

86



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL  
TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA

MODELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN  
DEL AGUA SUBTERRÁNEA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

CARLOS MOLINA SERRANO

DIRECTOR DE TESIS: ING. MIGUEL A. GONZÁLEZ LÓPEZ



MEXICO, D. F.

2002



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/085/01

Señor  
**CARLOS MOLINA SERRANO**  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. MIGUEL ANGEL GONZALEZ LÓPEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**"MODELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA"**

- I. **INTRODUCCIÓN**
- I. **LEGISLACIÓN NACIONAL RELATIVA A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA**
- II. **GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS**
- III. **MODELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS**
- IV. **DESARROLLO DE SOFTWARE**
- V. **CASO ESTUDIO**
- CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 2 de mayo de 2001.  
EL DIRECTOR

**M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO**  
GFB/GMP/mstg.

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios por iluminarme con su esperanza en aquellos momentos difíciles para poder concluir mi licenciatura.*

*A mis Padres por su amor y apoyo, ya que les entrego un poco de lo mucho que me han dado y que vean hecho realidad un sueño que tal vez ni ellos mismos imaginaron ver, el primer profesional de la familia. Los quiere su hijo Carlos.*

*A Marisol, mi hermana a quien le debo mucho por alcanzar esta cima y que siempre nos tendremos para apoyarnos en todo.*

*A Rafael, mi amigo desde la infancia que siempre me acompañó en logros y tropiezos. Le doy gracias a Dios por conocer a una persona tan sencilla y con los mejores sentimientos de amistad. Gracias por ser mi amigo.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por abrirme sus puertas y darme las herramientas necesarias para servir a mi país, México.*

*Al Ingeniero Miguel Ángel González López por su tiempo, dedicación y disciplina para que juntos lográramos este proyecto pionero en la ingeniería civil.*

*Al Doctor Virgilio Moreno que al traerme a este mundo ahora me vea llegar a donde pocos han podido, gracias por sus consejos.*

*Al Ingeniero Juan Manuel Acevedo por sus consejos, apoyo y hacerme ver que la vida no es tan difícil como parece.*

*A la Licenciada María Elena Cano Salazar por todo el tiempo que me dedicó en la asesorías donde me ayudó a crecer como individuo y darme las herramientas para salir a vivir el mundo que me espera.*

*Al licenciado Javier Gómez por su tiempo y asesoría para poder cumplir este objetivo tan importante en mi vida.*

*A la Coordinación de Proyectos Académicos por los cursos que tomé, ya que detrás de cada manual está el esfuerzo de todo un equipo de gente profesional, brindando lo mejor de ellos.*

*A los Ingenieros Enrique César, Alba Vázquez y Ricardo Padilla que fuera de las aulas muestran gran interés y atención por sus alumnos.*

*A mis compañeros Daniel y Areli que me dieron su amistad, y que desafortunadamente ya no están entre nosotros.*

---

***LA BASE DE TODA SABIDURÍA ES:***

***“CONÓCETE A TI MISMO”***

***SÓCRATES.***

---

# Í N D I C E

## INTRODUCCIÓN

### CAPÍTULO I

#### LEGISLACIÓN NACIONAL RELATIVA A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

I.1	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente .....	I.1
I.2	Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento .....	I.5
I.2.1	Ley de Aguas Nacionales .....	I.5
I.2.2	Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales .....	I.9
I.3	Norma Oficial Mexicana NOM – 003 – CNA – 1996 .....	I.12
I.4	Código Penal para el Distrito Federal en Materia de Fuero Común, y para toda la República en Materia de Fuero Federal .....	I.16
I.5	Ley Federal de Derechos en Materia de Agua .....	I.17

### CAPÍTULO II

#### GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS

II.1	Generalidades del Comportamiento de los Acuíferos .....	II.1
II.2	Acuífero Confinado .....	II.6
II.2.1	Acuífero Confinado en Régimen Permanente .....	II.6
II.2.2	Acuífero Confinado de Espesor Constante en Régimen Variable .....	II.10
II.3	Acuífero Semiconfinado .....	II.10
II.3.1	Consideraciones Generales .....	II.10
II.4	Acuífero Libre .....	II.11
II.4.1	Coefficiente de Almacenamiento para un Acuífero Libre .....	II.11
II.4.2	Acuífero Libre en Régimen Permanente .....	II.12
II.5	Porosidad .....	II.12
II.6	Coefficiente de Almacenamiento .....	II.14
II.7	Gradiente Hidráulico .....	II.16
II.7.1	Cálculo del Gradiente Hidráulico por la Pérdida de Carga .....	II.16
II.7.2	Cálculo del Gradiente Hidráulico por los Niveles Piezométricos .....	II.17
II.7.3	Cálculo del Gradiente Hidráulico por la Pendiente de la Superficie Piezométrica .....	II.18
II.8	Permeabilidad .....	II.20
II.8.1	Coefficiente de Permeabilidad .....	II.24
II.8.2	Factores que Influyen en la Permeabilidad de los Suelos .....	II.24
II.8.2.1	Influencia de la Relación de Vacíos del Suelo .....	II.24
II.8.2.2	Influencia de la Temperatura del Agua .....	II.25
II.8.2.3	Influencia de la Estructura y la Estratificación .....	II.25
II.8.2.4	Influencia de la Presencia de Agujeros, Fisuras, etc. ....	II.26
II.9	Transmisibilidad .....	II.26

# Í N D I C E

---

## CAPÍTULO III

### MODELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS.

III.1	Propagación de Contaminantes .....	III.1
III.2	Aplicaciones .....	III.6
III.3	Dispersión de Contaminantes de Acuíferos para Diversos Casos .....	III.6
III.4	Consideraciones sobre Dispersión .....	III.16
III.5	Caso General .....	III.18

## CAPÍTULO IV

### DESARROLLO DE SOFTWARE.

IV.1	Diagrama de flujo .....	IV.3
IV.1.1	Caso I .....	IV.3
IV.1.2	Caso II .....	IV.7
IV.1.3	Caso III .....	IV.8
IV.2	Lenguaje Fuente del Programa .....	IV.9

## CAPÍTULO V

### CASO ESTUDIO

V.1	Caso Estudio .....	V.1
-----	--------------------	-----

### CONCLUSIONES

### BIBLIOGRAFÍA

---



## INTRODUCCIÓN

Se han definido cerca de 653 acuíferos distribuidos en el territorio nacional, de los cuales 96 están sometidos a sobreexplotación. Estos acuíferos suministran aproximadamente el 50% de la extracción nacional para todos los usos. Debido a la sobreexplotación, la reserva de agua subterránea se está minando a un ritmo de cerca de 8 km<sup>3</sup> por año.

Existen 17 acuíferos con problemas de intrusión salina ubicados en los estados de Baja California, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz. Entre éstos se encuentran Maneadero y San Quintín en Baja California; Santo Domingo en Baja California Sur; Caborca, Costa de Hermosillo y San José de Guaymas en Sonora.

Una de las principales acciones realizadas por la CNA durante los últimos años en lo que se refiere a las aguas del subsuelo, ha sido mejorar el conocimiento de los principales acuíferos del país. Para ello, se han realizado numerosos estudios que comprenden la revisión de las características de los cuerpos de agua subterráneos; la observación periódica de la evolución de sus niveles y de la calidad del agua; la evaluación de la recarga; la regularización de los volúmenes de agua que se extraen de ellos; y el desarrollo de modelos para simular su comportamiento y prever su evolución.

El agua subterránea se ha convertido en un elemento indispensable en el suministro a los diferentes usuarios, bien sea en las zonas áridas, donde constituye la fuente de abastecimiento más importante, y a menudo única, o en las diferentes ciudades del territorio, las cuales han tenido que recurrir a ella para cubrir sus crecientes requerimientos de agua.

El balance nacional de agua subterránea es positivo en su conjunto, ya que la extracción representa sólo el 53% de la recarga natural. Sin embargo, este balance encubre diversas situaciones críticas, debido a que una gran parte de los recursos renovables permanece sin uso en las regiones más húmedas y menos desarrolladas del sur, en tanto que en las zonas áridas y semiáridas del centro, norte y noreste, la cantidad de agua extraída en numerosos e importantes acuíferos es mucho mayor a la de su recarga, es decir, existe una fuerte sobreexplotación.

El problema de la sobreexplotación de los acuíferos del país es cada vez más grave; en 1975 eran 32 los acuíferos sobreexplotados, número que se elevó a 36 en 1981, a 80 en 1985 y a 100 en 1999.

La sobreexplotación ha ocasionado que la calidad del agua de numerosos acuíferos se haya deteriorado, principalmente por intrusión salina y migración de agua fósil de mala calidad inducida por los efectos del bombeo, así como por la contaminación difusa generada en las ciudades y zonas agrícolas.

Un problema potencial importante en la contaminación de acuíferos como resultado del vertido de efluentes urbanos e industriales no tratados que se descargan directamente en las áreas de recarga. En este sentido, no existen datos sustantivos que permitan evaluar su evolución.

Debido a lo anterior es que surgió el interés por realizar el presente estudio que está constituido por cinco capítulos.

---

En el capítulo uno titulado “Legislación Nacional Relativa de la Contaminación del Agua Subterránea”, se describen los artículos, sanciones, obras y derechos de los usuarios al agua, relacionados con la contaminación del agua subterránea.

En el capítulo dos titulado “Generalidades del Comportamiento de los Acuíferos”, se hace una clasificación y descripción de los tipos de acuíferos, además se mencionan y detallan los conceptos fundamentales de los acuíferos que darán las bases para el estudio de los casos que se analizan posteriormente.

En el capítulo tres titulado “Modelación de la Contaminación de los Acuíferos” se describe el comportamiento matemático de las aguas subterráneas y se analizan tres casos diferentes de acuerdo a los tipos de acuíferos.

En el capítulo cuatro titulado “Desarrollo de Software” se aplican la programación de las ecuaciones que describen el comportamiento en los tres casos desarrollados, en el lenguaje de Visual Basic 6.0 donde se muestran para dichas ecuaciones los diagramas de flujo y la programación en el caso I.

En el capítulo cinco titulado “Caso Estudio” se analizan los tres casos estudiados anteriormente.

---

## **CAPÍTULO I**

### **LEGISLACIÓN NACIONAL RELATIVA A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA**

En este capítulo se expone de forma general la legislación, que se ha hecho para prevenir, controlar y en su caso evitar la creciente contaminación de las aguas subterráneas.

Anteriormente no se le daba la importancia a legislar la contaminación del medio ambiente, hoy en día cualquier obra de ingeniería civil debe cumplir con los requisitos mínimos.

Para efectos del tema de este primer capítulo se incluye la Ley General de Equilibrio Ecológico expedida por la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, también se incluye los artículos referentes a contaminación de agua subterránea de la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento expedida por la Comisión Nacional del Agua; donde se explica a nivel nacional las condiciones y características para prevenir el aumento de la contaminación a los acuíferos. Adicionalmente se incluye la NOM-003-CNA-1996 expedida también por la Comisión Nacional del Agua con el título "Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos" donde se dan las condiciones para que los interesados cumplan en la perforación de pozos y no contaminen los acuíferos.

Posteriormente se menciona el artículo 416 del Código Penal para el Distrito Federal en Materia de Fuero Común, y para toda la República en Materia de Fuero Federal, donde se describen las sanciones económicas para aquellos delitos ambientales a los cuerpos de aguas nacionales. Finalmente se describe un resumen de la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de enero de 2001, elaborada por la Comisión Nacional del Agua, en donde se mencionan las condiciones y características que los usuarios al derecho al agua deben de cubrir por ese servicio que el gobierno les proporciona.

#### **1.1.- LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE.**

Esta Ley fue expedida en 1988 y reformada en 1996. En la figura 1.1 se presentan los extractos relacionados con la contaminación de acuíferos, a continuación se resumirán dichos extractos.

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	Título Primero	Capítulo II	Artículo 5
		Título Segundo	Sección II
	Título Tercero	Capítulo I	Artículo 88
		Capítulo II	Artículo 99
	Título Cuarto	Capítulo I	Artículo 109 BIS
		Capítulo III	Artículo 117
			Artículo 120
			Artículo 121
		Capítulo IV	Artículo 122
			Artículo 136
		Artículo 139	

Figura 1.1 Extractos de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente relacionados con la contaminación de acuíferos.

**TÍTULO PRIMERO**

**Disposiciones Generales**

**CAPÍTULO II**

**DISTRIBUCION DE COMPETENCIAS Y COORDINACION**

**ARTÍCULO 5.-** Son facultades de la federación:

XIV.- La regulación de las actividades relacionadas con la exploración, explotación y beneficio de los minerales, sustancias y demás recursos del subsuelo que corresponden a la nación, en lo relativo a los efectos que dichas actividades puedan generar sobre el equilibrio ecológico y el ambiente.

**TÍTULO SEGUNDO**

**BIODIVERSIDAD**

**CAPÍTULO I**

**ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS**

**SECCIÓN II**

**TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS**

**ARTÍCULO 49.-** En las zonas núcleo de las áreas naturales protegidas quedará expresamente prohibido:

I.- Verter o descargar contaminantes en el suelo, subsuelo y cualquier clase de cauce, vaso o acuífero, así como desarrollar cualquier actividad contaminante.

## **TÍTULO TERCERO**

### **APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE LOS ELEMENTOS NATURALES**

#### **CAPÍTULO I**

##### **APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DEL AGUA Y LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS.**

**ARTÍCULO 88.-** *Para el aprovechamiento sustentable del agua y los ecosistemas acuáticos se considerarán los siguientes criterios:*

*III.- Para mantener la integridad y el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico, se deberá considerar la protección de suelos y áreas boscosas y selváticas y el mantenimiento de caudales básicos de las corrientes de agua, y la capacidad de recarga de los acuíferos.*

#### **CAPÍTULO II**

##### **PRESERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DEL SUELO Y SUS RECURSOS**

**ARTÍCULO 99.-** *Los criterios ecológicos para la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo se considerarán en:*

*XI.- Las actividades de extracción de materias de subsuelo; la exploración, explotación, beneficio y aprovechamiento de sustancias minerales; las excavaciones y todas aquellas acciones que alteren la cubierta y suelos forestales.*

## **TÍTULO CUARTO**

### **PROTECCIÓN AL AMBIENTE**

#### **CAPÍTULO I**

##### **DISPOSICIONES GENERALES**

**ARTÍCULO 109 BIS.-** *La Secretaría, en los términos que señalen los reglamentos de esta Ley, deberá integrar un inventario de emisiones atmosféricas, descargas de aguas residuales en cuerpos receptores federales o que se infiltren al subsuelo, materiales y residuos peligrosos de su competencia, coordinar los registros que establezca la Ley y crear un sistema consolidado de información basado en las autorizaciones, licencias o permisos que en la materia deberán otorgarse.*

#### **CAPÍTULO III**

##### **PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA Y DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS.**

**ARTÍCULO 117.-** *Para la prevención y control de la contaminación del agua se considerarán los siguientes criterios.*

*II.- Corresponde al Estado y la sociedad prevenir la contaminación de ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos y corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo.*

*IV.- Las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo.*

**ARTÍCULO 120.-** *Para evitar la contaminación del agua, quedan sujetos a regulación federal o local:*

*VI.- Las infiltraciones que afecten los mantos acuíferos.*

**ARTÍCULO 121.-** *No podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal, o de la autoridad local en los casos de descargas en aguas de jurisdicción local o a los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población.*

**ARTÍCULO 122.-** *Las aguas residuales provenientes de usos públicos urbanos y las de usos industriales o agropecuarios que se descarguen en los sistemas de drenaje y alcantarillado de las poblaciones o en las cuencas, ríos, cauces, vasos y demás depósitos o corrientes de agua, así como las que por cualquier medio se infiltren en el subsuelo, y en general, las que se derramen en los suelos, deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir:*

*III.- Trastornos, impedimentos o alteraciones en los correctos aprovechamientos, o, en el funcionamiento adecuado de los sistemas, y en la capacidad hidráulica en las cuencas, cauces, vasos, mantos acuíferos y demás depósitos de propiedad nacional, así como de los sistemas de alcantarillado.*

#### **CAPÍTULO IV**

#### **PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO**

**ARTÍCULO 136.-** *Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:*

*I.- La contaminación del suelo;*

*II.- Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos;*

*III.- Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación, y*

*IV.- Riesgos y problemas de salud.*

**ARTÍCULO 139.-** *Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.*

## I.2.- LEY DE AGUAS NACIONALES Y SU REGLAMENTO.

### I.2.1.- LEY DE AGUAS NACIONALES

La Ley de Aguas Nacionales se deriva del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos donde se menciona el dominio de las aguas. Esta Ley sustituye a la promulgada en el año de 1972 (Ley Federal de Aguas) y es reformada en su última ocasión en el año de 1999. En la figura 1.2 se presentan los extractos relacionados con la contaminación de acuíferos.

A continuación se muestran los extractos relacionados con la contaminación de acuíferos.

Ley de Aguas Nacionales	—	Título Primero	—	Capítulo único	—	Artículo 2
	—	Título Segundo	—	Capítulo II	—	Artículo 3
	—	Título Quinto	—	Capítulo único	—	Artículo 7
	—	Título Sexto	—	Capítulo I	—	Artículo 42
	—	Título Séptimo	—	Capítulo III	—	Artículo 44
	—	Título Séptimo	—	Capítulo único	—	Artículo 47
	—	Título Séptimo	—	Capítulo único	—	Artículo 81
	—	Título Séptimo	—	Capítulo único	—	Artículo 86
	—	Título Séptimo	—	Capítulo único	—	Artículo 88
	—	Título Séptimo	—	Capítulo único	—	Artículo 91
—	Título Séptimo	—	Capítulo único	—	Artículo 96	
—	Título Octavo	—	Capítulo IV	—	Artículo 112	
—	Título Décimo	—	Capítulo I	—	Artículo 119	

Figura 1.2 Extractos de la Ley de Aguas Nacionales relacionados con la contaminación de acuíferos.

#### **TÍTULO PRIMERO** **DISPOSICIONES PRELIMINARES** **CAPÍTULO UNICO**

**ARTÍCULO 2.-** Las disposiciones de esta ley son aplicables a todas las aguas nacionales, sean superficiales y del subsuelo. Estas disposiciones también son aplicables a los bienes nacionales que la presente ley señala.

**ARTÍCULO 3.-** Para los efectos de esta ley se entenderá por:

II.- "Acuífero": cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento.

**TÍTULO SEGUNDO**  
**ADMINISTRACIÓN DEL AGUA**  
**CAPÍTULO I**  
**DISPOSICIONES GENERALES**

**ARTÍCULO 7.-** *Se declara de utilidad pública:*

*II.- La protección, mejoramiento y conservación de cuencas, acuíferos, cauces, vasos y demás depósitos de propiedad nacional, así como la infiltración de aguas para reabastecer mantos acuíferos y la derivación de las aguas de una cuenca o región hidrológica hacia otras;*

*IV.- Restablecer el equilibrio hidrológico de las aguas nacionales, superficiales o de subsuelo, incluidas las limitaciones de extracción, las vedas, las reservas y el cambio en el uso del agua para destinarlo al uso doméstico.*

**TÍTULO QUINTO**  
**ZONAS REGLAMENTADAS, DE VEDA O DE RESERVA**  
**CAPÍTULO ÚNICO**

**ARTÍCULO 42.-** *La explotación, uso o aprovechamiento de las aguas del subsuelo en las zonas en donde el Ejecutivo Federal las reglamente o decrete su veda, incluso las que hayan sido libremente alumbradas requerirán de:*

*I.- Concesión o asignación para su explotación, uso o aprovechamiento; y*

*II.- Permisos para las obras de perforación que se realicen a partir de decreto de veda o reglamentación.*

**TÍTULO SEXTO**  
**USOS DEL AGUA**  
**CAPÍTULO I**  
**USO PUBLICO URBANO**

**ARTÍCULO 44.-** *La explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales superficiales o del subsuelo por parte de los sistemas estatales o municipales de agua potable y alcantarillado, se efectuarán mediante asignación que otorgue "La Comisión", en la cual se consignará en su caso la forma de garantizar el pago de las contribuciones, productos y aprovechamientos que se establecen en la legislación fiscal y la forma prevista para generar los recursos necesarios para el cumplimiento de estas obligaciones.*

**ARTÍCULO 47.-** *Las descargas de aguas residuales a bienes nacionales o su infiltración en terrenos que puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos se sujetarán a lo dispuesto en el Título Séptimo.*



*"La Comisión" promoverá el aprovechamiento de aguas residuales de los sistemas de agua potable y alcantarillado, que se podrán realizar por los municipios, los organismos operadores o por terceros.*

### **CAPÍTULO III**

#### **USO EN GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**ARTÍCULO 81.-** *La explotación, el uso o aprovechamiento de aguas del subsuelo en estado de vapor o con temperatura superior a ochenta grados centígrados, cuando se pueda afectar un acuífero requerirán de la previa asignación o concesión para generación geotérmica u otros usos.*

### **TÍTULO SÉPTIMO**

#### **PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS**

##### **CAPÍTULO ÚNICO**

**ARTÍCULO 86.-** *"La Comisión" tendrá a su cargo:*

*I.- Promover y, en su caso ejecutar y operar la infraestructura federal y los servicios necesarios para la preservación, conservación y mejoramiento de la calidad del agua en las cuencas hidrológicas y acuíferos, de acuerdo con las normas oficiales mexicanas respectivas y las condiciones particulares de descarga en los términos de la ley;*

*II.- Formular programas integrales de protección de los recursos hidráulicos en cuencas hidrológicas y acuíferos, considerando las relaciones existentes entre los usos del suelo y la cantidad y calidad del agua;*

*III.- Establecer y vigilar el cumplimiento de las condiciones particulares de descarga que deben satisfacer las aguas residuales que se generen en bienes y zonas de jurisdicción federal, de aguas residuales vertidas directamente en aguas y bienes nacionales, o en cualquier terreno cuando dichas descargas puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos; y en los demás casos previstos en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente;*

*VI.- Promover o realizar las medidas necesarias para evitar que basura, desechos materiales y sustancias tóxicas, y lodos producto de los tratamientos de aguas residuales, contaminen las aguas superficiales o del subsuelo.*

**ARTÍCULO 88.-** *Las personas físicas o morales requieren permiso de "La Comisión" para descargar en forma permanente, intermitente o fortuita aguas residuales en cuerpos receptores que sean aguas nacionales o demás bienes nacionales o en otros terrenos cuando puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos.*

*"La Comisión" mediante acuerdos de carácter general por cuenca, acuífero, zona, localidad o por usos podrá sustituir el permiso de descarga de aguas residuales por su simple aviso.*

**ARTÍCULO 91.-** *La infiltración de aguas residuales para recargar acuíferos, requiere permiso de "La Comisión" y deberá ajustarse a las normas oficiales mexicanas que al efecto se emitan.*

**ARTÍCULO 96.-** *En las zonas de riego y en aquellas zonas de contaminación extendida o dispersa, el manejo y aplicación de sustancias que puedan contaminar las aguas nacionales superficiales o del subsuelo, deberán cumplir las normas, condiciones y disposiciones que se desprendan de la presente ley y su reglamento.*

*"La Comisión" promoverá en el ámbito de su competencia, las normas o disposiciones que se requieran para hacer compatible el uso de los suelos con el de las aguas, con el objeto de preservar la calidad de las mismas dentro de un ecosistema, cuenca o acuífero.*

## **TÍTULO OCTAVO**

### **INVERSIÓN EN INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA**

#### **CAPÍTULO IV**

#### **COBRO POR EXPLOTACIÓN, USO O APROVECHAMIENTO DE AGUAS NACIONALES Y BIENES NACIONALES**

**ARTÍCULO 112.-** *La explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, incluyendo las aguas del subsuelo, así como de los bienes nacionales que administre "La Comisión", motivará el pago por parte del usuario de las cuotas que establece la Ley Federal de Derechos.*

## **TÍTULO DÉCIMO**

### **INFRACCIONES, SANCIONES Y RECURSOS**

#### **CAPÍTULO I**

#### **INFRAESTRUCTURA Y SANCIONES ADMINISTRATIVAS**

**ARTÍCULO 119.-** *"La Comisión" sancionará, conforme a lo previsto por esta ley, las siguientes faltas:*

*I.- Descarga en forma permanente, intermitente o fortuita aguas residuales en contravención a lo dispuesto en la presente ley en cuerpos receptores que sean bienes nacionales, incluyendo aguas marinas, así como cuando se infiltren en terrenos que sean bienes nacionales o en otros terrenos cuando puedan contaminar el subsuelo o el acuífero, sin perjuicio de las sanciones que fijen las disposiciones sanitarias y de equilibrio ecológico y protección al ambiente;*

*XIV.- Arrojar o depositar, en contravención a la ley, basura, sustancias tóxicas peligrosas y lodos provenientes de los procesos de tratamiento de aguas residuales en ríos, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua o infiltrar materiales y sustancias que contaminen las aguas del subsuelo.*

## 1.2.2.- REGLAMENTO DE LA LEY DE AGUAS NACIONALES

El Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales fue promulgada en el año de 1992, pasando posteriormente por modificaciones donde la última se realizó en el año de 1999. En la figura 1.3 se presentan los extractos relacionados con la contaminación de acuíferos.

