

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación en la región
hidrogeológica Saltillo-Ramos Arizpe

Por:

Jesús Hernández Pérez

Tesis

Presentada como requisito parcial
Para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Marzo de 2006

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación en la región
hidrogeológica Saltillo-Ramos Arizpe

Tesis realizada por:

JESÚS HERNÁNDEZ PÉREZ

Que someten a consideración el H. jurado examinador como requisito parcial
para obtener el título de:

Ingeniero Agrónomo en Irrigación

Aprobada:

Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho
Asesor principal

Ing. Arturo Monroy Nieto
Asesor

M.C. Luís Samaniego Moreno
Asesor

Dra. Iliana Hernández Javalera
Asesor

Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Marzo de 2006

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCION	1
Objetivos	2
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Contaminación del Agua Subterránea.....	3
Vulnerabilidad de Acuíferos a la Contaminación	4
Definiciones de Vulnerabilidad a la Contaminación por Diferentes Autores	5
Metodología DRASTIC	6
Parámetros de la metodología DRASTIC.....	7
Aplicación del Método DRASTIC.....	16
MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
Descripción del Acuífero Saltillo-Ramos Arizpe	17
Localización	17
Distritos y Unidades de Riego	18
Usuarios Mayores de Agua Subterránea	18
Estudios Técnicos Realizados con Anterioridad.....	19
Fisiografía.....	21
Provincias Fisiográficas	21
Condiciones Climáticas	21
Temperatura Media Anual	22
Precipitación Media Anual	22
Evaporación Potencial Media Anual	23
Hidrografía.....	23
Región Hidrológica, Cuenca y Subcuenca.....	23
Geomorfología.....	24
Estratigrafía	25
Jurásico Superior	25
Cretácico Inferior	26
Cretácico Superior	28
Terciario Inferior.....	30
Geología Estructural.....	31
Hidrogeología	32
Metodología.....	34
Aplicación del la Metodología DRASTIC	34

RESULTADOS	37
Profundidad	37
Recarga	38
Acuífero	41
Suelo	42
Topografía	46
Impacto en la Zona No Saturada	50
Conductividad Hidráulica	51
Índices Encontrados	56
CONCLUSIONES	57
RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	59

INDICE DE CUADROS

	Página
CUADRO 2.1. MUESTRA LOS VALORES PARA LA PROFUNDIDAD	8
CUADRO 2.2. VALORES DE RECARGA NETA	9
CUADRO 2.3. VALORES PARA EL MEDIO ACUÍFERO	10
CUADRO 2.4. CORRESPONDIENTE AL MEDIO DEL SUELO	12
CUADRO 2.5. VALORES DE TOPOGRAFÍA	13
CUADRO 2.6. IMPACTO EN LA ZONA NO SATURADA	14
CUADRO 2.7. VALORES PARA LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	15
CUADRO 2.8. ÍNDICES DE PONDERACIÓN	15
CUADRO 4.1. VALORES OBTENIDOS PARA LA PROFUNDIDAD MEDIA.....	39
CUADRO 4.2. VALORES OBTENIDOS PARA LA RECARGA.....	40
CUADRO 4.3. VALORES OBTENIDOS PARA EL TIPO DE ACUÍFERO.....	44
CUADRO 4.4. VALORES OBTENIDOS PARA EL TIPO DE SUELO.....	45
CUADRO 4.5. VALORES OBTENIDOS PARA LA TOPOGRAFIA (PENDIENTE MEDIA)	47
CUADRO 4.6. VALORES OBTENIDOS PARA EL IMPACTO EN LA ZONA NO SATURADA	52
CUADRO 4.7. VALORES OBTENIDOS PARA LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	56
CUADRO 4.8. VALORES OBTENIDOS PARA EL ÍNDICE DRASTIC	57

INDICE DE FIGURAS

	página
FIGURA 3.1 UBICACIÓN DEL ACUÍFERO SALTILLO-RAMOS ARIZPE	18
FIGURA 4.1. MAPA DE PIEZOMETRÍA.....	38
FIGURA 4.2 MAPA DE EDAFOLOGÍA.....	43
FIGURA 4.3 MAPA TOPOGRÁFICO.....	49
FIGURA 4.4 MAPA DE HIDROGEOLOGÍA.....	55
FIGURA 4.5 PLANO DE VULNERABILIDAD	60

RESUMEN

A partir de un Sistema de Información Geográfica y con la metodología DRASTIC se evalúa la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Saltillo-Ramos Arizpe que comienza a partir de un mapa base del Estado de Coahuila, para tales efectos se comienza con la georeferenciación y cuadriculando éste para generar así los nodos en los cuales se concentra la información que la metodología requiere y con esto generar un mapa de Vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea.

Con la metodología DRASTIC, el índice bajo esta en el orden de 50 a 100 y en el caso extremo el índice es mayor a 145. En el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe se obtuvieron rangos de vulnerabilidad que van desde baja hasta alta Para la de mayor extensión y mas presencia dentro del acuífero tiene una superficie de 1142.41 Km² siendo esta una vulnerabilidad media con rangos de 100 a 120. en segundo termino se encuentra la vulnerabilidad baja con índices menores a 100 y ocupa el 11% de todo el acuífero y la vulnerabilidad alta es la que ocupa menor extensión solo el 8.4% del total.

I. INTRODUCCION

En los últimos años el suministro del agua se ha vuelto un problema muy serio, debido a que cada vez se cuenta con menos fuentes, ya sea superficiales o subterráneas con la calidad necesaria que el humano requiere para el consumo propio y otras necesidades básicas; esto conlleva a la necesidad de proteger los recursos hídricos, principalmente los de procedencia del tipo subterráneo.

La creciente población y el uso ineficiente del agua, principalmente la que se destina para uso agrícola, tiene graves consecuencias en muchos países donde ya han experimentado problemas de contaminación del agua subterránea la cual se encuentra desde fuentes puntuales hasta dispersas.

En la actualidad se desarrollan métodos muy sofisticados para el estudio del agua subterránea con el fin de establecer metodologías que permiten conocer el comportamiento de los contaminantes una vez que han sido vertidos en el suelo, uno de estos métodos es DRASTIC desarrollado en los Estados Unidos de Norteamérica.

La vulnerabilidad de un acuífero se puede entender como la relativa facilidad con la que un contaminante puede migrar al acuífero bajo ciertas condiciones como: prácticas de manejo, características del contaminante y condiciones de sensibilidad del acuífero. Sin que sea necesaria una correlación entre la sensibilidad y la vulnerabilidad.

El Estado de Coahuila por sus condiciones de clima y vegetación se encuentra sujeto a ciertas condiciones en cuanto a extracción se refiere, la escasa precipitación pluvial trae como consecuencia el desequilibrio, de ahí que se tiene que recurrir a medidas administrativas y legales como son los decretos de veda y reglamentos.

El acuífero Saltillo-Ramos Arizpe tiene gran importancia debido a que en esta zona geográfica esta acentuada la capital del estado y existe una población que ha experimentado un crecimiento demográfico muy importante en los últimos años, y como consecuencia de esto, en el acuífero se registran abatimientos que muestran que la recarga es menor que la descarga. Pero lo más importante es establecer medidas que permitan saber en que condiciones de vulnerabilidad a la contaminación se encuentran los acuíferos del Estado, por lo anteriormente expuesto se plantea al siguiente objetivo.

Objetivo.

Determinar la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en el Acuífero Saltillo-Ramos Arizpe perteneciente al Estado de Coahuila de Zaragoza.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Contaminación del Agua Subterránea

Según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR por sus siglas en inglés) 2002, No existe agua que sea completamente pura. Aún el agua en la naturaleza contiene impurezas. A medida que el agua fluye por diferentes rutas, se acumula en cuerpos de agua y se infiltra en las capas del subsuelo, va disolviendo o absorbiendo los minerales o las sustancias que entran en contacto con ella. Algunas de estas sustancias no son dañinas a la salud, pero a ciertos niveles podrían afectar el sabor del agua y contaminarla.

Algunos contaminantes se originan de la erosión natural de las formaciones rocosas. Otros contaminantes provienen de descargas de fábricas, productos agrícolas, o químicos utilizados por las personas en sus hogares y patios. Los contaminantes también pueden provenir de tanques de almacenamiento de agua, pozos sépticos, lugares con desperdicios peligrosos y vertederos. Actualmente, los contaminantes del agua subterránea de mayor preocupación son los compuestos sintéticos. Estos incluyen: solventes, pesticidas, pinturas, barnices, gasolina y nitrato.

Vulnerabilidad de Acuíferos a la Contaminación

El término vulnerabilidad a la contaminación del acuífero es usado para representar las características intrínsecas que determinan su susceptibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante que cause cambios químicos, físicos o biológicos que estén por encima de las normas de utilización del agua. Según Foster e Hirata (1988) la vulnerabilidad es primeramente una función de:

- la inaccesibilidad de la zona saturada, en sentido hidráulico, a la penetración de contaminantes;
- la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada del acuífero, como resultado de su retención física y reacción química con los contaminantes.

Alvarado R. J, (2000), menciona que el agua subterránea, en ciertas condiciones, constituye un importante recurso de abastecimiento de agua para distintos usos. En algunas ocasiones, las características propias del sistema natural determinan que la cantidad, accesibilidad y en especial la calidad del agua subterránea se torne inadecuada para algunos o todos los usos requeridos. Por lo tanto, es importante dejar claro que el agua subterránea no siempre es sinónimo de recurso disponible. En muchas ocasiones, los recursos hídricos subterráneos suelen perder tal categoría al estar afectados por distintas actividades contaminantes que incorporan al agua subterránea una variedad de sustancias tóxicas (metales pesados, compuestos orgánicos, organismos patógenos, etc.) En general, los contaminantes entran al medio subterráneo a través de tres caminos:

- a) La disposición de líquidos o productos solubles con el agua, sobre la superficie del terreno.
- b) El entierro de sustancias en el subsuelo, por encima del nivel freático.
- c) La inyección de materiales en el subsuelo por debajo del nivel freático.

A la hora de inferir el potencial de contaminación de un acuífero, es indispensable conocer las características del ambiente hidrogeológico, así como también haber definido su modelo conceptual de funcionamiento.

Definiciones de Vulnerabilidad a la Contaminación por Diferentes Autores

Carbonell (1993) define la vulnerabilidad a la contaminación, como la tendencia de los contaminantes a localizarse en el sistema de agua subterránea, luego de ser introducidos por encima del acuífero más somero. En este caso el autor considera solamente la acción de los contaminantes.

Foster e Hirata (1991) expresan que la “vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta”. En este caso al citar a una carga contaminante impuesta, los autores parecen referirse solamente a una contaminación de origen artificial.

EPA (1991) hace referencia a la vulnerabilidad subterránea respecto a un plaguicida, como la facilidad con que un contaminante aplicado en la superficie, puede alcanzar al acuífero en función de las prácticas agrícolas empleadas, las características del plaguicida y la susceptibilidad hidrogeológica. Esta definición incorpora, además de las condiciones del medio, las propiedades del contaminante y las prácticas de cultivo (vulnerabilidad específica)

Metodología DRASTIC

Existen diferentes metodologías para determinar la vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación, una de ellas es DRASTIC que se utiliza principalmente en Estados Unidos de Norteamérica, debido a que fue ideado en este país, pero también es utilizado ampliamente en los países latinoamericanos.

El método DRASTIC es un método empírico desarrollado por Aller *et al.* en 1987 y patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en ingles). Los parámetros y la metodología que se describe a continuación son propuestas por los autores de la metodología DRASTIC

- Profundidad del agua subterránea (Depth)
- Tasa de recarga (Recharge)
- Tipo de acuífero (Aquifer media)
- Tipo de suelo (Soil media)
- Topografía (Topography)
- Impacto en la zona no saturada (Impact of the vadose zone)
- Conductividad hidráulica (Hydraulic Conductivity)

El sistema permite determinar un valor numérico para cada sitio hidrogeológico por medio de un modelo aditivo (de la sumatoria de los valores asignados a cada parámetro). Cada uno de los siete factores recibe un peso ponderado.

Hay un peso especial para zonas agrícolas. La vulnerabilidad puede ser determinada por la ecuación:

$$DrDw+RrRw+ArAw+SrSw+TrTw+IrIw+CrCw = \text{Contaminación potencial}$$

Donde r es el índice y w es la ponderación.

