

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN ACUÍFERO EN LABORATORIO
EMPLEANDO EL EQUIPO DE HIDROLOGÍA P6530**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCION DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MENCIÓN HIDRAÚLICA**

VANESSA ESTEFANIA MENA VIERA
vanessa.mena01@epn.edu.ec

DIRECTOR: DRA. CARLA PAOLA MANCIATI JARAMILLO
carla.manciati@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: DR. XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS
xavier.zapata@epn.edu.ec

Quito, Mayo 2019

DECLARACIÓN

Yo Vanessa Estefania Mena Viera, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Vanessa Estefania Mena Viera

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Vanessa Estefania Mena Viera, bajo nuestra supervisión.

Dra. Carla Manciatì

DIRECTOR

Dr. Xavier Zapata Ríos

CO-DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Politécnica Nacional, la Facultad de Ingeniería Civil y al Laboratorio Docente de Hidráulica por la formación profesional impartida, el equipo y el espacio destinado para el desarrollo de este trabajo.

A mis tutores de tesis: Dra. Carlita Manciaty y Dr. Xavier Zapata Ríos, quienes me han guiado en esta etapa de culminación de la carrera dejando amenas enseñanzas.

A los ingenieros: Jorge Augusto Toapaxi, Cristina Alexandra Torres y Manuel Narvaéz, quienes participaron directa e indirectamente en el proceso y sin su colaboración el desarrollo de esta tesis no hubiera sido posible.

A Alexis Armas y su familia por su colaboración y apoyo incondicional.

A mi padre: Cristóbal Mena, por el esmero y dedicación hacia mí y mis hermanas (Vale, Liz y Evelyn).

Vanessa Mena

DEDICATORIA

A la memoria de mis abuelitos: Pedro Mena y Ursulina Álvarez.

Vanessa Mena

ÍNDICE DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS	xv
NOMENCLATURA.....	xvi
GLOSARIO.....	xviii
RESUMEN.....	xxiii
ABSTRACT.....	xxiv
PRESENTACIÓN.....	xxv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3. HIPÓTESIS.....	3
1.4. ALCANCE.....	3
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.5.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	3
1.5.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	5
1.5.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	6
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	7
2.1. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1.1. INTRODUCCIÓN.....	7
2.1.2. CICLO HIDROLÓGICO.....	8
2.1.1.1. Ecuación hidrológica	10
2.1.2. ECUACIONES FUNDAMENTALES.....	11
2.1.2.1. Energía mecánica	11
2.1.2.2. Teorema de Bernoulli	14

2.1.2.3.	Gradiente hidráulico	16
2.1.2.4.	Ecuación de Darcy	18
2.1.1.1.	Ecuación de continuidad para flujo estacionario	19
2.1.3.	<i>ACUÍFEROS</i>	20
2.1.4.	<i>PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS</i>	23
2.1.4.1.	Porosidad efectiva y coeficiente de almacenamiento.....	23
2.1.4.2.	Permeabilidad y transmisividad.....	26
2.1.5.	<i>FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA</i>	27
2.1.5.1.	Flujo constante en un acuífero libre	27
2.1.5.2.	Flujo constante en un acuífero confinado.....	29
2.1.6.	<i>EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA</i>	31
2.1.6.1.	Acuífero libre	32
2.1.6.2.	Acuífero confinado	38
2.1.7.	<i>DETERMINACIÓN DE LOS ECUACIONES A PARTIR DE LOS PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS</i>	43
2.1.7.1.	Flujo radial constante en un acuífero libre.....	44
2.1.7.2.	Flujo radial constante en un acuífero confinado.....	45
2.1.8.	<i>RED DE FLUJO</i>	47
2.1.9.	<i>INTRODUCCIÓN A SURFER®</i>	47
2.1.9.1.	Métodos de interpolación	52
2.2.	ESTADO DEL ARTE	52
3.	METODOLOGÍA	58
3.1.	INTRODUCCIÓN	58
3.2.	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y COMPONENTES.....	58
3.3.	ACCESORIOS	60
3.4.	MEDIO GRANULAR.....	61
3.5.	MEDIDAS DE SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO	62
3.5.1.	<i>EQUIPO ELÉCTRICO</i>	62
3.5.2.	<i>EQUIPO ROTATORIO</i>	63
3.1.1.	<i>DESINFECCIÓN</i>	63

2.2.1.1. Método de tratamiento	64
2.2.1.2. Frecuencia del tratamiento	64
3.6. OPERACIÓN Y TOMAS DE MEDIDAS	65
3.6.1. OPERACIÓN DE BOMBAS.....	65
3.6.2. CAMBIO DE CONDICIONES	66
3.6.3. TOMA DE MEDIDAS.....	66
3.6.3.1. Tablero de manómetros	66
3.6.3.2. Manómetros del tanque de arena.....	68
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
4.1. GUÍA DE PRÁCTICAS Y REDES DE FLUJO	69
4.1.1. FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN UN ACUÍFERO LIBRE	69
4.1.1.1. Objetivo	69
4.1.1.2. Preparación del equipo	69
4.1.1.3. Procedimiento experimental.....	70
4.1.1.4. Resultados y Análisis	70
4.1.1.5. Hoja de datos	72
4.1.2. FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN UN ACUÍFERO CONFINADO.....	74
4.1.2.1. Objetivo	74
4.1.2.2. Preparación del equipo	74
4.1.2.3. Procedimiento experimental.....	75
4.1.2.4. Resultados y Análisis	75
4.1.2.5. Redes de flujo	76
4.1.3. EXTRACCIÓN DE AGUA DE UN ACUÍFERO LIBRE.....	78
4.1.3.1. Objetivo	78
4.1.3.2. Preparación del equipo	78
4.1.3.3. Procedimiento experimental.....	79
4.1.3.4. Cálculos	79
4.1.3.5. Redes de flujo	81
4.1.4. EXTRACCIÓN DE AGUA DE UN ACUÍFERO CONFINADO.....	84

4.1.4.1. Objetivo	84
4.1.4.2. Preparación del equipo	84
4.1.4.3. Procedimiento experimental	85
4.1.4.4. Cálculos	85
4.1.4.5. Redes de Flujo	87
<i>4.1.5. INTERACCIÓN DE LOS CONOS DE DESCENSO DE UN POZO EN UN ACUÍFERO LIBRE</i>	<i>89</i>
4.1.5.1. Objetivo	89
4.1.5.2. Preparación del equipo	89
4.1.5.3. Procedimiento experimental	90
4.1.5.4. Cálculos	91
4.1.5.5. Redes de flujo	92
<i>4.1.6. INTERACCIÓN DE LOS CONOS DE DESCENSO DE UN POZO EN ACUÍFERO UN CONFINADO</i>	<i>95</i>
4.1.6.1. Objetivo	95
4.1.6.2. Preparación del equipo	95
4.1.6.3. Procedimiento experimental	96
4.1.6.4. Cálculos	97
4.1.6.5. Redes de flujo	98
<i>4.1.7. DEMOSTRACIÓN DE LA MECÁNICA FLUVIAL DEL CAUCE DE UN RÍO</i>	<i>104</i>
4.1.7.1. Objetivo	104
4.1.7.2. Preparación del equipo	104
4.1.7.3. Procedimiento experimental	105
4.1.7.4. Observaciones	105
4.1.7.1. Red de flujo	106
4.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON ACUÍFEROS REALES	108
4.2.1. FLUJO DE AGUA	108
4.2.2. EXTRACCIÓN DE AGUA	113
4.2.3. INTERACCIÓN DE CONOS DE DESCENSO	118

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	122
5.1. CONCLUSIONES	122
5.2. RECOMENDACIONES	123
6. BIBLIOGRAFÍA	124
7. ANEXOS	128

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. DISTRIBUCIÓN GLOBAL DEL AGUA	7
FIGURA 2.2. CICLO HIDROLÓGICO	10
FIGURA 2.3 ENERGÍA TOTAL EN UN FLUJO DE AGUA	14
FIGURA 2.4. TEOREMA DE BERNOULLI	15
FIGURA 2.5. ENERGÍA QUE INTERVIENEN EN UN MEDIO POROSO.....	17
FIGURA 2.6 PERMEÁMETRO DE DARCY	19
FIGURA 2.7 BALANCE DE AGUA EN UNA UNIDAD DE SUELO	20
FIGURA 2.8 ACUÍFERO LIBRE Y ACUÍFERO CONFINADO CON SUS RESPECTIVAS ZONAS DE RECARGA.....	22
FIGURA 2.9 ACUÍFERO LIBRE Y SEMICONFINADO	23
FIGURA 2.10 EXTRACCIÓN DE UN METRO CÚBICO DE UN ACUÍFERO (A) CONFINADO, (B) LIBRE.	24
FIGURA 2.11 PERMEABILIDAD EN UN ACUÍFERO	26
FIGURA 2.12 FLUJO CONSTANTE A TRAVÉS DE UN ACUÍFERO LIBRE QUE DESCANSA SOBRE UNA SUPERFICIE IMPERMEABLE HORIZONTAL	28
FIGURA 2.13 FLUJO CONSTANTE A TRAVÉS DE UN ACUÍFERO CONFINADO DE ESPESOR UNIFORME.....	30
FIGURA 2.14 CONDICIONES DEL ACUÍFERO LIBRE ANTES DEL BOMBEO.....	34
FIGURA 2.15 PRIMERA ETAPA DEL BOMBEO EN ACUÍFERO LIBRE	35
FIGURA 2.16 SEGUNDA ETAPA DEL BOMBEO EN ACUÍFERO LIBRE	35
FIGURA 2.17 TERCERA ETAPA DEL BOMBEO EN ACUÍFERO LIBRE.....	36
FIGURA 2.18 GRÁFICO DE LOG DESCENSO VS LOG TIEMPO DURANTE EL BOMBEO EN UN ACUÍFERO LIBRE	36
FIGURA 2.19 POZO DE BOMBEO EN UN ACUÍFERO CONFINADO, TOTALMENTE PERFORADO.	39

FIGURA 2.20 EQUILIBRIO EN EL ABATIMIENTO DE UN ACUÍFERO CONFINADO.	46
FIGURA 2.21 LÍNEAS EQUIPOTENCIALES Y LÍNEAS DE FLUJO EN UN MEDIO ISOTRÓPICO	48
FIGURA 2.22 LÍNEAS EQUIPOTENCIALES Y LÍNEAS DE FLUJO EN UN MEDIO ANISOTRÓPICO	48
FIGURA 2.23 PANTALLA DE TRABAJO DEL SOFTWARE SURFER	51
FIGURA 3.1 EQUIPO DE HIDROLOGÍA Y COMPONENTES EN EL LABORATORIO DOCENTE DE HIDRÁULICA.....	59
FIGURA 3.2 ESQUEMA DEL EQUIPO.....	59
FIGURA 3.3 GRÁFICA DE CALIBRACIÓN DE LOS VERTEDEROS	68
FIGURA 4.1 ESQUEMA DEL EQUIPO PARA EL ENSAYO DE FLUJO DE AGUA EN ACUÍFERO LIBRE	70
FIGURA 4.2 RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLUJO DE AGUA EN ACUÍFERO LIBRE. EL ANEXO 5 CONTIENE LOS DATOS DE LA PRÁCTICA.....	73
FIGURA 4.3 ESQUEMA DEL EQUIPO PARA EL ENSAYO DE FLUJO DE AGUA EN ACUÍFERO CONFINADO.....	75
FIGURA 4.4 RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLUJO DE AGUA EN ACUÍFERO CONFINADO. PLACA CIRCULAR.	76
FIGURA 4.5 RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLUJO DE AGUA EN ACUÍFERO CONFINADO. PLACA RECTANGULAR.	77
FIGURA 4.6 ESQUEMA DEL EQUIPO PARA EL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE AGUA EN ACUÍFERO LIBRE.	79
FIGURA 4.7 RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE AGUA EN UN ACUÍFERO LIBRE, DESCENSO APROXIMADO DE 50 MM.	81
FIGURA 4.8 RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE AGUA EN UN ACUÍFERO LIBRE, DESCENSO APROXIMADO DE 100 MM.	82
FIGURA 4.9 RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE AGUA EN UN ACUÍFERO LIBRE, DESCENSO APROXIMADO DE 150 MM.	83
FIGURA 4.10 ESQUEMA DEL EQUIPO PARA EL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE AGUA EN ACUÍFERO CONFINADO.	85

FIGURA 4.11 RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE AGUA EN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA CIRCULAR, DESCENSO APROXIMADO 50 MM.	87
FIGURA 4.12 RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE AGUA EN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA CIRCULAR, DESCENSO APROXIMADO 100 MM.	88
FIGURA 4.13. ESQUEMA DEL EQUIPO PARA EL ENSAYO DE INTERACCIÓN DE CONO DE DESCENSO EN ACUÍFERO LIBRE.	90
FIGURA 4.14 RESULTADOS DEL ENSAYO DE INTERACCIÓN DE AGUA EN UN ACUÍFERO LIBRE, DESCENSO APROXIMADO DE 50 MM.	92
FIGURA 4.15 RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE AGUA EN UN ACUÍFERO LIBRE, DESCENSO APROXIMADO DE 100 MM.	93
FIGURA 4.16 RESULTADOS DEL ENSAYO DE INTERACCIÓN EN UN ACUÍFERO LIBRE, DESCENSO APROXIMADO DE 150 MM.	94
FIGURA 4.17 ESQUEMA DEL EQUIPO PARA EL ENSAYO DE INTERACCIÓN DE CONOS.....	96
FIGURA 4.18 RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE AGUA EN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA RECTANGULAR, DESCENSO APROXIMADO 50 MM.	98
FIGURA 4.19 RESULTADOS DEL ENSAYO DE INTERACCIÓN EN UN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA CIRCULAR, DESCENSO APROXIMADO DE 50 MM.	99
FIGURA 4.20 RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE AGUA EN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA RECTANGULAR, DESCENSO APROXIMADO 100 MM.	100
FIGURA 4.21 RESULTADOS DEL ENSAYO DE INTERACCIÓN EN UN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA CIRCULAR, DESCENSO APROXIMADO DE 100 MM.	101
FIGURA 4.22 RESULTADOS DEL ENSAYO DE INTERACCIÓN EN UN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA RECTANGULAR, DESCENSO APROXIMADO DE 50 MM.	102
FIGURA 4.23 RESULTADOS DEL ENSAYO DE INTERACCIÓN EN UN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA RECTANGULAR, DESCENSO APROXIMADO DE 100 MM.	103
FIGURA 4.24 TRAZADO EN PLANTA DEL RÍO PARA REALIZAR LA PRÁCTICA.	105
FIGURA 4.25 RESULTADOS DEL ENSAYO DE DEMOSTRACIÓN DE LA MECÁNICA FLUVIAL DEL CAUCE DE UN RÍO.	106
FIGURA 4.26 CONTORNO DE SUPERFICIE FREÁTICA, RESULTADO DE LA PRÁCTICA DE FLUJO DE AGUA UN ACUÍFERO LIBRE.....	108

FIGURA 4.27 MAPAS DE LA CAPA FREÁTICA DEL HUMEDAL DE LOST CREEK AL NIVEL MÁXIMO DE AGUA EL 19 DE JUNIO DE 1997, ESTADOS UNIDOS.....	109
FIGURA 4.28 MAPAS DE LA CAPA FREÁTICA DEL HUMEDAL DE LOST CREEK AL NIVEL MÍNIMO DE AGUA EL 16 DE JULIO 1997, ESTADOS UNIDOS.....	109
FIGURA 4.29 MAPAS DE LA CARGA HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO DEL SISTEMA DE OASIS DE TAFILALET (TOS) EN FEBRERO DEL 2011, MARRUECOS	109
FIGURA 4.30 MAPA EQUIPOTENCIAL DEL MES DE JUNIO DE LA LLANURA ALUVIAL EN LOS ALREDEDORES DE LA CIUDAD DE NEUQUÉN, ARGENTINA	109
FIGURA 4.31 MAPA DE ISOPIEZAS DEL SECTOR MINERO GUANACÓ, CHILE	110
FIGURA 4.32 MAPA DE CONTORNO DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA DEBIDO AL FLUJO DE AGUA EN ACUÍFERO COMBINACIÓN LIBRE – CONFINADO CIRCULAR.....	111
FIGURA 4.33 MAPA DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA MEDIDA EL 30 DE DICIEMBRE DE 1995 EN EL ACUÍFERO CONFINADO A2, SHANGHAI, CHINA	111
FIGURA 4.34 MAPA DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA MEDIDA EL 30 DE DICIEMBRE DE 1995 EN EL ACUÍFERO CONFINADO A4, SHANGHAI, CHINA	111
FIGURA 4.35 CONTORNO SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA FLUJO DE AGUA COMBINACIÓN DE UN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA CIRCULAR Y UN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA RECTANGULAR	112
FIGURA 4.36 PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO, SEPTIEMBRE 2002, ACUÍFERO MÉNDEZ-SAN FERNANDO, MÉXICO	112
FIGURA 4.37 CONTORNO DESCENSOS DE AGUA APROXIMADAMENTE 50 MM, 100 MM Y 150 MM EN ACUÍFERO LIBRE, OBTENIDOS A PARTIR DE LOS DATOS DE LA PRÁCTICA DE EXTRACCIÓN EN LABORATORIO	114
FIGURA 4.38 MAPA DE CONTORNO DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO SAN LEONARDO, OCTUBRE DEL 2005, SICILIA, ITALIA.....	114
FIGURA 4.39 EXTRACCIÓN DE AGUA EN EL ACUÍFERO DEL SISTEMA DE OASIS DE TAFILALET (TOS) EN 1984 REGISTRADO COMO UN AÑO SECO, MARRUECOS	115
FIGURA 4.40 CONTORNO SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE AGUA DE 50 MM Y 100 MM, COMBINACIÓN DE UN ACUÍFERO LIBRE Y UN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA CIRCULAR.	115
FIGURA 4.41 MAPA DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA MEDIDA EL 30 DE DICIEMBRE DE 1995 EN EL ACUÍFERO CONFINADO A2 , SHANGHAI, CHINA.....	116

FIGURA 4.42 MAPA DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA MEDIDA EL 30 DE DICIEMBRE DE 1995 EN EL ACUÍFERO CONFINADO A4 , SHANGHAI, CHINA.....	116
FIGURA 4.43 CONTORNOS DE LAS SUPERFICIES DEL NIVEL DE AGUA Y CONOS DE DESCENSO PARA LOS AÑOS DE 1988 A 2002, EN DHAKA, BANGLADESH	116
FIGURA 4.44 CONTORNO SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE AGUA COMBINACIÓN DE UN ACUÍFERO LIBRE Y UN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA RECTANGULAR OBTENIDOS POR TRIANGULACIÓN CON INTERPOLACIÓN BÁSICA. EXTRACCIÓN DE AGUA APROXIMADA DE 50 MM Y 100 MM.	117
FIGURA 4.45 CONTORNO DE LAS SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA DURANTE EL PRE-MONSOON, 2005, LOS HUMEDALES DEL ESTE DE KOLKATA, INDIA	117
FIGURA 4.46 RED DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO JALAPA, GUATEMALA	118
FIGURA 4.47 CONTORNO DESCENSO DE AGUA APROXIMADAMENTE 50 MM, 100 MM Y 150 MM EN CADA POZO DEL ACUÍFERO LIBRE, OBTENIDOS A PARTIR DE LOS DATOS DE LA PRÁCTICA DE INTERACCIÓN	119
FIGURA 4.48 EXTRACCIÓN DE AGUA EN EL ACUÍFERO DEL SISTEMA DE OASIS DE TAFILALET (TOS) EN 2001 REGISTRADO COMO UN AÑO HÚMEDO, MARRUECOS (BOUAAMLAT, ET AL., 2016).....	120
FIGURA 4.49 CARGA HIDRÁULICA EN EL ACUÍFERO COSTERO DE OROPESA DEL AÑO 1990, CASTELLÓN, ESPAÑA. (GIMÉNEZ & MORELL, 1997).....	120
FIGURA 4.50 MAPA DE ISOVARIACIÓN DE LA LLANURA ALUVIAL EN LOS ALREDORES DE LA CIUDAD DE NEUQUÉN, ARGENTINA A) PERIODO MAYO JUNIO, B) PERIODO JUNIO-.JULIO (DELUCHI, ET AL., 2013).....	120
FIGURA 4.51 CONTORNO SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA ENSAYO DE INTERACCIÓN DE CONOS DE DESCENSO COMBINACIÓN POZO DE LA IZQUIERDA EN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA CIRCULAR Y POZO DE LA DERECHA EN ACUÍFERO CONFINADO CON PLACA RECTANGULAR. EXTRACCIÓN DE AGUA APROXIMADA DE 50 MM Y 100 MM.	121
FIGURA 4.52 RED DE FLUJO, SEPTIEMBRE 2002, ACUÍFERO MÉNDEZ-SAN FERNANDO, MÉXICO	121

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1 GRUPOS DE FORMACIONES GEOLÓGICAS.	21
TABLA 2.2 VALORES TÍPICOS DE POROSIDAD EFICAZ Y COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTO.....	25
TABLA 3.1: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ARENA, P6531.....	61
TABLA 3.2: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ARENA, P6531	62
TABLA 3.3: GRANULOMETRÍA DE LA ARENA, P6531	62

NOMENCLATURA

- a : Aceleración, m/s^2
- g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)
- S : Almacenamiento en un acuífero confinado (*adimensional*)
- S_s : Almacenamiento específico ($1/m$)
- h_p : Altura de columna de agua, m
- $\frac{P}{\gamma_w}$: Altura de presión, m
- z : Altura geométrica que se mide desde un nivel de referencia, $z=0$, m
- A : Área de una sección transversal perpendicular a la dirección de la fuerza., m^2
- u : Argumento (-)
- $\frac{v^2}{2g}$: Carga de velocidad, m
- h : Carga hidráulica (m)
- h_1 : Carga hidráulica a la distancia r_1 (m)
- h_2 : Carga hidráulica a la distancia r_2 (m)
- h_1 : Carga hidráulica a longitud 0 (m)
- h_0 : Carga hidráulica inicial (m)
- h_2 : Carga hidráulica en la longitud L (m)
- $\frac{P}{\rho g}$: Carga de presión

- S : Coeficiente de almacenamiento (*adimensional*)
- K : Conductividad hidráulica (*m/día*)
- K_h : Conductividad hidráulica horizontal (*m/día*)
- K_r : Conductividad hidráulica radial
- K_v : Conductividad hidráulica vertical (*m/día*)
- β : Compresibilidad del agua a temperatura ambiental (N/m^2)
- α : Compresibilidad del esqueleto del acuífero (N/m^2)
- ρ : Densidad, kg/m^3
- ρ_w : Densidad del agua (kg/m^3)
- z : Distancia, m
- x : Distancia desde h_1 a h
- r : Distancia radial desde la sección circular al pozo (m)
- b : Espesor saturado inicial del acuífero (m)
- z : Elevación sobre la base del acuífero
- E_c : Energía cinética, $kg \cdot m^2/s^2$
- $\frac{1}{2} \rho v^2$: Energía cinética
- E_g : Energía potencial gravitacional, $kg \cdot m^2/s^2$
- ρgz : Energía potencial gravitacional
- E_{tv} : Energía total por unidad de volumen

q' :	Flujo por unidad de ancho ($m^2/día$)
F :	Fuerza, $kg \cdot m/s^2$
i :	Gradiente hidráulico, <i>adimensional</i>
$\frac{dh}{dr}$:	Gradiente hidráulico (<i>adimensional</i>)
L :	Longitud, m
m :	Masa, kg
$\frac{dh}{dt}$:	Pendiente de la superficie potenciométrica (<i>sin dimensiones</i>)
k :	Permeabilidad del medio
γ_w :	Peso específico del agua, kg
Δh :	Pérdida de carga, m
n :	Porosidad (m^3/m^3)
P :	Presión, Pa
Q :	Tasa de bombeo ($m^3/día$)
$h_o - h$:	Reducción de carga hidráulica (m)
S_y :	Rendimiento específico (<i>adimensional</i>)
t :	Tiempo desde que comenzó el bombeo ($día$)
W :	Trabajo, $kg \cdot m^2/s^2$
T :	Transmisividad ($m^2/día$)
v :	Velocidad, m/s

GLOSARIO

Acuífero: Unidad geológica saturada (roca o sedimentos), lo suficiente permeable para permitir la extracción de agua de forma económica.

Agua subterránea: Es el agua que ocupa los espacios porosos o fracturas de rocas en el subsuelo.

Agua superficial: Agua almacenada en estanques, lagos, ríos y arroyos.

Anisotropía: Característica de un medio en el que una o más de sus propiedades varían según la dirección en que se midan.

Basamento: Normalmente rocas ígneas o metamórficas deformadas, más antiguas, que rara vez desarrollan la porosidad y la permeabilidad necesarias para actuar como un yacimiento de hidrocarburos, y por debajo del cual las rocas sedimentarias no son comunes.

Capa freática (nivel freático): Nivel de agua de un acuífero libre.

Carga hidráulica estática: Altura de la superficie libre del agua sobre un nivel de referencia horizontal.

Clima: Conjunto variable de condiciones atmosféricas que se caracteriza por el estado y el desarrollo de las condiciones meteorológicas en una zona determinada.