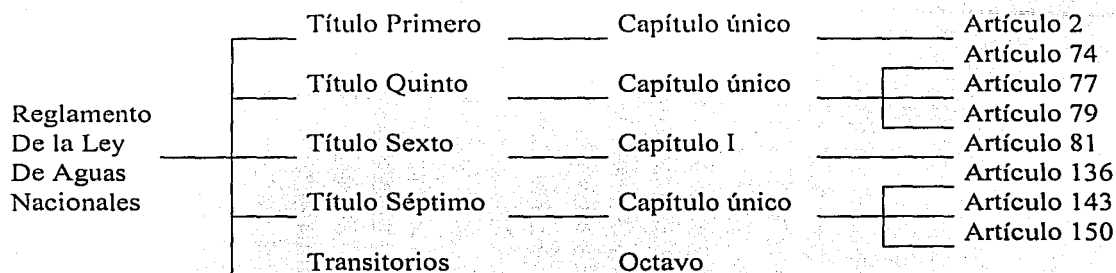


Figura 1.3 Extractos del Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales relacionados con la contaminación de acuíferos.

### **TÍTULO PRIMERO** **DISPOSICIONES PRELIMINARES** **CAPÍTULO ÚNICO**

**ARTÍCULO 2.-** Para los efectos de este "Reglamento", se entiende por:

*I.- Aguas continentales: las aguas nacionales, superficiales o del subsuelo, en la parte continental del territorio nacional;*

*VII.- Cuerpo receptor; la corriente o depósito natural de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales así como los terrenos en donde se infiltran dichas aguas, cuando puedan contaminar el suelo o los acuíferos.*

### **TÍTULO QUINTO** **ZONAS REGLAMENTADAS, DE VEDA O DE RESERVA** **CAPÍTULO ÚNICO**

**ARTÍCULO 74.-** Se entenderá por zona reglamentada, aquella en la que el Ejecutivo Federal mediante reglamento, por causa de interés público, establece restricciones o disposiciones especiales para la explotación, uso o aprovechamiento del agua, conforme a la disponibilidad del recurso y a las características de la zona a fin de lograr la administración racional e integral del recurso y conservar su calidad.

*El reglamento se aplicará, a partir de su entrada en vigor, tanto a los aprovechamientos de aguas superficiales y del subsuelo existentes al momento de su expedición, como a los que se autoricen con posterioridad.*

**ARTÍCULO 77.-** *Se entenderá como zona de veda aquella en la que el Ejecutivo Federal mediante decreto por causa de interés público, establece:*

*I.- Que no es posible mantener o incrementar las extracciones de agua superficial o del subsuelo, a partir de un determinado volumen fijado por "La Comisión" conforme a los estudios que al efecto realice, sin afectar el desarrollo integral sustentable del recurso y sin el riesgo de inducir efectos perjudiciales, económicos o ambientales, en las fuentes de agua de la zona en cuestión o en los usuarios del recurso; o*

*II.- Que se prohíben o limiten los usos del agua con objeto de proteger la calidad del agua en las cuencas o acuíferos.*

**ARTÍCULO 79.-** *En las zonas en las cuales el Ejecutivo Federal haya decretado una veda o en una zonas en las que se haya reglamentado la extracción y utilización de aguas nacionales del subsuelo, "La Comisión", en los términos de la "Ley" y el presente "Reglamento", a solicitud de los usuarios, expedirá las concesiones o asignaciones para su explotación, uso o aprovechamiento.*

**TÍTULO SEXTO**  
**USOS DEL AGUA**  
**CAPÍTULO I**  
**USO PÚBLICO URBANO**

**ARTÍCULO 81.-** *La explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, superficiales o del subsuelo para centros de población o asentamientos humanos, se efectuará mediante asignación para uso público urbano que otorgue "La Comisión", en los términos del artículo 44 de la "Ley".*

**TÍTULO SEPTIMO**  
**PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS**  
**CAPÍTULO ÚNICO**

**ARTÍCULO 136.-** *En los permisos de descargas de las aguas residuales de los sistemas públicos de alcantarillado y drenaje, además de lo dispuesto en el artículo anterior, se deberá señalar la forma conforme a lo dispuesto en la ley para efectuar:*

*II.- La verificación del estado de conservación de las redes públicas de alcantarillado con el fin de detectar y corregir, en su caso, las posibles fugas que indican en la calidad de las aguas subterráneas subyacentes y en la eventual contaminación de las fuentes de abastecimiento de agua.*

**ARTÍCULO 143.-** *"La Comisión" establecerá las condiciones particulares que deberán cumplir las descargas de aguas residuales previo a su posterior explotación, uso o aprovechamiento, asimismo, fijará las que deberán cumplir en el caso de su infiltración a un acuífero.*

*“La Comisión” podrá otorgar el permiso para recargar acuíferos con aguas depuradas, en los términos de la “Ley” y el presente “Reglamento”.*

**ARTÍCULO 150.-** *“La Comisión”, en el ámbito de su competencia, promoverá las medidas preventivas y de control para evitar la contaminación de las aguas superficiales o las del subsuelo por materiales y residuos peligrosos.*

*En el caso de que el vertido o infiltración de dichos materiales y residuos peligrosos contaminen las aguas nacionales superficiales o del subsuelo, o los bienes nacionales a que se refiere la “Ley”, “La Comisión” determinará las medidas correctivas que deban llevar a cabo las personas físicas o morales responsables o las que con cargo a éstas, efectuará “La Comisión”.*

*El daño causado se determinará y cuantificará por “La Comisión”, en el ámbito de su competencia, y se notificará a los responsables la resolución respectiva y se gestionara su cobro conforme a la “Ley”.*

*El pago del daño causado, procederá independientemente de que “La Comisión” y las demás autoridades competentes apliquen las sanciones a que haya lugar en los términos de ley. Para los efectos respectivos, “La Comisión” lo hará del conocimiento de las autoridades involucradas.*

## **TRANSITORIOS**

**OCTAVO.-** *El otorgamiento por parte de “La Comisión”, de permisos de descarga de aguas residuales a cuerpos receptores que sean bienes nacionales o cuya infiltración en terrenos pueda contaminar un acuífero, se sujetará a lo siguiente:*

*I.- Las personas que sin contar con permiso de descarga de aguas residuales hayan construido plantas de tratamiento de agua residual o las obras para el control de la calidad del agua, o tenga en proceso de realización el programa constructivo o la ejecución de las obras respectivas, en los términos del artículo 282-A de la Ley federal de Derechos, para cumplir con la legislación y reglamentación vigente en la materia, así como con las normas para la descarga de aguas residuales y con las condiciones particulares de descarga, se sujetarán a lo dispuesto en el transitorio noveno, y*

*II.- Las personas que no tengan permiso de descarga de agua residual y que no se encuentren en los supuestos de la fracción anterior, se sujetarán a lo dispuesto en el transitorio décimo de este “Reglamento.”*

### I.3.- NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-CNA-1996

Esta Norma Oficial Mexicana se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 12 de junio de 1996 y reformada su publicación en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de enero de 1997. En la figura 1.4 se presentan los extractos relacionados con la contaminación de acuíferos.

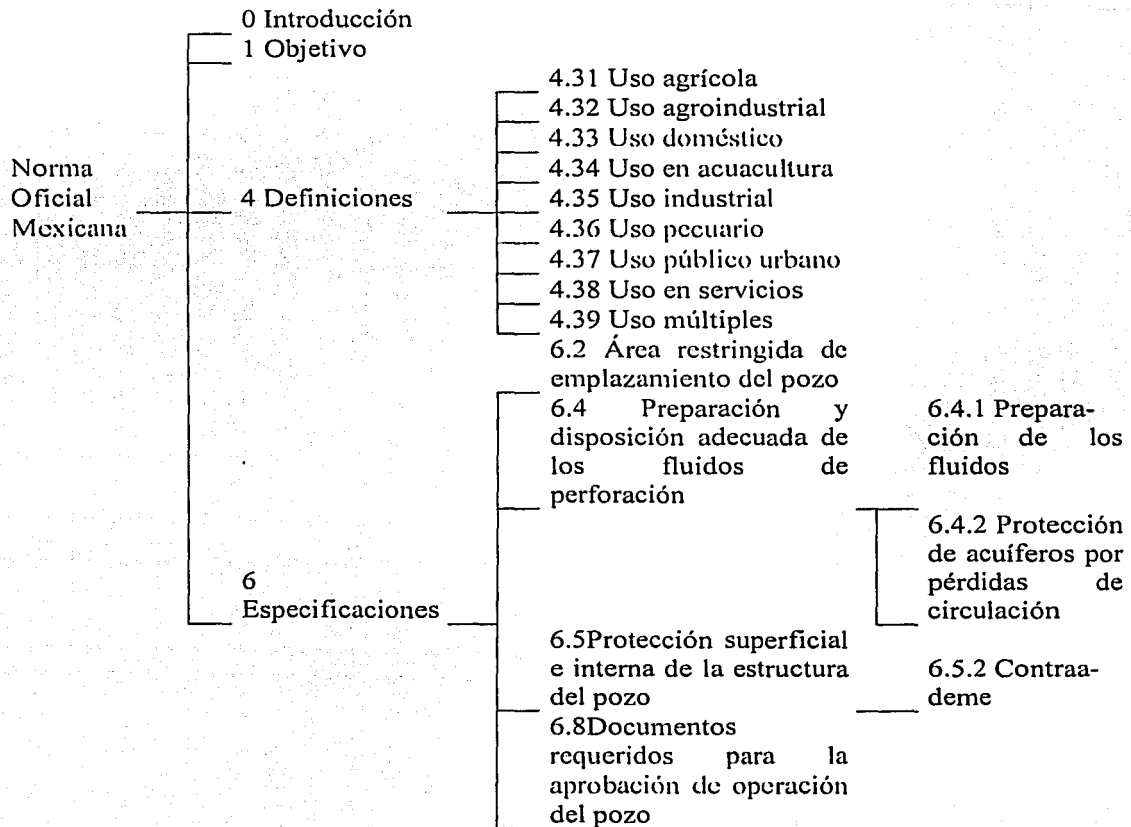


Figura 1.4 Extractos de la NOM-003-CNA-1996 relacionados con la contaminación de acuíferos.

## **0.- INTRODUCCIÓN**

*La necesidad de obtener agua en cantidades económicamente explotables ha originado la perforación de aproximadamente 140,000 pozos distribuidos en 460 acuíferos. Cuando los pozos para extracción de agua están mal construidos, ofrecen una vía de contaminación entre el ambiente externo y los acuíferos.*

*A diferencia del agua superficial en la que puede observarse el proceso de contaminación y la localización de las fuentes contaminantes, lo que permite la remediación y depuración del recurso de manera oportuna, en el caso del agua subterránea la contaminación avanza y se efectúa sin que pueda observarse, originando que a veces la fuente de abastecimiento de agua tenga que abandonarse temporal o definitivamente. Los estudios para determinar la fuente y características de la contaminación, así como el proceso de remediación o descontaminación, requieren plazos de hasta varios años y originan altos costos que obligan incluso a abandonar definitivamente la fuente local de abastecimiento de agua.*

*La falta de cuidado en el manejo de las instalaciones que contienen líquidos y depósitos de residuos sólidos degradables cercanos a los pozos para extracción de agua, la ausencia de reglamentación relativa a la distancia a la que se puede construir un pozo para extracción de agua de la fuente de contaminación no suprimible y el diseño y construcción inadecuado de pozos, ha dado como resultado la posible contaminación de las aguas subterráneas.*

## **1.- OBJETIVO**

*Esta Norma Oficial Mexicana establece los requisitos mínimos de construcción que se deben cumplir durante la perforación de pozos para la extracción de aguas nacionales y trabajos asociados, con objeto de evitar la contaminación de los acuíferos.*

## **4.- DEFINICIONES**

**4.31 USO AGRÍCOLA:** *La utilización de agua nacional destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas, y su preparación para la primera enajenación, siempre que los productos no hayan sido objeto de transformación industrial.*

**4.32 USO AGROINDUSTRIAL:** *Utilización de agua nacional para la actividad de transformación industrial de los productos agrícolas y pecuarios.*

**4.33 USO DOMÉSTICO:** *Utilización del agua nacional destinada al uso particular de las personas y del hogar, riego de sus jardines y de sus árboles de ornato, incluyendo el abrevadero de sus animales domésticos que no constituya una actividad lucrativa.*

**4.34 USO EN ACUACULTURA:** *La utilización de agua nacional destinada al cultivo, reproducción y desarrollo de cualquier especie de la fauna y flora acuáticas.*

**4.35 USO INDUSTRIAL:** *La utilización de agua nacional en fábricas o empresas que realicen la extracción, conservación o transformación de materias primas o minerales, el acabado de productos o la elaboración de satisfactores, así como la que se utiliza en parques industriales, en calderas, en dispositivos para enfriamiento, lavado, baños y otros servicios dentro de la empresa, las salmueras que se utilizan para la extracción de cualquier tipo de sustancias y el agua aún en estado de vapor, que sea usada para la generación de energía eléctrica o para cualquier otro uso o aprovechamiento de transformación.*

**4.36 USO PECUARIO:** *La utilización de agua nacional para la actividad consistente en la cría y engorda de ganado, aves de corral y animales, y su preparación para la primera enajenación, siempre que no comprendan la transformación industrial.*

**4.37 USO PÚBLICO URBANO:** *La utilización de agua nacional para centros de población o asentamientos humanos, a través de la red municipal.*

**4.38 USO EN SERVICIOS:** *La utilización de agua nacional para servicios distintos a los señalados en las fracciones 4.31 a 4.39 de esta norma*

**4.39 USOS MÚLTIPLES:** *La utilización de agua nacional aprovechada en más de uno de los usos definidos en párrafos anteriores, salvo el uso para conservación ecológica, el cual está implícito en todos los aprovechamientos.*

## **6.- ESPECIFICACIONES**

### **6.2.- ÁREA RESTRINGIDA DE EMPLAZAMIENTO DEL POZO**

*El área de protección entre el sitio seleccionado para construir un pozo y las fuentes potenciales de contaminación existentes que no pueden ser suprimidas, tendrá un radio mínimo de 30 m con respecto al pozo.*

*Las fuentes de contaminación son las siguientes (esta lista no es limitativa, sino que depende de lo que, para situaciones y condiciones particulares, la Comisión considere necesarias):*

- *Alcantarillado sanitario.*
- *Campos de precolación.*
- *Canales de agua residuales.*
- *Cloacas.*
- *Depósitos de jales.*
- *Fosas sépticas.*
- *Gasolineras y depósitos de hidrocarburos.*
- *Lechos de absorción.*
- *Letrinas.*
- *Pozos abandonados no sellados.*
- *Pozos de absorción.*
- *Puntos de descarga de aguas residuales de uso industrial.*
- *Rellenos sanitarios.*



- *Ríos y cauces con aguas residuales provenientes de los usos definidos en los puntos 4.31 a 4.39.*
- *Rastros y establos.*

*El radio mínimo podrá ser modificado por la Comisión o por la autoridad local competente, a través de la disposición legal o reglamentaria aplicable, con base en un estudio específico del sitio que considere la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación y la extensión de su área de influencia para diferentes tiempos.*

*Cuando no sea posible cumplir el radio mínimo especificado en la presente Norma o en la disposición local reglamentaria, el concesionario o asignatario deberá presentar a la Comisión el diseño que propone para evitar la contaminación del acuífero, basado en estudios hidrogeológicos.*

#### **6.4 PREPARACIÓN Y DISPOSICIÓN ADECUADA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.**

*En la perforación de pozos con fluidos, cuya base principal sea el agua y la bentonita, éstos no deben contener ninguna sustancia que degrade las características químicas del agua subterránea.*

##### **6.4.1 PREPARACIÓN DE LOS FLUIDOS**

*El agua utilizada en la preparación del fluido de perforación debe tener características físico-químicas tales que no inhiban las propiedades del fluido y no degraden al agua del subsuelo. Debe estar libre de organismos patógenos y poseer un pH entre 6 y 10.*

##### **6.4.2 PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS POR PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN**

*No se deben añadir al fluido de perforación materiales que puedan contaminar o reducir las propiedades hidráulicas del acuífero.*

#### **6.5 PROTECCIÓN SUPERFICIAL E INTERNA DE LA ESTRUCTURA DEL POZO**

*Todos los aprovechamientos hidráulicos subterráneos deben contar con protección sanitaria. De acuerdo con la estructura del pozo, el espacio anular entre las paredes de la formación y el ademe, así como la terminal superior del pozo, son las áreas que presentan mayor riesgo de contaminación.*

##### **6.5.2 CONTRAADEME.**

*El contraademe debe tener la longitud necesaria para evitar la infiltración de agua superficial o agua contaminada contenida en el subsuelo hacia el interior del pozo. El contraademe debe tener una longitud mínima de seis metros y debe sobresalir 0.20 m del nivel del terreno natural o sobreelevado, o bien 0.50 m, dependiendo del diseño del pozo. El espacio anular entre el contraademe y la formación adyacente será rellenado por completo con una lechada de cemento normal.*

*En el caso de que se perforen pozos donde existan acuíferos con agua de diferente calidad, el concesionario o asignatario deberá presentar a la Comisión el diseño del pozo para evitar la mezcla del agua de ellos por efecto del pozo y que pueda causar la degradación de la calidad del agua de alguno de los acuíferos.*

#### **6.8 DOCUMENTOS REQUERIDOS PARA LA APROBACIÓN DE OPERACIÓN DEL POZO.**

*Para aprobar la operación del pozo por parte de la Comisión, es necesario que el concesionario o asignatario entregue los siguientes documentos:*

- a) Croquis de localización del pozo, indicando las posibles fuentes de contaminación,*
- f) Análisis físico-químico del agua que incluya determinación del pH, conductividad eléctrica, sulfatos, nitratos, cloruros, dureza total, calcio, sodio, potasio y sólidos disueltos totales.*

#### **I.4.- CÓDIGO PENAL PARA EL DISTRITO FEDERAL EN MATERIA DE FUERO COMÚN, Y PARA TODA LA REPÚBLICA EN MATERIA DE FUERO FEDERAL.**

El presente Código fue publicado en el año de 1931 y modificado en su última versión en el año de 1996. A continuación se menciona el capítulo sobre lo referente a la sanción de delitos ambientales en acuíferos.

#### **TÍTULO VIGÉSIMO QUINTO CAPÍTULO ÚNICO DELITOS AMBIENTALES**

**ARTÍCULO 416.-** *Se impondrá pena de tres meses a seis años de prisión y multa por el equivalente de mil a veinte mil días de salario mínimo general vigente en el Distrito Federal al momento de cometer el delito, al que sin la autorización que en su caso se requiera, o en contravención a las disposiciones legales, reglamentarias y normas oficiales mexicanas:*

*I.- Descargar, deposite, o infiltre, o lo autorice u ordene, aguas residuales, líquidos químicos o bioquímicos, desechos o contaminantes en los suelos, aguas marinas, ríos, cuencas, vasos y demás depósitos o corrientes de agua de jurisdicción federal, que ocasionen o puedan ocasionar daños a la salud pública, a los recursos naturales, a la flora, a la fauna, a la calidad del agua de las cuencas o a los ecosistemas.*

## I.5.- LEY FEDERAL DE DERECHOS EN MATERIA DE AGUA.

La presente Ley Federal de Derechos fue expedida en el año de 1982 y reformada en su última versión en el año 2001. En la figura 1.5 se describe el índice de dicha Ley en materia de agua y posteriormente se hace un resumen de su contenido.

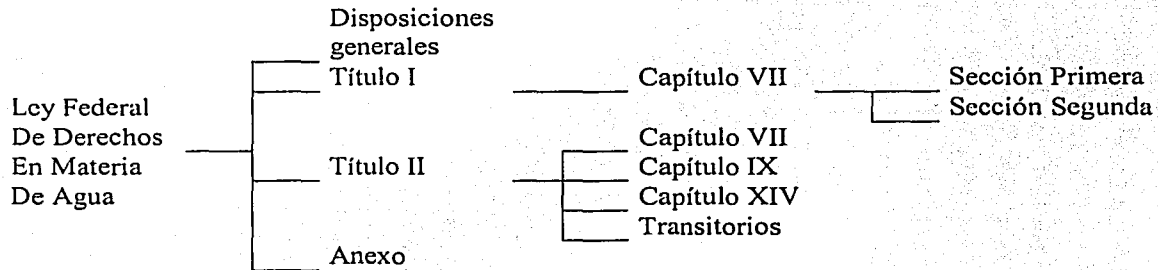


Figura 1.5 Extractos de la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua relacionados con la contaminación de acuíferos.

A continuación se menciona un resumen sobre dicha Ley:

La Ley Federal de Derechos en Materia de Agua fue publicada en el mes de enero del año 2001, elaborada por la Comisión Nacional del Agua, a través de la Gerencia de Recaudación y Control, dependiente de la Subdirección general de Administración del Agua.

Esta Ley consta de un apartado titulado “Disposiciones Generales” en donde se hace mención de las obligaciones que tiene el Estado por cobrar los servicios que brinda en materia de agua, así como de los factores que son utilizados para estos cobros fijados por el Congreso de la Unión y de sus actualizaciones en los meses de abril, julio y octubre.

Los montos que se señalen en esta Ley son establecidos por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público y se destinarán para cubrir los gastos de operación, conservación, mantenimiento e inversión a los organismos descentralizados.

Por otra parte se marcan las cuotas por trimestres para ciertas actividades a realizar por las personas físicas o morales con respecto al derecho al uso del agua a nivel nacional.