El método posee tres supuestos importantes: el contaminante es introducido sobre la superficie de la tierra, el contaminante es trasladado al agua subterránea por precipitación y el contaminante es móvil en el agua.

Esta metodología utiliza un sistema paramétrico de evaluación que incluye siete características fundamentales a las que asigna valores numéricos entre 1 y 10 de acuerdo a la importancia relativa de cada una en el proceso de existencia y expresión del agua subterránea, que se escoge de acuerdo al acuífero particular de que se trate, y un multiplicador entre 1 y 5 (peso ponderado según su importancia) recomendado por los autores del método para expresar generalidades propias del agua del subsuelo. Como resultado de esta evaluación se obtiene un mapa, mostrando zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación.

Parámetros de la metodología DRASTIC

Profundidad al acuífero (espesor de la zona vadosa):

De los Santos J. (1998) La zona no saturada es aquella donde el contenido de agua es menor que la porosidad. Su espesor se obtiene como la diferencia entre el nivel topográfico y el nivel al que se encuentra el material saturado, que coincide con el piezométrico cuando el acuífero es libre o con el de techo del acuífero cuando es confinado.

Es de gran importancia ya que es la primera defensa natural del acuífero contra los contaminantes. Además es un medio donde el flujo es más lento y generalmente es aerobio y alcalino, lo cual hace mayor el potencial para intercepción, absorción y eliminación de bacterias y virus, atenuación de metales pesados y otros químicos a través de precipitación, adsorción o intercambio de cationes y adsorción y biodegradación de muchos hidrocarburos y compuestos orgánicos sintéticos.

Cuanto mayor es el espesor de la zona vadosa, los contaminantes tienen más tiempo de contacto con el medio, sometiéndose a los procesos de atenuación por un lapso más prolongado. Además tienen mayor oportunidad de oxidarse con el oxígeno atmosférico que está presente en toda esta zona.

Por lo tanto, un acuífero presenta mayor vulnerabilidad en los puntos en que la zona no saturada es más fina y menor donde es más gruesa.

La metodología asigna puntajes crecientes para rangos de profundidad cada vez menores, los cuales están asociados a grados de vulnerabilidad. Esto se muestra en el cuadro 2.1.

Cuadro2.1. Muestra los valores para la profundidad (Aller *et al.* 1987)

Profundidad (m)	Clasificación D_r
0 – 1.5	10
1.5 – 4.6	9
4.6 – 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9 – 30.5	2
> 30.5	1

Recarga neta:

De los Santos J. (1998) La recarga es el volumen de agua por unidad de área que ingresa al acuífero durante un período de tiempo, para lo cual debe atravesar la superficie y la zona no saturada. En su camino el agua arrastra consigo muchas sustancias, siendo así el principal vehículo para la lixiviación y el transporte de contaminantes líquidos y sólidos.

Por esto, cuanto más grande sea la recarga mayor oportunidad tendrán los contaminantes de llegar al acuífero. Además, será menor el tiempo de recorrido en la zona no saturada, sufriendo las sustancias los procesos de atenuación por un período más corto.

De esta manera, DRASTIC asigna mayores puntajes cuanto mayor es el valor de la recarga neta, como se puede ver en el cuadro 2.2.

Cuadro 2.2. Valores de recarga neta (Aller *et al.* 1987)

Recarga Neta (R)	
Recarga (mm)	Clasificación R_r
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

Tipo de acuífero:

De los Santos J. (1998) El tipo de material que compone el acuífero afecta directamente al flujo dentro del mismo. A la vez, la velocidad y el camino que sigue un contaminante están gobernados por el flujo. La velocidad determina el tiempo disponible para que los contaminantes desarrollen los procesos de atenuación y el camino se relaciona con el área de material con que entra en contacto.

En un medio granular, a mayor tamaño de grano se tiene mayor permeabilidad. Por lo tanto la capacidad de atenuación es menor cuanto mayor sea la granulometría. En un medio fracturado, la vulnerabilidad es función del grado de fracturación.

Al ser este parámetro difícilmente cuantificable, DRASTIC asocia rangos de puntajes a los distintos tipos de acuífero y sugiere un puntaje típico para cada uno (Cuadro 2.3.).

Cuadro 2.3. Valores para el medio acuífero (Aller *et al.* 1987)

Medio acuífero (A)		
Tipo de acuífero	Rango de clasificación A_r	Valor típico A_r
Lutita masiva	1 – 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 – 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 – 5	4
Till glacial	4 – 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena o grava	4 – 9	8
Basaltos	2 – 10	9
Caliza karstica	9 – 10	10

Tipo de suelo:

De los Santos J. (1998) El suelo es la porción más superficial de la zona no saturada y está caracterizada por una significativa actividad biológica. Tiene mayor contenido de materiales finos (limos y arcillas) por lo que es el primero en restringir la migración de contaminantes. La mayor cantidad de materia orgánica está contenida en la primera capa y decrece con la profundidad, y es también un importante factor en la atenuación de los mismos.

Como resultado de su mayor contenido de arcilla y materia orgánica y de su población bacteriana mucho más grande, la mayoría de los procesos que protegen a las aguas subterráneas son mucho más activos en el suelo.

Dentro de los suelos, son los suelos arcillosos los que dan mayor protección al acuífero. Sin embargo, esto no es verdadero cuando se trata de arcillas expansivas que se contraen y expanden alternadamente en función de la humedad. Cuando el suelo se seca, se forman fisuras que luego se cierran al hidratarse, pero al inicio de la hidratación los contaminantes pueden moverse a través de las fisuras que aún no se cerraron.

Entonces, si las arcillas son expansivas no son una protección para el acuífero, ya que la permeabilidad secundaria creada por las fisuras de desecación hace que el mismo resulte accesible para los contaminantes.

El suelo es importante en la función de atenuación, sobre todo cuando la fuente de contaminación es difusa (aplicación de fertilizantes y pesticidas o deposición ácida). Sin embargo, el suelo es muy vulnerable en sí mismo ya que puede ser fácilmente dañado en su función de retardador y degradador de los contaminantes cuando no está en condiciones naturales. El Cuadro 2.4. muestra los valores asignados por DRASTIC a los distintos tipos de suelos.

Cuadro 2.4. Correspondiente al medio del suelo (Aller *et al.* 1987)

Medio del suelo (S)	
Tipo de suelo	Clasificación S _r
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol – cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

Topografía:

De los Santos J. (1998) El agua que llega a la superficie del suelo y no se evapora, tiene principalmente dos caminos: escurrir o infiltrarse. El comportamiento que tenga depende en gran medida de la pendiente del terreno.

Si la pendiente es grande, el agua escurre superficialmente llevándose consigo parte de las sustancias contaminantes. En cambio, si es pequeña, el agua tiende a encharcarse permaneciendo en la superficie lo suficiente para infiltrar y llevar con ella sustancias al acuífero.

Los valores asociados por DRASTIC, aparecen en el Cuadro 2.5.

Cuadro 2.5. Valores de topografía (Aller *et al.* 1987)

Topografía (T)	
Pendiente (%)	Clasificación T _r
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1

Impacto de la zona vadosa:

El tiempo que demora el agua en recorrer el camino hasta la zona saturada no sólo depende de la longitud, sino también del tipo de material con que se encuentra. De esta manera, el medio controla el tiempo en que los contaminantes están sometidos a los procesos de atenuación.

Por ser muchos de estos procesos de carácter superficial, la atenuación es mucho más importante si el agua encuentra material granular de pequeña granulometría, ya que el contaminante tiene mayor área efectiva de sólido con quien entrar en contacto. Por lo tanto, cuanto mayor sea el contenido de arcilla y limo presente en la zona vadosa, mayor será el tiempo de recorrido y más tortuoso será el camino para el agua, teniendo el acuífero mayor potencial para protegerse.

Al igual que con el tipo de acuífero, se asignan rangos a los distintos tipos de material y se dan valores típicos (Cuadro 2.6)

Conductividad hidráulica:

La conductividad hidráulica se refiere a la capacidad de los materiales del acuífero para transmitir agua, lo cual controla el flujo y la velocidad a la que se mueven los contaminantes desde que ingresan al acuífero.

Por ello, DRASTIC asocia valores de alta vulnerabilidad a conductividades altas. En el Cuadro 2.7. muestra los puntajes relativos asignados.

Cuadro 2.6. Impacto en la zona no saturada (Aller *et al.* 1987)

Impacto de la zona no Saturada (I)		
Tipo de medio	Rango de clasificación I_r	Valor típico I_r
Capa confinante	1	1
Cieno – arcilla	2 – 6	3
Lutita	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4 – 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 – 8	6
Metamórfica/Ígnea	2 – 8	4
Arena y grava	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza karstica	8 – 10	10

Cuadro 2.7. Valores para la Conductividad Hidráulica (Aller *et al.* 1987)

Conductividad Hidráulica (C)		
Conductividad Hidráulica		Clasificación C_r
(m/día)	(cm./s)	
0.04 – 4.08	$4.6 \times 10^{-5} - 4.7 \times 10^{-3}$	1
4.08 – 12.22	$4.7 \times 10^{-3} - 1.4 \times 10^{-2}$	2
12.22 – 28.55	$1.4 \times 10^{-2} - 3.4 \times 10^{-2}$	3
28.52 – 40.75	$3.4 \times 10^{-2} - 4.7 \times 10^{-2}$	6
40.75 – 81.49	$4.7 \times 10^{-2} - 9.5 \times 10^{-2}$	8
> 81.49	> 9.5×10^{-2}	10

Cuadro 2.8. Índices de ponderación (Aller *et al.* 1987)

Índices de ponderación		
Parámetros		Índice de ponderación
D profundidad del nivel del agua	Dw	5
R Recarga	Rw	4
A naturaleza del acuífero	Aw	3
S tipo de suelo	Sw	2
T topografía	Tw	1
I impacto en la zona no saturada	Iw	5
C conductividad hidráulica	Cw	3

La dinámica de los sistemas acuíferos hace que los Mapas de Vulnerabilidad no sean información estática. Variaciones en las condiciones de acceso, presencia y movimiento del agua, originan cambios en las variables de estado de los sistemas. El seguimiento de estos cambios y la importancia de los mismos pueden conducir a la revisión de tales mapas, y a su modificación y corrección temporal.

Aplicación del Método DRASTIC

Para aplicar este método debe asumirse que el posible contaminante tiene la misma movilidad en el medio que el agua, que se introduce por la superficie del terreno y se incorpora al agua subterránea mediante la recarga (lluvia y/o retorno de riego). Se aplica a los acuíferos libres y confinados, pero no a los semiconfinados, que deben valorarse de manera que puedan adaptarse a uno de los tipos definidos.

A cada uno de los siete parámetros considerados por este método se les asigna un valor en función de los diferentes tipos y rangos definidos en la tabla 1. Además, al valor de cada parámetro se aplica un índice de ponderación entre 1-5 que cuantifica la importancia relativa entre ellos, y que puede modificarse en función del contaminante.

El índice de vulnerabilidad obtenido es el resultado de sumar los productos de los diferentes parámetros por su índice de ponderación: $DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw = \text{Índice de vulnerabilidad}$ siendo "r" el valor obtenido para cada parámetro y "w" el índice de ponderación. El rango posible de valores del índice DRASTIC está comprendido entre 23-226 siendo más frecuentes valores entre 50-200. Los intervalos de vulnerabilidad o riesgo se definen en función de la aplicación. En el trabajo realizado se han establecido los siguientes grados:

Una vez implementada esta metodología, es posible identificar áreas de mayor o menor susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

Localización

CNA gerencia estatal Coahuila (2002). El Acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, se localiza en la parte sureste del Estado de Coahuila, coordenadas geográficas 25° 25' latitud Norte y 101° longitud Oeste, cuenta con una superficie aproximada de 1,419 km² que cubre el valle aluvial del mismo nombre y la zona de sierras al poniente del valle. El polígono que delimita al acuífero cubre parcialmente a los municipios de Saltillo, Ramos Arizpe y Arteaga, (Figura 3.1)

El Valle Saltillo-Ramos Arizpe está limitado al sur por la Sierra Zapalinamé, al oriente por las Sierra de Arteaga, Sierra San Lucas y Sierra San José de los Nuncios, y al poniente por la Sierra El Asta y Sierra Palma Gorda.