Coefficiente de permeabilidad (conductividad hidráulica): Parámetro que expresa cuantitativamente la permeabilidad de un material frente a la circulación de un flujo de densidad y viscosidad determinadas. Puede definirse como el volumen de dicho fluido que atraviesa, por unidad de tiempo y bajo efecto del gradiente hidráulico unitario, una unidad de superficie perpendicular a la dirección del flujo, en condiciones tales que se aplique la ley de Darcy.

Cono de depresión (cono de bombeo): Alude a la forma que adopta el nivel piezométrico alrededor de una captación sometida a extracción, de modo que los descensos provocados por el bombeo son mayores cuanto menor es la distancia al pozo.

Contorno piezométrico (superficie piezométrica): Gráfica en planta de las líneas piezométricas de un acuífero confinado.

Cuenca hidrográfica: Consiste en toda el área de tierra inclinada hacia un punto de descarga particular.

Curva descenso-tiempo: Curva que se obtiene de la prueba de bombeo de un acuífero

Densidad: Masa de una sustancia por unidad de volumen.

Divisoria de aguas subterráneas: Línea de la superficie del nivel freático o de la superficie piezométrica a cada lado de la cual diverge el flujo de agua subterránea.

Drenaje (desagüe): Extracción de agua de una zona mediante métodos artificiales para rebajar el nivel de agua subterránea o superficial.

Ensayo de bombeo o prueba de acuífero: Prueba que consiste en bombear una captación durante un cierto período de tiempo y observar la variación que se produce en los niveles piezométricos del acuífero. Puede usarse tanto para conocer la capacidad o el rendimiento de una captación como para determinar las características hidráulicas del acuífero.

Estado permanente: Estado en el que no hay cambios en el tiempo de la altura del nivel del agua y donde esta no proviene del almacenamiento.

Flujo laminar: Flujo en un cauce abierto, una conducción o un medio poroso en el que predominan las fuerzas de viscosidad y las partículas del fluido se desplazan siguiendo trayectorias relativamente suaves y bien definidas sin que se produzca

mezcla transversal significativa ni que se supere el valor del umbral crítico del número de Reynolds para el flujo turbulento.

Gradiente hidráulico: Se define como la pérdida de carga por unidad de longitud.

Hidrogeología: Es la ciencia que estudia las aguas subterráneas, trata de su origen y formación, así como de su movimiento, características físicas, químicas y biológicas.

Homogeneidad: Característica de un medio poroso cuyas propiedades no varían en el espacio.

Incompresible: La incompresibilidad es una aproximación, se dice que el flujo es incompresible si la densidad permanece aproximadamente constante a lo largo de todo el flujo.

Interacción de conos: Influencia del bombeo en los conos de descenso para pozo cercanos.

Isotropía: Característica de un medio cuyas propiedades son las mismas en todas las direcciones.

Límite impermeable: Límite que crea refracción en el flujo de agua.

Línea de flujo: Línea a lo largo de la cual una partícula de agua se desplaza desde aguas arriba hacia aguas abajo en un suelo permeable.

Línea equipotencial: Línea a lo largo de la cual el potencial de carga en todos los puntos es igual.

Modelos: Un modelo en cualquier rama es la representación simplificada de la realidad, el cual nos facilita la comprensión del funcionamiento de los fenómenos físicos que se representan, por lo tanto, son cuantificables.

Medio poroso: Roca o suelo con poros interconectados que permiten el flujo de fluidos a través del medio.

Nivel estático: Elevación de la capa freática o de la superficie piezométrica cuando no está influenciada por bombeo u otras formas de extracción de agua subterránea.

Nivel piezométrico: Nivel determinado por las alturas de posición y de presión estática en un acuífero confinado.

Ortogonalidad: Generalización de la noción geométrica que se refiere a la perpendicularidad.

Parámetros hidrogeológicos: Características de los acuíferos que rigen su comportamiento frente a influencias externas.

Permeabilidad: Es una medida del grado en que los espacios porosos están interconectados.

Piezómetro: Instrumento que se utiliza para medir la presión de poros o nivel del agua.

Porosidad: Es el porcentaje en volumen de los poros o espacios que el medio tiene.

Pozo de observación: Pozos en donde se realiza mediciones de altura de agua en los ensayos de bombeo.

Pozo: Inicialmente se lo define como un mecanismo para extracción de agua con un diámetro superior a un metro y profundidades no excesivas, menores a doce metros. La excavación es de forma manual. Actualmente la excavación a mano es escasa y la maquinaria permite realizar sondeos con diámetros cada vez mayores, la tendencia es llamar pozo o captación hidrogeológica a aquellos sondeos que una vez acondicionados y equipados permiten la extracción de agua, y pozos abiertos a los pozos tradicionales.

Recarga artificial: Aumento de la recarga natural de los acuíferos por medios artificiales.

Recurso / reserva de agua subterránea: Volumen de agua almacenada en un acuífero disponible para su utilización.

Red de flujo: La combinación de un número de líneas de flujo y líneas equipotenciales.

Sondeo: Inicialmente el concepto era el de un mecanismo para la extracción de agua con diámetro estrecho y enormes profundidades, alcanzando los 500 m, por lo cual la perforación se la realiza con maquinaria. Actualmente debido a que todas las perforaciones se las realiza con maquinaria, el término de sondeo se utiliza exclusivamente para los sondeos de investigación hidrogeológica.

Superficie piezométrica: La superficie virtual formada por los puntos que alcanzaría el agua en infinitas perforaciones en el acuífero.

Unidades de confinamiento / unidad hidrogeológica: Sistema formado por uno o varios acuíferos interconectados, dentro de un contorno definido por una formación impermeable.

Viscosidad: Propiedad de un fluido para resistir el esfuerzo cortante producido por gradientes de velocidad que generalmente se expresa como un coeficiente.

Zona saturada: Parte de una formación acuífera en la que todos sus huecos están llenos de agua.

RESUMEN

Este trabajo parte de las prácticas de laboratorio de un acuífero de acuerdo a las instrucciones del manual del aparato de hidrología P6530, equipo del laboratorio docente de hidráulica. El trabajo de acuerdo a su objetivo, consistió en modificar las condiciones de bombeo y de frontera del instrumento para obtener mediciones del movimiento de agua e interpretar los resultados mediante redes de flujo y comparar con acuíferos reales. El manejo del equipo, cambio de condiciones y toma de medidas se los detalla en el capítulo de metodología. De la comparación de las redes de flujo que se obtienen a partir de las prácticas en laboratorio con las redes de flujo de los acuíferos recopilados en el estado del arte se demuestra que a través del modelo físico de un acuífero bajo las modificaciones de condiciones de bombeo y de frontera planteadas podemos representar adecuadamente fenómenos hidráulicos de la misma forma que ocurren en la naturaleza. La comparación se realiza entre redes de flujo con las mismas condiciones de confinamiento: acuífero libre, acuífero confinado. Adicionalmente como resultados se tienen la guía de práctica para que puedan ser reproducidas en el equipo, el cual es una valiosa herramienta para la formación académica y comprensión de los fenómenos hidráulicos subterráneos y superficiales.

PALABRAS CLAVES: aparato de hidrología, agua subterránea, acuífero.

ABSTRACT

This research is based on the laboratory practices of an aquifer according to the instructions of the manual of the hydrology device P6530, equipment of the teaching laboratory of hydraulics. The research, according to its objective, consisted of modifying the pumping conditions and limits of the instrument to obtain measurements of water movement and interpret the results through flow networks and compare them with real aquifers. The management of the equipment, the changing conditions and the taking of measures are detailed in the methodology chapter. Comparing the flow networks of the laboratory practices with the flow networks of the aquifers collected in the state of the art, it is demonstrated that through the physical model of an aquifer under the modifications of the pumping conditions and limits, we can represent adequately hydraulic phenomena in the same way that occurs in nature. The comparison is made between flow networks with the same confinement conditions: free aquifer, confined aquifer. In addition, the practice guide is presented as a product which is a valuable tool for academic training and understanding of surface and groundwater phenomena.

KEYWORDS: hydrology apparatus, groundwater, aquifer.

PRESENTACIÓN

El presente documento busca demostrar que mediante un modelo físico de un acuífero con modificaciones en las condiciones de bombeo y de frontera se puede representar adecuadamente dichos fenómenos de la misma forma que ocurren en la naturaleza. Para hacerlo se aborda los siguientes capítulos:

El CAPÍTULO I describe los fundamentos que posee el estudio y se separa en introducción, objetivos, hipótesis, alcance y justificación.

El CAPÍTULO II contiene la información bibliográfica recopilada de los conceptos que intervienen en el estudio y la información de los acuíferos para la comparación posterior a realizarse.

El CAPÍTULO III contiene la metodología donde se describe el equipo a utilizarse, el material granular, medidas de seguridad y operación del equipo.

En el CAPÍTULO IV presenta como resultado una guía de prácticas para el equipo. Además se incluye las redes de flujo para las condiciones detalladas en cada práctica y la posterior comparación con las redes de flujo de los acuíferos recopilados en el capítulo II.

Las conclusiones y recomendaciones a las que se llega del estudio se presentan en el CAPÍTULO V.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El 70 % del planeta Tierra es agua y de esta apenas el 2.5 % es agua dulce. Del total de agua dulce el 0.5 % se encuentra en depósitos subterráneos y tan solo un 0.01% en agua superficial. A nivel mundial se conoce la gran demanda que satisface el agua subterránea, ya sea como fuente de agua para consumo o para riego. La Organización de las Naciones Unidas (ONU), en su informe publicado en el año 2015 sostiene que en el mundo 2.500 millones de personas dependen exclusivamente de este recurso para satisfacer sus necesidades básicas de agua. Ante la creciente demanda del recurso la importancia de las aguas subterráneas aumenta, los conocimientos de esta se encuentran limitados con respecto a los del agua superficial; a pesar de que el recurso subterráneo supere en volumen a éste (Fundación AQUAE, 2016; Mazari, 2003; WWAP, 2015).

El estudio del agua subterránea es importante para evaluar la disponibilidad futura de agua. La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA), mediante su satélite Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) ha realizado avances para obtener información de los 37 acuíferos más grandes a nivel mundial (Richey et al., 2015).

Latinoamérica es una región con abundancia del recurso hídrico, pero con una cultura de uso ineficiente del agua en casi todos los ámbitos en los que se utiliza. Afortunadamente, esta situación ha cambiado en los últimos años, ya que varios países han eliminado algunas trabas que impiden lograr la seguridad hídrica y han impulsado incentivos a través de políticas públicas necesarias para el fomento del uso eficiente del recurso. Los problemas de sobreexplotación y contaminación de aguas subterráneas son temas nuevos en la región, pero están afectando a países como México, Brasil, Paraguay, Argentina o Perú, lo que reivindica la imperante

necesidad de consolidar una gestión sostenible de las aguas subterráneas en la región (Arroyo, 2017).

En Ecuador el aprovechamiento adecuado del agua subterránea es escaso y se tiene un déficit de información sobre usos reales y potenciales de este recurso, la importancia de crear una base de información ocasiona que en el año 2014 la Asamblea Nacional apruebe la Ley Orgánica de Recurso Hídricos, donde la Cuarta disposición transitoria promueve la creación de un inventario nacional de las aguas subterráneas por cuencas hidrográficas. El inventario permitirá conocer la disponibilidad del recurso a nivel nacional abriendo la posibilidad del aprovechamiento bajo el marco de gestión de agua subterránea. Para lograr una gestión integral del recurso es importante que los profesionales tengan una herramienta que permita comprender los fenómenos hidráulicos e hidrológicos que ocurren en un acuífero.

El aparato de hidrología P6530 es la herramienta que nos permite reproducir y comprender fenómenos importantes en laboratorio para la comprensión del comportamiento de un acuífero. En el presente trabajo se busca validar el tipo de fenómenos que permite reproducir el equipo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Reproducir las prácticas de laboratorio para un acuífero de acuerdo a las indicaciones del manual del aparato de hidrología P6530, modificando las condiciones de bombeo y de frontera para obtener mediciones del fenómeno e interpretar los resultados mediante redes de flujo y comparar con acuíferos reales.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reproducir las prácticas de laboratorio de un acuífero de acuerdo a las instrucciones dadas en el manual del aparato de hidrología P6530 del laboratorio docente de hidráulica.

- Realizar gráficas de las líneas de flujo de cada fenómeno utilizando el software SURFER® a partir de los datos obtenidos en los diferentes estados o condiciones propuestas.
- Interpretar el fenómeno hidrológico e hidráulico de un acuífero modificando las condiciones de bombeo y condiciones de frontera, adecuando los accesorios del aparato de hidrología para diferentes estados y compararlo con acuífero reales.

1.3. HIPÓTESIS

- A través del modelo físico de un acuífero bajo las modificaciones de condiciones de bombeo y de frontera podemos representar adecuadamente el fenómeno y comprender mejor lo que pasa en la naturaleza.

1.4. ALCANCE

El presente trabajo pretende reproducir diversas condiciones dentro de un acuífero en el equipo de hidrología P6530 del laboratorio docente de hidráulica, dentro de las condiciones se varía y combina las condiciones de bombeo, frontera y de confinamiento. De las cargas hidráulicas en los manómetros obtenidas en cada ensayo se obtienen las superficies piezométricas en el software SURFER 13.

Al comparar según el tipo de acuífero la forma de las redes de flujo obtenidos con las redes de flujo de acuíferos reales recopilados en el estado del arte del presente trabajo se valida que el equipo permite reproducir las condiciones que se han simulado en laboratorio y que se dan en la naturaleza. De los ensayos se elabora un manual de prácticas para tener una herramienta que facilite la comprensión de los fenómenos hidrológicos e hidráulicos que ocurren en la naturaleza para que los estudiantes puedan reproducir las mismas y refuercen el aprendizaje.

1.5. JUSTIFICACIÓN

1.5.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Rocha (2003) menciona que hacer ciencia es construir modelos. Históricamente la construcción de modelos ha permitido el progreso del conocimiento de los

fenómenos representados. Un modelo en cualquier rama es la representación simplificada de la realidad, el cual nos facilita la comprensión del funcionamiento de los fenómenos físicos que se representan, por lo tanto, son cuantificables. En las ciencias hidráulicas se emplean diferentes tipos de modelos, los principales modelos empleados en hidrogeología son los físicos, análogos, determinísticos y matemáticos. La selección del modelo depende del estudio que se pretenda realizar, del fenómeno a representar y en gran medida de los recursos que se dispongan (Calvo et al., 2007; Cruces y Martínez, 2006; Galindo, 1999; Rocha, 2003).

Existen modelos de agua subterránea y herramientas predictivas para comprender el comportamiento de un acuífero. Comprender los sistemas de agua subterránea es crucial para garantizar su adecuado manejo y protección global. La escases de datos sobre aguas subterráneas recopilados por los países en vías de desarrollo, dificultan este trabajo, a pesar de ello se pueden utilizar modelos. Para esto se debe conocer cómo se modelan estos sistemas y hacerlos utilizables para la gestión de las aguas subterráneas. Para estudiantes que inician con el estudio de la hidráulica subterránea los ejercicios suelen estar desconectados de los sistemas que ellos entienden, limitando el aprendizaje y dificultando extrapolar lo aprendido a situaciones reales. Para mejorar esto, se han realizado varios modelos experimentales que permiten ampliar y perfeccionar el entendimiento de procesos hidrogeológicos. Estos modelos van desde la utilización de una caja de vidrio o una pecera con materiales granulares accesibles, hasta los ensayos en campo realizados en acuíferos dependiendo del grado de formación de los practicantes y la complejidad de los procesos que se pretenden analizar (Calvo et al., 2007; Loheide II y Shingai 2011; Lopez-Maldonado et al., 2017).

El método de enseñanza-aprendizaje de aguas subterráneas a través de diferentes tipos de modelos y en diferentes niveles educativos no es una metodología nueva, pero es efectiva. De la experimentación combinada y los ejercicios numéricos, los estudiantes conectarán los procesos que ven en el laboratorio con los resultados de los modelos numéricos dado que adquieren una mejor comprensión de la magnitud e importancia de propiedades y parámetros que controlan el flujo, además

asimilan mejor las simplificaciones que deben ser realizadas en modelos numéricos de sistemas físicos (Calvo et al., 2007; Hakoun et al., 2013).

1.5.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

Un acuífero es un medio poroso y permeable que permite la retención de agua, según la estructura geológica de los materiales que lo forman, las condiciones hidráulicas del agua contenida y las condiciones de presión que se generan el acuífero puede ser libre, confinado o semiconfinado. Si la cantidad de agua subterránea retenida tiene un volumen considerable, se puede aprovechar el recurso mediante la extracción. Para comprender la dinámica de un acuífero existen diversos mecanismos como los modelos físicos que son una reproducción a escala de la realidad, obedeciendo reglas de similitud y de la disponibilidad de recursos como el espacio.

Existen modelos físicos experimentales para representar los fenómenos hidrogeológicos ocupando un espacio determinado, un ejemplo de estos es el aparato de hidrología P6530 de la marca CUSSON. Este módulo permite reproducir un acuífero con un medio granular y varios accesorios se representarán diversas condiciones de frontera y de flujo para el acuífero. Las características del medio granular son especificadas por el proveedor del equipo. Para realizar las mediciones y obtener información base para el estudio recurrimos a los manómetros multitubos (CUSSON, 2014; Fernández et al., 1997; Vergara, 1993).

De los ensayos realizados en el laboratorio y las respectivas mediciones en los manómetros que dispone el equipo, se elaboran gráficas de las líneas de flujo, gráficas del nivel freático y superficie piezométrica. El software que se empleará para la visualización gráfica es SURFER®. Este es un programa de mapeo basado en cuadrículas que interpola datos. La cuadrícula se usa para producir diferentes tipos de mapas, incluidos mapas de contorno, vectores, imágenes, relieves sombreados, cuencas hidrográficas y superficies 3D. La variedad de métodos disponibles en el software, proporciona diferentes interpretaciones de los datos, y permite elegir el más apropiado para las necesidades del estudio (Golden Software, 2015).

1.5.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

El aparato de hidrología P6530 permite el estudio de los principios hidrogeológicos de una cuenca hidrográfica, entre los estudios que permite reproducir están el de permeabilidad, mecánica fluvial, extracción de agua e hidrogramas de tormenta. Éste es una valiosa herramienta que complementa el aprendizaje en las materias de: Hidrología Básica y Aplicada, Hidráulica Básica, Hidráulica Fluvial, Hidráulica subterránea y materias afines que requieran de prácticas para demostración y reforzamiento de las clases teóricas (CUSSON, 2014).

La Escuela Politécnica Nacional es la primera universidad del país en adquirir este equipo. La EPN ha apostado una fuerte inversión en la implementación de equipos en el Laboratorio Docente de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental para consolidar la formación investigativa de estudiantes y docentes (Haro, 2015).

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. INTRODUCCIÓN

El 70 % del planeta Tierra es agua, y como se muestra en la Figura 2.1, de esta apenas el 2.5 % es agua dulce. De este porcentaje el 30.1 % es agua subterránea, y el 1.2 % es agua dulce superficial que se encuentra distribuida principalmente entre hielo en el subsuelo y permafrost el 69 % y en lagos el 20.9 % (Shiklomanov, 1993).

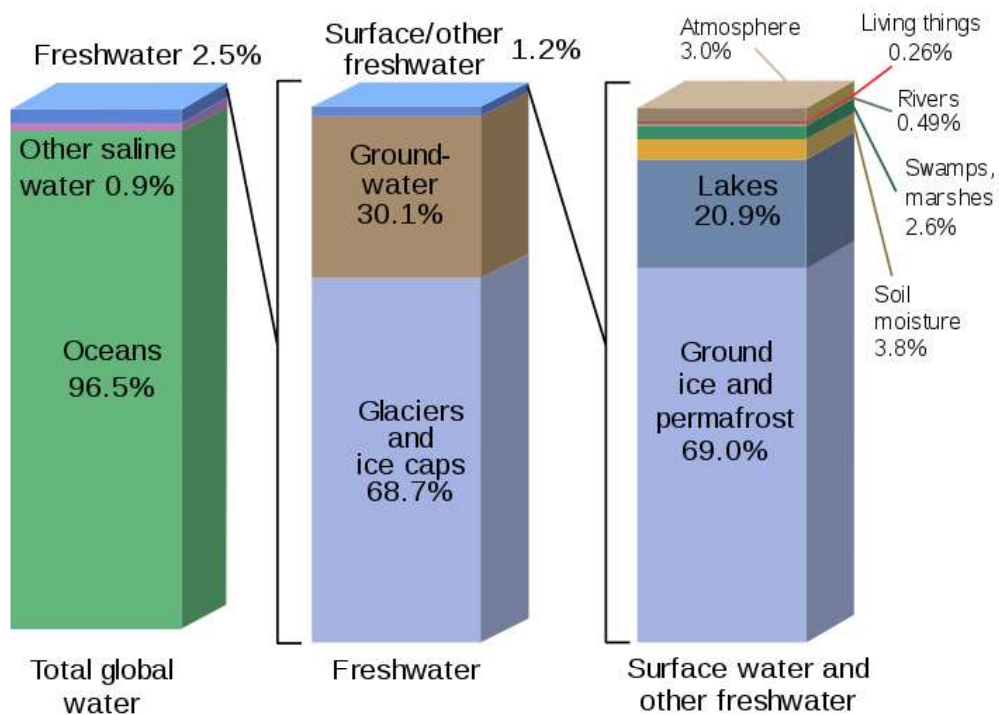


Figura 2.1. Distribución global del agua (Shiklomanov, 1993)

2.1.2. CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico es el proceso permanente de transformación y circulación del agua. Al encontrarse la mayor parte de agua en los océanos, empezamos por ahí para describir el ciclo hidrológico de la Figura 2.2. En la superficie de los océanos el líquido se evapora. La cantidad de agua evaporada varía, incrementándose cuando el océano se acerca a la línea ecuatorial, donde la radiación solar es más intensa. Al evaporarse el agua va a la atmósfera, dejando la sal del mar atrás, quedando agua pura. El vapor de agua se mueve a través de la atmósfera como parte integral del fenómeno que denominamos “clima”. Cuando las condiciones atmosféricas son adecuadas, el vapor de agua se condensa y forma gotitas. Estas gotitas pueden caer al mar, a la tierra o pueden vaporizarse mientras están en el aire (Fetter, 2001).

La precipitación que cae sobre la superficie de la tierra ingresa a varias rutas del ciclo hidrológico. Parte del agua puede almacenarse temporalmente en la superficie del suelo en forma de hielo, nieve o en charcos, lo que se conoce como almacenamientos superficiales y ocurren en irregularidades en la geografía. Parte de la lluvia o la nieve derretida drenarán a través del suelo hacia un cauce. Esto se denomina flujo por escorrentía. Si la superficie del suelo es porosa, el agua se filtrará al interior en el proceso llamado infiltración (Fetter, 2001).

Debajo de la superficie de la tierra, los poros del suelo contienen aire y agua, a esta región se conoce como zona vadosa o zona de aireación. El agua almacenada en la zona vadosa se llama agua vadosa, esta agua contiene partículas de lodo, arcilla y limo. En la parte superior de la zona vadosa se encuentra la franja de agua del suelo, zona donde pueden alcanzar las raíces de las plantas y aprovechar el agua para su desarrollo. A medida que la planta usa el agua, se transpira como vapor a la atmósfera. En algunas condiciones, el agua puede fluir lateralmente en la zona vadosa, en un proceso conocido como interflujo. El vapor de agua en la zona vadosa también puede migrar de regreso a la superficie terrestre para evaporarse. El exceso de agua vadosa se mueve hacia abajo por la gravedad en un proceso conocido como drenaje por gravedad. Pasa a través de la zona intermedia a la franja capilar. En la franja capilar los poros se llenan con agua capilar para que la

saturación se aproxime al 100%; sin embargo, el agua se mantiene en su lugar por fuerzas capilares (Dávila, 2011; Fetter, 2001).

Una vez que el agua ha pasado la franja capilar, a cierta profundidad, los poros del suelo o la roca están saturados de agua. La parte superior de la zona de saturación se llama nivel freático. El agua subterránea fluye a través de las capas de roca y suelo hasta que se descarga como manantial o como infiltración en un estanque, lago, arroyo, río u océano. El agua que fluye en una corriente puede provenir del flujo superficial o del agua subterránea que se ha filtrado en el lecho del río. La contribución de agua subterránea a una corriente se denomina caudal base, mientras que el flujo total en una corriente es de escorrentía. El agua almacenada en estanques, lagos, ríos y arroyos se denomina agua superficial (Fetter, 2001).

El fenómeno de la evaporación no se restringe a cuerpos de agua superficiales o abiertos, como el océano, lagos, arroyos y embalses. Afecta también a la precipitación interceptada por las hojas y otras superficies vegetativas, al igual que el agua detenida en las depresiones de la superficie terrestre o la humedad del suelo en las capas superiores del suelo. La evaporación directa del agua subterránea puede tener lugar cuando la zona saturada está en la superficie terrestre o cerca de esta. La transpiración por las plantas y la evaporación de la superficie terrestre se agrupan como evapotranspiración. La Figura 2.2 muestra la interacción de estos fenómenos en el ciclo hidrológico (Fetter, 2001).

