denitrificación está controlada por el transporte de carbono orgánico inestable desde la zona del suelo hacia la zona de agua subterránea. El aumento de transporte de carbono podría promover la denitrificación dando lugar a un mejoramiento en la calidad del agua subterránea.

En particular estos autores muestran que altas concentraciones de nitratos a profundidades someras corresponden con altos valores de oxígeno disuelto, entre 2 y 10 mg/l, mientras que un marcado declive en la concentración de nitratos corresponde con la región en la cual los valores de oxígeno disuelto presentan generalmente un marcado declive a valores menores de 2 mg/l. Lo anterior se ha concluido con base en las tendencias de nitratos y concentraciones de OD, las disparidades en cloruro y distribución de nitratos, la hidrogeología física y la distribución de tritio, O^{18}, y deuterio.

Se sabe que varios factores influyen en el promedio de denitrificación tanto indirecta como directamente, entre estos: disponibilidad de oxígeno, presencia real de carbón disponible, temperatura, humedad de suelo, pH, presencia de denitrificadores, y textura de suelo.

En un estudio realizado en Inglaterra por Howard et al. (1970) se concluye en base a iones mayores y determinaciones isotópicas que la denitrificación no es significante y que la aparente pérdida en la concentración de nitratos (de >10 a <2 mg/l NO_3-N) en la dirección aparente de flujo es principalmente debido a la mezcla entre aguas de diferente origen, además que la presencia de nitrógeno reducido es una posible evidencia de denitrificación en algunas aguas antiguas. Concluye también que la denitrificación no puede ocurrir bajo concentraciones elevadas de nitrato en aguas de recarga moderna.

Bases bioquímicas y microbiológicas de la denitrificación
El CO_2 producido por la denitrificación se disuelve para formar ácido carbónico a través de la reacción

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$$

Para valores de pH en un rango aproximado de 6.5 a 8.3, el ácido carbónico producido se disolverá para formar H^+ y HCO_3^- a través de la reacción

$$H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

Dado el rango de pH usualmente encontrado en agua subterránea, la reacción de disolución de CO_2 se puede escribir como

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

Para el cual la constante de equilibrio es $1.41*10^{-8}$, por lo que

$$4NO_3^- + 5/6\ C_6H_{12}O_6 \leftrightarrow 2N_2 + H^+ + 5HCO_3^- + 2H_2O$$

En suelos calcáreos el H^+ producido a partir del ácido carbónico reacciona con la calcita para equilibrar el pH del sistema

$$CaCO_3 + H+ \leftrightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$$

Con una constante de equilibrio de $7.2*10^1$

$$4NO_3^- + 5/6C_6H_{12}O_6 + 5CaCO_3 + 4H^+ \leftrightarrow 2N_2 + 10HCO_3^- + 5Ca^{2+} + 2H_2O$$

Estas reacciones químicas y sus relaciones serán útiles para evaluar los efectos de la denitrificación sobre la química del agua subterránea (Appelo et al. 1996).

Trudell et al. (1986), señalan que suelos de textura fina ya sean cultivados o no, contribuyen a la extensión de la contaminación por NO_3 del agua subterránea; esto puede simplemente reflejar el hecho de que no ha habido tiempo suficiente para que el nitrato penetre a profundidades significantes en materiales geológicos de baja permeabilidad.
Los resultados aportan como fuerte conclusión que la ocurrencia de la denitrificación a un nivel freático profundo fue de hecho limitada por la falta de carbono orgánico degradable.

Concluye que si el nivel del agua se encuentra a profundidades más someras la denitrificación del acuífero podría ocurrir, mientras que si el nivel del agua es más profundo la denitrificación no ocurrirá. La denitrificación parece estar asociada a la lixiviación del carbono orgánico disuelto desde la superficie del suelo. Esto podría tener importantes consecuencias, por ejemplo para variar la práctica de riego agrícola desarrollada, lo que podría favorecer la lixiviación y transporte de carbono orgánico al nivel del agua, promoviendo así la denitrificación con el potencial para reducir la extensión y severidad de la contaminación de nitratos en el acuífero.

Otra conclusión importante de estos trabajos es que los acuíferos que estén conectados a la superficie por materiales geológicos de alta permeabilidad, en áreas de una intensa producción agrícola, es de esperarse que presenten una elevada concentración de nitratos. Por el contrario en suelos de textura fina no se presentan altos niveles de contaminación por nitratos en el agua subterránea, además los acuíferos confinados no son propensos a contaminación por fuentes agrícolas de nitratos. Sin embargo, el suelo de textura fina puede contribuir con nitratos a las aguas superficiales a través de corrientes superficiales y de carga de drenes.

Gillham y Cherry (1978) para determinar la evidencia de denitrificación dividen la zona de estudio en diferentes categorías en función del nivel de actividad agrícola, tipo de material, (empleando una gráfica NO_3–N vs OD) así como la textura del material con la concentración de NO_3 –N.

Lo anterior sugirió que altas concentraciones de NO_3^- bajas concentraciones de OD, son condiciones geoquímicas suficientes para remover el OD, y una vez que el OD, se haya consumido ocurrirá la denitrificación. La tendencia en los datos también indica que suelos de textura fina ya sean cultivados o no cultivados no contribuyen a la extensión de la contaminación del agua subterránea, lo que puede ser en parte el resultado de la denitrificación o simplemente reflejar el hecho de que ha sido insuficiente el tiempo para que el nitrato penetre a profundidades significantes en materiales geológicos de baja permeabilidad.

La ocurrencia de denitrificación está asociada con niveles de agua somera debido a que bajo el nivel de agua somera el carbono orgánico degradable se lixivia desde el suelo dentro de la zona capilar y al agua subterránea.

En estas pruebas se agregó acetileno al agua de inyección y así la producción de óxido nitroso se tomó como una evidencia concluyente de la ocurrencia de la denitrificación. Se emplearon el promedio de consumo de nitratos y el promedio de producción de N_2O para calcular el promedio de denitrificación.

f) Fijación

La fijación del nitrógeno se refiere a la incorporación de gas nitrógeno inerte en un compuesto químico tal que pueda ser usado por plantas y animales. Este mecanismo ocurre a partir de gas N_2, a nitrógeno orgánico, siendo predominantemente acompañado por microorganismos especializados y su asociación con plantas.

La fijación atmosférica se da por rayos y procesos de fijación industrial debido a fertilizantes y otros productos químicos.

	Procesos de fijación	Producto
N_2 gas	Biológica	Compuestos de nitrógeno orgánico
	Rayos	Nitrato
	Industrial	Amonio, Nitrato

Tabla I.2 Procesos de fijación

g) Síntesis o asimilación

Se refiere a mecanismos biológicos que usan amonio o compuestos de nitrato para formar proteína de planta y otros compuestos que contienen nitrógeno, es decir:

$$NO_3^- + CO_2 + \text{Plantas verdes} + \text{luz solar} \rightarrow \text{proteína}$$
$$NH_3/NH_4^+ + \text{Plantas verdes} + \text{luz solar} \rightarrow \text{proteína}$$

Los animales requieren proteínas de plantas y de otros animales, ya que, con ciertas excepciones, ellos no son capaces de transformar el nitrógeno inorgánico a la forma de nitrógeno orgánico.

I.1.3 Nitrógeno en Suelos

La pérdida de N en el suelo es un proceso importante en el ciclo del N, ya que forma minerales disponibles de $N\text{-}NO_3^-$, ya sea agregado como fertilizante o producido a través del decaimiento de la materia orgánica. Sin embargo, estos minerales no permanecerán mucho tiempo en el subsuelo, dado que cualquier N mineral que no sea absorbido por plantas o incorporado en la materia orgánica se transformará por uno o varios de los siguientes procesos.

i) Volatilización de NH_3

La pérdida aumenta conforme el pH del suelo se eleva, así como con el incremento de temperatura, con una baja CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico) como la de la arena, con la descomposición de desecho orgánico sobre el suelo (Stevenson 1982).

Se ha incrementado en gran medida el uso de NH_4^+ como fertilizante, pero las pérdidas por volatilización no son muy altas, ya que al inyectarse al subsuelo no se excede su capacidad de sorción.

ii) Denitrificación Bacterial

La denitrificación actúa como un balance sobre la fijación bioquímica del N_2.

iii) Lixiviación

En este proceso el N se pierde principalmente como NO_3^-, aunque también durante la lixiviación el NH_4^+ se puede perder de suelos arenosos, por lo que en este tipo de suelos se dan las más bajas recuperaciones de N al incorporar cantidades importantes de este, sin embargo se recuperan del lixiviado grandes cantidades de N por plantas.

iv) Reacciones Químicas de NO_2^-

Bajo ciertas condiciones, la pérdida de N de suelos y N de fertilizantes puede ocurrir a través de reacciones químicas que involucran NO_2^-.

El nitrito no se encuentra generalmente en cantidades detectables en un suelo bien drenado neutro o ligeramente ácido; la acumulación ocurre sin embargo en suelos calcáreos, el ión nitrito por lo general persiste temporalmente cuando se aplica NH_4^+ o fertilizantes de tipo NH_4^+, este nitrito se atribuye a una inhibición de la nitrificación en el estadio del NH_4^+.

Las pérdidas inexplicables de N, reportadas en diferentes investigaciones se han asociado comúnmente con la acumulación de NO_2^-, además de las perdidas significantes de gases de fertilizantes con N, las cuales pueden ocurrir a través de las reacciones químicas del NO_2 formado por nitrificación de NH_4^+ o por fertilizantes constituidos de NH_4^+ en suelos ácidos o medianamente ácidos (Nelsen, 1982).

Factores que influyen en la lixiviación del N a partir de fertilizantes

La lixiviación del N a partir de fertilizantes aplicados es el evento precursor a los procesos de transformación descritos previamente. La cantidad de lixiviado y por lo tanto la cantidad de nitrato en el agua subterránea se define como una función del tiempo de la aplicación del fertilizante, su cobertura vegetal, la porosidad del suelo, el método de aplicación del fertilizante y la cantidad agregada, el volumen drenado de varios tratamientos de agua, así como el rango de irrigación.

Cabe mencionar que un largo periodo de aplicación de fertilizante mineral, no tiene efectos significantes sobre los patrones de distribución del nitrógeno (Khan, 1971).

Las prácticas que influyen en la concentración o presencia de NO_3^- en el agua subterránea incluyen la intensidad del fertilizante, tipo de semilla y uso de tierra.

El tipo de suelo afecta al nitrato en agua subterránea, es decir un suelo arenoso pierde más del doble de nitrógeno comparado con un suelo arcilloso; La profundidad de las raíces en arenas raramente alcanza los 60 cm por lo que las pérdidas son muy grandes. El nitrógeno a esta profundidad está disponible para las semillas y expuesto a la lixiviación. Para un suelo arcilloso con buena estructura la situación es diferente, la penetración de la raíz puede fácilmente alcanzar 1 m o más en una toma más estable del nitrógeno por las semillas (Stevenson, 1982).

Un aspecto importante en la presencia de nitratos en suelos es la relación de este con los cloruros ya que el movimiento del nitrato y cloruro en suelo ocurre en forma similar. El cloruro no es afectado por procesos biológicos, por lo que el promedio cloruro / nitrato puede indicar el mecanismo por el cual el nitrato se pierde del perfil del suelo. Un promedio constante de cloruro/nitrato puede sugerir lixiviación, mientras que un aumento en esta relación puede indicar denitrificación. Para la relación NO_3-N/Cl^- contra tiempo, se observa que las altas precipitaciones no sólo simulan denitrificación en la zona superior, sino también la dilución del nitrógeno a bajas profundidades después de un periodo relativamente seco.

Variaciones del Nitrato con la profundidad del suelo

Foster y Crease (1972) reportaron que la actividad agrícola resulta en una recarga con alto contenido de nitrato, mientras que el agua subterránea en zonas boscosas contiene poco nitrato.

A partir de diferentes líneas de investigación estos autores observaron que a pocos metros a partir de la superficie del terreno, las propiedades hidrogeológicas del perfil saturado son función de la profundidad. En el verano el movimiento del soluto es fuertemente dispersivo con flujo descendente intermitente, por lo que los solutos se infiltran desde la parte superior, transportándose hacia abajo por el exceso de agua de lluvia que se infiltra. La extensión o dispersión de los solutos son esencialmente función de la intensidad de infiltración, de las propiedades hidráulicas de la matriz, de la geometría de fisura, y del coeficiente de difusión apropiado del soluto correspondiente.

Formas inorgánicas del nitrógeno en suelos

Dentro de estos compuestos se enlistan principalmente el NO_3^-, NO_2^-, amonio intercambiable (NH_4^+), amonio no intercambiable (NH_4^+mineral compuesto), gas N_2, y óxido nitroso (N_2O), existen otros compuestos como óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), hidroxilamina (NH_2OH), ácido hiponitroso (HON=NOH) y azida (N_3^-), pero de difícil identificación. (Young y Aldag, 1982)

Tipo de roca	ppm de NH_4^+	Como % de N
Ígnea		
Basaltos, pórfiros, gabro, dunita	10-39	70-95.2
Sedimentaria		
Carbonosas	210-530	12.1-13.2
No carbonosas	330-420	61.7-70.2
Minerales silicatados		
Biotita	10-36	88.9-91
Illita	690	75.5
Otros feldespatos	8-41	65.9-95.5

Tabla I.3 Concentración de NH_4^+ en diferentes rocas * Young y Aldag, (1982).

Los NO_3^-, NO_2^- y $NH_4^+{}_{int}$. difieren en su comportamiento con respecto al NH_4^+, por ser formas intercambiables y solubles en agua

Para la determinación de las formas inorgánicas del N, es necesario considerar las condiciones del muestreo, almacenamiento y manipulación de la muestra ya que la concentración puede variar día con día por una mala manipulación de la muestra.

Formas orgánicas del nitrógeno en suelos

Casi el 90% del N en la capa superficial de la mayoría de suelos está orgánicamente combinado (Stevenson 1982). Dentro de las formas orgánicas presentes se encuentran: aminoácidos, amino azúcares, y amoniaco.

Aminas: Son derivados orgánicos del amoniaco (NH_3) en donde uno o más de los protones (H^+) es remplazado por un radical o grupo aromático (Seager y Slabaugh. 1987). La propiedad más importante de las aminas es su comportamiento como bases débiles; son las bases orgánicas más comunes, reaccionan con agua para liberar iones OH^-.
Los ácidos como el sulfúrico, nítrico, fosfórico, o carboxílico reaccionan con las aminas formando sales, las cuales son más solubles en agua que las aminas.

Las variaciones en los patrones de distribución de N reportados en diferentes estudios se atribuyen por lo general a las diferencias de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo examinado. La proporción de N del suelo como aminoácido generalmente disminuye con el cultivo, mientras que el porcentaje de N como amino azúcar varía muy poco o aumenta (Stevenson, op.cit.).

Aminoácidos: Son las unidades básicas de las proteínas, están constituidos por dos grupos químicos que son el grupo amino ($-NH_2$) y el grupo ácido (-COOH)

Los aminoácidos existen en suelos en formas como:

1) Aminoácidos libres
   a) solución de suelo
   b) micro poros de suelo
2) Como aminoácidos, péptidos o proteínas ligados a minerales arcillosos
3) Aminoácidos, peptidas o proteínas ligadas a coloides húmicos

4) Como mucoproteína (aminoácidos combinados con N–acetilhexosamina y otros azúcares)
5) Ácido murámico, contiene mucopéptidos derivados de paredes celulares bacterianas.
6) Ácido tricoico, polímero lineal de poliorbital o glicerofosfato, conteniendo ester unido a alanina.

Aminoazúcares: Ocurren como componentes estructurales de un amplio grupo de sustancias denominadas mucopolisacáridos, se encuentran en combinación con mucopeptidas y mucoproteínas así como con moléculas pequeñas como antibióticos.
En el suelo puede existir como un polisacárido alcalino insoluble.

Se asume en forma general que los aminoazúcares en suelos son de origen microbial.
Una relación importante sugerida por Gallali *et al.* (1975), es la del N en suelo como aminoazucar y el contenido de Ca^{2+}, en donde los mayores porcentajes de N son típicos de suelos saturados de Ca^{2+}, este ion como compuesto en $CaCl_2$, permite remover no sólo la fracción soluble e intercambiable del NH_4^+, sino también aquella fracción fijada al suelo.

Namdev y Dube (1973) concluyen que la aplicación de urea y herbicidas al suelo aumenta el contenido de N como aminoácidos por estimulación de la población microbiana que sintetiza aminoácidos durante la descomposición de residuos de plantas.

El N orgánico es altamente resistente en suelo al ataque microbiano, esto debido a varias causas Stevenson (op cit.):

1) Presencia de constituyentes proteicos (aminoácidos, péptidos, proteínas) los cuales son estabilizados a través de sus reacciones con otros constituyentes orgánicos del suelo.
2) Complejos biológicamente resistentes, se forman en suelo por reacciones químicas involucrando NH_3 o NO_2^- con lignito o sustancias húmicas; estos complejos son altamente resistentes a la mineralización por microorganismos del suelo.
3) Adsorción de compuestos orgánicos de N por minerales arcillosos que protegen a las moléculas de su descomposición.
4) Complejos formados entre compuestos de N orgánico y cationes polivalentes, tales como Fe, son biológicamente estables.
5) Parte del N orgánico ocurre en poros o espacios vacíos siendo físicamente inaccesibles para microorganismos.

La siguiente tabla enlista las principales diferencias entre compuestos orgánicos e inorgánicos.

Propiedad	Comp. orgánicos	Comp. inorgánicos
Enlaces entre moléculas	Generalmente covalente	Generalmente iónico
Fuerzas entre moléculas	Generalmente débil	Muy fuerte
Estado físico normal	Gas, líquido, o sólido de baja fusión	Usualmente sólidos de alta fusión
Flamabilidad	Comúnmente flamable	Comúnmente inflamable
Solubilidad en agua	Comúnmente baja	Comúnmente alta
Conductividad de soluciones de agua	No conductor	Conductor

Tabla I.4 Propiedades de componentes orgánicos e inorgánicos * Seager y Slabaugh, (1987)

Procesos de productos nitrogenados

Los procesos más importantes que involucra el ciclo del nitrógeno en el sistema suelo-agua son principalmente: Procesos de transporte, procesos abióticos, y procesos bióticos

Los procesos de transporte que pueden estar involucrados en movimientos subsuperficiales de varias formas incluyen:

- ⇒ Difusión de formas de amonio
- ⇒ Difusión de formas de nitrato
- ⇒ Movimiento de alguna forma con la fase acuosa.
- ⇒ Procesos abióticos, tales como adsorción e intercambio catiónico pueden causar retención de algunas formas de amonio en el subsuelo.
- ⇒ Procesos bióticos tales como la incorporación en la biomasa de plantas o microbiana pueden ocurrir en el sistema.

La Figura I.5 ilustra el ciclo del nitrógeno en el ambiente subsuperficial.

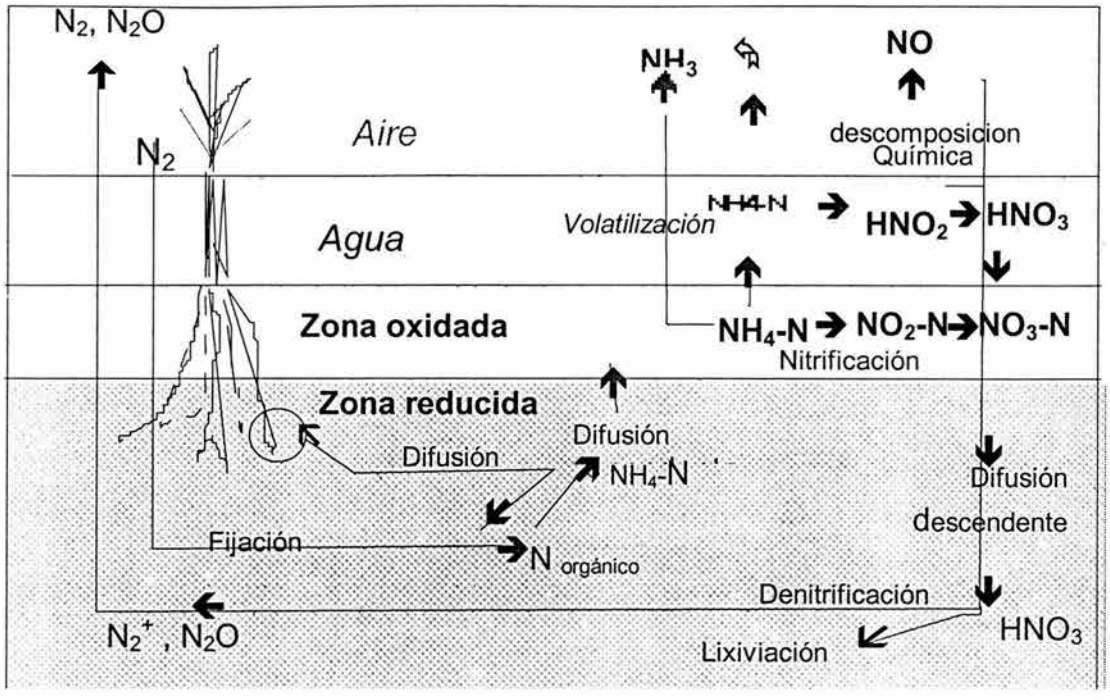


Figura. I.5 El ciclo del nitrógeno en el ambiente subsuperficial (modificado de Canter, 1997) .

Como se sugiere en la figura I.5 la ocurrencia de ciertos procesos es función de la presencia de condiciones oxidantes o reductoras.

Suelos saturados

La principal característica de los suelos saturados (anaerobios), es la asimilación de O_2, diferenciando entre la cantidad de O_2 que consume el suelo, y lo que el flujo de agua aporta.

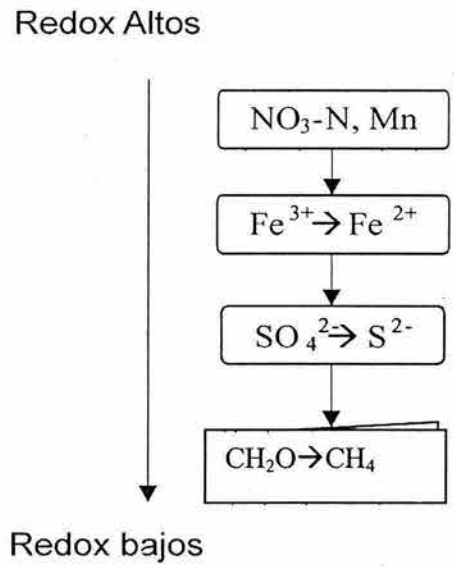
La zona reducida (saturada) consume mucho menos O_2 que un suelo oxidado (zona no saturada) (Patrick y Sturgis, 1955).

Es posible distinguir la capa de suelo no saturado por la presencia de NO_3^- en lugar de NH_4^+ y un potencial REDOX alto, mientras que en un suelo saturado el potencial sería bajo o más negativo.

Zona	Características Principales	Proceso
Zona aerobia, O_2 Suelo no saturado	Zona oxidada Nitrificación, *REDOX* alto	NH_4-N → NO_3-N
Zona anaerobia suelo saturado	Zona Reducida Denitrificación, *REDOX* bajo	$NO_3 \rightarrow NO_2 \rightarrow NO$

Tabla I.5 Características de zonas aerobias y anaerobias

El nitrato y el MnO_2 son reducidos a altos potenciales *redox*, mientras que SO_4^{2-} y CO_2 son reducidos sólo bajo condiciones anaerobias estrictas asociados con potenciales *redox* extremadamente bajos, al desaparecer el O_2 en suelos saturados la reducción de los componentes de un suelo inorgánico oxidado es algo secuencial (Patrick et al. 1955).



La diferencia principal entre un suelo saturado y uno no saturado, se debe a la actividad de microorganismos que funcionan bajo condiciones anaerobias y aerobias; en un suelo seco la mayoría de las transformaciones del nitrógeno son provocadas por bacterias aerobias y algunas veces por facultativos anaerobios.

En un suelo anaerobio los principales procesos microbianos que involucra N en suelos sumergidos son mineralización, inmobilización, nitrificación, denitrificacion, y fijación del Nitrógeno.

I.1.4 Nitrógeno en Agua Subterránea

El ciclo del N sugiere que las especies químicas nitrogenadas encontradas en aguas subterráneas están relacionadas principalmente al tipo de microorganismos presentes, a las condiciones físico-químicas en la matriz suelo-agua y a la historia transitoria del flujo de agua subterránea conforme se mueve de la zonas de recarga a la de descarga. El hombre ha propiciado una mayor fijación mediante el cultivo de cosechas que están relacionadas con las bacterias que fijan el N, los cultivos más comunes de este tipo son leguminosas, como la alfalfa. El cultivo de estas cosechas proporciona el N ya fijado para otras plantas. Además del incremento intencional de la fijación biológica, el hombre ha desarrollado métodos químicos que permiten la fijación del N, este N químicamente fijado se incorpora a los fertilizantes que se utilizan mucho en la agricultura.

Fuentes de nitratos en aguas subterráneas

Las fuentes de nitratos en aguas subterráneas pueden ser consideradas en cuatro categorías

1. Fuentes naturales: El nitrógeno geológico puede ser movilizado y lixiviado, vía la irrigación.

2. Materiales de desecho: Desechos animales como los procedentes de rastros, o confinamiento de puercos, aplicación de aguas de desecho municipal o industrial o efluente líquido sobre tierras de plantíos, campos, parques, etc.

3. Raíces de cosechas

4. Irrigación de cosechas: Lixiviación de nitrógeno por aplicación excesiva de fertilizantes (Canter, 1997).

Gillham y Cherry (1978) señalan la importancia de contar con pozos de observación, en los cuales se efectúen muestreos para análisis químicos y mediciones geoquímicas. En diferentes áreas, encontraron que los nitratos son transportados lateralmente desde áreas de alta concentración de NO_3^-, a zonas con baja concentración y como resultado se encontraron altos valores de NO_3^- en el agua subterránea bajo áreas no cultivadas pero adyacentes a aguas bajo áreas de cultivo.

Zona Vadosa

La concentración de NO_3-N en una zona vadosa, bajo un campo agrícola, está en el rango de 5-100 mg/l, con detecciones frecuentes de 20-40 mg/l (Canter, 1997). Los iones de amonio electrostáticamente ligados a partículas de arcilla cargadas negativamente pueden ser oxidados vía la acción de microorganismos resultando nitrito o ion nitrato que se libera y migra con las aguas del suelo percolante.

El amonio ha sido encontrado en aguas termales y en función del muestreo y la técnica analítica puede tender a oxidarse y ser reportado como nitrato.

Sistema de Tanque séptico

Estos sistemas representan una fracción significante de la carga de N al agua subterránea ya que el efluente de un típico sistema de tanque séptico tiene una concentración importante de N con un total de 25 a 60 mg/l. De este nitrógeno entre 20 y 55 mg/l existen como amoniaco y menos de 1mg/l existe como NO_3^-, por lo que el aporte principal de este sistema será en forma amoniacal.

Un estudio específico caracterizó un sistema efluente típico que contenía aproximadamente 7mg/l de N orgánico, 25 mg/l amonio-N y 0.3 mg/l de NO_3-N Robertson (1974).

Aunque la contaminación por N en aguas naturales puede resultar de especies nitrogenadas disueltas orgánicas e inorgánicas, el nitrato es comúnmente monitoreado y generalmente aceptado como parámetro de polución primario.

Como se mencionara en el inciso anterior, un tanque de agua séptico puede no contener esencialmente nitratos, dado que las especies de nitrógeno en esta agua podrían ser

amoniaco, sin embargo el agua de suelo inmediatamente fuera de la línea de lixiviación en un suelo bien aireado puede contener nitratos en exceso de hasta 100 ppm.

Si el agua potable contiene un alto nivel de ion nitrato, puede ser peligrosa; los niños pequeños y los animales que pastan se pueden enfermar e incluso morir por tomar agua que contiene un exceso de ion nitrato.

Los límites internacionales permisibles en agua potable según la U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)1975, son de 45 mg/l de ion nitrato, o 10 mg/l expresado como nitrógeno. Sin embargo recomienda que a este rango de uso, es necesario tener mas cuidado con la potencialidad de afectación al emplearla en agua para alimentar niños ya que la mayoría de casos de metahemoglobinemia están asociados con agua que contiene mas de 50 mg/l de nitratos, la mayoría de los casos reportados involucra pozos someros localizados cerca de campos de irrigación o sistemas de agua de desecho.

I.2 Antecedentes Históricos

Estudios Previos

El Valle del Mezquital ha sido objeto de diferentes estudios encaminados en parte al conocimiento de las condiciones hidrogeológicas para el desarrollo industrial y agrícola de la región, a lo que se unió el empleo de aguas negras para riego.
Hidrotec, S.A. (1970): Elaboró el primer estudio de disponibilidad hidráulica y contaminación generada por el riego de aguas negras.
Geocalli (1981): Continuó con este proyecto.

GEOPESA (1979): Elaboró un estudio de factibilidad para incrementar el volumen de agua drenada a través del canal principal hacia el distrito de riego 100 ubicado en Ixmiquilpan.

A nivel Hidrogeoquímico se han elaborado diversos estudios, entre los que destacan el estudio isotópico de las aguas subterráneas del Valle del Mezquital, elaborado por Payne (1975) así como el estudio Hidrogeoquímico de la porción centro oriental del Valle realizado por del Arenal (1985).

La Comisión Nacional del Agua (CNA) ha venido desarrollando junto con el British Geological Survey (BGS) un estudio Hidrogeológico del impacto del uso de aguas negras en el Valle del Mezquital, elaborando una importante base de datos de los valores previos.

Otra referencia importante es el trabajo sobre impacto ambiental del agua de irrigación en la parte central de México por Siebe y Cifuentes (1995).

Campos-Enriquez et al (2000) elaboraron un estudio sobre tectónica en la porción central del cinturón volcánico transmexicano en donde definen en base a estudios gravimétricos las estructuras que circundan al Valle del Mezquital.

Huizard et al. (2002) elaboraron un estudio sobre el comportamiento geohidrológico en relación con el marco geológico estructural en la subcuenca de Pachuca-Zumpango, en donde definen una serie de estructuras tipo graben delimitadas por fallas normales, estructuras que de algún modo controlan el flujo subterráneo en la región.

Características del área de estudio

El Valle del Mezquital ocupa estructuralmente una depresión elongada, de unos 5 a 15 km de ancho y 15 km de largo, relleno por una secuencia aluvial reciente (Qal), constituida por arenas con gravas, lentes de ceniza volcánica, caliza lacustre, y flujos de lava. También se ubican algunos depósitos de edad plioceno- pleistoceno con una litología similar.

A grosso modo el modelo conceptual de flujo subterráneo en el área establece que antes de la irrigación con aguas negras existían dos flujos semi-independientes asociados en el Valle Salado-Tula en la porción occidental y en el Valle de Actopan al oriente. Con el incremento del aporte de aguas negras, la infiltración a partir de los sistemas de canales y de la irrigación de tierras, el régimen de flujo subterráneo ha venido a dominar. Se ha creado un nuevo acuífero apareciendo nuevas zonas de descarga y manantiales (BGS y CNA, 1995).

Los flujos de lava forman el acuífero más importante en el distrito y son la principal fuente de agua subterránea, lo que se manifiesta en los manantiales ubicados en el área.

Actualmente se emplean aproximadamente 40 m^3/s de aguas negras para riego.

El impacto del uso de aguas negras puede afectar principalmente a la calidad del agua subterránea; El agua de desecho municipal contiene altos niveles de sólidos orgánicos e inorgánicos suspendidos y disueltos, substancias orgánicas como carbohidratos, lignitos, grasas, jabones, detergentes sintéticos, proteínas y sus productos de degradación están también presentes en el agua de desecho, (BGS y CNA, 1995).

El contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, así como micro nutrientes es lo suficientemente alto para cubrir los requerimientos del cultivo, eliminando la adición de fertilizantes inorgánicos. Sin embargo un exceso de nutrientes puede permanecer en el agua de infiltración, dado que el contenido de nitrógeno de aguas negras es usualmente grande, y un amplio rango de recarga del acuífero puede dar lugar a la polución inaceptable del agua subterránea tanto con amonio como con nitrato.

En el distrito de Hidalgo se irrigan 43000 Ha de un total de 48000 con aguas negras, en cultivos de alfalfa, maíz, trigo, avena, tomates y chiles.

El clima de la región es seco a semiárido con una temperatura media de 18.3 °C con lluvias en verano, el promedio de lluvia de los últimos 10 años ha sido de 450 mm/a, con las mayores precipitaciones en los meses de mayo a septiembre y una evaporación potencial de 2100 mm/a.

En base a las investigaciones geofísicas reportadas por diversas dependencias como CFE, (1985) y CNA (1985), y a las exploraciones directas realizadas en el sitio por CFE y PEMEX (1980) se reporta un acuífero profundo parcialmente confinado con un rendimiento específico mayor que el correspondiente al acuífero superficial, éste último constituido por coladas de basaltos con intercalaciones de tezontle, en contraste con el acuífero somero que se conforma de depósitos aluviales, tobas y cenizas volcánicas intercaladas con derrames de basaltos de la formación Tarango.

Un tercer acuífero se ubica en las calizas cretácicas, este acuífero varía de libre a confinado y como mencionan algunos autores (Del Arenal, 1985; Payne, 1975) su comportamiento hidráulico es muy complejo.

Geoquímicamente Del Arenal (1985), distingue tres grupos de agua, una primera familia sódica-bicarbonatada, una segunda familia tipo mixta-bicarbonatada y una tercera como cálcica-bicarbonatada.

I.2.1. Resultados Analíticos previos

Para este trabajo se consideraron los datos reportados por la Central Termoeléctrica de Tula CFE, 1986, en donde se presenta la evolución Hidrogeoquímica de 1985 a 1986, de los pozos de las baterías I y II con datos de iones mayores y STD. Se evaluaron de igual manera los datos obtenidos por CNA y BGS, 1994-1997, quienes tomaron muestras de 42 pozos, con datos de pH, Temperatura, O_2, CE (uS/cm), iones principales y especies menores como Na, K, Ca, Mg, HCO_3, SO_4, Cl, NO_3-N, P_{total}, F, Si, Sr, Mn, Fe, V, B , asi como elementos traza como Li, Be, Al, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Rb, Y, Zr, Mo, Cd, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Eu, Sm,Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb,Lu, Ti, Pb, Bi, Th.

El trabajo de Gallegos et al. (1999), reporta datos de coliformes fecales y coliformes totales donde se observa un incremento en la concentración para los meses de lluvia de mayo a septiembre, en aquellos puntos en donde el nivel del agua es más alto.
La siguiente tabla (Tabla I.6) muestra los datos reportados por CNA en 1998 específicamente en el área de estudio.