Dentro del área que ocupa el acuífero se encuentran la Ciudad de Saltillo capital del estado y las poblaciones de Ramos Arizpe y Arteaga. La población urbana total es de aproximadamente 640,000 habitantes concentrados principalmente en la Ciudad de Saltillo.

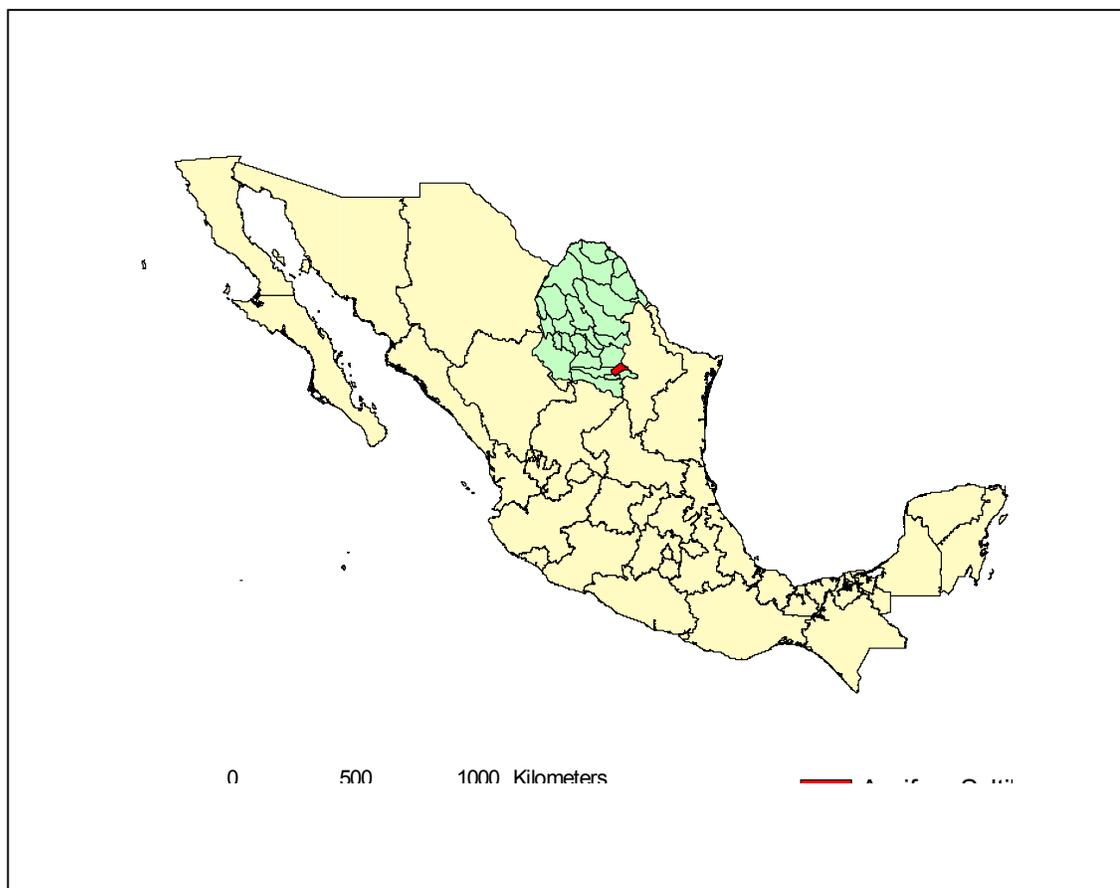


Figura 3.1 Ubicación del acuífero Saltillo-Ramos Arizpe

Distritos y Unidades de Riego

Las unidades de riego con aprovechamientos regularizados existentes en la zona, de acuerdo con información proporcionada por la Subgerencia de Administración del Agua de esta Gerencia Estatal, son: El Álamo, Predio El Llano, La Reforma, El Ancón, Guajardo 1, Guajardo 2, Las Rusias, Cuatro Ases, San Diego 1, Las Silvas, Oliverio Gutiérrez del Bosque, Quinta Emilio y Praderas.

Usuarios Mayores de Agua Subterránea

De acuerdo con información proporcionada por la Subgerencia de Administración del Agua de la Gerencia Estatal en Coahuila, los usuarios mayores de agua subterránea del Acuífero Saltillo-Ramos Arizpe son: El Sistema de Agua Potable de Ramos Arizpe con un volumen concesionado de 8,199,370 m³/año, El Sistema de Agua Potable de Saltillo con un volumen de 2,906,989 m³/año y General Motors, S.A. de C.V., empresa localizada en el Municipio de Ramos Arizpe con un volumen de 1,060,000 m³/año para uso industrial. Estos grandes usuarios tienen un 29% del volumen total concesionado del acuífero.

Estudios Técnicos Realizados con Anterioridad

La empresa Estudios Geológicos y Obras Civiles (1974), realizó un estudio geohidrológico en el cual se define el funcionamiento hidrodinámico del acuífero Saltillo-Ramos Arizpe y se establece que este es independiente de los acuíferos en calizas que afloran en las sierras del oriente y sur. También fueron censados 871 aprovechamientos de los cuales resultaron 669 pozos, 183 norias y 19 manantiales. En este estudio por medio de un balance en el acuífero del valle para el periodo junio de 1974 a diciembre de 1974, se obtuvo una recarga media de 46.1 Mm³/año, una extracción de 27.3 Mm³/año, una salida por flujo horizontal aguas debajo de Ramos Arizpe de 5.2 Mm³/año y una descarga por manantiales de 18.3 Mm³/año. Otro de los estudios geohidrológicos más importantes que se han realizado en la zona es el efectuado por ININSA (1981), en el cual fueron censados 1161 aprovechamientos, 889 pozos, 248 norias, 23 manantiales y un tajo.

El volumen total de extracción de estos aprovechamientos fue de 70.5 Mm³/año, de los cuales 43.4 Mm³/año se extraían del acuífero del valle destinados para uso agrícola y agua potable principalmente y 27.1 Mm³/año de los acuíferos calizos para el abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Saltillo. De un balance en el acuífero del valle para el periodo junio de 1974 a abril de 1981 se obtuvieron los siguientes resultados: recarga por flujo horizontal de 9 Mm³/año, recarga vertical de 40 Mm³/año, descargas por flujo subterráneo de 15.6 Mm³/año y descarga por manantiales de 5.7 Mm³/año.

La compañía Consultores en Agua Subterránea (1986), por medio de sondeos eléctricos verticales estableció que el acuífero del valle se encuentra hasta profundidades de 150 m, en la parte alterada de las lutitas y areniscas del Cretácico Superior y en el aluvión que las cubre.

En el estudio geohidrológico realizado por Lesser y Asociados (1996) se censaron 725 aprovechamientos, 648 pozos, 56 norias y 21 manantiales. El volumen total de extracción resultante fue de 67.4 Mm³/año, distribuidos 45.1 Mm³/año para uso potable, 10.1 Mm³/año industrial y 12.2 Mm³/año agropecuario. Del volumen total de extracción 26.28 Mm³/año proviene del acuífero del valle y 41.12 Mm³/año de los acuíferos calizos. En este estudio, también para el acuífero del valle se realizó un balance con un periodo 1986 a 1996, indicando que existió una entrada por flujo subterráneo de 9.36 Mm³/año, la infiltración por fugas del agua potable en la zona urbana de la Ciudad de Saltillo ascendió a 3.97 Mm³/año, la infiltración por lluvias fue de 7.753 Mm³/año, la descarga por flujo subterráneo fue de 1.5 Mm³/año y la descarga por manantiales de 2.87 Mm³/año.

Fisiografía

Provincias Fisiográficas

La zona en donde se encuentra el Acuífero Saltillo-Ramos Arizpe se localiza en la Provincia Fisiográfica de las Sierras y Cuencas, en el límite con la provincia de la Sierra Madre Oriental. Las características fisiográficas de la zona dentro de la provincia Sierras y Cuencas son de dos tipos:

- a) La zona de topografía relativamente suave, corresponde al Valle de Saltillo-Ramos Arizpe, en donde la elevación del terreno disminuye hacia el norte con valores desde 1,800 msnm a 1,200 msnm, y
- b) La zona de sierras del poniente orientadas Este-Oeste, las cuales se caracterizan por una topografía abrupta con elevaciones máximas de 2,400 msnm.

La Sierra Madre Oriental a esta altitud se caracteriza por sierras y valles paralelos alargados en dirección Este-Oeste y con elevaciones hasta de 2,800 msnm.

Condiciones Climáticas.

Las características del clima fueron analizadas con base en la información climatológica reportada por la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal Saltillo para las siguientes estaciones que se encuentran dentro del Valle Saltillo-Ramos Arizpe: Arteaga, Ateneo Fuente, Observatorio Saltillo, Ramos

Arizpe y Saltillo-CNA. De acuerdo con la clasificación de climas según sistema de Köppen, modificado por E. García, en la región imperan dos tipos de climas. Hacia el norte, alrededor de Ramos Arizpe, el clima es del tipo Bsohz', el cual entra en el grupo de climas cálidos, subgrupo semifrío, subtipo seco semicálido, con lluvias escasas todo el año y precipitación invernal mayor del 18%. Hacia la porción sur de la región, incluyendo a la Ciudad de Saltillo, el clima es del tipo Bsokx', el cual entra en el grupo de cálidos, subgrupo de clima semifrío, subtipo seco templado, con lluvias escasas todo el año y precipitación invernal mayor del 18%.

Temperatura Media Anual

La temperatura promedio anual varía entre 17.3° C en la estación Observatorio Saltillo y entre 17.9° C en las estaciones Saltillo-CNA y Ramos Arizpe.

Precipitación Media Anual

La precipitación promedio anual varía entre 460 mm en la estación climatológica Observatorio de Saltillo, ubicada en la parte suroeste del valle, y entre 333 mm en la estación Ramos Arizpe, localizada al norte del valle. La variación de la precipitación anual revela varios periodos lluviosos alternando con épocas de sequías, entendiendo como años lluviosos o secos cuando la precipitación es mayor o menor que la precipitación promedio anual. De esta manera, se identifican los siguientes periodos lluviosos: 1937 y 1938; 1941, 1942, 1943 y 1944; 1948; 1950 y 1951; 1958 y 1959; 1965, 1966, 1967 y 1968; 1971, 1972 y

1973; 1975 y 1976; 1978; 1981, 1982 y 1983; 1986, 1987 y 1988; 1990, 1991 y 1992; y 1997.

Evaporación Potencial Media Anual

La evaporación potencial promedio anual varía entre 1910 mm en la estación Observatorio de Saltillo y entre 1672 mm en la estación Ramos Arizpe.

Hidrografía

Región Hidrológica, Cuenca y Subcuenca

El Acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, de acuerdo a la Carta Hidrológica de Aguas Superficiales escala 1:250,000 Hoja Monterrey G14-7 editada por el INEGI (1981), se encuentra en la Región Hidrológica del Río Bravo (RH-24), Cuenca del Río San Juan (B) y Subcuenca Río San Miguel (e-8918).

Los escurrimientos superficiales son una serie de arroyos intermitentes caracterizados por descargas torrenciales en época de lluvias. Estos arroyos se originan en las sierras que circundan al Valle Saltillo-Ramos Arizpe y en la zona del valle constituyen una fuente de recarga al acuífero por medio de la infiltración del agua a lo largo de sus cauces a través de los depósitos aluviales permeables, especialmente en las márgenes del valle aluvial en donde algunos de ellos desaparecen.

La corriente principal es El Arroyo del Pueblo o Arroyo La Encantada, cuyo cauce de sur a norte se encuentra cargado hacia el poniente del valle. Este arroyo es afluente del Arroyo Patos, con el cual confluye aproximadamente a 40

Km. al norte fuera del valle pasando la población de Paredón, Coahuila. Es el principal cuerpo receptor de las descargas de aguas residuales de las ciudades de Saltillo y Ramos Arizpe. Al igual que el de las descargas de aguas industriales provenientes del corredor industrial desarrollado principalmente en el Municipio de Ramos Arizpe en forma paralela a la Carretera Federal Saltillo-Monterrey.