Puede ocurrir que aguas más profundas como el agua magmática que está contenida en magmas profundos de la corteza se agregue al ciclo hidrológico, cuando el magma alcanza la superficie del suelo marino. Para diferenciar, el vapor que se ve en algunas erupciones volcánicas es agua subterránea que entra en contacto con el magma en aumento y no proviene del agua magmática. Así mismo como el agua magmática puede aportar eventualmente al ciclo, parte del agua en los sedimentos oceánicos se subduce con estos elementos y se retira del ciclo hidrológico. (Fetter, 2001).

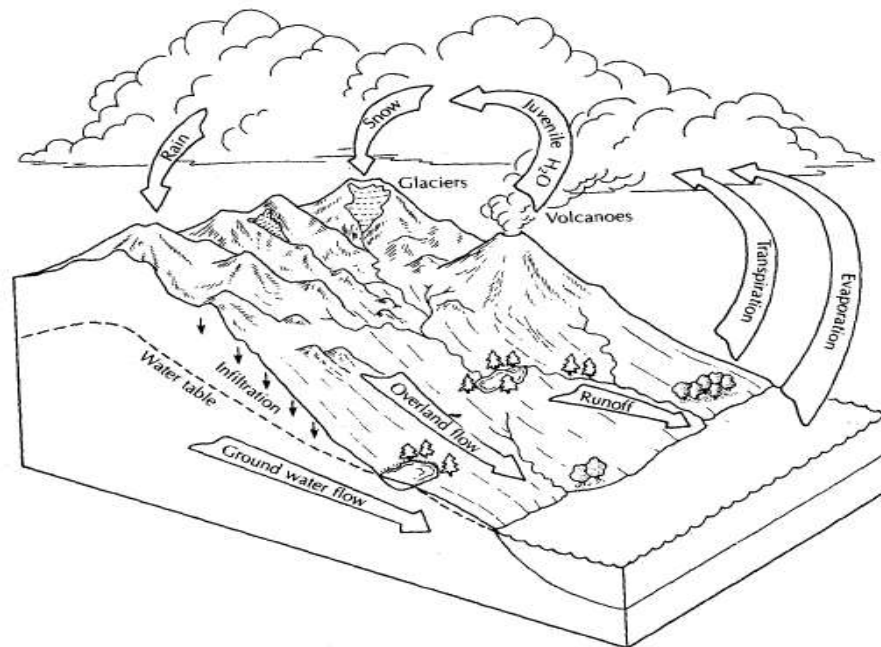


Figura 2.2. Ciclo hidrológico
(Fetter, 2001)

2.1.1.1. Ecuación hidrológica

La ecuación hidrológica proporciona un medio cuantitativo para evaluar el ciclo hidrológico. Esta ecuación fundamental es un simple enunciado de la ley de conservación masiva y se expresa en la ecuación (2.1) (Fetter, 2001).

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \text{cambios en los almacenamientos} \quad (2.1)$$

Si consideramos cualquier sistema hidrológico, por ejemplo: un lago que tiene un cierto volumen de agua en un momento dado. Varios flujos de entrada se suman a este volumen de agua como la precipitación que cae sobre la superficie del lago, las corrientes que fluyen hacia el lago, el agua subterránea que se filtra en el lago y también el flujo por tierra desde las superficies cercanas que se conoce como flujo subsuperficial. Y las salidas de agua son por la evaporación, la transpiración por la vegetación acuática emergente, las corrientes de salida y la filtración de aguas subterráneas desde el fondo del lago hacia las capas del suelo más profundas. Si, en un período de tiempo dado, las entradas totales son mayores que el total de flujos de salida, el nivel del lago aumentará a medida que se acumule

más agua. Al contrario, si las salidas superan las entradas durante un período de tiempo, el volumen de agua en el lago disminuirá. Cualquier diferencia entre las tasas de entrada y salida en un sistema hidrológico dará como resultado un cambio en el volumen de agua almacenada en el sistema. La ecuación hidrológica se puede aplicar a sistemas de cualquier tamaño, sea un pequeño depósito o un continente. La ecuación depende de la escala de tiempo, por lo cual los elementos de entrada deben medirse durante los mismos períodos de tiempo que los flujos de salida (Fetter, 2001).

La unidad básica en hidrología de aguas superficiales, donde se aplica esta ecuación es la cuenca de drenaje, o cuenca de captación que consiste en toda el área de tierra inclinada hacia un punto de descarga particular. La que está delineado por los límites de las aguas superficiales, divisiones topográficas o parteaguas. En la hidrología de aguas subterráneas, utilizamos el concepto de cuenca de agua subterránea o cuenca hidrogeológica, que es el volumen subsuperficial a través del cual fluye el agua subterránea hacia una zona de descarga específica. Los límites de una cuenca hidrográfica superficial y la cuenca subterránea subyacente no necesariamente coinciden (Fetter, 2001).

2.1.2. ECUACIONES FUNDAMENTALES

Para comprender los conceptos fundamentales hay que realizar un análisis de energía mecánica y a partir de este surgen las ecuaciones que se emplean en el estudio del agua subterránea (González, et al., 2004; Fetter, 2001).

2.1.2.1. Energía mecánica

Hay diferentes tipos de energía mecánica reconocidos en la física clásica. De estos, consideraremos la energía cinética, la energía potencial gravitacional y la energía de las presiones de fluidos. Según la física newtoniana un cuerpo o fluido en movimiento tiende a permanecer en movimiento, porque posee energía cinética (Fetter, 2001).

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.2)$$

Donde:

E_c : Energía cinética, $kg \cdot m^2/s^2$

v : Velocidad, m/s

m : Masa, kg

El concepto de energía potencial gravitacional parte del concepto del trabajo que se necesita realizar para que una masa de agua m se mueva verticalmente hacia arriba una distancia z desde alguna superficie de referencia (Fetter, 2001).

$$W = F \cdot z \quad (2.3)$$

Donde:

W : Trabajo, $kg \cdot m^2/s^2$

F : Fuerza, $kg \cdot m/s^2$

z : Distancia, m

Newton (1687), en la publicación "Principios Matemáticos de la Filosofía Natural", enuncia que el cambio de movimiento es directamente proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre en línea recta a lo largo de la fuerza que se imprime (Fetter, 2001).

$$F = m \cdot a \quad (2.4)$$

Donde:

F : Fuerza, $kg \cdot m/s^2$

m : Masa, kg

a : Aceleración, m/s^2

La masa de agua ahora ha adquirido energía igual al trabajo realizado para levantarla, reemplazando la ecuación (2.4) en ecuación (2.3). Esta es una energía potencial, debido a la posición de la masa de fluido con respecto al nivel de referencia (Fetter, 2001).

$$W = E_g = mgz \quad (2.5)$$

Donde:

W : Trabajo, $kg \cdot m^2/s^2$

E_g : Energía potencial gravitacional, $kg \cdot m^2/s^2$

m : Masa, kg

g : Aceleración de la gravedad, m/s^2

z : Distancia, m

Otra fuente de energía para la masa de fluido se debe a la presión del fluido que actúa sobre la misma. La presión es la fuerza por unidad de área que actúa sobre un cuerpo (Fetter, 2001).

$$P = F/A \quad (2.6)$$

Donde:

P : Presión, Pa

F : Fuerza, $kg \cdot m/s^2$

A : Área de una sección transversal perpendicular a la dirección de la fuerza, m^2

La densidad se define como masa por unidad de volumen. Para una unidad de volumen de fluido, la energía total de la unidad de volumen de fluido es la suma de tres componentes: energía cinética, energía gravitacional y la presión ejercida sobre el fluido para una unidad de volumen de flujo (Fetter, 2001).

$$E_{tv} = \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z + P = h \quad (2.7)$$

Donde:

E_{tv} : Energía total por unidad de volumen

$\frac{1}{2}\rho v^2$: Energía cinética

$\rho g z$: Energía potencial gravitacional

P : Presión ejercida sobre el fluido

h : Carga hidráulica



Figura 2.3 Energía total en un flujo de agua
(González, et al., 2004)

2.1.2.2. Teorema de Bernoulli

El teorema de Bernoulli, ecuación (2.8), expresado en términos de energía, dice que la carga hidráulica total se mantiene constante, es decir, entre dos puntos del fluido en movimiento se conserva la energía total, lo único que ocurre es que partes

de la energía se transfieren de un término a otro. Esto considerando el caso ideal para un flujo perfecto e incomprensible en estado permanente y estacionario como el de la Figura 2.4 (González et al., 2004).

$$\Delta H = \Delta z + \Delta \frac{P}{\gamma_w} + \Delta \frac{v^2}{2g} \quad (2.8)$$

Donde:

Δ : Operador para denotar diferencia entre términos: $\Delta H = H_2 - H_1$

z : Energía potencial gravitacional, se mide desde el nivel de referencia $z=0$, m

$\frac{P}{\gamma_w}$: Energía de presión, m

P : Presión de agua en el punto considerado, Pa

γ_w : Peso específico del agua, kg

$\frac{v^2}{2g}$: Energía cinética, m

v : Velocidad de flujo en el punto considerado, m/s

g : Aceleración de la gravedad, m/s^2

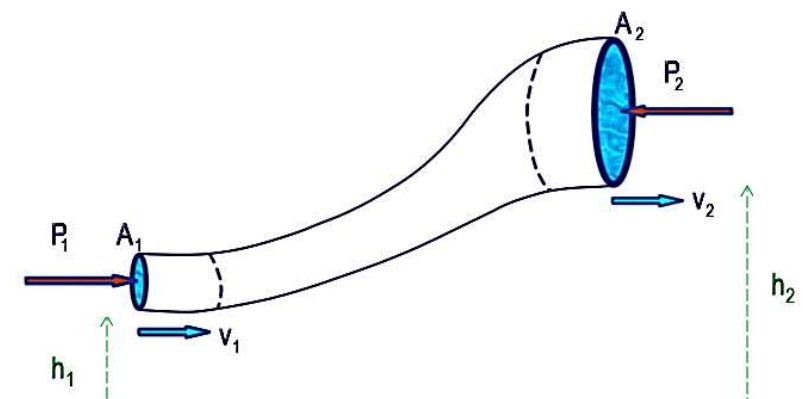


Figura 2.4. Teorema de Bernoulli
(González, et al., 2004)

En los fluidos reales cualquier obstáculo produce una pérdida de energía, la pérdida de energía en una unidad de longitud L , se lo define como gradiente hidráulico. A continuación, se aborda este concepto partiendo de la energía mecánica (González et al., 2004).

2.1.2.3. Gradiente hidráulico

El gradiente es la pérdida de energía en una unidad de longitud: Al aplicar la ecuación de energía al flujo de agua subterránea, donde la velocidad de flujo es muy baja debido a que atraviesa un medio con permeabilidad baja, el término de energía cinética es despreciable, como se observa en la Figura 2.1. Dejando los términos de energía potencial gravitacional y la energía o carga por presión. Para deducir la ecuación de energía por unidad de masa, ecuación (2.9), se parte de la ecuación de energía por unidad de volumen expresada en la ecuación (2.7), dividido para la densidad ρ y la gravedad g (Fetter, 2001):

$$h = z + \frac{P}{\rho g} \quad (2.9)$$

Donde:

h : Carga hidráulica

z : Energía potencial gravitacional

$\frac{P}{\rho g}$: Carga de presión

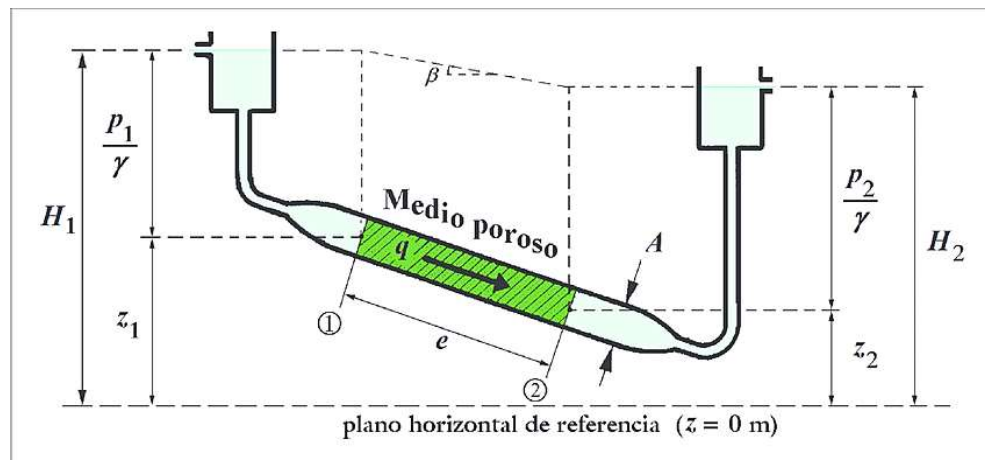


Figura 2.5. Energía que intervienen en un medio poroso
(González, et al., 2004)

La presión ejercida es la presión hidrostática, expresada en la ecuación (2.10) (Fetter, 2001).

$$P = \rho g h_p \quad (2.10)$$

Donde:

P : Presión ejercida sobre el fluido (hidrostática), N/m^2

ρ : Densidad, kg/m^3

g : Aceleración de la gravedad, m/s^2

h_p : Altura de columna de agua, m

Sustituyendo la ecuación (2.10) en la ecuación (2.9), se tiene:

$$h = z + h_p \quad (2.11)$$

Donde:

h : Carga hidráulica

z : Altura geométrica que se mide desde un nivel de referencia, $z=0$

h_p : Altura de columna de agua, m

En la naturaleza el agua circula desde un punto de mayor altura piezométrica (H_1) a un punto de menor altura piezométrica (H_2). Si se considera que la pérdida de altura se produce en una longitud e , la cual es la distancia recta entre ambos puntos, se define el gradiente hidráulico como la pérdida de carga por unidad de longitud (González, et al., 2004).

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2.12)$$

Donde:

i : Gradiente hidráulico, *adimensional*

Δh : Pérdida de carga, m

L : Longitud, m

Este concepto es muy utilizado para flujos en estado laminar, caracterizados por la ley de Darcy.

2.1.2.4. Ecuación de Darcy

Supone que la velocidad de flujo es proporcional al gradiente hidráulico en un flujo en estado laminar, está ecuación la planteo Darcy a partir de los experimentos que realizo con permeámetros como el de la Figura 2.5 (González et al., 2004; Fetter, 2001).

$$v = k i \quad (2.13)$$

Donde:

v : Velocidad aparente del agua a lo largo de las líneas de flujo teóricas

k : Conductividad hidráulica

i : Gradiente hidráulico

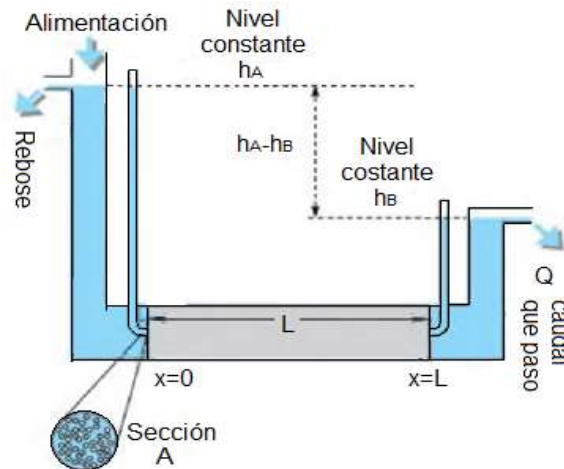


Figura 2.6 Permeámetro de Darcy

(González, et al., 2004)

La ecuación (2.13) se puede aplicar en las tres direcciones x , y y z .

2.1.1.1. Ecuación de continuidad para flujo estacionario

Al derivar la velocidad de cada eje se puede establecer de forma matemática la ecuación de continuidad (conservación de la masa), la cual versa que para un régimen de flujo estacionario el agua que ingresa en una unidad del suelo por unidad de tiempo es igual a la cantidad de agua que sale, es decir no existen fugas o aportes adicionales. Si además consideramos que el volumen elemental escogido no cambia y tampoco la presión, como se observa en la Figura 2.7 tenemos la ecuación (2.14) (González, et al., 2004; Sotelo, 1997)

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.14)$$

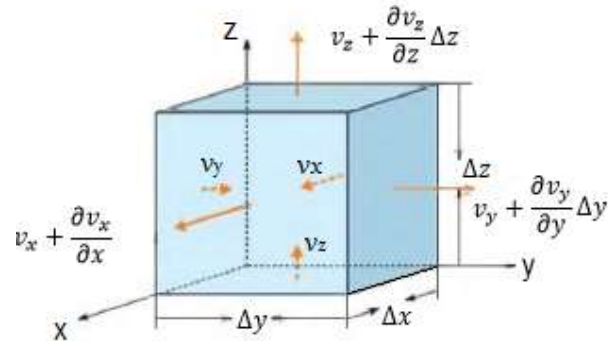


Figura 2.7 Balance de agua en una unidad de suelo

(González, et al., 2004)

Al reemplaza en la ecuación de continuidad la ley de Darcy aplicada a los tres ejes y considerar que el agua es incomprensible, el suelo tiene densidad constante y se encuentra saturado, además de que es un medio isotrópico, es decir, el coeficiente de permeabilidad en las tres direcciones es el mismo. Se establece así la ecuación tridimensional de Laplace (Fetter, 2001; González, et al., 2004).

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = 0 \quad (2.15)$$

La ecuación de Laplace en dos dimensiones para un medio isotrópico representa dos familias de curvas ortogonales: las líneas de flujo y las líneas equipotenciales. Las dos familias de líneas para representar una solución de la ecuación de Laplace deben cumplir con las condiciones de ortogonalidad y las condiciones de frontera de la región de flujo (Das, 2015; Fetter, 2001; Juarez y Rico, 1994).

Estos principios nos permiten caracterizar a los acuíferos y comprender su comportamiento, para esto es primero se define a un acuífero.

2.1.3. ACUÍFEROS

Los acuíferos son unidades, formaciones o grupos geológicos subterráneos saturados lo suficientemente permeables para almacenar y transmitir agua. En la

naturaleza existe una amplia gama de formaciones con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir el agua, estas formaciones suelen dividirse en cuatro grupos principales, con capacidad de almacenar, drenar, transmitir y con formaciones características que se muestran en la Tabla 2.1 (González et al., 2002).

	Capacidad de almacenar	Capacidad de drenar	Capacidad de transmitir	Formaciones características
ACUÍFEROS	ALTA	ALTA	ALTA	Gravas, arenas, calizas
ACUITARDOS	ALTA	MEDIA/BAJA	BAJA	Limos, arenas limosas y arcillosas
ACUICLUDOS	ALTA	MUY BAJA	NULA	Arcillas
ACUIFUGOS	NULA	NULA	NULA	Granitos, gneises, mármoles

Tabla 2.1 Grupos de formaciones geológicas.

(González et al., 2004)

Los acuíferos según las condiciones de presión pueden clasificarse como acuíferos libres, acuíferos confinados y acuíferos semiconfinados (González et al., 2002).

Acuíferos libres: Su límite superior es la superficie freática, donde la presión del agua es igual a la atmosférica (Figura 2.8). Liberan el agua por desaturción, es decir el agua que ceden es el agua que tienen almacenada el acuífero en los poros o fisuras. Los conos de bombeo presentan elevados descensos de nivel en el pozo y corto radio de influencia (González et al., 2004).

Acuíferos confinados o cautivos: Estos acuíferos están sobreyacidos y subyacidos por estratos de materiales impermeables, como en la Figura 2.8. En la naturaleza no existen acuíferos completamente confinados, dado que no existen materiales absolutamente impermeables. El nivel de agua está por encima del

techo del material del acuífero. Son acuíferos con rápida influencia de un bombeo puntual. Los conos de bombeo comparados con los de los acuíferos libres suelen ser de menor altura y con radios de influencia más largos (González et al., 2004).



Figura 2.8 Acuífero libre y acuífero confinado con sus respectivas zonas de recarga

(López et al., 2009)

Acuíferos semiconfinados: Este acuífero se encuentra cubierto por una capa superior semiconfinante o formaciones semipermeables que permiten el paso del agua de los acuíferos superiores al acuífero semiconfinado, como se muestra en la Figura 2.9. La velocidad de reacción de estos acuíferos ante un bombeo es moderada en relación a la velocidad de reacción de los acuíferos confinados. Los radios de influencia tienen valores medios entre los acuíferos libres y confinados. En realidad, un acuífero semiconfinado es un sistema físico integrado por un acuífero superior bien alimentado, un paquete semipermeable y un acuífero inferior semiconfinado; la diferencia de niveles entre el acuífero superior e inferior acarrea una transferencia de agua vertical que alimenta el acuífero inferior (González et al., 2004).

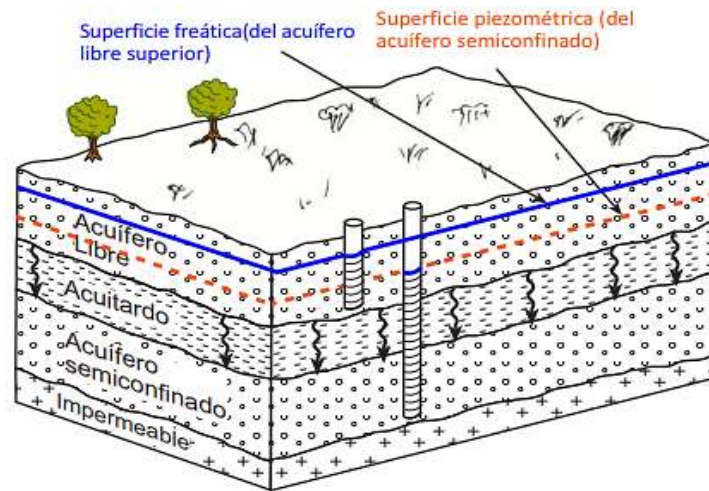


Figura 2.9 Acuífero libre y semiconfinado
(Sánchez, 2017)

Cada acuífero presenta parámetros que los caracterizan.

2.1.4. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

La capacidad de almacenar y transmitir agua, debe ser cuantificada y para ello se asocian a los parámetros hidrogeológicos de porosidad efectiva, coeficiente de almacenamiento, permeabilidad y transmisividad (González et al., 2004).

2.1.4.1. Porosidad efectiva y coeficiente de almacenamiento

Si consideramos un volumen de un metro cúbico, extraído en una superficie de un metro cuadrado y que produce el descenso de un metro en la superficie piezométrica, como en la Figura 2.10. Para el caso del acuífero libre el parámetro que indica el volumen de agua liberada es la porosidad efectiva, ecuación (2.16), y para acuíferos confinados el coeficiente de almacenamiento (Sánchez, 2017).

$$m_e = \frac{\text{Volumen de poros conectados}}{\text{Volumen total}} \quad (2.16)$$

Donde:

m_e : Porosidad efectiva

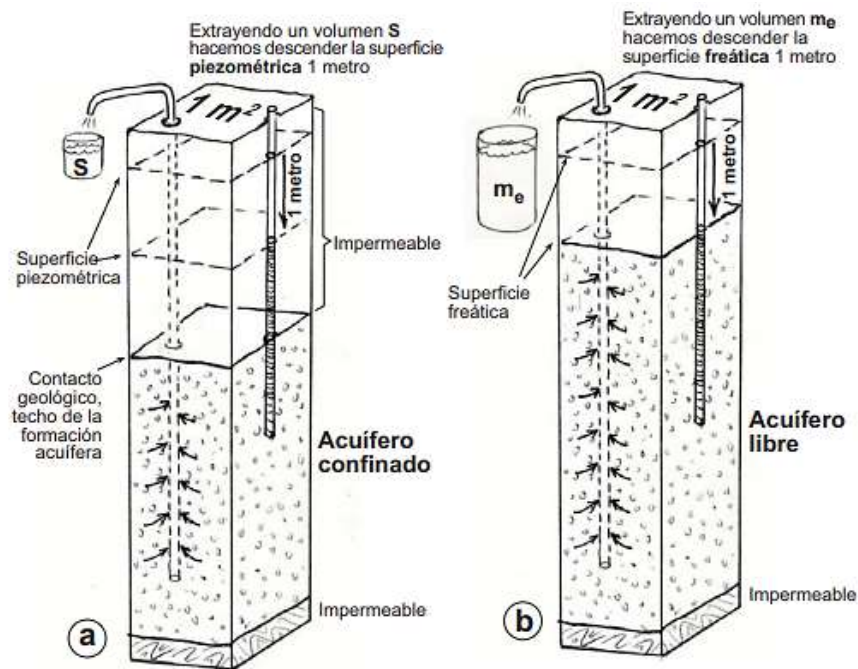


Figura 2.10 Extracción de un metro cúbico de un acuífero (a) confinado, (b) libre.