Pozo	SEC	STD	HCO_3	SO_4	Cl	Na	Ca	K	Mg	NO_3-N	pH
Ajacuba	1077	913.76	526.59	86.7	54.4	125.52	50.1	25.19	41.92	3.34	7.05
621-Tlaxcoapan	1874	1330.6	461.18	52.35	400	212.7	114.23	33.04	42.3	14.8	7.7
1099	1926	1556.61	611.63	96.68	392	228.12	141.28	17.04	53.16	16.7	7.23
102 Atotonilco	1322	981.95	431.74	100.72	105	143.56	134.26	24.05	36.76	5.86	7
Tlahuelilpan	2060	1742.47	781.71	124.51	296	367.71	74.65	50.8	29.47	17.62	7.2
Mangas	1918	1591.08	735.91	118.91	257	316.48	53.1	29.04	62.58	18.06	7.3
Manantial											
1184-Tezontepec	1665	1332.76	569.11	140.69	233	202.4	80.66	31.36	61.06	14.48	7.53
C.Colorado	1657	1399.09	577.29	177.93	217	249.93	93.18	34.93	34.63	14.2	7.21
1997-Ojito	1910	1330.3	575	145	197	222	73.1	30.7	74.2	13.3	7.2
Piezómetros											
MC1	1630	1179	361.42	73.68	387	246.92	54.11	29.14	26.73	Nd	6.72
MB	1774	1450.28	618.17	141.66	241	297.2	54.61	40.23	36.76	20.65	7.29
MC3	1447	1135.45	498.73	58.14	271	251.3	15.03	26.06	15.19	Nd	7.55
MC4-1	1232	994.45	506.97	5.06	168	225.15	13.03	61.36	14.88	Nd	7.68
MC4-2	1115	871.78	451.36	11.33	145	200.05	9.02	42.26	12.76	Nd	7.14
MC5-1	1779	1346.96	495.52	60.06	370	159.68	183.36	18.89	44.96	14.49	7.18
MC5-2	1753	1360.98	469.35	66.23	407	160.56	178.85	18.73	45.27	14.99	7.2
MC5-3	1717	1346.54	487.34	70.6	391	154.12	169.34	18.24	44.05	11.85	7.26
MD1	1780	1472.54	592.01	195.76	226	318.24	66.63	27.4	29.25	17.25	7.53
MD2	1440	1257.87	583.83	130.4	167	208.33	106.41	32.33	26.53	3.04	7

Tabla I.6 Calidad del agua subterránea * CNA y BGS (1998)

Localidad	Prof (m)	Feb	Abr	May	Jun	Agosto	Sep.	Oct
Sn José B	11	<3	460	<3	23	3	23	23
	25	3	<3	<3	4	<3	150	4
C. Colorado	7	1100	240	240	240	43	>2400	43
"	25	7	72400	<3	<3	4	23	240
Tula	7	nd	7	<3	<3	<3	>2400	43
Actopan	7	nd	460	<3	7	4	240	<3

Tabla I.7 Concentración de coliformes totales (cfu/100 ml) en agua subterránea dentro del área de irrigación con aguas negras *Modificado de Gallegos et al. (1999).

La BGS y CNA en1994, efectuaron un amplio muestreo de aguas negras para analizar y caracterizar esta agua (ver tabla I.8).

	Emisor central (EMC)	Río Salado (RS1)	Río Tepeji (RTE)	Río Tula (RT1)	Casa de fuerza (DCFE)	Refinería (DPM)	Presa Endho (SOT)
pH	6.97	7.64	6.95	6.99	7.43	7.48	7.13
SEC (uS/cm)	1114	1590	431	995	1673	4092	1136
Oxigeno disuelto (mg/l)	0.59	0.95	2.54	0.88	1.8	4.27	2.18
Coliformes fecales (MPN/100 ml)	$6.54*10^{12}$	$52*10^{5}$	$28*10^{5}$	$5.98*10^{12}$	$6.4*10^{6}$	$20.1*10^{3}$	$7.8*10^{4}$
Detergentes (mg/l)	6.58	2.56	3.4	5.21	1.355	0.505	4.22
Norgánico (mg/l)	14.71	3.79	6.08	4.57	5.85	5.018	2.35
NH4-N (mg/l)	8.5	18.52	2.93	8.19	3.44	25.91	10.88
NO2-N (mg/l)	0.039	0.137	3.40	0.028	0.780	0.780	0.040
NO3-N(mg/l)	0.192	0.348	0.373	0.289	12.40	7.96	0.066
HCO3(mg/l)	232.85	596.83	312.05	350.4	230.6	237.29	268.64
SO4 (mg/l)	187.49	346.23	79.9	179.94	1253	2627	146.16
Cl(mg/l)	76.97	243.20	47.27	87.97	253.8	294.1	83.97
Na(mg/l)	77.64	337.0	95.16	82.22	482.15	290.56	202.90
K(mg/l)	18.28	37.2	9.75	21.50	28	32.75	17.88
Fe (mg/l)	0.712	0.240	0.531	0.658	0.183	0.689	0.257
Cu (mg/l)	0.087	0.086	0.030	0.050	0.155	0.170	0.040

Tabla I.8 Calidad de las aguas negras de descarga en el Valle del Mezquital en 1994 (CNA-BGS, 1998)

Sobre la caracterización de aguas de irrigación, se consideraron los datos generados por Siebe y Cifuentes (1995), con muestras de las presa Endho, y canales de riego; en estos datos se comprueba que un agua estancada superficial no presentará una concentración importante de NO_3, sin embargo la concentración de N se encontrará en forma de amonio.

Característica	Unidad	Agua no tratada (Tlamaco-Juandho)	Presa Endho	Agua de drenaje (Tepa Lagunilla)
pH		8.4	7.15	7.5
E:C.	µc/cm	1483	7.6	1720
Ca^{2+}	meq/l	2.66	2.39	5.05
Mg^{2+}	meq/l	2.1	1.87	3.14
Na^{+}	meq/l	8.9	3.12	8.38
K^{+}	meq/l	1.09	0.53	0.66
CO_3^{2-}	meq/l	2.11	1.24	2.25
HCO_3-	meq/l	4.84	3.18	3.9
SO_4^{2-}	meq/l	0.45	0.48	0.81
Cl^{-}	meq/l	6.43	2.9	7.85
NO_3^{-}	meq/l	0.01	0.01	1.84
Nt	mg/l	29.3	15.6	10.9
$N\text{-}NH_3$	mg/l	17.5	8.21	2.43
$N\text{-}NO_3$	mg/l	0.02	0.02	10.11

Tabla I.9 Características generales del agua de irrigación * Siebe y Cifuentes (1995) reportados como SARH 1985

Para estas mismas aguas se contaba con los datos reportados por Jiménez y Homero (1998), con la caracterización de las aguas negras, a partir de muestras de los canales principales. Este trabajo caracteriza las aguas negras del valle, resaltando las bajas concentraciones en metales pesados y concentraciones de NH_4^{+}-N de 29.43 a 18.2 mg/l en los diferentes canales de distribución.

Calidad del Agua de Irrigación

En Base a datos previos se clasifica a las aguas de irrigación como salinas, con altas concentraciones de detergentes, grasas y aceites, boro y hierro. Cromo y cadmio parecen también presentarse con valores altos sin embargo no existen valores de estos parámetros.

I.2.2.Evolución del uso de aguas negras y la calidad del agua subterránea

En estudios geoquímicos previos (Del Arenal, 1985) se distinguieron tres grupos de agua, el primero relacionado con aguas conectadas con alguna cámara magmática, un segundo grupo fuera de la zona de estudio y un tercero relacionado con muestras tomadas relacionadas con canales de aguas negras.

En el año de 1896 se inició el uso de aguas negras para riego en el valle, es decir más de un siglo de aporte. Inicialmente se irrigaba con esta agua el centro del valle en torno a los poblados de Tlaxcoapan y Tlahuelilpan. Posteriormente su uso se extendió hacia Mixquiahuala al norte, controlando el dren el flujo del río Salado.

Para incrementar el "aprovechamiento", de las aguas negras se construyó en 1926 la presa Requena con una capacidad de 71 Mm^3. La presa Taximay con 50 Mm^3 y La presa Endho en 1934 con 182 Mm^3.

Actualmente recibe un promedio de 40 m^3/seg de aguas negras no tratadas, que se emplean para irrigar un área de 45,215 ha.

Año	Volumen de Aguas negras Mm^3 BGS1996	Extracción de Aguas subterráneas Mm^3 BGS 1996,INEGI1992
1960	700	15
1965	500	20
1970	975	24
1975	925	60
1980	1225	72
1985	1125	84
1990	1150	120
1995	1160	123

Tabla I.10 Extracción de aguas subterráneas vs. volumen de aguas negras irrigadas

El siguiente diagrama muestra como a partir de 1960 se ha incrementado el uso de aguas negras mientras que la extracción del agua subterránea se ha mantenido a los mismos niveles a costa de la calidad de esta última.

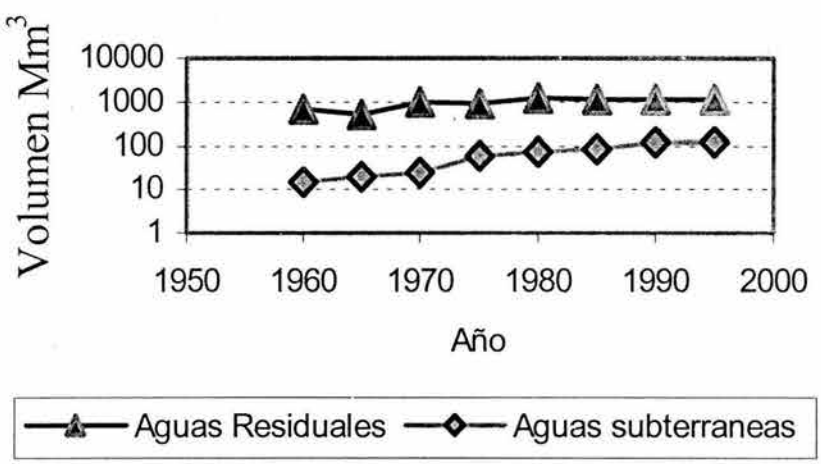


Figura I.6 Extracción de aguas subterráneas / volumen de aguas residuales

II. Geología

II.I Marco Geológico

Con el fin de conocer y recopilar la información generada del área de estudio se consultaron los siguientes trabajos:

Cartas topográfica y geológicas escala 1:50,000 CETENAL 1989

- ⇒ Tula de allende F14-C-88
- ⇒ Mixquiahuala F14-C-89
- ⇒ Imágenes de satélite del área de Tula de Allende, 1:50,000 LANDSAT 1985
- ⇒ Resumen de la Investigación Hidrogeológica en la C.T. Tula, Hgo., C.F.E. 1985; Este trabajo resume las investigaciones realizadas para la construcción de la central termoeléctrica de Tula.
- ⇒ Informe Final C.T. Tula, Hgo., 1990. Trabajo abocado a la rehabilitación y aforo de los pozos de los sistemas I y II de la CFE en 1989, con información piezométrica, hidrógrafos, videograbaciones y análisis hidrogeoquímicos de interés.
- ⇒ Sistema de drenaje profundo, secretaría de obras y servicios, Dirección General de obras hidráulicas, D.D.F. 1975. Este estudio presenta en forma amplia características hidrogeológicas y propiedades mecánicas del subsuelo del Valle de México, cuyo plano geológico abarca, aunque con poco detalle , parte de la zona de estudio.
- ⇒ Servicio de prospección y levantamientos geológicos y Geofísicos en la zona de Polotitlan Tecozautla, edo. De México e Hgo. GEOPESA, 1979. Estudio Geohidrológico que abarca una parte importante de los alrededores de Tula de Allende, Hgo. Con un extenso estudio de geología regional, así como características generales del comportamiento geohidrológico del estado de Hidalgo.
- ⇒ Determinación de los sitios para la perforación de doce pozos en las proximidades del río Tula y proyecto de la conducción a la refinería Miguel Hidalgo en Tula Hgo., 1984. Trabajo cuyo objetivo era el localizar doce sitios para pozos profundos cuya extracción de agua subterránea se destinaría a la refinería. Por lo que el informe señala diversas características geohidrológicas detectadas por medio de sondeos de pozos preexistentes, así como por los resultados de perforación y muestreo de nuevos pozos.
- ⇒ Actualización del estudio Geohidrológico del Valle del Mezquital Hgo., SARH 1981. Amplio informe geohidrológico que abarca en su totalidad el área de estudio, presenta un importante análisis de climatología, hidrogeología, hidrogeoquímica e hidrología subterránea con una loable serie de datos y valores graficados y tabulados de cada uno de estos aspectos.
- ⇒ Síntesis geográfica del estado de Hidalgo, INEGI, 1992. Importante recopilación geográfica del estado de Hidalgo.
- ⇒ Taller de Fotograbado y Cartografía 1989, Fotografías aéreas de Tula Hgo. Apoyo en la interpretación geológica y estructural del área
- ⇒ Resumen de la Geología de la hoja Pachuca, Estado de Hidalgo y México. Fries., 1962. El antecedente más importante y completo de los estudios geológicos

levantados en el estado de Hidalgo. Punto de partida para una investigación bibliográfica del área.

- ⇒ Carta Geológica del Estado de Hidalgo, UNAM, Instituto de Geología, 1972. Netamente un plano geológico regional que bastaría para corroborar las diversas unidades litológicas en la porción SW del estado de Hidalgo, porción que cubre el área de estudio.
- ⇒ Impact of Wastewater reuse on Groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, México. BGS, 1995. El informe preliminar de este trabajo, compila información importante de la geología del valle.
- ⇒ Contribution to the tectonics of the northern portion of the central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt, J.O.Campos E. et al., 2000. Una contribución importante al comportamiento tectónico estructural del Cinturón Volcánico Transmexicano, con importantes datos de sismicidad en el Valle del Mezquital que les permiten a los autores describir un modelo estructural para el Valle y sus alrededores.
- ⇒ Geologic Structure and groundwater flow in the Pachuca-Zumpango sub-basin, central Mexico, R.Huizard A. et al., 2002. Estudio Hidrogeológico de la subcuenca de Pachuca-Zumpango, colindando al sureste con el área de estudio, cuyas similitudes litológicas y estructurales permiten referirlo al área de interés.

En base a esta investigación y a los diversos recorridos realizados en el área de estudio, se mencionan detalladamente las diversas características geológicas de esta área.

Es probable que en alguna época geológica casi toda la cuenca del valle del Mezquital haya estado ocupada por aguas lacustres, siendo limitada al este y oeste por diversas sierras volcánicas de rocas extrusivas básicas e intermedias, en forma de coladas lávicas de basalto, andesita e incluso riolita, con pequeños conos dispersos de basaltos vítreos que atestiguan una actividad volcánica reciente. Al norte de este valle el límite lo constituye una secuencia de rocas detríticas coronadas por una potente columna de rocas volcánicas (CFE, 1990).

En la porción austral del área de estudio se presentan pequeñas elevaciones montañosas de composición predominantemente calcárea, como representantes en superficie de la unidad base de la secuencia estratigráfica en el área. Prácticamente todas estas calizas, afloran debido a basculamientos tectónicos delimitados por extensas fallas de tipo normal.

El relleno lacustre esta representado por una secuencia de capas arcillosas, arenosas e incluso conglomeráticas, definiéndose también algunas capas de caliza lacustre, travertino y coladas lávicas interdigitadas. Esta unidad se presenta en discordancia angular con las diversas unidades que las delimitan, carácter que manifiesta una intensa actividad tectónica en el área, Figura II.1.

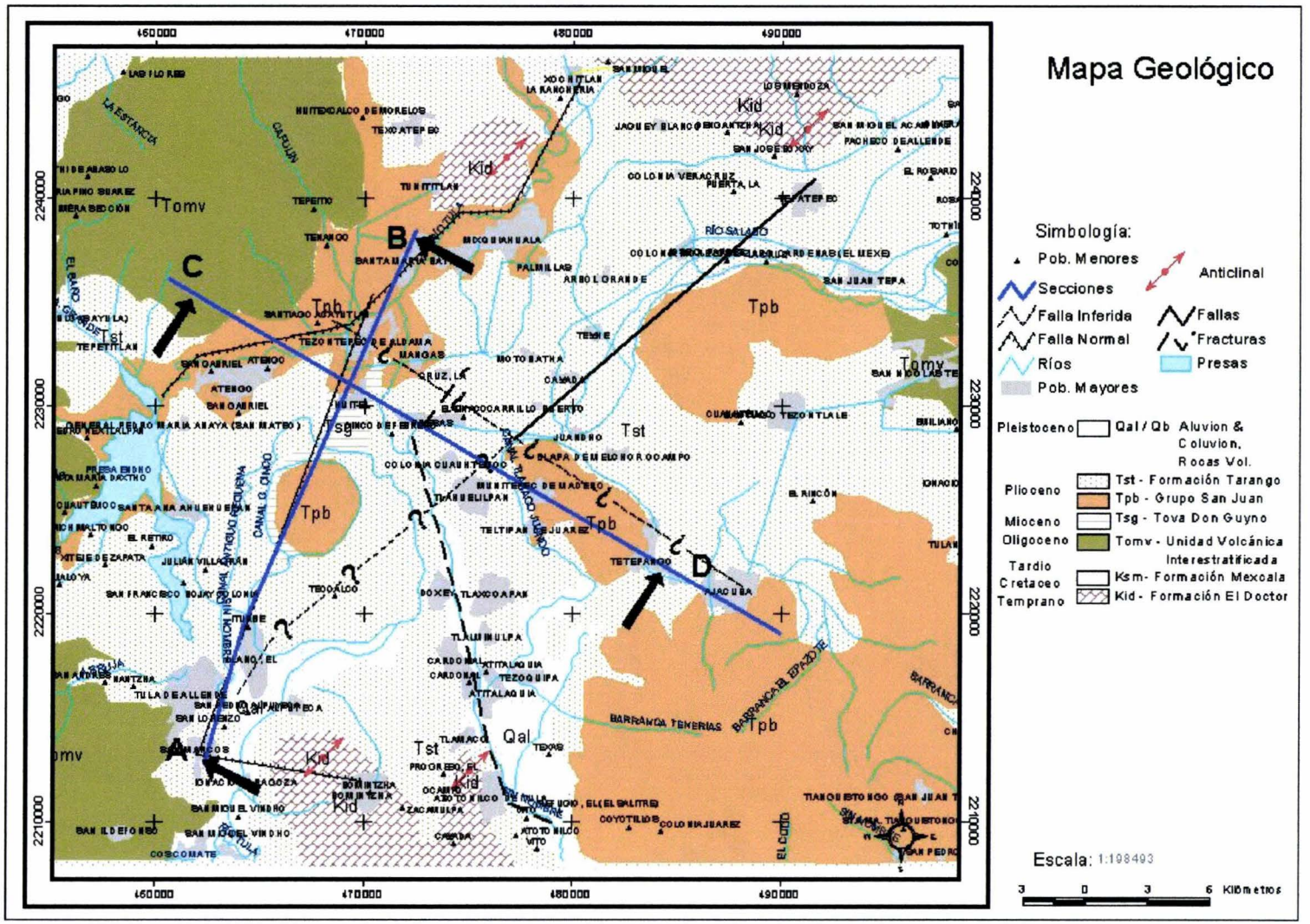


Figura II.1 Mapa geológico.

Características generales de los diferentes tipos de rocas que se presentan en la zona.
La zona se ubica fisiográficamente en la provincia del Eje Neovolcánico Transmexicano, las características litológicas y estructurales de las rocas que afloran en esta provincia indican que hubo diferentes eventos geológicos de tipo orogénico, que asociados al volcanismo y al relleno de cuencas oceánicas dieron el carácter estructural a esta región (INEGI, 1992).

Los mantos constituidos por material piroclástico que se ubican en el área (Sayula, Sta. Ma. Batha, Michimaloya) presentan extensos depósitos de escorias, pedazos de piedra pomez, lapilli, arena volcánica y cenizas. Este material cementado da lugar a tobas, brechas, brechas tobáceas y aglomerados volcánicos, así como "lahares", estos últimos son depósitos con abundantes cantos en una matriz volcánica de grano más grueso que el lodo, por lo que este material pobremente clasificado forma capas volcanoclásticas débilmente estratificadas.

Los lahares se pueden formar durante la erupción o posteriormente por retrabajo de derrubios volcánicos durante los intervalos de no actividad volcánica aun después de que el volcán se ha extinguido, ya que debido a su posición en los flancos de éste, resulta un material favorablemente ubicado para ser desplazado en forma de coladas de barro al estar saturado de agua de lluvia o del vapor volcánico. Estos depósitos se ubican en la porción Occidental del Valle de Tula, es decir en Tula de Allende, Michimaloya y Requena.

Varios mantos de ignimbritas se pueden apreciar al norte y noroeste del área de estudio en C. Montanho, Sayula, y C. Xicuco (CFE, A. Cervantes 1990), cuyos depósitos se precipitan a altas temperaturas por medio de un flujo piroclástico. Estas tobas de flujo cinerítico, como también se les denomina, difieren de los depósitos de caída libre, no sólo en su modo de depositarse sino en su distribución aérea, selección y grado de compactación y soldamiento. Surge durante las erupciones de magmas ácidos ricos en componentes volátiles, compuestos por gotas o coágulos de fragmentos todavía plásticos de lava saturada que se encuentran suspendidos en una nube densa y caliente de vapores de agua y gases. Las ignimbritas mio-pliocénicas, correspondientes a las tobas Don Guinyo presentan una gran extensión, siendo la mayoría de composición riolítica variando a cuarzolatitas, riodacitas y dacitas.

Se ubican también antiguas mesetas de lava basalto-andesítico (Tetepango, San Juan Tepa), productos de diversas erupciones de fisuras, en donde la lava fue extruida a través de grietas relativamente estrechas derramándose sobre la superficie en forma continua.

Se elevan en las zonas diversas estructuras volcánicas, dentro de las que sobresalen algunos conos piroclásticos (Cuahutemoc, Teñhe), diversos domos volcánicos (C. El Epazote).

Se presentan en forma aislada diversos cuerpos hipoabisales de composición riolítica (C. Carambullo, C. El Danghi), los cuales solidificaron en el interior de grietas o como cuellos de antiguos volcanes.

Pequeños depósitos de conglomerados con clastos netamente calcáreos y otros clastos puramente volcánicos, se presentan en forma limitada, así como algunos clastos puramente

volcánicos, en los sectores de Conejos, Tianguistengo, Sayula y Xochitlán; algunos de estos se presentan como antiguos testigos de estrechos paleocanales fluviales.

Al norte y sur del Valle de Tula (Cruz Azul), rocas detríticas de grano fino dan lugar a afloramientos locales de areniscas, lutitas y lodolitas, en las inmediaciones de los poblados de Mixquiahuala y Progreso; todos estos materiales se presentan como material de relleno de una antigua cuenca lacustre.

Características Fisiográficas:
La continuidad de los fenómenos volcánicos durante casi todo el terciario, se manifiesta en el gran espesor y en la extensión que cubren las rocas ígneas del eje neovolcánico, donde pueden encontrarse volcanes aislados o en conjunto cuyas alturas no rebasan los 2500 m., domos riolíticos, conos cineríticos enteros y erosionados, mesetas formadas por flujos piroclásticos y derrames de basalto que tienen forma de mesetas y planicies sobre las que se han originado algunos lagos, debido al cierre de las cuencas. Estas estructuras han sido modificadas en ocasiones por fenómenos de volcanismo explosivo como se manifiesta en la Caldera de Huichapan en la localidad del Astillero.

Se ubican rocas sedimentarias mesozoicas en algunos afloramientos que sobresalen en forma de cerros aislados en medio del dominio de las rocas ígneas, como en las localidades de Tula de Allende y Atotonilco de Tula, donde cerros de caliza son explotados para uso industrial.

La interacción entre el clima y la composición litológica de las rocas volcánicas se hace más evidente en las zonas húmedas, donde afloran extensos derrames de rocas basálticas que han sido alterados profundamente por el intemperismo fisicoquímico y han desarrollado suelos residuales de color rojizo que indican la fuerte oxidación de los minerales férricos contenidos en las rocas ígneas.

En particular el Valle de Tula muestra laderas tendidas como el cono del Cerro del Estudiante (Ajacuba) en el extremo oriental con laderas tendidas con una altitud de 2700 m s.n.m.; se ubican también laderas abruptas, con una altitud máxima de 2855 m s.n.m. (C. Grande).

Estratigrafía
El análisis estratigráfico abarca la integración de los datos y de la organización de las diversas unidades observadas en campo las cuales comprenden:

CUATERNARIO	***Aluvión-Derrames Lávicos Lahares***	***Qal-Qb Ql***
	Formación Tarango	Tst
TERCIARIO	Grupo San Juan	Tpb
	Toba Don Guinyo	Tsg
	Grupo Pachuca	Tomv
	Grupo el Morro	Tmm
CRETACICO	Formación Mexcala	Ksm
	Formación El Doctor	Kid

Tabla II.1 Estratigrafía de la región

Las características representativas de cada una de ellas se mencionan a continuación.

Sistema Cretácico

Formación El Doctor (Wilson et al., 1955).- Esta es la unidad litoestratigráfica más antigua que aflora en el área de estudio (Bomintzha, Atotonilco, Apaxco). Esta formación se desarrolla durante el Cretácico, integra la plataforma carbonatada del Banco El Doctor, separada de la plataforma San Luis-Valles, por una cuenca intracratónica denominada cuenca de Zimapán (Carrillo, 1971). Presenta diversas facies litológicas destacándose en el área aquella concerniente a un ambiente de aguas poco profundas, es decir de plataforma interna. Dicha formación consta de calizas de grano fino, con cierto grado de recristalización, localmente contiene abundantes restos fósiles de bivalvos (rudistas) y gasterópodos. Esta formación se encuentra plegada y afallada en sus diversos afloramientos. Aunque no se ha determinado el espesor total de esta facie, se le estima un espesor mínimo de 300 m. Es correlacionable con la Formación El Abra o Tamaulipas superior de la cuenca petrolífera de Tampico, equivale también a la Formación Morelos que aflora más al sur de la cuenca de México. Esta unidad corresponde principalmente al Albiano extendiéndose hasta el Cenomaniano, o lo que se conoce en México como el Cretácico medio.

Formación Mezcala (Segerstrom, 1962).- En discordancia erosional sobre la Formación El Doctor se presenta una secuencia gruesa de capas clásticas de grano variable y matriz calcárea, constituida en su parte inferior por capas alternadas de lutita, limolita, marga o caliza y arenisca. Hacia arriba las sucesión de capas de marga y caliza desaparecen, predominando incluso capas de conglomerado fino. En la zona de estudio se presenta esta formación como una secuencia predominante de lutitas calcáreas. Se le asigna una edad Turoniano-Santoniano, la erosión acaecida sobre esta unidad dejó tan sólo pequeños afloramientos en el área como los que se observan en la porción septentrional (Mixquiahuala) y Austral (Cruz Azul) de ésta.

Sistema Terciario- Cuaternario

Conglomerado El Morro (Segestrom, 1962).- Pequeños depósitos aislados (Tunititlán, Tianguistengo) de conglomerados con clastos de caliza en una matriz rojiza de grano fino subyaciendo a rocas cretácicas, se presentan como producto de la erosión de las rocas calcáreas precedentes, por lo que se le considera de tipo "molasse". A este grupo se le asigna una edad Eoceno Tardio o bien Oligoceno Temprano.

Grupo Pachuca (Fries, 1962).- Rocas volcánicas ocurridas durante el intervalo Oligoceno-Plioceno, descansando en discordancia erosional o angular sobre unidades más antiguas. La composición de estas rocas varía de basalto a riolita, destacándose la presencia de tobas andesíticas, lavas andesíticas e incluso ignimbritas. Se presenta en capas o estratos interdigitados, compuestos por derrames de lava, brecha volcánica, aglomerado volcánico, tobas y arenisca tobácea. La sucesión más gruesa y más completa de estas rocas se encuentra en las inmediaciones de Sta. Ma. Macua y Santiago Acayutlan.

Tobas Don Guinyo (Fries, 1962) .- Consta de afloramientos de tobas y brechas riolíticas y dacíticas en forma de derrames piroclásticos o ignimbritas.

En el Cerro Xicuco y en el cañón de Sayula, se observa esta unidad como una roca afanítica de color ladrillo, con lentes aplastados de obsidiana negra; es decir típicamente una toba de flujo cinerítico, a la cual se le ha asignado una edad del Plioceno inferior.

Grupo San Juan (Segerstrom, 1962).- Conjunto de derrames máficos, cuya composición varía de basalto a andesita; yacen discordantemente sobre las unidades anteriores terciarias, incluso sobre rocas mesozoicas con marcada discordancia angular y erosional. Este grupo ha sido producto de derrames lávicos emitidos de diferentes centros eruptivos ubicados cerca de los afloramientos actuales, presenta poco material volcanoclástico asociado.

Su espesor es muy variable sin exceder los 400 m dentro de la zona de estudio. Esta unidad abarca desde el Plioceno Tardío hasta el inicio del Pleistoceno, presenta sus mayores espesores en los cerros de Ajacuba, El Estudiante y Santiago Tezontlale.

Formación Tarango (Segerstrom, 1962).- Sedimentos clásticos depositados en ambiente acuoso de edad concerniente al Plioceno-Pleistoceno, localmente interestratificados con derrames lávicos de edad semejante a las rocas máficas del grupo San Juan. Estos sedimentos fueron depositados sobre una superficie de erosión que se desarrolló encima de las unidades Cretácicas y Terciaria. Se presume un espesor máximo de 400 m para esta formación, aunque no se ha logrado medir su potencial total.

Gran parte de esta formación fue depositada por corrientes de aguas superficiales acumulando el material en forma de relleno de amplios valles. Entre las capas que comprenden la formación se intercalan locamente tobas de grano fino, producto de la erosión de tobas preexistentes o de erupciones volcánicas contemporáneas. Localmente la interrupción del desagüe, dio lugar al desarrollo de pequeños lagos de corta duración, en los que se depositaron arcillas, margas y algunas calizas lacustres (San Marcos, Atotonilco de Tula, Ajacuba). Su localidad tipo se presenta en la Barranca de Tarango, en la colonia Mixcoac, de la ciudad de México.

Basalto Cuaternario Qb (De Cserna et al. 1987).- Casi todas las rocas incluidas en esta unidad son basaltos de Olivino en derrames de lava y conos cineríticos de edad cuaternaria.

- Restos de un solo derrame se encuentran cubriendo terrazas situadas a ambos lados del Río Tula.

Lahar.- Depósitos de material piroclástico locales y aislados arrastrados por lodos, sobreyaciendo a diversas coladas basálticas, se ubican en la porción Occidental del área.

Aluvión y material clástico.- Diversas acumulaciones de aluvión y material clástico de edad Cuaternaria se presentan como rellenos de antiguos valles o bien de los diversos ríos que aún drenan el área.

II.2. Geología del Subsuelo

Se cuenta en el área con la presencia de 29 pozos de C.F.E., 15 pozos de PEMEX y 45 pozos de la SARH; ésta última realizó en 1981 un estudio geofísico para definir todo el subsuelo del Valle del Mezquital, dicho trabajo complementó la interpretación de los cortes litológicos con que se contó. Toda esta información corrobora la tesis mencionada de que el Valle de Tula constituye una antigua cuenca lacustre delimitada por bloques de rocas volcánicas afalladas en diversos flancos. Para dicha cuenca se presume una profundidad aproximada de 50m, alcanzando tanto una caliza de origen presumiblemente lacustre como un potente espesor de arcilla verdosa (toba volcánica argilitizada), ambas unidades como parte del material de relleno lacustre pertenecientes a la Formación Tarango.

A partir de esta interpretación se elaboró la sección mas representativa del área (Figura II.3), que parte del fraccionamiento de Presa Requena hasta el poblado de Tunititlán, pasando por el cerro Xicuco, cuyo origen denota importantes implicaciones de tipo tectónico en el área de estudio; dicha estructura muestra superficialmente un basculamiento ocurrido sobre las ignimbritas de la toba Don Guinyo. Este fallamiento se infiere que alcanza gran profundidad debido al salto que en superficie presenta dicha estructura. El C. Huitel y los derrames del cuaternario (Qb) se presentan como parte de una extrusión por fisura definida a lo largo de dichos derrames. En los alrededores de la Ciudad Cooperativa de Cruz Azul, un recorrido de campo permite apreciar las diversas fallas que definen los contactos entre las rocas cretácicas (Kmd y Ksm) y las rocas del terciario y cuaternario (Tst y Qb) dando lugar a estrechas estructuras tipo graben, dichas estructuras también se presentan sobre las rocas volcánicas de los grupos San Juan y Pachuca .

Se considera que la Formación Tarango tiene una gran importancia en el comportamiento hidrogeológico del sistema, debido a su heterogeneidad tanto vertical como horizontal, por lo que se define esta Formación como una secuencia de:

- ⇒ Arenas y gravas en superficie poco o nada cementadas de aproximadamente 5 m de espesor máximo.
- ⇒ Arenas y arcillas poco cementadas de 7 m de espesor promedio generalmente en acuñamiento con otras capas.
- ⇒ Capas de arcilla plástica, cuyos espesores fluctúan entre 10 y 50 m.
- ⇒ Diversas capas de basaltos fracturados y alterados, que se acuñan o interdigitan con unidades detríticas hasta una profundidad aproximada de 150 m.
- ⇒ Pequeños lentes de conglomerados o gravas poco compactadas, producto del acarreo de antiguos afluentes.
- ⇒ Aislados lentes de caliza porosa de origen lacustre de hasta 200 m de espesor.
- ⇒ Delgados lentes de ceniza volcánica, que se presentan como resultado de la actividad volcánica contemporánea, así como tobas de grano fino producto de la erosión de tobas preexistentes.
- ⇒ Nódulos o capas delgadas de caliche mezcladas en forma heterogénea entre capas superficiales o bien a profundidad en relación con alguna falla o fractura ocurrida dentro de esta formación.

Los sedimentos de esta formación fueron depositados encima de una superficie de erosión que se desarrolló sobre unidades litológicas precedentes ya sea sobre las rocas calcáreas del

Cretácico o bien sobre roca volcánica del Terciario; por lo que bajo esta unidad de material detrítico, se infiere la presencia de una gruesa secuencia de rocas volcánicas pertenecientes a la actividad del Grupo San Juan o bien si la erosión lo permitió se ubicará un potente espesor de las ignimbritas de la Toba Don Guinyo sobreyaciendo al amplio volumen de las rocas máficas del Grupo Pachuca (las cuales se depositaron directamente sobre las calizas de la Formación El Doctor o sobre las lutitas de la Formación Mezcala). Sin embargo es probable que las rocas volcánicas que se encuentran sobre estas formaciones sedimentarias, sean parte del Grupo San Juan, ya que así se llega a apreciar en algunos sectores de la superficie.

II.3 Esquema estructural de la porción central del Valle

El Valle del mezquital es parte de una gran depresión (Campos – Enriquez et al., 2000) constituye una antigua cuenca lacustre delimitada por bloques de rocas volcánicas afalladas en diversos flancos. Dicha cuenca alcanza tanto una caliza de origen presumiblemente lacustre como un potente espesor de arcilla verdosa (toba volcánica argilitizada), ambas unidades son parte del material de relleno lacustre perteneciente a la Formación Tarango (CFE, Cervantes, 1990). Dicha formación presenta en el área diversos derrames interestratificados en forma concordante o en discordancia de tipo angular o erosiva; característica que se aprecia ampliamente en superficie, estos derrames se suceden como parte de la continua actividad volcánica que abarcara desde el Plioceno hasta el Reciente.
Todas las unidades volcánicas que constituyen parte de la secuencia litológica del área, se encuentran en superficie sumamente fracturadas e incluso afalladas, y las más antiguas muestran un intenso grado de erosión.

Las rocas sedimentarias pertenecientes a las Formaciónes Mezcala y El Doctor, se presentan intensamente plegadas, afalladas y fracturadas y en consecuencia demasiado alterada, esto debido a la intensa actividad tectónica a la que han sido sometidas (Campos Enriquez et al. op. cit.). La actividad neotectónica en el valle documentada a través de actividad sísmica histórica y reciente, se asocia con fallamiento de tipo normal con distención N-S relacionado esto con lo que denomina el Graven del Mezquital (Campos-Enriquez et al., 2000).

En esta tesis, a partir de los diferentes cortes litológicos de barrenos y perfiles de pozos con los que se contó se ubicaron también los dos sistemas principales de fallas.

La orientación de estos sistemas sigue a aquella del cinturón volcánico Mexicano, la primera con una dirección NW-SE y afecta a las calizas cretácicas (Ajacuba-Tezontepec). El segundo sistema con una dirección SW-NE se relaciona con los efectos tensionales que han afectado a las rocas volcánicas (San Marcos-Huitel y El Llano-Tepatepec). Este último sistema se relaciona con la presencia de manantiales termales como son los de Ajacuba y Vito (Figura II.2, Figura II.3, Figura II.4).