Geomorfología

CNA gerencia estatal Coahuila (2002). El Valle de Saltillo-Ramos Arizpe está labrado sobre la Formación Parras que por su constitución de lutitas favoreció un relieve suave, por su baja resistencia a la erosión, y sobre el cual se acumularon depósitos aluviales preferentemente en las partes bajas. Otras formas del relieve de origen fluvial son una serie de conos aluviales desarrollados sobre el flanco noroeste de la Sierra Zapalinamé. Así como los conos de deyección de los arroyos La Carbonera, La Roja y Pesquería, los cuales descienden de la Sierra Madre Oriental. En la parte noreste del valle resalta una amplia meseta aluvial antigua que se extiende hacia el norte y que está disectada por el Arroyo la Boca y su continuidad el Arroyo El Jaral.

En la zona de sierras del poniente, existe una morfología típica originada por la erosión diferencial que afecta a las formaciones del Grupo Difunta, el cual está constituido por areniscas y lutitas, dando lugar, las primeras, a prominencias y escarpes topográficos y las segundas, a formas de erosión suave. Todas las formas topográficas, sujetas desde luego al patrón estructural regional, dominado por plegamientos cuyos ejes corren en dirección Este-Oeste.

En la Sierra Madre Oriental, las prominencias topográficas son efectos de cuerpos de calizas que forman los flancos de estructuras anticlinales y

sinclinales. El anticlinal corresponde, generalmente, a la sierra y el sinclinal al valle, aunque en ocasiones, cuando el pliegue está recostado, el valle queda labrado en el corazón del anticlinal.

Estratigrafía

Jurásico Superior

Formación Zuloaga (Jsz)

Aflora en el núcleo del anticlinal Sierra San José de los Nuncios en donde se encuentra erosionada e intrusionada por yesos de la Formación Minas Viejas subyacente. También aflora al sur de la Sierra Zapalinamé y al Noroeste de Sierra Hermosa. Está constituida por caliza de aguas someras color gris claro al intemperismo y gris oscuro al fresco, intercala con lutitas. Su estratificación es de medio a grueso, su espesor varía de 65 a 500 m aproximadamente. Por su contenido faunístico se le considera del Oxfordiano. Su contacto inferior no se aprecia, el contacto superior es concordante con la Formación La Casita.

Formación La Casita (Jslc)

Fue definida por Imlay (1936), en el Cañón La Casita, situado en la parte media de la Sierra de Parras, Coahuila. Aflora en los núcleos de los anticlinales, en la Sierra San José de los Nuncios, Sierra Zapalinamé y Cañón Los Chorros. Está constituida por intercalaciones de lutitas y areniscas, las primeras son calcáreas y en ocasiones carbonosas, presenta concreciones silíceas intercaladas de diferente tamaño y algunos horizontes de evaporitas. Su espesor se considera

de 365 m aproximadamente y estratificación delgada. Subyace discordantemente a la Formación Taraises y se le considera una edad Kimmeridgiano-Portlandiano por su contenido de fósiles. Se interpreta que se depositó en un ambiente de aguas someras parcialmente lacustre.

Cretácico Inferior

Formación Taraises (Kit)

Imlay (1936), la define en el Cañón Taraises localizado en el extremo Oeste de la Sierra de Parras. Aflora en la Sierra San José de los Nuncios, Sierra La Nieve, Sierra Arteaga y Sierra Agua del Toro. Esta representada por dos miembros; el Miembro Inferior está constituido por calizas de estratificación media a gruesa que presenta algunas vetillas de calcita y algunos horizontes de limolita en estratos delgados, se aprecia al sur de la Sierra Zapalinamé en el Cañón Los Chorros; el Miembro Superior son calizas arcillosas de estratificación media intercalada con estratos delgados de lutitas fósiles. Tiene un espesor aproximado de 80 m y subyace a la Formación Cupido concordante. Se le ha asignado dentro del Berriasiano Superior al Hauteriviano. El Miembro Inferior se depositó en facies de plataforma en aguas someras con mayor aporte proveniente del continente. El Miembro Superior se depositó en facies de Cuenca en aguas tranquilas.

Formación Cupido (Kic)

Fue propuesta por Imlay (1937) para referirse a una secuencia calcárea que se encuentra en la localidad tipo en el Cañón El Mimbres, en la Sierra de Parras, Coahuila. Aflora en las sierras de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental.

Aflora en la Sierra La Nieve, Sierra de Arteaga, Sierra San Lucas y Sierra San José de los Nuncios. Se constituye en tres miembros; el Miembro Inferior corresponde a una facies de cuenca y está formado por calizas gruesas con vetillas de calcita en las cercanías con la Formación Taraises; el Miembro Medio se depósito en facies de Plataforma y está representado por un quiebre arcillo-calcáreo de poco espesor; el Miembro Superior es de una facies arrecifal y constituye una calcirrudita tamaño de la arena estratificación de gruesa a masiva con abundante fauna marina y presenta superficialmente corrugaciones y abundantes estilolitas. Su contacto superior es concordante con la Formación La Peña y se asigna una edad del Neocomiano Superior-Aptiano Inferior. Su espesor es variable, pero en promedio es del orden de 400 m.

Formación La Peña (Kilp)

Fue definida por Imlay (1936) y menciona como localidad tipo al flanco Norte de la Sierra Taraises. Aflora en las sierras del Oriente y es fácil identificarla en el campo, debido a que es poco resistente a la erosión formando puertos topográficos de erosión. Son calizas arcillosas delgadas intercaladas con lutitas calcáreas laminares muy fosilíferas. Al Sureste y Suroeste de Saltillo se le estima un espesor de 40 a 50 m. Es un horizonte índice de referencia, debido a su marcado contraste litológico con las formaciones que la limitan y a su contenido faunístico, siendo el más característico el género *Dufrenoyia sp.* Es concordante con la Formación Aurora y se le considera del Aptiano-Albiano Inferior. Su litología indica un acarreo de detritos de las zonas positivas, durante movimientos verticales en el Aptiano, su ambiente de depósito es infranerítico.

Formación Aurora (Kia)

Fue definida por Burrows (1910), como una secuencia de calizas en la localidad tipo en la Mina La Aurora en la Sierra de Cuchillo Parado al Oeste de Ojinaga, Chihuahua. Aflora en las sierras localizadas al Oriente del Valle de Saltillo-Ramos Arizpe. Está constituida por calizas de estratificación media a gruesa, presenta estilolitas y nódulos de pedernal. Subyace a la Formación Cuesta del Cura concordantemente, tiene un espesor variable pero en promedio de 200 m y se le ha asignado una edad del Albiano Inferior hasta el Albiano Medio. Representa una trasgresión marina que ocasionó inicialmente el depósito de calizas en ambiente de plataforma, al progresar la trasgresión se acumularon las calizas con nódulos de pedernal propiamente en un ambiente de cuenca.

Cretácico Superior

Formación Cuesta del Cura (Kicc)

Imlay (1936), describió esta formación, de acuerdo con los afloramientos de caliza delgada ondulante, con bandas de pedernal negro que hay a siete kilómetros al Oeste de Parras, Coahuila. Aflora en Loma Alta, Cañón Los Chorros, Sierra Zapalinamé, Sierra Arteaga, Sierra La Nieve y Sierra San José de los Nuncios. Son calizas de estratificación delgada a media, es una caliza muy friable y presenta bandas de pedernal e intercalaciones de lutitas. Presenta espesores hasta de 150 m y es concordante con la Formación Indidura sobreyacente. Es de edad Albiano Medio al Cenomaniano Inferior y el ambiente de depósito es de facies de cuenca, debido a que en el Cenomaniano los mares comenzaron a retirarse, por lo que presenta una gran cantidad de clastos.

Formación Indidura (Ksi)

Kelly (1936) definió a esta formación en el área de Las Delicias, Coahuila, como lutitas y calizas lajeadas. Aflora en el Cañón Los Chorros, Sierra Zapalinamé, Sierra Arteaga, Sierra La Nieve y Sierra San José de los Nuncios. Está constituido por una serie de calizas arcillosas de estratificación delgada a laminar que presentan lutitas. El espesor promedio en la región es de 60 m y la fauna estudiada sitúa a esta formación del Cenomaniano Superior al Turoniano. Está asociada a la regresión de los mares del Cenomaniano y su ambiente de depósito es de facies de plataforma de mares someros.

Formación Parras (Ksp)

La Lutita Parras fue definida por Imlay (1936), como lutita calcárea negra con lodo de arenisca calcárea negra de grano fino, la localidad tipo está situada en las Lomas de San Pablo, al Este de la Ciudad de Parras, Coahuila. Aflora hacia el Sur y Oriente del Valle Saltillo-Ramos Arizpe, y en los estrechos valles sinclinales de la Sierra Madre Oriental. Está constituida por una secuencia homogénea y monótona de lutitas calcáreas y margas, de color negro y gris oscuro que presenta un color de intemperismo verde olivo, en ocasiones presenta escasos horizontes delgados de caliza arcillosa. Se le observa fractura nodular y se disgrega fácilmente en forma espicular. Subyace en forma transicional y concordante al Grupo Difunta, por su posición estratigráfica que ocupa y por su contenido microfaunístico de *globotruncatas* se asigna una edad Campaniano. Se depósito en mares abiertos de profundidad variable, en aguas tranquilas y representa facies de relleno de cuenca, del tipo flysch pelítico.

Grupo Difunta (Ksd)

Fue nominada por Imlay (1936) como formación, de acuerdo con los afloramientos que existen en el Cerro Difunta, que se encuentra a unos 4.5 km del poblado de Pozo de Boquillas, situado al norte del extremo occidental de la Sierra de Parras. Boyd (1959) en un trabajo realizado al Norte de la Ciudad de Saltillo, estableció para la secuencia del Grupo Difunta siete unidades. Por sus características petrofísicas bien fueron definidas como formaciones, elevándolas al rango de Grupo por Murray *et. al.* (1962). Las que en orden cronológico de la más antigua a la más joven son: Cerro del Pueblo, Cerro Huerta, Cañón del Tule, Las Imágenes, Cerro Grande, Las Encinas y Rancho Nuevo, asignándoles una edad Campaniano-Paleoceno.

En forma general esta constituido por una alternancia de areniscas calcáreas, lutitas calcáreas y limolitas, que afloran en gran parte al Norte, Oeste y Suroeste del Valle Saltillo-Ramos Arizpe. Se le estima un espesor de 600 m en donde aflora y esta cubierto por depósitos aluviales. En la Cuenca de Parras por la presencia de Exogira Ponderosa Roemer en la base, se le ha asignado una edad Campaniano terminal, llegando hasta el Paleoceno. Registra una acumulación de sedimentos depositados en medios deltáicos y según su litología hubo cuatro fases regresivas y tres fases progradacionales deltáicas, las segundas por eventos de subsidencia local.

Terciario Inferior

Conglomerado Reynosa (Tcgl)

Está constituido por conglomerados y brechas de calizas de origen continental que afloran sobre el flanco norte de la Sierra Zapalinamé y al Oeste de las sierras de la provincia Sierra Madre Oriental, se presenta en algunas zonas cementadas por caliche y en otras por arenas y gravas, y su espesor es variable. Depósitos Aluviales (Qaal, Qtr y Qal) Se han distinguido los siguientes tres tipos de depósitos aluviales: Qaal) guijarros, gravas y arcillas, que en algunas partes se presentan poco consolidados y en otras partes no, se encuentran en los abanicos aluviales y depósitos de piamonte; Qtr) es un material compuesto por carbonato de calcio originado por la precipitación, aflora en el Cañón Los Chorros; y Qal) gravas, arenas, limos y arcillas no consolidados, producto de la desintegración de las rocas o sedimentos más gruesos preexistentes, se encuentran en las zonas más bajas del Valle Saltillo-Ramos Arizpe, su espesor es muy variable y reducido.

Geología Estructural

El Valle de Saltillo-Ramos Arizpe se encuentra entre dos regiones estructurales. Al Oriente se encuentra la estructura llamada Curvatura de Monterrey, en donde existen rocas sedimentarias del Jurásico Superior al Cretácico Superior, y en la que las estructuras son apretadas y forman prominentes sierras alargadas, siguiendo la orientación de los ejes anticlinales. Esta curvatura está limitada al norte por la falla frontal inversa de la Sierra Madre Oriental, la cual se continúa al occidente fuera del área donde toma una orientación casi Este-Oeste. También se continúa hacia el Oriente fuera del área, en donde toma una

dirección NNW-SSE. Dentro del área de la curvatura, existen otras fallas inversas, las que afectan a algunas estructuras dentro de la zona. Los anticlinales y sinclinales tienen una orientación NE-SW en la porción occidental, los cuales cambian de rumbo a NW-SW en la parte oriental, formando así una curva convexa hacia el norte.