(Sánchez, 2017)

El coeficiente de almacenamiento (S) se define como el volumen de agua que un medio permeable absorbe o expulsa del almacenamiento, por unidad de área de superficie y por unidad de cambio en la carga. El almacenamiento de un acuífero confinado se expresa en la ecuación (2.17) (Fetter, 2001).

$$S = bS_s \quad (2.17)$$

Donde:

S : Almacenamiento en un acuífero confinado (*adimensional*)

b : Espesor del acuífero (m)

S_s : Almacenamiento específico ($1/m$)

Si en la zona saturada, la carga crea presiones que afectan la disposición de los granos del suelo y la densidad del agua en los vacíos, se define al almacenamiento

específico (S_s) como la cantidad de agua por unidad de volumen de una formación saturada que se almacena o expulsa del almacenamiento debido a la compresibilidad del esqueleto del suelo y el agua de poro por unidad de cambio en la carga. El concepto se puede aplicar tanto a acuíferos como a unidades de confinamiento. El almacenamiento específico o coeficiente de almacenamiento elástico está dado por la ecuación (2.18) (Fetter, 2001).

$$S_s = \rho_w g (\alpha + n\beta) \quad (2.18)$$

Donde:

S_s : Almacenamiento específico (1/m)

ρ_w : Densidad del agua (kg/m^3)

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

α : Compresibilidad del esqueleto del acuífero (N/m^2)

n : Porosidad (m^3/m^3)

β : Compresibilidad del agua a temperatura ambiental (N/m^2)

Tanto el coeficiente de almacenamiento y la porosidad eficaz son adimensionales, y presentan los valores típicos mostrados en la tabla

Acuíferos libres (porosidad eficaz): 0.3 a 0.01	El agua proviene del vaciado de los poros
Acuíferos semiconfinados (coeficiente de almacenamiento): 10^{-3} a 10^{-4}	El agua proviene de la descompresión y de los rezumenes(exudación) desde las capas confinantes
Acuíferos confinados (coeficiente de almacenamiento): 10^{-4} a 10^{-5}	El agua proviene de la descompresión

Tabla 2.2 Valores típicos de porosidad eficaz y coeficientes de almacenamiento

(Sánchez, 2017)

2.1.4.2. Permeabilidad y transmisividad

La permeabilidad o conductividad hidráulica. K es el parámetro definido para evaluar la capacidad de transmitir agua en los acuíferos, como se muestra en la Figura 2.11 y es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico, ecuación (2.16) (Sánchez, 2017).

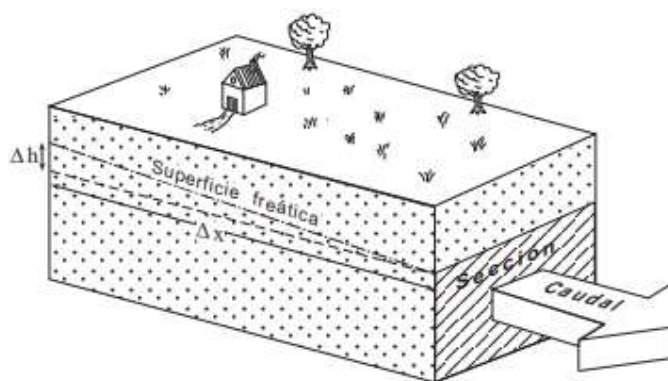


Figura 2.11 Permeabilidad en un acuífero

(Sánchez, 2017)

$$\frac{Q}{A} = K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2.19)$$

Donde:

Q : Caudal ($m^3/día$)

A : Sección transversal del acuífero (m^2)

K : Conductividad hidráulica (m/s)

$\frac{\Delta h}{\Delta l}$: Gradiente hidráulico (*adimensional*)

El producto de la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero, nos permite conocer la transmisividad, ecuación (2.20) (Fetter, 2001; OMM, 2012).

$$T = bK \quad (2.20)$$

Donde:

T : Transmisividad (m^2/s)

b : Espesor saturado del acuífero (m)

K : Conductividad hidráulica (m/s)

Para un acuífero multicapa (caso particular y frecuente de acuíferos con niveles o capas de distinta permeabilidad), la transmisividad total es la suma de la transmisividad de cada una de las capas. La transmisividad de los acuíferos es un concepto que asume que el flujo a través del acuífero es horizontal. Esta suposición es válida en ciertos casos. Cuando la carga en un acuífero saturado o confinado cambia el agua será almacenada o expulsada (Fetter, 2001).

La transmisividad es variable en acuíferos libres dado que el espesor saturado varía por ejemplo por estación (verano-invierno). En los acuíferos confinados si el espesor es constante la transmisividad también será constante (Sánchez, 2017).

2.1.5. FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea dentro de las capas de roca y suelo tiene movimiento, para su comprensión se separa en flujo un acuífero libre y flujo en un acuífero confinado.

2.1.5.1. Flujo constante en un acuífero libre

En un acuífero libre, el hecho de que el nivel freático sea también el límite superior de la región de flujo complica la determinación del volumen del acuífero. En la Figura 2.12, el lado izquierdo de la región de flujo saturado tiene un espesor h_1 y el lado derecho tiene un espesor h_2 . Si no hay recarga o evaporación a medida que el flujo atraviesa la región, la cantidad de agua que fluye por el lado izquierdo es igual a la que fluye por el lado derecho. Aplicando la ley de Darcy, como el área de la sección transversal es más pequeña en el lado derecho, el gradiente hidráulico

debe ser mayor. Por lo tanto, el gradiente de la capa freática en flujo libre no es constante, aumenta en la dirección del flujo (Fetter, 2001).

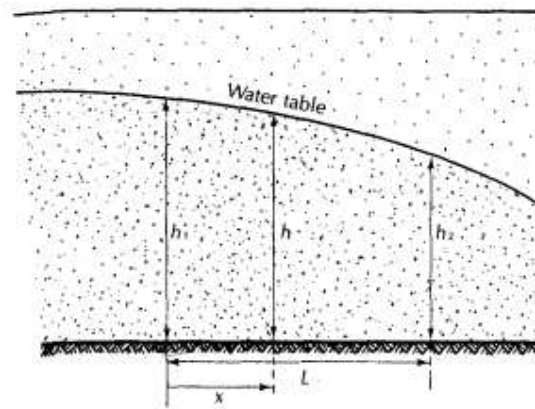


Figura 2.12 Flujo constante a través de un acuífero libre que descansa sobre una superficie impermeable horizontal

(Fetter, 2001)

Este problema fue resuelto por las suposiciones de Dupuit. Estas suposiciones consideran que el gradiente hidráulico es igual a la pendiente del nivel freático y que para pequeños gradientes de la capa freática, las líneas de flujo son horizontales y las líneas equipotenciales son verticales. Las soluciones basadas en estos supuestos han demostrado ser útiles en muchos problemas prácticos. Sin embargo, las suposiciones de Dupuit no permiten una superficie de filtración en el lado de la salida (Fetter, 2001).

De la ley de Darcy:

$$q' = -K h \frac{dh}{dx} \quad (2.21)$$

Donde:

h : Espesor saturado del acuífero. En $x = 0$; $h = h_1$; en $x = L$, $h = h_2$,

Integrando la ecuación con estas condiciones de borde.

$$\int_0^L q' dx = -K \int_{h_1}^{h_2} h dh \quad (2.22)$$

$$q' x|_0^L = -K \left. \frac{h^2}{2} \right|_{h_1}^{h_2} \quad (2.23)$$

$$q' = \frac{1}{2} K \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{L} \right) \quad (2.24)$$

Donde:

q' : Flujo por unidad de ancho ($m^2/día$)

K : Conductividad hidráulica ($m/día$)

h_1 : Carga hidráulica a longitud 0 (m)

h_2 : Carga hidráulica en la longitud L (m)

L : Longitud (m)

2.1.5.2. Flujo constante en un acuífero confinado

Si hay un movimiento constante de las aguas subterráneas en un acuífero confinado, habrá un gradiente o pendiente en la superficie potenciométrica del acuífero. Del mismo modo sabemos que el agua se moverá en la dirección opuesta a la pérdida de carga, Δh . Para un flujo de este tipo, la ley de Darcy se puede usar directamente. En la Figura 2.13 se muestra una porción de un acuífero confinado de espesor uniforme con una superficie potenciométrica de gradiente lineal, es decir, su proyección bidireccional es lineal para dos pozos de observación donde se puede medir la altura hidráulica (Fetter, 2001).

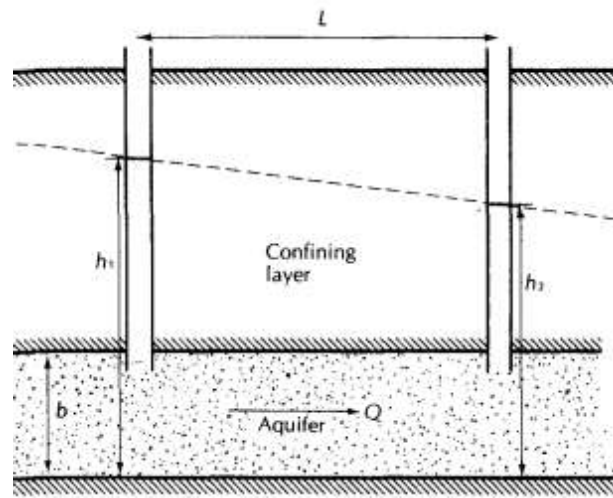


Figura 2.13 Flujo constante a través de un acuífero confinado de espesor uniforme

(Fetter, 2001)

La cantidad de flujo por ancho de unidad, q , puede determinarse a partir de la ley de Darcy:

$$q' = Kb \frac{dh}{dt} \quad (2.25)$$

Donde:

q' : Flujo por unidad de ancho ($m^2/día$)

K : Conductividad hidráulica ($m/día$)

b : Espesor del acuífero (m)

$\frac{dh}{dt}$: Pendiente de la superficie potenciométrica (*sin dimensiones*)

Se puede conocer la carga h a alguna distancia intermedia x , entre h_1 y h_2 . Esto se puede encontrar a partir de la ecuación (2.26).

$$h = h_1 - \frac{q'}{K b} x \quad (2.26)$$

Donde:

x : Distancia desde h_1 a h

El entender el flujo de agua es importante al igual que el comportamiento de la misma ante la extracción.

2.1.6. EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

Los pozos son uno de los aspectos más importantes de la hidrogeología aplicada, se utilizan en la extracción de agua subterránea para satisfacer las diferentes necesidades humanas, ya sea para consumo, riego y actividades industriales. Como un medio para la gestión del agua subterránea, los pozos se pueden utilizar también para recargar artificialmente los acuíferos a velocidades superiores a la recarga natural (Fetter, 2001).

La misma consideración teórica se aplica a los pozos que extraen agua o inyectan agua. Durante el bombeo se produce una caída de la altura en el acuífero alrededor del pozo y durante la inyección hay un aumento en la altura del acuífero. Desde un punto de vista matemático la inyección se maneja utilizando un valor negativo para la velocidad de bombeo. Un cono de bombeo, o cono de depresión, se formará en el acuífero alrededor de un pozo de bombeo a medida que el nivel del agua disminuya (Fetter, 2001).

Se trabaja idealmente con pozos que penetran completamente acuíferos que son homogéneos e isótropos. Además, se asume simetría radial, es decir; los valores de transmisividad y almacenamiento de los acuíferos no dependen de la dirección del flujo en el acuífero. Se hace las siguientes suposiciones sobre las condiciones hidráulicas en el acuífero y sobre los pozos (Fetter, 2001):

1. El acuífero está limitado en el fondo por un estrato impermeable (basamento).

2. Todas las formaciones geológicas son horizontales y tienen una extensión horizontal infinitiva.
3. La superficie potenciométrica del acuífero es horizontal antes del inicio del bombeo.
4. La superficie potenciométrica del acuífero no cambia con el tiempo después del inicio del bombeo.
5. Todos los cambios en la posición de la superficie potenciométrica se deben al efecto del pozo de bombeo.
6. El acuífero es homogéneo e isotrópico.
7. Todo el flujo es radial hacia el pozo.
8. El flujo del agua subterránea es horizontal.
9. La Ley de Darcy es válida.
10. El agua subterránea tiene densidad y viscosidad constantes.
11. El pozo de bombeo y los pozos de observación son totalmente penetrantes, es decir, están excavados en todo el espesor del acuífero.
12. El pozo de bombeo tiene un diámetro infinitesimal y es 100% eficiente.

Estas suposiciones básicas se aplican a todas las situaciones. Además cada situación puede tener suposiciones adicionales, propias de cada caso y que se mencionarán en cada caso (Fetter, 2001).

2.1.6.1. Acuífero libre

El flujo de agua en un acuífero libre hacia un pozo de bombeo se describe mediante la ecuación de Neuman y Whitherspoon (1969) (Fetter, 2001).

$$K_r \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{K_r \partial h}{r \partial r} + K_v \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.27)$$

Donde:

h : Espesor saturado del acuífero

r : Distancia radial desde el pozo de bombeo

z : La elevación sobre la base del acuífero

S_s : El almacenamiento específico

K_r : Conductividad hidráulica radial

K_v : Conductividad hidráulica vertical

t : Tiempo

Cuando se bombea agua en un acuífero libre, los gradientes hidráulicos que son inducidos por el bombeo crean un cono de descenso en el nivel freático y hay componentes verticales de flujo. El agua extraída en el pozo surge de dos mecanismos: la entrega de agua como acuífero confinado y del drenaje real del acuífero libre (Cherry & Freeze, 1979; Fetter, 2001).

Básicamente, existen tres enfoques que pueden usarse para predecir en el tiempo y el espacio el crecimiento de los conos de descenso en acuíferos libres. El primero, denominado como análisis completo requiere que la solución incluya tanto las zonas saturadas como las insaturadas. De los estudios analíticos realizados por Kroszynski y Dagan (1975) y de los modelos matemáticos de Taylor y Luthin (1969), Cooley (1971) o Brutsaert et. al (1971), se llegan a la conclusión general que la posición del nivel freático durante el bombeo no se ve afectada sustancialmente por la naturaleza del flujo insaturado sobre el nivel freático. En otras palabras, si bien conceptualmente es más atractivo realizar un análisis saturado-insaturado, hay pocas ventajas prácticas para hacerlo, y dado que las propiedades insaturadas del suelo son extremadamente difíciles de medir in situ, entonces el análisis completo rara vez se utiliza (Cherry & Freeze, 1979; Fetter, 2001).

El segundo enfoque, que es el más simple, usa la misma ecuación de un acuífero confinado pero con el argumento de la función de pozo definido en términos del rendimiento específico S_y , en lugar de la capacidad de almacenamiento S , y aplicando el concepto de transmisibilidad T . Jacob (1950) demostró que este enfoque conduce a reducciones pronosticadas correctas, siempre y cuando la reducción sea pequeña en comparación con el espesor saturado. El método se

basa en los supuestos de Dupuit y falla cuando los gradientes verticales se vuelven significativos (Cherry & Freeze, 1979; Fetter, 2001).

Para el tercer enfoque y el más utilizado en la práctica se distingue tres fases en el bombeo de un acuífero libre, recordando que inicialmente antes del bombeo, sobre la superficie freática siempre existe una franja capilar que separa la zona no saturada de la zona saturada, como se muestra en la Figura 2.14 (Cherry & Freeze, 1979; Sánchez, 2017).

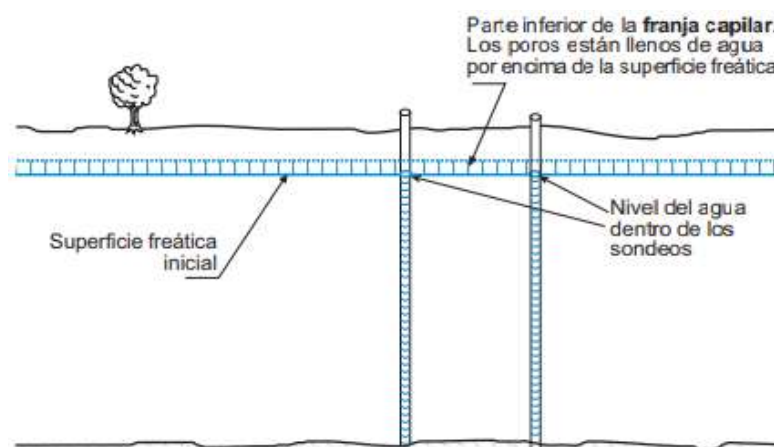


Figura 2.14 Condiciones del acuífero libre antes del bombeo

(Sánchez, 2017)

En la primera etapa de bombeo que dura unos pocos minutos el acuífero entrega agua por el mismo mecanismo que lo hacen los acuíferos confinados. La superficie freática desciende dejando sobre ella poros llenos de agua como se muestra en la Figura 2.15, la superficie freática está en movimiento (Cherry & Freeze, 1979; Sánchez, 2017).

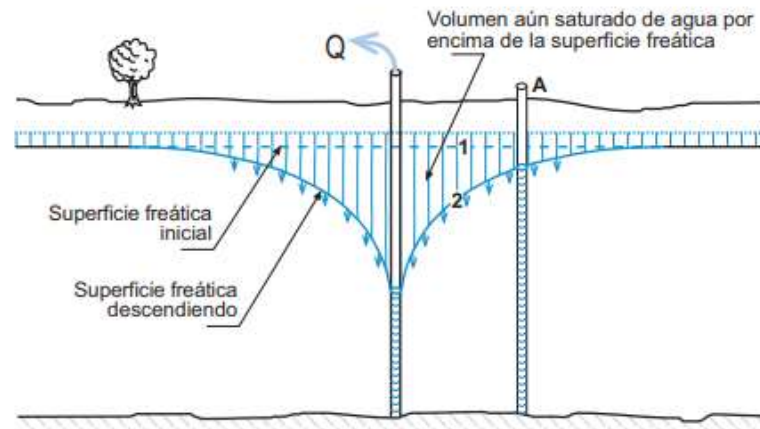


Figura 2.15 Primera etapa del bombeo en acuífero libre

(Sánchez, 2017)

En la segunda etapa del bombeo la superficie freática ha llegado a un estado casi inmóvil, el agua que se encuentra sobre ella cae por gravedad y alimenta el caudal de bombeo. Este proceso que se observa en la Figura 2.16, se lo conoce como drenaje diferido y puede durar horas o semanas (Cherry & Freeze, 1979; Sánchez, 2017).

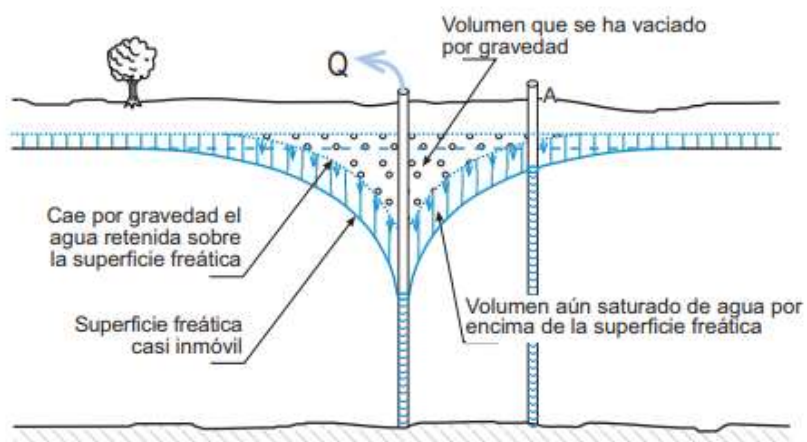


Figura 2.16 Segunda etapa del bombeo en acuífero libre

(Sánchez, 2017)

Cuando el drenaje diferido termina, inicia la tercera etapa, donde el acuífero entrega el agua contenida en los poros, produciendo un descenso lento donde la franja capilar y la superficie freática descienden simultáneamente Figura 2.17 (Cherry & Freeze, 1979; Sánchez, 2017).

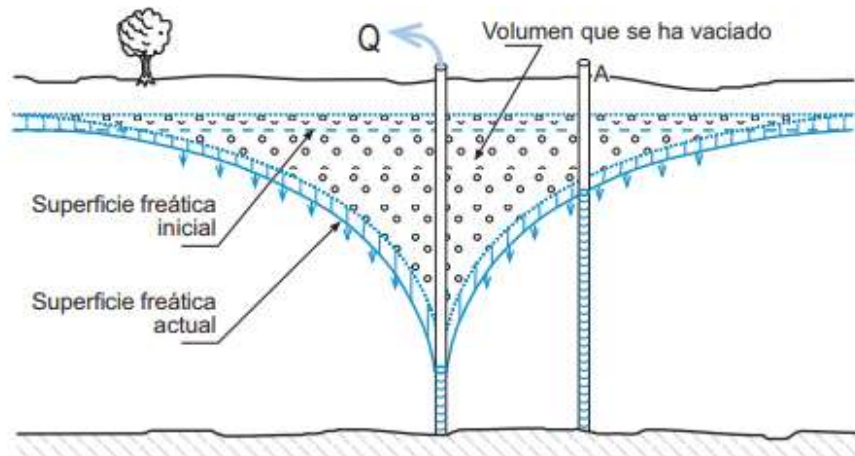


Figura 2.17 Tercera etapa del bombeo en acuífero libre

(Sánchez, 2017)

Si durante todo el proceso se mide los niveles en el pozo de observación se obtendría la Figura 2.18, donde el tramo AA' es la primera etapa, el tramo A'B es la segunda etapa y el tramo BB' la tercera etapa. Los tramos de los extremos siguen una ecuación similar a la ecuación de Theis que se trata en la extracción en un acuífero confinado (Cherry & Freeze, 1979; Sánchez, 2017).

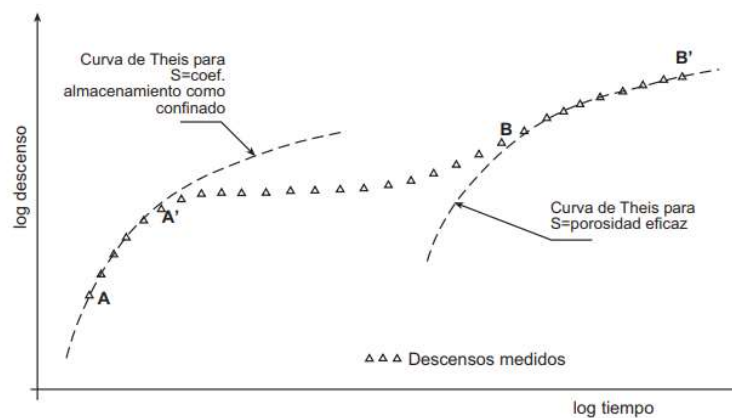


Figura 2.18 Gráfico de log descenso vs log tiempo durante el bombeo en un acuífero libre

(Sánchez, 2017)

Una ecuación que describa este proceso fue planteada por Newman en la ecuación (2.27). Newman propone un método que reconoce la existencia de componentes de flujo vertical y la solución general para la reducción. La solución de Newman, expresada en la ecuación (2.28) toma las siguientes suposiciones ya sean

adicionales o en lugar de las suposiciones básicas (Cherry & Freeze, 1979; Fetter, 2001).

1. El acuífero es libre.
2. La zona vadosa no tiene influencia en la reducción.
3. El agua inicialmente bombeada proviene de la liberación instantánea de agua del almacenamiento elástico.
4. Eventualmente el agua proviene del almacenamiento debido al drenaje por gravedad de los poros interconectados.
5. La reducción es insignificante en comparación con el grosor del acuífero saturado.
6. El rendimiento específico es al menos 10 veces la capacidad de almacenamiento elástica.
7. El acuífero puede ser, pero no obligatoriamente, anisotrópico con conductividad hidráulica radial diferente a la conductividad hidráulica vertical.

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \Gamma) \quad (2.28)$$

$W(u_A, u_B, \Gamma)$ es la función de pozo para el acuífero de la capa freática, Tabulada en el ANEXO 1, el que se encuentra en función de las ecuaciones (2.29), (2.30) y (2.31). Las dos primeras ecuaciones son exclusivas para datos de descenso temprano (Fetter, 2001).

$$u_A = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2.29)$$

$$u_B = \frac{r^2 S_y}{4Tt} \quad (2.30)$$

$$\Gamma = \frac{r^2 K_v}{b^2 K_h} \quad (2.31)$$

Donde:

- Q : Tasa de bombeo ($m^3/día$)
- T : Transmisividad ($m^2/día$)
- r : Distancia radial desde el pozo de bombeo (m)
- h : Carga hidráulica (m)
- h_o : Carga hidráulica inicial (m)
- $h_o - h$: Reducción de carga hidráulica (m)
- S : Coeficiente de almacenamiento (*adimensional*)
- S_y : Rendimiento específico (*adimensional*)
- t : Tiempo (*día*)
- K_h : Conductividad hidráulica horizontal ($m/día$)
- K_v : Conductividad hidráulica vertical ($m/día$)
- b : Espesor saturado inicial del acuífero (m)

2.1.6.2. Acuífero confinado

Cuando se bombea un pozo de un acuífero completamente confinado, el agua se obtiene del almacenamiento elástico o específico del acuífero. El almacenamiento elástico es agua que se libera del almacenamiento debido a la expansión del agua a medida que se reduce la presión en el acuífero y por expulsión a medida que se reduce el espacio entre los porosos del acuífero. Para un acuífero confinado, generalmente este valor es pequeño (0.005 o menos) y el bombeo afecta un área relativamente grande del acuífero. Además si no se produce recarga, el área de extracción de la superficie potenciométrica se expandirá indefinidamente a medida que continúe el bombeo (Fetter, 2001).

El primer análisis matemático de los efectos de extracción transitoria en un acuífero confinado fue publicado por Theis (1935), La ecuación de Theis, ecuación (2.32)

describe el desarrollo espacial y temporal del cono de abatimiento, y es válida solamente para acuíferos confinados. La función de Theis se basa en las siguientes suposiciones y se muestran en la Figura 2.19 (Fetter, 2001; Werner, 1996).