En la descripción de campo se identificaron y midieron la orientación de fallas y fracturas en donde la tendencia principal es de NE-SW 60-70° y NW-SE 20-30° (Figura. II.5)

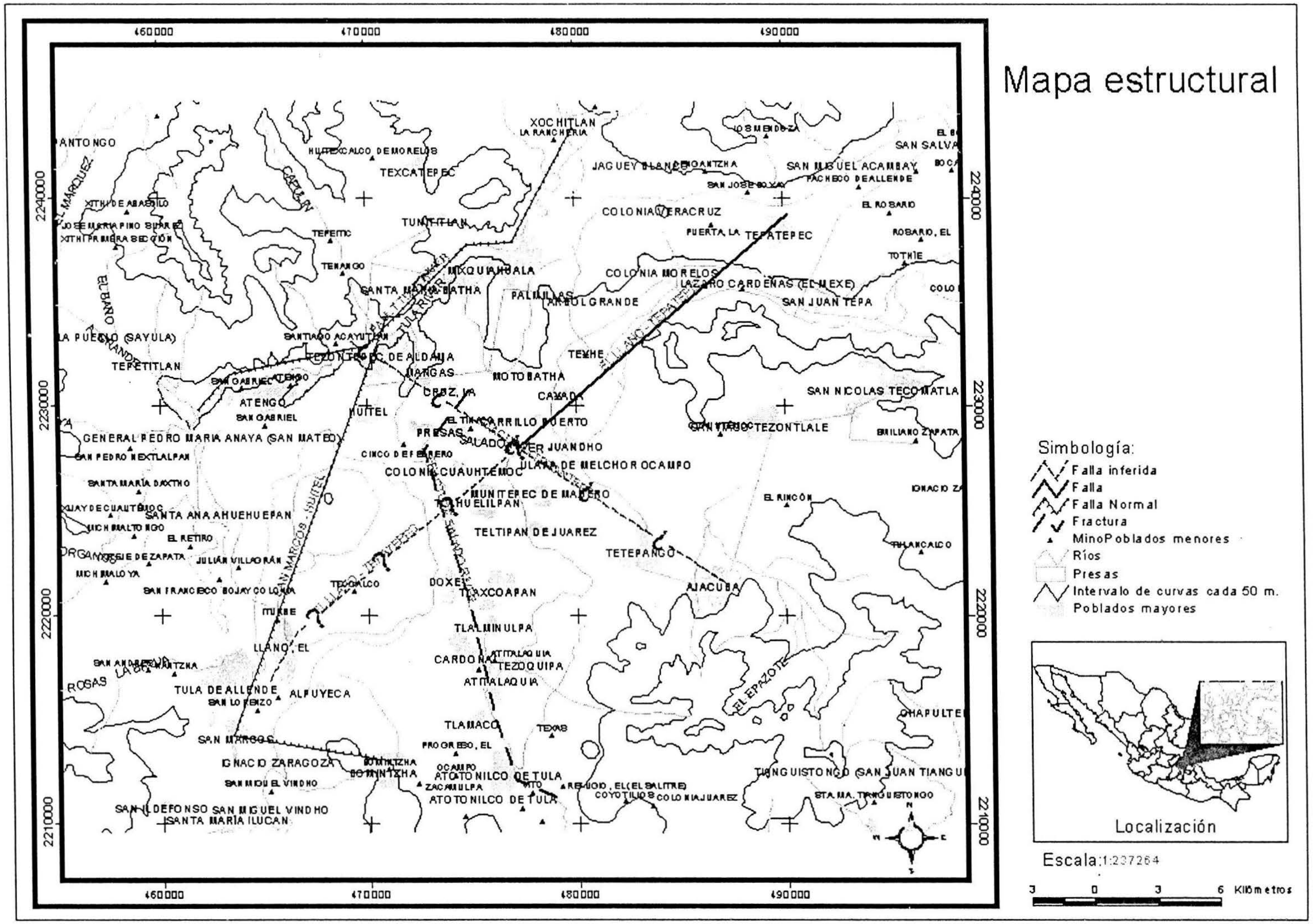


Figura II.2 Mapa estructural.

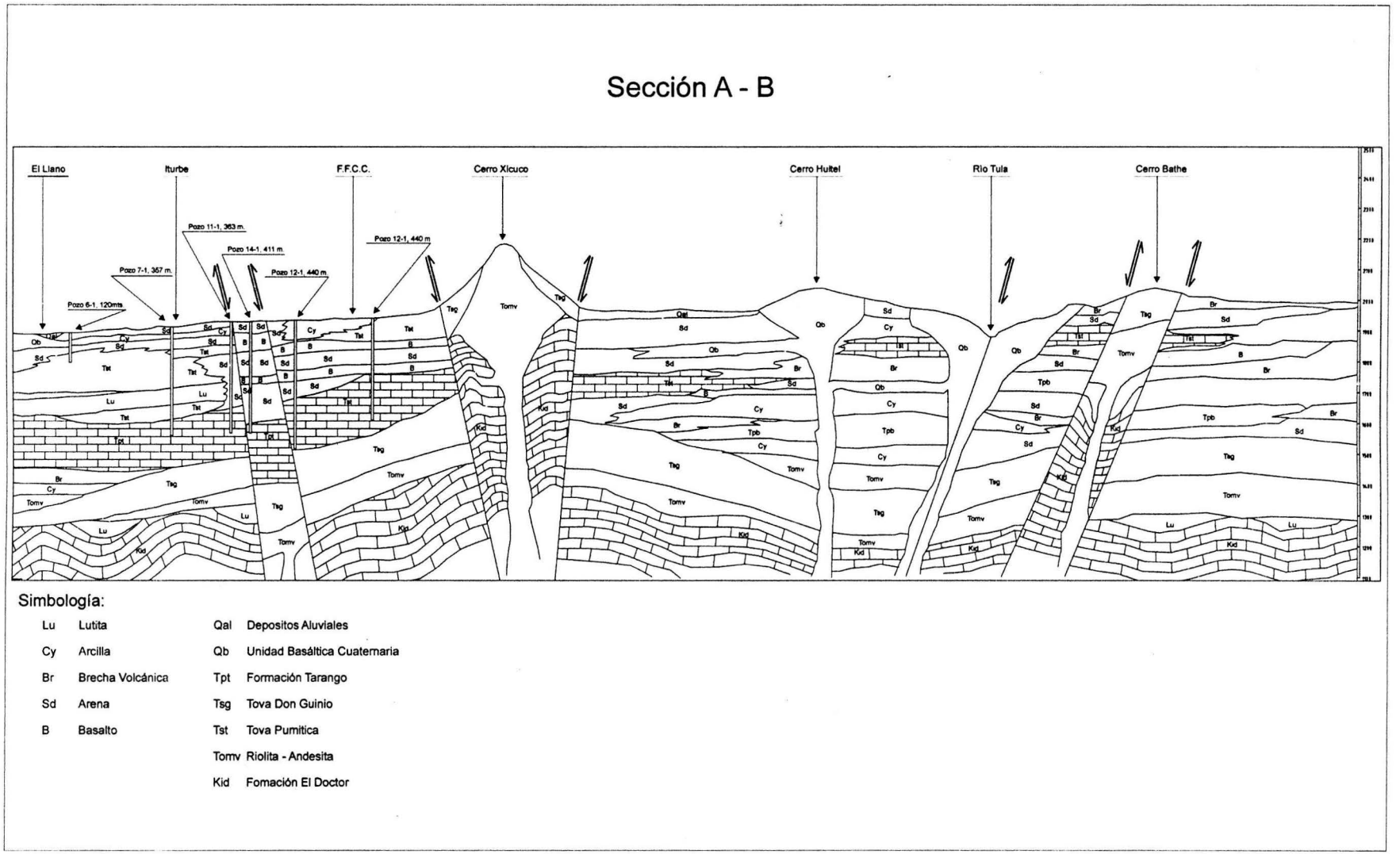


Figura II.3 Sección A – B.

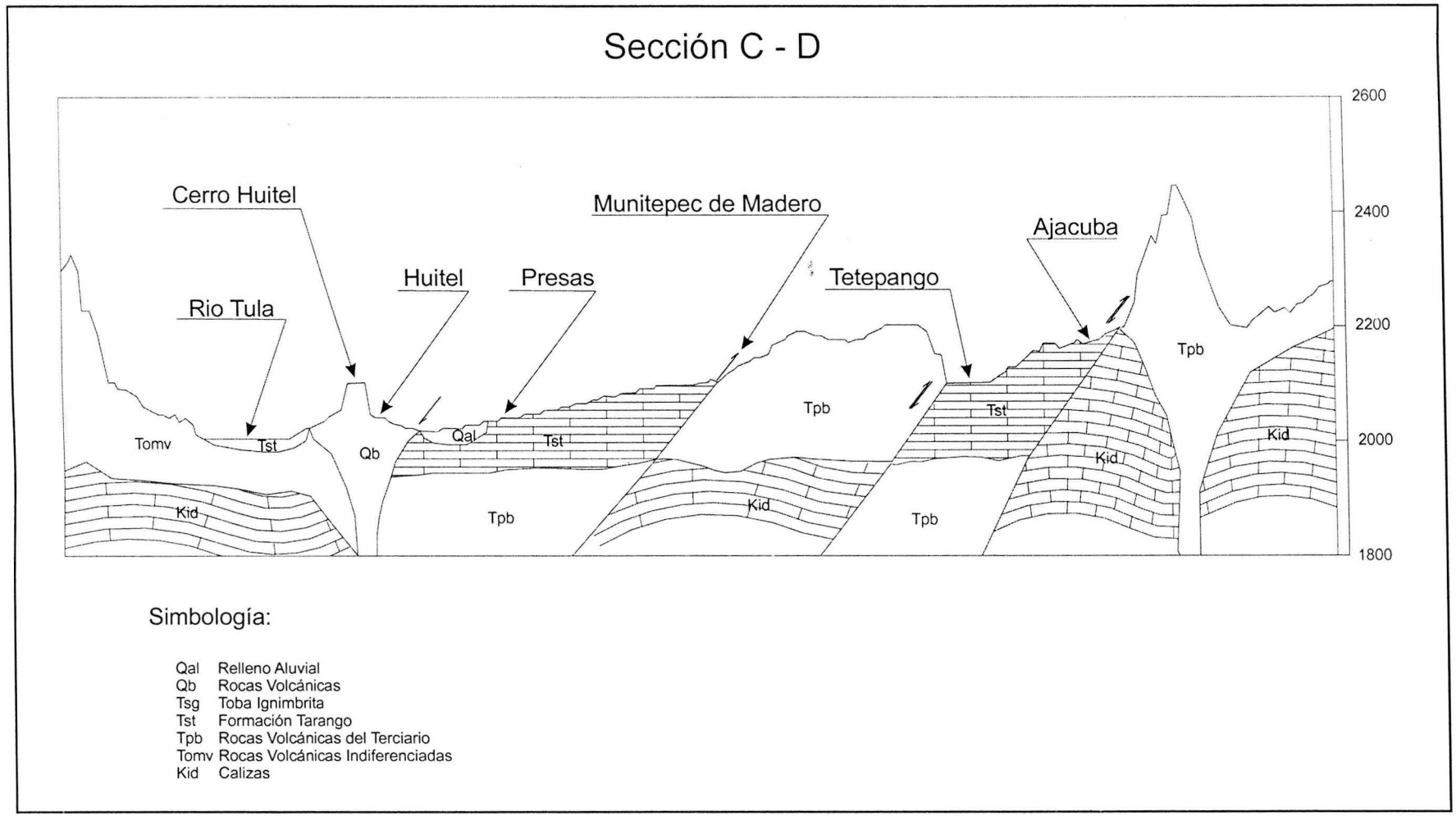


Figura II.4 Sección C– D.

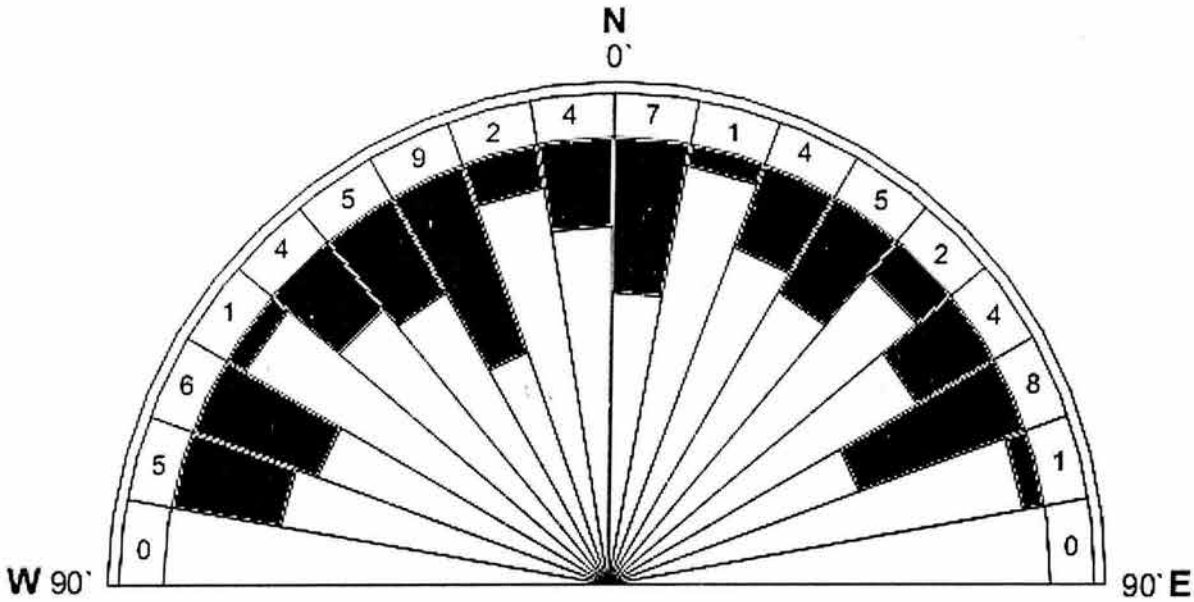


Figura II.5 Diagrama de frecuencia de fallas y fracturas

Las fallas y fracturas asociadas al río Tula, así como la acción erosiva del agua ha modelado el relieve regional y permitido la extensión del sistema de drenaje.

Las secciones geológicas N-S y NW-SE (Figuras II. 3 y II.4 respectivamente) muestran la relación entre los diferentes sistemas de fallas y las rocas volcánicas terciarias.

Las Calizas cretácicas constituyen el basamento del sistema, edificado por bloques estructurales limitados por fallas. Campos-Enriquez et al., 2000 señalan que las anomalías residuales indican la presencia de este basamento calcáreo sobreyacido por rocas volcánicas indiferenciadas; este modelo contempla una depresión este-oeste extendiéndose hacia el oeste desde el valle del Mezquital hasta la zona de la fractura de Querétaro.

Respaldado por sondeos eléctricos verticales (CFE, 1990) así como por descripciones litológicas de barrenos profundos (>300 m) (CFE, Cervantes, 1990) se sabe que el valle está relleno por un grueso espesor de rocas volcánicas del terciario y algunas capas delgadas de caliza lacustre. El aluvión está compuesto por conglomerado interestratificado con arcillas lacustres y en el centro del valle con flujos de lava y capas de arena fina (Huizar - Alvarez et al., 2003).

Se pueden observar algunos conos volcánicos, así como flujos contemporáneos relacionados con las zonas de fallas, cuyos flancos actúan como conductos para los flujos de lava.

Al noreste de la presa Endho se ubicó un lineamiento con dirección NE-SW que se podía proyectar hacia el cerro Xicuco; que es una estructura volcánica terciaria (Tomv) localizada sobre una falla normal con la misma traza (CFE, Cervantes 1985). Esta estructura está rodeada por tobas e ignimbritas cuya identificación es posible aún empleando fotografías aéreas.

Otro lineamiento importante fue aquel trazado desde el Cerro del Elefante, con una dirección NW-SE 30°, orientándose hacia la zona de falla ubicada en Mangas, en donde la presencia de manantiales se atribuyó a esta estructura.

En resumen en el área de estudio, es decir desde Mixquiahuala al norte, hasta El Llano en el borde sur (Figura II.2) se ubican tres fallas principales definidas por los drenes de los ríos Tula y Salado y una tercera estructura a lo largo de la línea que se dibuja al sur del cerro Xicuco, hasta el cerro Huitel.

En base a fotografías aéreas e imágenes de satélite (Landsat) se definió un lineamiento desde Tepatepec, truncándose en la falla que delimita el río Salado, esto se respaldó con las descripciones de barrenos y perfiles ubicados en torno a este río.

II.4. Hidrogeología

La principal fuente de aguas subterráneas en el estado se ubica en los acuíferos del valle del Mezquital, cuya recarga se incrementó notablemente al iniciarse el riego con agua superficial

Los flujos de lava constituyen el acuífero más importante en el distrito y la principal fuente de agua subterránea. Estas rocas tienen una permeabilidad moderada, principalmente asociada con el fracturamiento y fallamiento, presentan un espesor variable y pueden estar interdigitadas con depósitos de menor permeabilidad; lo que ocasiona que el acuífero varíe de confinado a semiconfinado.

Otra fuente importante de agua subterránea es el aluvión el cual contiene arena y secuencias de grava. Esta formación aflora sobre gran parte del distrito con diversos espesores, las capas de arena y grava tienen alta permeabilidad. Esta formación se considera de baja transmisividad, debido a los depósitos arcillosos.

Un tercer acuífero lo conforman las calizas cretácicas profundas, cuyo carga alimenta a los acuíferos superiores; se infiere que puede comportarse como acuífero libre o bien como acuífero parcial o completamente confinado. Este manto acuífero puede estar ligado al artesianismo que se presenta en la zona de San Salvador (Del Arenal, 1985).

La transmisividad promedio en la zona de Actopan es de $7x10^{-3}$ m^2/seg. y el coeficiente de almacenamiento promedio de 2 $x10^{-3}$ a (CFE, 1985).

Desde hace pocos años la extracción de agua del subsuelo se ha incrementado con el establecimiento de una refinería y una planta termoeléctrica en el Valle de Tula .

El flujo de agua proviene principalmente del oriente y del sur con dirección norte y probablemente noreste desde Actopan.

En la zona de Actopan la recarga superficial se genera al igual que en la zona de Tula por la infiltración de las aguas de riego.

La porción occidental del área de estudio es la que presenta mayores índices de precipitación pluvial. Se presume que esta escurre sobre las tobas arcillosas de la formación Tarango, o bien se infiltra a través de las capas arenosas de la misma Formación, pero en ambos casos su destino es el Valle del Mezquital.

Puesto que la explotación mediante pozos es todavía reducida, el acuífero descarga la mayor parte de su alimentación a través del cauce del río Tula y de numerosos manantiales entre los que destaca el de Cerro Colorado, fuente de abastecimiento de gran número de poblados.

Se estima que en la actualidad, los acuíferos del valle reciben una alimentación total mínima de 280 millones de m^3.

II.4.1 Unidades Hidrogeológicas.

No todas las formaciones geológicas que se presentan en el área de estudio, poseen la misma facilidad para transmitir y proporcionar agua en cantidades apreciables, económicamente hablando. Tal aspecto se enfatiza al evaluar los aluviones y arenas de la Formación Tarango con las andesitas y riolitas de Grupo Pachuca. Por lo que resulta sumamente importante establecer una diferencia entre:

a) Unidades permeables
b) Unidades semipermeables
c) Unidades impermeables

a) Unidades permeables

Dado que los acuíferos que se presentan con mayor frecuencia están formados por depósitos no consolidados de materiales sueltos, tales como arenas, gravas y una mezcla de ambos, etc., sin importar su origen geológico (fluvial, deltáico, piedemonte, viento, hielo, etc.), así como sus buenas condiciones de recarga (buena porosidad, existencia de masas o corrientes de agua), su permeabilidad y la baja profundidad de su nivel piezométrico posibilita que puedan contener notables caudales de agua. Estas características ocurren con los sedimentos del Cuaternario (Qal) que presentan materiales clásticos de origen fluvial y aluvial, así como lentes locales de ceniza volcánica, los cuales se encuentran restringidos a los cauces de los principales ríos y arroyos que drenan el área. Su prácticamente nula compactación y alta porosidad, permite clasificar a esta unidad como de alta permeabilidad, teniendo la capacidad de constituir un acuífero superior, cuya recarga proviene principalmente de las aguas pluviales.

Resulta difícil clasificar a las rocas volcánicas y más aún evaluarlas como buenos o malos acuíferos, por depender esto de las características físico-químicas que les otorga su origen, grado de alteración, edad, y ambiente tectónico. Los valores más altos de trasmisibilidad se han encontrado en basaltos recientes (Davis y De Wiest, 1967), en constraste con algunas riolitas y basaltos compactos de alta densidad cuyas propiedades hidrológicas son muy pobres.

En la zona de estudio los derrames basálticos comprendidos entre el Pleistoceno y el Reciente (Qb), presentan una estructura vesicular que le otorga una porosidad primaria, la cual aunada a un alto grado de fracturamiento provoca que sean altamente permeables.

Algunos de los derrames pertenecientes al Grupo San Juan (Plioceno-Pleistoceno) de composición basáltica e incluso andesítica, presentan, al igual que los derrames posteriores, porosidad primaria basada en una estructura vesicular, además de un alto grado de fracturamiento por lo que son altamente permeables; considerándose así como una de las principales unidades del sistema acuífero.

Conviene recalcar el alto grado de alteración que presentan algunos de estos derrames basálticos, refiriéndose principalmente a la alteración de tipo hidrotermal, la cual se manifiesta ante el efluvio de manantiales termales en la zona de estudio (Ajacuba, Tezontepec, Vito), factor que favorece la permeabilidad de estas rocas.

El material clástico constituído por gravas y arenas de grano fino a grueso, poco consolidado, así como los depósitos de conglomerados que se presentan en forma extensa al suroeste del área (Texhimay), pertenecientes todos estos a la Formación Tarango, presentan también una estructura de porosidad primaria altamente permeable.

b) Unidad semipermeable.
Entre las rocas sedimentarias consolidadas que encierran el 95% del global de las aguas subterráneas en la tierra, la más importante es la caliza (Custodio y Llamas, 1983), que varía enormemente en densidad, porosidad y permeabilidad, de acuerdo con el ambiente sedimentario existente al momento de su formacion y al desarrollo posterior de zonas permeables por disolución de los carbonatos (Karst); sin embargo si no estan carstificadas suelen ser poco permeables a no ser que este aspecto se substituya por un alto grado de fracturamiento lo que otorgaría a la roca una porosidad secundaria, dando lugar a una unidad semipermeable como ocurre en la zona de estudio con la caliza de la Formación El Doctor (Kid).

Algunas rocas de composición marcadamente andesítica, más compacta y con menor grado de alteración y fracturamiento, pertenecientes a los Grupos San Juan y Pachuca, presentan porosidad en bajo grado y en consecuencia baja permeabilidad. Al igual que las tobas e ignimbritas de la Toba Don Guinyo (Tsg), las que a pesar dal tamaño de grano y de la compactación que presentan, ven favorecida su permeabilidad por el grado de alteración y fracturamiento que observan, funcionando así como zona de recarga hacia el subsuelo.

Otros miembros considerados como semipermeables, son los concernientes a sedimentos no consolidados de tamaño mediano a fino de algunos horizontes de arenas intercaladas con arcillas pertenecientes al miembro tobáceo de la Formación Tarango, los lahares del Cuaternario y algunas de las lutitas con alto grado fracturamiento de la Formación Mexcala.

c) Unidades Impermeables
Bajo este rubro quedan incluidos algunos de los paquetes litológicos de las formaciones que comprenden del Oligoceno al Mioceno, es decir el Grupo Pachuca y las primeras

emanaciones del Grupo San Juan. Estos incluyen rocas volcánicas cuya composición varía desde riolitas hasta basaltos compactos con bajo grado de alteración y sin fracturamiento.

También quedan incluídas algunas arcillas y tobas de la Formación Tarango las cuales se han considerado como capas sello en la constitución del acuífero, así como el material arcilloso de la Formación Mezcala.

UNIDADES GEOHIDROLOGICAS	CARACTERISTICAS	
PERMEABLES Qal, Qb, Tst, Tpb	Qal	Permeabilidad primaria
	Qb	Permeabilidad Secundaria
	Tst	Miembros de granulometría arenosa, grava y conglomerado de permeabilidad primaria
	Tpb	Permeabilidad secundaria de algunos derrames por fracturamiento
SEMIPERMEABLES Ql, Tst, Tsg, Tomv, Kmd, Ksm	Ql	Debido a su granulometría, tamaño y disposición de su matriz
	Tst	Al presentar material arcilloso
	Tsg, Tomv	Por fracturamiento y grado de intemperismo
	Kmd, Ksm	Calizas y lutitas de bajo grado de permeabilidad favorecida por fracturamiento
IMPERMEABLES Tst, Tpb, Tomv, Ksm	Tst	Capas netamente arcillosas con cementante calcáreo llegando a constituir una barrera impermeable
	Tpb, Tomv	Debido a su constitución litológica
	Ksm	Por su alto contenido de material arcilloso

Tabla II.2 Unidades Hidrogeológicas

II.4.2 Flujo Subterráneo

La compleja geología del área torna sumamente complicada la definición del flujo subterráneo, principalmente por la presencia de fallas que controlan este flujo, los patrones principales de flujo en base al sistema principal de fallas de dirección aproximada norte-sur, se refleja en los cauces de los ríos Tula y Actopan.

Estas condiciones definen dos unidades de flujo subterráneo semi independiente. Uno de ellos fluye de sur a norte en el sistema del Salado y Valle de Tula en la parte occidental del área de estudio; el segundo flujo se ubica en la parte oriental, fluyendo de este a norte en el Valle de Actopan.

Estos sistemas de agua subterránea pueden probablemente mantenerse por una limitada recarga de agua subterránea desde las montañas al sur del Valle del Mezquital. Esto podría originarse por la infiltración de la precipitación o por el influjo de la superficie del suelo.

Niveles locales base, y controles de descarga de agua subterránea pudieron relacionarse con el valle del río Tula (el cual se enclava en el Valle y el Río Actopan). Por lo tanto los niveles de agua subterránea debieron ser relativamente profundos > 50 m sobre la mayor parte del valle y existiría un uso limitado de pozos someros para el suplemento de agua

potable. Desafortunadamente no existen registros de niveles de agua suficientemente amplios para confirmar esto. El enclave del río Tula es un indicador de la naturaleza profunda del nivel del agua subterránea.

La ampliación y prolongada irrigación con aguas negras a través de la última década, ha modificado completamente la recarga de agua subterránea y el régimen de flujo creando un acuífero somero.

Con el incremento gradual de la importación de aguas negras durante este periodo, la extención de la irrigación para cultivo, la infiltración del exceso de irrigación aplicada a los campos y del retorno de esta agua de irrigación, ahora domina el régimen de flujo de agua subterránea regional. El agua subterránea de recarga es derivada en gran medida de la infiltración de estas fuentes (CNA y BGS 1998).

Una consecuencia de este ascenso de los niveles es el surgimiento de manantiales, la mayoría en el Valle del río Tula, por ejemplo El Ojito al sur de Progreso de Obregón, el cual es usado para propósitos recreativos, otro es el de Cerro Colorado al este de Tlahuelilpan para uso potable con un caudal aproximado de 600 l/s. Niveles de agua subterránea han llegado muy cerca del nivel del terreno creando zonas vadosas; tales como las de San Salvador, en donde la evaporación directa ha aumentado la salinidad de acuíferos someros.

La extención y profundidad de acuíferos someros afectados por salinidad es desconocida debido a la carencia de puntos de muestreo.

Comparando datos de 1991, con aquellos de 1982, existe evidencia de un ascenso local de niveles en la vecindad de Mixquiahuala y Progreso de Obregón, a partir del desplazamiento hacia el norte de las curvas de 1950 y 1970 m. Siendo menor este ascenso, para el mismo periodo, en el Valle de Actopan.

Los datos sugieren que los dos flujos separados de agua subterránea asociados con la dirección del drenado de los ríos Tula y Actopan se han mantenido menos constantes a través del periodo de irrigación a nuestros días. Así en el área entre estos dos ríos, en torno al poblado de Tepatepec, el gradiente hidráulico es muy bajo y puede representar una división de agua subterránea con el flujo del noroeste hacia el río Tula y del este hacia el valle de Actopan.

La relativamente restringida área de niveles bajos de agua subterránea en torno a Tepatepec, puede representar un cono de abatimiento local asociado con la extracción de agua subterránea cercana al pueblo. La construcción gradual de cuerpos de agua subterránea someros parecen no haber modificado la hidrogeología tanto como para establecer un flujo único con una dirección dominante en el área de estudio, pero el sistema de distribución de canales y el drenaje en esta área es de oeste a este, cruzando entre los receptores de los ríos Tula al oeste y Actopan al este.

Evidencias del control estructural.

La dirección de flujo principal es SW-NE en el centro del valle, la discontinuidad que reporta CNA y BGS (1995) en diferentes configuraciones desde 1970, en el gradiente hidráulico en el área de Tlahuelilpan puede ser causada por un accidente geológico, posiblemente una falla de tipo normal (CFE, 1985).

La presencia de travertino reportado en algunas de las muestras tomadas en la base de diversas elevaciones montañosas aledañas al río Tula (C. Cruz, Pueblo Nuevo), conlleva a dos importantes conclusiones; la primera de carácter tectónico, relacionada con la falla inferida que originó el cauce del río Tula y a través de la cual, emerge por diferentes fuentes el agua subterránea, y la segunda asociada a un ambiente calcáreo somero para dar lugar a la precipitación del travertino.

La presencia de capas locales de travertino en el valle, en la zona de Atitalaquia y el Llano, se relaciona a diversas fallas secundarias ocurridas sobre la Formación Tarango.

Su origen se relaciona también con manantiales termominerales, ya que en estas aguas la pérdida de los gases disueltos, el paso de un medio conductor a un medio oxidante y un enfriamiento, son causas que alteran el ambiente químico de un agua mineral que surge a la superficie del terreno, esto da lugar a la precipitación de carbonato de calcio en forma de depósitos sólidos, como el travertino.

La existencia de nódulos o capas delgadas de caliche mezcladas en forma heterogénea entre capas superficiales o bien a profundidad en relación con alguna falla o fractura ocurrida dentro de esta formación indica también este control estructural.

Algunas capas de este material presentan mineralización de pirolusita ($Mn\ O_2$) que es un mineral típico de ambiente lacustre de circulación restringida, pero sumamente oxidante. Esto confirma el hecho de considerar el valle como una cuenca que durante el Pleistoceno estuvo ocupada totalmente por aguas lacustres, ésta cuenca está delimitada por secuencias volcánicas de diferente edad y composición.

Grandes cantidades de caliche ($Ca\ CO_3$) se formaron sobre diversas capas de la Formación Tarango; este material resulta de los efectos combinados de evaporación y cambio en la presión parcial del dióxido de carbono.

Característicamente las estructuras pisolíticas que forma el carbonato de calcio en un estado temprano son truncadas sobre su superficie superior presentando un crecimiento acrecional en su superficie inferior, esto como resultado de la precipitación proveniente de la percolación descendente de aguas vadosas.

Fries (1962) señaló que la presencia de calizas cretácicas en superficie en el valle de Actopan favorece la existencia a profundidad de estructuras que contengan agua confinada. Del Arenal (1985) menciona que las grandes diferencias entre los niveles de agua de pozos relativamente cercanos, pero de diferente origen, sólo se puede explicar por la presencia de fallas de tipo normal.

II.5 Suelos

En la zona impera el clima semiseco templado y semicálido, pero también está presente de manera importante el templado.

Predomina como suelo primario el tipo redzina que son suelos que se caracterizan por tener una capa superficial rica en humus y muy fértil, que descansa sobre roca caliza o sobre un material rico en cal. En las partes planas como en la zona de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan, Tetepango, Mixquiahuala, y Tula de Allende predomina el vertisol pélico como suelo primario y el feozem calcárico como secundario, limitados por tepetate. Estos suelos negros tienen una textura arcillosa, fase dúrica, son de fertilidad moderada, por lo que son altamente productivos y están dedicados a labores agrícolas de temporal y a actividades pecuarias, sin embargo en época de sequías estos suelos son duros, masivos y lodosos .

En los llanos de Actopan, que son amplias áreas de terrenos planos con piso rocoso asociados a lomeríos, los suelos son también del tipo feozem, con gran aportación de carbonatos, lo que los hace pertenecer a los denominados calcáricos, sobreyacen a material endurecido por la cementación del carbonato de calcio que se conoce como caliche, fase petrocálcica.

Prácticas Agrícolas

El Valle de Mezquital presenta uso de suelo como agricultura de riego (AR). La zona de estudio ocupa 320 km^2 para cultivo. Los cultivos principales son el maíz, la alfalfa, la cebada, el frijol, el tomate, los vegetales, los chiles, la calabaza y la avena. En el último periodo la alfalfa y el maíz se han incrementado, mientras que la producción de avena ha declinado, particularmente desde 1981.

Ultimamente se introdujeron los criaderos de peces, esto para explotar las nuevas fuentes de agua superficiales como es el caso de Mangas.

Agricultura de Riego

En los alrededores de los poblados de Tula, Tezontepec de Aldama, Mixquiahuala de Juárez y Progreso se siembra sobre terrenos casi planos, en suelos profundos y fértiles, se riega con agua de las presas Endho y Requena.

La técnica de riego utilizada es por gravedad, empleando el método de melgas, sobre todo en el cutivo de alfalfa, implementando también el método de surcos.

Otra variante de este tipo de agricultura es el utilizar también agua de pozos, como en las zonas de Atotonilco, y Cerro Xicuco, predominando cultivos de avena y hortalizas.

Calidad del Suelo

Los suelos en el área son una mezcla de arcillas de textura y tipo margoza y son por lo general ligeramente alcalinos pH de 6.8 a 8.6, con una capacidad de intercambio catiónico (CIC) de media a alta (200 a > 400 meq/kg). El alto CIC permite un intercambio iónico importante, siendo la evidencia de esto el carácter del suelo, el cual

cambia ligeramente de ser muy rico en calcio a ser muy rico en sodio, dado que el alto contenido de sodio de las aguas negras desplaza los iones de calcio de la matríz.

Mediciones del contenido de metales en suelo en sitios con un alto rango de historia de irrigación de 4 a 80 años de reuso de aguas negras, muestra un claro incremento en el contenido de metales pesados (Tabla II.3).

Sin embargo y a pesar del largo periodo de aplicación de aguas negras el contenido de metales pesados está dentro de la tolerancia propuesta por otros países.
Las proporciones no alcanzan aun valores críticos (Tabla II.3).

Metal	Concentración en suelo mg/kg	Concentración en suelo mg/kg	Factor prom. de incremento
	Precipitación	Irrigación aguas negras	
Cd	0.13-0.20	1.14-1.65	8.6
Pb	5.8-12.8	27.8-52.5	4.2
Cu	4.0-13.2	27-49	4.7
Zn	29.5-54.5	116.5-179	3.8

Tabla II.3 Incremento de metales pesados en suelo por el uso de aguas negras *extraído de BGS-CNA (1995)

Los estudios de campo muestran que la mayoría de la carga de metales pesados que es retenida por el suelo es contenida en los primeros 30 cm del perfil del suelo. Solo en raros casos se detecta un enriquecimiento a mayor profundidad en el perfil y aun cercano a la capa de irrigación en campo.

El carbón orgánico, nitrógeno y contenido de fósforo del suelo muestra un incremento significante asociado con el uso de aguas negras para irrigación .

Significativamente sin embargo la acumulación de nitrógeno en el suelo después de un siglo de irrigación con aguas negras, se mantiene muy por debajo del aporte anual acumulado incorporado en el suelo por medio de fertilizantes, esto sugiere que importantes pérdidas de N ocurren a través de plantas o por denitrificación o lixiviación (BGS-CNA 1995).