La otra región estructural, se encuentra al Oeste y Noroeste del Valle Saltillo-Ramos Arizpe, en donde existen sedimentos del Grupo Difunta, pertenecientes al elemento paleogeográfico de la Cuenca de Parras. Las estructuras que se forman tienen una orientación NE-SW. En estas estructuras es común encontrar una serie de fallas de desplazamiento lateral izquierdo de rumbo NW-SE y de desplazamiento lateral derecho de rumbo NE-SW y N-S. También existen una serie de fracturas de direcciones N-S, NW-SE, NE-SW y E-O.

Hidrogeología

Tipo de Acuífero

Con base en la información geológica y geofísica consultada de los estudios realizados por organismos anteriormente mencionados, así como en la información recopilada de pozos, se definieron la naturaleza, distribución y fronteras del acuífero denominado Saltillo-Ramos Arizpe motivo de la presente publicación de la disponibilidad de aguas subterráneas. El Acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, está formado en la parte del valle por los Depósitos Aluviales, Conglomerado Reynosa y las lutitas fracturadas de la Formación Parras. Las rocas areniscas fracturadas del Grupo Difunta, forman parte de este acuífero en la zona de las sierras localizadas al Oeste y Noroeste del valle. Es un acuífero del tipo semiconfinado y el basamento hidrogeológico, definiendo como basamento la profundidad a la cual las fracturas en las lutitas de la Formación

Parras desaparecen o se cierran a profundidad, se encuentra a profundidades que varían entre 250 y 450 m. Los límites del acuífero de carácter impermeable son: el contacto entre la Formación Parras fracturada y la Formación Indidura de baja permeabilidad, al Oeste y Sureste del valle, quedando separado de los acuíferos calizos de las formaciones Cuesta del Cura y Aurora; al Oeste y Noroeste, la divisoria de aguas subterránea que virtualmente coincide con el parteaguas superficial que pasa por la Sierra Palma Gorda, Sierra El Asta, Mesa Alta, Cerro Las Palmas, Cerro Las Tinajas y Cerro Grande, siendo separado de los acuíferos General Cepeda-Sauceda y Paredón; y al Suroeste, la divisoria de agua subterránea que existe con el acuífero Cañón de Derramadero a la altura del Cañón La Angostura. Las entradas por flujo lateral que provienen de los cañones La Carbonera y San José de los Nuncios, representan otro tipo de límite del acuífero. Otros acuíferos existentes en la región que se encuentran en rocas calizas fracturadas y que no se consideran en el presente balance de aguas subterráneas y cálculo de la disponibilidad son los siguientes:

Las calizas de la Formación Zuloaga, presentan importancia como acuífero; sin embargo, el agua subterránea es de mala calidad causada por la presencia de horizontes de evaporitas en esta formación. Es explotado fuera de la zona en la parte sureste del Valle San Antonio de las Alazanas, Municipio de Arteaga, Coahuila, en donde es aprovechado para riego agrícola. Otro acuífero calizo se encuentra en la Formación Cupido, el cual se está explotando para el abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Saltillo, por medio de pozos profundos (400 m a 1198 m de profundidad) perforados en Loma Alta en la nariz estructural de los anticlinales de la Sierra San Lucas. Estos pozos en su inicio de operación a principios de los años setenta aportaban grandes caudales, pero que actualmente se han reducido a caudales que varían entre 10 a 47 lps, por efecto de los fuertes abatimientos que han presentado.

El acuífero de la Formación Cupido, también se explota para uso industrial por medio de los pozos Kimberly Clark 1 (profundidad=600 m), Kimberly Clark 2 (profundidad=700 m) y Apasco 1 (profundidad=428 m), los cuales aportan caudales respectivamente de 53 lps, 85 lps y 35 lps. Los pozos Kimberly Clark, están perforados en la nariz estructural del anticlinal de la Sierra San José de los Nuncios, en tanto que el pozo Apasco está perforado en el flanco norte de este anticlinal. La C.F.E. recién perforó un pozo a 403 m de profundidad sobre el flanco sur del anticlinal de la Sierra San José de los Nuncios, resultando con un bajo caudal máximo de aforo de 7 lps, a pesar de cortar calizas de la Formación Cupido. Las rocas calizas de la Formación Cuesta del Cura y Aurora, forman otro acuífero calizo, el cual está siendo explotado, también para el abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Saltillo por medio de los pozos de las baterías Zapalinamé y Cañón San Lorenzo. Los pozos Zapalinamé, cuyas profundidades varían entre 250 y 500 m, y que actualmente aportan caudales de extracción entre 23 y 55 lps. Estos pozos están perforados sobre el flanco noroeste del anticlinal simétrico de la Sierra Zapalinamé. Los tres pozos del Cañón San Lorenzo, cuyas profundidades varían entre 205 m y 500 m, y que actualmente producen caudales de extracción entre 11 y 20 lps, por su parte están perforados en el flanco noroeste del anticlinal recumbente de la Sierra Zapalinamé.

Recarga Total Media Anual

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural más la recarga inducida, que para el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe es de 29.47 millones de metros cúbicos por año ($Mm^3/año$).

Metodología

Aplicación de la metodología DRASTIC

Para el acuífero **Saltillo-Ramos Arizpe** se aplicó la metodología como se menciona a continuación:

- Recolección de la información cartográfica para la generación de la base de datos digital. Se utilizaron 5 mapas, mapa base del Estado de Coahuila de Zaragoza, escala 1:1, 000,000 (INEGI 2002) mapa de hidrogeología escala 1:4, 000,000 (CONABIO, 2002), carta de suelo y vegetación, escala 1:1000,000 (INEGI, 1981), carta topográfica escala 1:50,000, hoja G14-C33 (INEGI, 1978) y mapa de acuíferos escala 1:1000,000 (CNA, 2002).
- Clasificación de la información del medio hidrogeológico, acorde a su condición de explotación de los acuíferos en el estado (CNA, 2002).
- Se elaboró una malla de 5X5 km. en el programa de diseño AutoCAD 2004 el cual se importó al programa ArcView GIS 3.3, esto se hizo de manera georeferenciada, para que coincidiera la cuadrícula en el mapa con las coordenadas para el manejo de la información contenida en los mapas temáticos, de esta forma quedó enmarcado el mapa de Coahuila, así como, también sus unidades Hidrogeológicas. Lo anterior, con la finalidad de puntualizar la información disponible por nodos. En el acuífero se obtuvieron 49 nodos.
- Los parámetros observados fueron: profundidad, recarga, tipo de acuífero, tipo de suelo, topografía (pendiente), impacto en la zona no saturada y la conductividad hidráulica.

- Con la información de la profundidad de los pozos del acuífero en cuestión se elaboró un mapa de profundidades al nivel estático para saber cuales valores se tenían que asignar en referencia a la profundidad a cada nodo, tanto el peso ponderado como el rango.
- La obtención de los valores de Recarga proporcionados por CNA gerencia estatal Coahuila son valores promedio para todo el acuífero. Para los valores de tipo de acuífero se utilizó la carta de hidrogeología publicada por INEGI, otro de los parámetros que se obtuvo por cartas de INEGI es el de topografía (1:50,000), tipo de suelo con la carta de uso de suelo y vegetación
- Para el cálculo de los valores del impacto en la zona no saturada se utilizó el mapa de Hidrogeología, además de datos con estudios realizados en la región por Lesser y Asociados (CNA, 1996). Al igual que los demás parámetros se evaluó con la formula teniendo en cuenta que este es uno de los factores que no es tan fácil de determinar debido a la disponibilidad de la información del medio hidrogeológico en el acuífero, por lo tanto los datos deben ser manejados con mucho cuidado, además de que el peso ponderado que se le asigna en la metodología es alto.
- La ecuación aplicada para evaluar la vulnerabilidad es la siguiente:

$$D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w = \text{Contaminación Potencial}$$

Donde:

D=Profundidad

R=Recarga

A=Acuífero

S=Suelo

T=Topografía

I=Impacto en la zona no saturada

C=Conductividad hidráulica

r=Puntaje

w=peso de ponderación

Esta se aplicó para cada uno de los 49 nodos, donde cada uno de los nodos se evaluó la profundidad, recarga, tipo de acuífero, tipo de suelo topografía, impacto en la zona no saturada y conductividad hidráulica asignándoles un peso y un rango dependiendo de las características de cada sector, para después multiplicar esos dos tipos entre si y así sucesivamente para los 7 factores, después se sumaron esos factores como se menciona en la ecuación expuesta anteriormente

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Profundidad

Este parámetro es uno de los más importantes dentro de la metodología utilizada en este trabajo, la profundidad media encontrada entre los 10 m a 20 m. ocupa una área mínima, ubicada en la parte Suroeste del acuífero. La mayor parte de esta región el manto acuífero se encuentra arriba de los 30 m. como se muestra en el mapa de profundidades al nivel estático (Figura 4.1). Los valores obtenidos son relativamente altos y en este sentido mientras la profundidad al nivel estático indique que el manto acuífero es muy profundo; es menos vulnerable. (Cuadro 4.1).

Recarga

Un contaminante emigra hacia el acuífero más rápido cuanto mayor sea la recarga, la precipitación pluvial es un factor importante para que se de este proceso. En la recarga neta se observa, que debido a las condiciones de precipitación pluvial escasa y la alta evapotranspiración que presenta la región donde se ubica el acuífero, las recargas son muy bajas y esto también es reflejado para darle los valores, que para este caso es el valor mínimo que presenta la metodología DRASTIC. (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.1. Valores obtenidos para la profundidad media

Nodo	Prof. Media	Rango _ profundidad	Peso _ profundidad	Valor
1	11.19	5	5	25
2	13	5	5	25
3	14.5	5	5	25
4	15.1	5	5	25
5	16.78	3	5	15
6	18.2	3	5	15
7	20	3	5	15
8	21.5	3	5	15
9	19.2	3	5	15
10	22.4	3	5	15
11	25.17	2	5	10
12	27.36	2	5	10
13	28.31	2	5	10
14	28.61	2	5	10
15	28.4	2	5	10
16	20	3	5	15
17	28.82	2	5	10
18	39.6	1	5	5
19	28.9	2	5	10
20	34.4	1	5	5
21	32.02	1	5	5
22	31.9	1	5	5
23	32.74	1	5	5
24	33.01	1	5	5
25	33.4	1	5	5
26	37.5	1	5	5
27	26.13	2	5	10
28	27.39	2	5	10
29	30	2	5	10
30	34.5	1	5	5
31	24.05	2	5	10
32	25.3	2	5	10
33	35.2	1	5	5
34	38.04	1	5	5
35	37.2	1	5	5
36	30.52	1	5	5
37	15.51	3	5	15
38	13.2	5	5	25
39	31.11	1	5	5
40	90.03	1	5	5
41	56.13	1	5	5

42	58.4	1	5	5
43	15	5	5	25
44	10.81	5	5	25
45	25.82	2	5	10
46	26.5	2	5	10
47	34.41	1	5	5
48	26	2	5	10
49	22.5	3	5	15