1. Que el acuífero es: confinado con espesor constante, no limitado, homogéneo e isótropo.
2. La carga es: horizontal y constante.
3. El cambio de almacenamiento del acuífero es proporcional al cambio de presión y sucede inmediatamente.
4. El coeficiente de almacenamiento es constante.
5. El caudal es constante.
6. El pozo es completamente perforado, la capacidad del pozo es despreciable y que en el pozo no ocurren pérdidas de presión.
7. El ensayo de bombeo no debe ser influenciado por otros pozos que se encuentren bombeando.

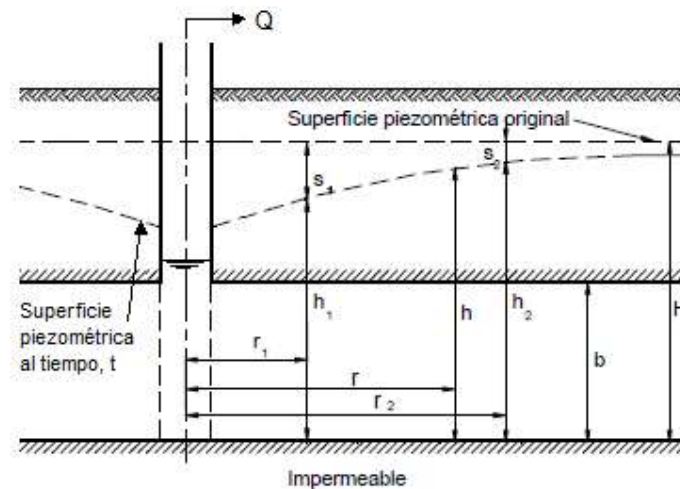


Figura 2.19 Pozo de bombeo en un acuífero confinado, totalmente perforado.
(Fetter, 2001)

$$s(r, t) = \frac{Q}{2\pi KH} W(u) \quad (2.32)$$

Donde:

$s(r, t)$: Desarrollo espacial y temporal del cono de abatimiento (m)

Q : Tasa de bombeo ($m^3/día$)

K : Coeficiente de permeabilidad

H : Espesor del acuífero (m)

$W(u)$: Función de pozo de Theis, ecuación (2.33)

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.21} + \frac{u^3}{3.21} - \frac{u^4}{4.21} + \dots \quad (2.33)$$

Con:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2.34)$$

Donde:

T : Transmisividad ($m^2/día$)

t : Tiempo desde que comenzó el bombeo ($día$)

r : Distancia radial desde la sección circular al pozo (m)

S : Coeficiente de almacenamiento (*adimensional*)

u : Argumento (–)

Para la solución de la ecuación se emplean tablas o un método gráfico en papel doble logarítmico. El ANEXO 2 contiene una tabla de valores de $W(u)$ para varios valores de u (Fetter, 2001; Werner, 1996).

La ecuación de Theis permite la simplificación de la ecuación de extracción de flujo, con el proceso que se describe a continuación. Según la ley de Darcy, el flujo de agua a través de cualquier sección circular del acuífero hacia el pozo se puede expresar en la ecuación (2.35) (Fetter, 2001).

$$Q = (2\pi r b) K \left(\frac{dh}{dr} \right) \quad (2.35)$$

Donde:

Q : Tasa de bombeo ($m^3/día$)

r : Distancia radial desde la sección circular al pozo (m)

b : Espesor del acuífero (m)

K : Conductividad hidráulica ($m/día$)

$\frac{dh}{dr}$: Gradiente hidráulico (*adimensional*)

Aplicando el concepto de transmisividad T en la ecuación (2.35), tenemos la ecuación (2.36), que es la tasa de bombeo constante (Fetter, 2001).

$$Q = 2\pi r T \left(\frac{dh}{dr} \right) \quad (2.36)$$

Donde:

Q : Tasa de bombeo ($m^3/día$)

T : Transmisividad ($m^2/día$)

r : Distancia radial desde la sección circular al pozo (m)

$\frac{dh}{dr}$: Gradiente hidráulico (*adimensional*)

Reorganizando la ecuación tenemos:

$$r \frac{dh}{dr} = \frac{Q}{2\pi T} \quad (2.37)$$

Las suposiciones básicas pueden expresarse matemáticamente como condiciones iniciales y de frontera. La condición inicial de una superficie potenciométrica horizontal es:

$$h(r, 0) = h_0 \text{ para todo } r \quad (2.38)$$

Para las condiciones de frontera se considera una extensión horizontal infinita sin reducción en ningún momento de la siguiente forma:

$$h(\infty, t) = h_0 \text{ para todo } t \quad (2.39)$$

La solución de Theis para la ecuación (2.37) bajo las condiciones iniciales y de contorno de las ecuaciones (2.38) y (2.39) es:

$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-a}}{a} da \quad (2.40)$$

Donde el argumento u está dado en la ecuación (2.34). Se debe tener en cuenta las unidades de la tasa de bombeo Q , ya sea en metro cúbico o pies cúbicos por día. Incluso si el pozo se bombea durante menos de veinticuatro horas, la tasa de bombeo Q debe expresarse en términos del volumen que se bombearía en un día. La integral en la ecuación (2.40) se llama integral exponencial y se puede aproximar mediante una serie infinita (Fetter, 2001):

$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \right] \quad (2.41)$$

Esta serie infinita ha sido llamada función de pozo y generalmente se diseña en función de $W(u)$, y con la notación la ecuación de Theis se expresa (Fetter, 2001):

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2.42)$$

Donde:

Q : Tasa de bombeo ($m^3/día$)

h : Carga hidráulica (m)

h_o : Carga hidráulica inicial (m)

$h_o - h$: Reducción de carga hidráulica (m)

T : Transmisividad ($m^2/día$)

u : Argumento (-)

La solución de estas ecuaciones se puede obtener de una manera más fácil a partir de los parámetros hidrogeológicos que se obtiene en ensayos de bombeo del acuífero en estudio.

2.1.7. DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES A PARTIR DE LOS PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Los parámetros hidráulicos generalmente se determinan mediante una prueba de acuífero o de bombeo, donde se extrae agua de un pozo y se observa la tasa de disminución del nivel de agua en los pozos de observación cercanos o pozos piezométricos. En la realización de una prueba de bombeo debe haber un pozo de bombeo, y generalmente uno o más pozos de observación. En las pruebas de bombeo se suponen las siguientes condiciones (Fetter, 2001).

1. El pozo de bombeo capta solo el acuífero que se está ensayando.
2. Todos los pozos de observación captan solo el acuífero que se ensaya.
3. El pozo de bombeo y los pozos de observación penetran totalmente el acuífero.

Los supuestos generales y los supuestos específicos para cada tipo de acuífero en la sección también son necesarios. Si un pozo bombea lo suficiente, el nivel del agua puede alcanzar un estado de equilibrio; es decir, no hay más reducción con el tiempo. La región alrededor del pozo de bombeo donde disminuyó la carga se conoce como cono de depresión. Cuando se ha alcanzado el equilibrio, el cono de depresión deja de crecer porque ha llegado a una fuente de alimentación y la tasa de recarga es igual a la de bombeo. Estas condiciones se conocen también como condiciones de estado permanente (Fetter, 2001).

2.1.7.1. Flujo radial constante en un acuífero libre

Thiem derivó una ecuación para el flujo radial constante en un acuífero libre, la ecuación (2.43). Bajo las siguientes hipótesis adicionales a los supuestos generales (Fetter, 2001).

1. El acuífero es libre y el flujo es horizontal.
2. El pozo se bombea a un caudal constante.
3. Se ha alcanzado el equilibrio; es decir, no hay más cambios en el abatimiento con el tiempo.

$$Q = (2\pi r b) K \left(\frac{db}{dr} \right) \quad (2.43)$$

Donde:

Q : Tasa de bombeo ($m^3/día$)

r : La distancia radial desde la sección circular hasta el pozo. (m)

b : Espesor saturado inicial del acuífero (m)

K : Conductividad hidráulica ($m/día$)

$\frac{db}{dr}$: Gradiente hidráulico (*adimensional*)

Reorganizando la ecuación (2.43) y considerando la existencia de dos pozos de observación, la carga es h_1 a una distancia r_1 del pozo de bombeo y es h_2 a una distancia r_2 . Se integra ambos lados de la ecuación con las condiciones de contorno.

$$\int_{b_1}^{b_2} b \, db = \frac{Q}{2\pi K} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (2.44)$$

$$b_2^2 - b_1^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.45)$$

Donde:

Q : Tasa de bombeo ($m^3/día$)

r : La distancia radial desde la sección circular hasta el pozo. (m)

b : Espesor saturado inicial del acuífero (m)

K : Conductividad hidráulica ($m/día$)

Asimismo, se puede llegar a obtener ecuaciones para un acuífero confinado.

2.1.7.2. Flujo radial constante en un acuífero confinado

En el caso del flujo radial constante en un acuífero confinado, son necesarias las siguientes suposiciones adicionales.

1. El acuífero es confinado.
2. El pozo se bombea a caudal constante.
3. Se ha alcanzado el equilibrio, es decir, no hay más cambios en los abatimientos con el tiempo.

La Figura 2.20 muestra un pozo completamente perforado en un acuífero confinado. En condiciones de estado permanente, el caudal de agua que se

bombea desde el pozo es igual al caudal de agua que el acuífero transmite al pozo. Este problema fue resuelto por primera vez por Thiem (1906) (Fetter, 2001).

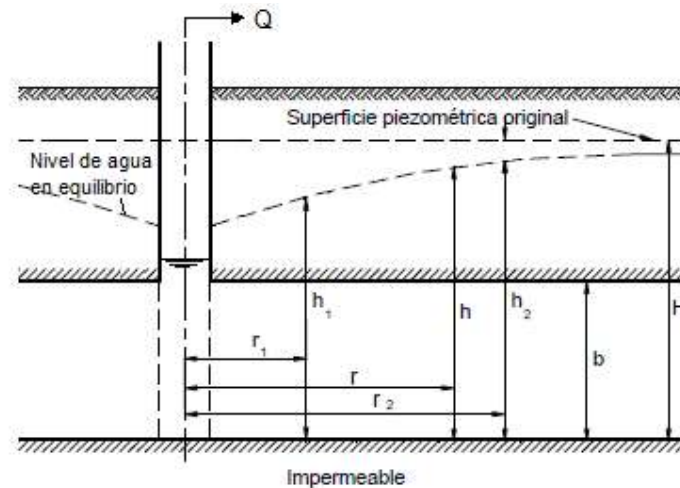


Figura 2.20 Equilibrio en el abatimiento de un acuífero confinado.

(Fetter, 2001)

De la ley de Darcy aplicada a un acuífero confinado con flujo horizontal, se tiene:

$$dh = \frac{Q}{2\pi T} \frac{dr}{r} \quad (2.46)$$

Si hay dos pozos de observación, donde la carga h_1 corresponde a una distancia r_1 desde el pozo de bombeo y la carga de h_2 a una distancia r_2 . Al integrar ambos lados de la ecuación (2.46) con estas condiciones de contorno se tiene:

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \frac{Q}{2\pi T} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (2.47)$$

Y al resolver la integral:

$$h_2 - h_1 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.48)$$

Donde:

Q : Tasa de bombeo ($m^3/día$)

T : Transmisividad ($m^2/día$)

h_1 : Carga hidráulica a la distancia r_1 (m)

h_2 : Carga hidráulica a la distancia r_2 (m)

Si el bombeo ha progresado hasta un punto donde el descenso se ha estabilizado, la carga se determina en dos pozos de observación ubicados a diferentes distancias del pozo de bombeo. El caudal de bombeo, las cargas y las distancias radiales se ingresan en la ecuación (2.48). Se observa que el coeficiente de almacenamiento del acuífero no interviene en esta ecuación. Dado que en condiciones de estado permanente, no hay cambios en la altura con el tiempo y el agua no proviene del almacenamiento, la ecuación de Thiem no se puede usar para determinar el coeficiente de almacenamiento del acuífero, pero la ecuación (2.18) nos permite conocer el valor de este parámetro (Fetter, 2001).

Al extraer agua en un acuífero se forma la red de flujo que se compone de las líneas de flujo y de las líneas equipotenciales.

2.1.8. RED DE FLUJO

A la combinación de un número de líneas de flujo y líneas equipotenciales se le llama red de flujo. Una línea de flujo es una línea a lo largo de la cual una partícula de agua se desplazará desde el lado aguas arriba hacia el lado aguas abajo en un medio permeable. Una línea equipotencial es una línea a lo largo de la cual el potencial de carga en todos los puntos es igual. Por lo tanto, si se colocan piezómetros en diferentes puntos a lo largo de una línea equipotencial, el nivel de agua subirá a la misma elevación en todos ellos (Das, 2015; Fetter, 2001; Juarez y Rico, 1994).

Las líneas de flujo son útiles para visualizar el movimiento del agua subterránea. En un medio isótropo, las líneas de flujo cruzarán las líneas equipotenciales en

ángulos rectos. Si hay anisotropía en el plano de flujo, las líneas de flujo cruzarán las líneas equipotenciales en un ángulo dictado por el grado de anisotropía formado entre y la dirección del gradiente (h) y la dirección del flujo. La Figura 2.21 muestra líneas equipotenciales y líneas de flujo en un medio isotrópico y la Figura 2.22 muestra líneas equipotenciales y líneas de flujo en un medio anisotrópico (Das, 2015; Fetter, 2001).

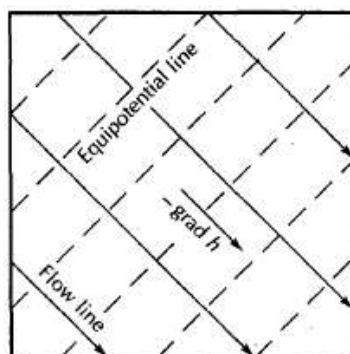


Figura 2.21 Líneas equipotenciales y líneas de flujo en un medio isotrópico

(Fetter, 2001)

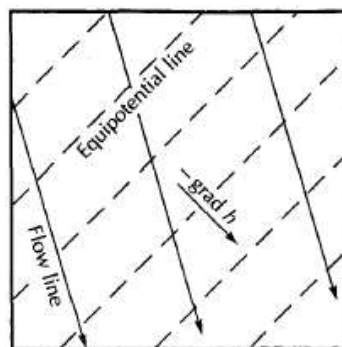


Figura 2.22 Líneas equipotenciales y líneas de flujo en un medio anisotrópico

(Fetter, 2001)

El método de construcción de la red de flujo presentado a continuación se basa en los siguientes supuestos (Fetter, 2001):

1. El acuífero es homogéneo y está completamente saturado.
2. Es isotrópico.
3. No hay cambio en el campo potencial con el tiempo.

4. El suelo y el agua son incomprensibles.
5. El flujo es laminar y la ley de Darcy es válida.
6. Todas las condiciones de borde son conocidas.

Hay tres tipos de condiciones de contorno posibles:

1. El agua subterránea no puede pasar un límite sin flujo o impermeable. Las líneas de flujo adyacentes serán paralelas a este límite, y las líneas equipotenciales se intersecarán en ángulos rectos.
2. Como la carga es la misma en todas partes de un límite de carga constante, tal límite y la línea equipotencial adyacente son paralelos.
3. Para acuíferos libres también hay un límite, el nivel freático. El nivel freático no es una línea de flujo ni una línea equipotencial; más bien es una línea donde se conoce la carga. Si hay recarga o descarga a través del nivel freático, las líneas de flujo estarán en un ángulo oblicuo al nivel freático. Si no hay recarga a través del nivel freático, las líneas de flujo pueden ser paralelas a él (Fetter, 2001).

Una red de flujo es una familia de líneas equipotenciales con suficientes líneas ortogonales dibujadas para que resulte un patrón de figuras "cuadradas". Excepto en los casos de geometría simple, las figuras no serán realmente cuadrados. Los siguientes pasos son necesarios en la construcción de una red de flujo (Fetter, 2001).

1. Identificar las condiciones de contorno.
2. Dibujar los límites a escala en función del espacio de trabajo que se dispone. Los dos ejes del dibujo tienen que tener la misma escala.
3. Identificar la posición de las condiciones equipotenciales y de flujo conocidas.
4. Dibujar un conjunto de prueba de líneas de flujo. Las líneas de flujo externas serán paralelas a los límites impermeables. Las redes de flujo no necesitan un límite finito en todos los lados; es posible tener una región de flujo que se extienda más allá del borde exterior de la red de flujo. Una red de flujo puede tener un tubo de flujo parcial a lo largo de un borde. Las líneas de flujo no necesitan estar separadas una distancia igual.

5. Dibuja un conjunto de prueba de líneas equipotenciales. Comenzar en un extremo del campo de flujo y avanzar hacia el otro. Las líneas equipotenciales deben ser perpendiculares a las líneas de flujo. Serán paralelos a los límites de carga constante y en ángulo recto a los límites impermeables. Si hay un límite de nivel freático, la posición de la línea equipotencial en el nivel freático se basa en la elevación del nivel freático. Las líneas equipotenciales deben estar espaciadas conformando formas de cuatro lados que tengan aproximadamente dimensiones centrales iguales; es decir, las líneas que pasan por el centro de cada forma deben tener aproximadamente la misma longitud.
6. Borrar y volver a dibujar las líneas de flujo de prueba y las líneas equipotenciales hasta obtener la red de flujo deseada de las líneas equipotenciales ortogonales y las líneas de flujo. Si es necesario cambiar la escala del paso 2.

Para realizar las líneas de flujo se usan métodos de interpolación. La interpolación tiene como objetivo estimar a partir de una muestra los valores de Z para un conjunto de puntos (X, Y). Los interpoladores que operan a partir de puntos pueden clasificarse como: (Fallas, 2003)

- Exactos: Estos interpoladores preservan los valores originales de los puntos de muestreo.
- No exactos: Contrario a los exactos, no mantienen los valores originales de los puntos de muestreo.
- Globales: Estos interpoladores se basan en todos los puntos de muestreo.
- Locales: La interpolación está basada en un set de puntos de muestreo.

Para realizar la interpolación se puede utilizar el software SURFER.

2.1.9. INTRODUCCIÓN A SURFER®

El software SURFER® en su versión 13, es un programa de mapeo basado en cuadrículas que interpola datos. La cuadrícula se usa para producir diferentes tipos de mapas, incluidos mapas de contorno, vectores, imágenes, relieve sombreado,

cuenca hidrográfica, superficie 3D y mapas 3D. La variedad de métodos disponibles en el software proporciona diferentes interpretaciones de sus datos y, nos permite elegir el más apropiado para las necesidades del estudio que se requieran. Prácticamente todos los aspectos de los mapas se pueden personalizar para obtener resultados de calidad (GOLDENSOFTWARE, 2015).

SURFER®13 contiene tres tipos de ventana de documento: el documento de trazado, el documento de la hoja de trabajo y la cuadrícula. Los mapas se crean y se muestran en el documento de trazado, el documento de la hoja de trabajo muestra, edita, transforma y guarda los datos en un formato adecuado. El editor de nodo de cuadrícula muestra y edita los valores de Z para la cuadrícula seleccionada. A continuación observamos la pantalla de trabajo del software (GOLDENSOFTWARE, 2015).

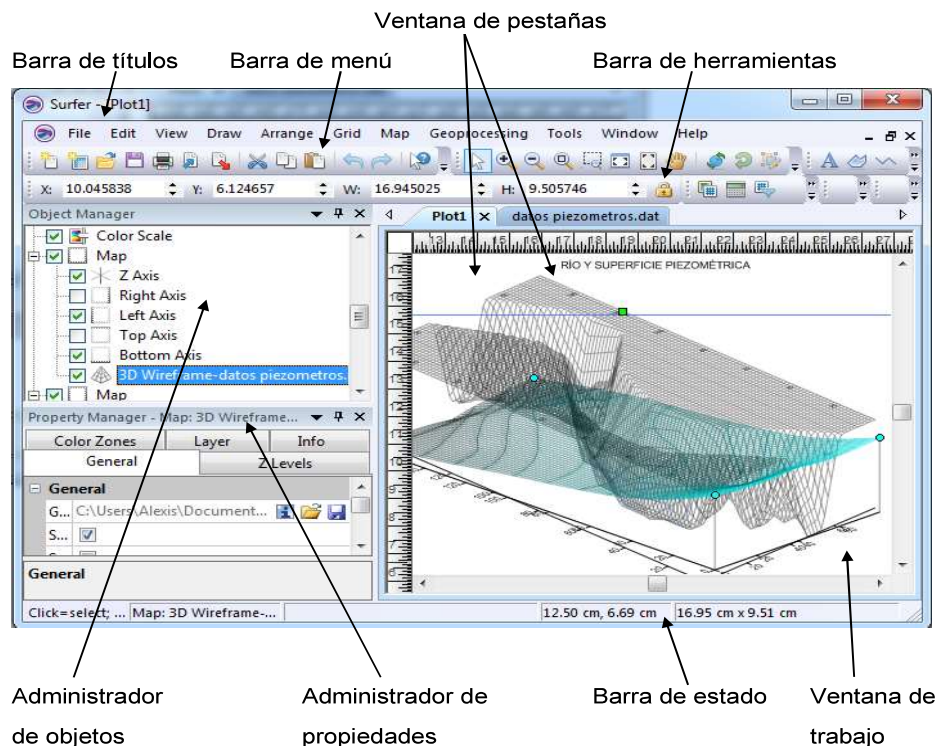


Figura 2.23 Pantalla de trabajo del software SURFER (GOLDENSOFTWARE, 2015)

2.1.9.1. Métodos de interpolación

El software SURFER usa varios métodos para la interpolación de datos, el más utilizado es el método de Kriging, a continuación se enumeran los métodos de interpolación con los que cuenta este programa (Fallas, 2003):

- Distancia inversa ponderada
- Kriging
- Curvatura mínima
- Vecino natural
- Vecino más cercano
- Funciones radiales
- Método modificado de Shepard
- Triangulación con interpolación lineal

La interpolación es una herramienta para obtener las redes de flujo a partir de las cargas hidráulicas y comparar estas con las redes de flujo de los acuíferos que se presentan a continuación en el estado del arte.