Capacidad de Intercambio Catiónico

Los suelos implican una serie de procesos y emplazamiento de materia mineral producida por descomposición química y desintegración física de la capa rocosa. La fracción mineral del suelo consiste en dos fracciones principales. Primero los minerales fragmentados del tamaño de arenas y limos que no juegan un papel importante en el desarrollo del suelo a pesar de constituir la mayor parte de este; la segunda clase consiste de minerales arcillosos asociados con óxidos e hidroxidos formados por alteración química de minerales silicatados. Los minerales arcillosos son particularmente importantes por su capacidad de intercambiar los cationes adsorbidos en su capa superficial, al hacer circular a través de su masa agua con sales en disolución. Los cationes intercambiables más usuales son: Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, H^+, Al^{3+} y NH_4^+. Los cationes H^+ y Al^{3+} son cationes generadores de un suelo ácido, mientras que los cationes

Na^+,K^+, Mg^{2+},Ca^{2+}, generan un suelo alcalino, y el balance entre estas dos clases de cationes determina el pH del suelo.

La capacidad de intercambio aumenta con el grado de acidez del suelo, es decir es mayor si el pH del suelo es menor, la actividad catiónica es notable para valores de pH menores de 7. Un alto valor CIC es un indicador general de un alto grado de actividad química, mientras un bajo valor de CIC indica un bajo grado de actividad química. La capacidad de intercambio también crece con la velocidad y concentración de la solución que circule a través del perfil del suelo.

La materia orgánica conocida como humus presenta un alto valor de CIC .

Infiltración

Cuando el agua se acumula artificialmente en la superficie, la penetración inicial en el suelo es muy alta y desciende muy rápidamente a una tasa constante llamada constante de infiltración final, que se encuentra estrechamente relacionada con la conductividad saturada del suelo. Si la intensidad de la precipitación excede a esta capacidad de infiltración, entonces la acumulación de agua en la superficie produce un exceso y a la larga un flujo superficial. Durante este proceso, con excepción de unos cuantos milímetros superficiales, el suelo permanece sin saturarse y por lo tanto con un potencial hidráulico negativo, ocurre un frente de humedecimiento claramente definido. La migración de la precipitación pluvial es suficientemente alta para exceder la infiltrabilidad final pero por lo general las intensidades de esta magnitud son raras, con la probable excepción de los ambientes semiáridos.

Un modelo de infiltración simple, surge cuando las condiciones de las intensidades de precipitación pluvial exceden generalmente la capacidad de infiltración, las precipitaciones son poco frecuentes y ocurren grandes volúmenes de almacenamiento.

Un modelo que supone el comportamiento en el sitio es el que toda la precipitación se infiltra hasta completar la capacidad de almacenamiento y cualquier precipitación o irrigación subsecuente produce un flujo superficial. Sin embargo en ambos casos existe la necesidad de considerar la estructura de los macroporos del suelo, ya que un suelo de arcilla macroporosa tiene permeabilidades comparables a los suelos de grava, además la fisura estructural en un subsuelo arcilloso aumenta la conductividad hidráulica vertical en uno a tres órdenes de magnitud. Ahora bien si las presiones del aire del suelo son mayores que las atmosféricas pueden evitar que los macroporos dominen el proceso de infiltración.

Es importante subrayar que la cubierta orgánica de la superficie y su tratamiento, que en el caso que nos ocupa varía de 30 cm a 1 m de espesor, controlan en gran medida la infiltración y la producción de las cantidades excesivas de agua.

Cuando se presentan grandes grietas estructurales como en el caso de contactos interpélales, hay movimientos descendentes rápidos de agua a través de los poros verticales grandes inicialmente llenos de agua.

III. Muestreo y Análisis

Uno de los objetivos de este trabajo es la determinación de nitratos en el agua subterránea del valle y su evolución a través del tiempo, por lo que se planeó un muestreo que incluiría pozos, piezómetros y manantiales, para así poder contar con un control de agua proveniente de los diferentes acuíferos que constituyen el valle (Tabla III.1, Figura III.1).

III.1 Muestreo de Agua Subterránea

Se efectuaron tres campañas de muestreo la primera en época de estiaje en 1998, la segunda 4 meses después y la tercera un año después en 1999.

El primer muestreo se realizó en febrero de 1998 en 14 puntos, entre pozos y piezómetros cuyas profundidades fluctúan entre 5.39 m y 205 m; el objetivo de este primer muestreo era determinar la evolución de la contaminación en el valle.

El segundo muestreo se realizó en junio de 1998; el objetivo de este segundo muestreo fue llevar a cabo un control a profundidad, por lo que sólo se muestrearon los piezómetros y multipiezómetros con profundidades conocidas. Se determinaron NO_3^-, SO_4^{2+}, HCO_3^-, Fe además de los parámetros de campo como alcalinidad, pH, Eh, temperatura y conductividad.

El tercer muestreo se efectuó en abril de 1999; este muestreo se programó principalmente para efectuar toma de muestras de suelo, considerando además el monitoreo de los piezómetros con mayor control en cuanto a su profundidad
La Figura III.1 muestra la ubicación de los sitios de muestreo.

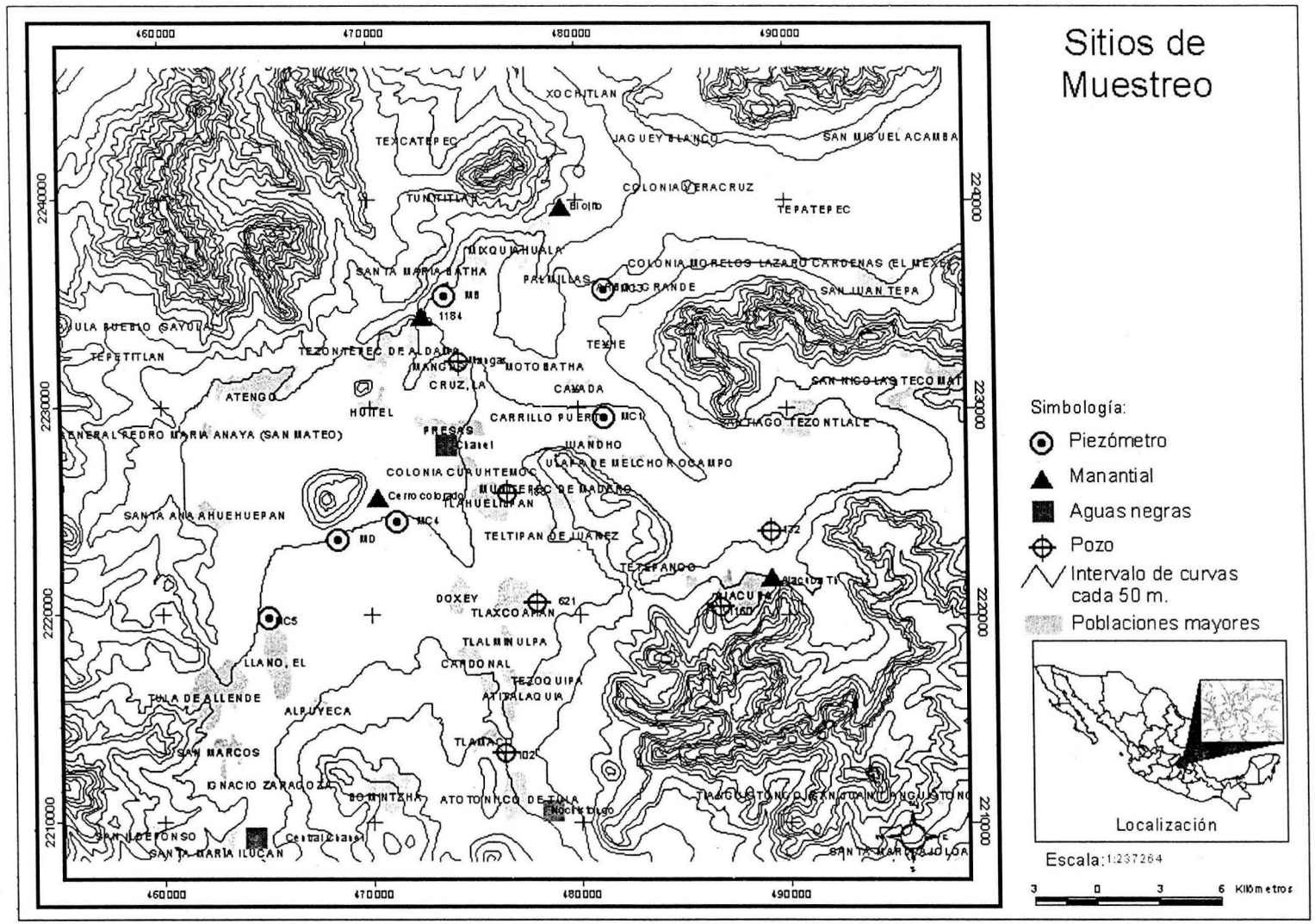


Figura III.1 Sitios de muestreo.

Método de muestreo
Se tomaron 3 muestras por sitio:

1. 1l para aniones
2. 500 ml metales (se adicionaron con HNO_3)
3. 125 ml para nitratos y nitritos

Las botellas debían estar perfectamente limpias y enjuagadas con HCl y agua destilada.

Las botellas para medir fierro se adicionan con 5ml de HNO_3/l, para evitar la precipitación de ion férrico

Las muestras para determinar nitratos se deben adicionar con 0.8 ml de H_2SO_4 /l, refrigerarlas y analizarlas en un corta tiempo.

Antes de muestrear se retira el agua contenida en la parte superior, se toma la muestra en un frasco preparado previamente y se debe conservar hasta su análisis no más de 2 días, a 4 °C.

Cada botella se etiquetó con su número de muestra correspondiente y el tipo de análisis a efectuar.

Las muestras se conservaban en hielo y ya en el laboratorio en refrigeración hasta su análisis

Fuente	Clave	Profundidad	pH	Observaciones
Pz. Ajacuba	111 o 112	>100 m	6.38	Surte 3 poblados
Pz. Tlaxcoapan	621		6.31	Siembra de Alfalfa
Piez. Requena	MC1	10.31	6.48	Canal aguas negras
Piez.El Tinaco	MB	14	6.52	Terreno c/siembra
Piez. Endho	MC3-C2	4.78	6.8	Siembra maíz, canal a.n.
"	MC3-C1	5.39		
Tezontepec	1184	Brotante	6.6	En roca volcánica
Pz. Mangas		Brotante	6.64	En roca volcánica
Piz.Tlahue	MC4-C1	11	6.78	canal aguas negras
	MC4-C2	11.3	6.84	
Piez. Hacda.	MC5-C1	24	6.3	con siembra de alfalfa
	MC5-C2	18	6.6	
	MC5-C3	11	6.23	
Pz. Atitalaquia	HGO1099	205	6.67	Abastece 3 poblados
Pz.Atotonilco	102	120	6.5	Márgenes pie de monte
Pz. Tlahue	788		6.76	se tomo de la llave
Man. C.Col.	1156	Brotante	6.75	
Piez. C.Col.	MD1	25.5	6.8	
"	MD3	7.5	6.63	Hay plantíos

Tabla III.1 Puntos de muestreo

Al tomar la muestra se median algunos parámetros en campo como; alcalinidad pH, Eh, Oxígeno disuelto, temperatura y Conductividad.

Significado de las mediciones de campo
Alcalinidad:

Este valor se debe medir en campo para evitar el error ocasionado por la disolución de los gases, la precipitación de $CaCO_3$ y la oxidación de metales en las muestras de agua durante el almacenamiento, este valor es más cercano a la realidad que aquel medido en laboratorio (Armienta, et al. 1987).

La alcalinidad se determina en el sitio de muestreo por medio del método de titulación de la muestra con un ácido mineral fuerte. Este permite por medio de la adición del ácido, que los carbonatos pasen a bicarbonatos y posteriormente a ácido carbónico indicando por medio de indicadores colorimétricos los puntos de equivalencia.

pH
Este parámetro debe medirse en campo para evitar las alteraciones que por pérdida o ganancia de gases disueltos podría presentar la muestra posteriormente. Para ello se emplea un aparato de medición cuyo electrodo se introduce en una celda de flujo continuo para minimizar el intercambio de gas CO_2 con la atmósfera, ya que esto podría provocar que este gas escapara y se incrementara el pH (Freeze y Cherry, 1979).

Eh:
Teóricamente el Eh determina la distribución de todas las reacciones de equilibrio en una forma similar a la que el pH expresa la distribución de todo equilibrio ácido-base. En contraste al pH, desafortunadamente el Eh no puede ser medido en forma no ambigua en la mayoría de las aguas naturales.

La medición del Eh se efectúa con un electrodo de redox (Pt) contra un electrodo de referencia de potencial conocido. Los potenciales medidos son corregidos de acuerdo a esta ecuación:

$$Eh = E_{medido} - E_{ref}$$

Generalmente las aguas de ambiente oxidante tienen un Eh mayor a aquellos de ambientes reducidos (Drever, 1982).

Oxígeno disuelto
La interacción de temperatura con el control de oxígeno disuelto, puede ser muy compleja, debido al efecto de la temperatura sobre la solubilidad de éste. Su consumo y difusión al disminuir la temperatura puede aumentar la solubilidad del oxígeno y disminuir su consumo (Canter, op cit.).

La unidad de lectura común es miligramos por litro o porcentaje de saturación (aunque este último depende de la presión parcial y de la temperatura). La atmósfera tiene una presión (P_{O_2}) de 0.2 atm. Usando la ley de Henry es fácil calcular para el agua en contacto con la atmósfera un contenido de oxígeno disuelto 8.26 mg/l (0.26mmol) a 25 °C .

El agua saturada de aire con oxígeno disuelto es continuamente infiltrada a través de suelos en los acuíferos y el oxígeno disuelto es un importante oxidante en sistemas acuíferos.

La reducción del oxígeno disuelto se inicia en suelos y se completa en la cima de la zona saturada; parece ser que cuando el nivel freático está cercano a la superficie, el transporte descendente del carbón orgánico disuelto (COD) puede consumir el oxígeno del acuífero. Un consumo similar de oxígeno en zonas de irrigación con aguas negras ha sido reportado.

Temperatura

Este parámetro está íntimamente relacionado con todas las reacciones geoquímicas que ocurren en el agua subterránea. Se emplea para su medición un termómetro digital de alta precisión, verificándolo con los termómetros de otros aparatos de campo.

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de una solución es la capacidad de la misma para transportar la corriente eléctrica. Debido a que los iones son los responsables de conducir la corriente eléctrica a través de una muestra de agua, la conductividad se relaciona con la concentración iónica total. La conductividad eléctrica es proporcional a la cantidad total de iones disueltos presentes en el agua, por lo que este parámetro puede ser usado para dar una idea de los sólidos totales disueltos en una muestra de agua (BGS y CNA, 1998). Para medir este parámetro se emplea un conductivímetro en donde la unidad de medición es microssiemen por centímetro (μS/cm) equivalente a micromhos por centímetro (μmhos/cm).

Parámetro	Equipo
Alcalinidad	Equipo de campo, para medir alcalinidad a la fenoftaleina y alcalinidad total.
pH	Medidor de pH
Eh	Electrodo de platino combinado
Oxígeno disuelto	Medidor de campo,Y51-Modelo 51B, considera un factor de corrección al nivel de altura
Temperatura	Termómetro
Conductividad	Conductivímetro

Tabla III.2 Parámetros medidos en campo

Análisis

Se tomaron seis muestras, para determinaciones en laboratorio de NO_3^-, Fe, NH_4^+, SO_4^{2-} y HCO_3^-.

Los análisis se realizaron en el laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica. La determinación de nitratos y nitritos se efectuó por cromatografía de iones, la de sulfatos fue por el método turbidimétrico, cloruros por electrodo selectivo y alcalinidad por titulación ácido-base.

Método empleado para la determinación de nitratos:

Aunque existen varios métodos convencionales para determinar aniones individuales como los colorimétricos, electrométricos o de titulación, sólo la cromatografía de iones cuenta con una técnica instrumental simple que puede ser usada para mediciones rápidas y secuenciales. Este método elimina la necesidad de usar reactivos peligrosos.

Este método es aplicable después de la filtración de agua superficial, subterránea y de desecho así como de agua potable para remover partículas mayores a 0.2 μm.

Principio: Una muestra de agua se inyecta en una corriente de eluente de carbonato-bicarbonato pasando a través de una serie de intercambiadores de ion. Los aniones de interés son separados sobre las bases de sus afinidades relativas por aniones intercambiables fuertemente básicos de baja capacidad.

Los aniones separados son dirigidos a través de un catión de membrana de fibra intercambiable o micromembrana supresora chocando con un flujo de solución fuertemente ácida.

Con el supresor, los aniones separados son convertidos a sus formas ácidas de mayor conductividad, y el eluente carbonato-bicarbonato es convertido a ácido carbónico de débil conductividad.

Interferencias: Cualquier sustancia que tenga un tiempo de retención coincidente con el de cualquier anión a ser determinado, en este caso el NO_3^-, interferirá al producir una respuesta del detector. Una alta concentración de cualquier ion, también interfiere con la resolución y algunas veces en la retención de otros iones.

La dilución de la muestra o gradiente de elusión da lugar a muchas interferencias.

Concentración mínima detectable: Esta concentración está en función del tamaño de la muestra y de la escala de conductividad empleada, por lo general es de 0.1 mg/l.

Tipo de agua	St	So	Error (%)
Potable	0.08-0.70	0.03-0.48	0- +9.5
Residual	0.42-14.0	0.06-0.51	-28.6-+0.4

Tabla III.3 Precisión y Error

III.2 Muestras de suelo

El suelo del valle, debido a la aplicación de aguas negras, se ha visto afectado en sus características principales como pH, salinidad y CIC; sin embargo a pesar del largo periodo de aplicación de éstas, el contenido de metales pesados está dentro de la tolerancia propuesta por otros países, ya que las proporciones no alcanzan aun valores críticos (Siebe y Cifuentes 1995).

El carbón orgánico, nitrógeno y contenido de fósforo del suelo muestra un incremento significante asociado con el uso de aguas negras para irrigación.

Sin embargo la acumulación de nitrógeno en el suelo después de 80 años de irrigación con aguas negras, se mantiene muy por debajo del aporte anual acumulado incorporado en el suelo por medio de fertilizantes, esto sugiere que importantes pérdidas de N ocurren a través de plantas o por denitrificación o lixiviación (CNA, op.cit)

Objetivo del Muestreo de suelo

El objetivo principal del muestreo de suelo es el conocer las características generales de este como pH, contenido de M.O., humedad, granulometría, textura, y CIC, para determinar si existe alguna relación entre el tipo de suelo con la presencia o ausencia de nitratos en el agua subterránea.

III.3 Técnica de Muestreo

Se tomaron muestras únicamente de la parte superior del suelo, ya que es en los primeros centímetros en donde se llevan a cabo las reacciones suelo-agua que definen las características de esta última.

Se empleó una perforadora manual (Cobra) cuya capacidad de penetración es de hasta 3 m. Se muestrearon tres sitios, MC5, MD y MC4, los dos primeros sitios presentan contenido de nitratos en el agua subterránea y el tercero no reporta NO_3^- actualmente.

El núcleo que se recupera se puede describir en campo en forma inalterada.

No. de Muestra	Prof. de la muestra Cm	Descripción
MC5-1	10-40	Oscuro, limo arenoso c/fragmentos de roca, alto contenido de M.O.
MC5-2	40-48	Arenoso c/ fragmentos de roca
MC5-3	0.48-0.60	Arena c/ fragmentos de caliche
MC4-5	0—40	Limoso alto contenido de humedad
MC4-4	40-75	Materia oscuro, arenoso, c/ un horizonte de arcilla roja
MC4-3	75-103	Limoso alto contenido de humedad, c/ fragmentos de roca
MC4-2	103-125	Arena c/ fragmentos de roca
MC4-1	125-185	Arena
MD5	0-52	
MD4	52—59	Alto contenido de M.O., plástico
MD3	0.59-0.79	Turbado, arenoso
MD2	0.79-1.89	Más húmedo
MD1	1.89-1.96	Arenoso

Tabla III.4 Muestras de suelo

En general en el centro del valle el suelo presenta una capa superior de aproximadamente 40 cm con alto contenido de materia orgánica y humedad, y principalmente limoso.

Materia Orgánica:
Los análisis para materia orgánica se basan en la determinación de carbono orgánico total, a través de la oxidación húmeda del carbón orgánico con dicromato de potasio según la siguiente reacción:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 6CO_2 + 6e^-$$
$$Cr_2O_7^{2-} + 6e^- + 7H_2O \rightarrow 2Cr^{3+} + 14OH^-$$

La determinación fotométrica de la extinción de los iones de Cr^{3+}, proporcionó el contenido de carbón orgánico a través de una curva patrón elaborada con glucosa.

Al graficar la curva patrón (mg/100 ml contra absorbancia) se leen las concentraciones equivalentes de los problemas.

Mg de C/g de suelo=(mg de c/100ml)/peso de la muestra en g
% de Corg.= (mg de C/g de suelo)/10
% de M.O.= % de Corg. *1.724

El factor de 1.724 resulta de que en promedio la materia orgánica contiene 58% de carbón orgánico.

Capacidad de Intercambio Catiónico:
Este método se realiza por medio de un espectrofotómetro de absorción atómica para las determinaciones de Ca y Mg haciendo diluciones 1:10 con el dilutor automático, con una solución de cloruro de lantano al 0.5% (es decir 50 ml de $LaCl_2$ llevados a 500 ml con agua destilada) y las de K y Na se hacen con una solución de $CsCl_2$ utilizando flamometría.

Granulometría:
Esta clasificación se efectuó por medio de tamices, pesando la muestra húmeda y secando posteriormente para tomar el peso seco y así obtener el contenido de humedad de cada muestra.

La media del contenido de humedad es de 31.49% (Tabla III.5), lo que representa un alto contenido de humedad superficial, esto se relaciona con la capacidad de infiltración en los primeros centímetros del suelo.

								peso muestra (g)	
No. de muestra	Profundidad (cm)	peso húmedo	peso inicial	Wm	Peso final	Ws	Ww	w(%)	yesp(g/cm3)
MC4-1	125-185	30.8	86.69	30.71	79.2	23.22	7.49	32.25667528	11.05714286
MC4-2	103-125	181.06	245.81	181.65	207.26	143.1	38.55	26.93920335	10.22142857
MC4-3	75-103	202.17	276.18	200.88	228.1	152.8	48.08	31.46596859	12.224
MC4-4	40-75	166.61	230.8	165.64	191.13	125.97	39.67	31.49162499	8.997857143
MC4-5	0-40	158.72	233.28	158.6	195.11	120.43	38.17	31.69476044	8.602142857
MD-1	189-196	155.79	218.42	154.92	180.77	117.27	37.65	32.1053978	7.818
MD-2	79-189	227.96	292.71	209.29	236.29	152.87	56.42	36.90717603	10.91928571
MD-3	59-79	19.37	66.24	18.42	61.13	13.31	5.11	38.39218633	6.655
MD-4	52-59	32.67	88.54	32.47	79.74	23.67	8.8	37.17786227	7.89
MD-5	0-52	52.3	181.14	128.38	145.08	92.32	36.06	39.05979203	9.232
MC	0-59	186.88	254.07	184.2	214.42	144.55	39.65	27.42995503	10.325
MC5-1	10 - 40 cm	126.56	212.63	126.44	185.63	99.44	27	27.15205149	7.102857143
MC5-2	40-48	207.03	296.97	206.79	276.84	186.66	20.13	10.78431373	10.66628571
MC5-3	48 - 60 cm	155.21	248.28	154.15	216.5	122.37	31.78	25.97041759	8.158

Tabla III.5 Datos de Laboratorio de Mecánica de Suelos

IV Modelación del Sistema

IV.1 Modelo Hidrogeológico Conceptual

La principal fuente de aguas subterráneas en el estado se ubica en los acuíferos del valle del Mezquital, cuya recarga se incrementó notablemente al iniciarse el riego con agua superficial. Puesto que la explotación mediante pozos es todavía reducida, el acuífero descarga la mayor parte de su alimentación a través del cauce del río Tula y de numerosos manantiales entre los que destaca el de Cerro Colorado, fuente de abastecimiento de gran número de poblados.

Sin embargo desde hace algunos años (1980), la extracción de agua del subsuelo se ha incrementado con el establecimiento de una refinería y una planta termoeléctrica en el Valle de Tula.

Un aspecto importante del funcionamiento del sistema es el del río Tula, el cual además de fungir como fuente de descarga, puede representar también una importante fuente de recarga en función de la variación de los niveles piezométricos en el área.

Los flujos de lava constituyen el acuífero más importante en el distrito y la principal fuente de agua subterránea. Estas rocas tienen una permeabilidad moderada, principalmente asociada con su fracturamiento y fallamiento. Presentan un espesor variable y pueden estar interdigitadas con depósitos de menor permeabilidad. Esta unidad varía de confinada a semiconfinada.

Otra fuente importante de agua subterránea es el aluvión, el cual contiene desde lentes arcillosos hasta arenas finas. Esta formación aflora sobre gran parte del distrito con diverso espesor. A pesar de que las capas de arena tienen alta permeabilidad, esta formación se considera de baja transmisividad, debido al grueso espesor de arcillas y depósitos arcillosos que presenta. El acuífero es comúnmente no confinado en la superficie o cerca de la superficie, mientras que a profundidad es típicamente semiconfinado.
Los manantiales de Tezontepec y Cerro Colorado se ubican sobre rocas volcánicas del terciario, el primero surge justo en el entronque de la falla del río Tula con el lineamiento que viene desde Tetepango hasta Mangas, el manantial de Cerro Colorado que brota en rocas volcánicas (acuífero principal) se relaciona con la presencia de la falla de San Marcos-Huitel; este manantial surge, según versiones del lugar, a partir del incremento del uso de aguas negras. Esto se puede explicar con la idea de que al ascender los niveles del acuífero somero, la presión sobre el acuífero fracturado aunado a la disminución de la extracción de agua subterránea, dio lugar al surgimiento de este manantial. Al disminuir la extracción, el acuífero volcánico se recupera a la par de la saturación del medio poroso, lo que incrementa el flujo hacia los manantiales de C. Colorado, Tezontepec, y Mangas.

El área relativamente restringida en torno a Tepatepec, de niveles bajos de agua subterránea, con un comportamiento asociado a un cambio en la dirección de flujo puede representar un abatimiento local, el cual se dirige a través de las rocas volcánicas hacia el

noroeste, mientras que en Tetepango el nivel de agua subterránea de buena calidad disminuye.

Existe una discontinuidad en el área de Tlahuelilpan del gradiente hidráulico, lo que lleva a inferir la existencia de un accidente geológico como es una posible Falla normal (C.F.E. 1987).

La carga que entra por el borde sur representa una alimentación importante al acuífero, pero la calidad de ésta se deteriora por la infiltración del agua residual del Gran Canal.

IV.1.1 Parámetros Hidrogeológicos

Recarga

Esta se representa a través de la precipitación con un valor en el valle de 430 mm/año y de 550 mm/año en la sierra. Existen sistemas de drenes o canales construidos principalmente para colectar el exceso de agua de irrigación, la mayoría de estas aguas se colectan antes de alcanzar al agua subterránea, sin embargo la técnica de riego por lámina de inundación aporta una gran cantidad de agua de estos canales a la recarga. Estos canales se ubican en su mayoría en las tierras drenadas por el canal Requena y el canal Endho. Otros sistemas se ubican al este del río Salado, en el área de Tlahuelilpan y Tlaxcoapan.

La recarga inducida por riego se calculó en función de los volúmenes que descargan cada uno de los canales en la zona, considerando un índice de infiltración hasta del 15 % (CNA y BGS 1998).

Ubicación	Vol. Drenado (Mm^3/año)	Periodo de obs.
Tezontepec	133.2	1966 -1970
Tlamaco	205.63	1914 -1959
Requena	84.111	1934 -1939

Tabla IV.1 Volúmenes Drenados * INEGI 1992

Cálculo de la recarga:
Recarga por precipitación pluvial:
Area * I de inf. * precipitación
$27*36*10^6*0.15*0.430= 62.66*10^6\ m^3$

En el área existen 345 km de canales y considerando una lixiviación promedio de estos de 2.85 Mm^3/ a/ km (CNA y BGS, 1998), se obtiene una recarga de 983.25 Mm^3/año: Esta recarga es debida a la pérdida a través de canales. Considerando un área de tierras de riego de 340 Km^2 con un volumen de aguas negras de 1260 Mm^3/a y un aporte de aguas subterráneas de 163 Mm^3, se tiene un total de 1423 Mm^3 de aguas aportadas para recarga, al restar las pérdidas por infiltración de canales se tiene un total de 437.75 Mm^3 y con un índice de infiltración del 15%, se obtiene un volumen de infiltración en campo de 67.66 Mm^3/a y 62.66 Mm^3 por precipitación esto da un total de 1113.57 Mm^3 /a.

El río Tula drena un volumen de agua de 15000 lps es decir 0.253Mm^3/a con un índice de infiltración del 10% debido a un basamento con permeabilidad secundaria; esto representa un volumen de recarga a partir de este dren de 0.02 Mm^3/a. Sin embargo estudios previos reportan datos muy diversos para este parámetro.

Referencia	Año	Área (Km^2)	Recarga (Mm^3/a)
INEGI	1992	2000	236
BGS-CNA	1995	452	1227

Tabla IV.2 Recarga estimada en estudios previos.

Pozos

No existe un censo confiable que registre datos principalmente de: número de pozos, extracción, año de construcción, profundidad y caudal de extracción. Los pocos estudios existentes aclaran que el número de pozos censados dista mucho de ser el real.

Referencia	Año	No. de Pozos	Caudal de Extracción Mm^3/a	Q promedio Mm^3/a	Profundidad promedio (m)
INEGI	1992	3600	24.4	1.57	70
CNA	1991	>1000	162.75	3.15	250
Pozos de CFE	1979	14 pozos Bat.I	25	0.15	250
Pozos de CFE	1985	15 pozos Bat II	37.84	0.22	250
Pozos de PEMEX	1985	7	23.65	4.73	250

Tabla IV.3 Censos de Pozos

En cuanto a los datos de CFE y PEMEX, éstos no contienen un censo general de la zona. La extracción total de la zona es de 24 Mm^3/año en 1970 y de 163 Mm^3/año en 1995, considerando tanto pozos como manantiales (BGS y CNA,1995), lo cual se estima se ha incrementado hasta en un 50% en los últimos años.

Almacenamiento

INEGI (1992) reporta una capacidad de 140 Mm^3/a. Sin embargo un balance promedio en la zona daría un cambio de almacenamiento de:

Recarga-Descarga= Cambio de S

1113.17-163= 950.17 Mm^3

IV.2 Desarrollo de un modelo de simulación

Un modelo es una simplificación conceptual, por lo que es fundamental visualizar el modelo a analizar. Tomando en cuenta la guía presentada por Tanji (1982), para el desarrollo de un modelo, se elaboró el siguiente diagrama de flujo:

Figura IV.1 Diagrama de flujo

Este sencillo diagrama presenta los aspectos más importantes en el desarrollo de un modelo.

IV.3 Modelación Hidrogeológica

Al considerar la elaboración de un modelo de aguas subterráneas, es necesario modelar inicialmente al sistema de flujo para poder así simular el comportamiento del N en el sistema suelo-agua, (Tanji, 1982)

Ecuación de flujo

La ecuación diferencial parcial para un *flujo unidimensional no estacionario* en la zona de raíz (Nimah y Hanks, 1973) se puede expresar como :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K\theta \frac{\partial h}{\partial z}\right] \qquad \text{S (z,t)----------(IV.1)}$$

en donde:

$\frac{\partial \theta}{\partial t}$ representa la variación en el contenido volumétrico de agua en el tiempo

K conductividad hidráulica

z distancia vertical desde la superficie del suelo

h carga hidráulica (comprende la presión de carga h y la carga por gravedad z)
S es el término de pérdidas por la extracción de agua de la raíz
Esta ecuación representa la variación de flujo en función de la profundidad del suelo, cuya suma reporta el promedio del contenido de agua con respecto al tiempo.

Un modelo de tipo CSMP (Continuous System Modeling Program, programa especial desarrollado por IBM), (Beek y Frissel, 1973), define el flujo de agua como:

$$v = D\,(d\phi/dx) + K \text{----------} (IV.2)$$

En donde v es la velocidad de flujo.

En este modelo simplista el perfil del suelo se divide en diferentes placas de un espesor definido, por lo que la velocidad de flujo se calcula en los límites de dos placas adyacentes, mientras que la conductividad y difusión se calcula por celdas i, $i+1$.

Modelo Matemático de Transporte para la configuración del acuífero
El VMODFLOW 2.10, es un programa realizado por la Universidad de Waterloo, Can., como un modelo de flujo y transporte (Vmodflow, 1997)

Carácterísticas de los Modelos Hidrogeológicos del Nitrógeno
Para modelar el comportamiento del nitrógeno es menester referirse a las diferentes opciones viables:

Modelo Hidrogeológico → Describirá las características del sistema de flujo subterráneo, es decir; dirección de flujo, variaciones en el nivel estático, zonas de descarga y recarga y su interacción con el medio fracturado y poroso.

Modelo de transporte → Definirá el transporte del soluto, sin embargo no todas las especies del nitrógeno son móviles, y existen diversos procesos que alteran el transporte y su seguimiento.

Modelo hidrogeoquímico→ Simula las posibles reacciones físico químicas que ocurren en el medio acuífero, sin considerar la actividad microbiana, las actividad de bacterias, y el efecto de las raíces en los procesos.

Configuración del Sitio
Para modelar el área, comprendida por el plano de Valle del Mezquital de DETENAL, se empleó para su configuración el Surfer.

Para la configuración de las concentraciones de nitratos en el acuífero también se utilizó el SURFER.

Empleando este programa fue posible configurar la concentración de NO_3^- y cloruros, en campo de 1994, 1997 y 1998.

IV.3.1 Descripción del modelo

Para simular el flujo subterráneo en el Valle del Mezquital y resolver así la ecuación diferencial que describe éste, se desarrolló un modelo que requiere conocer la geometría tridimensional del medio hidrogeológico, identificar las propiedades hidráulicas de los materiales en donde se desarrolla el flujo subterráneo, especificar las condiciones de frontera de acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento requerido, así como las condiciones iniciales de flujo de agua subterránea y las cargas hidráulicas, además de analizar el flujo volumétrico del agua (es decir las extracciones por bombeo principalmente).

Distribución espacial:

El área de estudio con 945 km^2, abarca una malla de 36 columnas y 27 renglones de 1 km de ancho, comprende 3 capas que representan:

Capa 1: Material aluvial de relleno lacustre, con capas arcillosas, con un espesor promedio de 200 m; esta capa tiene la configuración topográfica del terreno en donde la parte más alta es la porción austral además de las zonas montañosas, la parte más baja es la salida del Río Tula y el borde oriental a la altura de Ajacuba.

Capa 2: Material de relleno, y roca volcánica del terciario de permeabilidad secundaria, con un espesor máximo en el centro del valle de 400 m.

Capa 3: Rocas calcáreas del cretácico. Se ubican dos sistemas de fallas y fracturas, el primer sistema está relacionado con la actividad tectónica del mesozoico (SW-NE, E-W), por lo que afectó a estas rocas, el segundo sistema está relacionado con la actividad del Eje Neovolcánico (SE-NW).

Se ubicaron las fallas con un material diferente, para distinguir su relación con el comportamiento hidrogeológico del sistema, se asume que estos lineamientos están rellenos con material arenoso y brechas de falla.

Distribución Temporal:

La primera configuración con que se cuenta es la de 1970 (BGS y CNA, 1995), con un seguimiento hasta 1987, es decir 17 años, dividido en los siguientes periodos.