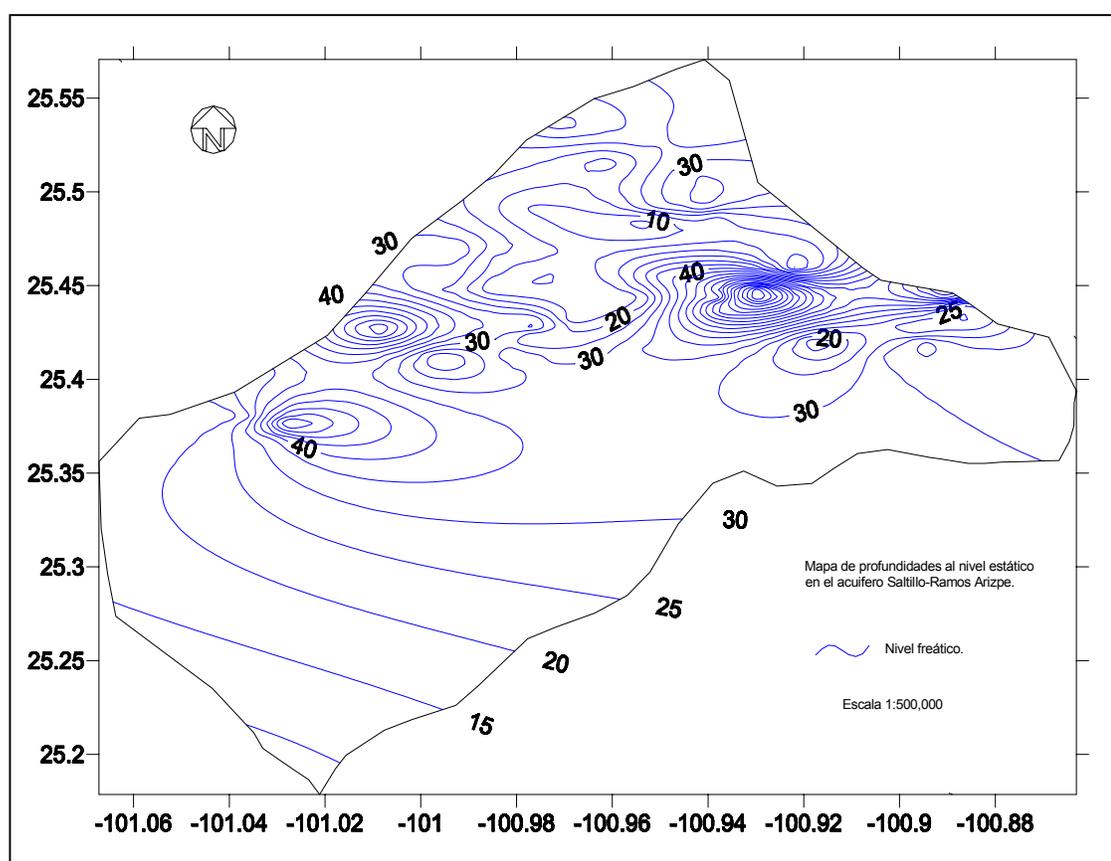


Figura 4.1. Mapa de profundidad al nivel estático

Cuadro 4.2. Valores obtenidos para la Recarga

Nodo	Recarga	Rango_recarga	Peso_recarga	Valor
1	20.8	1	4	4
2	20.8	1	4	4
3	20.8	1	4	4
4	20.8	1	4	4
5	20.8	1	4	4
6	20.8	1	4	4
7	20.8	1	4	4
8	20.8	1	4	4
9	20.8	1	4	4
10	20.8	1	4	4
11	20.8	1	4	4
12	20.8	1	4	4
13	20.8	1	4	4
14	20.8	1	4	4
15	20.8	1	4	4
16	20.8	1	4	4
17	20.8	1	4	4
18	20.8	1	4	4
19	20.8	1	4	4
20	20.8	1	4	4
21	20.8	1	4	4
22	20.8	1	4	4
23	20.8	1	4	4
24	20.8	1	4	4
25	20.8	1	4	4
26	20.8	1	4	4
27	20.8	1	4	4
28	20.8	1	4	4
29	20.8	1	4	4
30	20.8	1	4	4
31	20.8	1	4	4
32	20.8	1	4	4
33	20.8	1	4	4
34	20.8	1	4	4
35	20.8	1	4	4
36	20.8	1	4	4
37	20.8	1	4	4
38	20.8	1	4	4
39	20.8	1	4	4
40	20.8	1	4	4
41	20.8	1	4	4
42	20.8	1	4	4

43	20.8	1	4	4
44	20.8	1	4	4
45	20.8	1	4	4
46	20.8	1	4	4
47	20.8	1	4	4
48	20.8	1	4	4
49	20.8	1	4	4

Acuífero

El medio acuífero juega un papel muy importante, ya que hay acuíferos transmiten el agua mas fácil que otros, que van desde lutitas masivas, hasta calizas kársticas, siendo estas ultimas el medio mas deseable para la extracción de agua, pero en contraste son las mas vulnerables a la contaminación, debido la gran solubilidad que presenta este tipo de material al contacto con el agua.

De acuerdo con los mapas temáticos consultados para el tipo de acuífero, se reportan variaciones en toda la región, predominando las siguientes clasificaciones: en primer término se encuentran; las lutitas, limonitas y calizas arcillosas, en segundo termino; calizas y areniscas y por ultimo; gravas, arenas y limos presentándose estos últimos en escasa proporción. (Cuadro 4.3)

4.4. Suelo

El agua estando en un medio de suelo con la poca capacidad de absorber un agente contaminante promueve a que penetre a estratos más inferiores, como es escaso de algunos lugares dentro de la región, donde el suelo es escaso o ausente. Esto aumenta la probabilidad de que pueda quedar más expuesto a contaminantes y por lo consiguiente más vulnerable. Es notable la influencia de material calcáreo en toda la región.

Para este parámetro se definieron claramente tres tipos de suelos en el acuífero. Los Xerosoles y dentro de estos los cálcicos y haplicos (Figura 4.2), otro tipo de suelos que predominan son los llamados litosoles y por último en escasa proporción los suelos de tipo Feosem calcárico. (Cuadro 4.4).

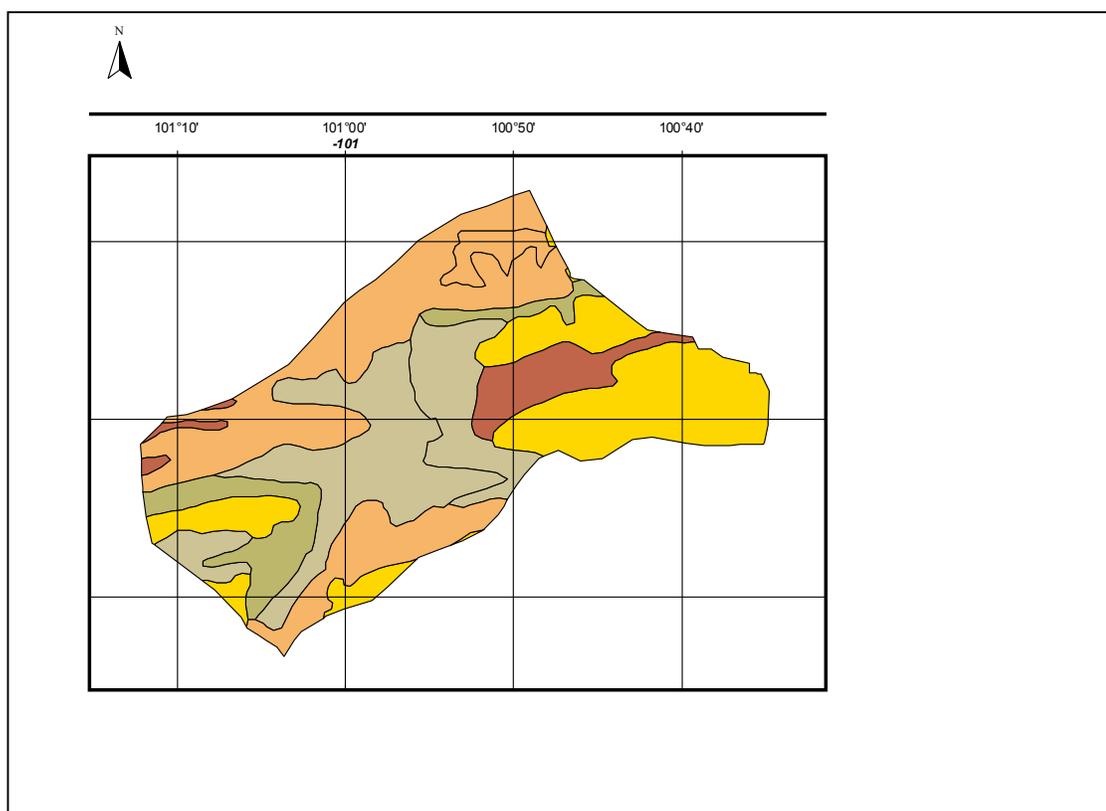


Figura 4.2 Mapa de Edafología

Cuadro 4.3. Valores obtenidos para el tipo de acuífero

Nodo	Acuífero	Rango _ acuífero	Peso _ acuífero	Valor
1	gravas arenas y limos	8	3	24
2	gravas arenas y limos	8	3	24
3	calizas y areniscas	6	3	18
4	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
5	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
6	gravas arenas y limos	8	3	24
7	calizas y areniscas	6	3	18
8	calizas y areniscas	6	3	18
9	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
10	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
11	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
12	gravas arenas y limos	8	3	24
13	calizas y areniscas	6	3	18
14	calizas y areniscas	6	3	18
15	calizas y areniscas	6	3	18
16	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
17	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
18	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
19	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
20	gravas arenas y limos	8	3	24
21	gravas arenas y limos	8	3	24
22	calizas y areniscas	6	3	18
23	calizas y areniscas	6	3	18
24	calizas y areniscas	6	3	18
25	calizas y areniscas	6	3	18
26	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
27	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
28	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
29	gravas arenas y limos	8	3	24
30	gravas arenas y limos	8	3	24
31	calizas y areniscas	6	3	18
32	calizas y areniscas	6	3	18
33	calizas y areniscas	6	3	18
34	calizas y areniscas	6	3	18
35	calizas y areniscas	6	3	18
36	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
37	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
38	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
39	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
40	gravas arenas y limos	8	3	24
41	gravas arenas y limos	8	3	24

42	gravas arenas y limos	8	3	24
43	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
44	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
45	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
46	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
47	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
48	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15
49	lutitas, limolitas y calizas arcillosas	5	3	15

Cuadro 4.4. Valores obtenidos para el tipo de suelo

Nodo	Suelo	Rango_suelo	Peso_suelo	Valor
1	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
2	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
3	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
4	Xerosol Háplico, textura media	10	2	20
5	Regosol calcarico, textura media	10	2	20
6	Regosol calcarico, textura media	10	2	20
7	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
8	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
9	Regosol calcarico, textura media	10	2	20
10	Litosol, textura media	10	2	20
11	Regosol calcarico, textura media	10	2	20
12	Xerosol Háplico, textura media	10	2	20
13	Xerosol Háplico, textura media	10	2	20
14	Xerosol Háplico, textura media	10	2	20
15	Xerosol Háplico, textura media	10	2	20
16	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
17	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
18	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
19	Xerosol Háplico, textura media	10	2	20
20	Xerosol Háplico, textura media	10	2	20
21	Xerosol Háplico, textura media	10	2	20
22	Litosol, textura media	10	2	20
23	Litosol, textura media	10	2	20
24	Litosol, textura media	10	2	20
25	Litosol, textura media	10	2	20
26	Xerosol Háplico, textura media	10	2	20
27	Xerosol Háplico, textura media	10	2	20
28	Xerosol Háplico, textura media	10	2	20

Continuación...				
29	Xerosol Haplico, textura media	10	2	20
30	Feozem calcarico, textura media	9	2	18
31	Litosol, textura media	10	2	20
32	Litosol, textura media	10	2	20
33	Litosol, textura media	10	2	20
34	Litosol, textura media	10	2	20
35	Litosol, textura media	10	2	20
36	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
37	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
38	Xerosol Haplico, textura media	10	2	20
39	Litosol, textura media	10	2	20
40	Feozem calcarico, textura media	9	2	18
41	Litosol, textura media	10	2	20
42	Feozem calcarico, textura media	9	2	18
43	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
44	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
45	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
46	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
47	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
48	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18
49	Xerosol Cálcico, textura media	9	2	18

Topografía

Sólo donde existen asentamientos humanos y zonas industriales la topografía es suave, del orden de 0-2 por ciento existen grandes variaciones como por ejemplo Sierra Zapalinamé, Sierra de Arteaga, Sierra San Lucas y Sierra San José de los Nuncios, al sur de la región y al poniente por la Sierra El Asta y Sierra Palma Gorda (Figura 4.3). La metodología utilizada considera que el parámetro topográfico es de poca importancia, es por esta razón que los resultados obtenidos hicieron variar poco el índice que se obtuvo al final, aun siendo valores elevados los que se tomaron. (Cuadro 4.5).