Posteriormente se menciona las condiciones de cobro y las características que debe contener el agua para ser usada por las personas físicas o morales, dividido por zonas de disponibilidad, por

parámetros y usos, además se menciona el costo por metro cúbico por conexión de agua potable para el Distrito Federal y Zona Conurbada del Valle de México.

Se menciona también la obligación que deben tener las personas físicas y morales en la operación de sus aparatos de medición ya que deben estar registrados ante la Comisión Nacional del Agua, posteriormente, se enlistan las diferentes zonas de disponibilidad, las cuales son nueve en donde se comprenden los estados y municipios de toda la republica mexicana y aquellos que no aparecen en la lista serán incluidos en el municipio más cercano que este en alguna de las zonas de disponibilidad.

Se menciona posteriormente las obligaciones a pagar el derecho a las personas físicas y/o morales en los inmuebles del dominio público.

También se hace mención sobre la distribución de los ingresos por las multas para todas las ciudades de la republica mexicana y cuando percibe la Federación.

Posteriormente se mencionan las facultades de las autoridades fiscales.

Otro capítulo de importancia es el que se refiere a la descarga de agua residuales a los bienes de la nación, en donde se explica los diferentes tipos de descarga a las aguas superficiales y subterráneas, así como también se da un glosario sobre todos los conceptos que se relacionan con la descarga de aguas residuales.

Se describe también una clasificación de los cuerpos receptores llamados tipo A, B y C en donde se enlistan para los dos últimos los cuerpos receptores por estados de la republica mexicana y al final se hace mención para las plataformas marinas que se considerarán como cuerpos receptores tipo A, referidos como aguas costeras con explotación pesquera, navegación y otros usos.

Se hace la mención de las condiciones que debe tener el agua residual al ser descargado a algún cuerpo de agua donde se debe de monitorear los volúmenes del agua residual vertidos, la calidad en que son descargados en su concentración promedio de contaminación, además se explican las características que debe llevarse a cabo los muestreos a las aguas residuales.

Así también, se menciona el cálculo de los montos del derecho a pagar por cada tipo de contaminantes que rebase los límites máximos permisibles.

Otras de las disposiciones que se menciona en esta Ley son las diferentes formas para que las personas físicas y/o morales puedan obtener descuentos en el pago por las descargas de aguas residuales que estén realizando.

Posteriormente a esta Ley se presentan las disposiciones transitorias de la Ley Federal de Derechos donde se menciona su vigencia, los meses en que se incrementa, las actividades y las industrias participantes se les menciona sus cuotas, además se indican los municipios con su porcentaje de cuota correspondiente, además se fijan las zonas de conformidad para el período 2000-2004.

Por último se presenta el anexo con que cuenta esta Ley en donde se menciona resoluciones que ha sufrido la Miscelánea Fiscal así como su fecha de publicación, también se mencionan las reformas que ha tenido la Ley Federal de Derechos y su fecha de publicación, se presenta una tabla del Índice Nacional de Precios al Consumidor, otra tabla es la Sumatoria de Recargos, por otra parte se incluye un resumen de las cuotas trimestrales de los años 1999,2000, una tabla del artículo 278-C, fracción II sobre cuotas en pesos por metro cúbico para potencial hidrógeno (pH), otra tabla sobre el mismo artículo pero para la fracción III sobre cuotas en pesos por kilogramo por índice de incumplimiento de la descarga, además se cuenta con las formas PAMCAR y SECTRA donde el primero se refiere al programa de acciones para mejorar la calidad de las descargas de las aguas residuales y el segundo es para el programa de acciones para mejorar la calidad de las descargas de aguas residuales y finalmente se encuentra publicado el instructivo para la presentación, vigilancia y seguimiento de programas de acciones para mejorar la calidad de las aguas residuales.

## CAPÍTULO II

### GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS

En este capítulo se da una descripción de los tipos de acuíferos, así como de sus características más generales, posteriormente se describen definiciones importantes para entender su comportamiento. El objetivo de este capítulo es proporcionar las bases fundamentales para el estudio de los acuíferos.

#### II.1. GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS.

En este punto se hablará sobre las características geológicas de los acuíferos así como su clasificación que se les ha dado desde un punto de vista de su presión hidrostática.

De entre las rocas sedimentarias consolidadas que encierran el 95% de las aguas subterráneas para el conjunto de la tierra la más importante es la caliza, roca formada casi exclusivamente por carbonato de calcio, que varía enormemente en densidad, porosidad y permeabilidad, de acuerdo con el ambiente sedimentario existente en su formación y el desarrollo posterior de zonas permeables por disolución del carbonato (es decir, la formación de una "karst"), que pueden llegar a formar verdaderos "ríos subterráneos" y toda una morfología especial en los que en algunos casos no cabe hablar de la transmisibilidad y permeabilidad, debido a que no se cumple el régimen laminar por las grandes dimensiones de las fisuras.

Sin embargo estas rocas si no están carstificadas, suelen ser poco permeables lo mismo que las margas, intermedias entre las calizas y las arcillas. Los conglomerados y areniscas, considerados como gravas y arenas cementadas, ven disminuida su porosidad y permeabilidad a causa del cemento que las une y da cohesión. De esta forma, si éste ha desaparecido en parte, debido a una disolución química o bien no rellenó totalmente los poros intergranulares, pueden ser objeto de explotación como acuíferos.

En las rocas volcánicas es difícil establecer una clasificación de las mismas respecto si constituyen o no buenos acuíferos, puesto que depende de las características físicas y químicas y de las propias rocas, y de la erupción que las originó, del grado de alteración, edad, etcétera, ya que si aquella es escoriácea, con grandes intersticios, puede constituir excelentes acuíferos.

Se da a continuación una clasificación más importante de los acuíferos y que los agrupa de acuerdo con la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos, que se traduce en consecuencias prácticas de gran trascendencia.

En efecto, se denominan acuíferos libres no confinados o freáticos aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua encerrada en ellos, que está en contacto directo con el aire y por lo tanto a presión atmosférica. En la figura 2.1 el acuífero B sería un acuífero libre. En éstos, al perforar pozos que los atravesen total o parcialmente la superficie obtenida por los niveles del agua de cada pozo forma una superficie real.

Por el contrario, en los acuíferos cautivos, confinados o a presión (figura 2.1, acuífero A), el agua de los mismos está sometida a una cierta presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que lo contiene, saturándola totalmente. Por ello, durante la perforación de pozos en acuíferos de este tipo al atravesar el techo del mismo se observa un ascenso rápido del nivel del agua hasta estabilizarse en una determinada posición. De acuerdo con éste y la posición del nivel topográfico de la boca del pozo, pueden considerarse pozos surgentes o fluyentes aquellos en los cuales el nivel piezométrico está situado a cota superior de la boca del pozo y simplemente artesianos o a presión a los pozos en el mismo acuífero, pero cuyo nivel piezométrico quede por debajo de la superficie topográfica en los alrededores del mismo (figura 2.1, pozos 1 y 2). Así pues, estos acuíferos poseen una superficie piezométrica ideal, que puede materializarse considerando todos los niveles que alcanzaría el agua en sendas perforaciones distribuidas por el acuífero equivalentes a la altura piezométrica del agua en el acuífero en la vertical de cada punto.

Una variedad de estos acuíferos la constituyen los acuíferos semicautivos, o semiconfinados que pueden considerarse como un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que el muro (parte inferior) y/o el techo (parte superior) que los encierra no sea totalmente impermeable sino un acuitardo, es decir un material que permita una filtración vertical del agua, muy lenta, que alimente el acuífero principal en cuestión, a partir de un acuífero o masa de agua situada encima o debajo del mismo. Como es lógico, este paso vertical de agua es sólo posible cuando existe una diferencia de potenciales entre ambos acuíferos (el que recarga y el recargado) y puede hacerse en uno u otro sentido, e incluso variar con el tiempo según sea la posición relativa de los niveles piezométricos de los mismos.

Algunos conceptos importantes en el estudio de los acuíferos son los de régimen permanente y régimen no permanente.

Cuando se inicia el bombeo a caudal constante en un pozo, y en general en cualquier tipo de captación, en los primeros instantes se extrae agua del almacenamiento en los alrededores del pozo, gracias al descenso del nivel producido. Poco a poco el cono de influencia va extendiéndose de forma que la cantidad de agua producida a consecuencia del descenso de nivel iguale a la extraída por el pozo (figura 2.2). En igualdad de otras condiciones la velocidad de expansión y extensión del cono es mucho más rápida en un acuífero confinado que en un acuífero libre de acuerdo con el diferente orden de magnitud del coeficiente de almacenamiento (figura 2.3). El período durante el cual los descensos, van aumentando se llama de régimen no permanente o simplemente de régimen variable. (se refiere a los descensos y puede corresponder tanto a una extracción constante como variable). En la figura 2.4 se indican las curvas de descensos-tiempos obtenidos según el tipo de acuífero.

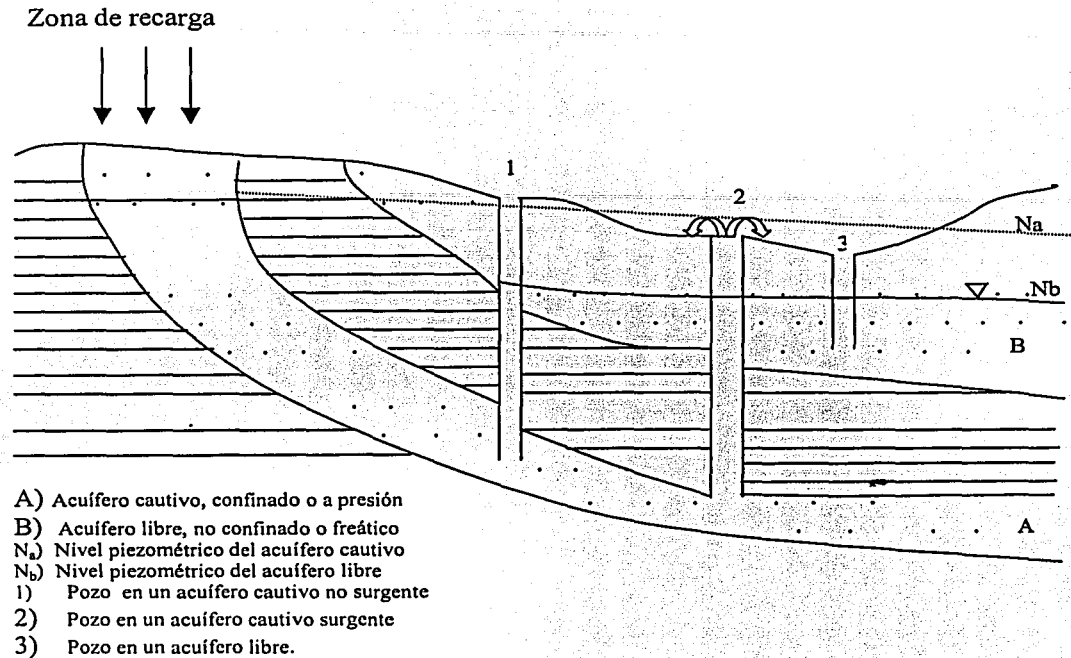


Figura 2.1 Tipos de acuíferos, pozos y niveles piezométricos

En un acuífero que no puede recibir agua del exterior tal como sucede en un acuífero perfectamente confinado o en acuífero libre en ausencia de aportes de agua de lluvia o agua superficial, todo el caudal extraído por el pozo debe proceder del almacenamiento y por lo tanto el régimen es siempre no permanente. Sin embargo, y debido a la superficie creciente del cono de influencia, si el acuífero es de extensión muy grande (infinito a efectos prácticos), la velocidad de descenso va disminuyendo paulatinamente hasta que llega un momento en que es tan lento que se puede aceptar a efectos prácticos que los descensos se han estabilizado y entonces se dice que ha alcanzado un régimen casi permanente.

Los acuíferos semiconfinados reciben una carga y cuando la misma iguala al caudal bombeado, se establece un verdadero régimen estacionario.



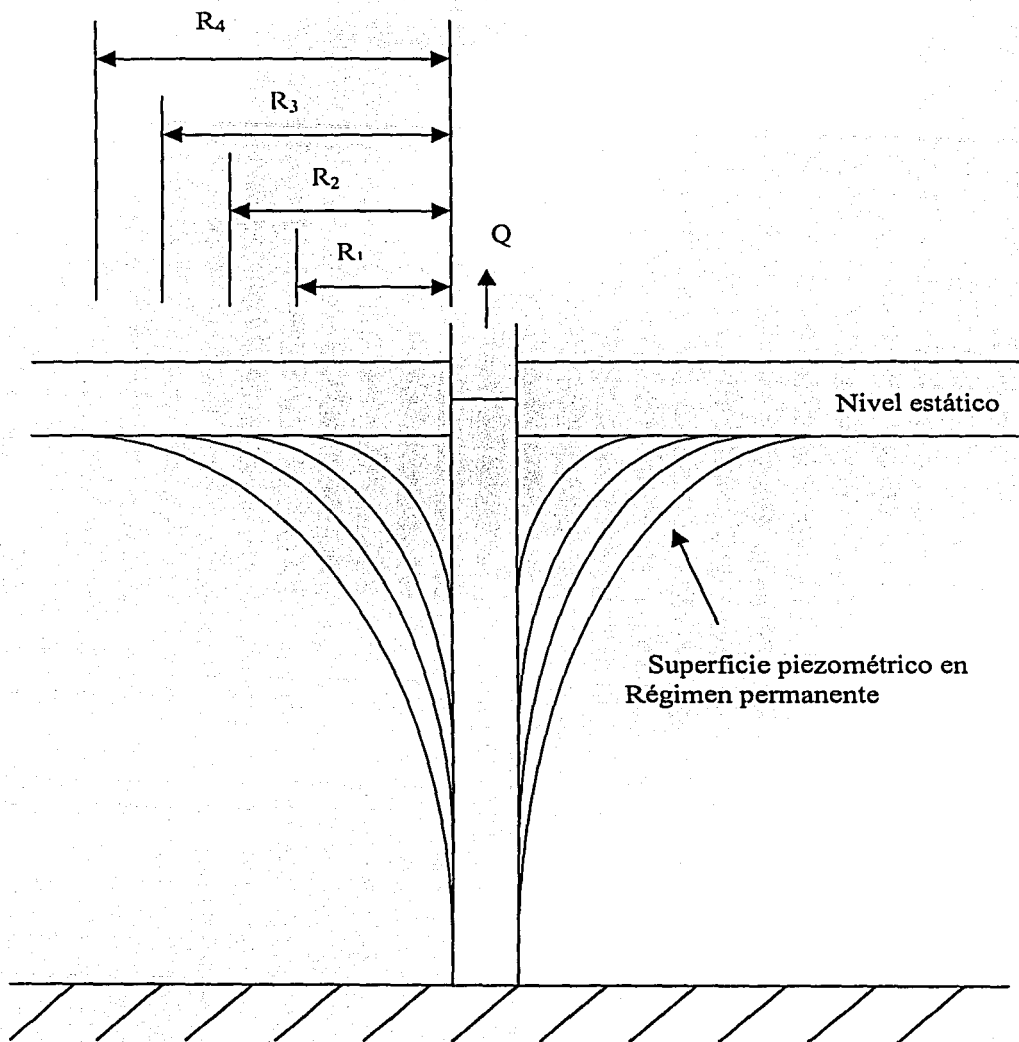
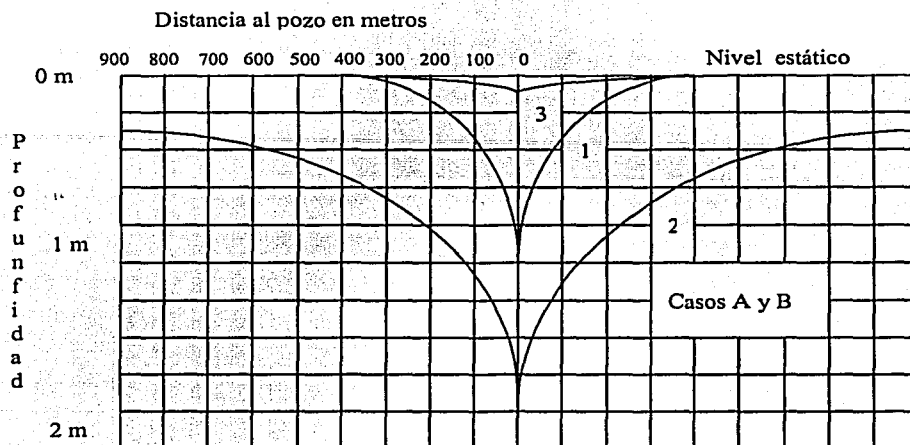


Figura 2.2 Formación del cono de descensos



Caso	Curva	Acuífero	Transmisividad m <sup>2</sup> /día	Coefficiente de Almacenamiento	Caudal m <sup>3</sup> /día	Duración del Bombeo-días	Radio de influencia m
A	1	Libre	365	0.2	50	22	300
A	2	Cautivo	365	0.002	50	22	3000
B	1	Libre	365	0.2	50	22	300
B	3	Libre	3650	0.2	50	22	630

Figura 2.3 Diferencia de velocidad de expansión y extensión del cono entre un acuífero confinado y un acuífero libre

Muchos acuíferos confinados pueden recibir en realidad algo de recarga a través de un límite de modo que se comportan como tales inicialmente, pero cuando el cono de descensos se ha extendido suficientemente la recarga iguala a la extracción confinante, y por lo tanto se establece un régimen permanente. Sin embargo, en acuíferos de poca extensión superficial puede suceder que la recarga no pueda llegar a igualar el bombeo, en cuyo caso el régimen permanente no puede establecerse y los niveles descienden continuamente hasta el vaciado del acuífero.

Considerando los acuíferos libres éstos pueden recibir algo de recarga procedente de las lluvias anteriores y de la acumulada en el medio no saturado que tiene encima, o bien el cono de influencia puede alcanzar a algún río o masa de agua superficial. En estos casos puede también establecerse un régimen permanente real (figura 2.5). Al igual que se dijo en el párrafo anterior, si el acuífero es de poca extensión y la recarga no puede igualar al bombeo no puede establecerse el régimen permanente.

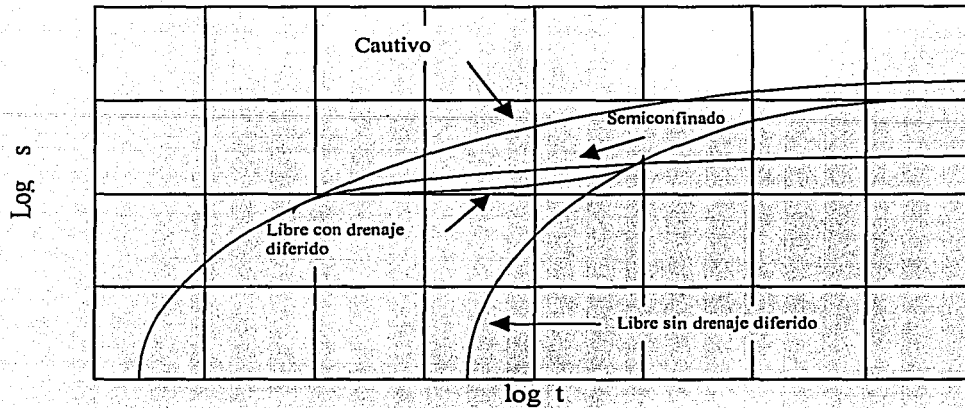


Figura 2.4 Gráfico de descensos ( $s$ ) en función del tiempo ( $t$ ) en diferentes tipos de acuíferos, observados en un piezómetro a distancia fija de un pozo de iguales características y con la misma transmisividad  $T$ .

Las características fundamentales del régimen permanente son que no se toma agua del almacenamiento del acuífero. El acuífero es un mero transmisor de la recarga. En cambio, en régimen variable el acuífero no sólo transmite agua sino que la proporciona, al menos en parte, entrando en juego el coeficiente de almacenamiento.

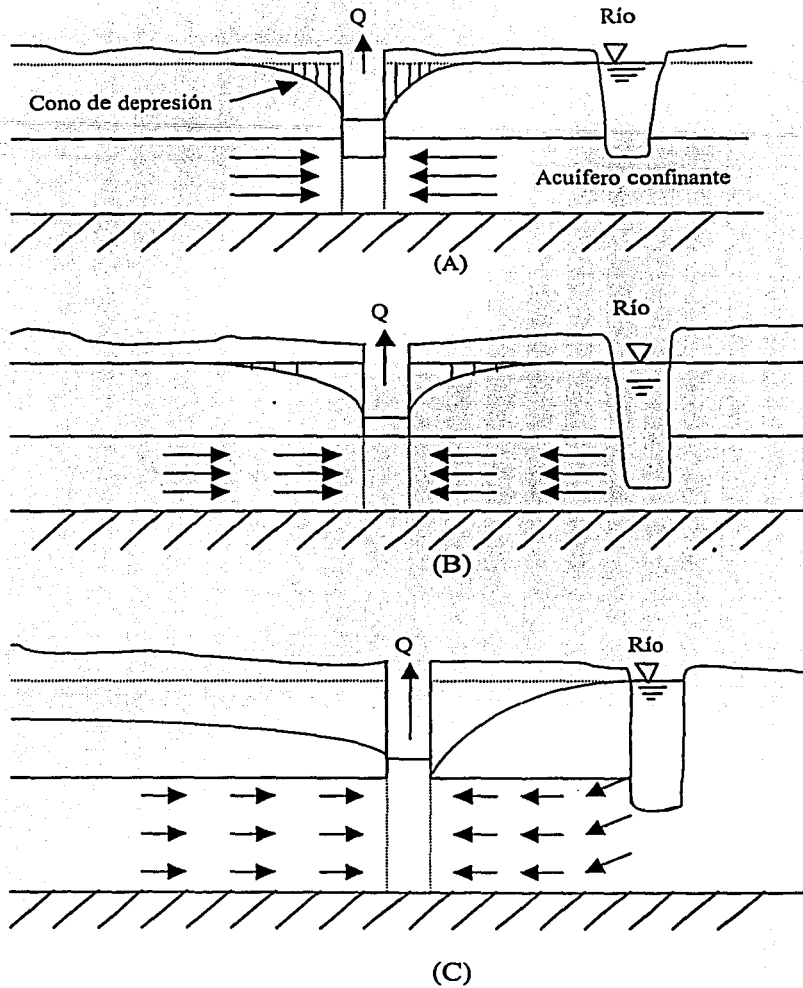
Las denominaciones permanente, estacionario y estable, se tomarán como equivalente, así como también las de variable, no estacionario y no permanente. Un acuífero en explotación está en régimen dinámico, el cual puede ser permanente o no permanente según que la recarga iguale o no el caudal extraído.

## II.2.- ACUÍFERO CONFINADO.

Es aquel que está limitado superior e inferiormente por estratos impermeables y que contiene agua a una presión mayor que la atmosférica y por lo tanto el efectuar una perforación, el agua asciende hasta, un nivel superior al del techo del acuífero. Se considera que el techo y el fondo del acuífero no aportan agua. Los estratos impermeables ofrecen mucha resistencia al flujo del agua. También se le llama acuífero cautivo.

### II.2.1.- ACUÍFERO CONFINADO EN REGIMEN PERMANENTE.

Si se trata de un acuífero cautivo de espesor constante, en régimen permanente la red de flujo puede obtenerse simplemente por adición de la red de flujo del acuífero no perturbado y la del pozo como si estuviese en un acuífero sin flujo natural (figura 2.6 y 2.7).