2.2. ESTADO DEL ARTE

El estudio del comportamiento hidrogeológico de los acuíferos es de gran interés para diversos usos y aplicaciones. A nivel mundial se realizan estudios en acuíferos, algunos de ellos son:

Autor(es), año	Título	Zona de estudio	Resumen
Sahu P., Sikdar P., 2007	Sistema hidráulico del acuífero de los humedales del este de Kolkata y alrededor de estos, Bengala Occidental, India	Los humedales del este de Kolkata, India	Los humedales del este de Kolkata fueron declarados como sitio Ramsar n° 1208 el 19 de agosto de 2002 y han adquirido un estatus internacional. El área es una parte de la llanura deltaica inferior del sistema del río Bhagirathi-Ganga y generalmente es de naturaleza plana. La geología debajo de la superficie de la zona está completamente cubierta por los sedimentos fluviales cuaternarios que comprenden una sucesión de arcilla, arcilla limosa, arena y arena mezclada con grava ocasional. El acuífero cuaternario se encuentra entre dos secuencias de arcilla. El acuífero confinado se compone de arena moderadamente bien clasificada y refleja el ambiente de deposición fluvial. La dirección del flujo regional de agua subterránea es de este a oeste. Las investigaciones geoquímicas detalladas de 40 muestras de agua

			<p>subterránea junto con el análisis estadístico (por ejemplo, correlación y análisis de componentes principales) sobre estos datos químicos revelan: cuatro tipos de calidad de agua subterránea (buena, mala, muy mala y agua inadecuada para beber) , cuatro facies hidroquímicas (pueden asignarse a tres tipos amplios, tales como aguas “frescas”, “mezcladas” y “salobre”); la evolución de las aguas “mezcladas” se debe posiblemente a la mezcla hidráulica de Aguas “frescas” y “salobres” dentro de la matriz del acuífero y / o en mezcla, y la ausencia de facies de Na-Cl indica un lavado continuo del acuífero.</p>
<p>Woods S., MacDonald L., y Westbrook C., 2006</p>	<p>Interacciones hidrológicas entre un almacenamiento aluvial y un humedal en pendiente en tierra en las Montañas Rocosas centrales, EE. UU.</p>	<p>Montañas Rocosas centrales de Colorado, Estados Unidos</p>	<p>Los humedales de pendiente generalmente ocurren en las roturas de una pendiente donde la descarga de agua subterránea mantiene las condiciones del suelo húmedo. A menudo se encuentran en el perímetro de abanicos aluviales altamente permeables, pero no se han realizado estudios hidrológicos detallados de estos humedales en particular. El estudio combina las mediciones de flujo de arroyos y manantiales con cinco años de datos de niveles piezométricos y de agua para comprender la hidrología de un humedal. El estudio se centró en un abanico aluvial de 5,2 ha y un humedal de pendiente adyacente de 1,6 ha en la parte alta subalpina de la cabecera del río Colorado en las Montañas Rocosas centrales de Colorado. Los cambios en las entradas de flujo de corriente resultantes de un desvío de aguas arribas ayudaron a confirmar los vínculos inferidos a partir de los datos hidrométricos. Las descargas de dos manantiales en el pie del abanico aluvial se eliminaron y la carga piezométrica en el pie del abanico aluvial disminuyó en más de 80 cm dentro del primer y segundo día después de que se desvió la corriente, lo que indica que la infiltración es la principal fuente de recarga de agua subterránea. La descarga continua de agua subterránea en la parte superior del humedal limita el descenso del nivel de agua a menos de 40 cm. La importancia del flujo de corriente como fuente de agua distingue los humedales de pendiente adyacentes a los abanicos aluviales de los que se encuentran en otros entornos y los hace particularmente vulnerables a las desviaciones de agua en la parte de aguas arriba.</p>
<p>Comisión Nacional del Agua, 2015</p>	<p>Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Méndez-San Fernando (2802), Estado de Tamaulipas</p>	<p>Acuífero Méndez-San Fernando, Estado de Tamaulipas, México</p>	<p>El cálculo de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero permitirá una mejor administración del recurso hídrico como en el otorgamiento de concesiones. El documento sintetiza la información donde claramente especifica el balance de aguas subterráneas, la disponibilidad de agua subterránea susceptible a concesionar a más de información obtenida en estudios anteriores que nos permiten conocer la fisiografía, geología e hidrogeología del acuífero Méndez-San Fernando.</p>

<p>Ye S., Luo Y., Wu J., Yan X., Wang H., Jiao X., Teatini P., 2016</p>	<p>Modelado numérico tridimensional de subsidencia en Shanghai, China</p>	<p>Shanghai, China</p>	<p>Shanghai, ha experimentado dos períodos de hundimiento rápido de tierra o subsidencia, debidos principalmente a la explotación de aguas subterráneas relacionada con el crecimiento económico y de la población. El primer período ocurrió durante 1956–1965 y se caracterizó por una tasa promedio de hundimiento de la tierra de 83 mm/año, y el segundo período ocurrió durante 1990–1998 con una tasa promedio de hundimiento de 16 mm/año. Gracias al establecimiento de redes de monitoreo para los niveles de agua subterránea y hundimiento de tierra, se ha recopilado un conjunto de datos valiosos desde la década de los 1960. En este estudio, se desarrolló un modelo numérico de hundimiento de la tierra para simular el flujo de agua subterránea tridimensional (3D) acoplado a los desplazamientos de los acuíferos 3D en el centro de Shanghai desde el 30 de diciembre de 1979 hasta el 30 de diciembre de 1995. El modelo se calibra usando datos piezométricos, nivelación geodésica y mediciones de extensómetro de pozo realizadas durante este período. Por primera vez, existe la capacidad de proporcionar algunas estimaciones preliminares en el campo de desplazamiento horizontal asociado con la subsidencia en Shanghai y para el cual no hay mediciones disponibles. Los resultados de este estudio resaltan que los desplazamientos horizontales causados por la explotación regional de aguas subterráneas parecen demasiado pequeños como para dañar gravemente la infraestructura del subsuelo en el área central de Shanghai; sin embargo, se necesitan más investigaciones locales (específicas del sitio).</p>
<p>Bouaamlat I., Larabi A. y Faouzi M., 2016</p>	<p>Investigación hidrogeológica de un acuífero de sistema oasis en el sureste de Marruecos mediante el desarrollo de un modelo de flujo de agua subterránea</p>	<p>Tafilalet, Marruecos</p>	<p>El agua subterránea del sistema de oasis de Tafilalet (TOS) es un importante recurso hídrico en los valles más bajos de Ziz y Rheris en el sureste de Marruecos. El acuífero libre es explotado para consumo doméstico y riego. Se desarrolló un modelo de flujo de agua subterránea para evaluar el impacto de las variaciones climáticas y el desarrollo, incluida la construcción de estructuras hidráulicas, sobre el comportamiento hidrodinámico del acuífero. Las simulaciones numéricas se realizaron mediante la implementación de una base de datos espacial dentro de un sistema de información geográfica y utilizando la herramienta Arc Hydro Groundwater con el código MODFLOW-2000. Los resultados de las simulaciones de estado permanente y transitorio entre 1960 y 2011 muestran que el nivel freático está en equilibrio entre la recarga, principalmente infiltración de agua superficial y la descarga por evapotranspiración. Después de la puesta en servicio de la presa Hassan Addakhil en 1971, las cargas hidráulicas se hicieron más sensibles a las variaciones anuales que a las variaciones estacionales. Las cargas también están influenciadas por sequías recurrentes y los cambios más altos en el nivel del agua se registran en áreas irrigadas. El modelo proporciona una forma de gestionar los recursos de agua subterránea en el TOS. Puede utilizarse como una herramienta para predecir el impacto de diferentes planes de manejo para la protección de las</p>

			aguas subterráneas contra la sobreexplotación y el deterioro de la calidad del agua.
Ferrara V., Pappalardo G. y Rapisarda F., 2007	Factores de salinización que afectan a los acuíferos costeros del este de Sicilia	Sicilia, Italia	A lo largo de la costa Jónica de Sicilia, entre el monte Etna e Hyblean Plateau, las aguas subterráneas de los acuíferos aluviales de las cuencas de los ríos Simeto y San Leonardo muestran contenidos de sal variables y frecuentemente elevados. La variabilidad granulométrica de los depósitos aluviales condiciona los valores de permeabilidad, valores medios a bajos en los niveles arenoso-arcillosos, altos en los niveles de gravas y arenas, alcanzando los valores más bajos en los niveles limo-arcillosos. Esta variabilidad horizontal y vertical, junto con el marco estructural del sustrato impermeable arcilloso, influye en el flujo de las aguas subterráneas y en los intercambios con las aguas superficiales, como muestra la hidroquímica. La prospección geofísica, los datos estratigráficos de pozos y sondeos, los niveles del agua y la correlación con los análisis químicos, han permitido caracterizar los orígenes principales de la salinidad, mientras que su tendencia evolutiva desde los últimos 30 años ha sido llevada a cabo a través de la comparación con datos anteriores. La intensa actividad humana causó en su momento importantes consecuencias sobre el equilibrio de los acuíferos, aumentando los procesos de salinización de las aguas subterráneas. Esto puede deberse a diferentes causas, como el uso de fertilizantes en la agricultura, los residuos industriales y la intrusión marina debida a los intensos bombeos de los acuíferos.
Giménez E. y Morell I., 1995	Análisis hidrogeoquímico de procesos de salinización en el acuífero costero de Oropesa (Castellón, España).	Castellón, España	El acuífero costero de Oropesa se ve afectado por procesos de salinización indudablemente asociados con la explotación intensa de aguas subterráneas para el suministro agrícola. El acuífero corresponde geológicamente a una depresión tectónica con relleno plio-cuaternalio. Hidrogeológicamente, este acuífero es detrítico, con porosidad intergranular, que recibe una recarga sustancial de los acuíferos mesozoicos adyacentes. El contacto con el mar, además de la presencia de suelo cultivado que requiere una explotación extrema de las aguas subterráneas, con frecuencia da lugar a procesos de intrusión de agua de mar. La presente investigación es un intento de comprender la intrusión de agua salada en este acuífero, utilizando análisis hidroquímicos del comportamiento de ciertos iones menores que podrían ayudar en el proceso de caracterización. En el caso del sector de Oropesa, la salinización de las aguas subterráneas no parece atribuirse únicamente a la intrusión del agua de mar, sino que también existen anomalías relacionadas en gran medida con la geología del sector y sus alrededores, el tipo de recarga, las condiciones hidrodinámicas en el área específica. El estudio cuenta con una red de flujo de la zona del año 1990, esta herramienta permite comprender el flujo en el acuífero.

Manzo D., 2016	Informe final. Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala.	Guatemala	El conocimiento de la hidrogeología en la región volcánica de la República de Guatemala, es de alta trascendencia a nivel nacional, debido a que en esta área se concentra el mayor número de los centros poblados, constituyendo una herramienta fundamental para definir el uso adecuado del agua y su reglamentación. La investigación fue experimental y de tipo exploratoria, dado que fue un estudio de campo, donde se identificaron los medios hidrogeológicos naturales y las interrelaciones entre variables de permeabilidad de las rocas y el flujo del agua subterránea y de tipo descriptiva y explicativa, al realizar un análisis, interpretación y discusión de las diferencias entre las características hidráulicas de transmisividad y coeficiente de almacenamiento de los acuíferos. La investigación se orientó a la elaboración de un documento con mapas temáticos de hidrogeología de los principales acuíferos volcánicos de Guatemala, a escala 1:100,000. Dentro de los aportes técnico-científicos importantes que se derivan del estudio, es lo referente al conocimiento cualitativo y cuantitativo de las aguas subterráneas para el manejo y la explotación de acuíferos, al tener la caracterización de los diferentes acuíferos, tanto de sus parámetros hidrogeológicos, como de las extracciones y disponibilidades de agua para su protección y conservación.
Laurencena P., Kruse E., Deluchi M.	Dinámica freática de la llanura aluvial en los alrededores de la ciudad de Neuquén, Argentina	Valle inferior del Río Limay, Argentina	El área de estudio, que comprende un sector del valle inferior del Río Limay, está caracterizada por un importante desarrollo socioeconómico basado en el cultivo de frutales con riego sustentando a través de canales. El objetivo del trabajo fue evaluar las características de las curvas de agotamiento de los hidrogramas de los niveles freáticos en una zona llana de clima árido-semiárido. Se analizaron las variaciones freáticas mensuales del período 2003 – 2005. En mayo cesa el riego y no existen aportes al acuífero produciéndose una rápida profundización de los niveles freáticos hasta agosto. La disminución de las reservas en el acuífero freático es de 0.98 hm ³ en los meses de mayo y junio y de 0.53 hm ³ para julio. El conocimiento de las particularidades de la curva de agotamiento contribuye a caracterizar la dinámica del agua subterránea en este tipo de ambientes bajo riego, lo cual permitirá lograr a futuro mayor eficiencia en el manejo de los recursos hídricos de la región.
Gamboa C., Herrera C., Urrutia J. y Urqueta H., 2015	Evaluación hidrogeológica de la Depresión Central (25°- 25° 12' S), sector Minera Guanaco.	Sector minero Guanaco, Chile	Discute el modelo hidrogeológico conceptual de un acuífero ubicado en el flanco occidental de la Cordillera de Domeyko, al sur de Antofagasta. El estudio de la geología, piezometría, registros de temperatura y conductividad eléctrica, revelaron la presencia de un sistema heterogéneo y anisótropo, conformado de dos medios principales: medio poroso y medio fracturado. El agua se recarga en las partes altas de la Precordillera y luego circula principalmente con sentido Este a Oeste, controlado por la presencia de fisuras que conforman un sistema de trampas tectónicas, donde el agua atrapada en algunos casos puede dar origen a manantiales, como el caso del Manantial de Cachinal. La variación de temperatura y salinidad con la profundidad evidencian

			que hay zonas donde el tiempo de interacción entre el agua y la roca puede ser prolongado.
Hoque M., Hoque M., y Ahmed M., 2007	Disminución del nivel de las aguas subterráneas y la deshidratación de los acuíferos en el área metropolitana de Dhaka, Bangladesh: causas y cuantificación	Ciudad de Dhaka, Bangladesh	La extracción fuerte mediante pozos de agua ha causado un descenso lineal a exponencial en el nivel de agua subterránea y un drenaje significativo del acuífero en Dhaka, Bangladesh. La ciudad depende casi completamente de agua subterránea que provienen de capas de arena no consolidadas que forman el sistema de acuíferos principal de la ciudad de Dhaka y están efectivamente confinadas por la arcilla Madhupur, parte de la Formación Dupi Tila. Los análisis muestran que el patrón de cambio del nivel del agua replica en gran parte los patrones de cambio en la tasa de abstracción de agua subterránea. Esta abstracción ha causado un descenso brusco en el nivel del agua en toda la ciudad habiéndose transformado en dos conos de depresión en el nivel del agua. Las partes superiores del acuífero se encuentran drenadas en toda el área, con la excepción de la porción nororiental y la esquina suroriental de la ciudad. Se calcula que aproximadamente 41 millones de metros cúbicos (MMC) del acuífero se habían drenado para el año 1988 lo cual aumentó a 2,272 MMC en el año 2002. El descenso del nivel del agua puede incrementar de modo no lineal debido a recarga vertical limitada en áreas donde el acuífero es drenado y puede amenazar severamente la sostenibilidad del acuífero.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

El modelo experimental simula el flujo de agua en un medio geológico representado por una arena, considerando que los ensayos se realizaron con el equipo nivelado es decir sin inclinación tanto en el fondo del tanque como en la superficie del medio granular y una recarga constante. Se realizaron prácticas para los tipos de acuífero libre y confinado de flujo de agua, extracción de agua e interacción de conos de depresión. De las cargas hidráulicas de los manómetros de equipo se realizaron gráficas de las superficies piezométricas en el software SURFER®13. Como precaución se partió de la información proporcionada en el manual del equipo, que dispone el Laboratorio Docente de hidráulica.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y COMPONENTES

El aparato de hidrología P6530 de la marca Cusson es una unidad independiente con facilidad de movilidad en caso de ser necesario. La unidad ha sido diseñada para permitir el estudio de los principios hidrogeológicos. Entre los estudios que permite reproducir son: estudio de permeabilidad, mecánica fluvial, extracción de agua del suelo e hidrogramas de tormenta y los estudios de interés que son el flujo de agua subterránea (Cusson, 2014).

El aparato consta de un tanque módulo con dimensiones aproximadamente de 200 cm de longitud, 75 cm de ancho y 25 cm de profundidad. El tanque se llena con un medio granular fino para simular experimentalmente el medio geológico. En la figura 3.1 se aprecia el equipo y sus componentes (Cusson, 2014).

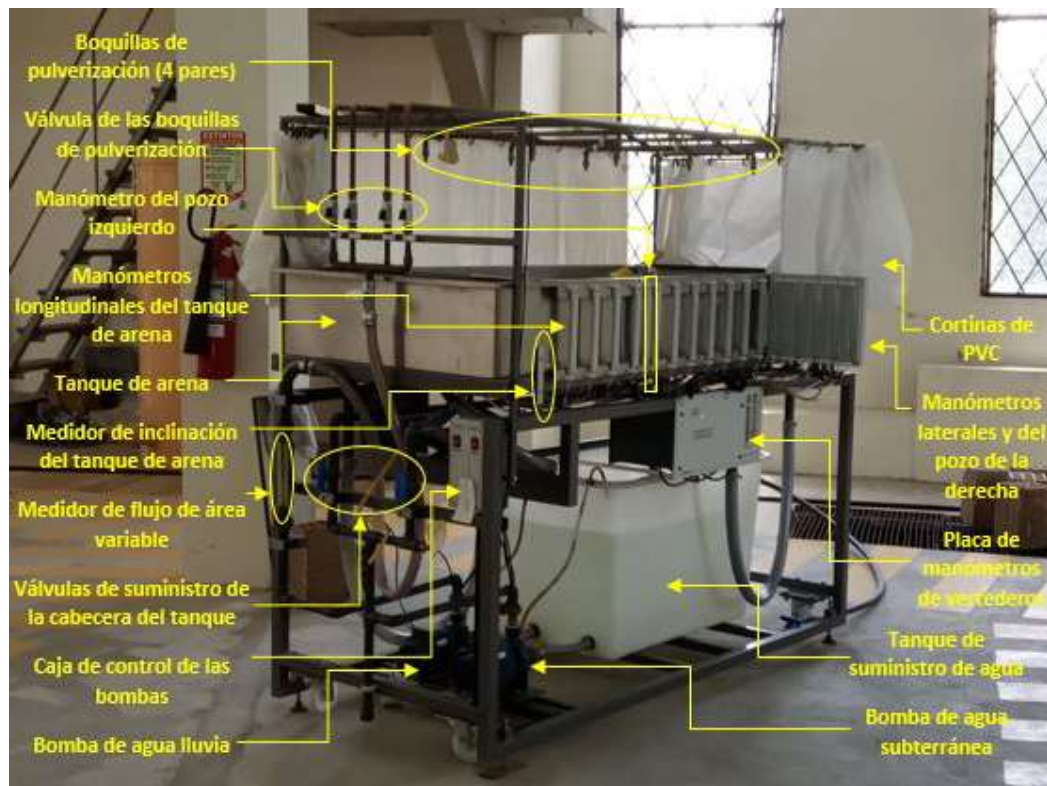


Figura 3.1 Equipo de hidrólogía y componentes en el Laboratorio Docente de Hidráulica

ELABORACIÓN: Mena V., 2019

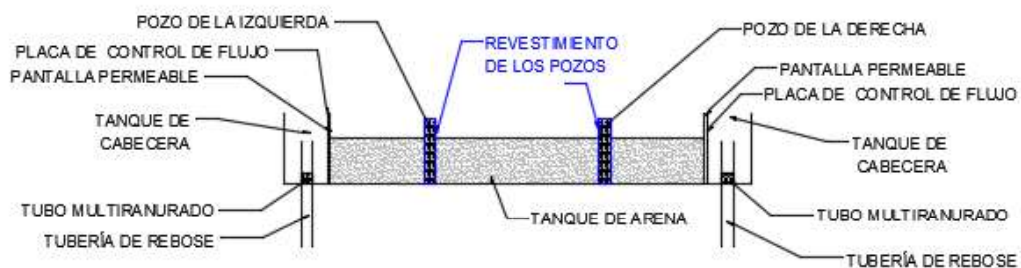


Figura 3.2 Esquema del equipo

ELABORACIÓN: Mena V., 2019

El módulo está soportado en una estructura de acero fabricada con montajes, esta estructura permite el ajuste de la inclinación del módulo. Encima del módulo, hay una estructura soportando a 8 boquillas rociadoras que se utilizan para simular la caída de lluvia. Estas boquillas cuentan con válvulas que controlan la salida de agua permitiendo simular una lluvia localizada. Una pequeña bomba centrífuga provee el suministro de agua a las boquillas.

A los extremos del módulo se tienen tanques de cabecera con membranas permeables con un tamaño de abertura de 0.4 mm, entre las cuales se coloca el material granular del tanque de arena. El área central del tanque tiene 2 salidas con un diámetro de 50 mm cada una, estas simulan pozos al instalar los tubos porosos. Los tubos de descarga de los pozos están controlados por válvulas que descargan dentro de los canales de flujo y nos permite conocer los valores de descarga.

En la base del módulo superior, además de las dos salidas para simular pozos se encuentra una formación de tomas de presión conectadas mediante mangueras flexibles a manómetros multitubos, colocados en la placa del tanque de arena, junto con reglas de medición en milímetros.

3.3. ACCESORIOS

El aparato de hidrología cuenta con una serie de accesorios, los cuales amplían el rango de experimentación:

- Dos tubos de revestimiento de pozos permeables de 35 mm de largo. Cada tubo perforado de acero inoxidable está soldado a un tapón hueco y equipado con un filtro de poliéster asegurado por un anillo tipo "O". Los tubos de revestimiento de los pozos encajan a presión en los receptáculos de los pozos ubicados en la base del tanque de arena.
- Dos tapones de pozo de 35 mm para su utilización cuando los tubos del revestimiento del pozo no están colocados.
- Dos pantallas impermeables que se pueden unir del lado de la arena a las pantallas de extremos permeable. Cada uno de las pantallas impermeables tiene una sección transversal cortada que puede cubrirse con una placa intercambiable, una condición simula un plano de inundación de 200 mm de altura y la otra una pantalla completamente impermeable.
- Dos recintos circulares, que corresponden a un anillo abierto y otro cerrado de 600 mm de diámetro cada uno.
- Dos recintos rectangulares abiertos con dimensiones de 330x550 mm y 618x918 mm.
- Una bandeja o recinto rectangular cerrado de 430x650 mm.

- Una ataguía que se puede usar para represar un cauce de río modelador.
- Dos formadores de 1 a 20 gradientes diferentes que permiten que la superficie de arena se profile en una pendiente de 1 en 20 hasta el fondo del tanque, lo que, junto con la capacidad de inclinar el tanque, aumenta el rango de experimentos.
- Herramienta de perfilado que ayuda a modelar la superficie de arena con perfiles de nivel plano y lechos de ríos rectos y serpenteantes.
- Tres juegos de puntas de boquilla de pulverización para simular lluvia:
 - a) Conjunto de 8 boquillas grandes (BF4-60)
 - b) Conjunto de 8 boquillas medianas (BF3-60)
 - c) Conjunto de 8 boquillas pequeñas (BF2-60)
- Herramientas manuales: pala, aforador, paleta y yeso para ayudar a nivelar y dar forma a los perfiles de arena requeridos.

Todos estos accesorios requieren un medio granular para su aprovechamiento.

3.4. MEDIO GRANULAR

El medio granular representa un material sedimentario tipo arena gruesa de coloración blanquecina con una composición química mayoritaria de sílice, de grano redondeado y con tamaño medio de 1.35 mm, según la clasificación de suelos USCS (*Unified Soil Classification System*) corresponde a una arena bien graduada (SW). Cusson suministra esta arena de sílice lavada y de alta gradación como accesorio P6531. La composición química, propiedades mecánicas y granulometría de esta arena se aprecian en la tabla 3.1, 3.2 y 3.3 respectivamente (CUSSON, 2014).

Tabla 3.1: Composición química de la arena, P6531

	%
<i>Si O₂</i>	99.3
<i>Fe₂ O₃</i>	0.05
<i>Al₂ O₃</i>	0.07
<i>K₂O</i>	0.01
<i>L.O.I. (Loss on Ignition)</i>	0.1

(Cusson 2014)

Tabla 3.2: Propiedades mecánicas de la arena, P6531

Tamaño medio de las partículas:	1350	μm
Forma de las partículas:	Redonda	
Densidad suelta:	1578	Kg/m ³
Densidad compacta:	1646	Kg/m ³

(Cusson 2014)

Tabla 3.3: Granulometría de la arena, P6531

Distribución de tamaño de partículas	peso acumulativo que pasa
μm	%
2360	99.8
2000	95.9
1700	83.7
1400	61.9
1180	30.2
1000	3.5
850	0.5

(Cusson 2014)

3.5. MEDIDAS DE SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO

Todo equipo tiene medidas de seguridad y requiere mantenimiento, para este equipo los aspectos a considerar son:

3.5.1. EQUIPO ELÉCTRICO

El equipo funciona con un suministro eléctrico de la red pública. La instalación eléctrica y el mantenimiento deben ser llevados a cabo por un ingeniero eléctrico competente de acuerdo con las reglamentaciones locales y las medidas de seguridad correspondientes. El suministro eléctrico y el cable de conexión deben estar clasificados adecuadamente con respecto a la corriente, temperatura y protección física para las condiciones de uso. La toma de corriente debe estar debidamente etiquetada y debe incorporar medios independientes para aislar el suministro y estar equipada con un dispositivo de protección contra sobrecorriente. Siempre aisle el equipo del suministro eléctrico cuando el equipo no se use y antes de retirar los paneles frontales o traseros, o para exponer cualquier pieza en

funcionamiento. Además se debe procurar tener un excedente de potencial de 30 V en CC (corriente continua) o 50 V en CA (corriente alterna) (CUSSON, 2014).

Antes de la instalación del equipo siempre se debe asegurar de que el voltaje de suministro eléctrico, la frecuencia y la configuración sean compatibles con este equipo. El equipo requiere un suministro monofásico y una conexión a tierra. Para minimizar el peligro, ya que el suministro está conectado por un cable posterior, se recomienda incorporar en el suministro un dispositivo de corriente residual, diseñado para la protección del personal. No se debe usar cerca un dispositivo de alta sensibilidad (30 mA), debido a la posibilidad de daño en el dispositivo (CUSSON, 2014).

3.5.2. EQUIPO ROTATORIO

EL equipo contiene piezas giratorias, que alcanzan velocidades de rotación muy altas. El equipo está provisto de seguridades y, por lo tanto, el equipo debe ser operado únicamente con las protecciones que posee para evitar el grave riesgo de atrapamiento o posible pérdida de prendas de ropa, cabello, artículos de joyería o partes del cuerpo (CUSSON, 2014).

3.1.1. DESINFECCIÓN

Todo sistema abierto en el que el agua se usa o almacena durante largos períodos tendrá una tendencia a ser colonizado por hongos, algas y bacterias. La velocidad y la naturaleza exacta de su colonización dependerán de las condiciones particulares del sitio. La apariencia y el olor de un sistema altamente contaminado a menudo son objetables. Los depósitos de lodo opacan los efectos visuales y obstruyen potencialmente los filtros. Un lecho de arena en un laboratorio es un medio de propagación ideal para una amplia variedad de bacterias, algas y hongos. Es esencial que el agua y el lecho de arena se mantengan limpios y libres de contaminación biológica. El tanque de polietileno se debe drenar con un intervalo de tiempo entre tres a doce meses, dependiendo del uso. Cualquier depósito de lodo o espuma debe eliminarse lavándolo con un detergente suave y cualquier sedimento en el tanque de arena debe ser retirado para evitar daños a las bombas

y la obstrucción de las boquillas y filtros. Estos problemas se pueden evitar mediante la esterilización periódica del sistema (CUSSON, 2014).

Para prevenir la contaminación biológica, se recomienda que el sistema de agua se trate con un agente esterilizante. Cusson recomienda el uso de un desinfectante a base de plata coloidal y peróxido de hidrógeno. La plata coloidal es un potente microbicida oxidante que inactiva las enzimas del metabolismo de bacterias, hongos, algas, o cualquier organismo unicelular, antes de que estos desarrollen algún mecanismo de defensa. Durante el proceso de tratamiento del agua por seguridad o protección se dispone la utilización de ropa adecuada, guantes, protección para los ojos. En caso de que se trabaje con el equipo a la altura de pecho se debe usar un delantal de caucho y protección para el rostro (CUSSON, 2014; Fabeiro, 2018).