1° 1970-1978
2° 1978-1984
3° 1984-1987

Parámetros del Modelo

Conductividad y almacenamiento: Se asoció una propiedad tipo a cada una de las formaciones geológicas que se presentan en la zona.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Propiedad	Kx (m/seg)	Ky(m/seg)	Kz(m/seg)	Ss	Sy	Capa	Unidad
1	7e-5	7e-5	1e-7	0.051	0.14	1	Qla
2	5e-6	5e-6	6e-7	0.0005	0.005	1,2,3	Tomv
3	0.00001	0.00001	1e-6	0.05	0.04	1,2,3	Kid
4	0.0002	0.0002	1e-8	0.07	0.1	1,2,3	Tpb
5	1e-4	1e-4	1e-5	0.002	0.1	1,2	Tpb(volc)
6	1.2e-4	1.2e-4	6e-5	0.0001	0.07	1	Tdg
7	0.005	0.005	0.0001	0.05	0.05	1,2,3	Ar

Tabla IV.4 Propiedades de las unidades

Pozos: Se agregaron aquellos que se podían ubicar en campo, sin embargo no todos contaban con la información necesaria, así que se consideró el volumen de extracción por área reportada en la Tabla IV. 5.

Área	Volumen total m^3/año
Tepeji del río	4070864
Tula de Allende	31650324
Atotonilco	2897380
Atitalaquia	904032
Tlaxcoapan	19294040
Tlahuelilpan	31882896
Tezontepec	19262971
Mixquiahuala	1316736
Progreso de Obregón	513216
Chicuahutla	286978
Tepatepec	2077200
Tetepango	44074
Ajacuba	2194906
Tepetitlán	673501
San Salvador	21835224
Santiago Anaya	1842776
Actopan	9537475
El Arenal	12448632
San A. Tlaxiaca	22813
Total	162756038

Tabla IV.5 Caudal de extracción promedio por áreas *BGS y CNA (1995)

Sólo algunos pozos indicaban las fechas de perforación, por lo que se optó por sumar por fecha el caudal considerado para cada periodo.

En cuanto a las profundidades del pozo, aquellos que no la reportaban se consideraban con la profundidad de la primera capa en el caso del valle y hasta la segunda en los flancos de este.

La extracción que se obtuvo en cada periodo fue de:

Periodo	Extracción Mm^3/año
1970-1977	30
1978-1984	114
1985-1987	152

Tabla IV.6 Volumen de extracción

Ríos: Se ubicó al río Tula con este tipo de frontera para definir si existe realmente una conexión hidráulica con el sistema.

Condiciones iniciales:
El flujo a partir de los patrones principales observados en la configuración de los niveles de 1970 (Figura IV.2), sigue los lineamientos de fracturamiento definidos; es decir NW-SE a la salida de los ríos Tula y Actopan, y sur del área, y SW-NE en el centro del Valle, por lo que se consideraron estas condiciones como las iniciales.

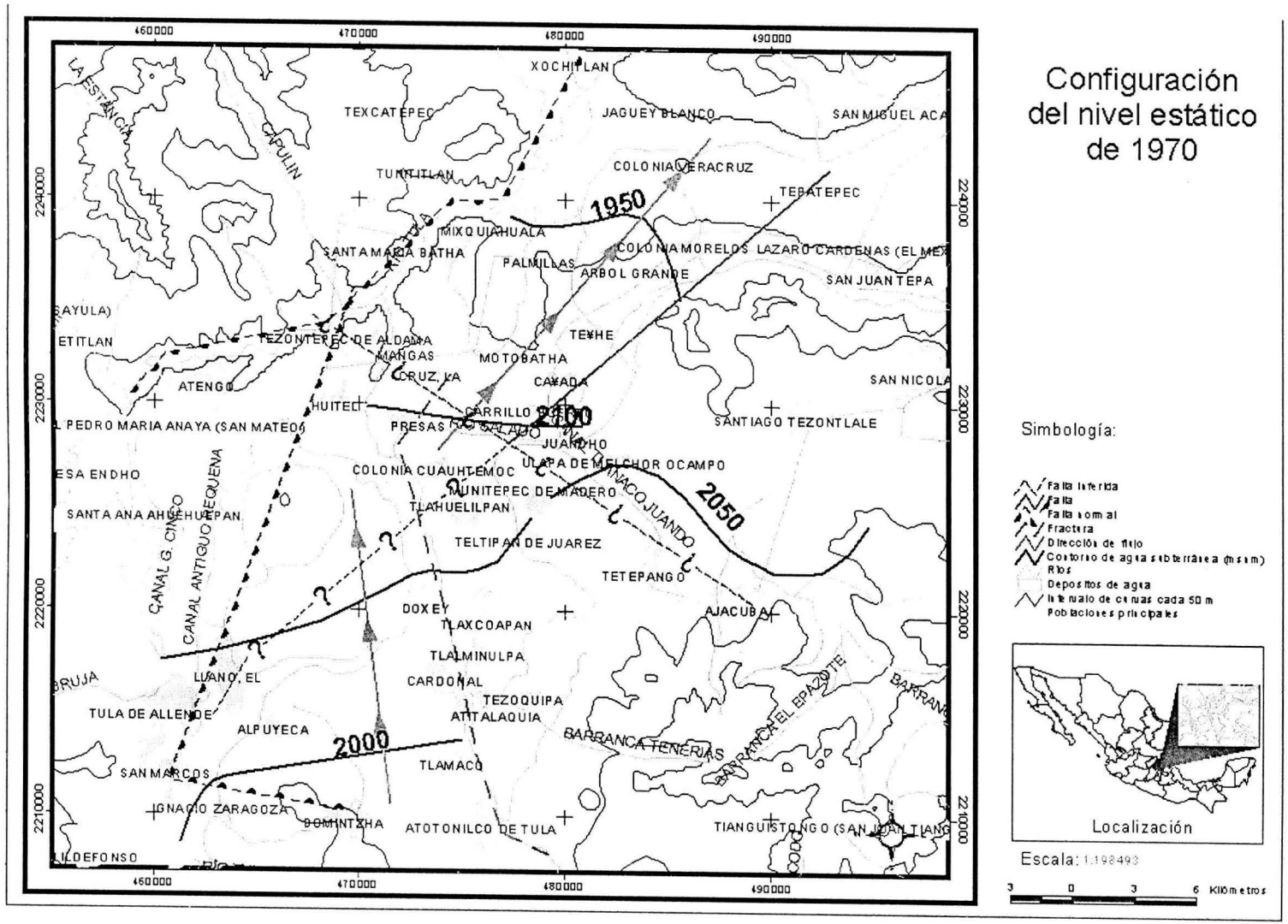


Figura III.2 Configuración del nivel estático 1970

Condiciones transitorias

Para el desarrollo del modelo inicialmente se tomaron las condiciones de 1970 para un flujo estacionario, la calibración en condiciones estacionarias se realizó utilizando la configuración presentada por CNA para 1982 (Figura IV.3).

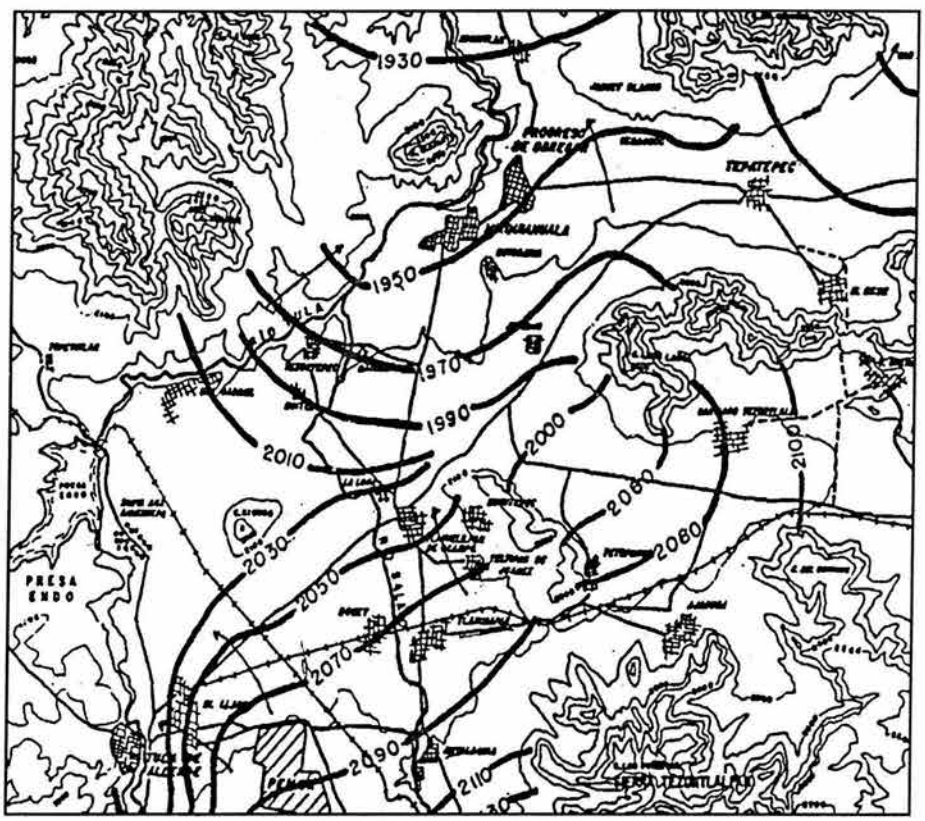


Figura IV.3 Configuración 1982 (BGS y CNA, 1998).

IV.3.2 Modelo de transporte

Para modelar el transporte de los nitratos es menester recalcar aspectos importantes de este: El transporte del N-amonio y NO_3^- en el ambiente subsuperficial ocurre por medio de la difusión con procesos abióticos tales como adsorción e intercambio iónico.

El transporte del N-amonio es proporcional al coeficiente de difusión y al gradiente de concentración por lo que su difusión en la capa anaerobia puede ser rápida a partir de la zona de mayor concentración hacia zonas de menor concentración.

El valor de difusión varía entre los diversos ambientes del suelo, no existen sin embargo datos de difusión para nitratos en la literatura, por lo que se considerarán los referentes a difusión del Cl^-, los cuales varían entre 9.9×10^{-6} a 6.1×10^{-5}.

Los valores de difusión para nitratos son típicamente mayores a aquellos de N-amonio, dado que el primero es un anión y no es adsorbido en el complejo intercambio subsuperficial.

El N-amoniacal puede no ser transportado a través de la zona no saturada ni en el agua subterránea debido principalmente a la adsorción.

Por estas razones se considerará únicamente la simulación del transporte de nitratos.

Objetivos
El objetivo de modelar el sistema de transporte en el acuífero es conocer el comportamiento de los contaminantes en el medio, como su fuente y destino.

Se considera para este modelo un acuífero superior semipermeable, además de la recarga a partir de las aguas negras.

Alimentación del modelo
Para alimentar esta simulación se determinó una concentración inicial de NO_3^- en 1970 de cero en el valle, y de 20 a 15 mg/l en las fuentes más antiguas, es decir el río Salado y el Gran Canal.

Se valoró además una concentración de recarga en las zonas de cultivo drenadas principalmente por estos canales y en donde la técnica de riego predominante es la lámina de inundación.

Se consideraron dos áreas de riego; aquella regada por las aguas de la presa Endho, en donde el aporte de aguas negras ha aumentado y aquellas provenientes del río Salado en donde el aporte ha disminuido.

Como pozos de observación, se emplearon los datos de los pozos de las dos baterías de CFE para 1984.

Periodo	Presa Endho	R. Salado
1970-1977	8 mg/l	20mg/l
1978-1984	14mg/l	10mg/l
1984-1987	17mg/l	7mg/l

Tabla IV.7 Concentración de NO_3 en las áreas de riego

IV.4 Modelación Hidrogeoquímica

La modelación del comportamiento hidrogeológico de una región involucra indudablemente los fenómenos físico químicos del sistema, y para conocer estas reacciones se emplea la modelación hidrogeoquímica.

Descripción del Modelo hidrogeoquímico empleado
El PHREEQE (Parkhurst et al., 1980) es un modelo que permite simular el comportamiento hidrogeoquímico de un acuífero, en base a la composición del agua subterránea, del medio físico o bien de la recarga que afecta al acuífero.

Se puede partir de una composición inicial para conocer la actividad, e índices de saturación de las diferentes especies.

Es posible hacer mezclas o agregar una sustancia diferente a la composición inicial, definiendo el tipo de reacciones redox que van a influir en la composición final y así simular lo más cercano posible el ambiente y sus reacciones.

El punto más importante de una modelación hidrogequímica es su interpretación.

Ya que en el archivo de salida no obtendremos un texto de conclusiones sino una serie de concentraciones, transformaciones, intercambios y fases presentes en el agua subterránea es necesario evaluar si estos resultados son coherentes con lo esperado realizando algunas transformaciones y determinaciones.

IV.4.1 Objetivos de la Modelación Hidrogeoquímica

Efectuar una simulación para conocer principalmente las reacciones que pueden ocurrir en el medio afectado por una importante recarga de aguas negras.

Las preguntas que se espera contestar al emplear la modelación hidrogeoquímica en el comportamiento de los nitratos serían:

- ⇒ ¿ Cuanto nitrato cabría esperar en el agua subterránea en función de los aportes?
- ⇒ ¿Sí no existe la concentración y evolución esperada qué procesos se estarían dando; difusión, dispersión o denitrificación?
- ⇒ ¿ Es posible modelar el comportamiento de los nitratos únicamente con un solo tipo de modelo, es decir solo el hidrogeoquímico o también con un modelo de flujo y transporte?
- ⇒ ¿Porqué en algunos sitios hay nitratos y en otros no?
- ⇒ ¿Porqué se tiene variación de NO_3 a profundidad?
- ⇒ El agua superficial no presenta NO_3, ¿de que proceso surgen?

Para el sitio de interés se determinó efectuar una simulación hidrodinámica para conocer principalmente las reacciones que pueden ocurrir en el medio afectado por una importante recarga de aguas negras. Como objetivos de esta modelación se enlistan los siguientes:

- ⇒ El objetivo principal es el corroborar el funcionamiento hidrogeológico inferido a partir de los análisis hidrogeoquímicos y geológicos del valle, así como conocer la relación existente entre los ríos Tula y Salado, y los canales de distribución de aguas negras con la recarga al acuífero y su calidad.
- ⇒ Determinar el grado de saturación de cada elemento.
- ⇒ Reconocer los cambios que ocurren en el sistema, en función del potencial de óxido/reducción.
- ⇒ Determinar con respecto a que minerales el agua subterránea en cada sitio se encuentra sobresaturada.

- ⇒ Determinar la estabilidad de los nitratos en función de las condiciones de pH-Eh
- ⇒ Definir si el nitrógeno está en forma amoniacal o de amonio.
- ⇒ Modelar el transporte de los nitratos considerando que estos sufren transformaciones mínimas en el agua subterránea.
- ⇒ Conocer la fuente de los compuestos del N y sus posibles procesos.
- ⇒ Determinar la retención del nitrato a diferentes valores de pH y en presencia de Cloruro, para lo cual debe tomarse en cuenta la factibilidad de los procesos con base a fundamentos químicos.

Cálculos para las determinaciones químicas en cada sitio:

a) Calidad de los análisis, para lo que se efectuó un balance de cargas.
b) Métodos de expresión en concentraciones

Concentración en masa: mg/l representa masa de soluto por volumen unitario de solución, y ppm representa peso de soluto en un peso determinado de solución y si la densidad de la solución es la unidad éstos son idénticos.

mg/l= masa de sustancia/ volumen de solución
ppm= Masa de sustancia/ masa de solución
densidad de solución (p)= masa de solución /volumen de solución

De tal manera que ppm y mg/l son equivalentes para una densidad de kg/l.

En estas expresiones el componente de la masa del término de la concentración puede adoptar diversas formas, la más simple es cuando se expresan los componentes específicos de una solución en términos de los componentes mismos, por ejemplo, una solución de nitrato de amonio (NH_4NO_3), tiene concentraciones diferentes del ión amonio NH_4^+ y del ión nitrato representando esto en la forma en que aparecen en solución es decir; como Xmg NH_4^+/litro y YmgNO_3^-/litro

Pero pueden expresarse los componentes como constituyentes distintos de los que aparecen en solución, para el caso del (NH_4NO_3) se representaría en términos de la cantidad de nitrógeno que contienen.

$$mgNH_4^+ - N/litro = X\ mgNH_4^+/litro * 14mg\ N/18\ mg\ NH_4^+$$
$$mg\ NO_3^- - N\ /litro = Y\ mgNO_3^-\ /litro * 14\ mg\ N/62\ mg\ NO_3^-$$

Los análisis realizados de las muestras de campo, reportan los nitratos como aparecen en la solución, por lo que se transformaron en términos de la cantidad de nitrógeno que contenían:

Muestra	Reporte	Peso Molecular		Transformación
	NO_3(mg/l)	N(mg)	NO_3(mg)	NO_3-N
MD1	76.38	14	62	17.2
MD2	13.44	14	62	3.0

Tabla IV.8 Transformación de nitratos a nitrógeno en los datos

Eh: Este parámetro se midió en campo y se transformó mediante la ecuación de
$Eh=Eh_{med} + Eh(tabla) + (231-Zobell) + 0.0013(25-T)$

Muestra	T	Eh campo(mv)	Eh (mv)	Eh(volts)
MC5-5	28.9	105	327.99493	0.3279949
MC5-4	22.5	-42	181.00325	0.1810033
MC4-1	21.2	34	257.00494	0.2570049
MC4-2	20.9	-90	133.00533	0.1330053
MD-3	17.8	166	389.00936	0.3890094
MD1	17.4	212	435.00988	0.4350099

Tabla IV.9 Valores de Eh

pe : A partir de los datos de Eh se empleó la ecuación de transformación para obtener pe a diferentes temperaturas:
$pe= -\log [e^-]$
$pe=(F/2.303R*T)*Eh(volts)$
en donde:
F constante de Faraday 96.5 KJ/v-eq
R=0.00831 KJ/(° mol)
T= ° K

Obteniendo los siguientes resultados:

Muestra	Eh(volts)	°K	pe
MC5-5	0.3279949	302.05	5.47546
MC5-4	0.1810033	295.65	3.08703
MC4-1	0.2570049	294.35	4.402606
MC4-2	0.1330053	294.05	2.280763
MD-3	0.3890094	290.95	6.741772
MD1	0.4350099	290.55	7.549368

Tabla IV.10 Valores de pe

IV.4.2 Desarrollo de la Modelación

a) Se compararon las soluciones de diferentes fuentes desde agua de canal, hasta agua de un pozo profundo con datos de 1985, como solución inicial.
b) Se emplearon datos de trabajos previos y de los obtenidos durante esta investigación.
c) Cada sitio se ha cargado como una solución, con sus diferentes profundidades y a diferente tiempo, para conocer las reacciones que dan lugar a la presencia o ausencia de nitratos.
d) Para el sitio MD se cargaron las soluciones a diferentes tiempos y a diferentes profundidades.
e) Se graficó la relación Cl/NO_3 como indicador de denitrificación.
f) Para el sitio MC3 se hizo una mezcla con agua superficial del emisor central la cual no presenta nitratos, y sí una alta proporción de bicarbonatos y sulfatos.
g) Se efectuó una mezcla con agua del manantial de Cerro Colorado aledaño a MD, con agua superficial del Río Salado.
h) Se simularon aguas con alta concentración de nitratos y agua con poca concentración de nitratos a diferentes tiempos.

Los resultados de estas modelaciones se presentan en el capítulo V.

V. Discusión General

V.1. Calidad del agua subterránea

Resultados de campo: La Tabla V.1 muestra aquellos valores de mayor interés medidos en campo.

MUESTRA	pH	T °C	O_2 mg/l	T°C en oxímetro	Eh
MC5-4	9.16	22.5	0.8	21	-42
MC5-5	6.42	28.9	0.5	26	105
MC4-1	6.82	21.2	2.1	20	0.34
MC4-2	6.55	20.9	2	18	-90
MD1	6.73	17.4	3	17	212
MD3	6.48	17.8	2.2		166

Tabla V.1 Parámetros medidos en campo

Los valores de Eh medidos en campo revelaron que las muestras del piezómetro aledaño al manantial de cerro colorado (MD) pertenecen a un ambiente oxidante.

Alcalinidad :

Las determinaciones en campo únicamente mostraron que no existía alcalinidad a la fenoftaleina, sin embargo no fue posible medir la alcalinidad total. Esta se verificó nuevamente en laboratorio con los siguientes resultados (Tabla V.2).

Muestra No.	alc. Fenoftaleina	alc total
Valoración	ml	ml
MD1	0	12.9
MD3	0	12.2
MC5-5	0	9.8
MC5-4	2.9	6.6
MC4-1	0	5.7
MC4-2	0	9.2

Tabla V.2 Resultados de Alcalinidad

Resultados analíticos:

En los resultados analíticos del primer muestreo sólo seis de los 13 puntos muestreados detectaron nitratos, estos sitios pertenecen a ambientes oxidantes con mayores concentraciones de O_2 (Tabla V.3).

Clave	Prof.	Alc. total	CO_3	HCO_3	SO_4	Fe	NH_3	NO_3	pH	°C	O_2	Eh	K(µS/cm)
MD1	*25.5*	483		590	206	0.21	*0.10* [1]	14.7	6.56	20	3.2	176	1720
MD2	*14.5*	478		583	127	1.48	0.08	3.11	6.59	21	3	193	1381
MD3	7.5	460		561	134	0.09	0.07	7.83	6.57	22	7	75	1438
MC3-2		625		762	56.6	59.9	0.04		6.82	20	1.8	-25	1763
MC3-3		463	27.4	509	72.9	161	*0.24* [1]		7.17	21	1	82	1419
MC4-1	11.3	354	16.8	398	2.23	20.9	0.08		6.31	22	2.2	105	1141
MC4-2	11.4	478		584	7.55	50.8	*0.18* [1]		6.7	22	1.4	-17	1127
MC5-1	*25*	411		501	60	0.04	0.06	12.2	6.25	22	4.2	258	1614
MC5-2	*18*	389		474	58.2	0.03	0.10	13.1	6.3	20	4	206	1652
MC5-3	*11*	412		514	66.3	0.04	0.07	16.5	6.6	21	6.4	158	1738
MC5-4	11	268	135	52.4	8.34	3.28	*6.31* [1]		9.56	21	2.4	74	1096
MC5-5	15.5	402		490	76.9	77	*0.52* [1]		6.7	22	2.8	-76	1638
MC5(15)						27.8			6.45	26	1.4		

[1] Ambientes menos oxidantes

Tabla V.3 Sitios y Datos de Muestreo (mg/l), Junio 1998

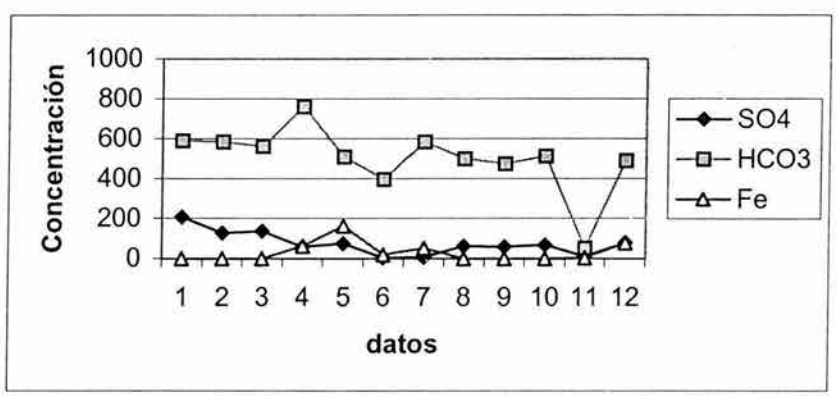
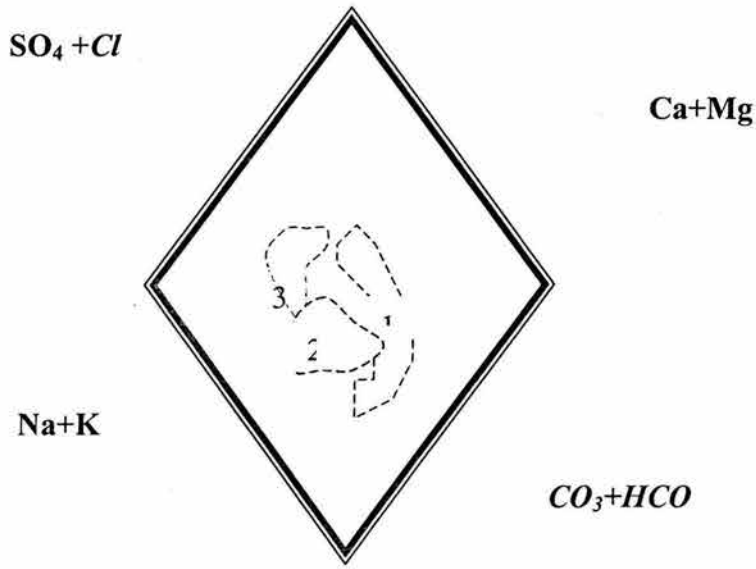


Figura V.1 HCO_3 y SO_4 en los sitios de muestreo (mg/l)

Las muestras se clasificaron principalmente como agua bicarbonatada de recarga.
Las muestras se clasificaron hidrogeoquímicamente por medio del programa GWW, versión 1.10, Groundwater Software for Windows, por Dr. D. Braticevic y Dr. J. Karanjac, United Nations, para obtener el diagrama triangular o de Pipper (Figura V.2).



	Tipo de agua
1.	Agua aledaña a canales
2	Agua de manantiales
3	Agua Profunda

Figura V.2 Clasificación del agua subterránea.

Datos comparativos:

Los datos obtenidos en el muestreo efectuado este año se compararon con datos registrados por BGS y CNA (1995) se contó con 7 puntos coincidentes (Tabla V.4) y en cada uno de estos puntos se midieron las concentraciones de NO_3-N, observando un incremento en todos ellos; en 5 de estos puntos el pH disminuyó, así como el contenido de HCO_3. El comportamiento de los sulfatos es variable, sin presentar un patrón determinado o relación alguna con los otros valores.

Es importante mencionar que datos previos de Fe_{total} presentan valores generales de <0.02 mg/l, así como la presencia de un alto contenido de SO_4 en las aguas de irrigación.

Datos	1994	CNA		BGS			Datos	1998			
Mtra	Clave	O_2 (mg/l)	pH	HCO_3	NO_3-N	SO_4	PH	HCO_3	SO_4	NO_3-N	NO_2-N
VM1	Ajacuba 1161	2	7	540	2.4	86.2	7.05	526.59	86.7	3.34	ND
VM2	Tlaxc 621	2.6	7.5	508	11.8	48.8	7.7	461.18	52.35	14.8	"
VM3	MC1						6.72	361.42	73.68	-	"
VM4	MB						7.29	618.17	141.66	20.65	"
VM5	MC3						7.55	498.79	58.14		"
VM6	1184	2.2	7	575	9.5	160	7.53	569.11	140.69	14.48	"
VM7	Mangas	2.5	7	814	15.6	128	7.3	735.91	118.91	18.06	"
VM8	MC4-1						7.68	506.97	5.06		"
VM9	MC4-2						7.14	451.36	11.33		"
VM10	MC5-1						7.18	495.52	60.06	14.49	"
VM11	MC5-2						7.2	469.35	66.23	14.99	"
VM12	MC5-3						7.26	487.34	70.6	11.85	"
VM13	1099	2.3	7.5	489	5.8	142	7.23	611.63	96.68	16.7	"
VM14	102	2.0	7.6	483	2.5	356	7	431.74	100.72	5.86	"
VM15	Tlahue						7.2	781.71	124.51	17.62	"
VM16	Man.C. Colorado	2.6	7.5	561	11.8	143	7.21	577.29	177.93	14.20	"
VM17	MD1						7.53	592.01	195.76	17.25	"
VM18	MD2						7	583.83	130.4	3.04	"

Tabla V.4 Datos comparativos

La Tabla V.4 muestra que los datos de NO_3-N reportados por la CNA presentan para 1994 las concentraciones más altas en el centro del Valle en relación con la zona de irrigación inicial (Río Salado) ver figura V.3, sin embargo para 1996 las concentraciones más altas se extienden hacia los bordes noreste y oriente del Valle; (Figura V.4) Estas configuraciones corresponden la primera al inicio del periodo de lluvias y la segunda al término de éstas.

Esta distribución concuerda con el desplazamiento citado en capítulos anteriores, en donde los nitratos siguen la configuración del flujo subterráneo, ya que estas sólo se desplazan al alcanzar el manto acuífero siguiendo el mismo patrón.

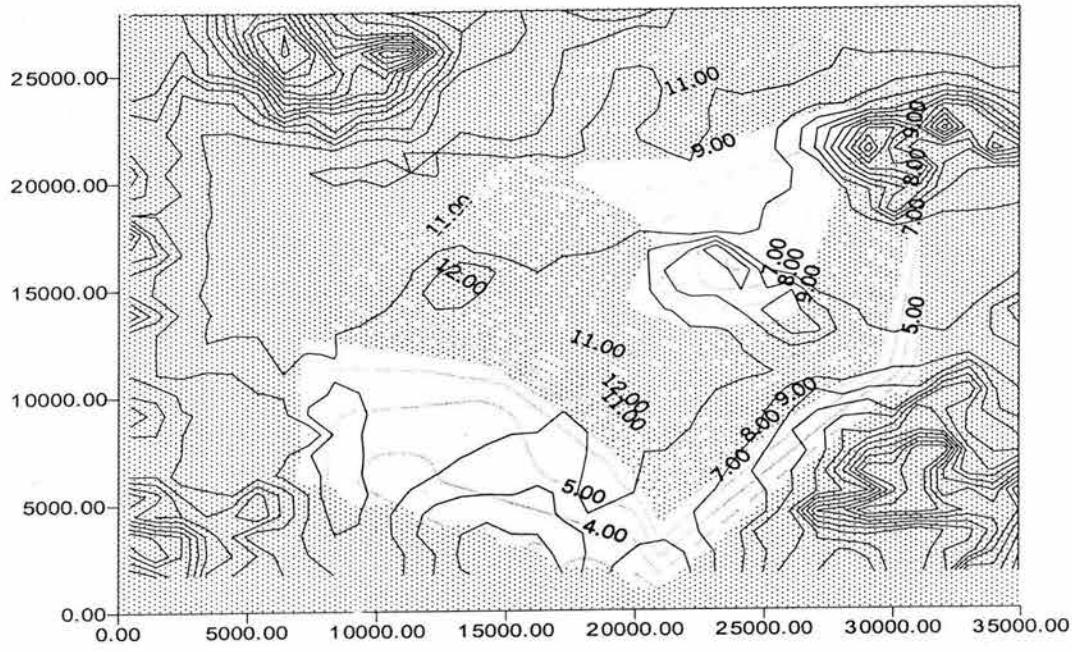


Figura V.3 Configuración de NO_3 para febrero 1994, Datos CNA (1995)

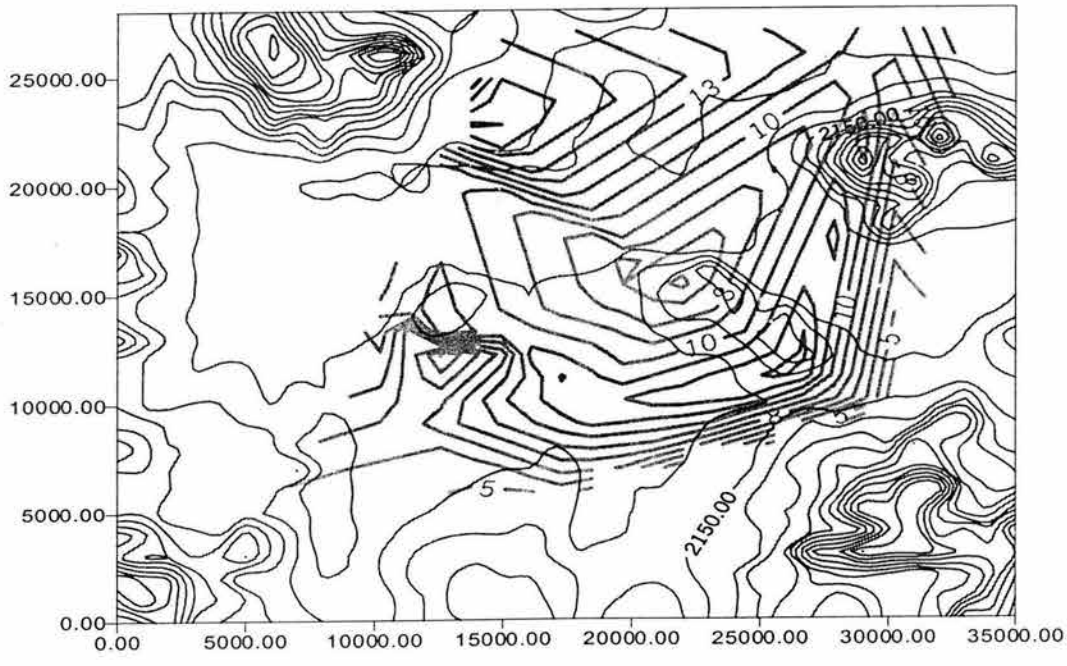


Figura V.4 Configuración de NO_3 en Octubre 1996, *Datos CNA (1997)

V.2 Relaciones a profundidad

De cinco sitios muestreados con control a profundidad, sólo dos (MC5 y MD) reportaron nitratos

En el sitio MC5 la concentración de NO_3 disminuye a profundidad, mientras que en el sitio MD disminuye entre 5 y 12 m de profundidad a partir de donde aumenta hasta los 25 m de profundidad del piezómetro (Figuras V.5 y V.6).

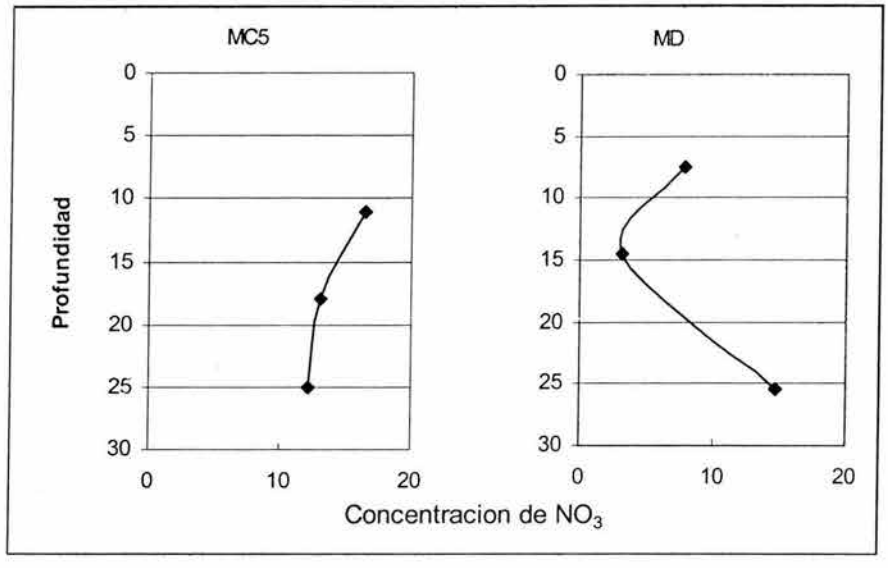


Figura V.5 Concentración de NO_3 en los sitios MC5 y MD

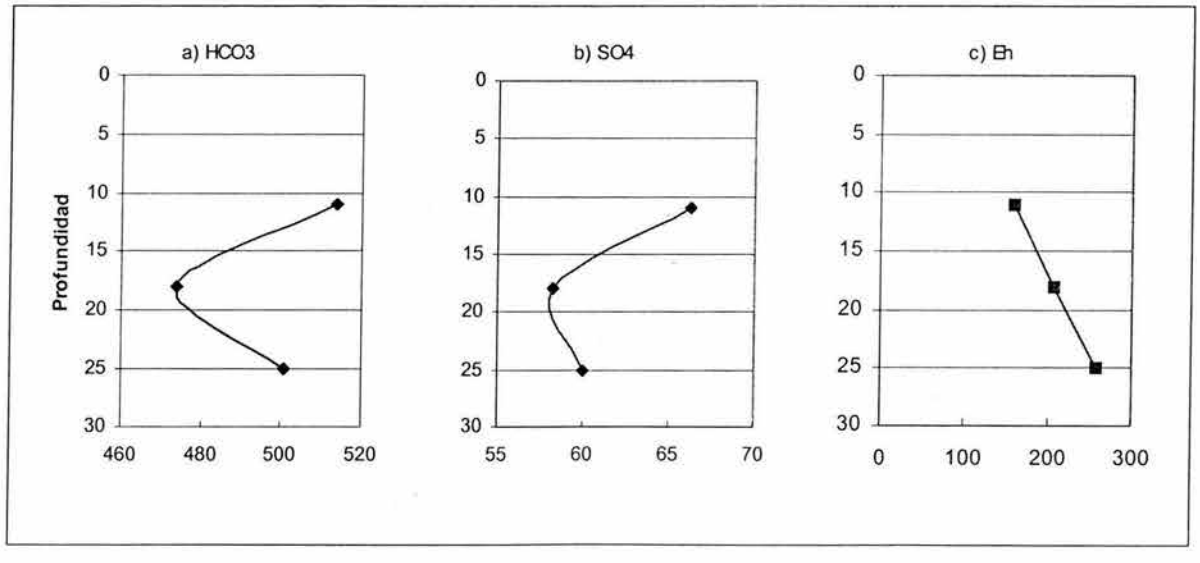


Figura V.6 Relaciones de HCO_3, SO_4 y Eh en el sito MC5

En el Sitio MC5 La concentración de HCO_3 tiene un comportamiento similar al de los SO_4 a profundidad, mientras que el Eh aumenta constantemente, lo que habla del predominio de condiciones oxidantes.