Cuadro 4.5. Valores obtenidos para la topografía (pendiente media)

Nodo	Topografía	Rango _ topografía	Peso _ topografía	Valor
1	2-6 %	9	1	9
2	2-6 %	9	1	9
3	12-18 %	3	1	3
4	2-6 %	9	1	9
5	2-6 %	9	1	9
6	0-2 %	10	1	10
7	0-2 %	10	1	10
8	6-12 %	5	1	5
9	2-6 %	9	1	9
10	2-6 %	9	1	9
11	0-2 %	10	1	10
12	0-2 %	10	1	10
13	0-2 %	10	1	10
14	6-12 %	5	1	5
15	6-12 %	5	1	5
16	6-12 %	5	1	5
17	6-12 %	5	1	5
18	2-6 %	9	1	9
19	0-2 %	10	1	10
20	0-2 %	10	1	10
21	0-2 %	10	1	10
22	12-18 %	3	1	3
23	>18 %	1	1	1
24	>18 %	1	1	1
25	>18 %	1	1	1
26	12-18 %	3	1	3
27	12-18 %	3	1	3
28	0-2 %	10	1	10
29	0-2 %	10	1	10
30	0-2 %	10	1	10
31	>18 %	1	1	1
32	>18 %	1	1	1
33	>18 %	1	1	1
34	>18 %	1	1	1
35	>18 %	1	1	1
36	12-18 %	3	1	3
37	0-2 %	10	1	10
38	0-2 %	10	1	10
39	6-12 %	5	1	5
40	6-12 %	5	1	5
41	>18 %	1	1	1

42	>18 %	1	1	1
43	2-6 %	9	1	9
44	0-2 %	10	1	10
45	0-2 %	10	1	10
46	0-2 %	10	1	10
47	2-6 %	9	1	9
48	2-6 %	9	1	9
49	2-6 %	9	1	9

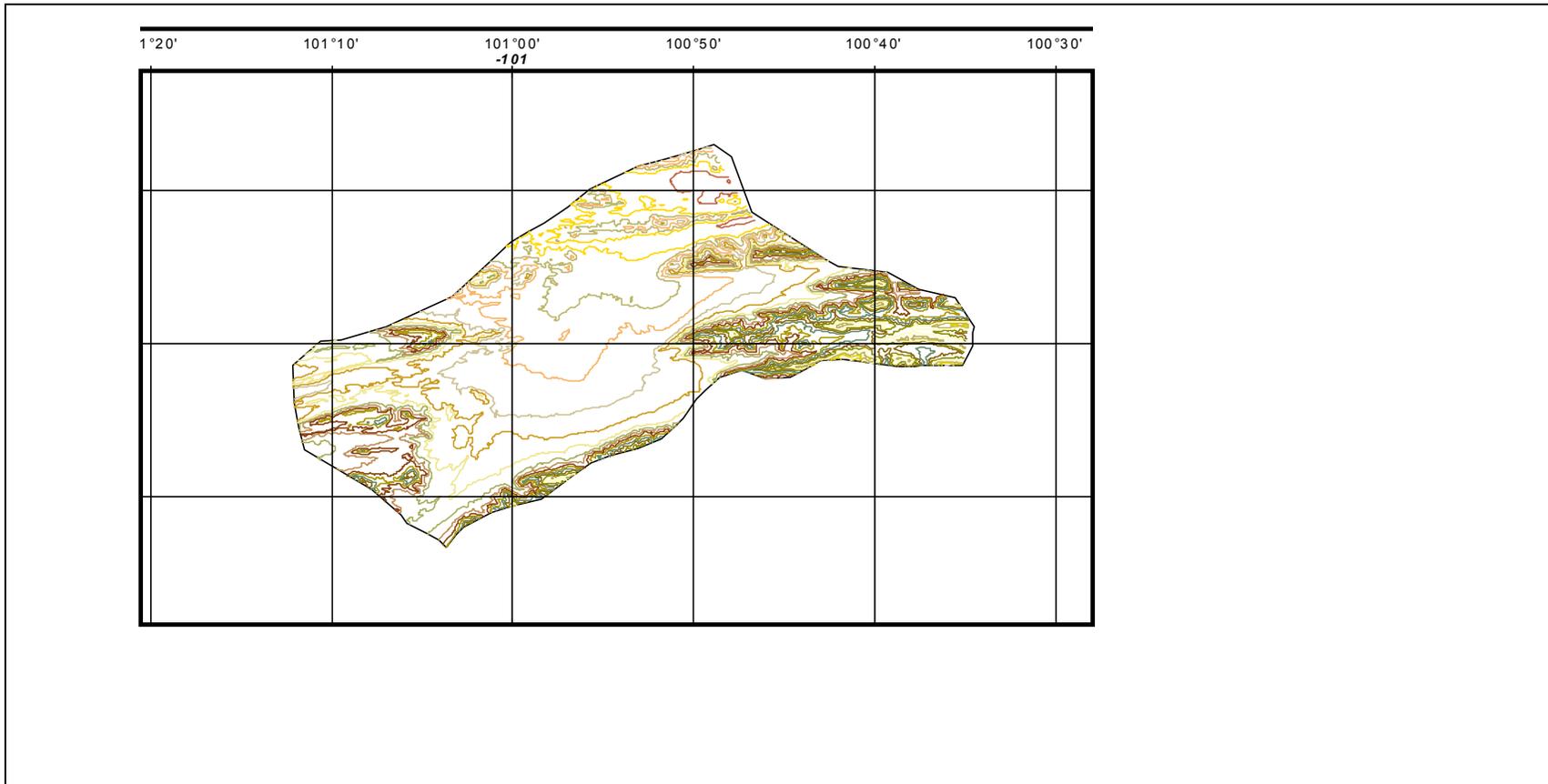


Figura 4.3. Mapa topográfico

Impacto en la Zona No Saturada.

Se definen tres zonas reconocibles dentro de la región que reporta el mapa de Hidrogeología, donde se nota claramente una parte que se denomina Cretácico Medio e Inferior Terciario (Península de Yucatán), con las siguientes características, rocas sedimentarias marinas, predominantemente calcáreas (calizas y areniscas). Otra de las zonas es Cretácico Superior y con la siguientes características, rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas limonitas y calizas arcillosas) y por último pleistoceno y reciente, estas con terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. (Figura 4.4). Para este caso del impacto en la zona no saturada (denominada por algunos autores como litología) presenta desde valores medios hasta altos. (Cuadro 4.6).

La zona no saturada al igual que la profundidad del acuífero y la recarga es de los parámetro mas importantes denominados así por el autor de DRASTIC, ya que es la zona por encima del nivel piezométrico donde los poros del suelo no están totalmente llenos de agua y depende mucho del material del cual estén formados. Un material de forma muy compacta impide grandemente a que un manto acuífero se contamine, por otro lado si es demasiado frágil aumenta este riesgo.

Cuadro 4.6. Valores obtenidos para el impacto en la zona no saturada

Nodo	Impacto en la zona no saturada	Rango impacto	Peso impacto	Valor
1	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
2	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
3	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
4	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
5	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
6	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
7	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
8	Cretácico medio e inferior terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas areniscas). Permeabilidad alta.	8	5	40
9	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
10	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
11	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
12	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta	7	5	35
13	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos	7	5	35

	aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.			
14	Cretácico medio e inferior terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas areniscas). Permeabilidad alta.	8	5	40
15	Cretácico medio e inferior terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas areniscas). Permeabilidad alta.	8	5	40
16	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
17	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
18	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
19	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
20	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
21	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
22	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
23	Cretácico medio e inferior terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas areniscas). Permeabilidad alta.	8	5	40
24	Cretácico medio e inferior terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas areniscas). Permeabilidad alta.	8	5	40
25	Cretácico medio e inferior terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas areniscas). Permeabilidad alta.	8	5	40

26	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
27	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
28	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
29	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
30	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
31	Cretácico medio e inferior terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas areniscas). Permeabilidad alta.	8	5	40
32	Cretácico medio e inferior terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas areniscas). Permeabilidad alta.	8	5	40
33	Cretácico medio e inferior terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas areniscas). Permeabilidad alta.	8	5	40
34	Cretácico medio e inferior terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas areniscas). Permeabilidad alta.	8	5	40
38	Cretácico medio e inferior terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas areniscas). Permeabilidad alta.	8	5	40
36	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja (localizada).	6	5	30
37	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30

38	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
39	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
40	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
41	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
42	Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. Permeabilidad media a alta.	7	5	35
43	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
44	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
45	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
46	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
47	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
48	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30
49	Cretácico superior. Rocas sedimentarias marinas predominantemente arcillosas (lutitas, limolitas y calizas arcillosas). Permeabilidad baja.	6	5	30

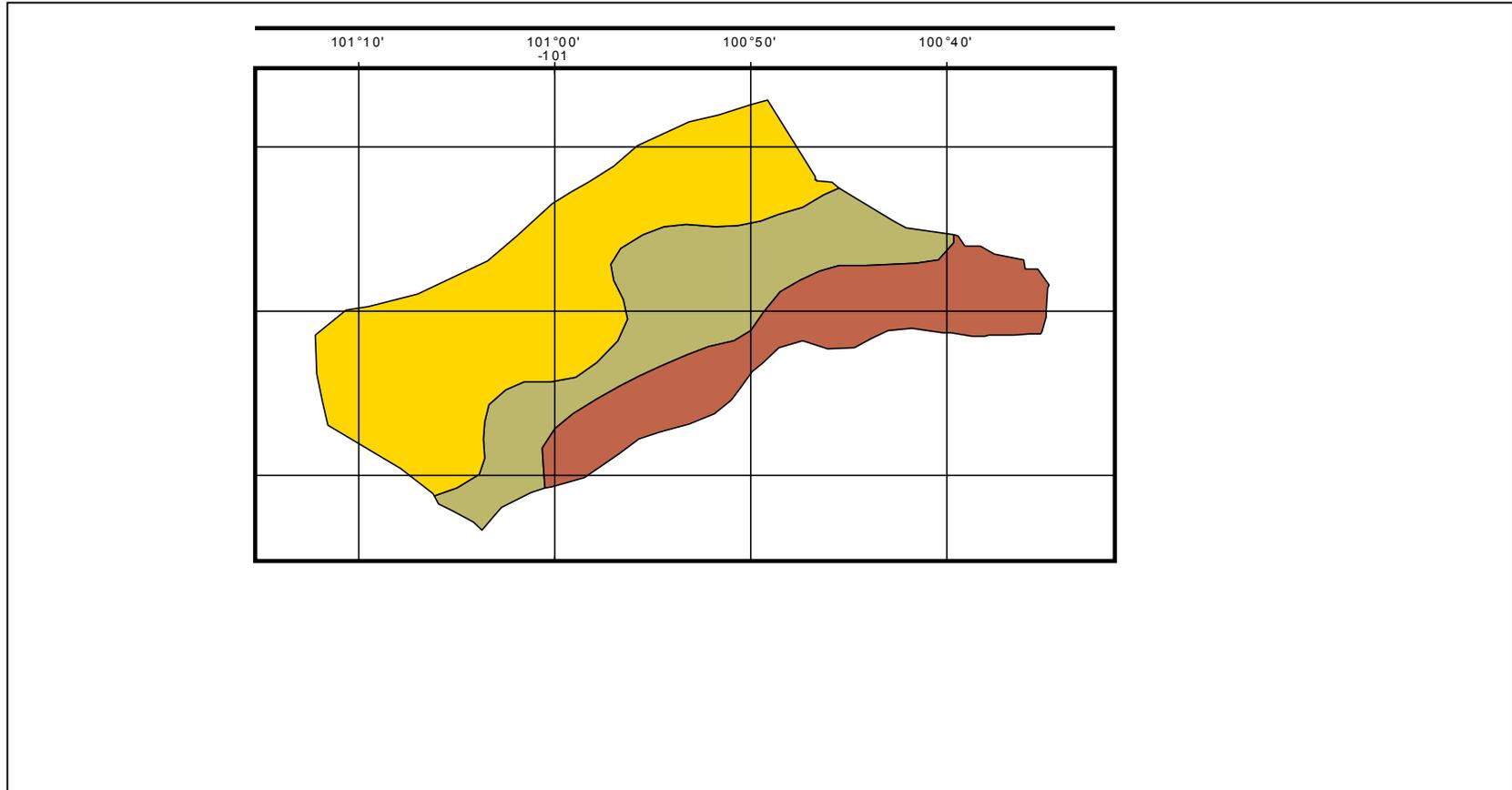


Figura 4.4 Mapa de hidrogeología

Conductividad Hidráulica.