2.2.1.1. Método de tratamiento

Hay que recordar que durante el tratamiento por seguridad o protección se dispone la utilización ropa adecuada, guantes, protección para los ojos, delantal de caucho y protección para el rostro. Una vez se cuente con las seguridades necesarias se proceda a realizar el tratamiento con los siguientes pasos:

1. Abrir ambas válvulas de control del pozo y levante por completo la tubería de rebose en los tanques de cabecera. Dejar un tiempo para que la mayor parte del agua en la arena se drene del tanque.
2. Agregar 35 ml de desinfectante al tanque de agua (concentración recomendada de 1:10000 partes por volumen) y mezcle para dispersar rápidamente el producto químico.
3. Encender las bombas de agua subterránea y de agua de lluvia. Abrir todas las válvulas de control.
4. Permitir que el agua fluya a través del sistema por 15 minutos.

2.2.1.2. Frecuencia del tratamiento

El sistema debe ser tratado cada vez que se llena con agua. La frecuencia de los tratamientos debe ajustarse para limitar la población bacteriana a 10^3 colonias / ml.

Los dispositivos de inmersión para microbiología con TTC están disponibles como un medio para monitorear la población bacteriana de modo que la frecuencia de tratamiento periódico se pueda determinar. El TTC permite visualizar y contar las colonias de bacterias con mayor facilidad a medida que las torna de color marrón rojizo (CUSSON, 2014).

3.6. OPERACIÓN Y TOMAS DE MEDIDAS

La operación del equipo consiste en la operación de bombas, apertura o cierres de válvulas y cambio de condiciones que se detalla a continuación.

3.6.1. OPERACIÓN DE BOMBAS

Dos bombas centrífugas de una sola etapa están ubicadas en el bastidor principal fabricado de acero. Una bomba impulsa el sistema de agua subterránea mientras que la otra bomba impulsa el sistema de agua de lluvia. Las bombas están conectadas por líneas de succión cortas a un tanque de polipropileno de 350 litros que incorpora filtros de succión de gran capacidad. Cada bomba tiene encendido/apagado independiente en la parte frontal de la caja de alimentación eléctrica. Los circuitos de control de velocidad de la bomba utilizan una unidad autónoma de control de ángulo de fase conectada directamente a cada bomba (CUSSON, 2014).

Desde la bomba de agua de lluvia el flujo puede variar en el rango entre 2 a 22 litros/minuto, valores obtenidos en el medidor de flujo de área variable, posteriormente el agua se dirige a las boquillas de pulverización montadas en el bastidor superior. Las boquillas están equipadas con filtros y se suministran con puntas intercambiables para ampliar el rango de simulación de lluvia desde llovizna ligera hasta tormentas fuertes. Las boquillas están dispuestas en cuatro pares y se alimentan a través de cuatro válvulas de bola de cuarto de vuelta (CUSSON, 2014).

Desde la bomba de agua subterránea, el flujo puede ser dirigido por dos válvulas de bola de un cuarto de vuelta a uno o ambos compartimientos de cabecera de los extremos, donde el agua ingresa por medio de tubos multiranurados, donde una placa de control de flujo perforada suaviza el flujo que ingresa al tanque de arena.

Se proporcionan desagües de altura ajustable en cada tanque de cabecera que permite el control de la carga en cada extremo del tanque de arena y, por lo tanto, del gradiente hidráulico a lo largo de él. El desagüe del lado izquierdo alimenta directamente al tanque del polipropileno, mientras que el del lado derecho pasa a un canal para la medición del flujo. El flujo de agua se mide en un vertedero tipo "V" con corte a 20° (CUSSON, 2014).

3.6.2. CAMBIO DE CONDICIONES

El cambio de condiciones se lo realizará antes de iniciar cualquier práctica en el equipo. Si el cambio de condiciones es de frontera se coloca una pantalla impermeable en el lado derecho o de descarga del equipo, simulando así el comportamiento de un acuífero libre y confinado con una barrera impermeable. Para el cambio de acuífero libre a confinado se utilizan los recintos cerrados rectangular, circular o se puede utilizar ambos para simular que los dos pozos se encuentran confinados.

Para el cambio de las condiciones de bombeo continuo pero intensivo se abre la válvula de control de los pozos ajustando a un descenso aproximado respecto a las alturas en los manómetros del ensayo de flujo de agua, los valores de descenso aproximado pueden ser de 50 mm, 100 mm y de 150 mm según el ensayo lo permita. Con una combinación de apertura de las válvulas ya sea solo de la válvula del pozo de la derecha para extracción de agua o de las dos válvulas de los pozos para interacción de conos de depresión.

3.6.3. TOMA DE MEDIDAS

La toma de medidas se realizará en la zona de recarga y de descarga tomando la altura del agua y en todos los manómetros.

3.6.3.1. Tablero de manómetros

En el tablero de manómetros del equipo se obtiene el valor de carga en milímetros para tres manómetros: el manómetro rotulado como *header discharge* y el valor del caudal de extracción de los pozos derecho e izquierdo rotulados como *L/H well*

discharge y *R/H well discharge*. Los valores de carga de estos manómetros han sido calibrados para los tres vertederos tipo "V" con corte a 20° y obtener el caudal de agua. Los vertederos generalmente están diseñados para satisfacer los requisitos de la norma BS3680, para la Medición del flujo de líquido en canales abiertos, sección: Instrumentos y equipos de medición. Los vertederos cumplen con la norma exceptuando que el ancho y la profundidad de los tanques de los vertederos son menores que los valores mínimos generalmente aceptados y que tiene un radio de 3 mm en el vértice para minimizar el error ocasionado por la tensión superficial. Los vertederos han sido calibrados por el proveedor, y este nos proporciona la ecuación y gráfica de calibración de los vertederos (CUSSON, 2014).

$$q = 0.001269 h^{2.353} \quad (3.1)$$

Donde:

q : caudal [$\frac{l}{min}$]

h : carga, altura de columna de agua en manómetro (mm)

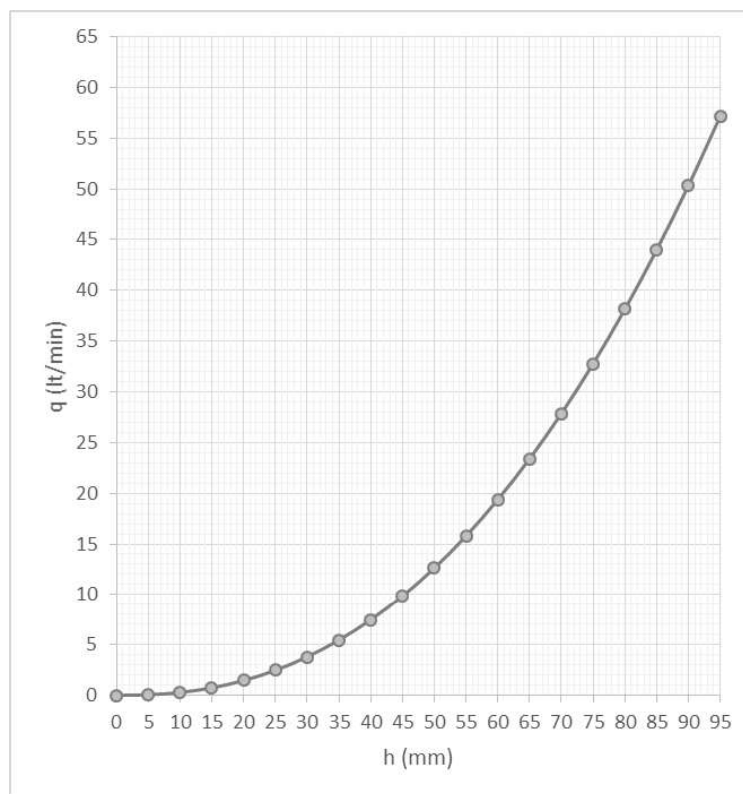


Figura 3.3 Gráfica de calibración de los vertederos

(CUSSON, 2014)

Además de estos manómetros el equipo cuenta con manómetros en el tanque de arena.

3.6.3.2. Manómetros del tanque de arena

El tanque de arena dispone longitudinalmente de 15 tomas de presión y transversalmente de 6 tomas de presión, todas ubicadas a una distancia de 10 cm entre tomas continuas, las presiones se observan en los manómetros de tubo donde se obtiene la carga en el tanque de arena en cada punto que representa una toma de presión. Adicionalmente tiene tomas de presión en los pozos, y el valor de la carga lo muestra el manómetro multitubo correspondiente a cada pozo. Todos los valores se anotan en milímetros (mm) en las hojas de datos desarrolladas para cada práctica. De estos valores se obtiene la red de flujo en el software SURFER.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. GUÍA DE PRÁCTICAS Y REDES DE FLUJO

4.1.1. FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN UN ACUÍFERO LIBRE

4.1.1.1. Objetivo

- Estudiar el flujo de agua subterránea en un acuífero libre.
- Obtener el valor experimental de permeabilidad del material granular que se utiliza en el equipo de hidrología.

4.1.1.2. Preparación del equipo

Preparar el equipo bajo las siguientes especificaciones.

Partes del equipo	Izquierda	Derecha
Pantallas	Permeable	Permeable
Revestimiento de los pozos	Ajustado	Ajustado
Válvulas de control de los pozos	Cerradas	Cerradas
Pendiente del tanque de arena	Nivelada	
Arena	180mm a 200 mm de profundidad, nivelar sobre la base del tanque cuando está seca	
Boquillas	No se usan en este experimento	
Válvulas de suministro de boquilla	Cerradas	
Válvulas de suministro del tanque de cabecera	Cerradas	Cerradas
Altura de la tubería de rebose en el tanque de cabecera	20 mm bajo el nivel de la arena	Completamente bajo

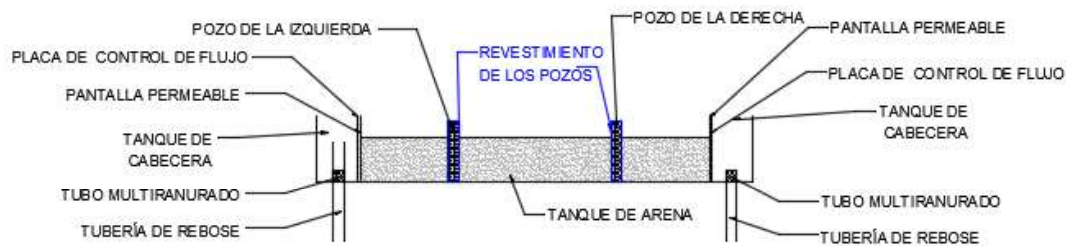


Figura 4.1 Esquema del equipo para el ensayo de flujo de agua en acuífero libre

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.1.3. Procedimiento experimental

1. Encender la bomba de agua subterránea.
2. Abrir la válvula de suministro del tanque de cabecera de la izquierda permitiendo que el flujo llene este tanque y exista un pequeño exceso del flujo el cual fluirá por la tubería de rebose.
3. Mirar los manómetros del tanque de arena para observar el avance de la superficie freática a través del tanque de arena. Si es necesario, primero desenganchar cada tubo en orden empezando desde el final, bajándolo hasta que el agua fluya y volver a colocar el tubo en su lugar.
4. Permitir que el sistema funcione durante un período de tiempo para establecer condiciones de estado permanente.
5. Registraren la hoja de datos de la práctica las lecturas del manómetro de descarga y toda la lectura de los manómetros del tanque de arena.

4.1.1.4. Resultados y Análisis

1. Determinar la tasa de flujo de aguas subterráneas Q de la lectura del manómetro de vertedero y la curva de calibración del vertedero, aplicando la ecuación (3.1).
2. Trazar la gráfica de las lecturas del manómetro h frente a la distancia x , de la gráfica y calcular o medir la pendiente dh / dx en cada manómetro.
3. Determinar la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad a partir de la ecuación (2.21), o de la misma ecuación adaptada en función del área y expresada en la ecuación (4.1).

$$K = \frac{Q}{A \left(\frac{dh}{dx} \right)} \quad (4.1)$$

Donde:

K : Conductividad hidráulica

A : Área

$\frac{dh}{dx}$: Pendiente de la gráfica h vs x, gradiente hidráulico

4.1.1.5. Hoja de datos

Escuela Politécnica Nacional
 Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental
 Laboratorio Docente de hidráulica
 Equipo de Hidrología P6530

Práctica: _____ FECHA: _____

Carga de descarga: _____ mm

Lecturas del manómetro

h mm	Gradiente hidráulico dh/dx	$K=Q/A(dh/dx)$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

Observaciones:

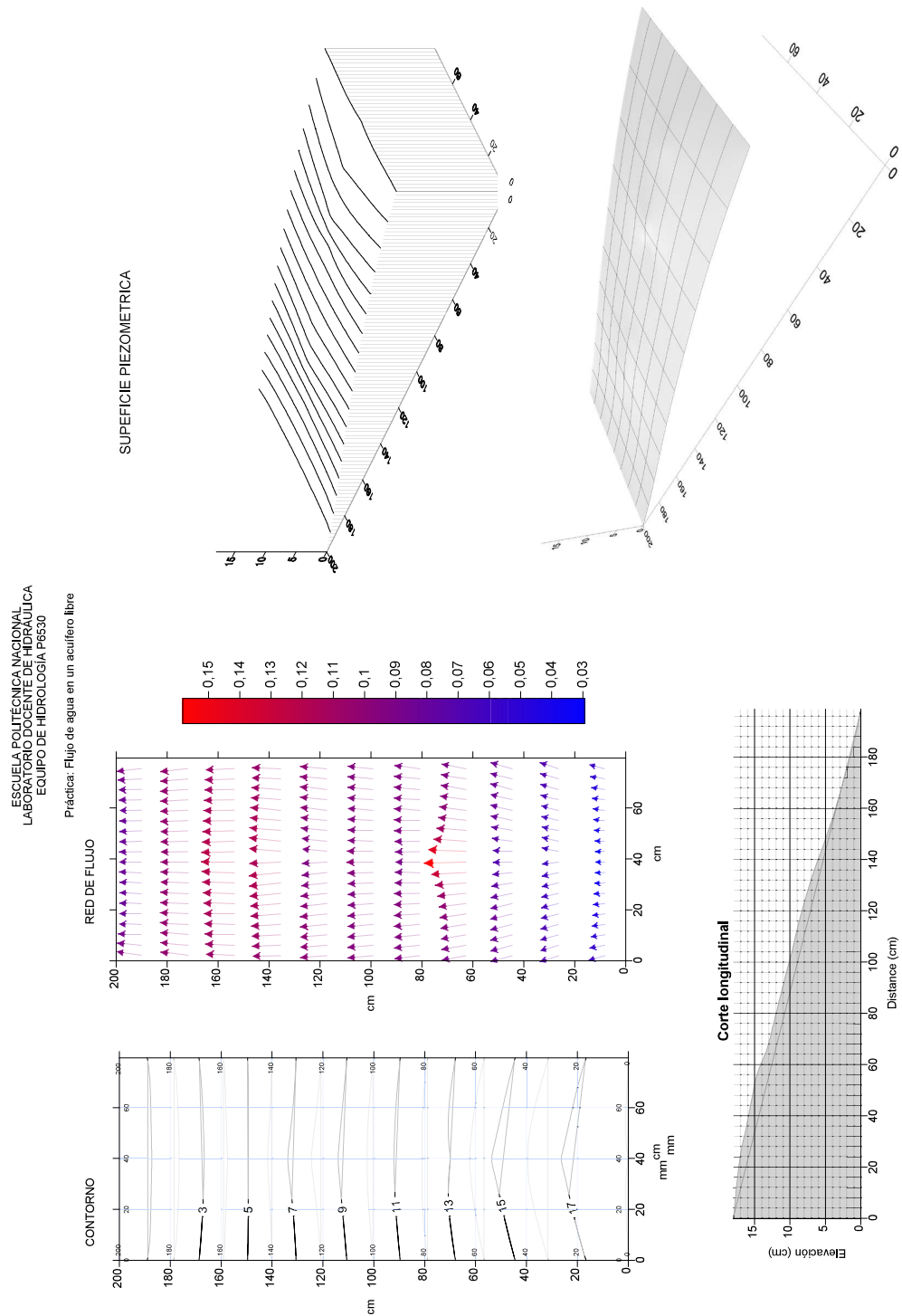


Figura 4.2 Resultados del ensayo de flujo de agua en acuífero libre.

El ANEXO 5 contiene los datos de la práctica.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.2. FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN UN ACUÍFERO CONFINADO

4.1.2.1. Objetivo

- Estudiar el flujo de agua subterránea en un acuífero confinado de planta circular y de planta rectangular.

4.1.2.2. Preparación del equipo

Preparar el aparato bajo las siguientes especificaciones.

Partes del Equipo	Izquierda	Derecha
Pantallas	Permeable	Permeable
Revestimiento de los pozos	Ajustado	Ajustado
Válvulas de control de los pozos	Cerradas	Cerradas
Pendiente del tanque de arena	Nivelada	
Arena	180 mm a 200 mm de profundidad, nivelada a la base del tanque, seca Excavar a una profundidad de 50 mm alrededor del pozo de la derecha y colocar el recinto cerrado concéntricamente alrededor del pozo. Asegurarse que la base del accesorio se encuentre paralela a la base del tanque. Añadir pesos al accesorio para evitar que flote.	
Boquillas	No se usan en este experimento	
Válvulas de suministro de boquilla	Cerradas	
Válvulas de suministro del tanque de cabecera	Cerradas	Cerradas
Altura de la tubería de rebose en el tanque de cabecera	20 mm bajo el nivel de la arena	20 mm bajo el nivel de la arena

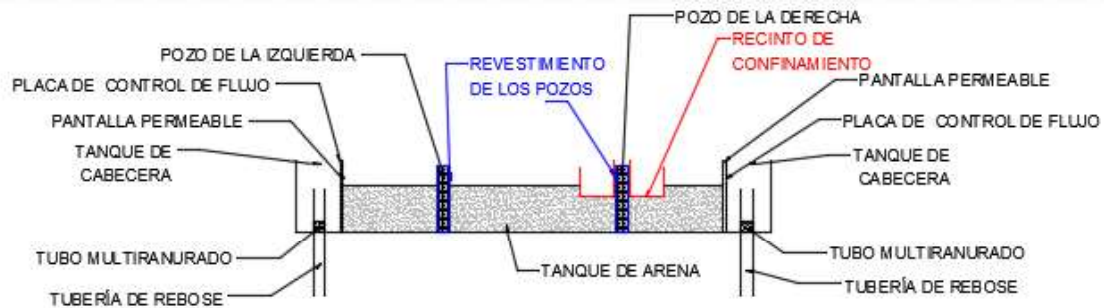


Figura 4.3 Esquema del equipo para el ensayo de flujo de agua en acuífero confinado.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.2.3. Procedimiento experimental

1. Encender la bomba de flujo de agua subterránea y mantener un flujo que no genere escorrentía superficial.
2. Abrir las dos válvulas de suministro del tanque de cabecera y ajustar la velocidad de la bomba para llenar los dos tanques de cabecera con un pequeño flujo de agua en exceso hacia cada tubería de rebose.
3. Esperar hasta que los manómetros del tanque de arena indican que este tanque está saturado con una superficie de nivel freático. Observar como aumenta el nivel de agua por el tubo central del recinto. Esperar a que los manómetros tengan un nivel estable.
4. Abrir con cuidado la válvula de control de la derecha manteniendo el nivel de agua en el tubo central en el rango de observación (esto garantiza que la arena bajo el recinto en la región del pozo permanezca saturada).
5. Registrar las lecturas de la placa de manómetros de vertederos y de los manómetros del tanque de arena en la hoja de datos de la práctica del ANEXO 4.

4.1.2.4. Resultados y Análisis

1. Trazar gráficos para mostrar la forma de la superficie piezométrica a partir de los datos tomados.

2. Calcular la velocidad de descarga con ecuación de la curva de calibración del vertedero, ecuación (3.1) y compara con el valor teórico de la ecuación (2.26)

4.1.2.5. Redes de flujo

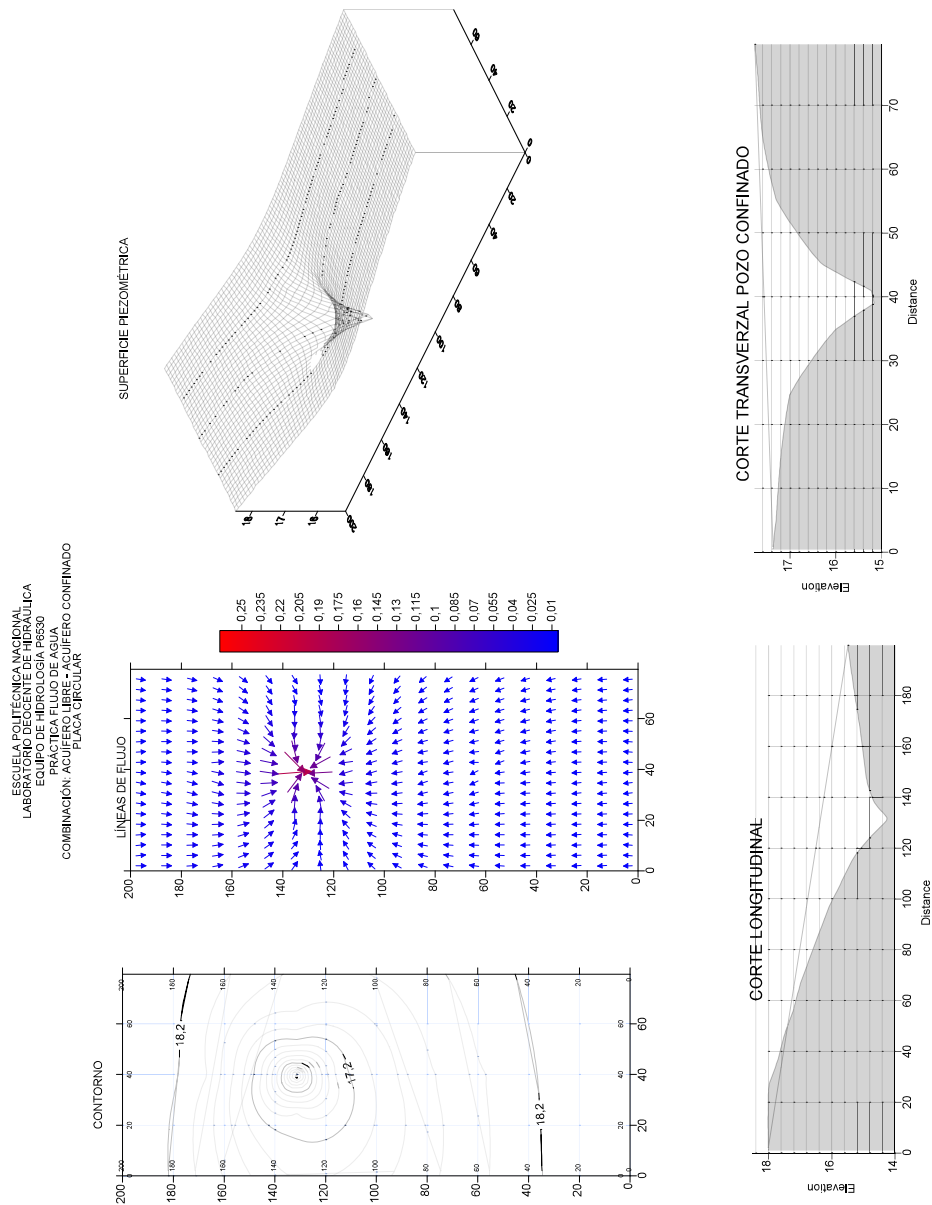


Figura 4.4 Resultados del ensayo de flujo de agua en acuífero confinado. Placa circular.