En el sitio MD los HCO_3 se comportan en forma prácticamente inversa a los SO_4 los cuales se incrementan a profundidad; el Eh es similar a los HCO_3 tornándose a profundidad un ambiente menos oxidante.

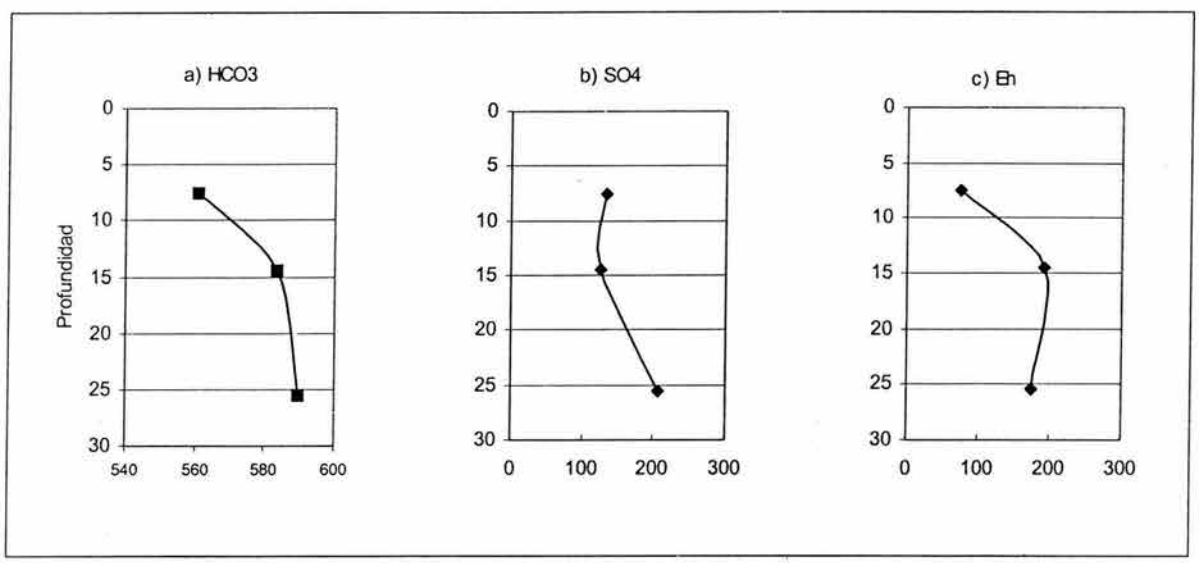


Figura V.7 Relaciones de HCO_3, SO_4 y Eh en el sitio MD

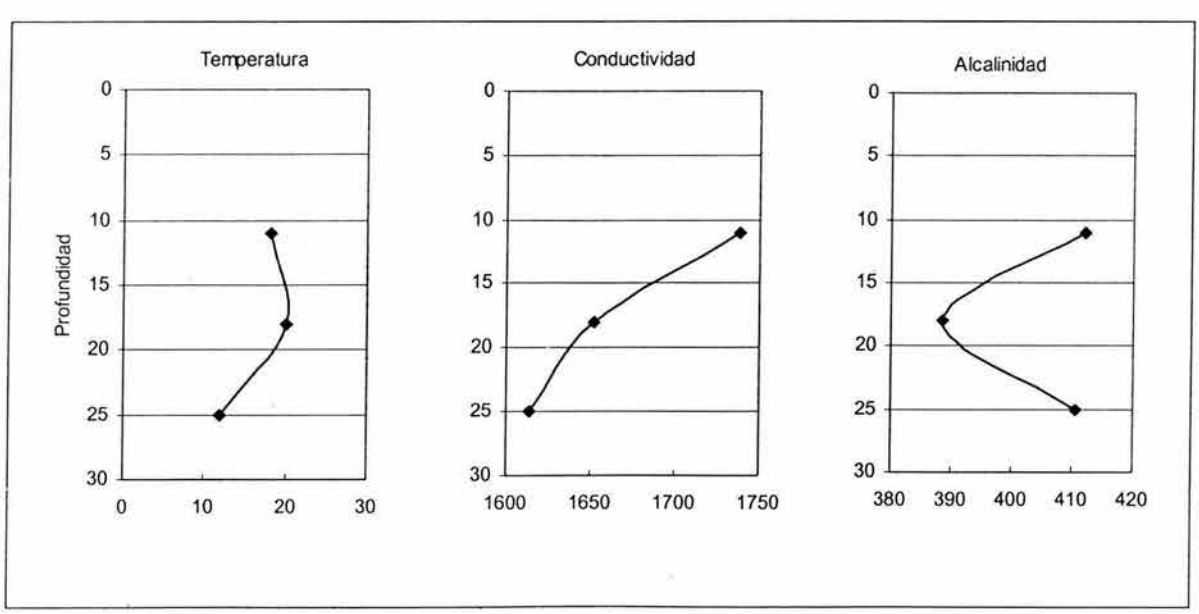


Figura V.8 Relaciones de Temperatura, conductividad y alcalinidad en el sitio MC5

En el sitio MC5 ocurre una disminución importante de la alcalinidad a 17 metros de profundidad a partir de ahí la temperatura disminuye. La conductividad disminuye constantemente desde la superficie.

En el sitio MD la temperatura a profundidad es más constante en forma similar a la conductividad mientras la alcalinidad aumenta.

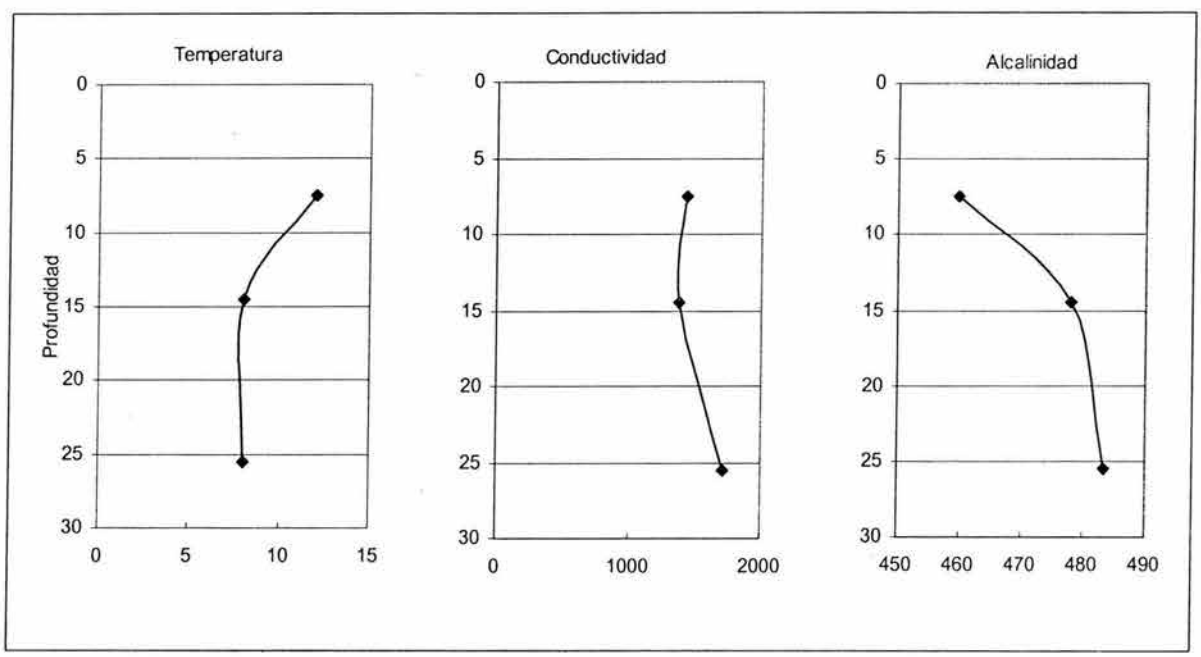


Figura V.9 Relaciones de Temperatura, conductividad y alcalinidad en el sitio MD

Evidencias de Denitrificación

La comparación de nitratos, bicarbonatos, y pH con la profundidad, denota en el sitio MC5, que un decremento en la concentración de nitratos a partir de los 17 metros se relaciona con un aumento en la concentración de HCO_3, lo que refleja la oxidación de la materia orgánica, proceso que podría estar apoyado con la ausencia de nitritos y en consecuencia sugerir la presencia de la denitrificación.

Resultados de los análisis:

Es importante recordar que el único medio para la remoción del nitrato in situ es por *reducción*. Por lo que se subraya lo siguiente:

La reducción de NO_3^- a N_2 se efectúa por algún donador de electrones como Fe^{2+}, H_2S y CH_4.

La reducción del nitrato ocurre a la par de la oxidación de materia orgánica la cual se refleja por el aumento de HCO_3^- y del pH.

Potencial Oxido-Reducción: El proceso de denitrificación como un proceso de óxido-reducción se puede definir a partir de dos semireacciones, en donde la primera implicaría la denitrificación como:

$1/5\ NO_3^- + 6/5\ H^+ + e^- \leftrightarrow 1/10N_{2(g)} + 3/5H_2O$ Eh(mV) 746, ^G° (kJ mole-1) -120.1

La oxidación de materia orgánica o un sustrato mineral completa la reacción

$$1/14\ FeS_2 + 4/7H_2O \leftrightarrow 1/7\ SO_4^{2-} + 1/14Fe^{2+} + 8/7H^+ + e^-$$

La reacción de óxido reducción en esta condición sería:

$$5FeS_2 + 14NO_3^- + 4H^+ \leftrightarrow 7N_2(g) + 10SO_4^{2-} + 5Fe^{2+} + 2H_2O$$

La oxidación de la pirita (como sustrato mineral) se puede dar en un flujo puramente advectivo o por influjo difusivo bajo condiciones de agua estancada.

Método para la caracterización de los procesos de denitrificación: Medir un gradiente de potencial redox en un acuífero subterráneo en un punto de recarga, y en zona confinada, en donde se espera pasar del estado de oxidación a un estado reducido con potencial redox inferior o igual a aquel que exigen los procesos de denitrificación, piezómetros MD-MC3. Variaciones a profundidad: de Fe, SO_4, NH_3, NO_3, HCO_3, pH, Eh. K, alcalinidad

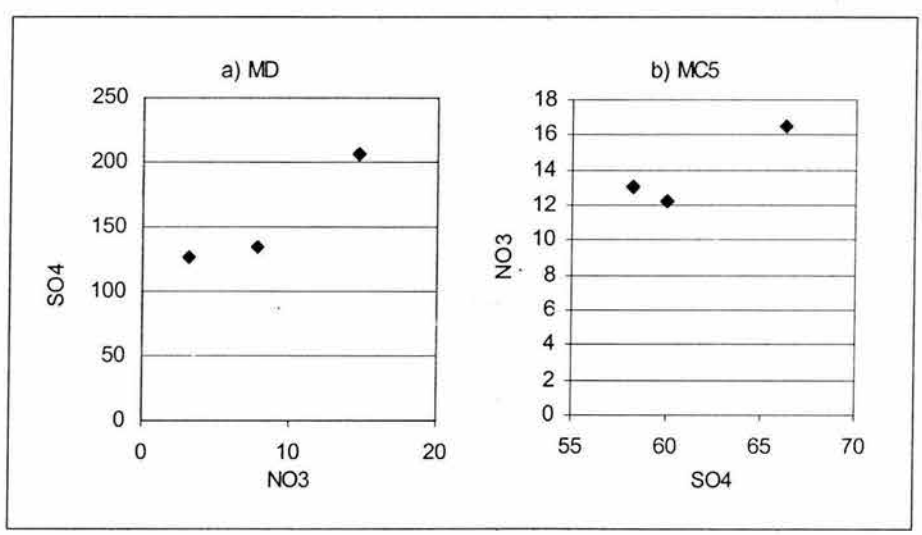


Figura V.10 NO_3/ SO_4

Se observa que en el sitio MD una menor concentración de SO_4 tiende a una menor concentración de NO_3, es decir predomina un ambiente reductor.

Materia Orgánica:
Las relaciones importantes con el contenido de materia orgánica en suelos son: El incremento en HCO_3 y pH, lo que representa la oxidación de la M.O., provocando la reducción de los NO_3.

La oxidación de la M.O. o sustrato mineral, se describe a través de las siguientes ecuaciones:

$$5CH_2O + 4NO_3 \rightarrow 2N_2 + 4HCO_3^- + CO_2 + 3H_2O$$
$$2FeS_2 + 6NO_3^- + 2H_2O \rightarrow 3N_2 + 2FeOOH + 4SO_4^{2-} + 2H^+$$

En el sitio MC5 con el constante incremento en la materia orgánica, aproximadamente a partir de los 20 cm se observa un incremento en los bicarbonatos mientras que el pH se mantiene en un valor de 6 y 7 es decir prácticamente neutro.

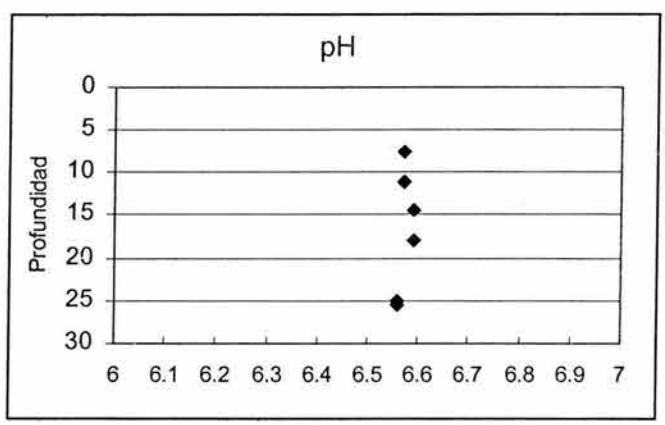


Figura V.11 Variación del pH con la profundidad sitio MC5 y MD

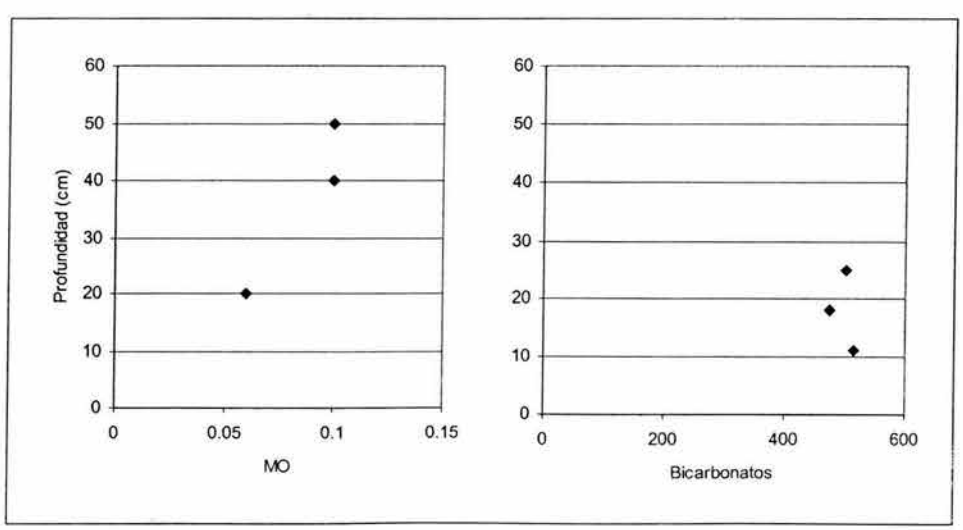


Figura V.12 Sitio MC5

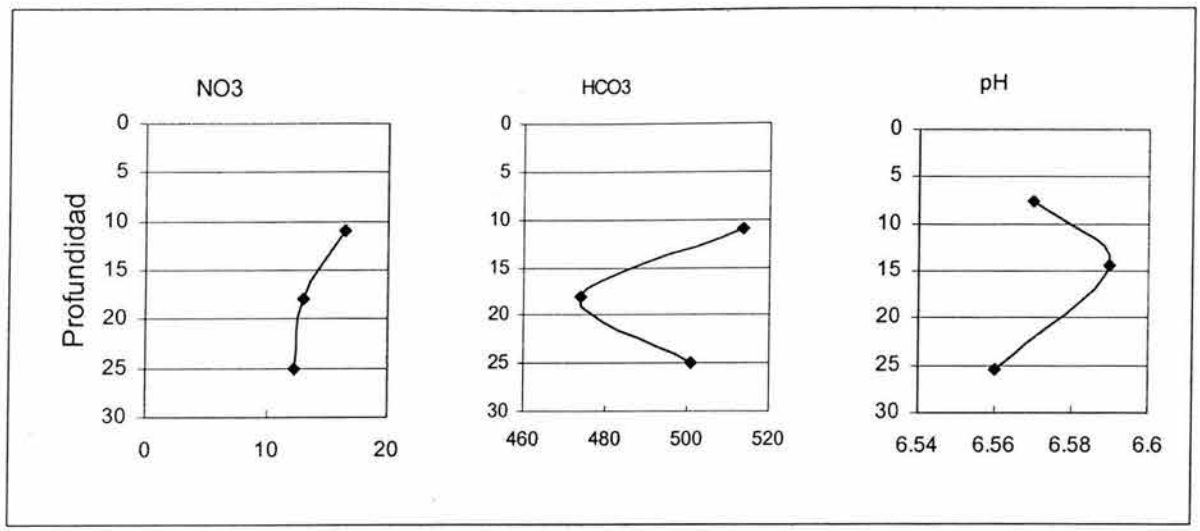


Figura V.13 Relación entre NO_3^-/HCO_3/pH en el sitio MC5

Estas gráficas muestran en los primeros 17 metros; al disminuir los NO_3^- disminuyen también los HCO_3 y aumenta ligeramente el pH inhibiendo la denitrificación, mientras que en los últimos metros del perfil muestreado, conforme disminuyen ligeramente los nitratos aumentan considerablemente los bicarbonatos y disminuye el pH, relación que apoya los procesos de denitrificación a esta profundidad.

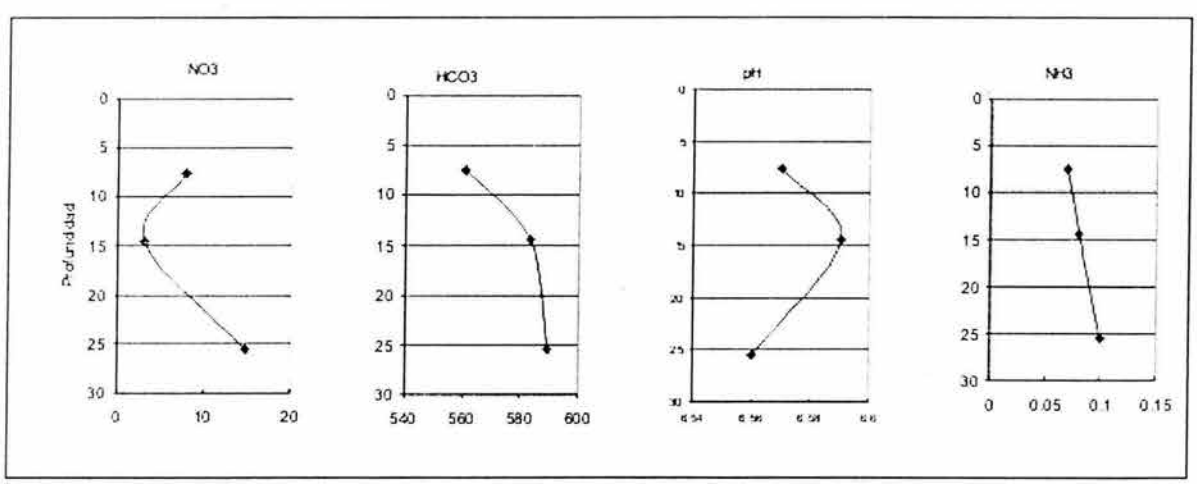


Figura V.14 Sitio MD, relación de NO_3/HCO_3/pH/NH_3

En el sitio MD en los primeros 15 metros, al disminuir los nitratos aumentan los bicarbonatos, reflejando la ocurrencia de los procesos de denitrificación. El aumento en la concentración de NH_3 apoya la ocurrencia de este proceso.

Sitios sin nitratos :

Algunos de los sitios en los cuales no se reportaron nitratos tenían antecedentes previos de nitratos como el sitio MC3 que reportó en 1997 una concentración de nitratos > 0.2 y

el MC4 había reportado hasta 1.5, por lo que resulta interesante conocer sus relaciones a profundidad.

Concentraciones de HCO_3 y pH en los sitios MC3 y MC4 :
Oxidación de M.O. en MC3 y MC4

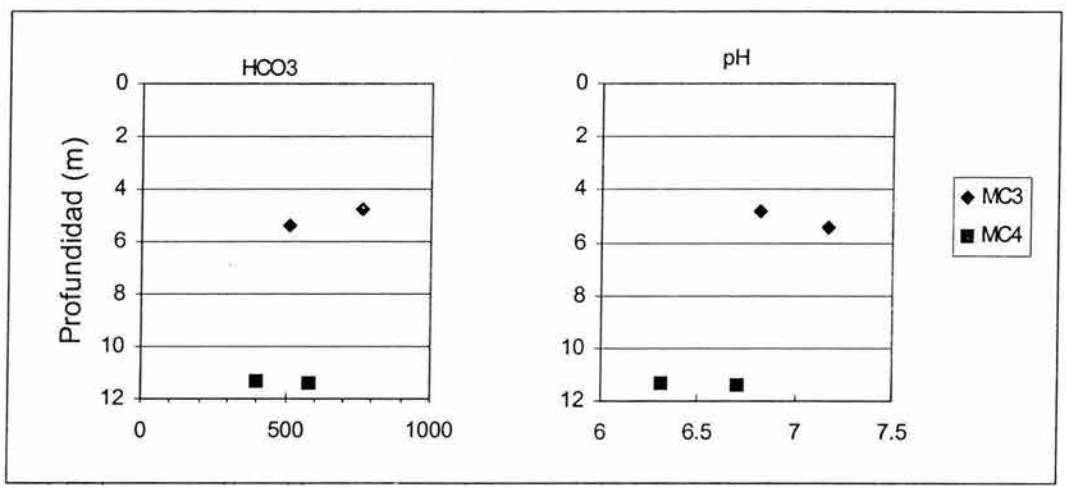


Figura V.15 Relación a profundidad de los sitios MC3 y MC4

En el sitio MC3 a mayor profundidad disminuyen los HCO_3 , mientras que en el sitio MC4 aumentan, sin embargo el pH a mayor profundidad es un poco ácido, lo anterior refleja la presencia de condiciones óptimas para la ocurrencia de la denitrificación en el sitio MC4.

O_2 y Temperatura

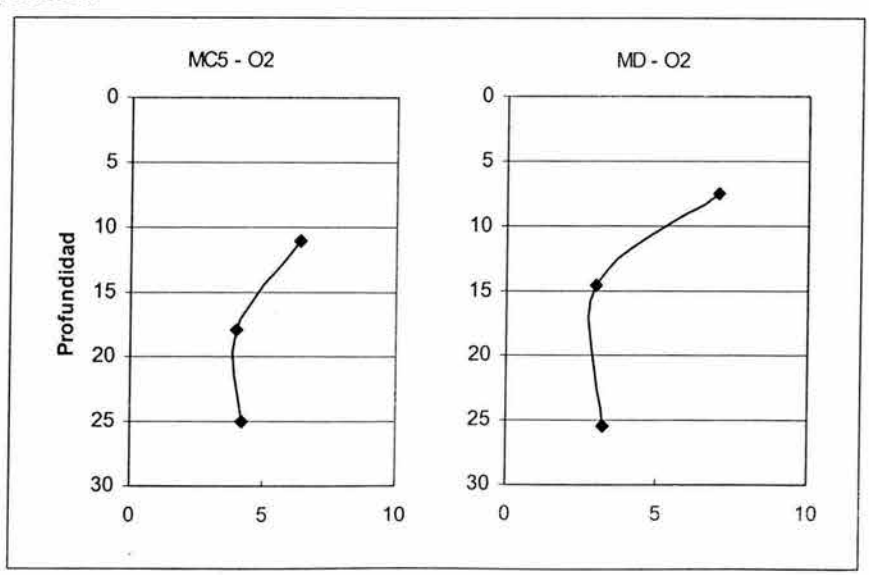


Figura V.16 MC5 y MD Relación de O_2 a profundidad

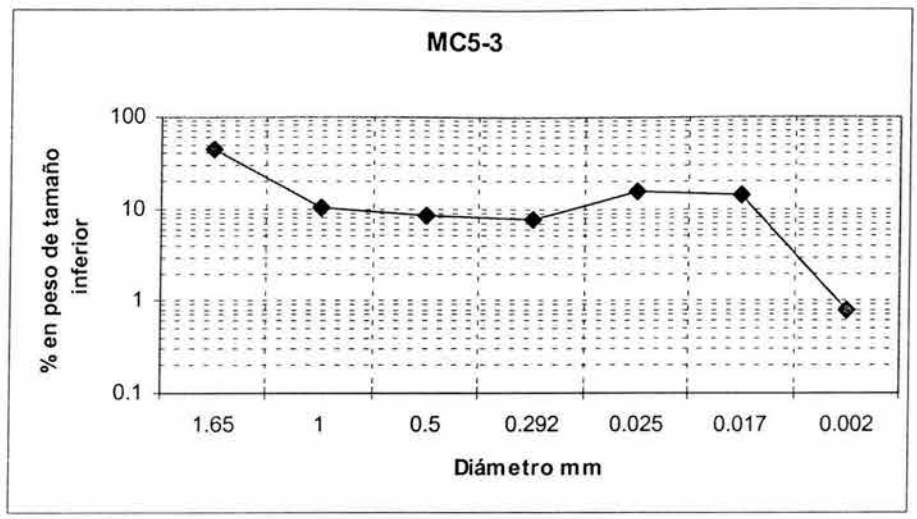
En ambos sitios la concentración de O_2 disminuye en los primeros metros en forma constante, mientras que en los últimos metros la disminución es muy suave, sin embargo continúa a través de todo el perfil, favoreciendo la denitrificación.

Conclusiones del análisis

- ⇒ Se observa un incremento en la evolución de los nitratos hasta del 40% en los datos comparados entre 1984 y 1997.
- ⇒ Un aspecto importante en el comportamiento de los nitratos es su íntima relación con la recarga de aguas superficiales, ya que posterior a la época de lluvias la configuración se modifica radicalmente, lo que habla de que la variación en la concentración de nitratos, ocurre en gran medida por la mezcla de estas aguas.
- ⇒ La ausencia de nitratos en sitios que aunque en muy baja concentración anteriormente reportaban nitratos se debe a: Procesos de denitrificación en un ambiente reductor y a su ubicación hidrogeológica como punto de recarga o descarga.
- ⇒ Considerando que los sitios muestreados se encuentran aledaños a canales, la diferencia principal entre ellos es un mayor tiempo de transporte, y en consecuencia la íntima relación con una fuente de recarga común.
- ⇒ En la mayoría de los sitios muestreados, las variaciones en las concentraciones de NO_3^- y su ausencia pueden deberse a la ocurrencia de los procesos de dentrificación.
- ⇒ La variación de temperatura como agente determinante de la denitrificación, es indicador de la mezcla con otra fuente subterránea.

Resultados del análisis de suelos

Representación de la distribución granulométrica:
Siempre que se cuente con suficientes datos es posible representar la distribución granulométrica por medio de gráficas, en donde se observa que en el suelo del Valle es principalmente arenoso con bajo contenido de limos (Figura V.17).



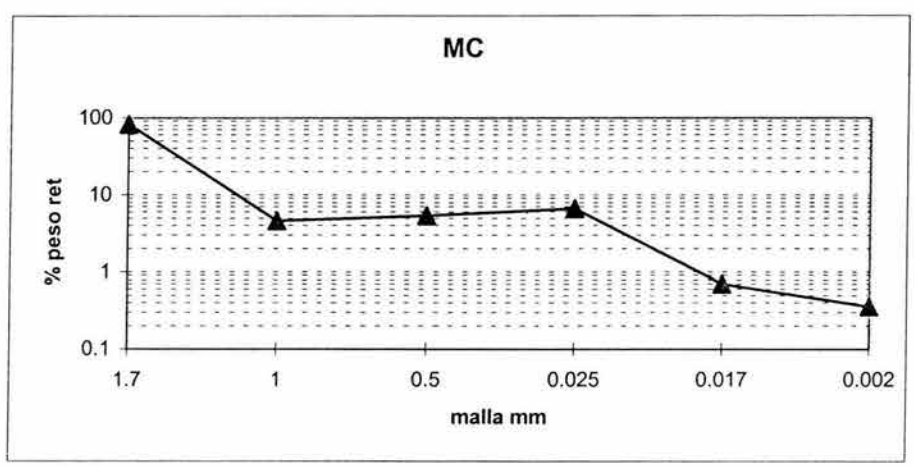


Figura V.17 Gráficas de distribución

Contenido de M.O.

Los análisis de suelos reportan que la mayor concentración de materia orgánica ocurre a profundidades mayores a un metro y aumenta con la profundidad.

Sitio	COT	% deCO	% de MO	Prof.(cm)
MC	5.90E-01	5.90%	10.17%	
MC5-1	4.00E-01	4.00%	6.90%	20
MC5-2	5.90E-01	5.90%	10.17%	40
MC5-3	6.00E-01	6.00%	10.34%	50
MC4-1	1.85E+00	18.50%	31.89%	145
MC4-2	1.25E+00	12.50%	21.55%	120
MC4-3	1.03E+00	10.30%	17.76%	75
MC4-4	7.50E-01	7.50%	12.93%	40
MC4-5	4.00E-01	4.00%	6.90%	10
MD1	1.96E+00	19.60%	33.79%	190
MD2	1.89E+00	18.90%	32.58%	79
MD3	7.90E-01	7.90%	13.62%	69

Tabla V.5 Contenido de COT, de MO y de CO en suelos

Sitio	CIC	prof. (cm)
MC4-3	12.07	85
MD4	14.48	55
MD1	14.51	195
MD2	36.54	185
MD3	13.83	69
MC5-1	15.74	25
MC5-2	15.61	45
MC53	11.46	20
MD5	13.39	30
MC4-1	24.04	145
MC4-2	25.32	110
MC4-4	7.05	65
MC4-5	10.27	10

Tabla V.6 Determinaciones de CIC

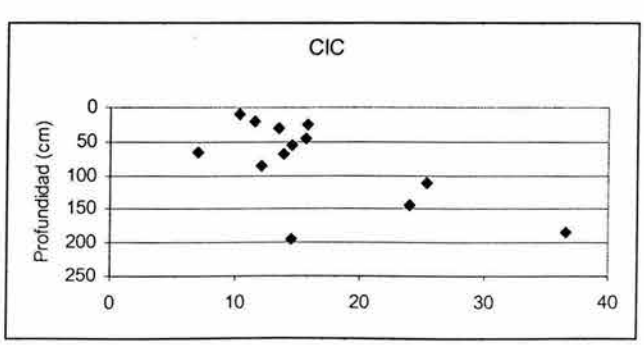


Figura V.18 Distribución de CIC

La Figura V.18 muestra que la CIC al igual que la materia orgánica tiende a aumentar con la profundidad.

Los sitios MC4 y MD presentan los valores más altos de Na^+, en un rango de 318-300 mg/l en contraste con los más bajos valores de Ca^{2+} .

Coeficientes de Uniformidad:
Se propusieron como medidas simples de uniformidad los coeficientes de C_u (Coeficiente de uniformidad)y C_c(Coeficiente de curvatura) (Freeze y Cherry, 1979).

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

En donde
D_{60} tamaño tal, que el 60% en peso del suelo sea igual o menor.
D_{10} Diámetro efectivo, el tamaño tal que sea igual o mayor que el 10%, en peso del suelo.

El autor menciona que esta relación en realidad es un coeficiente de no uniformidad , pues su valor numérico decrece cuando la uniformidad aumenta. Los suelos con $C_u<3$ se consideran muy uniformes; pero aun las arenas naturales rara vez presentan un valor menor a 2.

$$Cc = (D_{30})^2 / D_{60}*D_{10}$$

Con significados análogos a los anteriores.

Esta relación tiene un valor entre 1 y 3 en suelos bien graduados, con amplio margen de tamaños de partículas y cantidades apreciables de cada tamaño intermedio.
En la Tabla V.7 se enlistan los resultados obtenidos para cada muestra:

No. de muestra	Cu	Cc
MC4-1	62.96	0.04
MC4-4	89.47	0.026
MC4-2	1.55	1.32
MC4-5	100	0.028
MC4-3	113.33	0.025
MD-1	68	0.04
MD-2	100	1.53
MD-3	73.91	0.03
MD-4	70.83	0.03
MD-5	1.54	0.037
/MC	1.41	1.71
MC5-1	68	0.03
MC5-2	1.41	1.19
MC5-3	150	0.021

Tabla V.7 Coeficientes de Uniformidad y curvatura

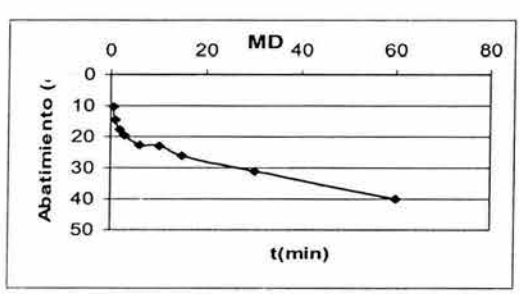
Según los datos anteriores son suelos poco uniformes a excepción de las muestras MC4-2, MD5, MC, y MC5-2, cuyas profundidades se ubican entre 0 y 59 cm.

Tasa de Infiltración:
La capacidad de infiltración del suelo estará estrechamente ligada con el almacenamiento, precipitación, uso de suelo y riego.