- A) Cono de depresión al poco tiempo de iniciarse el bombeo. El régimen es no permanente.  
B) Depresión en el momento de alcanzar al río e iniciarse la recarga inducida. El régimen es aún no Permanente.  
C) Cono de depresión estabilizado. Régimen permanente. Todo el caudal del pozo es suministrado por el río (carga inducida).

Figura 2.5 Evolución de los niveles piezométricos en un pozo próximo a un río.

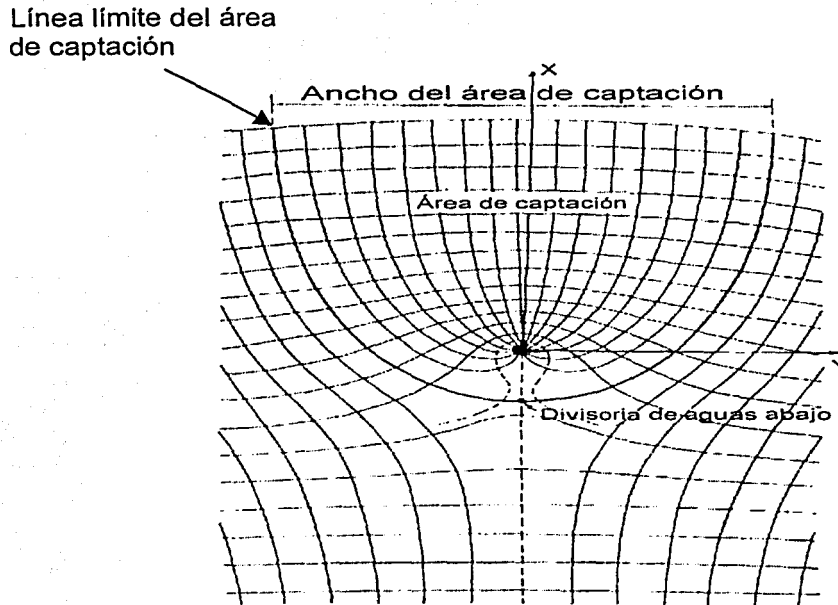


Figura 2.6 Red de flujo creada por un pozo que bombea en un acuífero con flujo natural.

El punto divisorio de aguas abajo se obtiene simplemente escribiendo que el perfil piezométrico que pasa por el pozo en la dirección del gradiente referido al nivel inicial del agua en el pozo, es:

$$h_o - h = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln \frac{R}{x} \pm i \cdot x \quad (2.1)$$

Donde:

$h_o$ : es el nivel inicial en el pozo.

$h$ : es el nivel piezométrico en un punto cualquiera del perfil a una distancia  $x$  del pozo.

$Q$ : es el gasto que circula.

$T$ : es el coeficiente de transmisibilidad.

$R$ : es el radio de acción o de influencia.

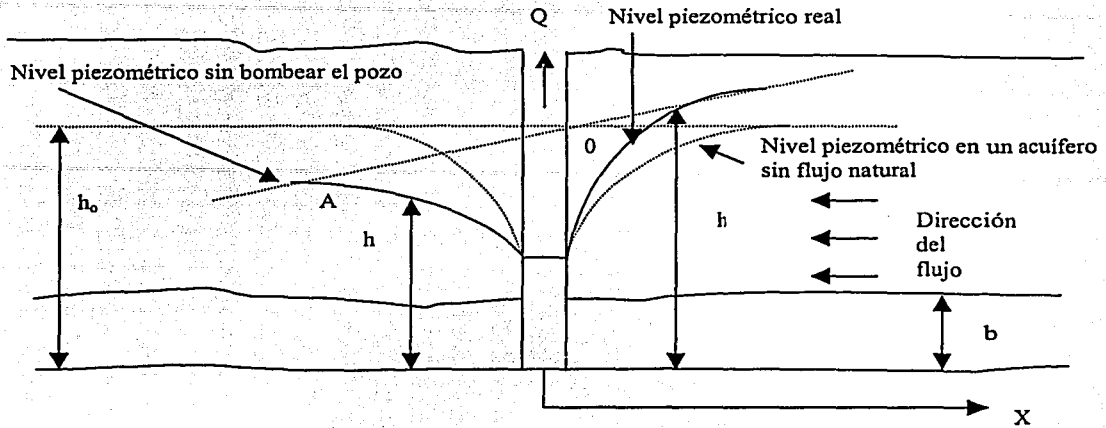
$x$ : es la distancia al pozo en sentido horizontal.

$i$ : es el gradiente natural.

(-): para aguas arriba.

(+): para aguas abajo.

El punto divisorio se obtendrá haciendo  $dh/hx = 0$  de la ecuación 2.1, obteniéndose



Donde:  
 $h_0$ : Nivel inicial en el pozo.  
 $h$ : Nivel piezométrico en un punto cualquiera del perfil a distancia  $x$  del pozo.  
 $b$ : Espesor del acuífero.  
 $A$ : Divisoria subterránea del agua abajo.  
 $O$ : Punto divisorio.  
 $Q$ : gasto del agua extraído del pozo.  
 $X$ : Eje divisorio.

Figura 2.7 Bombeo de un acuífero cautivo con flujo natural.

$$x = -\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T \cdot i} \quad (2.2)$$

La ecuación de la línea límite del área de captación (figura 2.6)

$$y = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T \cdot i} \arctg \frac{y}{x} \quad (2.3)$$

Donde:  
 $y$ : es la distancia al pozo en dirección vertical.  
 $Q$ : es el gasto que circula.  
 $T$ : es el coeficiente de transmisibilidad.  
 $i$ : es el gradiente hidráulico.  
 $x$ : es la distancia al pozo en sentido horizontal.  
 $\arctg$ : es la función arco tangente.

El ancho máximo del área de captación se obtiene haciendo  $x \rightarrow \infty$ , resultando:

$$(2y)_{max} = \frac{Q}{T \cdot i} \quad (2.4)$$

## II.2.2.- ACUÍFERO CONFINADO DE ESPESOR CONSTANTE EN RÉGIMEN VARIABLE.

El mismo principio de superposición expuesto anteriormente es válido para el régimen variable con bombeo a caudal constante en un acuífero confinado.

El perfil piezométrico que pasa por el pozo en la dirección del flujo referido al nivel inicial del agua, es:

$$h_0 - h = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} W \left( \frac{x^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t} \right) \pm i \cdot x \quad (2.5)$$

Donde:

$h_0$ : Nivel inicial en el pozo.

$h$ : Nivel piezométrico en un punto cualquiera del perfil.

$Q$ : Gasto que circula.

$T$ : Coeficiente de transmisibilidad.

$W$ : Función  $w$ .

$x$ : Distancia al pozo en sentido horizontal.

$t$ : Tiempo.

$S$ : Coeficiente de almacenamiento.

$i$ : Gradiente hidráulico.

(-): Para aguas arriba.

(+): Para aguas abajo.

Ecuación que también se aplica para el régimen estacionario.

La divisoria de aguas se extiende rápidamente en los primeros tiempos del bombeo, pero se estabiliza pronto, aún dentro del período de descensos variables.

## II.3.- ACUÍFERO SEMICONFINADO.

Es aquel que está limitado por estratos menos permeables que él, pero que puede recibir o ceder cantidades significativas de agua. En general se acepta que la recarga es proporcional a la diferencia de niveles entre los del acuífero en cuestión y los de los que están encima o debajo. Si la diferencia de niveles es negativa se produce una descarga.

### II.3.1.- CONSIDERACIONES GENERALES.

La teoría de acuíferos semiconfinados para régimen permanente y para régimen variable establecida anteriormente es, en ocasiones, una excesiva simplificación de la realidad, en especial en lo que se refiere al régimen variable.

Los supuestos que se establecieron para el régimen variable fueron:

- a) El almacenamiento en el acuitardo no se utiliza.
- b) El nivel piezométrico del acuífero que recarga no varía.
- c) Sólo existe un único nivel semiconfinante.

En la realidad la condición a) difícilmente se cumple en los primeros momentos del bombeo; la condición b) difícilmente se cumple para tiempos largos, a no ser que la transmisividad del acuífero recargante sea muy elevada; la condición c) exige una disposición que no siempre es la real.

#### II.4.- ACUÍFERO LIBRE.

Es aquel cuyo límite superior coincide con el nivel freático, esto es, la superficie del agua que está a la presión atmosférica. También se llama acuífero freático. Salvo indicación en caso contrario no se tendrá en cuenta la existencia de la franja capilar. En general se considerará que, cuando exista, la recarga de la lluvia o de riegos es uniforme en el espacio y en el tiempo.

##### II.4.1.- COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO PARA UN ACUÍFERO LIBRE.

La aplicación del concepto de coeficiente de almacenamiento a los acuíferos libres es más compleja, aunque razonamientos similares a los expuestos en los párrafos precedentes pueden aplicarse a la zona saturada de un acuífero libre inclinado. Considérese un acuífero libre de cualquier forma, en el que se cambia la carga de agua. Obviamente, ahora habrá sustracción o adición de agua en el acuífero, puesto que se trata de un sistema de gravedad, abierto, no confinado en la superficie. Así, el volumen de agua liberada o almacenada debe en este caso ser atribuido no sólo a la compresibilidad del agua y a la del material del acuífero, en la zona saturada de éste, sino también al drenaje o alimentación por gravedad en la zona a través de la cual se mueve el manto. El volumen de agua implicado en la captación o drenaje por gravedad, dividido por el volumen de la zona de movimiento del manto, da el rendimiento específico. Excepto en aquellos acuíferos de baja porosidad, el volumen de agua implicado en la captación o drenaje por gravedad serán tantos cientos de miles de veces mayor que el volumen atribuido a la compresibilidad, que para los fines prácticos puede decirse que el coeficiente de almacenamiento es igual al rendimiento específico. El método convencional de medida del cambio de carga, observando el cambio de elevación del nivel del agua en un pozo, evidentemente, identifica el cambio vertical de posición del manto. En otras palabras, el cambio de carga es igual al movimiento vertical del manto freático. Puede verse que el volumen de la zona de movimiento del manto es igual al área de la superficie del acuífero sobre la que ocurre el cambio de carga, multiplicada por el cambio de carga, multiplicado todo por el coseno del ángulo de inclinación del manto del acuífero. El producto de los dos últimos factores es el componente de cambio de carga que actúa normal a la superficie del acuífero.

Examínese la figura 2.8, la que representa, en forma esquemática, un acuífero horizontal, no artesiano. Aparece de nuevo un prisma unitario del acuífero y se asume que provoca un descenso del manto de una magnitud unitaria,  $x$ . Lo que es que el agua así liberada represente, a los fines prácticos, el drenaje por gravedad de la porción  $x$  del prisma acuífero. Teóricamente, sin embargo, una pequeña cantidad de agua procede de la porción del prisma que permanece saturada, de acuerdo con el caso del acuífero artesiano.



El coeficiente de almacenamiento será entonces razonablemente igual al rendimiento específico. Los coeficientes de almacenamiento de los acuíferos libres varían, aproximadamente de 0.05 a 0.30.

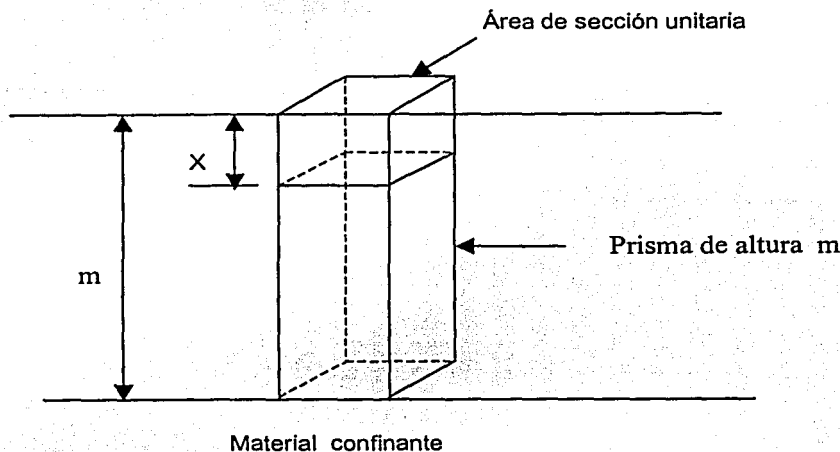


Figura 2.8 Diagrama para coeficiente al almacenamiento en un acuífero libre

#### II.4.2.- ACUÍFERO LIBRE EN RÉGIMEN PERMANENTE.

Si el acuífero es libre de base horizontal y con flujo natural, el espesor saturado es variable y por lo tanto también lo es la transmisividad.

El espesor saturado es mayor aguas arriba que aguas abajo.

Es frecuente que el acuífero tenga flujo natural, y además que pueda admitirse que la base es inclinada con igual pendiente que el flujo. En este caso la transmisividad es constante en ausencia de bombeo. Si los descensos producidos por bombeo son pequeños se pueden aplicar las mismas fórmulas que para el acuífero cautivo. Si no es así el análisis es más complicado.

#### II.5.- POROSIDAD.

Un medio poroso está formado por un agregado de granos entre los cuales existen espacios vacíos que pueden ser ocupados por un fluido: estos espacios vacíos se llaman poros.

El medio poroso puede ser consolidado o no consolidado según que exista o no exista un cemento que aglutine y ligue las diversas partículas integrantes, o se establezca alguna cohesión entre las mismas.

Así que se puede definir a la porosidad como la relación del volumen de intersticios (espacios abiertos) en el suelo a su volumen total. Es una medida de la cantidad de agua que, puede ser almacenada en los espacios entre partículas.

Si se tiene un volumen de terreno natural del cual  $V_p$  son poros y  $V_m = V - V_p$  es material compacto, la porosidad total se define como:

$$m = \frac{V_p}{V} \quad (2.6)$$

Donde:

m: Porosidad total.

$V_p$  :Volumen de poros.

V : Volumen total de la roca

Cuando el medio está saturado de agua, el contenido volumétrico en el mismo es m.

La porosidad es una de las características esenciales de las rocas en lo que se refiere a sus propiedades acuíferas. Se remite siempre a volúmenes.

En el terreno existen poros de muy diversas categorías; mientras puede existir una red de poros interconectados y el agua puede circular libremente por ellos, existen otros totalmente cerrados en los que el fluido está confinado; también existen poros semicerrados a través de los cuales el agua circula con cierta dificultad y lentitud y los intercambios de materia con el exterior se realizan principalmente por difusión.

Podemos distinguir dos tipos de porosidad: la porosidad total y la porosidad eficaz.

La porosidad total, porosidad verdadera, coeficiente de porosidad o módulo de los espacios vacíos, es la relación, expresada en tanto por ciento, entre el volumen de los espacios vacíos  $V_v$  y el volumen total de la roca V. Se designará con la letra m.

$$m = \frac{V_v}{V}(100) \quad (2.7)$$

Donde:

$V_v$ : Volumen de los espacios vacíos.

En estudios del movimiento del agua subterránea sólo importan los poros interconectados y a veces los semicerrados. Así nace el concepto de porosidad eficaz,  $m_e$ , que tiene en cuenta el volumen de esos poros  $V_e$  respecto al volumen total del terreno natural considerado.

$$m_e = \frac{V_e}{V} \quad (2.8)$$

Donde:

$m_e$  : Porosidad eficaz

$V_e$  : Volumen eficaz

Cuando  $m_e$  se determina saturando un terreno previamente seco, se obtiene un valor mayor que cuando se calcula por drenado de un terreno previamente saturado, y además en este último caso los valores dependen del tiempo; ello es consecuencia del lento vaciado de los poros semicerrados y de la existencia de agua suspendida por fuerza capilares y moleculares de retención. En estudios del movimiento del agua en medios no saturados interesa un valor que tenga en cuenta únicamente los poros de libre circulación, valor que en general debe obtenerse por técnicas de trazadores. Los dos valores extremos,  $m$  y  $m_e$ , tienen interés en estudios de variaciones de nivel en acuíferos libres.

A continuación se muestra un cuadro con los valores de porosidad de suelos típicos.

Cuadro 2.1 Valores de porosidad de suelos típicos

Descripción del suelo	Porosidad. n (%)
1.- Arena uniforme, suelta	46
2.- Arena uniforme, densa	34
3.- Arena graduada, suelta	40
4.- Arena graduada, densa	30
5.- Morena glaciár con partículas de todo tamaño	20
6.- Arcilla glaciár blanda	55
7.- Arcilla glaciár resistente	37
8.- Arcilla blanda ligeramente orgánica	68
9.- Arcilla blanda muy orgánica	75
10.- Bentonita blanda	84

## II.6.- COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO.

Cuando se bombea agua de un pozo, el agua procede del acuífero mediante uno de estos dos sistemas: drenaje o vaciado de los poros del mismo (acuíferos libres) o de los pequeños efectos elásticos del armazón físico del acuífero y de la propia elasticidad del agua, siendo ésta la única forma de obtener agua en un acuífero cautivo.

En el primer caso el agua procede del vaciado físico del agua gravífica contenida en el acuífero. El volumen del agua obtenido por unidad de volumen coincidirá, pues, con la porosidad eficaz de la zona saturada.

En el segundo caso el mecanismo es diferente al de los acuíferos libres y mucho más complejo, puesto que intervienen otro tipo de acciones. En efecto, el agua extraída de los poros se dilata por descompresión proporcionando una cantidad de agua; por otra parte, la presión intersticial (del

agua) en el terreno disminuye, lo cual trae como consecuencia la expulsión de un poco de agua, para hacer frente a la presión constante del terreno sobre el acuífero, con lo que éste disminuye un poco su espesor gracias a los efectos elásticos del acuífero considerado en conjunto.

En un acuífero confinado  $S_1$  es la cantidad de agua liberada por una columna de área horizontal unitaria y de altura igual al espesor saturado del acuífero, cuando la superficie piezométrica desciende una unidad. Los valores de  $S_1$  varían de  $1 \cdot 10^{-2}$  (adimensional).

Según la definición, en los acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad eficaz, es decir, al volumen de agua gravífica extraído de una unidad de acuífero saturado.

En los acuíferos cautivos entran en juego, como ya se ha dicho, los efectos mecánicos de compresión del terreno o de la propia agua. Si se supone un acuífero formado por arenas incompresibles, al disminuir la presión del agua por bombeo, el agua del acuífero se expande. En una columna de acuífero de sección unitaria y altura total saturada  $b$ , al disminuir una unidad el nivel piezométrico se obtiene un volumen de agua:

$$S_1 = m \cdot (\gamma) \cdot b \cdot (\beta) \quad (2.9)$$

Donde:

$S_1$  : Cantidad de agua liberada por una columna 1.

$m$  : porosidad total del acuífero.

$\gamma$  : peso específico del agua.

$b$  : espesor del acuífero.

$\beta$  : coeficiente de compresibilidad dinámica del agua.

Si se supone que el armazón de los granos de la arena del acuífero es también compresible y es  $\alpha$  su coeficiente de compresibilidad dinámica vertical, al disminuir la presión del agua, dicho armazón del acuífero deberá soportar una mayor parte del peso del terreno que tiene encima, con lo que disminuirá su porosidad al comprimirse; por unidad de descenso del nivel piezométrico, la columna de terreno antes mencionado liberará un volumen de agua:

$$S_2 = \gamma \cdot b \cdot \alpha \quad (2.10)$$

Donde:

$S_2$ : Cantidad de agua liberada por una columna 2.

$\alpha$ : Coeficiente de compresibilidad dinámica vertical.

La cantidad total de agua extraída del acuífero será:

$$S = S_1 + S_2 = \gamma \cdot b(m \cdot \beta + \alpha) \quad (2.11)$$

Donde:

S: Coeficiente de almacenamiento.

De ello, se desprende que el coeficiente de almacenamiento en los acuíferos libres coincide con la porosidad eficaz, sin intervención directa del espesor del acuífero, y en cambio en los cautivos los únicos factores determinantes son los pequeñísimos efectos del agua y del acuífero, teniendo gran importancia el espesor de los acuíferos.

Los valores del coeficiente de almacenamiento S son por tanto completamente distintos según se trate de uno y otro caso. Como idea de orden de magnitud, se puede recordar que varía de 0.05 a 0.30 en condiciones libres y caer en el campo de las milésimas a cienmilésimas en condiciones artesianas o cautivas. ( $10^{-3}$  a  $10^{-5}$ ).

## II.7.- GRADIENTE HIDRÁULICO.

Es la pendiente de la superficie piezométrica. La diferencia en elevación de un punto a otro a lo largo del gradiente hidráulico es una medida de presión. Esta diferencia de elevación es llamada "carga".

### II.7.1.- CÁLCULO DEL GRADIENTE HIDRÁULICO POR LA PÉRDIDA DE CARGA.

Suponga un tubo inclinado, con una columna de arena en un interior, provisto hacia arriba de dos tubos manométricos 1 y 2, separados por una distancia L, a través del cual circula una corriente de agua (figura 2.9).

La pérdida de carga h viene dada por la siguiente fórmula:

$$h = \left( \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \right) - \left( \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \right) \quad (2.12)$$

Donde:

h: Pérdida de carga

$P_1$ : Presión en el punto 1.

$P_2$ : Presión en el punto 2.

$\gamma$ : Peso específico del agua.

$Z_1$ : Cota en el punto 1 de la base de tubo manométrico respecto a un plano de referencia

$Z_2$ : Cota en el punto 2 de la base de tubo manométrico respecto a un plano de referencia.