El tipo de acuífero y las características de la zona no saturada marcan una cierta relación con la conductividad hidráulica y esto tiene importancia porque indica la rapidez con la que se mueve el agua en el suelo. La valoración de este parámetro es complejo si no se dispone de ensayos de bombeo que hayan determinado parámetros hidráulicos, por ello se pueden emplear los valores teóricos relativos estimados para las diferentes litologías, estableciendo rangos en función de la propia litología, número de captaciones existentes, caudal explotado y otras observaciones realizadas en el campo. Los valores reportados van desde 4-12 m/día, de 12-28 m/día y de 28-40 m/día. (Cuadro 4.7).

Índices Encontrados.

Para los índices encontrados una vez aplicada la fórmula de DRASTIC mostrados en la tabla 4.8 donde arrojó un mapa de vulnerabilidad que la mayor parte esta cubierta por una condición de vulnerabilidad media, en segundo término esta la vulnerabilidad baja y en zonas aisladas alta vulnerabilidad a la contaminación. (Figura 4.5).

Cuadro 4.7. Valores obtenidos para la Conductividad hidráulica

Nodo	Conductividad H. en m/día	Rango _ conductividad	Peso _ conductividad	Valor
1	4.08-12.22	4	3	12
2	12.22-28.55	6	3	18
3	12.22-28.56	6	3	18
4	4.08-12.22	4	3	12
5	4.08-12.23	4	3	12
6	12.22-28.55	6	3	18
7	12.22-28.56	6	3	18
8	28.52-40.75	8	3	24
9	4.08-12.22	4	3	12
10	4.08-12.23	4	3	12
11	4.08-12.24	4	3	12
12	12.22-28.55	6	3	18
13	12.22-28.56	6	3	18
14	28.52-40.75	8	3	24
15	28.52-40.76	8	3	24
16	4.08-12.22	4	3	12
17	4.08-12.23	4	3	12
18	4.08-12.24	4	3	12
19	4.08-12.25	4	3	12
20	4.08-12.26	4	3	12
21	12.22-28.55	6	3	18
22	12.22-28.56	6	3	18
23	28.52-40.75	8	3	24
24	28.52-40.76	8	3	24
15	28.52-40.77	8	3	24
26	4.08-12.22	4	3	12
27	4.08-12.23	4	3	12
28	4.08-12.24	4	3	12
29	12.22-28.56	6	3	18

30	12.22-28.57	6	3	18
31	28.52-40.76	8	3	24
32	28.52-40.77	8	3	24
33	28.52-40.78	8	3	24
34	28.52-40.79	8	3	24
35	28.52-40.80	8	3	24
36	4.08-12.24	4	3	12
37	4.08-12.25	4	3	12
38	12.22-28.57	6	3	18
39	12.22-28.58	6	3	18
40	12.22-28.59	6	3	18
41	12.22-28.60	6	3	18
42	12.22-28.61	6	3	18
43	4.08-12.25	4	3	12
44	4.08-12.26	4	3	12
45	4.08-12.27	4	3	12
46	4.08-12.28	4	3	12
47	4.08-12.29	4	3	12
48	4.08-12.30	4	3	12
49	4.08-12.31	4	3	12

Cuadro 4.8. Valores obtenidos para el índice DRASTIC

NODO	Índice DRASTIC
1	122
2	133
3	121
4	115
5	105
6	126
7	118
8	124
9	105
10	105
11	101
12	121

13	115
14	121
15	121
16	99
17	94
18	93
19	101
20	105
21	116
22	103
23	112
24	112
25	112
26	89
27	94
28	101
29	121
30	114
31	117
32	117
33	112
34	112
35	112
36	87
37	104
38	127
39	102
40	109
41	107
42	105
43	113
44	114
45	99
46	99
47	93
48	98
49	103

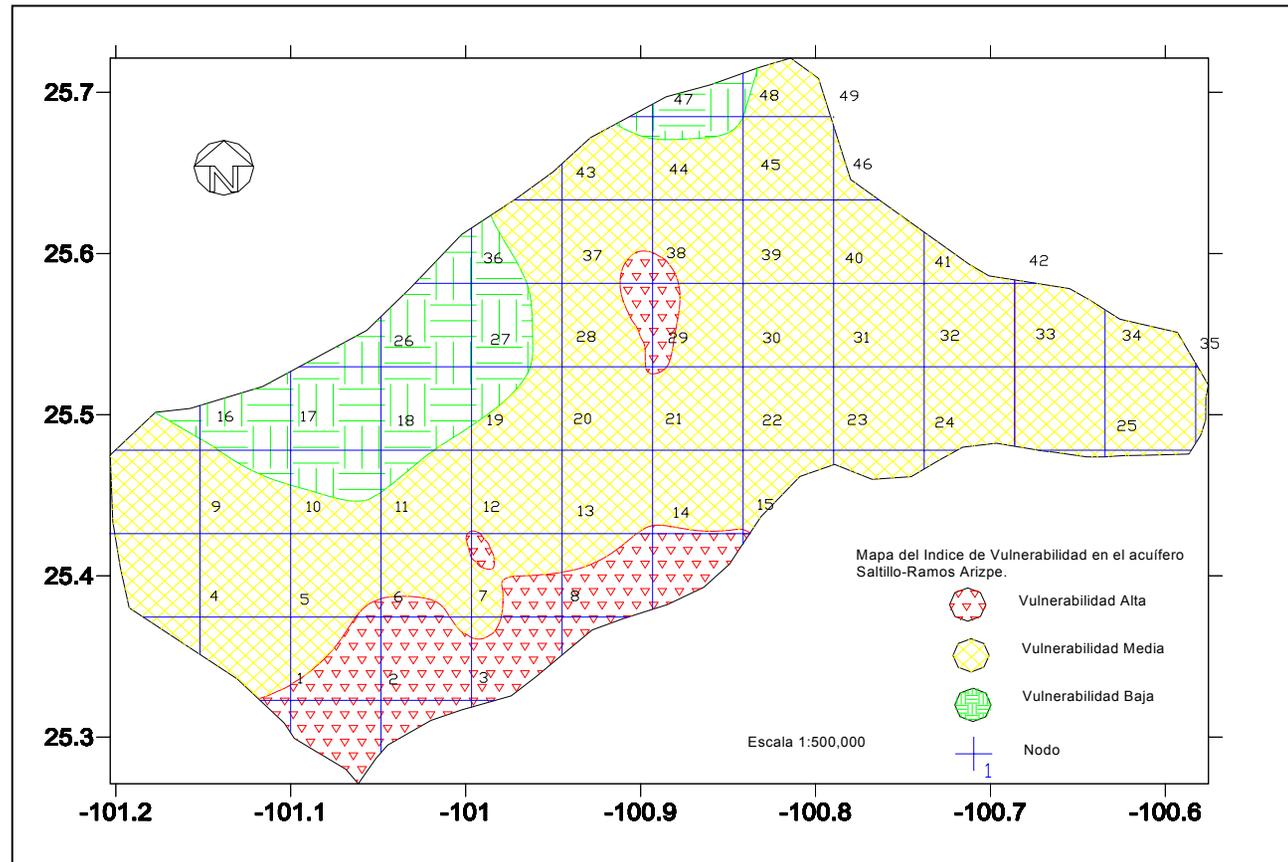


Figura 4.5. Mapa de Vulnerabilidad

V. CONCLUSIONES

El Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizado permitió que se manejaran los datos con mas precisión en el manejo de información.

Con la metodología DRASTIC se determino la vulnerabilidad a la contaminación el acuífero Saltillo- ramos Arizpe, obteniendo así un mapa que muestra el índice de vulnerabilidad, donde se distinguen tres zona importantes que van desde la vulnerabilidad alta hasta baja.

El rango de valores DRASTIC es del orden de 50 a 200, definiendo así la vulnerabilidad baja hasta extremadamente alta. Para el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe con rangos de 50 a 100 se determinó vulnerabilidad baja con un área de 156.93 Km², representando un 11.05%. De 100 a 120 vulnerabilidad media que tiene un área de 1142.41 Km², representando el 80.5% de todo la región siendo esta la más extensa y vulnerabilidad alta de 120 a 145 con un área de 119.66 Km² representando el 8.43%.

VI. RECOMENDACIONES

Un estudio de vulnerabilidad a la contaminación para que tenga cierto grado de confiabilidad debe de contar con elementos contundentes para poder determinar si el un acuífero puede ser contaminado o no, uno de estos elementos es la información precisa, detallada y actualizada. La información geohidrológica debe estar de forma disponible, para realizar estudios mas detallados que hagan referencia a la contaminación a las aguas subterráneas.

Debido a la gran importancia que tiene este tipo de estudios, es recomendable que un estudio de vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación forme parte de un plan previo para la explotación de los acuíferos, de esta forma hay más claridad en la toma de decisiones en el manejo de acuíferos.

Es necesario que se sigan haciendo más estudios de vulnerabilidad en regiones en las cuales aun no se han llevado a cabo.

VII. BIBLIOGRAFÍA

ATSDR 2002 Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades,
http://www.atsdr.cdc.gov/es/general/es_groundwater_fs.html

Aller L. B. T. Lehr J. Petty R. & G. Hackett. 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA /600/2-87-036: 1-455. Oklahoma.

Carbonell A. 1993. Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. National Research Council. National Academy Press: 1-204. Washington DC.

Custodio, E. y M. R. Llamas (Eds.) (1983). Hidrología Subterránea. (2 tomos). Omega, 2350 pp.

Comisión Nacional del Agua (2002). Determinación de la disponibilidad del agua en el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe, <http://www.cna.gob.mx>

Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. Geoinformación (2002), metadatos y cartografía en línea. <http://www.conabio.gob.mx>

Consultores en Agua Subterránea, S. A., 1986. Exploración Geofísica en la Zona de Saltillo, Coahuila. Realizado para SARH.

De los Santos, J. *et al.* 1998. Modelación Numérica del Acuífero Raigón. Proyecto CONICYT – BID 71/94. IMFIA, U de la R. Uruguay.

E. A. FitzPatrick, 1984, Suelos, su formación, clasificación y distribución Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México pp. 340.

EPA. 1991. A review of methods for assessing the sensitivity of aquifers to pesticide contamination. Preliminary document: 1-21. Washington DC.

Estudios Geológicos y Obras Civiles, S. A., 1974. Estudio Geohidrológico Preliminar de la Zona Saltillo-Ramos Arizpe, Coahuila. Realizado para DGZA de SRH.

Foster, S y R. Hirata, 1988. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. CEPIS/PAHO-WHO Technical Report. Lima (Perú). 81 pp.

Foster S. y R. Hirata 1991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes. CEPIS: 1-81. Lima.

ININSA, S. A., 1981. Estudio Geohidrológico Cuantitativo de la Zona Saltillo Ramos Arizpe, Coahuila. Realizado para DGZA de SARH.

Instituto Nacional de Estadística e Informática. Información geográfica. (INEGI)

<http://www.inegi.gob.mx>

Imlay, R. W. 1936. Evolution of the Coahuila Peninsula, México. IV. Geology of the western part of the Sierra de Parras. Bull. Geol. Soc. Amer., 47: 1091-1152, 10 Pls.

Juárez B. E. y Rico R. A. 1976, Mecánica de Suelos tomo 1 Fundamento de la mecánica de suelos, ed. LIMUSA, México pp. 198.

Kazmann G. R., Hidrología moderna, ed. CECOSA, México, 1969.

Kelly W. A. 1936, Evolution of the Coahuila, peninsula, Mexico Bulletin of the Geological Society of America 47(7).

Lesser y Asociados, S. A. de C. V., 1996. Estudio Geohidrológico de la Zona Saltillo Ramos Arizpe, Coahuila. Realizado para CNA.

Linsley, Jr R. K., Kohler M. A. Hidrología para ingenieros, segunda edición, McGraw-Hill México, 1977 pp. 163-170

Murray, G. E. Weidie, A.E. Jr., Boyd, D.R., Forde, R.H., Lewis, P.D. Jr., 1962 Formational divisions of difunta Group, Parras Basin, Coahuila and Nuevo León Mexico: American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 46, 374-383

Red temática de ciencias de la tierra de España, Red Iberoamericana sobre vulnerabilidad de acuíferos. <http://www.rediris.es/hidrored/>

United State Environmental Protection Agency (USEPA). 1993. Considerations in Deciding to Treat Contaminated Unsaturated Soils in Situ, EPA/540/S-94/500, Dec. 1993.