Se efectuaron dos pruebas tipo bailling, en donde las perforaciones se llenaban de agua, esperando y midiendo hasta la infiltración completa:

Sitio MD		Sitio MC5	
Tiempo	Abatimiento	Tiempo	Abatimiento
30 s	10.35 cm.	1	7.5
1 min	14.5	3	10
2 min	17.5	7	15.5
3min	19.5	15	19.5
6 min	22.7	25	22.5
10 min	23	40	28
15 min	26	1 hr	29.5
30 min	31	1.30	32
1 hr	40	2 h	38

Tabla V.8 Prueba de Infiltración



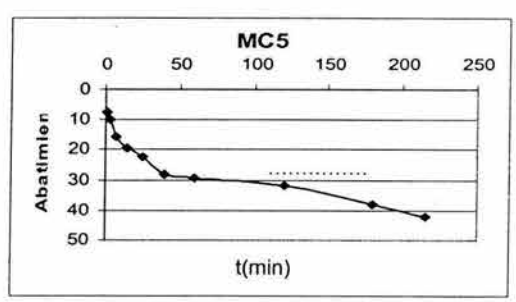


Figura V.19 Curvas de Infiltración

Estas gráficas muestran para ambos sitios, que los primeros 30 cm el perfil del suelo es más permeable con un rango inicial de infiltración de 86 cm/h, que es un valor muy alto; más allá de los 30 cm la velocidad de infiltración disminuye notoriamente a un rango de 45 cm/h. Esto se debe a la presencia de un material menos permeable como el caliche en el sitio MC5, y en el sitio MD, según la descripción de campo el suelo sólo se torna más húmedo o saturado.

Por lo que el índice de infiltración es superior en los primeros centímetros, disminuyendo paulatinamente a profundidad, sin embargo esta velocidad de infiltración inicial da lugar a un flujo superficial y encharcamiento debido a que es superada por las intensidades de precipitación pluvial e irrigación .

El sitio MD con un suelo arenoso y un mayor contenido de humedad está además relacionado con estructuras principales, sin embargo el alto contenido de humedad disminuye la capacidad de infiltración a profundidad, ya que se tiene un rango de infiltración inicial de 15cm/min en los primeros 30 cm.

V.2 Control estructural y flujo subterráneo
Para hablar en este contexto es menester referirse a dos puntos importantes

1. La dirección general de flujo es similar a la de las fallas principales del río salado y río Tula es decir sur a norte en el centro del valle y ligeramente hacia el NE al norte del mismo .
2. El afloramiento de los manantiales de Tezontepec y Cerro Colorado está estrechamente relacionado con fallas y/o fracturas

El manantial de Cerro Colorado se ubica en rocas volcánicas (acuífero principal), las cuales afloran en el área, al ascender los niveles aflora el manantial.

De igual forma, el manantial de Tezontepec está en estrecha relación con la falla que sigue el río Tula

La Figura V.20 muestra una sección a lo largo de los diversos piezómetros muestreados, señalando al punto MChda como un sitio en la entrada del valle, mientras que el sitio MC3 se ubica en la salida de este. Considerando que todos ellos se encuentran aledaños a canales, la diferencia principal entre ellos es tan sólo un mayor tiempo de transporte, y en consecuencia la íntima relación con una fuente de recarga común.

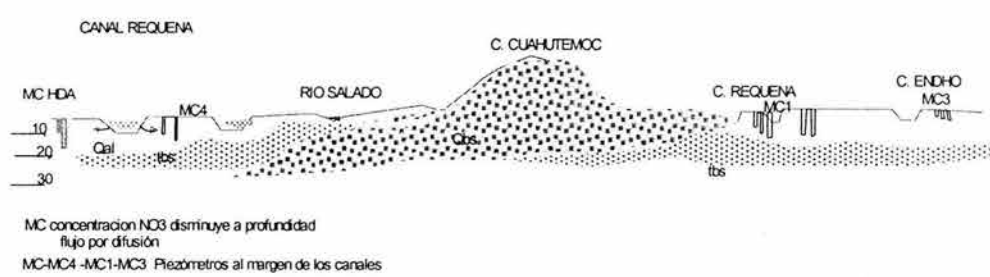


Figura V.20 Sección MChda-MC4-MC1-MC3

La Figura V.21 muestra una sección a lo largo de los dos piezómetros con nitratos, considerando al sitio MC5 como de flujo difusivo y al sitio MD, cercano al manantial de Cerro Colorado, como de flujo advectivo. En el sitio MC5 la CIC disminuye a profundidad, conforme el contenido de materia orgánica aumenta.

En el sitio MD la CIC es mayor entre los 79 y 189 cm de profundidad y disminuye a mayor profundidad.

En el sitio MD el espesor de suelo es mayor y se encuentra prácticamente sobre la zona de cultivos, el contenido de humedad aumenta a profundidad así como el contenido de arena.
En el sitio MC5 el contenido de arena disminuye a profundidad.

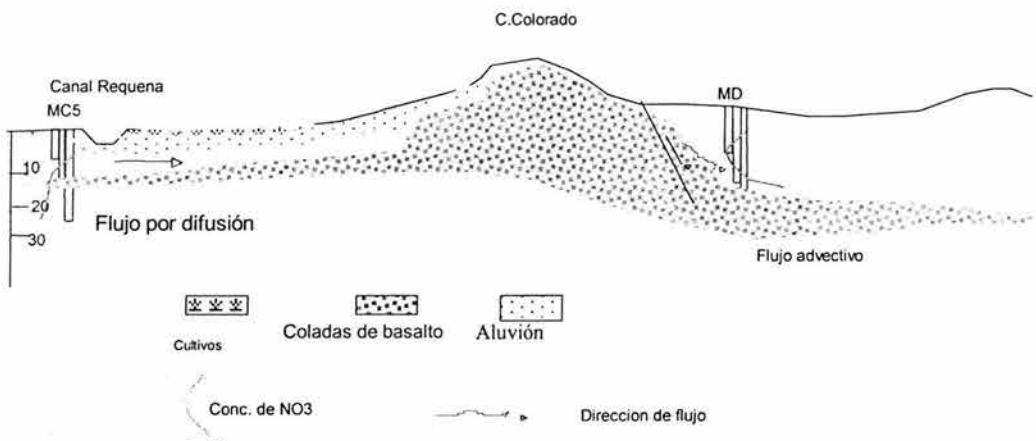


Figura V.21 Sección MC5-MD

Zonas de recarga y distribución de aguas negras

La recarga al acuífero puede ocurrir a través de :

- ⇒ La infiltración de agua de lluvia tanto en el suelo del valle como en sus márgenes por el escurrimiento de las partes altas.
- ⇒ Flujo subsuperficial de los flancos del valle a partir de la infiltración de terrenos más altos .
- ⇒ Lixiviación del sistema de los canales de distribución, es decir los canales y distribuidores de aguas negras en el área :
  Río Tula
  Río Salado
  Antiguo Requena
  G. Cinco
  Endho
- ⇒ Infiltración del exceso de agua de irrigación de los campos
- ⇒ Lixiviación del sistema de drenaje
- ⇒ Flujo a través del sistema de fallas, como son las de:
  Falla del Río Tula
  Falla del Río Salado
  Falla Tula-Huitel

Corriente	Volumen medio anual (Mm^3)	Periodo de observación
Río Tula	998.455	1938-1963
Río Salado	133.2	1966-1970
Canal Juandho	205.629	1914-1959
Total promedio	305.08	Periodo de 5 años

Tabla V.9 Volumen anual escurrido * DETENAL (1992)

Datos previos en los sitios de Recarga

Los piezómetros ubicados en los márgenes de los canales Endho y Requena no presentan concentración de NO_3, no así aquellos ubicados cerca de las fallas principales, presentando las mayores concentraciones a mayor profundidad.

Fuente	NO_3-N (mg/l)	HCO_3 mg/l
Cerro Colorado Man. MD	11.9	561
Tezontepec	10	541
Mangas	14	779
Tlaxcoapan	11.8	506
Pozo Tlalminulpa	14	696
El Ojito Man.	13.6	606

Tabla V.10 Resultados previos en zonas de fallas

Fuente	NO_3-N (mg/l)	HCO_3 (mg/l)
Pozo el Salto	3	377
Pozo Tula	3.6	250
Pozo el Llano	3.5	447
Pozo San Fco	7.1	368

Tabla V.11 Resultados fuera de las zonas de fallas

La relación estructural se manifiesta también con la presencia de manantiales surgidos a mitad del valle, así como los manantiales de Cerro Colorado y el de Tezontepec en la porción centro y norte del Valle.

Los sistemas pueden probablemente mantenerse por una limitada recarga de agua subterránea desde las montañas al sur del Valle del Mezquital. Esto podría originarse por la infiltración de la precipitación o por el influjo de la superficie del suelo y por la aportación de una fuente profunda al sur y occidente del área. Niveles locales base, y controles de descarga de agua subterránea pudieron relacionarse con el valle del río Tula el cual se enclava en el valle, y el Río Actopan.

La lixiviación a partir de los canales parece ser la mayor fuente de recarga, el volumen de agua perdido por infiltración a partir del sistema de distribución puede ser de 695 Mm^3 y estar potencialmente disponible para recarga. Distribuido sobre el total del distrito de riego (45,214 ha), este aporte podría implicar mas de 1539 mm/a de recarga potencial.

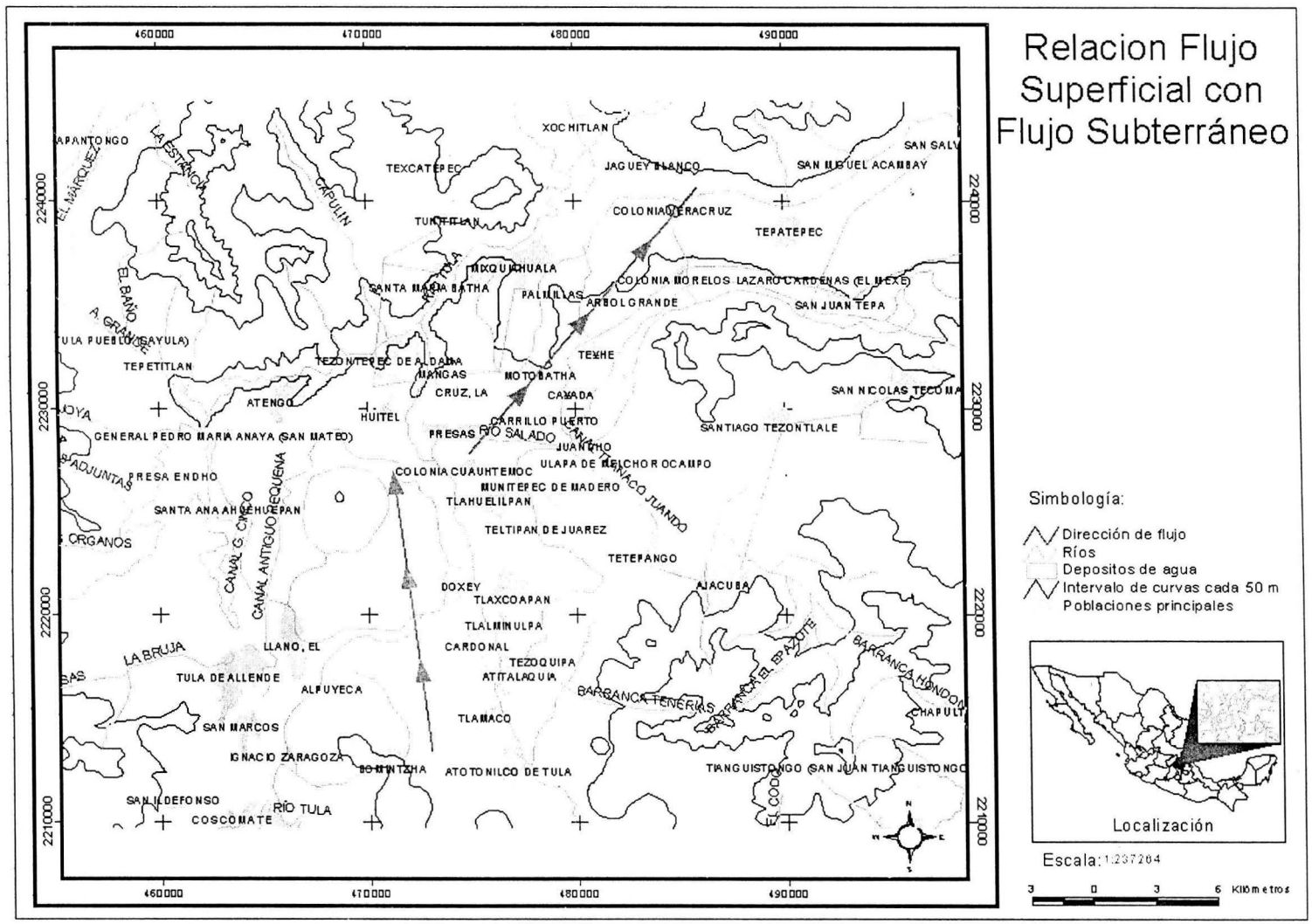


Figura V.22 Relación flujo superficial con flujo subterráneo

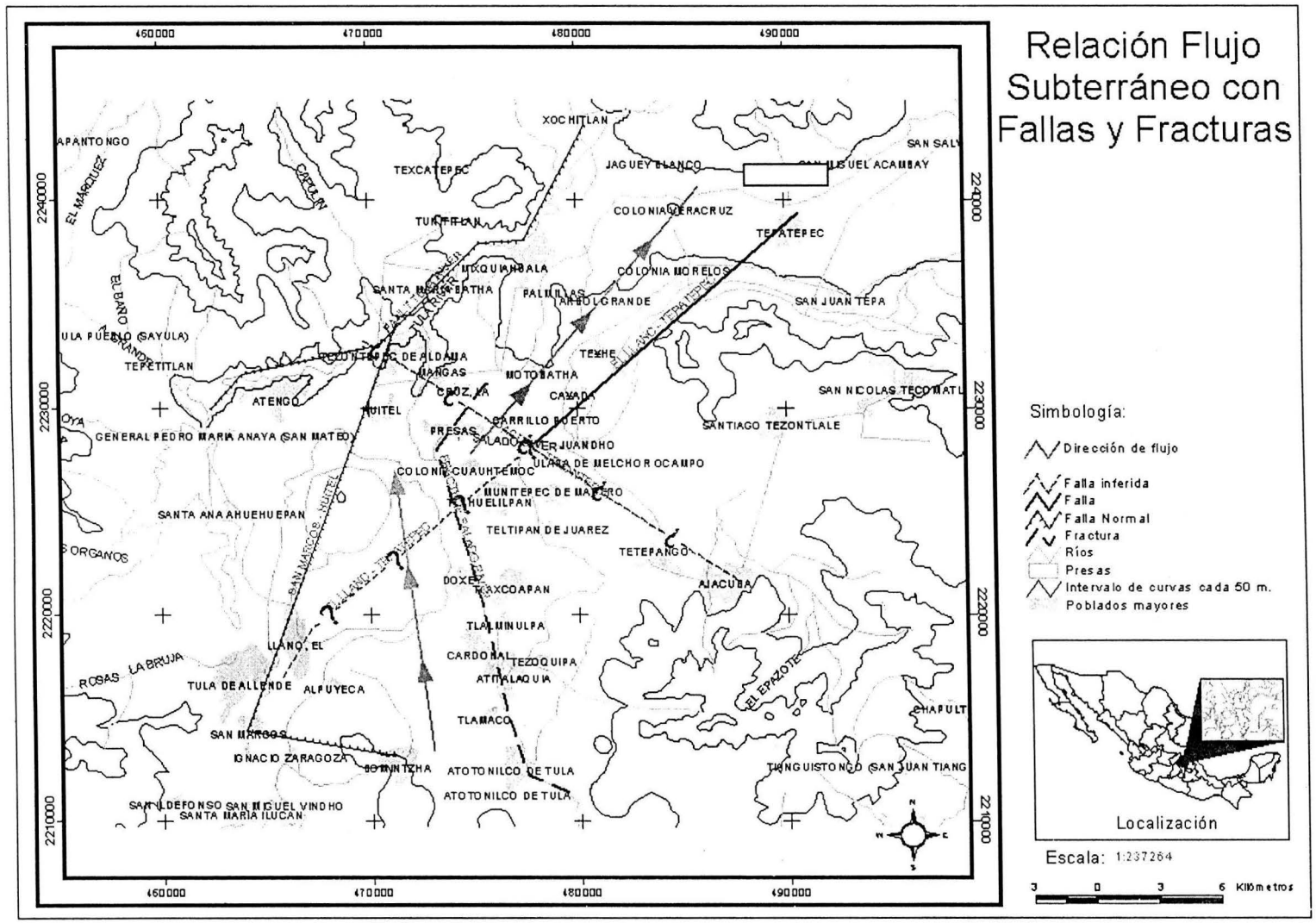


Figura V.23 Relación flujo subterráneo con falla y fracturas

V.3 Funcionamiento del modelo

Al material aluvial se le consideró permeable, así como al material volcánico del Terciario. La presencia de fallas y fracturas aumenta la permeabilidad del medio en las tres capas, los mayores almacenamientos corresponden a las calizas del cretácico, ya que de disminuir este, el acuífero simplemente se abate a pesar de aumentar la recarga vertical al sistema.

La recarga profunda proviene de las calizas, alimentando al acuífero superior a través de las diferentes fallas o contactos discordantes entre las unidades.

La recarga vertical por lo tanto no es la alimentación principal al sistema, ya que la presencia de tobas e ignimbritas disminuye la permeabilidad de la capa, inhibiendo la entrada al acuífero volcánico.

Los resultados del balance de recarga para cada periodo son de:

Periodo	Recarga anual Mm^3
1970-1977	278
1978-1984	357
1984-1987	433

Tabla V.12 Recarga del valle

Mientras que las cargas profundas son de:

Periodo	Carga profunda anual Mm^3
1970-1977	65
1978-1984	76
1984-1987	81

Tabla V.13 Cargas profundas

Si no se ubican los lineamientos permeables que representan las fallas y fracturas, la dirección de flujo es simplemente de sur a norte sin representar las configuraciones reales de 1970 a 1985 con que se cuenta.

Las fallas permiten la infiltración del agua de irrigación al acuífero, ya que al aumentar la carga vertical aumenta el flujo a través de las fallas.

La descarga de los manantiales de C. Colorado, Tezontepec, Mangas y Ajacuba se encuentra relacionada con estructuras principales como fallas, derrames y estructuras volcánicas (Figura V.23).

Los derrames volcánicos que bordean al río Tula y a la presa Endho no están conectados a profundidad, lo que inhibe la conexión hidráulica directa del acuífero con el agua residual de la presa.

La presencia del río Tula permite que el flujo en la porción norte varíe siguiendo este dren, al elevarse los niveles, el río funge como descarga, mientras que al disminuir éstos, el río recarga al acuífero.

La presencia de la falla de C. Cuauhtemoc-Tepatepec permite que el flujo siga esta misma dirección. Sin embargo al incrementar la descarga en el manantial de Cerro

Colorado, el flujo migra hacia esa dirección, por lo que el volumen de flujo hacia Tepatepec disminuye.

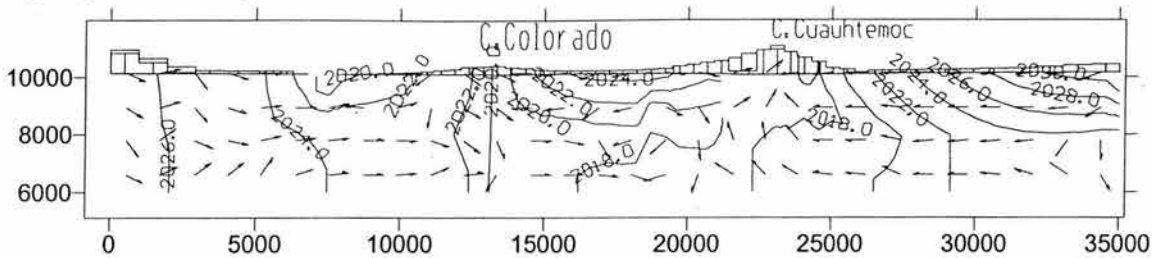


Figura V.24 Resultados del modelo sección E-W con direcciones de flujo.

La dirección de flujo principal es de sur a norte en el centro del valle, siguiendo la dirección del río Salado, variando hacia el oriente al norte del valle a la altura de Tezontepec de Aldama, a partir de donde sigue la dirección del río Tula (Figuras V.25. y V.26) en condiciones estacionarias.

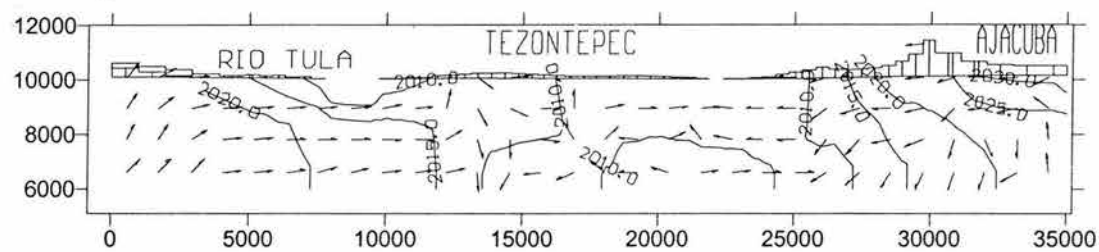


Figura V.25 Resultados del modelo sección del río Tula hacia Ajacuba.

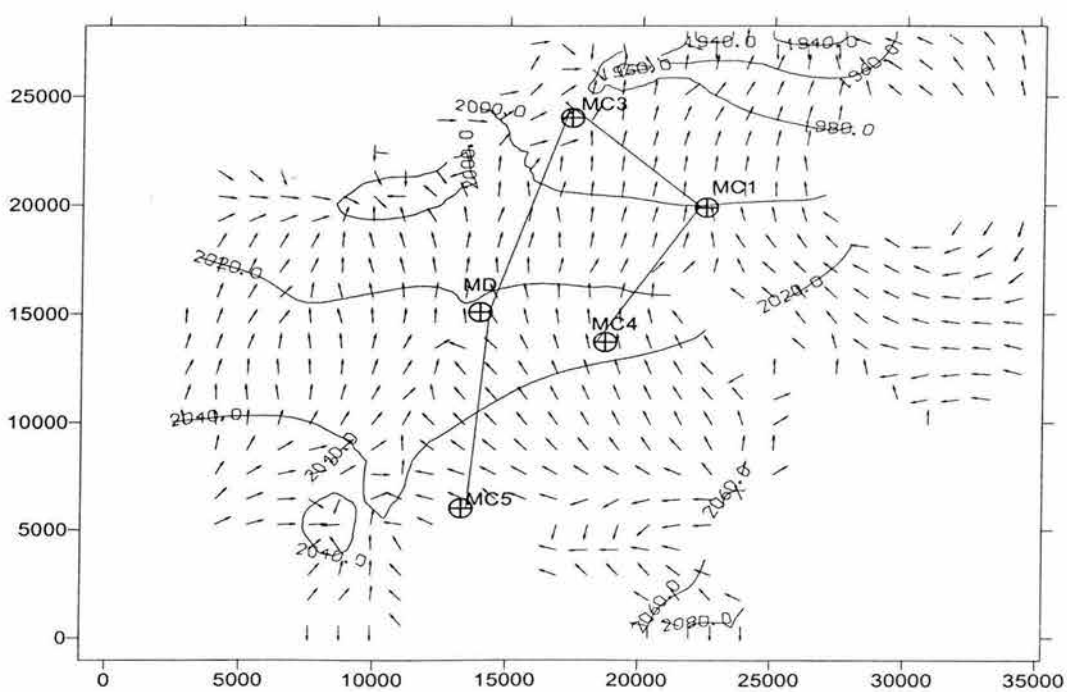


Figura V.26 Resultado del modelo en condiciones iniciales (1970), ubicando las secciones

La Figura V.27 muestra el resultado del modelo en condiciones transitorias para el año de 1982, el cual es similar a la configuración reportada por CNA para ese mismo año.

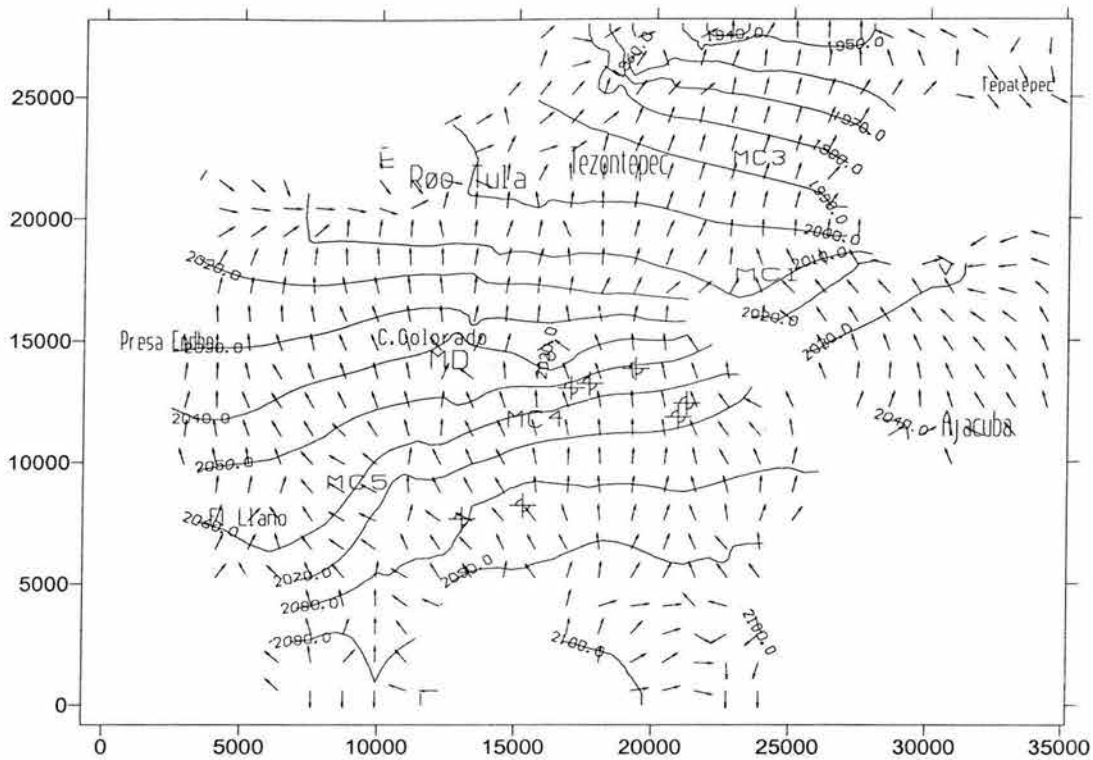


Figura V.27 Resultado del modelo en condiciones transitorias (1982)

V.4 Resultados del Modelo de Transporte

La modelación presenta como características principales por el riego sobre el valle que:

1.-En el primer periodo la concentración disminuye a lo largo de las fuentes de aguas residuales más antiguas

2.-En el último periodo las concentraciones mayores, aparecen al norte de las fuentes más antiguas, lo que refleja que la migración ocurre en la dirección de flujo (Figura V.28).

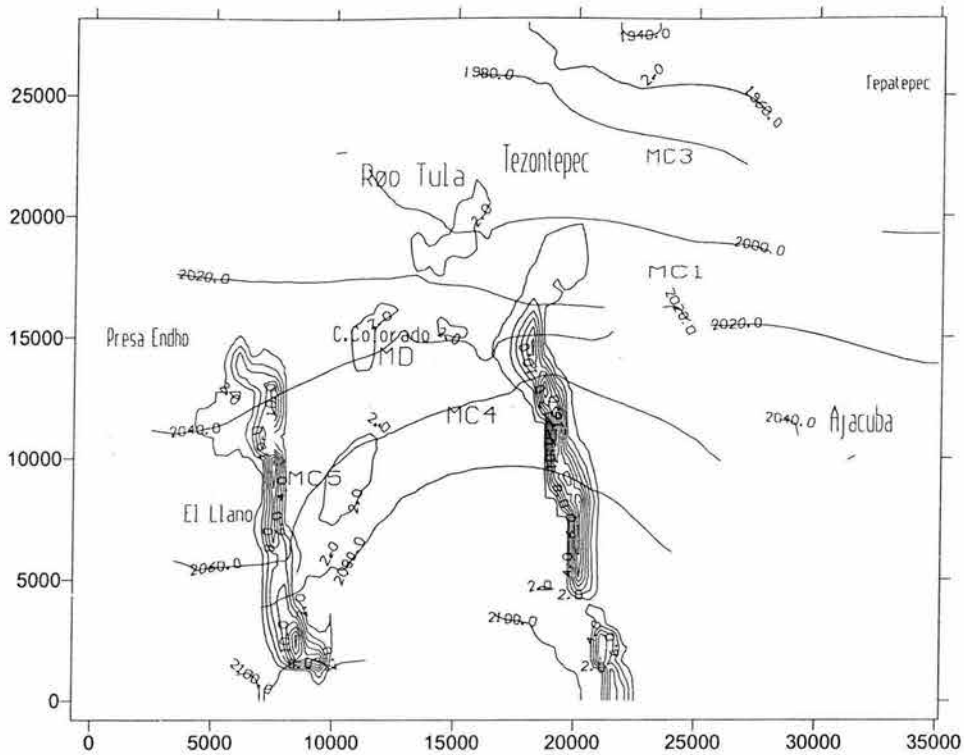


Figura V.28 Transporte de Nitratos 1984-1987

V.5 Conclusiones de la Modelación Hidrogeológica.

Existe una estrecha relación del comportamiento hidrogeológico con el marco estructural en el Valle del Mezquital.
Únicamente con una recarga extraordinariamente alta, se tendrían los valores estimados en estudios previos (1227 Mm^3/año).
Las diferentes fallas y fracturas fungen como sitios de recarga en el valle.
Las calizas subyacentes de la formación el Doctor, constituyen un acuífero profundo que alimenta en gran medida al acuífero superior
La carga que entra por el borde sur del valle representa una alimentación importante al acuífero, pero la calidad de esta es deteriorada por la infiltración de las aguas residuales del Gran Canal.

- ⇒ El agua de los manantiales de Cerro Colorado y Tezontepec tienen un mismo origen.
- ⇒ La presencia de la falla de C. Cuauhtemoc - Tepatepec permite que el flujo siga esta misma dirección.
- ⇒ No existe una relación hidráulica directa entre el lecho de la presa Endho y el acuífero.
- ⇒ La modelación de transporte presenta como características principales que:

    - En el primer periodo (1970-1977), la concentración disminuye a lo largo de las fuentes más antiguas.

- En el último periodo (1985-1987), las concentraciones mayores aparecen al norte de las fuentes más antiguas, lo que refleja que la migración ocurre en la dirección del flujo, disminuyendo la concentración por procesos de difusión y mezclado.

V.6 Resultados de la modelación Hidrogeoquímica

La Tabla V.14 muestra la composición de la solución de las diferentes muestras en moles/kg (molalidad). Se consideran muestras iniciales las de los canales y de pozos profundos como Ajacuba y CFE, mientras que norias, manantiales, piezómetros y pozos someros se consideran como mezclas de agua subterránea con agua superficial.

Elementos	Ajacuba	Piez. MC5	El Llano 1	La Noria	Cerro Col.	Tlaxcoapan	canal	CFE-12
N(5)	1.86E-04	2.57E-04	5.07E-04	5.65E-04	8.51E-04	1.91E-03	1.36E-04	2.53E-04
C(4)	9.04E-03	9.76E-03	6.44E-03	7.67E-03	9.21E-03	8.30E-03	3.25E-03	7.81E-03
Ca	9.04E-03	2.85E-03	1.87E-02	5.25E-03	2.28E-03	2.77E-03	8.84E-04	1.62E-03
Cl	1.24E-03	2.91E-03	3.85E-03	5.96E-03	5.14E-03	8.33E-03	3.92E-04	5.58E-03
K	1.24E-03		1.32E-03	7.81E-04	5.14E-03	8.32E-04	2.43E-04	9.14E-04
Mg	1.79E-03		6.64E-03	1.88E-03		1.73E-03	3.37E-04	1.94E-03
Na	5.14E-03	5.70E-03	1.03E-02	9.19E-03	9.93E-03	8.41E-03	1.19E-03	8.27E-03
O(0)	1.13E-04				7.51E-05	8.45E-05		
S(6)	9.14E-04	8.84E-04	2.20E-02	4.37E-03	1.74E-03	5.29E-04	3.50E-04	1.43E-03

Tabla V.14 Composición de las soluciones

Al graficar la concentración de nitratos, ésta aumenta hacia el centro del valle en la zona aledaña al río Salado.

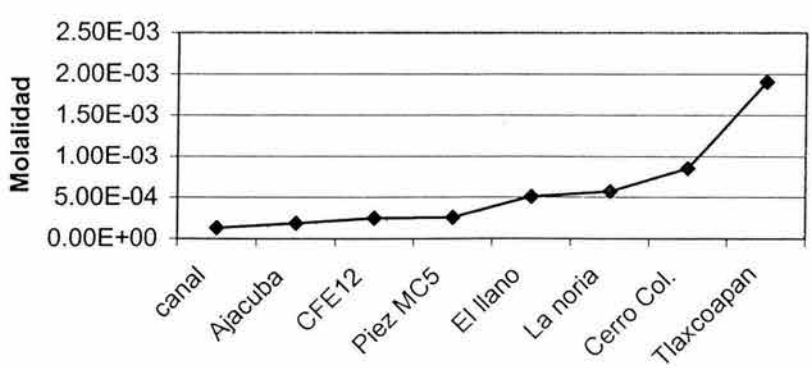


Figura V.29 Nitratos en Solución

La siguiente gráfica compara la solución de las diferentes muestras, en donde el agua del pozo del Llano es la que más varía de la composición general. .
El pozo de Ajacuba se presenta como agua meramente subterránea en ambiente con alto contenido de calcio el cual no se ha intercambiado por el sodio.
Según esta gráfica el pozo de CFE a pesar de ser un pozo profundo presenta cierta mezcla con agua superficial, similar al agua de la noria.

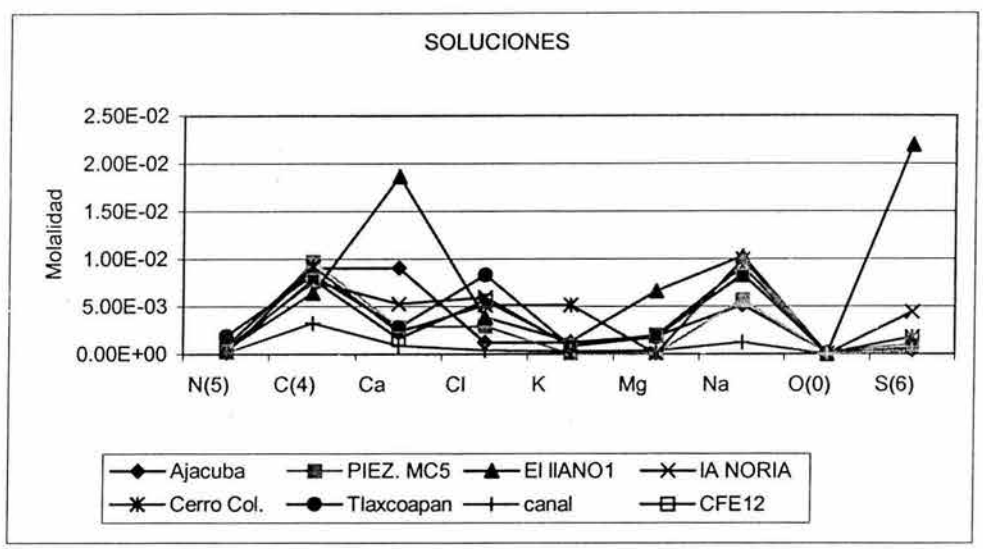


Figura V.30 Composición de las soluciones

Ejemplo 1: Sitio MD bajo tierra de riego con aguas negras, aledaño al manantial de Cerro Colorado, a diferentes profundidades y a diferentes tiempos.

Año	H_2 (g)	O_2 (g)	NO_3	HCO_3	Total CO_2	IS CO_2
1995	-22	-40.83	5.5	408	6.686e-3	-1.54
1996	-23.91	-36.71	13.3	649	1.064e-3	-1.33
1997	-23.92	-36.71	14.9	589	-.653e-3	-1.60

Tabla V.15 Relación de valores con respecto al tiempo, sitio MD1 a 2.5 m

Observaciones:

Incremento de HCO_3, y pH, y presencia de CO_2 que indican oxidación de materia orgánica, en los primeros metros.