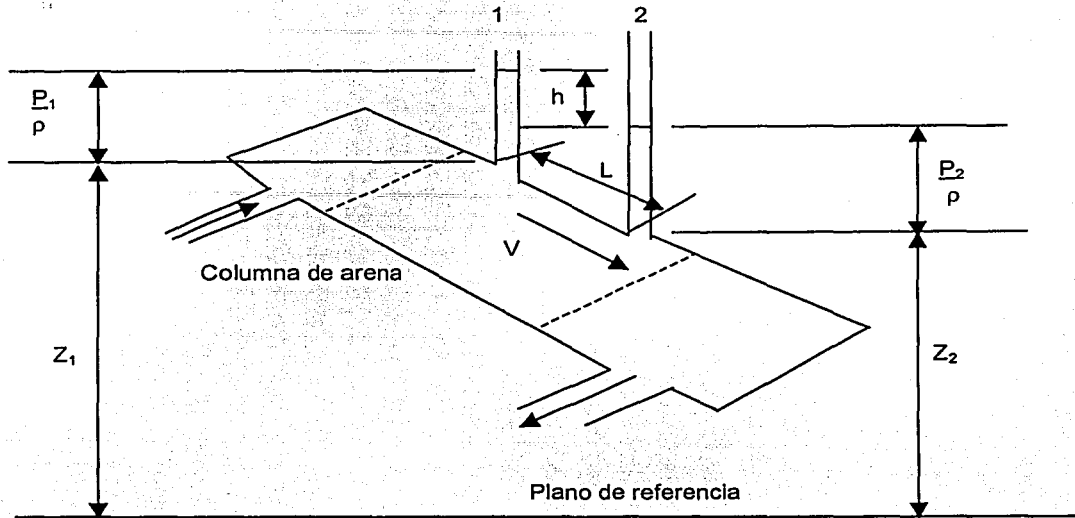


Figura 2.9 Gradiente hidráulico. Pérdida de carga a lo largo de una columna de arena

### II.7.2.- CÁLCULO DEL GRADIENTE HIDRÁULICO POR LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS.

Si se conocen los niveles piezométricos  $H_1$  y  $H_2$  en dos secciones transversales de la corriente líquida 1 y 2, que distan entre sí una longitud horizontal  $L$ , se tendrá con base en la figura 2.10.a:

$$i = \frac{H_1 - H_2}{L} \quad (2.13)$$

Donde:

- i: Gradiente hidráulico
- $H_1$ : Nivel piezométrico en 1
- $H_2$ : Nivel piezométrico en 2
- L: Longitud horizontal

Sea  $h$  la diferencia entre los niveles piezométricos,  $H_1 - H_2 = h$ :

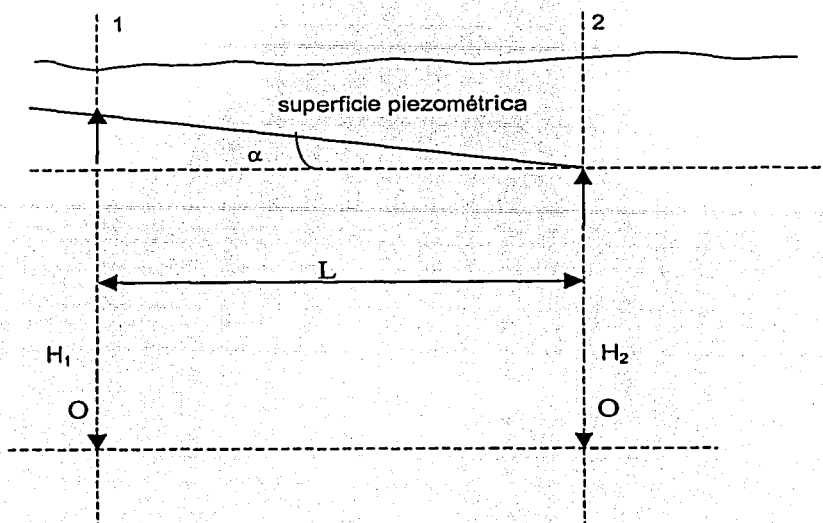


Figura 2.10 a. Cálculo del gradiente hidráulico

$$i = \frac{h}{L} \quad (2.14)$$

Donde:

h: Diferencia entre los niveles piezométricos.

Si  $p$  es la presión del flujo, o carga bajo la cual se efectúa el flujo, y  $H$  la potencia del manto acuífero, se tendrá:

$$i = \frac{p}{H} \quad (2.15)$$

Donde:

$p$ : Presión del flujo.

$H$ : Potencia del manto acuífero.

### II.7.3.- CÁLCULO DEL GRADIENTE HIDRÁULICO POR LA PENDIENTE DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA.

Considerando en un plano vertical, que pase por el eje de flujo de la corriente líquida, un segmento AB de la superficie piezométrica.

En el triángulo rectángulo ABC, la pendiente de la recta AB es (figura 2.10.b).

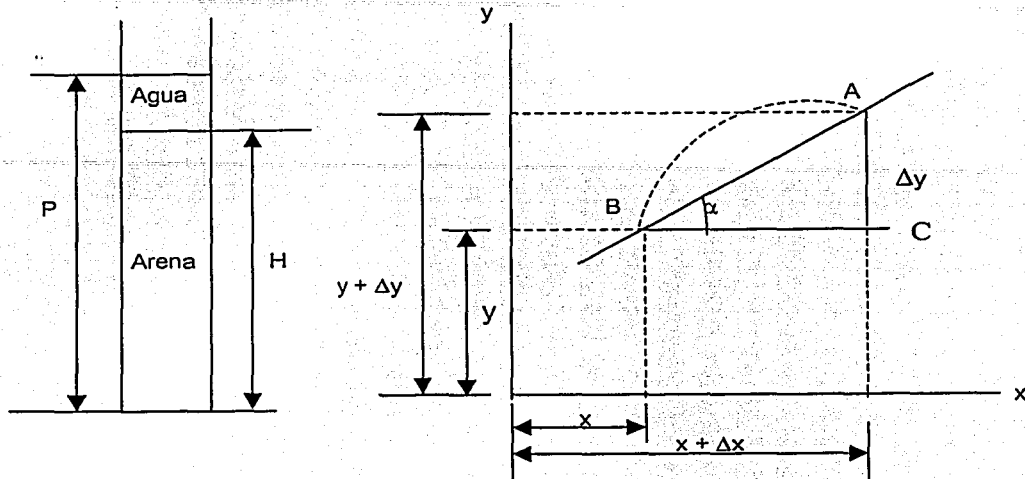


Figura 2.10 b Cálculo del gradiente hidráulico.

$$i = \text{sen } \alpha = \frac{AC}{AB} \quad (2.16)$$

Pero generalmente el ángulo  $\alpha$  es muy pequeño, ya que los gradientes hidráulicos observados son muy débiles. Se puede reemplazar el seno del ángulo  $\alpha$  por su tangente, de donde:

$$i = \text{tg } \alpha = \frac{AC}{BC} \quad (2.17)$$

Sean  $x$  y  $y$  las coordenadas del punto  $B$ , y  $x + \Delta x$  y  $y + \Delta y$  las del punto  $A$ ; siendo  $\Delta x$  y  $\Delta y$  los incrementos de las coordenadas sobre la recta  $AB$ . Reemplazando  $AC$  y  $BC$  por sus valores en la fórmula anterior:

$$i = \text{tg } \alpha = \frac{AC}{BC} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2.18)$$

Cuando  $A$ , se acerca a  $B$ , los valores  $\Delta x$  y  $\Delta y$  disminuyen, haciéndose infinitamente pequeños. En el límite, se tendrá:



$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (2.19)$$

La derivada  $dy/dx$  caracteriza la pendiente de la recta AB en el punto B. Si se toma cualquier punto entre A y B, se obtiene el mismo valor para la pendiente:

$$i = \frac{dH}{dx} \quad (2.20)$$

El valor  $dy/dx$  da la pendiente de la recta en un punto cualquiera de ésta.

En otros términos: el gradiente hidráulico es la derivada de la función de la curva que materializa la superficie piezométrica. Por consiguiente, es igual al coeficiente angular de la tangente a la curva en el punto B.

Si se reemplaza la ordenada y por potencia H de la capa acuífera, se tiene:

$$i = -\frac{dH}{dx} \quad (2.21)$$

$$i = -\frac{dh}{dL} \quad (2.22)$$

El signo negativo aparece porque dx aumenta en el sentido del desagüe mientras que H disminuye.

Los gradientes hidráulicos medidos en las condiciones normales de flujo, para los terrenos estudiados habitualmente, varían desde 50 por 1000 hasta 0.03 por 1000, o sea de 0.050 a 0.00003.

## II.8.- PERMEABILIDAD.

En 1856, el ingeniero francés Henry Darcy, descubrió la ley que regula el movimiento de las aguas subterráneas midiendo el caudal Q en función de la permeabilidad de los materiales estudiados y observó que (figura 2.11) éste equivalía a:

$$Q = k \cdot A \frac{h}{l} \quad (2.23)$$

Donde:

Q: Caudal que circula.

k: Coeficiente de permeabilidad.

A: Área de la sección.

h: Diferencia de carga entre la entrada y la salida de la vasija.

l: Recorrido que realiza el agua.

Si se tiene en cuenta que  $Q/A = v$ , siendo  $v$  la velocidad media, resulta:

$$\frac{Q}{A} = V = k \frac{h}{l} \quad (2.24)$$

Donde:

v: Velocidad media.

Llamado el gradiente hidráulico  $i = h/l$ , resulta:

$$V = k \cdot i; k = \frac{V}{i} \quad (2.25)$$

Este parámetro  $k$  o coeficiente de permeabilidad, tiene las dimensiones de una velocidad, ya que la ecuación dimensional es:

$$(k) = \frac{\left(\frac{L^3}{T}\right)}{L^2} = \frac{L}{T} \quad (2.26)$$

Así pues, se puede definir a la permeabilidad como una medida de la factibilidad de movimiento del agua subterránea a través de una roca y que es el caudal que pasa por una sección unidad del acuífero bajo un gradiente también unidad a una temperatura fija o determinada. Esta propiedad depende de la porosidad y, principalmente de la interconexión de los intersticios. Sus dimensiones son ( $LT^{-1}$ ).

Los factores que determinan la permeabilidad pueden ser intrínsecos y extrínsecos. Los intrínsecos son los propios del acuífero y dependen del tamaño de los poros. Así se ve que dos acuíferos que estuvieran formados por esferas de 0.1 m y  $10^{-3}$  m, respectivamente, pueden tener igual porosidad, pero siempre tendrán diferente permeabilidad. Si el resto de condiciones se mantiene, siempre tendrá mayor permeabilidad el medio que tenga mayor diámetro de las partículas.

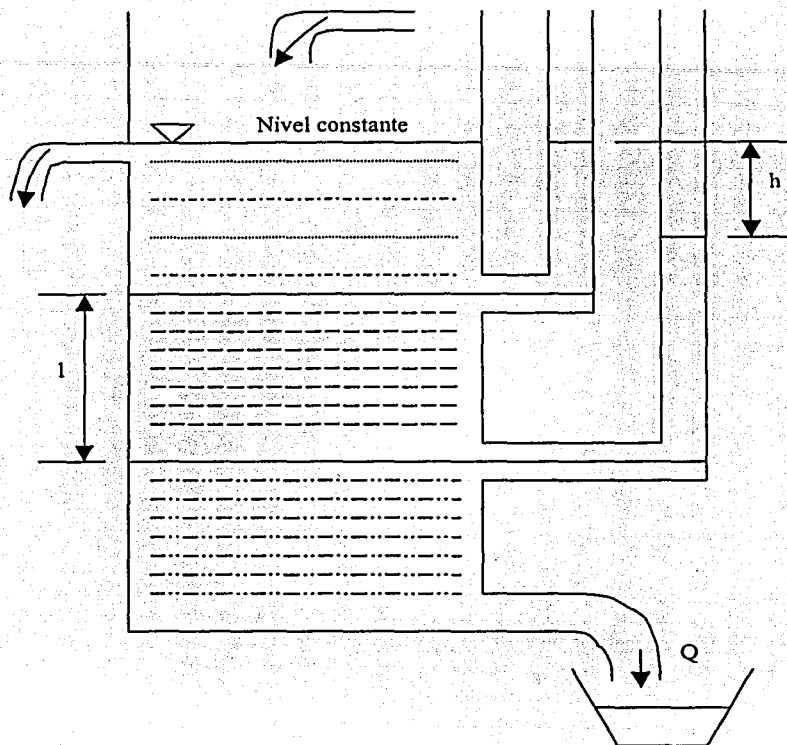


Figura 2.11 Ley de Darcy

Los factores extrínsecos son los que dependen del fluido y son fundamentalmente su viscosidad y su peso específico. La viscosidad de un fluido es la medida de la fuerza resistente, por unidad de área y por unidad de gradiente y velocidad transversal a la dirección del movimiento del fluido. Tanto la viscosidad como el peso específico dependen de la temperatura, por lo que en casos especiales debe tenerse en cuenta ésta, sobre todo por la notable influencia de la viscosidad en la permeabilidad.

Un terreno muy poroso puede ser muy permeable si sus poros son grandes y bien interconectados, tal como sucede en unas gravas limpias, o bien puede ser casi impermeable si sus poros son muy pequeños y/o semicerrados, como sucede en una arcilla o en ciertos materiales volcánicos (pumita, basaltos vacuolares). En general, los terrenos con baja porosidad tienden a ser poco permeables ya que las conexiones entre poros son difíciles y angostas.

En  $k$  influye, además de la naturaleza del terreno, la densidad y la viscosidad del fluido, las cuales son a su vez función de la temperatura y de la presión. Para obtener un coeficiente  $k_0$  que dependa sólo de las propiedades del medio basta escribir:

$$k = k_0 \frac{\gamma}{\mu} \quad (2.27)$$

Donde:

$k$ : Permeabilidad.

$k_0$ : Permeabilidad intrínseca, específica o geométrica, también llamado coeficiente de permeabilidad.

$\gamma$ : Peso específico del fluido (dinas/cm<sup>3</sup>).

$\mu$ : Viscosidad del fluido (dinas seg/cm<sup>2</sup>).

Como el agua es un fluido muy poco compresible, los cambios de presión no afectan prácticamente a  $k$  a través de la densidad. Si pueden afectar en cuanto alteran la geometría de los poros. La compactación del acuífero acarrea en general una reducción de permeabilidad, que puede ser importante en terrenos arcillosos. En este caso se altera  $k_0$  ya que el medio cambia de características.

El valor de  $k$  puede ser también afectado por la composición química del agua si existen arcillas capaces de flocularse o deflocularse. Lo mismo sucede si se producen disoluciones o precipitaciones, o bien se tiene arrastre y eliminación de las partículas más finas del medio o por el contrario se introducen materiales que se fijan dentro de los poros (colmatación).

A continuación se muestra en la cuadro 2.2 los valores de permeabilidad de algunos tipos de suelos.

Cuadro 2.2. Valores de permeabilidad para algunos suelos

Permeabilidad (m/día)	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>1</sup>	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>
Tipo de terreno	Grava limpia		Arena limpia; Mezcla de grava y arena		Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas			Arcillas no meteorizadas			
Calificación	Buenos acuíferos				Acuíferos pobres				Impermeables		
Capacidad de drenaje	Drenan bien				Drenan mal				No drenan		

### II.8.1.- COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD.

En las ecuaciones relacionadas con la Ley de Darcy, aparece una constante física de proporcionalidad,  $k$ , llamada el Coeficiente de Permeabilidad del Suelo. En cualquiera de esas ecuaciones y en especial la ecuación 2.25, puede verse que sus unidades son las correspondientes a una velocidad (téngase presente que  $i$  es un concepto adimensional). Esto se ha utilizado para definir en términos simples el coeficiente de permeabilidad de un suelo como la velocidad del agua a través del mismo, cuando está sujeta a un gradiente hidráulico unitario. Es obvio que en el valor numérico de  $k$  se reflejan propiedades físicas del suelo y en cierta medida ese valor indica la mayor o menor facilidad con que el agua fluye a través del suelo, estando sujeta a un gradiente hidráulico dado. Esta facilidad a su vez depende de toda una serie de propiedades físicas del suelo y, también de algunos factores, tales como temperatura.

### II.8.2.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS.

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores inherentes tanto al suelo como a características del agua circulante. Los principales factores son:

- 1.- La relación de vacíos del suelo.
- 2.- La temperatura del agua.
- 3.- La estructura y estratificación del suelo.
- 4.- La existencia de agujeros, fisuras, etc, en el suelo.

A continuación se analiza la influencia de cada uno de los factores anteriores.

#### II.8.2.1.- INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE VACÍOS DEL SUELO.

Es posible analizar teóricamente la variación del coeficiente de permeabilidad de un suelo respecto a su relación de vacíos, siempre y cuando se adopten para el suelo hipótesis simplificativas cuyo carácter permita que las conclusiones del análisis den información cualitativa correcta.

La permeabilidad  $k$  puede escribirse, en forma desplegada, como:

$$k = k' \cdot F(e) \quad (2.28)$$

Donde:

$k'$ : Coeficiente de permeabilidad para  $e = 1.0$ .

$F(e)$ : Función de la relación de vacíos.

$$F(e) = e^2 \quad \text{para arenas, y} \quad (2.29.a)$$

$$F(e) = C_3(e - e_0)^2 \quad \text{para arcillas} \quad (2.29.b)$$

Donde:

$C_3$ : Constante de ajuste.

$e$ : Relación de vacíos.

$e_0$ : Constante para cada tipo de suelo.

En esta última expresión  $C_3$  es una constante de ajuste para cumplir las condiciones particulares arriba mencionadas y  $e - e_0$  es la "relación de vacíos efectiva" desde el punto de vista del espacio que efectivamente se tiene para el flujo del agua.

### II.8.2.2.- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AGUA.

Al variar la temperatura manteniendo los demás factores constantes, existe la relación:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\nu_2}{\nu_1} \quad (2.30)$$

Donde:

$k_1$ : Permeabilidad en el punto 1

$k_2$ : Permeabilidad en el punto 2

$\nu_1$ : Viscosidad cinemática

$\nu_2$ : Viscosidad cinemática

En donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática ( $\eta/\rho = \eta g/\gamma\omega$ ) del agua.

Para poder comparar fácilmente los resultados de las pruebas de permeabilidad es conveniente referirlos a una temperatura constante, normalmente a 20°C. Indicando por el subíndice T los resultados obtenidos a la temperatura de la prueba, la referencia se hace aplicando la relación:

$$k_{20} = k_T \frac{\nu_T}{\nu_{20}} \quad (2.31)$$

Donde:

$k_{20}$ : Permeabilidad a 20 grados centígrados.

$k_T$ : Permeabilidad a la temperatura de la prueba.

$\nu_T$ : Viscosidad cinemática a la temperatura de la prueba.

$\nu_{20}$ : Viscosidad cinemática a 20 grados centígrados.

### II.8.2.3.- INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURA Y LA ESTRATIFICACIÓN.

Un suelo suele tener permeabilidades diferentes en estado inalterado y remoldeado, aún cuando la relación de vacíos sea la misma en ambos casos; esto puede ser debido a los cambios en la estructura y estratificación del suelo inalterado o a una combinación de los dos factores.

Pueden observarse variaciones importantes en la permeabilidad debido a que en el remoldeo quedan libres partículas del suelo y que el agua al fluir las mueve y reacomoda, hasta obturar los canales; en otras ocasiones, estas partículas son arrastradas al exterior de la muestra, causando la turbidez del agua de salida. En tales casos, el coeficiente de permeabilidad variará durante la prueba. Esta condición inestable en una fracción de las partículas del suelo es, frecuentemente, resultado de la mezcla de materiales provenientes de estratos de características diferentes; esta condición es casi inevitable al probar muestras remoldeadas. Los fenómenos de formación de natas internas en los poros y la segregación de burbujas de aire, tienen efectos similares y son difíciles de distinguir entre sí, a menos que el carácter del suelo garantice que no pueden formarse esas natas limosas. En general, los suelos con coeficiente de permeabilidad comprendido entre  $10^{-5}$  y  $10^{-3}$  cm/seg son los que presentan el peligro de permitir el desplazamiento de las partículas por efecto de las fuerzas de filtración.

Como la mayoría de los suelos están estratificados, es preciso determinar el coeficiente de permeabilidad tanto en dirección paralela, como normal a los planos de estratificación. En caso de que los estratos sean lo suficientemente gruesos, puede determinarse la permeabilidad para cada estrato más o menos homogéneo y así poder calcular el coeficiente de permeabilidad medio en cada dirección, para la combinación de estratos.

#### II.8.2.4.- INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE AGUJEROS, FISURAS, ETC.

A causa de heladas, ciclos alternados de humedecimiento y secado, efectos de vegetación y pequeños organismos, etc., pueden cambiar las características de permeabilidad de los suelos, convirtiéndose aun la arcilla más impermeable en material poroso.

#### II.9.- TRANSMISIBILIDAD.

Es la capacidad de un acuífero para transmitir el agua a través de todo su espesor y es igual al producto del coeficiente de permeabilidad por el espesor saturado del acuífero, como puede verse en la figura 2.12:

$$T = K \cdot h \quad (2.32)$$

Donde:

T: Coeficiente de transmisibilidad.

K: Permeabilidad.

h: Altura del acuífero.

La Ley de Darcy hace intervenir, en el cálculo del caudal en movimiento, la permeabilidad y la superficie de flujo ( $Q = k i S$ ).

Ahora bien, si la sección de flujo tiene una longitud L y una potencia H igual a la del horizonte acuífero:

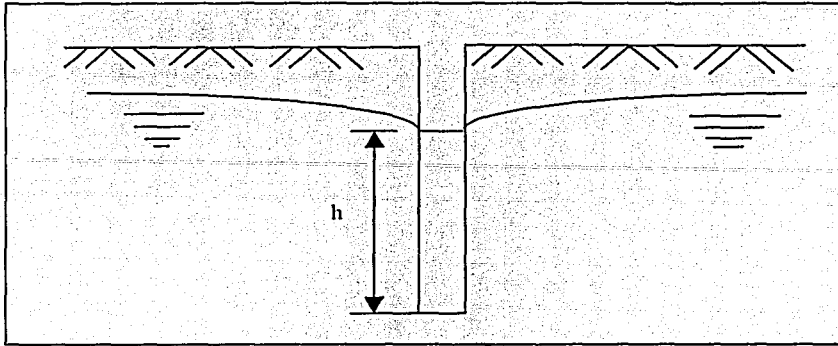


Figura 2.12 Coeficiente de transmisibilidad de un acuífero

$$S = H \cdot L \quad (2.33)$$

Donde:

S: Coeficiente de almacenamiento.

H: Potencia.

L: Longitud.

Reemplazando S por este valor, en la ecuación:

$$Q = k \cdot H \cdot i \cdot L \quad (2.34)$$

Donde:

Q: Gasto que circula.

k: Coeficiente de permeabilidad.

H: Potencia

i: Gradiente hidráulico.

L: Longitud.

Para los mantos cautivos:

$$Q = k \cdot e \cdot i \cdot L \quad (2.35)$$

Donde:

Q: Gasto que circula.

k: Coeficiente de permeabilidad.

e: Relación de vacíos.

i: Gradiente hidráulico.

L: Longitud.



El producto  $k \cdot H$  o  $k \cdot e$  se ha designado a menudo, siguiendo a Theis (1938), como la transmisibilidad. La transmisibilidad es, por consiguiente, el producto de la permeabilidad por la potencia del horizonte acuífero en la sección transversal considerada. La Ley de Darcy puede entonces expresarse así:

$$Q = T \cdot i \cdot L \quad (2.36)$$

Donde:

Q: Gasto que circula.

T: Transmisibilidad.

i: Gradiente hidráulico.

L: Longitud.

La noción de transmisibilidad es muy útil en el estudio de las aguas subterráneas libres cuyo caudal está determinado, esencialmente, por la permeabilidad de los terrenos y la potencia del horizonte acuífero.

Tiene las dimensiones del producto de una velocidad por una longitud ( $L^2 T^{-1}$ ) y se expresa, por consiguiente, en  $m^2/s$  o  $cm^2/s$ .

Permite calcular muy rápidamente las reservas de un manto, con un grado de aproximación suficiente.

## CAPÍTULO III

### MODELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS

A medida que en diferentes regiones de la tierra se recurre a extraer agua subterránea para satisfacer necesidades en grado creciente, es también fácil de constatar que existe, en muchos casos, un deterioro progresivo de la calidad del agua extraída.

Esto puede ser el resultado de entradas de agua de inferior calidad al acuífero como consecuencia de modificaciones de la línea piezométrica que provoquen los gradientes peligrosos.

En otros casos, la introducción de aguas de calidad inferior es el resultado de la inyección deliberada de aguas residuales de industrias, irrigaciones o comunidades.

Es aconsejable entonces examinar el comportamiento de contaminantes en acuíferos tratando de cuantificar sus concentraciones en función del tiempo y del espacio, para así conocer las posibles variaciones y decidir sobre las medidas de control.

#### III.1 PROPAGACIÓN DE CONTAMINANTES.

Se supone un acuífero homogéneo e isótropo, con una porosidad  $p$ . El volumen del líquido en un volumen elemental de acuífero  $dV$  será  $p dV$  y el ocupado por la parte sólida  $(1-p)dV$ .

Por tanto

$$\alpha = \frac{1-p}{p} = \frac{\text{Volumen de sólidos}}{\text{Volumen de vacíos}} \quad (3.1)$$

Donde:

$\alpha$ : Relación de vacíos

$p$ : Porosidad

Sea  $C$  la concentración (por ejemplo en  $g/m^3$ ) del contaminante en el agua y  $G$  la concentración del mismo en la parte sólida. Si el acuífero es confinado entre dos horizontes impermeables se puede suponer que se efectúa una inyección en un punto (o pozo) y se tratará de determinar la ley de concentración del contaminante  $C$ . Estos supuestos, como se verá, no quitan generalidad a los resultados.

Se analizará cada elemento de variación por separado.

Transporte advectivo.

Para definir este concepto se refiere al transporte del contaminante a una velocidad equivalente a la del agua subterránea en movimiento.

El transporte advectivo será:

a) En la superficie lateral del cilindro interior (Figura 3.1):

$$q \cdot C \cdot \Delta t; \text{ [en gramos]} \quad (3.2)$$

Donde:

Q: Gasto del fluido [m<sup>3</sup>/seg]

C: Concentración del contaminante [g/m<sup>3</sup>]

Δt: Incremento de tiempo [seg.]

b) En la superficie lateral del cilindro exterior (Figura 3.1):

$$-(Q + \Delta Q) \cdot \left( C + \frac{\partial C}{\partial r} \cdot \Delta r \right) \cdot \Delta t; \text{ [en gramos]} \quad (3.3)$$

Donde:

Δr: Incremento de radio del pozo [m]

ΔQ: Incremento de gasto [m<sup>3</sup>/seg]

El signo negativo es porque sale ese peso del contaminante del anillo

La dispersión se refiere a la extensión de la concentración de un contaminante como resultado de la variación espacial de la permeabilidad del acuífero.

La dispersión, se puede expresar también:

a) En la superficie lateral del cilindro interior:

$$- E \cdot p \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot \Delta t \cdot \frac{\partial C}{\partial r}; \text{ [gramos]} \quad (3.4)$$

Donde:

E: Coeficiente de dispersión.

p: Porosidad.

r: Radio del cilindro interior [m].

B: Altura [m].

Δt: Incremento de tiempo [seg].

$\partial C$ : Variación de la concentración de contaminante.

$\partial t$ : Variación del tiempo.

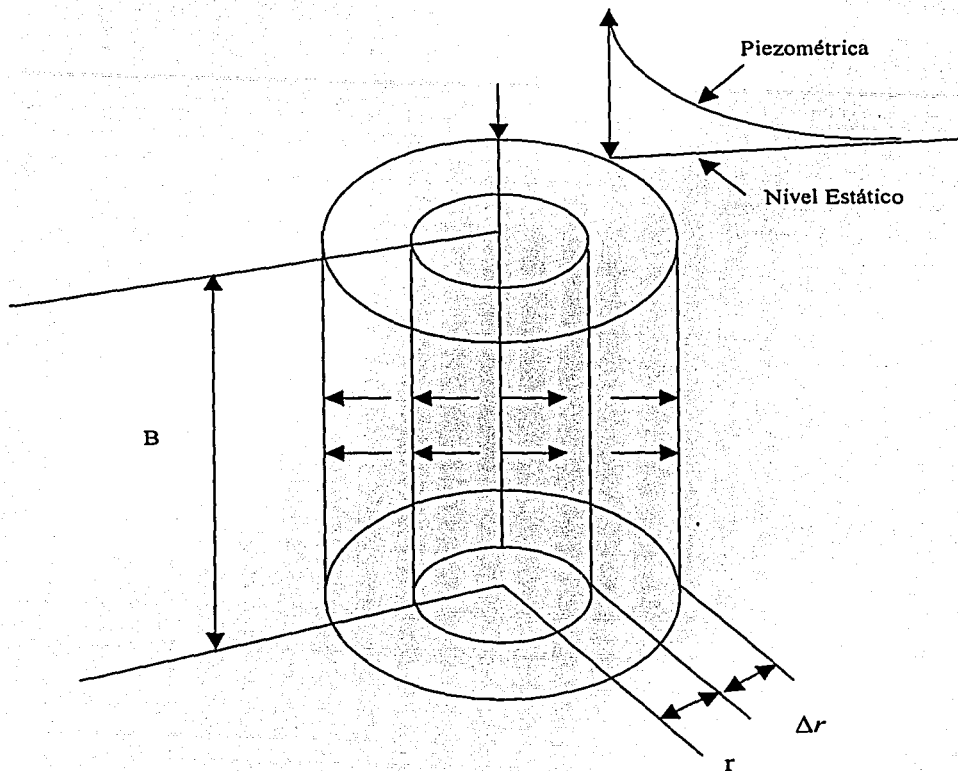


Figura 3.1 Tipos de contaminación del agua subterránea.

(ya que los gradientes son negativos).

b) En la superficie lateral del cilindro exterior:

$$+ E \cdot p \cdot 2 \cdot \pi (r + \Delta r) \cdot \left( \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \cdot \Delta r \right) \cdot B \cdot \Delta t; \text{ [gramos]}$$

A esto habrá que restar lo debido a la degradación o reacción del contaminante. Llamando K al porcentaje de cambio por unidad de tiempo (o sea expresado por ejemplo en día<sup>-1</sup>) resulta:

$$-k \cdot \Delta t \cdot [2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p \cdot \Delta r \cdot C + (1-p) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot \Delta r \cdot G] \quad [\text{gramos}] \quad (3.5)$$

Donde:

G: Concentración del contaminante en la parte sólida

k: Porcentaje de cambio por unidad de tiempo [día<sup>-1</sup>]

Ya que el primer término es lo que corresponde al agua y el segundo a la parte sólida.

Todo lo que precede sumado debe ser igual a lo que se acumula en el anillo, o sea:

$$2\pi \cdot r \cdot B \cdot p \cdot \Delta r \cdot \Delta C + (1-p) \cdot 2 \cdot \pi \cdot B \cdot \Delta r \cdot \Delta G \quad [\text{gramos}]$$

Igualando pues esta última expresión a la suma de las anteriores, cancelando términos iguales y eliminando infinitésimos de orden superior, queda:

$$E \cdot p \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot \Delta t \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \cdot \Delta r + E \cdot p \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta r \cdot B \cdot \Delta t \cdot \frac{\partial C}{\partial r} - Q \cdot \Delta C \cdot \Delta t - \Delta Q \cdot C \cdot \Delta t - k \cdot \Delta t \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot \Delta r \cdot [p \cdot C + (1-p) \cdot G] = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot \Delta r \cdot [p \cdot \Delta C + (1-p) \cdot \Delta G]$$

Dividiendo ahora por  $\Delta r \cdot \Delta t \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p$  resulta:

$$E \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + E \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} - \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta r} - \frac{C}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t} - k \cdot \left[ C + \frac{1-p}{p} \cdot G \right] = \frac{\Delta C}{\Delta t} + \frac{1-p}{p} \cdot \frac{\Delta G}{\Delta t}$$

Por lo tanto, en el límite:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \alpha \cdot \frac{\partial G}{\partial t} = E \cdot \left[ \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right] - \left[ Q \cdot \frac{\partial C}{\partial r} + C \cdot \frac{\partial Q}{\partial r} \right] \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p} - k \cdot (C + \alpha \cdot G)$$

(3.6)

Donde:

C: Concentración del contaminante en el agua [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

t: Tiempo [seg]

$\alpha$ : Relación de vacíos

G: Concentración del contaminante en la parte sólida

E: Coeficiente complejo

r: Radio del pozo [m]

Q: Gasto del fluido [ $\text{m}^3/\text{seg}$ ]

B: Altura del pozo [m]

p: Porosidad

K: Porcentaje de cambio por unidad de tiempo [ $\text{día}^{-1}$ ]

Esta es la ecuación general de variación de la concentración de un contaminante en un acuífero confinado.

Siendo el coeficiente de almacenamiento S la cantidad de agua que entra en un volumen de área igual a la unidad y altura igual a la del acuífero cuando la presión baja una unidad, como en la figura 3.1 hemos llamado h a esa presión, podemos expresar que:

$$\Delta Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta r \cdot \Delta h \cdot S}{\Delta t} \quad (3.7)$$

Donde:

$\Delta Q$ : Incremento de gasto [ $\text{m}^3/\text{seg}$ ]

r: Radio del pozo [m]

$\Delta r$ : Incremento de radio del pozo [m]

$\Delta h$ : Incremento de altura [m]

S: Coeficiente de almacenamiento

$\Delta t$ : Incremento de tiempo [seg]

O sea:

$$\frac{\partial Q}{\partial r} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot S \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.8)$$

En la ecuación 3.6 se puede sustituir el valor de  $\partial Q/\partial r$  por la expresión 3.8 anterior.

Se hace notar asimismo que  $Q/2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p$  es la velocidad intersticial a una distancia r del eje del pozo.

### III.2 APLICACIONES.

Es frecuente constatar que, en muchos casos:  $G = \lambda \cdot C$ .

Donde:

G: Concentración del contaminante en la parte sólida.

$\lambda$ : Porosidad.

C: Concentración del contaminante en el agua [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

Esto quiere decir que la concentración del contaminante en la fase sólida del acuífero es proporcional a la concentración en el agua ( $\lambda$  es constante).

Remplazando en la ecuación 3.6 se tiene:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \alpha \cdot \lambda \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = E \cdot \left[ \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right] - \left[ Q \cdot \frac{\partial C}{\partial r} + C \cdot \frac{\partial Q}{\partial r} \right] \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p} - k(C + \alpha \cdot \lambda \cdot C)$$

Haciendo ahora:

$$\theta = 1 + \alpha \cdot \lambda = 1 + \frac{1-p}{p} \cdot \lambda$$

Resulta:

$$\theta \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = E \cdot \left[ \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right] - \left[ Q \cdot \frac{\partial C}{\partial r} + C \cdot \frac{\partial Q}{\partial r} \right] \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p} - k \cdot \theta \cdot C \quad (3.9)$$

Donde:

$\theta$ : Constante de cambio de variable.

### III.3 DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES DE ACUÍFEROS PARA DIVERSOS CASOS.

Caso I. Dispersión despreciable y estado permanente, en acuífero no limitado pero confinado.

La ecuación 3.9 queda, en estas suposiciones:

$$Q \cdot \frac{dC}{dr} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p} + k \cdot \theta \cdot C = 0$$

ya que:

$$C(r,t) = C(r) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad E = 0 \quad y \quad \frac{\partial Q}{\partial r} = \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

Entonces:

$$\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p} \cdot \frac{dC}{dr} = -k \cdot \theta \cdot C$$

que es una ecuación a variables separables.

Resulta, sucesivamente:

$$\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot B \cdot p} \cdot \frac{dC}{C} = -r \cdot K \cdot \theta dr$$

$$\frac{dC}{C} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{Q} r dr$$

$$\log_e \frac{C}{C_0} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{Q} \cdot \frac{r^2 - r_0^2}{2}$$

$$C = C_0 \cdot e^{-\frac{2 \cdot \pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{Q} \left( \frac{r^2 - r_0^2}{2} \right)} \quad (3.10)$$

Donde:

C: Concentración del contaminante en el agua [g/m<sup>3</sup>]

C<sub>0</sub>: Concentración inicial del contaminante [microcuries/l]; [μg/l]; [g/l]

B: Altura del pozo [m]

p: Porosidad

K: Porcentaje de cambio por unidad de tiempo [día<sup>-1</sup>]

θ: Constante de cambio de variable

Q: Gasto del fluido [m<sup>3</sup>/seg]

r: Radio del pozo [m]

r<sub>0</sub>: Radio de un pozo al cual se está inyectando agua de concentración C<sub>0</sub>

En general, r<sub>0</sub><sup>2</sup> puede despreciarse frente a r<sup>2</sup> y por tanto:



$$C = C_0 \cdot e^{-\frac{\pi B p K \theta}{Q} r^2} \quad (3.11)$$

Esta misma ecuación se puede aplicar en el caso en que no haya concentración del contaminante en la fase sólida, puesto que simplemente

$$G = \lambda \cdot C \quad \therefore \quad \lambda = 0 \quad \therefore \quad \theta = 1$$

Y hasta sustituir  $\theta = 1$  en la ecuación 3.11.

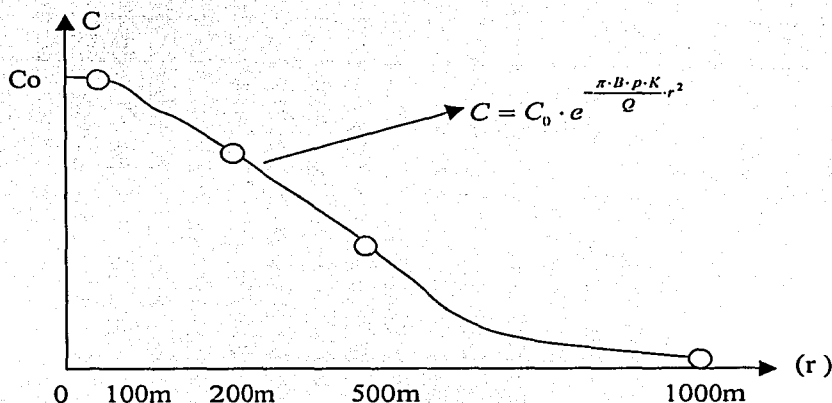


Figura 3.2

Se supone, por ejemplo, que se inyecta un caudal de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  conteniendo un elemento radiactivo con media vida de 14.3 días. Es fácil ver que:

$$K = \frac{2.303}{t_i} \text{Log}_{10} 2 = \frac{0.693}{t_i} = \frac{0.693}{14.3}$$

$$K = 0.048 \text{ [días}^{-1}\text{]}$$

Sí el acuífero tiene un espesor  $B = 10 \text{ m}$  y no reacciona su parte sólida con el contaminante ( $\theta=1$ ) resulta de la ecuación 3.11 lo que se muestra en la figura 3.2; asumiendo una porosidad  $p = 0.25$  y una concentración inicial de  $C_0$  microcuries/l por ejemplo. Se ve que a 500 m de distancia la concentración es de menos de 33.5% de la inicial. El tiempo de paso en que el contaminante llega a la distancia  $r = L$  será, en el caso general

$$\tau = \int_0^r dt = \int_{r_0}^L \frac{dr}{U}$$

Donde:

$\tau$ : Tiempo [días]

U: Velocidad intersticial [m/s]

Donde U es la velocidad intersticial  $Q/2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p$

Sustituyendo

$$\tau = \int_{r_0}^L \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p}{Q} dr = \frac{\pi \cdot p \cdot B}{Q} \cdot [L^2 - r_0^2]$$

En el ejemplo anterior, el tiempo que tarda en llegar a 500 metros de distancia será, de acuerdo a la fórmula precedente:

$$\tau = \frac{3.14 \cdot 0.25 \cdot 10}{86400} (500)^2 = 22.8 \text{ [días]}$$

Caso II. Mismas suposiciones que el caso anterior (estado permanente, acuífero homogéneo) pero asumiendo un pozo de recarga y un río o dren a distancia L del pozo.

La ecuación general de no equilibrio que liga las depresiones h (con respecto a la piezométrica inicial) con el tiempo y el radio r es:

$$\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} \quad (3.12)$$

Donde:

S: Constante de almacenamiento

T: Constante de transmisibilidad

El caso de un pozo de recarga y un río que afecta el acuífero confinado es equivalente al sistema del pozo de recarga y un pozo sumidero, imagen del real. El pozo estará situado a una distancia igual a L también como lo muestra la figura 3.3.

La solución de la ecuación 3.12 es:

$$h = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(z)$$

Donde:

h: Altura [m]

Q: Gasto [ $m^3/s$ ]

T: Coeficiente de transmisibilidad

W(z): Función de pozo

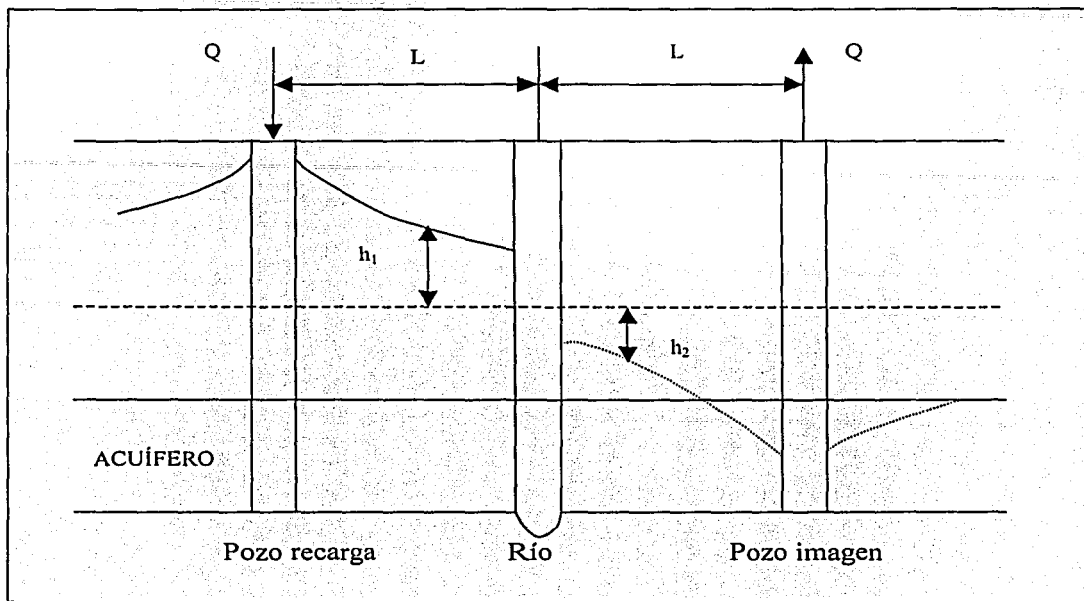


Figura 3.3

Donde:

$$z = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t} \quad (3.13)$$

Donde:

- r: Radio del pozo [m]
- S: Coeficiente de almacenamiento
- T: Coeficiente de transmisibilidad
- t: Tiempo [seg]

es un parámetro sin dimensiones conveniente. La función del pozo \$W(z)\$ puede ser aproximada por la expresión:

$$W(z) = -0.5772 - \text{Log}_e z$$

Tomando valores correspondientes a las depresiones causadas por los pozos real e imagen, se puede calcular valores aproximados de la concentración del contaminantes.

En efecto, como

$$h_1 = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \left[ -\text{Log}_e \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot t \cdot T} - 0.5772 \right]$$

$$h_2 = -\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \left[ -\text{Log}_e \frac{x^2 \cdot S}{4 \cdot t \cdot T} - 0.5772 \right]$$

Siendo  $x = 2L - r$  según se aprecia en la figura 3.3. Es fácil ver que, por definición de T, el valor del caudal en un ancho  $dm$  de acuífero perpendicular al plano de la figura será:

$$-T \frac{\partial h}{\partial t} dm = -T \frac{\partial (h_1 - h_2)}{\partial r} dm$$

y esta expresión será igual a:  $U \cdot B \cdot p \cdot dm$  donde U es la velocidad intersticial.

Por tanto:

$$U = -\frac{T}{B \cdot p} \frac{\partial (h_1 - h_2)}{\partial r}$$

Como

$$\frac{\partial (h_1 - h_2)}{\partial r} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \left[ -\frac{4 \cdot t \cdot T \cdot 2 \cdot r \cdot S}{r^2 \cdot S \cdot 4 \cdot t \cdot T} - \frac{4 \cdot t \cdot T \cdot 2 \cdot (2L - r) \cdot S}{(2L - r)^2 \cdot S \cdot 4 \cdot t \cdot T} \right]$$

Queda:

$$U = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot B \cdot p} \left[ +\frac{2}{r} + \frac{2}{2L - r} \right]$$

$$U = +\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot B \cdot p} \left[ +\frac{2L + r - r}{r(2L - r)} \right] = \frac{2L \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot B \cdot p \cdot r(2L - r)}$$

o sea:

$$U = \frac{Q}{\pi \cdot B \cdot p} \frac{L}{(2L - r) \cdot r}$$

Donde:

U: Velocidad intersticial [m/s]

Q: Gasto del fluido [m<sup>3</sup>/seg]

B: Altura del pozo [m]

R: Porosidad

L: Longitud [m]

R: Radio del pozo [m]

Sustituyendo este valor en la ecuación general, como E = 0 resulta, en estado permanente:

$$\frac{Q}{\pi \cdot B \cdot p} \frac{L}{(2L - r)r} \frac{dC}{dr} = -K \cdot \theta \cdot C$$

Separando variables e integrando

$$\text{Log}_e \frac{C}{C_0} = -\frac{K \cdot \theta \cdot \pi \cdot B \cdot p}{Q \cdot L} \left[ \frac{2L \cdot r^2}{2} - \frac{r^3}{3} \right]_{r_0}^r$$

Como en general r<sub>0</sub> es pequeño frente a r, resulta:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{K \cdot \theta \cdot \pi \cdot B \cdot p}{Q \cdot L} \left[ L \cdot r^2 - \frac{r^3}{3} \right]_{r_0}^r}$$

Como anteriormente, el tiempo de paso en alcanzar el dren sería

$$\tau = \int_0^L \frac{dr}{U} = \int_0^L \frac{\pi \cdot B \cdot p}{Q \cdot L} (2L - r) \cdot r dr$$

$$\tau = \frac{\pi \cdot B \cdot p}{Q \cdot L} \left[ L^3 - \frac{L^3}{3} \right] = \frac{2 \pi \cdot B \cdot p}{3 Q} L^3$$

Donde:

τ: Tiempo [seg]

Como puede verse en la figura 3.4, es posible calcular las concentraciones en otros puntos del A (como el B por ejemplo).

Si la distancia AB es llamada m, se ve que

$$r_1^2 = L^2 + m^2$$

Como es fácil probar, la concentración en el punto B (inmediatamente antes de entrar al río) es:

$$C = C_0 \cdot e^{-\frac{\pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{2 \cdot Q} r_1^2}$$

$$C = C_0 \cdot e^{-\frac{\pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{2 \cdot Q} (L^2 + m^2)}$$

o sea

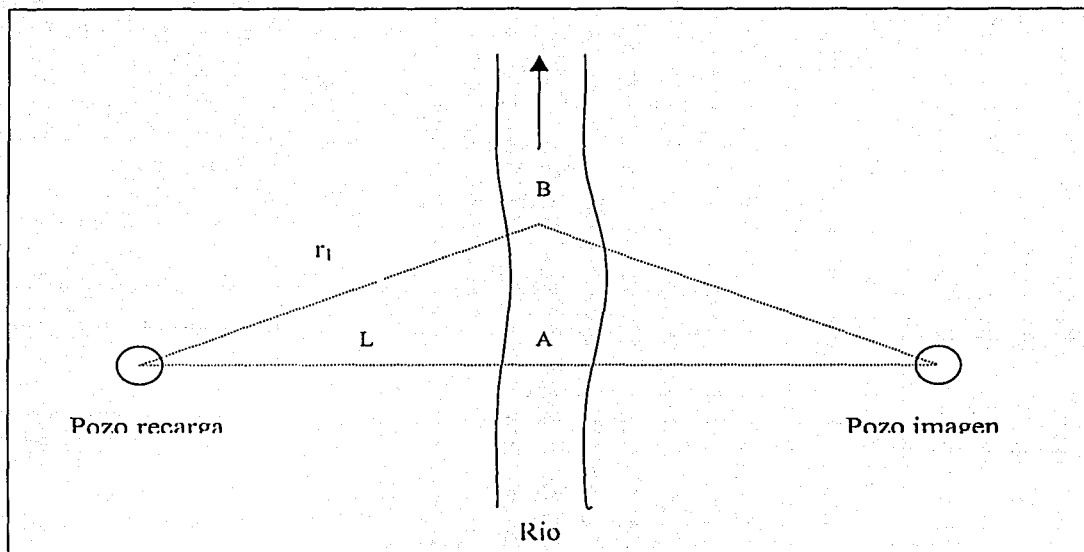


Figura 3.4

$$C = C_0 \cdot e^{-\frac{\pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{2 \cdot Q} L^2} \cdot e^{-\frac{\pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{2 \cdot Q} m^2} \quad (3.14)$$

De modo que la concentración en cualquier punto B (en el acuífero) es igual a la concentración en A multiplicada por el factor

$$f = \frac{1}{e^{\frac{\pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{2 \cdot Q} m^2}}$$

En consecuencia puede calcularse la concentración que llega al dren en cada punto en función del factor f y de la concentración en A.