Año	H_2 (g)	O_2 (g)	IS O_2	NO_3	Total CO_2	IS CO_2
1995	-22	-40.83	1.129e-4	4.422e-3	7.594e-3	-1.48
1996	-33.56	-17.5	4.032e-5	3.244e-3	9.456e-3	-1.47
1997	-33	-19.49	2.9e-5	4.09e-3	9.899e-3	-1.32

Tabla V.16 Relación de valores para el sitio MD2 a 5m de profundidad, (molaridad).

Observaciones:

Es posible definir un ambiente reductor a profundidad en donde la denitrificación da lugar a un descenso en la concentración de nitratos y un valor disminución en el IS del CO_2.

Ejemplo 2: Mezcla de agua de un piezómetro que reporta disminución de NO_3 a través del tiempo, con agua superficial del emisor central, que reporta muy bajo NO_3.

En la solución 1, la cual corresponde a agua subsuperficial en conexión hidráulica con agua negra de riego, se observa la presencia de compuestos de carbonatos; la solución 2 de donde proviene el agua negra de riego, presenta una gran variedad de compuestos de fierro, como hidróxidos y un alto contenido de materia orgánica.

SOLUCION 1 MC3			
Temp.	19.9		
PH	7		
Pe	10.22		
Redox	pe		
Units	mg/kgw		
C(4)	420	mg/kgw	as HCO3
Ca	162	mg/kgw	
Cl	282	mg/kgw	
K	16.5	mg/kgw	
Mg	40.9	mg/kgw	
Na	133	mg/kgw	
N(5)	11.8	mg/kgw	as NO3
S(6)	59.9	mg/kgw	as SO4
SOLUCION 2 EMISOR CENTRAL			
temp	25		
PH	7		
Pe	4		
redox	pe		
Unidades	mg/kgw		
Na	134	mg/kgw	
K	21.8	mg/kgw	
Mg	20.3	mg/kgw	
Ca	32.1	mg/kgw	
C(4)	417	mg/kgw	as HCO3
Cl	71	mg/kgw	
S(6)	99.9	mg/kgw	as SO4
N(5)	0.1	mg/kgw	as NO3
Fe	0.869	mg/kgw	
P	4.6	mg/kgw	
Mezcla1 MC3/EMISOR			
1	20		
2	10		

Tabla V.17 Solución ejemplo 2

Al efectuar la mezcla en una proporción de 10 a 20 se obtiene una solución con presencia de N_2 y amoniaco sin reportar NO_3, esto debido a las condiciones de pH y pe del medio.

Fase	IS	log IAP	log KT	
CH4(g)	-130.59	-175.01	-44.42	CH_4
CO2(g)	-1.5	-19.67	-18.16	CO_2
Fe (OH) 3(a)	2.28	20.28	17.99	$Fe(OH)_3$
FeS(ppt)	-133.86	-171.93	-38.07	FeS
Goetita	8.05	20.28	12.22	FeOOH
Yeso	-1.66	-6.24	-4.58	$CaSO_42H_2O$
H2(g)	-38.84	-38.84	0.00	H_2
H2S(g)	-130.69	-172.79	-42.10	H_2S
Hematita	18.09	40.55	22.46	Fe_2O_3
Hidroxiapatita	2.11	-38.13	-40.24	$Ca_5(PO_4)_3OH$
N2(g)	-3.11	-6.36	-3.25	N_2
NH3	-56.82	-61.44	-4.61	NH_3
O2(g)	-6.60	77.67	84.28	O_2
Pirita	-218.99	-305.89	-86.89	FeS_2
Siderita	-7.94	-18.81	-10.87	$FeCO_3$
Sulfuro	-97.77	-133.95	-36.18	S

Tabla V.18 Solución de la Mezcla

Observaciones:

Se da una sobresaturación de hidróxidos de fierro, hematita, y una subsaturación de pirita.
Reporta nitrógeno y amoniaco.
Refiere la presencia de un ambiente reductor y la ocurrencia de procesos de denitrificación.

Ejemplo 3: Mezcla río Salado con agua del manantial Cerro Colorado

Esto es lo que ocurre en la mayor parte del valle, agua residual de riego con agua subterránea en conexión hidráulica con el agua superficial.

SOLUCION 1 RIO SALADO			
temp	25		
pH	7		
pe	10.92		
redox	pe		
unidades	mg/kgw		
C(4)	882	mg/kgw	as HCO3
K	48.6	mg/kgw	
S(6)	76.7	mg/kgw	
Ca	54.4	mg/kgw	
Na	330	mg/kgw	
Mg	33.9	mg/kgw	
Cl	239	mg/kgw	
P	10.1	mg/kgw	
Fe	0.182	mg/kgw	

SOLUCION 2 AGUA MANANTIAL CERRO C.			
temp	20.3		
pH	7.28		
pe	10.94		
redox	pe		
Unidades	mg/kgw		
Na	230	mg/kgw	
C(4)	554	mg/kgw	as HCO3
P	0.3	mg/kgw	
Cl	150	mg/kgw	
N(5)	11.3	mg/kgw	as NO3
Ca	89.3	g/kgw	
Mg	33.7	mg/kgw	
K	36	mg/kgw	
S(6)	165	mg/kgw	
MEZCLA 1 AGUA MAN/A.RIO			
1	10		
2	20		

Tabla V.19 Solución ejemplo 3

MEZCLA:AGUA DE MANANTIAL CON AGUA DEL RIO SALADO

1.000e+01 Solución 1 RIO SALADO
2.000e+01 Solución 2 CERRO C.

Composición de la Solución		
Elementos	Molalidad	Moles
C	1.087e-02	3.261e-01
Ca	1.486e+00	4.457e+01
Cl	5.068e-03	1.520e-01
Fe	1.086e-06	3.259e-05
K	1.028e-03	3.084e-02
Mg	1.389e-03	4.167e-02
N	1.215e-04	3.645e-03
Na	1.145e-02	3.436e-01
P	1.152e-04	3.455e-03
S	1.411e-03	4.234e-02

Tabla V.20 Solución de la mezcla

Fase	SI	logIAP	logKT	
Calcita	0,92	-7,54	-8,46	CaCO3
CO2	-1,45	-19,61	-18,16	CO2
CH4(g)	-133,1	-177,48	-44,38	CH4
Fe(OH)3	1,19	19,18	17,99	Fe(OH)3
Goetita	6,98	19,19	12,21	FeOOH
Hematita	15,96	38,39	22,42	Fe2O3
N2(g)	-5,35	-218,11	-212,76	N2
NH3(g)	-58,91	-168,27	-109,36	NH3
O2	-5,26	78,92	9-84,18	O2
Pirita	-223,95	-310,75	-86,8	FeS2
Azufre	-99,23	-135,38	-36,15	S

Tabla V.21 Indices de Saturación

Observaciones:
A pesar de que el agua del manantial presenta NO_3, la mezcla sólo presenta NH_3 y N_2, con sobresaturación de hidróxidos de fierro, lo que indica la ocurrencia de procesos de amonificación y/ó denitrificación.
Se observa la pareja: oxidación de pirita-reducción de nitratos que involucra la oxidación de Fe(II) y S a través de las siguientes reacciones:

$$5FeS_2 + 14NO_3^- + 4H^+ \text{----------} 7N_2 + 5Fe^{2+} + 10SO_4^{2-} + 2H_2O$$

Si existe una disminución de Fe pero no un incremento de SO_4^{2-}

$$10Fe^{2+} + 2NO_3^- + 14H_2O \text{ ------ } 10FeOOH + N_2 + 18\ H^+$$

Este proceso se infiere por la alta proporción de hidróxidos de fierro.

Ejemplo 4: Mezcla de una solución inicial de agua subterránea prácticamente sin NO_3^-, con agua residual del río Salado.

SOLUCION 1 El LLANO 1		SOLUCION 2 RIO SALADO		
Temp	23.6	temp	25	
PH	6.93	pH	7.64	
Pe	3.77	pe	4	
Redox	Pe	redox	pe	
Unidades	mg/l	Unidades	mg/l	
Densidad	1	Densidad	1	
C (4)	392	C (4)	596.83	As HCO3
Ca	453	N (-3)	18.52	as NH4
Cl	82.7	Cl	243.2	
K	31.2	N(3)	0.137	as NO2

Mg	97.8	N(5)	0.348	as NO3
N(5)	0.3	K	37.2	
Na	143	Na	337	
S(6)	100	O(0)	0.95g/l	

Mezcla 1 Río/A. Subterránea
2 10
1 20

Descripción de la Solución	1	Descripción de la Solución	2
pH = 6.930		pH = 7.640	
pe = 3.770		pe = 4.000	
Actividad del agua = 0.820		Actividad del agua = 0.999	
Fuerza iónica = 5.023e+00		Fuerza iónica = 1.644e-02	
Masa de agua (kg) = 1.000e+00		Masa de agua (kg) = 1.000e+00	
Alcalinidad total (eq/kg) = 9.997e+00		Alcalinidad total (eq/kg) = 9.435e-03	
Total CO2 (mol/kg) = 1.058e+01		Total CO2 (mol/kg) = 9.802e-03	
Temperatura (deg C) = 23.600		Temperatura (deg C) = 25.000	
Balance eléctrico (eq) = -9.942e+00		Balance eléctrico (eq) = 3.551e-04	
Iteraciones = 14		Iteraciones = 10	
Total H = 1.209708e+02		Total H = 1.110259e+02	
Total O = 8.665464e+01		Total O = 5.559473e+01	

Tabla V.22 Solución ejemplo 4

Fase	SI	logIAP	logKT	
Anhidrita	-3.42	-7.77	-4.36	$CaSO_4$
Aragonita	1.85	-6.48	-8.33	$CaCO_3$
Calcita	2.00	--6.48	-8,33	$CaCO_3$
CO_2	1.73	-16.42	-18,15	CO_2
CH_4	-142.18	-186.24	-44.06	CH_4
Dolomita	4.32	-12.74	-17.06	$CaMg(CO_3)2$
Yeso	-3.39	-7.97	-4.58	$CaSO_4{:}2H_2O$
$N_2(g)$	-22.28	-233.34	-211.06	N_2
$NH_3(g)$	-71.82	-180.27	-108.45	NH_3

Tabla V.23 Índices de saturación ejemplo 4

Observaciones:
En esta mezcla no se reportan nitratos, sin embargo existe subsaturación de N_2 y de NH_3, lo que indica denitrificación.

Ejemplo 5. Agua subterránea con nitratos que se mezcla con agua residual:

Solución 1 El Llano		Solución 2 Canal	
Temp °C	23.6	temp	23.7
PH	6.93	PH	7.64
Unidades	mg/l	Unidades	mg/l
densidad	1	densidad	1
C(4)	392	C(4)	294
Ca	453	K	37.2
Cl	82.7	N(-3)	18.52
K	31.2	Cl	243.2
Mg	97.8	N(3)	0.137
N(5)	4.3	N(5)	0.348
Na	143	Na	337
S(6)	1280	S(6)	346.23

Tabla V.24 Solución Ejemplo 5

MEZCLA 1 Canal-Pozo

1	50
2	50

Elementos	molalidad
C(4)	4,82E-03
Cl	6,87E-03
K	9,52E-04
N(-3)	1,32E-03
N(3)	9,73E-06
N(5)	2,48E-05
Na	4,46E-02
S(6)	3,70E-03
Descripción de la solución	
PH	7,60E+00
Pe	4
alcalinidad total (eq/kg)	4,60E-03
temp °C	23,7

Tabla V.25 Mezcla ejemplo 5

Phase	SI	logIAP	logKT	
Calcita	0,07	-8,4	-8,47	CaCO3
CO2	-1,61	-19,77	-18,15	CO2
CH4(g)	-4,39	-48,51	-44,12	CH4
H2S(g)	-3,48	-45,27	0	H2S
N2(g)	-0,22	-3,47	-3,26	N2
NH3(g)	-7,96	-12,52	-4,52	NH3
O2	-69,2	14,37	83,58	O2
Sulfuro	-2,19	-38,08	-35,9	S

Tabla V.26 Índices de Saturación, ejemplo 5

Observaciones

Las aguas residuales comúnmente presentan altas concentraciones de NH_3, que se conserva al mezclarse en un ambiente reductor.

En la mezcla con agua subterránea, aun con presencia de NO_3^-, predomina el NH_3, lo que implica la presencia de un ambiente reductor, la disminución de los nitratos puede deberse a la mezcla de aguas.

El NH_3 es altamente soluble por lo que su índice de saturación es tan bajo.

Al disminuir el contenido de materia orgánica aumenta la concentración de NH_3.

Ejemplo 6: Mezcla de agua de un pozo profundo (400 m) con datos de 1985, con agua de un piezómetro a 25 metros de profundidad.

SOLUCION 1 CFE12		SOLUCION 2 MC5-1	
Temp	23.6	Temp	22
PH	7	pH	6.25
pe	4	pe	4.4
Redox	Pe	redox	pe
unidades	mg/l		mg/l
Density	1	densidad	1
C(4)	476	C(4)	501
Ca	65	O(0)	4.2
Cl	197.7	Fe	0.04
K	35.7		
Mg	47	N(-3)	0.06
N(5)	3.54	N(5)	12.2
Na	190	Alcalinidad	411
S(6)	137.47	S(6)	60

Tabla V.27 Soluciones ejemplo 6

Composición de la solución			Índices de Saturación			
Elementos	Molalidad	Moles	Fase	SI	log IAP	log KT
C(4)	7.810e-03	7.810e-03	Anhidrita	-1.89	-6.24	-4.36 CaSO4
Ca	1.624e-03	1.624e-03	Aragonita	-0.34	-8.66	-8.33 CaCO3
Cl	5.583e-03	5.583e-03	Calcita	-0.19	-8.66	-8.47 CaCO3
K	9.141e-04	9.141e-04	CO2(g)	-1.44	-19.59	-18.15 CO2
Mg	1.935e-03	1.935e-03	Dolomita CaMg(CO3)2	-0.19	-17.25	-17.06
N(5)	2.530e-04	2.530e-04	Yeso	-1.66	-6.24	-4.58 CaSO4:2H2O
Na	8.274e-03	8.274e-03	H2(g)	-22.00	-22.00	0.00 H2
S(6)	1.433e-03	1.433e-03	O2(g)	-39.59	44.00	83.59 O2

Tabla V.28 Solución Inicial Pozo CFE12

Composición de la solución			Descripción de la solución		
Elementos	Molalidad	Moles	pH = 8.294 Ajustando alcalinidad		
Alcalinidad	8.221e-03	8.221e-03	pe = 4.400		
C(4)	8.219e-03	8.219e-03	Actividad del agua = 1.000		
Fe	7.170e-07	7.170e-07	fuerza iónica = 5.548e-03		
N(-3)	3.527e-06	3.527e-06	Masa de agua (kg) = 1.000e+00		
N(5)	1.969e-04	1.969e-04	Total CO2 (mol/kg) = 8.219e-03		
O(0)	1.314e-04	1.314e-04	Temperatura (deg C) = 22.000		
S(6)	6.252e-04	6.252e-04	Balance eléctrico (eq) = -9.664e-03		
			Pares REDOX		
			Parejas Redox	pe	Eh (volts)
			N(-3)/N(5)	4.9147	0.2878
			O(-2)/O(0)	12.4318	0.7280

Tabla V.29 Solución 2 piezómetro MC5-1

Usando la mezcla 2.00 CFE12
5.00 MC5-1

Fase	IS	logIAP	LogKT	
Calcita	-0,13	-8,6	-8,47	CaCO3
CO2	-1,54	-19,69	-18,15	CO2
CH4(g)	-138,97	-183,14	-44,18	CH4
Fe(OH)3	0,69	18,65	17,95	Fe(OH)3
Goetita	6,52	18,65	12,12	FeOOH
Hematita	15,05	37,29	22,25	Fe2O3
N2(g)	-14,24	-225,9	-211,66	N2
NH3(g)	-66,47	-174,25	-106,77	NH3
O2	-1,98	81,72	83,7	O2
Pirita	-236,37	-322,71	-86,34	FeS2
Azufre	-104,08	-140,03	-35,95	S

Tabla V.30 Índices de saturación ejemplo 6

Observaciones:
La presencia de Nitratos y sulfuros de hierro en las soluciones iniciales, permite las reacciones de oxido-reducción dando lugar a N_2 , NH_3, hidroxidos de hierro y sulfatos

Conclusiones de la Modelación Hidrogeoquímica

- ⇒ A partir de esta modelación hidrogeoquímica se puede concluir que la evolución de nitratos en el área es función de las condiciones de pH y redox que predominen en los diferente puntos muestreados sin hablar de un proceso en general.
- ⇒ La variación de nitratos en algunos sitios paralelos a las líneas de flujo se debe a la mezcla de diferentes aguas, así como al tiempo de transporte de estas y sus procesos en el medio, como nitrificación y denitrificación.
- ⇒ Los procesos que predominan en el valle son los de reducción y denitrificación
- ⇒ Las aguas negras contienen como forma amoniacal el NH_3 .Las reacciones del NH_3 al mezclarse con el agua subterránea dependen del medio, al ocurrir una disminución del pH y un incremento del pe el NH_3 se transforma en NH_4^+ y NO_3^-.
- ⇒ En la mezcla de aguas superficiales con agua subterránea, aun con presencia de NO_3^-, predomina el NH_3, lo que implica un ambiente reductor.
- ⇒ La mezcla de agua negra con agua subterránea no produce una alta proporción de NO_3^-, pero incrementa los nitritos y formas amoniacales; esta mezcla de agua da lugar a una disminución de los nitratos presentes en el agua subterránea.
- ⇒ Las reacciones óxido-reducción varían con la profundidad y con el tiempo, predominando la reducción.
- ⇒ Al disminuir el contenido de M.O. aumenta la concentración de NH_3, debido al ambiente reductor.

V.7 Conclusiones

A modo de síntesis se presenta el modelo de comportamiento del sistema.

En el Valle del mezquital existen tres acuíferos, un acuífero superficial libre, producto del agua superficial que se infiltra en el suelo hasta encontrar una capa arcillosa que la retiene, su importancia económica es mínima. Un segundo acuífero lo conforman la rocas volcánicas del terciario y cuaternario, este acuífero es el más importante geohidrológicamente hablando, ya que prácticamente de éste se abastece el área. Por último un acuífero profundo en rocas calcáreas del cretácico, que se alimenta a través del sistema de fallas y fracturas que fungen como drenes de agua subterránea proveniente del sur y oriente del Valle. Este tercer acuífero varía de confinado a semiconfinado y su

importancia radica en alimentar al acuífero principal a través de sus estructuras, así como por su flujo ascendente.
Debido al incremento en el uso de aguas negras para riego, el riesgo de afectación al acuífero también se ha incrementado, sin embargo esta ha resultado mínima, gracias a los diversos procesos que se llevan a cabo en el ambiente suelo-agua.
A pesar de encontrar diferentes formas de N en el agua de riego, principalmente amoniaco, al entrar éste en un medio reductor se reduce a nitritos, o bien por su baja concentración de nitratos estos disminuyen al mezclarse con aguas de diferente origen en el subsuelo. Estos procesos dan lugar a concentraciones aceptables de nitratos en el acuífero o bien a su ausencia.
Se pudo determinar que los procesos de oxido-reducción se dan en función del tipo de suelo y profundidad de los niveles estáticos, así como otros factores como el tipo de flujo. Sin embargo el proceso de denitrificación ocurre en forma importante en el acuífero, lo que ayuda en gran medida a su protección.

Como conclusiones generales se enlistan las siguientes:

- ⇒ A pesar de que la concentración de nitratos se ha incrementado con el tiempo, este incremento no es en mucho lo esperado en función del aporte proporcionado.
- ⇒ Ocurre una estrecha relación del comportamiento hidrogeológico con el marco estructural del valle.
- ⇒ Existe una recarga variable proveniente del acuífero profundo, que da lugar a la mezcla del agua del acuífero principal.
- ⇒ Las fallas fungen como sitios de recarga.
- ⇒ No todo el acuífero tiene conexión hidráulica directa con el agua superficial de riego, debido en parte a la presencia de una capa impermeable arcillosa.
- ⇒ La técnica de riego por inundación, a pesar de permitir la infiltración del agua residual, también da lugar a que el agua sufra procesos de evaporación y asimilación antes de llegar al subsuelo, y que la zona oxidada desaparezca o bien sea mínima.
- ⇒ La caracterización de las aguas subterráneas en el área permite clasificarlas como: agua de canales y agua de manantiales, así como una mezcla de ambas.
- ⇒ Las aguas subterráneas son principalmente bicarbonatadas y mixtas
- ⇒ La disminución o ausencia de nitratos se encuentra en estrecha relación con un gradiente reductor a partir de una zona de recarga.
- ⇒ El sitio con flujo difusivo relacionado con un canal de aguas negras, tiene un menor espesor de suelo y una baja concentración de O_2, por lo que la concentración de NO_3^- disminuye a profundidad.
- ⇒ En el sitio con flujo advectivo, el suelo a mayor profundidad es más ácido y la concentración de NO_3^- depende del origen del flujo, a mayor profundidad la concentración es mayor, esto está ligado al tiempo y tipo de transporte.
- ⇒ La ausencia de nitratos en sitios aledaños a canales, muestra un ambiente más reductor o menos oxidante. Una relación importante en estos sitios, son las bajas temperaturas que presentan, con ligeras fluctuaciones de O_2.
- ⇒ La ausencia de nitritos no es una prueba concluyente de que no se lleve a cabo el proceso de denitrificación, recordando que los nitritos son sólo un producto intermedio del proceso, el producto final es el N_2.

- ⇒ Existen en el medio condiciones reductoras para la ocurrencia de la denitrificación, este proceso explicaría la ausencia de nitratos en sitios en donde se reportaran anteriormente.
- ⇒ Otro proceso que explica la ausencia de nitratos es su remoción por transporte.
- ⇒ La integración de las conclusiones de la modelación hidrogeológica e hidrogeoquímica, permite concluir que la denitrificación no es un proceso que predomine en el valle, y por lo tanto no es el factor determinante en la ausencia o disminución de nitratos.

Bibliografia

Allison, J. D., Brown, D. S., Novogradac, K. J., 1991. MINTEQA2/PRODEFA2, A geochemical assesment model for enviromental systems: version 3.0. User,s Manual. EPA/600/3-91/021, Washington, DC. USA.

American Society of Agronomy, Inc, Crop Science society of America Inc, Soil Science Society of America, Inc., 1982. Nitrogen in Agricultural Soils, FranK J. Stevenson editor. Madison Wisconsin USA.

APHA, 1995, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF, Washington D.C., p. 4-86, 4-87

Appelo, C.A.J. & Postma D. 1996. Gechemestry, Groundwater and Pollution, ed. A.A.Balkema, Brookfield.

Armienta, M.A., Zamora, V.F., Juárez. (1987) Manual para el análisis químico de aguas naturales en campo y en laboratorio, UNAM. Instituto de Geofísica, C.U. Méx.

Bahri A., 1999. Agricultural reuse of wastewater and global water management. Wat. Sci. Tech. 40, 339-346.

Bear, J., 1979. Dynamics of fkuids in Porous Media, Elsevier, New York, 764 pp.

Beck, B.F., Asmussen, L., Leonard, R. 1985. Relationship of geology, physigraphy, agricultural land use, and grounwater quality in southwest Georgia. Ground Water, Vol. 23, No. 5, pp. 627-634.

Behnke, J. 1975. A summary of Bigeochemestry of Nitrogen Compounds, Journal of Hydrology, 27 (1975)135-167.

Beek, J., M.J. Frissel. 1973, Simulation of nitrogen behavior in soils. Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen, The Netherlands.

Berry, F.A.F. 1969 Relative Factors influencing memebrane filtration effects in geological environments. Chem. Geol.,4 pp.295-301.

BGS, CNA, 1995. Impact of wastewater reuse on Groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, México. Phase 1 Report, February 1995. BGS Technical report WD/95/24

California State Water Resources Control Board, 1989. review Committee report on evaluation of sources of nitrate in ground water of Chico Urban area Butte County, 17p.

Campos-Enriquez. J. O., Rodríguez M., Delgado-Rodríguez O. Y Milan M., 2000. Contribution to the tectonics of the northern portion of the central sector of the trans-Mexican Volcanic Belt. Geological Society of America Special Paper 334, 223-233.°

Canter, L. W., Knox, R., Fairchild D., 1990, Groundwater Quality protection, Lewis publisher's inc. 557 p.

Canter, L.W., 1997, Nitrates in Groundwater: University of Oklahoma, Lewis Publishers, 263p.

Carrillo B. José, 1971. La Plataforma Valles San Luis Potosi. Bol. De la Asoc. Mex.de Geologos Petroleros, v.13 p.p.1-98.

C.F.E., 1984, Determinación de los sitios para la perforación de doce pozos en las proximidades del río Tula y proyecto de la conducción a la refinería Miguel Hidalgo en Tula Hgo., 1984.

C.F.E., 1985, Resumen de investigación hidrogeológica C.T. Tula.

C.F.E., 1987, Resumen Geohidrológico C.T. Tula. Reporte Interno.

C.F.E., Abigail A. Cervantes,1990, Estudio Geológico del Valle de Tula, Hgo.

C.F.E., 1990, Informe Final C.T. Tula Hidalgo.

CNA and BGS, 1998, London School of Hygiene and Tropical Medicine, University of Birmingham, Impact of wastewater reuse on Groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico. Final Report-November 1998. BGS Technical report WC/98/42

Custodio E., M. R. Llamas, 1983, Hidrología Subterránea, Ediciones Omega, S.A..

Darrel W. Nelson , 1982, Gaseous Losses of Nitrogen Other Than Through Denitrification, Nitrogen in Agricultural soils, Madison Wisconsin USA.

Davis y De Wiest, 1967, Hydrogeology. John Wiley & Sons, New York 463pp

De Cserna Z., de la Fuente - Duch M., Palacios-Nieto M., L., Mitre-Salazar L.M., Mota-Palomino R., 1987, Estructura geológica - gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México: Uni. Nal. Autón. Mex. Inst. Geol. Vol. 104

D.D.F., 1975, Secretaría de Obras y Servicios. Dirección General de obras hidráulicas, sistema de drenaje profundo.

Del Arenal , R., 1985, Estudio Hidrogeoquímico de la porción Centro Oriental del Valle del Mezquital , Hidalgo. Instituto de Geología,UNAM. Revista 6 Vol.1,86-97

Downs T.J., Cifuentes E., Ruth E., Suffet I.M., 1998. Effectiveness of a natural treatment in a wastewater irrigation district of the Mexico City region: a synoptic field survey. Water Environ. Res., 72, 4-21.

Drever, J. I. 1982, The Geochemestry of Natural Waters . Prentice-Hall Inc. 388p.

Foster, S.S.D. y R.I. Crease. 1972, Nitrate pollution of chalk groundwater in East Yorkshire: a hydrogeological appraisal. Groundwater Pollution in Europe, ed. J.A. ColeWater Information Center, Port Washington, N.Y. ,pp 269-271.

Freeze, R. Allan y Cherry, J.A. 1979, Grounwater, De Prentice, Hall. 604p.

Fries, Carl, Jr., 1962, Hoja Pachuca 14Q-e(11),con Resumen de la geología de la hoja Pachuca, Estados de Hidalgo y México: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Carta Geológica de México, serie de 1: 100, 000, mapa con texto.

Gallali, T., A. Gluckert, and F. Jacquin. 1975, Etude de la distribution des sucres amines dans la matiere organique des sols . Bull. Ec. Natl. Super. Agron. Ind. Alim. 17: 53-59.

Gallegos E., Warren A., Robles E., Campos E., Calderon A., Sainz M.G., Bonilla P., Escolero O., 1999. The effects of wastewater irrigation on groundwater quality in Mexico. Wat. Sci. Tech. 40, 45-52

García A. M. y Benito Del Castllo, 1988, Cromatogafía líquida de alta resolución.

Gelhar, L. W. and J. I. Wilson, 1974. Ground water quality modelling. Ground Water Vol.22, pp. 399-408.

Geocalli 1981, Actualizaciónn del estudio Geohidrológico del Valle del Mezquital, Hidalgo. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

GEOPESA, 1979, Servicio de prospección y levantamientos Geológicos, Geofísicos en la zona de Polotitlan Tecozautla, edo de México e Hidalgo.

Gillham, R.W., Cherry, J.A. 1978, Field evidence of denitrification in Shallow Groundwater Flow System, Water Poll. Res. Canada Vol. 13

GWW, version 1.10, 1990, Groundwater Software for Windows, Dr. D. Braticevic y Dr. J. Karanjac, United Nations

Hantzche, N. N., Finnemore, E. J. 1991, Predicting ground-water nitrate-nitrogen impacts. Ground Water, Vol. 33, No.2, pp. 284-290

Henry, M. J., Mc. Ready R.G.L., Gould, W.D. 1984, Distribution, source, and evolution of nitrate in a Glacial Till of Southhern Alberta, Canada, Elsevier Science Publishers, B.V.

Hidrotec 1970, Estudio geohidrológico del Valle del Mezquital y zonas adyacentes. Secretaría de Recursos Hidráulicos.

Howard, D.L. , J.I. Frea, R.M. Pfister, and P.R. Durgan, 1970, Biological nitrogen fixation in Lake Erie. Science 169: 61-62.

Huizard-Alvarez, Hernández G., Carrillo-Martínez M., Carrillo-Rivera J.J., Hergt T., y Angeles G., 2003. Geologic Structure and groundwater flow in the Pachuca-Zumpango sub-basin, central México. Environmental Geology 43: 385-399

Hutchinson, G.L., 1954, The biochemestry of the terrestrial atmosphere. P.371-433. In G.P. Kuiper(ed) The solar system. Vol. II The earth as planet. Univ. of Chicago, Press Chicago.

INEGI, 1992, Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo. Instituto Nacional de Geografía y Estadística, México D.F.

Instituto de Geología, UNAM, 1972, Carta Geológica del Estado de Hgo.

Jiménez B.C., Chávez A., Barrios J.E., Pérez R., 2000, Impact and potential of reused water in the Mezquital Valley. Water 21, June 2000, 34-36.

Jiménez B.C., Homero L., 1998, Physico-chemical and bacteriological characterization of wastewater from Mexico City. Wat. Sci. Tech. 37, 1-8

Khan, S.U. 1971, Nitrogen fraction in a gray wooded soil as influenced by long-term crop-ing systems and fertilizer. Can. J. Soil Sci. 51: 431-437.

Kreitler, C. W., and Jones, D.C., 1975, Natural soil nitrate: the cause of contamination of ground water in runnels County, Texas. Ground Water, Vol. 13, pp. 56-63

LANDSAT, 1985, Imágenes de Sátelite del área de Tula de Allende escala 1:50,000

Larry W. Canter, Robert, C. Knox., Deborah M. Fairchild, 1990, Groundwater Quality Protection. Lewis Publishers inc. 557p.

Namdev, K.N. , and J.N. Dube. 1973, Residual effect of urea and herbicides on hexosamina content and urease and proteinase activities in a grassland soil. Soil Biol. Biochem.5: 855-859.

Nimah, M.N. y R.J. Hank. 1973. Model for estimating soil, water, plant and atmospheric interrelations: I. Description and sensitivity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37:522-527.

OPS/ALMS. 1980, Criterios de salud ambiental, No. 5 Nitratos, Nitritos y Compuestos nitrosos., 109 p.

Parkhurst, D. L., D. C., Thorstenson, and L. N. Plummer. 1980, PHREEQE- a computer program for geochemical calculations USGS/WRI-80-96.195p.

Patrick, W.H., Jr., y M.B. Sturges. 1955, Concentration and movement of oxygen as related to absorption of ammonium and nitrate nitrogen by rice. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 19: 59-62.

Payne, B.R., 1975, La interacción del agua de riego con el agua subterránea y el río Tula en el Valle del Mezquital, Hgo.: Informe final de la sección de Hidrología Isotópica de la OIEA para la SARH, pp12-17.

Piskin, R. 1973. Evaluation of nitrate content of groundwater in Hall County, Nebraska. Ground Water, Vol.11, No.6 pp.4-13

Pourbaix, M.J.N., J. van Muylder, y N. de Zhoubov. 1963, Atlas d'Equilibres Electrochémiques à 25ºC. Gauthier-Villars, Paris (J.A. Franklin, trans., Pergamon Press, London, 1966)

Robertson, J.B. 1974, Digital modeling of radioactive and chemical waste transport in the Snake River Plain aquifer at the national reactor testing station, Idaho U.S. Geol. Survey., Water resource.

SARH., 1981, Actualización del estudio Geohidrológico del Valle del Mezquital Hgo.

Seager, S.L. , Slabaugh, M.R. 1987, Chemestry for Today. General, orgánic and Biochemestry. West Publishing Company.

Secretaría de Obras y Servicios, Dirección General de Obras Hidráulicas, D.D.F., 1975, Sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México.

Segerstrom, K., 1962, Geology of south-central Hidalgo and north-eastern México. US Geologic Survey 1104C, pp 87-162.

Shipper, L. A. Cooper, A. B., Dyck, W. J. 1990, Mitigating non point-source nitrate pollution by riparian zone denitrification in: Nitrate contamination, exposure, consequences and control. I. Bogardi and R. D. Kuzelka, eds.,

Siebe C., Cifuentes E., 1995, Environmental impact of wastewater Irrigation in Central Mexico: An Overview. Int J. Environ. Health Res. 5, 161-173.

Springer-Verlag Berlin, pp. 401-414.

Stevenson, F.J. 1962. Chemical state of the nitrogen in rocks. Geochim. Cosmochim. Acta 26: 797-809.

Stevenson F.J. 1982, Inorganic Forms of Soil Nitrogen. Copyright 1982. Nitrogen in Agricultural Soils:67-114.

Strahler N. Arthur 1981, Physical Geology, Harper & Row, Publishers, New York.

Stuart, M.A., Rich, F.J. Bishop, G.A. 1995, Survey of nitrate contamination in shallow domestic drinking water wells of the inner costal plain of Georgia Ground Water, Vol. 33, No.2, pp. 284-290.

Taller de Fotograbado y Cartografía, 1989, Fotografías aéreas de Tula Hgo.,

Tanji, Keneth K. 1982. Modeling of the soil Nitrogen Cycle. Copyright 1982, Nitrogen in Agricultural Soil. Frank J. Stevenson Ed. 721-770

Trudell, M.R., Gillham, R.W., Cherry, J.A., 1986, An in Situ study of the occurrence and rate of Denitrification in Shallow Unconfined sand aquifer. Journal of Hydrology, 83(1986) pp. 251-268.

U.S.Environmental Protection Agency.1975, Water programs: national interim primary drinking water regulation. Federal register, 40, no. 248.

V. Belousov, 1977, Geología Estructural, Ed. MIR, México.

Vmodflow, 1997, Manual de referencia, Waterloo Centre for Groundwater Research University of Waterloo and Waterloo Hydrologic Software.

W.H.Patrick Jr.,1982, Nitrogen Transformation in Submerged Soils, Nitrogen in Agricultural soils, Wisconsin, USA.

Walker, W.H. 1973, Groundwater nitrate pollution in rural areas. Groundwater, Vol. 11,No.6, pp 19-22

Wehrmann, H.A.1984, Managing groundwater nitrates quality by mass balance modeling in the Rocktone-Roscoe área, Illinois. In proc. of the NWWA Eastern Regional Conference on Groundwater Management, National Water Well Assoc. Dublin, pp 558-587.

Wilson, B.W. ,Hernández, J.P., Meabe, E., 1955, Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del Estado de Querétaro. Soc. Geol. Mex. 18, pp 1-10.

Young, J.L. 1962, Inorganic soils nitrogen and carbon: nitrogen ratios of some Pacific north-west soils. Soil Sci. 93:397-404.

Young, J.L., y R.W. Aldag. 1982, Inorganic Forms of Nitrogen in Soil. Copiright 1982. Nitrogen in Agricultural soils. 1982: 43-62.