Suponiendo el mismo acuífero del ejemplo anterior se puede hallar la distribución de la concentración del contaminante a lo largo del dren (inmediatamente antes de entrar a él).

En el cuadro 3.1 se presentan los factores de corrección "f".

Cuadro 3.1

Factores de corrección "f"

Valor m (metros)	$a = \frac{\pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{2 \cdot Q} m^2$	$f = \frac{1}{e^a}$
100	$0.218 \cdot 10^{-1}$	0.98
200	$0.872 \cdot 10^{-1}$	0.915
500	$5.45 \cdot 10^{-1}$	0.58
1000	$21.8 \cdot 10^{-1}$	0.112

y la figura 3.5 da la distribución a lo largo del dren en función del valor de C en A.

Es fácil ver que el caso explicado se puede extender con ecuaciones similares al caso de un pozo de recarga y uno de extracción.

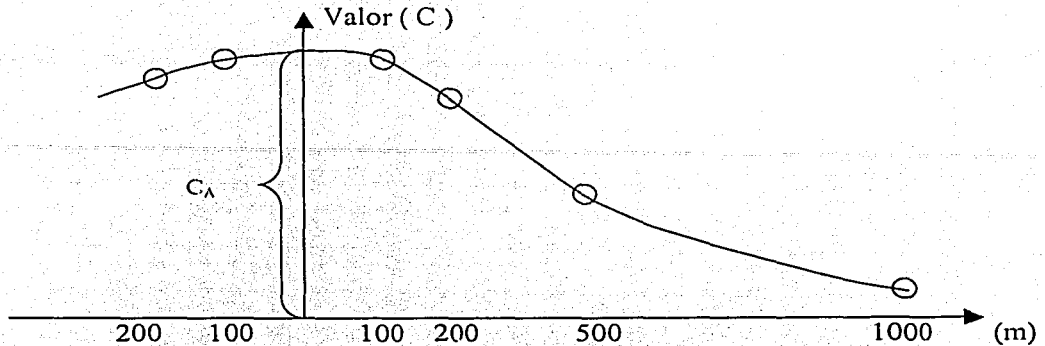


Figura 3.5 Distribución a lo largo del dren en función del valor de C en A.

### Caso III.

Para este caso, se supone que en lugar del río o dren existe una barrera impermeable. Cuando se encuentra esta condición de borde, es necesario suponer que no existe flujo a través de ella, o sea que la velocidad  $U = 0$  en  $r = L$ .

La ecuación de la velocidad se obtiene de la misma forma que la del caso anterior, con la debida atención a que ahora el pozo imagen se invierte y entonces:

$$U = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot B \cdot p} \left[ \frac{2}{r} - \frac{2}{2L - r} \right]$$

Lo que confirma  $U = 0$  para  $r = L$ . De allí

$$U = \frac{Q}{\pi \cdot B \cdot p} \frac{L - r}{(2L - r) \cdot r}$$

y por tanto, en el caso no dispersivo:

$$\frac{Q}{\pi \cdot B \cdot p} \frac{L - r}{(2L - r) \cdot r} \frac{dC}{dr} = -K \cdot \theta \cdot C$$

Entonces



$$-\frac{\pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{Q} \frac{(2L-r) \cdot r}{L-r} dr = \frac{dC}{C}$$

Integrando entre  $r_0 = 0$  y  $r$  se tiene:

$$\text{Log}_e \frac{C}{C_0} = -\frac{\pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{Q} \left[ -2L^2 + \frac{(L-r)^2}{2} - L^2 \text{Log}_e (L-r) \right]$$

o sea

$$C = C_0 e^{-\frac{\pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{Q} \left[ -2L^2 + \frac{(L-r)^2}{2} - L^2 \text{Log}_e (L-r) \right]}$$

y la concentración en la barrera será ( $L = r$ )

$$C = C_0 e^{\frac{3\pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot L^2}{Q}} \quad (3.15)$$

Donde:

$C_0$ : Concentración inicial del contaminante [microcuries / L]

B: Altura del pozo [m]

p: Porosidad

K: Porcentaje de cambio por unidad de tiempo [día<sup>-1</sup>]

L: Longitud [m]

Q: Gasto del fluido [m<sup>3</sup>/seg]

Combinando los casos anteriores puede obtenerse la solución de un número de casos prácticos, usando el principio de superposición. Inclusive se puede analizar los casos de intrusión salina y formación de barreras de agua dulce, como se han efectuado en un número de situaciones.

#### III.4 CONSIDERACIONES SOBRE DISPERSIÓN.

Excepto en casos de acuíferos de grava o en calcáreos cavernosos, generalmente el coeficiente de dispersión E es de valor bajo. Ciertos investigadores llegan a la conclusión que el valor de E puede expresarse así:

$$E = 1.9 \cdot U \cdot d \quad (3.16)$$

Donde:

U: Velocidad del agua [m/día]

d: Diámetro efectivo de la arena [m]

1.9: Constante sin dimensiones

Puede comprobarse que los valores de E así calculados son sólo una fracción de los que se hallan en aguas superficiales.

Por ejemplo en caso de que  $d = 0.001$  [m] (1 mm)

$$U = 20 \left[ \frac{m}{día} \right] \quad \therefore \quad E = 0.038 \left[ \frac{m^2}{día} \right]$$

Para valores muy bajos de U se alcanzaría el rango de la dispersión puramente molecular (difusión). Esta es del orden de  $1.0 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/día.

En el caso de U despreciable, la ecuación 3.9 se convierte, en el estado permanente:

$$E \left[ \frac{d^2 C}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dC}{dr} \right] - K \cdot \theta \cdot C = 0$$

que se reduce a la ecuación:

$$\frac{d^2 C}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dC}{dr} - \frac{K \cdot \theta}{E} C = 0 \quad (3.17)$$

Donde:

C: Concentración del contaminante en el agua [g/m<sup>3</sup>]

r: radio del pozo [m]

K: Porcentaje de cambio por unidad de tiempo [día<sup>-1</sup>]

θ: Constante de cambio de variable

E: Coeficiente de dispersión

Esta es una ecuación de Bessel de orden cero. Su solución es:

$$C = \lambda_1 \cdot B_0 \left[ \sqrt{\frac{K \cdot \theta}{E}} r \right] + \lambda_2 \cdot N_0 \left[ \sqrt{\frac{K \cdot \theta}{E}} r \right] \quad (3.18)$$

Donde:

B<sub>0</sub>: Función de Besel modificada de primera clase

N<sub>0</sub>: Función de Besel modificada de segunda clase

λ<sub>1</sub> y λ<sub>2</sub>: Constantes

Si las condiciones son tales que las condiciones de borde siguientes se cumplen:

$$C = 0 \quad \text{para} \quad r = \infty$$

$$C = C_0 \quad \text{para} \quad r = r_0$$

Entonces la ecuación final es:

$$C = \frac{C_0}{M} N_0 \left[ \sqrt{\frac{K \cdot \theta}{E}} r^2 \right] \quad (3.19)$$

Donde:

$$M = N_0 \left[ \sqrt{\frac{K \cdot \theta \cdot r_0^2}{E}} \right] \quad (3.20)$$

Estas ecuaciones son idénticas a las de lagos para mezcla vertical perfecta sin vientos.

### III.5 CASO GENERAL

Las soluciones de 3.6 o de 3.9 son extremadamente complejas y en caso de presentarse, aún en estado permanente, sería del caso considerarlas en segmentación como en los estuarios o lagos.

Es fácil probar, en ciertos casos particulares, que son ecuaciones de Bessel y por tanto, como en el caso anterior, con funciones de Bessel como solución.

## CAPÍTULO IV

### DESARROLLO DE SOFTWARE

En este cuarto capítulo se estudiará el análisis del programa de computadora desarrollado en el lenguaje de Visual Basic en su versión 6.0, eligiéndolo por su facilidad de manejo y por su creciente uso que ha tenido en los últimos años.

Visual Basic es hoy el lenguaje de programación más popular del mundo. Es un producto con una interfaz gráfica de usuario para crear aplicaciones para Windows basado en el lenguaje Basic y en la programación orientada a objetos.

En este capítulo se desarrollaron los tres casos de contaminación de agua subterránea explicados en el capítulo anterior, donde primero se explicará de que trata cada uno de ellos, sus parámetros requeridos.

Como se verá en este capítulo los ejemplos a considerar son los siguientes casos:

El primero, de un acuífero no limitado pero confinado en donde el contaminante se dispersará en estado permanente inyectando el caudal cuyo contenido es un elemento degradativo.

En este caso al tratarse de un acuífero confinado se refiere a un acuífero que está limitado superior e inferiormente por estratos impermeables y que contiene agua a una presión mayor que la atmosférica y por lo tanto al efectuar una perforación, el agua ascienda hasta un nivel superior al del techo del acuífero. Se considera que el techo y el fondo del acuífero no aportan agua. Los estratos impermeables ofrecen mucha resistencia al flujo del agua. También se les llama acuífero cautivo. Por otra parte la característica de estado permanente significa que no se toma agua del almacenamiento del acuífero y se debe considerar al acuífero como un mero transmisor de la recarga.

Para el segundo caso se toman las mismas condiciones que en el caso anterior, solamente que aquí se presenta un pozo de recarga y un río a cierta distancia y que intervendrá un factor de corrección en la concentración de un punto dado del acuífero.

Para el último caso, el tercero, se considera una barrera impermeable que como consecuencia no hay flujo, su velocidad será igual a cero y que la longitud del contaminante sea igual al radio del pozo del acuífero.

Explicación de los casos.

Caso I.

En este caso se trata de un acuífero no limitado pero confinado donde el contaminante se dispersará en estado permanente, inyectando el caudal cuyo contenido es un elemento radio activo.

Como se analizó en el capítulo anterior la ecuación (3.11) se obtuvo de haber resuelto por medio de separación de variables la ecuación (3.10).

Para determinar el tiempo que se pide en este caso, se observará que en la fórmula (3.13) el término "dr" será el haber derivado a la variable r de la ecuación (3.12).

Y para obtener el tiempo que se pide en este caso se utilizará la ecuación (3.14) obteniendo de la integración del termino "dr" de la ecuación 3.13, pero se hace notar que el parámetro k no se toma en cuenta en esta última ecuación.

#### Caso II.

Son las mismas condiciones que en el caso I; sin embargo, se presenta un pozo de recarga y un río o dren a cierta distancia L del pozo y otro pozo de extracción también a cierta distancia. En este caso se vera que intervendrá un factor de corrección en la concentración de un punto dado del acuífero.

Para este segundo caso se está tomando en cuenta por medio de la figura 3.4 algunas variables a considerar que se involucran en la ecuación (3.18). En esta figura se ven dos puntos, llamados "A" y "B" donde se analizó en el capítulo anterior la concentración en cada punto de ellos tomando en cuenta un factor de corrección llamado "f", cuya finalidad tiene de hacer homóloga la concentración del punto "A" al punto "B".

#### Caso III.

Para el último caso se analizará con una barrera impermeable, lo que trae consigo la nula existencia de flujo dando como condiciones que la velocidad intersticial sea nula y la longitud igual al radio del pozo.

Para el tercer caso, debido a las condiciones de que se está tratando de un acuífero en una barrera impermeable, esto hace que la dispersión de los contaminantes esten estancados en una cierta área que es la del acuífero, por lo tanto su velocidad es cero y su longitud es igual al radio del mismo acuífero.

Como se pudo ver en el capítulo anterior, que en base a estas consideraciones se desarrollo el proceso matemático, llegando a dar la ecuación (3.19) que es quien rige este comportamiento para el tercer caso.

Parámetros requeridos en cada uno de los casos.

#### Caso I.

Los parámetros a considerar en este ejemplo son los siguientes:

Q: Gasto [ $m^3/seg$ ]

t: Tiempo [días]

k: Porcentaje de cambio por unidad de tiempo.

B: Espesor [m]

$\theta$ : Constante de cambio de variable  
p: Porosidad  
 $C_0$ : Concentración inicial de variable  
L : Distancia de la concentración [m]  
r: Radio del pozo [m]

#### Caso II.

Los parámetros a considerar en este ejemplo son:

f: Factor de corrección  
B: Espesor [m]  
p: Porosidad  
k: Porcentaje de cambio por unidad de tiempo.  
 $\theta$ : Constante de cambio de variable  
Q: Gasto [ $m^3/seg$ ]  
m: Distancia [m]

#### Caso III.

Los parámetros a considerar en este ejemplo son:

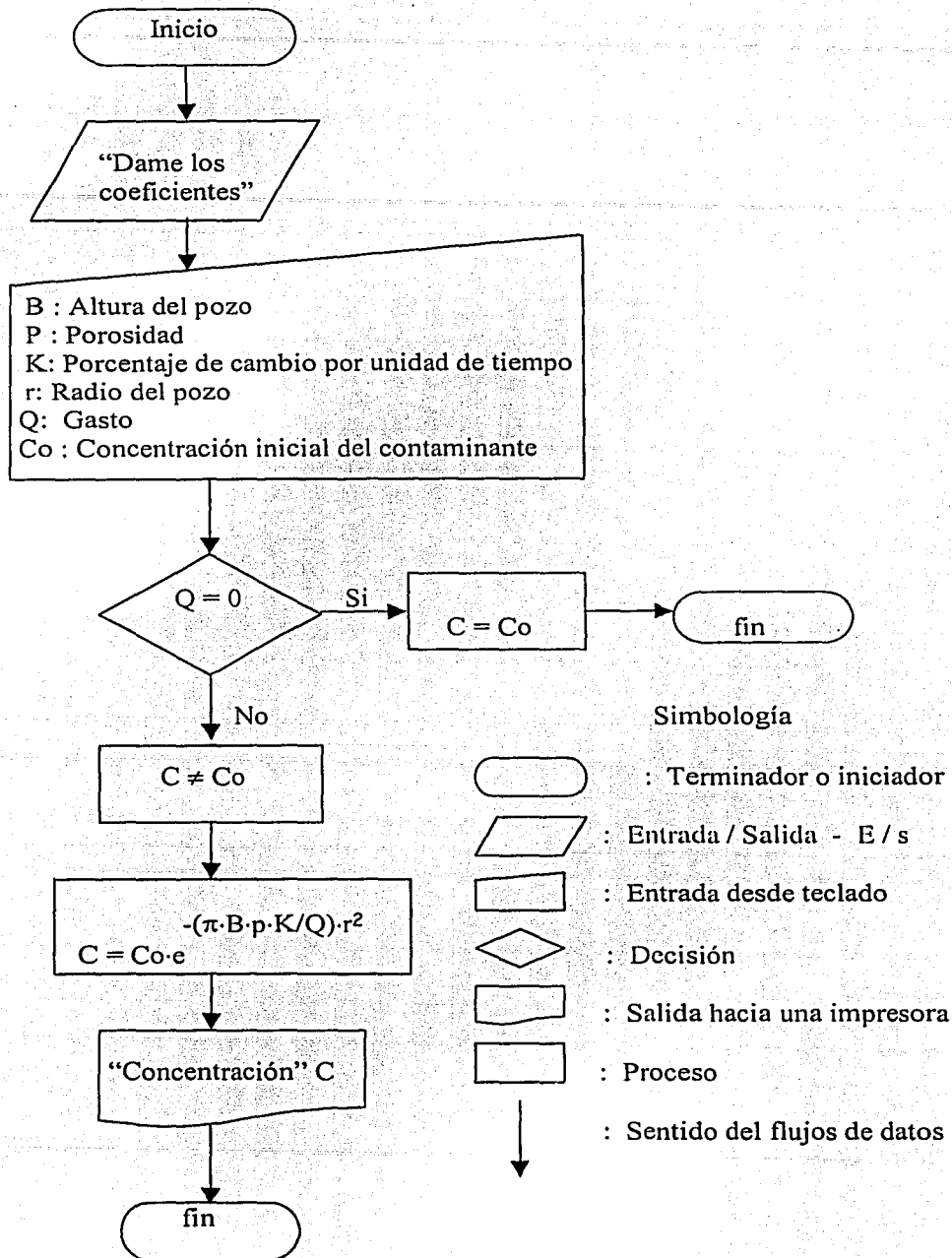
$C_0$ : Concentración inicial del contaminante  
B: Espesor [m]  
p: Porosidad  
k: Porcentaje de cambio por unidad de tiempo.  
L: Distancia [m]  
Q: Gasto [ $m^3/seg$ ]

### IV.1 Diagrama de flujo.

Un diagrama de flujo es una representación gráfica del flujo lógico de datos que se utilizará en la formulación, generalmente de una determinada parte del programa. Esto quiere decir que los diagramas se dibujan antes de escribir el programa, para asegurar un desarrollo lógico.

#### IV.1.1 Caso I.

A continuación se mostrará el diagrama de flujo de la ecuación que describe el comportamiento de la concentración para el Caso I que anteriormente se describió.



Figuran 4.1 Diagrama de flujo de la concentración de un contaminante.

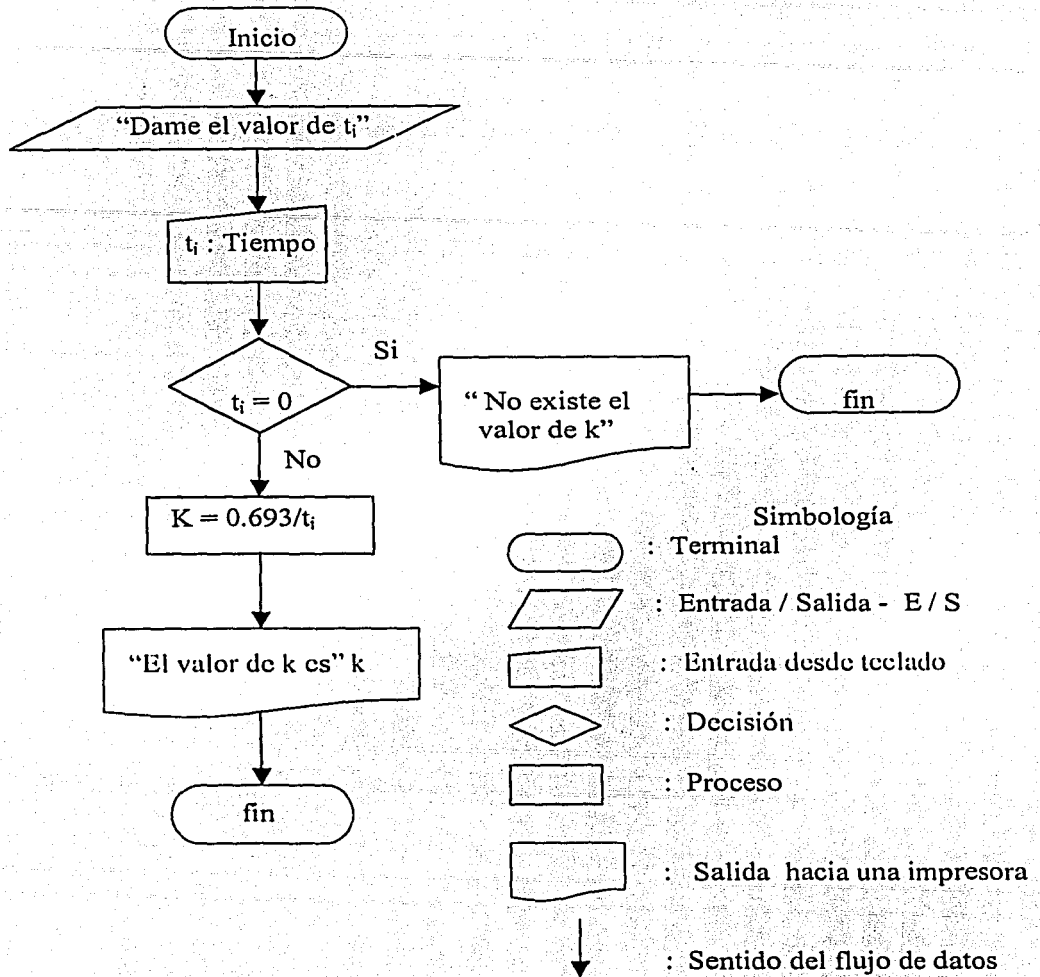


Figura 4.2 Diagrama de flujo del porcentaje de cambio por unidad de tiempo.



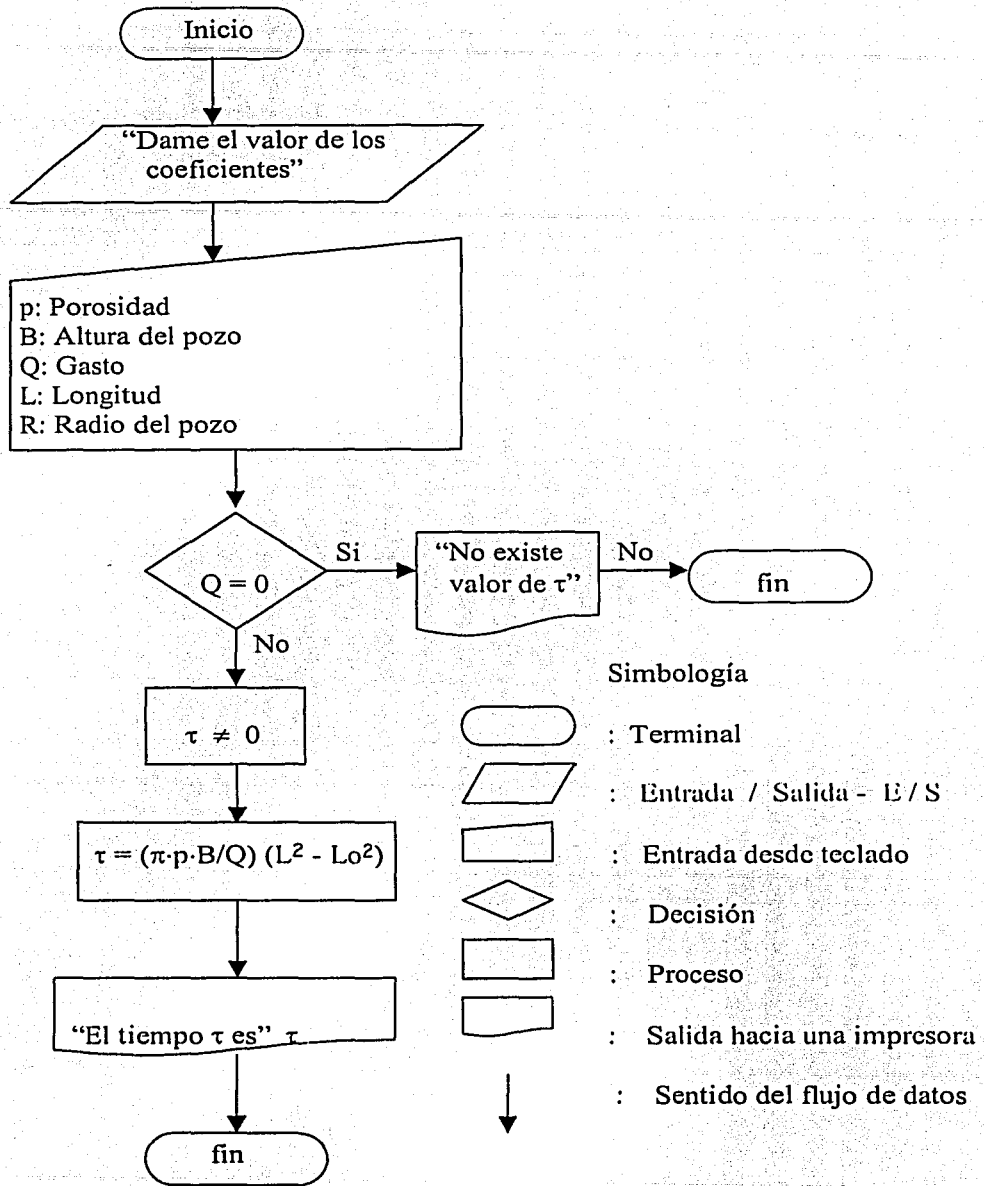


Figura 4.3 Diagrama de flujo del tiempo de paso.

IV.1.2 Caso II

A continuación se mostrará el diagrama de flujo de la ecuación que describe el comportamiento de la concentración para el Caso II que anteriormente se describió.

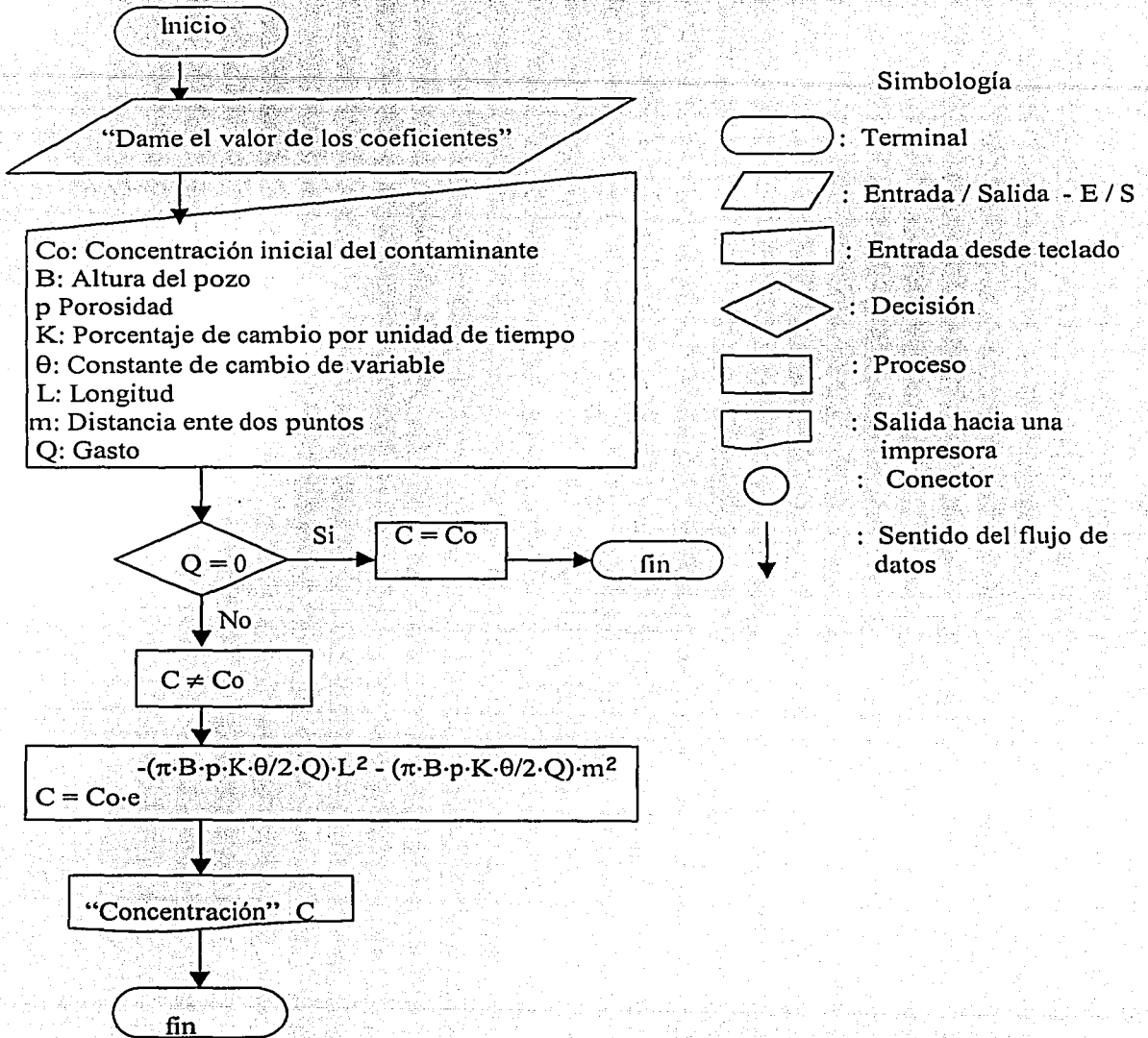


Figura 4.4 Diagrama de flujo para el punto B (inmediatamente antes de entrar al río)

IV.1.3 Caso III

A continuación se mostrará el diagrama de flujo de la ecuación que describe el comportamiento de la concentración para el Caso III que anteriormente se describió.

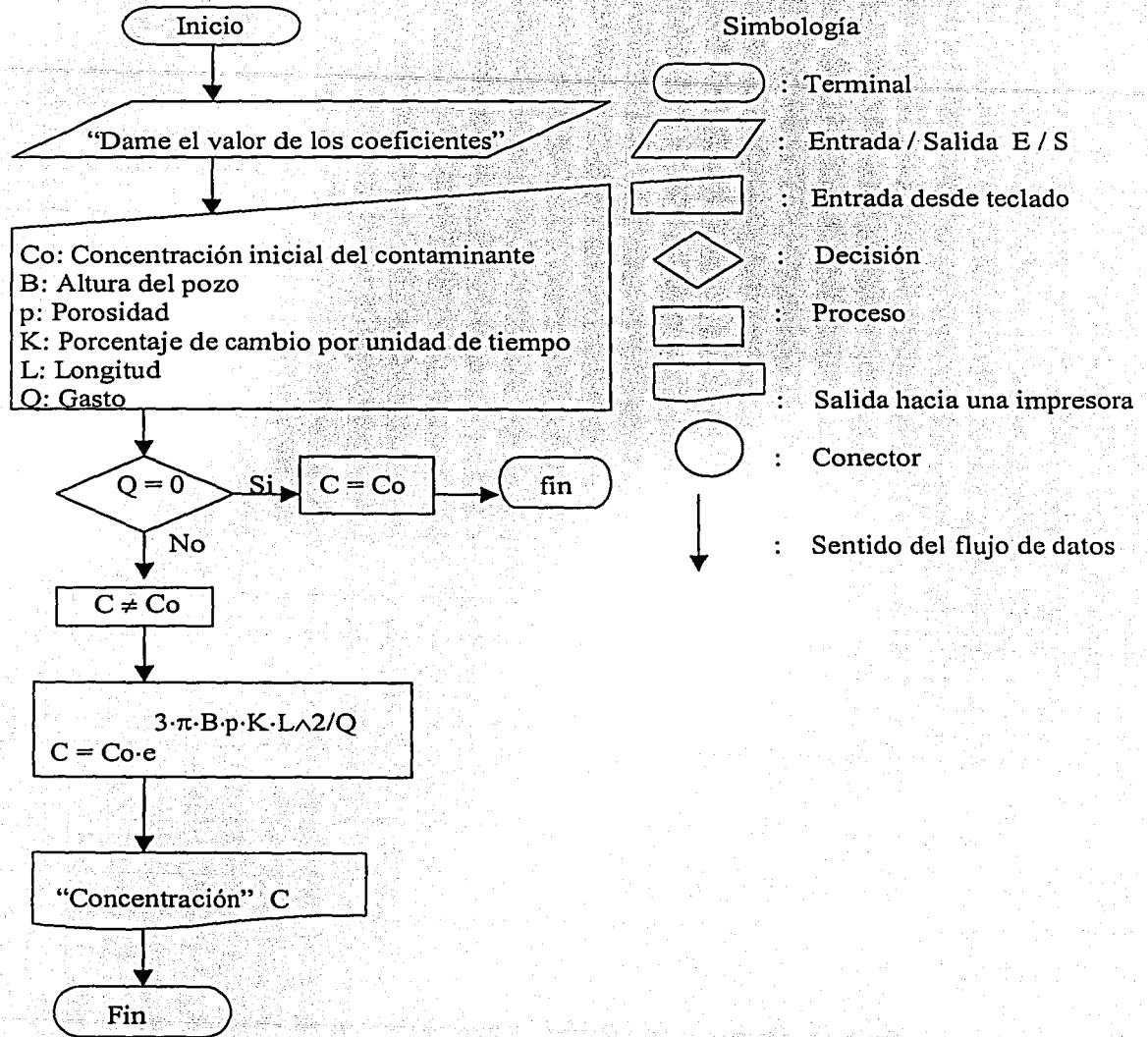


Figura 4.5 Diagrama de flujo para la concentración del contaminante en la barrera.

## IV.2 Lenguaje Fuente del Programa

```
Const xmin = -100, xmax = 100, ymin = -100, ymax = 100
Const xstep = 0.0001, ystep = 0.0001
```

```
Private Sub Command1_Click(Index As Integer)
```

```
If Index = 0 Then
```

```
  Cls
```

```
  lblcaso.Caption = "CASO I"
```

```
  ci = InputBox("Dame el valor de la concentracion inicial en metros")
```

```
  b = InputBox("Dame el valor del espesor del acuifero en metros")
```

```
  p = InputBox("Dame el valor de la porosidad")
```

```
  k = InputBox("Dame el valor del porcentaje en dias^-1")
```

```
  q = InputBox("Dame el valor del gasto en m^3/seg")
```

```
  PI = 3.14159565
```

```
  n = InputBox("NUMERO DE RADIOS A EVALUAR")
```

```
For i = 1 To n
```

```
  suma = 0
```

```
  r = InputBox("Dame el radio")
```

```
  C = Val(ci) * Exp(-((PI * Val(b) * Val(p) * Val(k)) / Val(q)) * Val(r) * Val(r))
```

```
  MSFlexGrid1.Rows = n + 1
```

```
  MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 0) = i
```

```
  MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 1) = r
```

```
  MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 2) = Format(C, "#.###")
```

```
  ForeColor = vbBlack
```

```
  CurrentX = ScaleLeft
```

```
  CurrentY = ScaleTop
```

```
  Line (xmin, 0)-(xmax, 0)
```

```
  Line (0, ymin)-(0, ymax)
```

```
  ForeColor = vbRed
```

```
  PSet (r * 100, C * 100)
```

```
  Circle (r * 100, C * 100), 0.5
```

```
Next i
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
MSFlexGrid1.FormatString = "" ^ [RADIOS [Km]] ^ [CONCENTRACIONES [mg/l]]"
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Resize()
```

```
ScaleLeft = xmin
```

```
ScaleTop = xmax
```

```
ScaleWidth = xmax - xmin
```

```
ScaleHeight = -(ymax - ymin)
```

```
Refresh
```

```
End Sub
```

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

## CAPÍTULO V

### CASO ESTUDIO

En el presente capítulo se analizarán los tres casos de estudio presentados en el capítulo III.

Caso I. Dispersión despreciable y estado permanente, en acuífero no limitado pero confinado.

Considerando que se inyecta un caudal de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  conteniendo un elemento radiactivo con vida media de 14.3 días. Es fácil ver que:

$$K = \frac{2.303}{t_i} \text{Log}_{10} 2 = \frac{0.693}{t_i} = \frac{0.693}{14.3}$$

$$K = 0.048 \text{ [días}^{-1}\text{]}$$

Si el acuífero tiene un espesor  $B = 10 \text{ m}$  y no reacciona su parte sólida con el contaminante de la ecuación 3.11 que se muestra en la figura 3.2 se obtiene  $\theta=1$ ; asumiendo una porosidad  $p = 0.25$  y una concentración inicial de  $C_0$  microcuries/l por ejemplo. Se ve que a 500 m de distancia la concentración es de menos de 33.5% de la inicial. El tiempo de paso en que el contaminante llega a la distancia  $r = L$  será, en el caso general

$$\tau = \int_0^r dt = \int_{r_0}^L \frac{dr}{U}$$

Donde:

$\tau$ : Tiempo [días]

$U$ : Velocidad intersticial [m/s]

Donde  $U$  es la velocidad intersticial  $Q/2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p$

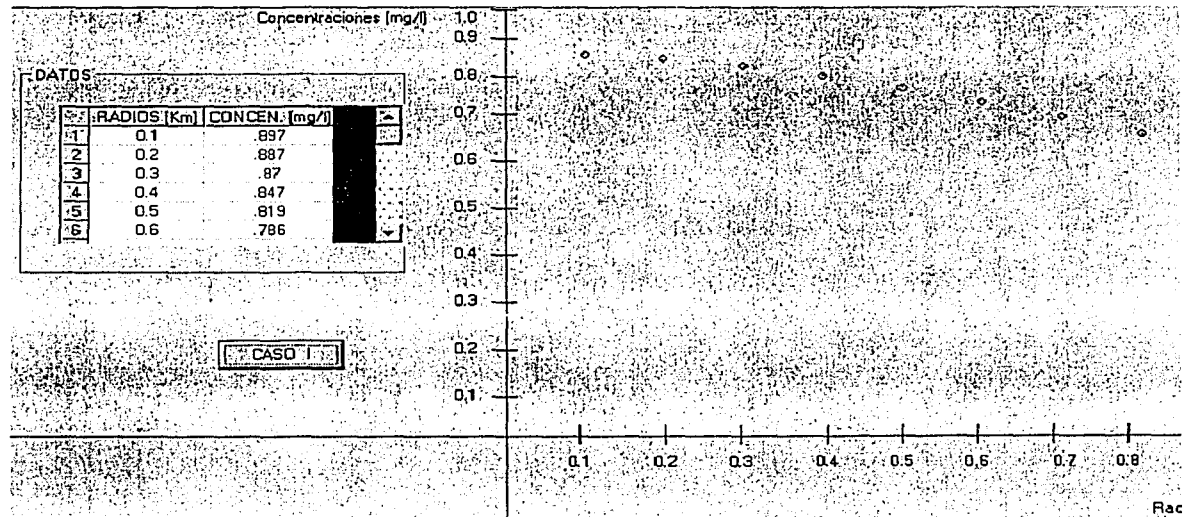
Sustituyendo

$$\tau = \int_{r_0}^L \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \cdot p}{Q} dr = \frac{\pi \cdot p \cdot B}{Q} \cdot [L^2 - r_0^2]$$

El tiempo que tarda en llegar a 500 metros de distancia será, de acuerdo a la fórmula precedente:

$$\tau = \frac{3.14 \cdot 0.25 \cdot 10}{86400} (500)^2 = 22.8 \text{ [días]}$$

A continuación se muestra el programa de computo realizado en Visual Basic 6.0 para este ejemplo donde se podrán ver las pantallas con los valores y su grafica correspondiente.



### Caso II

Suponiendo el mismo acuífero del caso anterior se puede hallar la distribución de la concentración del contaminante a lo largo del dren (inmediatamente antes de entrar a él).

En el cuadro 5.1 se presentan los factores de corrección "f".

Cuadro 5.1

Factores de corrección "f"

Valor m (metros)	$\alpha = \frac{\pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot \theta}{2 \cdot Q} m^2$	$f = \frac{1}{e^\alpha}$
100	$0.218 \cdot 10^{-1}$	0.98
200	$0.872 \cdot 10^{-1}$	0.915
500	$5.45 \cdot 10^{-1}$	0.58
1000	$21.8 \cdot 10^{-1}$	0.112

y la figura 3.5 da la distribución a lo largo del dren en función del valor de C en A.

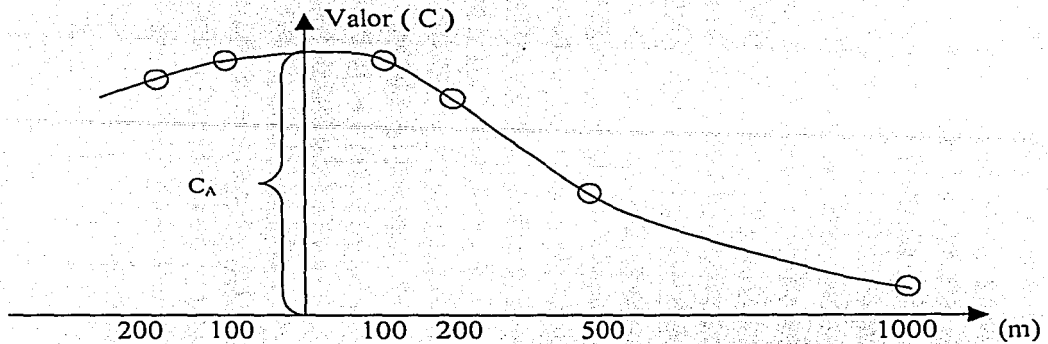


Figura 5.1 Distribución a lo largo del dren en función del valor de C en A.

Es fácil ver que el caso explicado se puede extender con ecuaciones similares al caso de un pozo de recarga y uno de extracción.

### Caso III.

Para este caso, se supone que en lugar del río o dren existe una barrera impermeable. Cuando se encuentra esta condición de borde, es necesario suponer que no existe flujo a través de ella, o sea que la velocidad  $U = 0$  en  $r = L$ .

Si el acuífero tiene un espesor de  $B = 10$  [m], asumiendo una porosidad de  $p = 0.25$  con una concentración inicial del contaminante de  $C_0 = 50$  [g/l], analizando una distancia de  $L = 500$  [m] y un valor de  $k = 0.05$  [día<sup>-1</sup>].

Empleando la siguiente fórmula como se observó en el capítulo III

$$C = C_0 e^{\frac{3 \cdot \pi \cdot B \cdot p \cdot K \cdot L^2}{86400}}$$

Y sustituyendo valores se tiene:

$$C = 50 e^{\frac{3 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 0.25 \cdot 0.05 \cdot 500^2}{86400}}$$

$$C = 50.342 \text{ [g/l]}$$

## CONCLUSIONES

En cuanto a la legislación que se ha promulgado en nuestro país en materia de contaminación del agua subterránea, aún se necesita estudiar y conocer más a fondo esta problemática, ya que como no puede ser percibida directamente, es necesario que autoridades municipales, estatales, federales y sociedad en general, se integren conjuntamente para denunciar puntos de contaminación, sanciones a los causantes y lo más importante, prevenir futuras fuentes y concientizar a la sociedad en general del grave peligro que representan las aguas subterráneas contaminadas. Es responsabilidad de los encargados de la creación y aprobación de dichas leyes en materia de prevención de contaminación de nuestro medio ambiente, contar con expertos en la materia para crear leyes más coherentes.

Es necesario estudiar los acuíferos para conocer su comportamiento, y entender el efecto de la contaminación de las aguas subterráneas conociendo las causas que los ha llevado a considerarlos como "focos rojos" en el medio ambiente.

Por otra parte al analizarse los diferentes tipos de acuíferos se puede concluir que los más susceptibles de contaminarse son los libres y semiconfinados, ya que se encuentran en una franja permeable donde los contaminantes al ser depositados en el suelo se pueden transportar en dirección a los mantos acuíferos y así contaminar el agua subterránea. En cambio en los acuíferos confinados contenidos en estratos impermeables tanto superior como inferiormente hacen muy poco probable que los fluidos contaminados puedan transportarse en ellos y llegar a las aguas subterráneas.

Los diferentes casos de estudio que se presentaron nos permiten conocer el comportamiento de la concentración de la contaminación en el agua subterránea y sus graficas nos indican que a mayor distancia se va presentando menor contaminación, por lo que la descarga y/o concentración mientras más lejos se presente de los cuerpos de aguas subterráneas menor contaminantes tendrán.

El análisis de los casos de contaminación subterránea con ayuda del programa de cómputo Visual Basic 6.0, proporciona una herramienta muy poderosa y en cierta manera fácil de proyectar los conceptos de contaminación aquí estudiados, lo que ayuda a obtener los resultados y las gráficas de manera casi instantánea.

Como una muestra de la aplicación del programa de cómputo se analizó el primer caso de estudio para observar el comportamiento de dichos contaminantes en la corrida del programa, observando que los resultados de los cálculos son sorprendentemente rápidos y así el usuario puede hacer uso del programa tantas veces como lo desee y poder efectuar un diagnóstico preciso y oportuno.



---

## BIBLIOGRAFÍA

### I.- Texto.

- 1.- Castagnino, Walter A. Polución de agua, modelos y control. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).Lima.
- 2.- Castany, G. Tratado práctico de las aguas subterráneas. Omega. Barcelona, España. 1971.
- 3.- CNA. Compendio básico del agua en México. México. 2001
- 4.- CNA y SEMARNAP. El agua en México: Retos y avances. México. 2000.
- 5.- Custodio, Emilio y Llamás, Manuel Ramón. Hidrología Subterránea. Tomo I. Segunda edición. Omega S. A. Barcelona, España. 1983.
- 6.- Ferris, J. G; Knowles D. B; el alli. Teoría de los acuíferos. Instituto cubano del libro. La Habana, Cuba. 1970.
- 7.- Iturbe Argüelles, Rosario y Silva Martinez, Ana Elisa. Agua Subterránea y Contaminación. Series del Instituto de Ingeniería. México. 1992.
- 8.- Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez Alfonso. Mecánica de Suelos. Tomo I. Segunda Edición. Limusa. México. 1992.
- 9.- Monsalve Sáenz, German. Hidrología en la Ingeniería, Segunda Edición. Alfaomega. Colombia. 1998.
- 10.- Terzaghi, Carl y Perck, Ralph B. Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica. Segunda Edición. El Ateneo S. A. España. 1980.

### II.- Leyes y Reglamentos.

- 1.- Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2001. Comisión Nacional del Agua. México. 2001.
- 2.- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Secretaria del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. México. 1997.
- 3.- Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. Comisión Nacional del Agua. México. 1999.
- 4.- Norma Oficial Mexicana NOM-003-CNA-1996. Comisión Nacional del Agua. México. 1996.

**III.- Manuales.**

- 1.- Balena, Francisco. Programación Avanzada con Microsoft Visual Basic Versión 6. Mc. Graw Hill. México. 1999.
- 2.- Ceballos, Francisco Javier. Curso de Programación de Visual Basic 6. Alfaomega. México. 2001.