El ANEXO 9 contiene los datos de la práctica.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

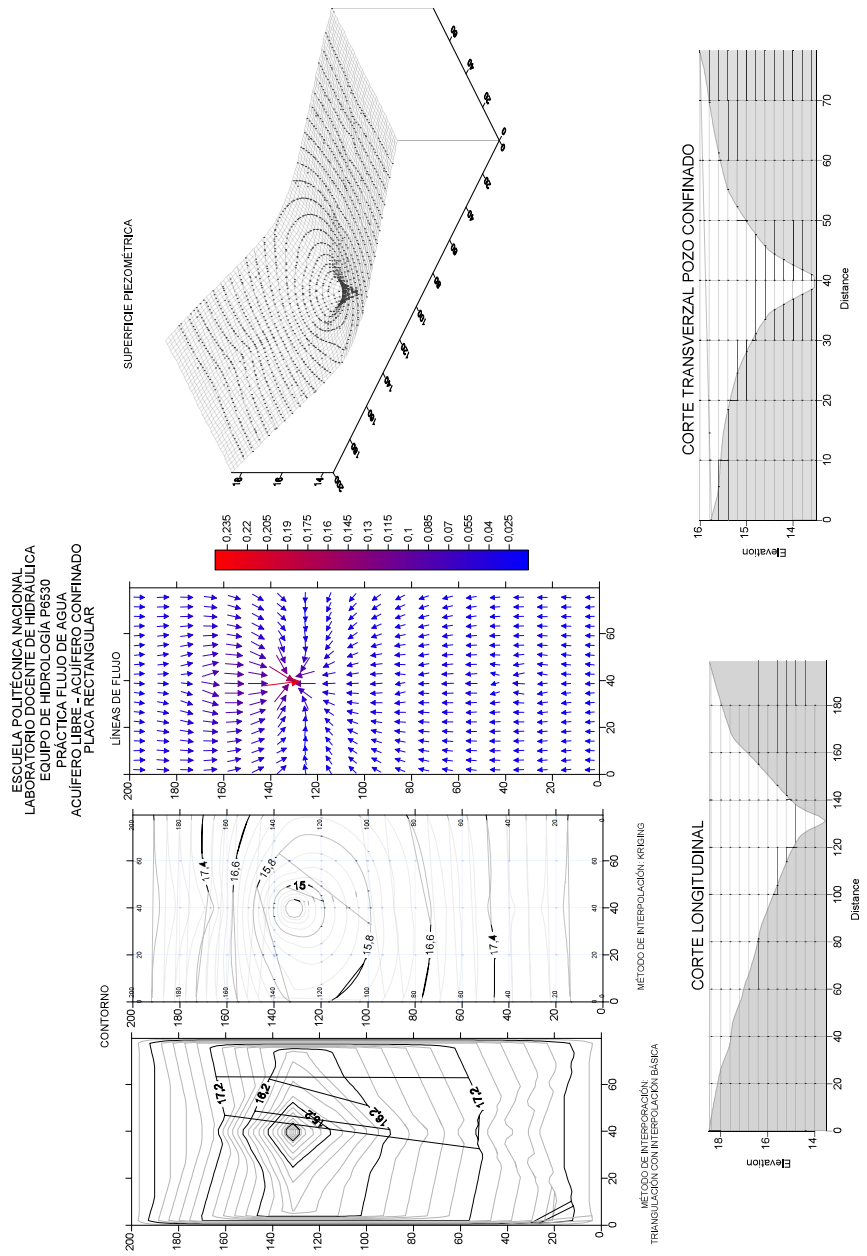


Figura 4.5 Resultados del ensayo de flujo de agua en acuífero confinado. Placa rectangular. El ANEXO 7 contiene los datos de la práctica.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.3. EXTRACCIÓN DE AGUA DE UN ACUÍFERO LIBRE

4.1.3.1. Objetivo

- Estudiar la extracción de agua subterránea en un acuífero libre.

4.1.3.2. Preparación del equipo

Preparar el equipo bajo las siguientes especificaciones.

Partes del equipo	Izquierda	Derecha
Pantallas	Permeable	Permeable
Revestimiento de los pozos	Ajustado	Ajustado
Válvulas de control de los pozos	Cerradas	Cerradas
Pendiente del tanque de arena	Nivelada	
Arena	180 mm a 200 mm de profundidad, nivelar la base del tanque, seca	
Boquillas	No se usan en este experimento	
Válvulas de suministro de boquilla	Cerradas	
Válvulas de suministro del tanque de cabecera	Cerradas	Cerradas
Altura de la tubería de rebose en el tanque de cabecera	20 mm bajo el nivel de la arena	20 mm bajo el nivel de la arena

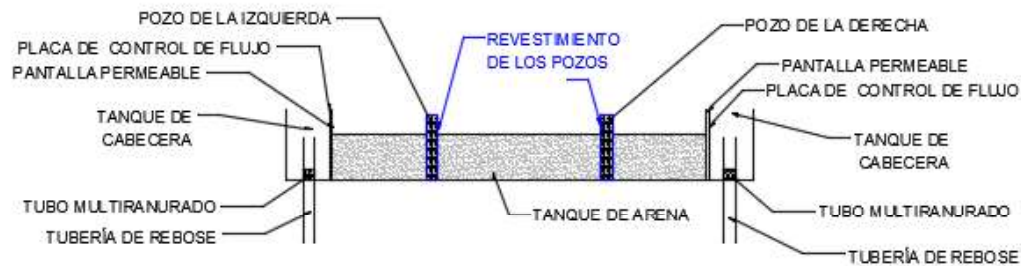


Figura 4.6 Esquema del equipo para el ensayo de extracción de agua en acuífero libre.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.3.3. Procedimiento experimental

1. Encender la bomba de agua de flujo subterráneo.
2. Abrir las dos válvulas de suministro del tanque de cabecera y ajustar el flujo de agua para llenar los dos depósitos dejando un pequeño flujo de agua en exceso para cada tubería de rebose.
3. Esperar hasta que los manómetros del tanque de arena indiquen que el tanque de arena está saturado con una superficie de nivel freático.
4. Abrir con cuidado la válvula de control del pozo de la derecha y ajustar su abertura para lograr extraer aproximadamente 50 mm.
5. Esperar hasta que las lecturas se estabilicen para todos los manómetros del tanque de arena. Registrar las lecturas del manómetro del vertedero de control del pozo de la derecha y todas las lecturas de los manómetros del tanque de arena en la hoja de datos de la práctica, ANEXO 4.
6. Aumentar la apertura de la válvula de control de la derecha para obtener un descenso de 100 mm aproximadamente. Cuando el flujo se haya estabilizado registrar las lecturas de los manómetros del vertedero de control del pozo de la derecha y todas las lecturas de los manómetros del tanque de arena.
7. Si es necesario repetir el procedimiento para valores de descenso de 150 mm y 200 mm aproximadamente.

4.1.3.4. Cálculos

1. Determinar la tasa de extracción, Q , de la lectura del manómetro y la curva de calibración y compare con el valor teórico obtenido con la ecuación (2.45)

y el valor de K_p obtenido en la práctica de flujo de agua subterránea en un acuífero libre.

2. Usar la ecuación (2.45) para determinar la forma teórica de la superficie freática y comparar con los valores experimentales.
3. Calcular el radio de influencia utilizando la ecuación (2.45).

4.1.3.5. Redes de flujo

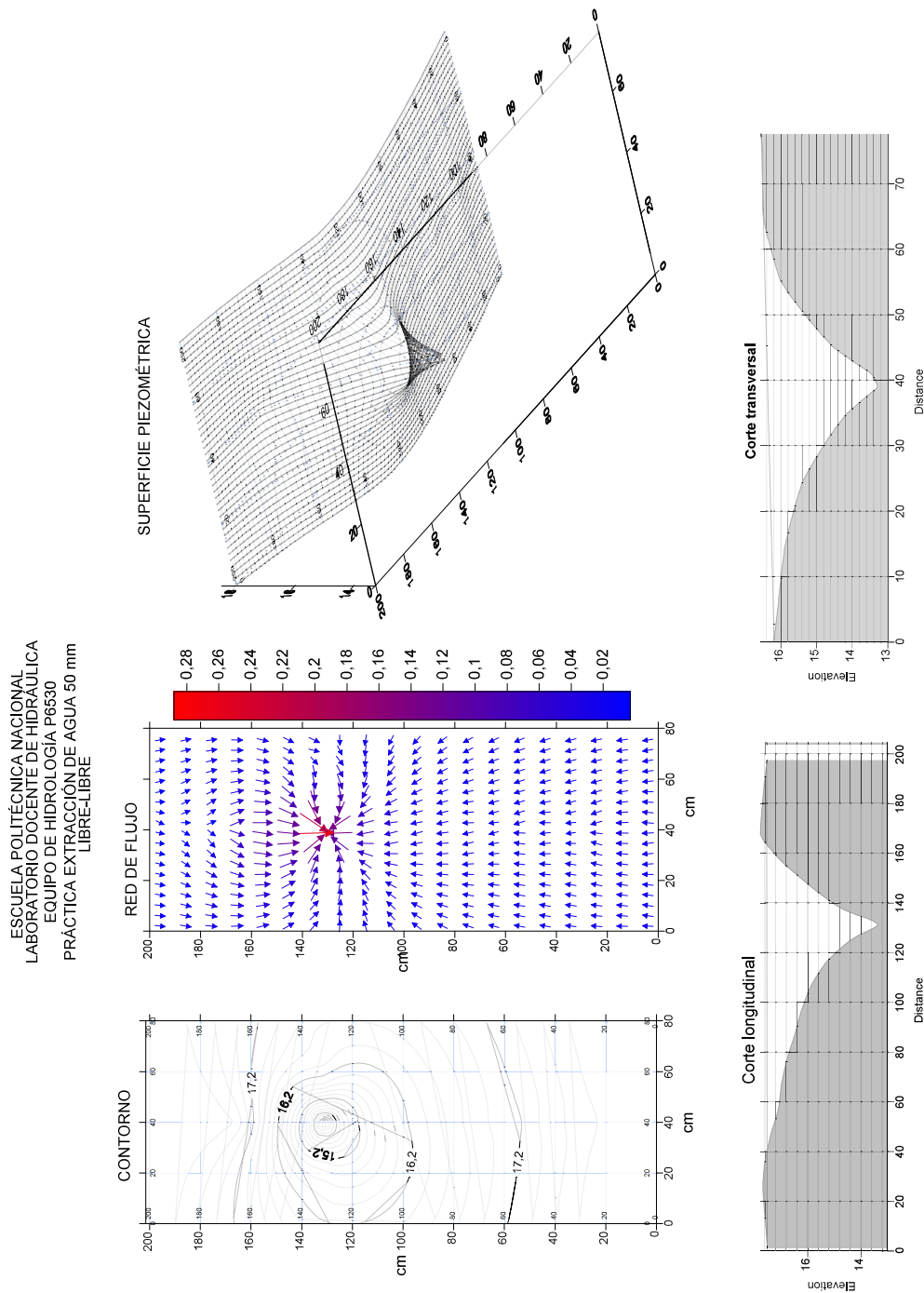


Figura 4.7 Resultados del ensayo de extracción de agua en un acuífero libre, descenso aproximado de 50 mm.

El ANEXO 5 contiene la tabla de valores.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

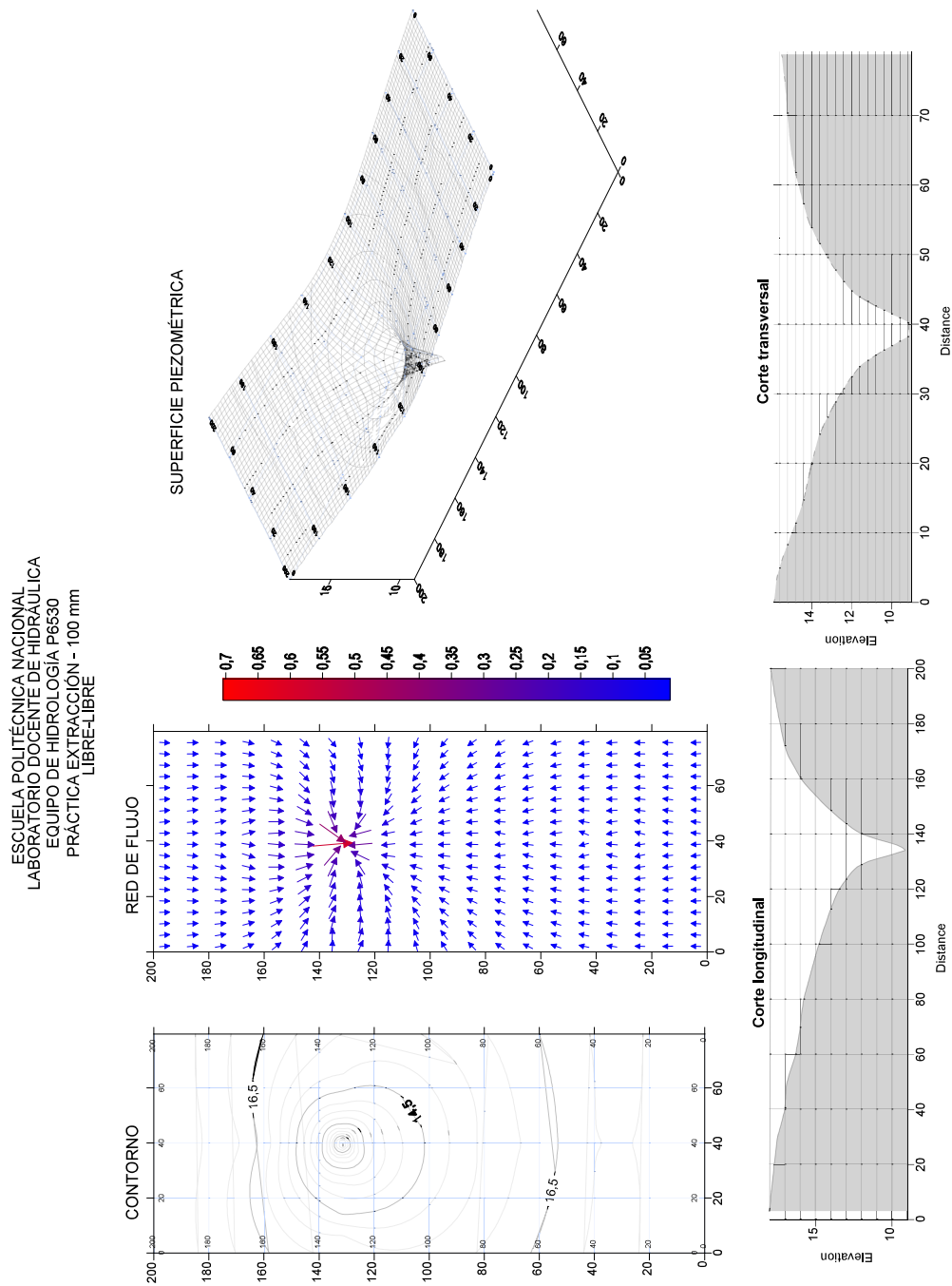


Figura 4.8 Resultados del ensayo de extracción de agua en un acuífero libre, descenso aproximado de 100 mm.

El ANEXO 5 contiene la tabla de valores.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

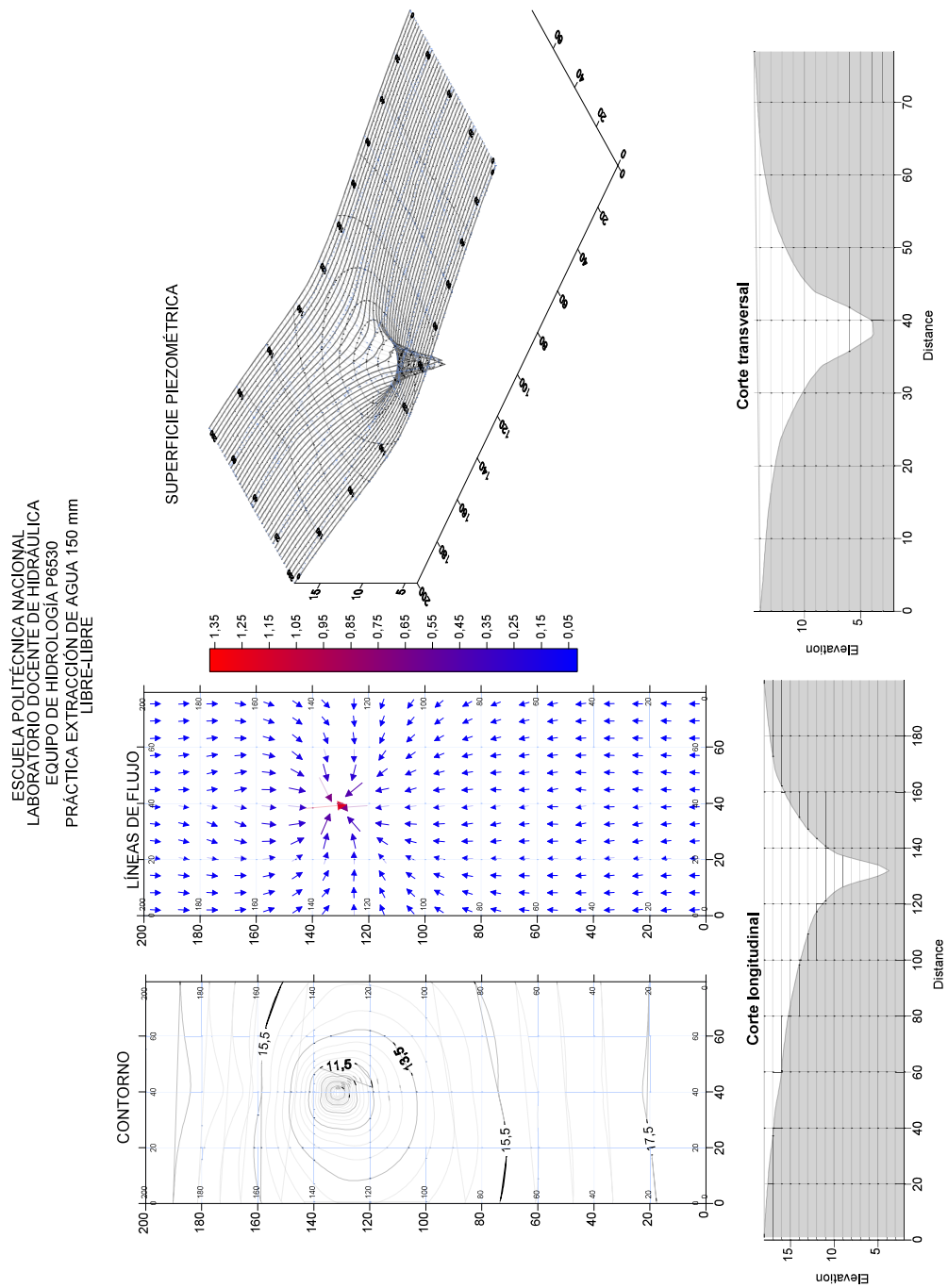


Figura 4.9 Resultados del ensayo de extracción de agua en un acuífero libre, descenso aproximado de 150 mm.

El ANEXO 5 contiene la tabla de valores.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.4. EXTRACCIÓN DE AGUA DE UN ACUÍFERO CONFINADO

4.1.4.1. Objetivo

- Estudiar la extracción de agua subterránea en un acuífero confinado.

4.1.4.2. Preparación del equipo

Preparar el equipo bajo las siguientes especificaciones.

Partes del equipo	Izquierda	Derecha
Pantallas	Permeable	Permeable
Revestimiento de los pozos	Ajustado	Ajustado
Válvulas de control de los pozos	Cerradas	Cerradas
Pendiente del tanque de arena	Nivelada	
Arena	180 mm a 200 mm de profundidad, nivelada a la base del tanque, seca Excavar a una profundidad de 50 mm alrededor del pozo de la derecha y colocar el recinto cerrado circular o rectangular concéntricamente alrededor del pozo. Asegurarse que la base del accesorio se encuentre paralelo a la base del tanque. Añadir pesos al accesorio para evitar que flote.	
Boquillas	No se usan este experimento	
Válvulas de suministro de boquilla	Cerradas	
Válvulas de suministro del tanque de cabecera	Cerradas	Cerradas
Altura del tubo en el tanque de cabecera	20 mm bajo el nivel de la arena	20 mm bajo el nivel de la arena

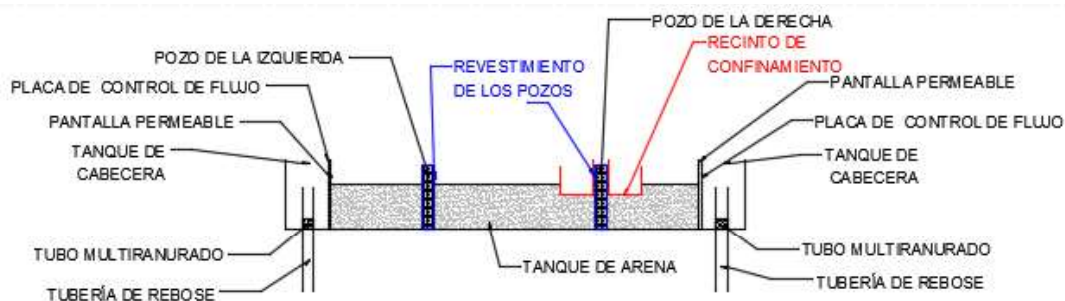


Figura 4.10 Esquema del equipo para el ensayo de extracción de agua en acuífero confinado.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.4.3. Procedimiento experimental

1. Repetir el proceso experimental de la práctica de flujo de agua en un acuífero confinado.
2. Abrir con cuidado la válvula de control del pozo de la derecha y ajustar su abertura para lograr extraer aproximadamente 50 mm a partir del valor de manómetro del pozo en la práctica de flujo de agua en un acuífero confinado.
3. Esperar hasta que las lecturas se estabilicen para todos los manómetros del tanque de arena. Registre las lecturas del manómetro del vertedero de control del pozo de la derecha y todas las lecturas de los manómetros del tanque de arena.
4. Aumentar la apertura de la válvula de control de la derecha para obtener un descenso de 100 mm aproximadamente. Cuando el flujo se haya estabilizado registrar las lecturas de los manómetros del vertedero de control del pozo de la derecha y todas las lecturas de los manómetros del tanque de arena en la hoja de datos de la práctica, ANEXO 4.
5. Si es necesario repetir el procedimiento para valores de descenso de 150 mm y 200 mm aproximadamente.

4.1.4.4. Cálculos

1. Determinar la tasa de extracción Q , de la lectura del manómetro y la curva de calibración y comparar con el valor teórico obtenido con la ecuación

(2.48), y el valor de K_p obtenido en la práctica de flujo de agua subterránea en un acuífero libre.

2. Usar la ecuación (2.48) para determinar la forma teórica de la superficie freática y comparar con los valores experimentales.
3. Calcular el radio de influencia usando la ecuación (2.48).

4.1.4.5. Redes de Flujo

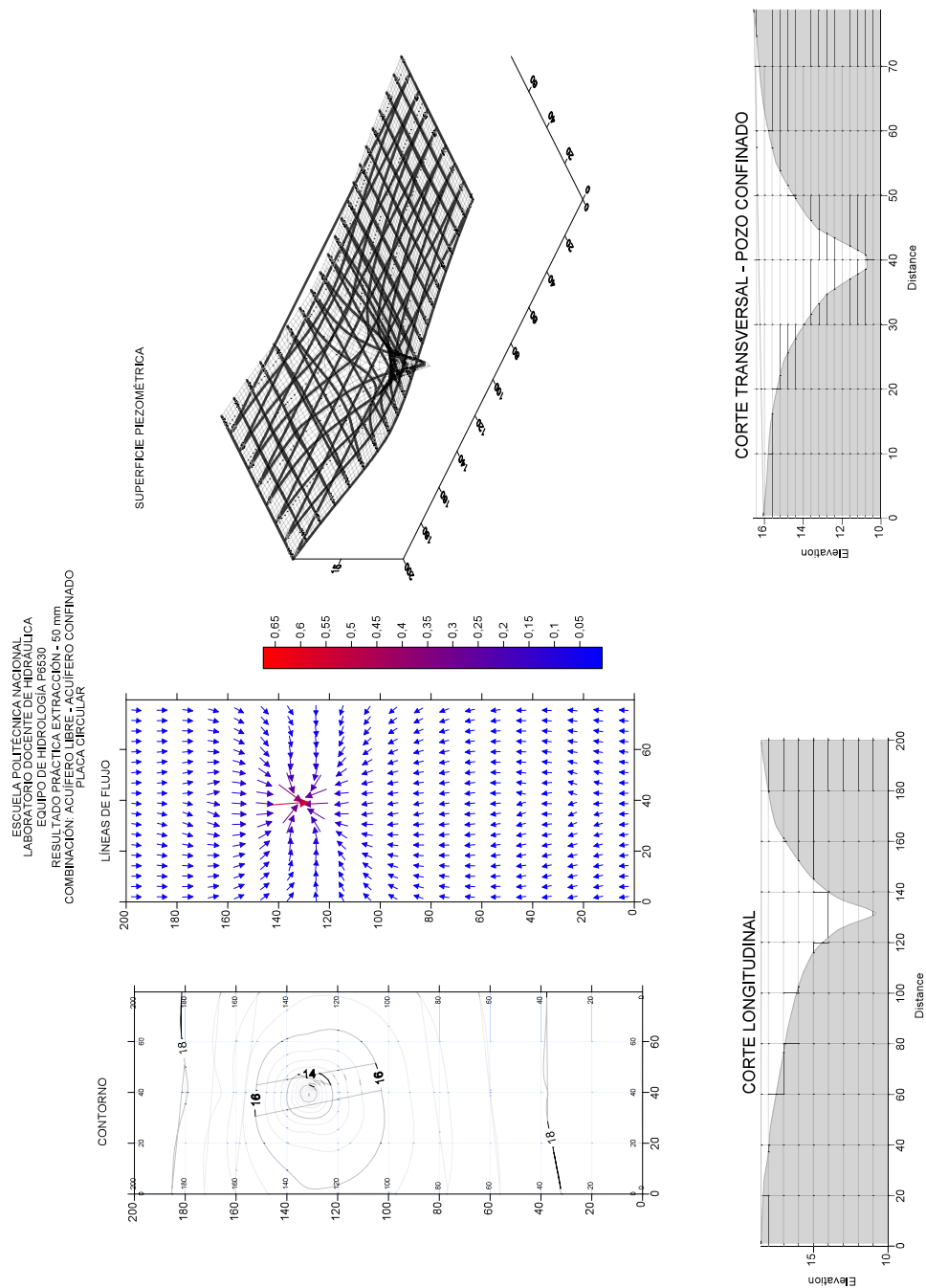


Figura 4.11 Resultados del ensayo de extracción de agua en acuífero confinado con placa circular, descenso aproximado 50 mm.

El ANEXO 6 contiene los datos de la práctica.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

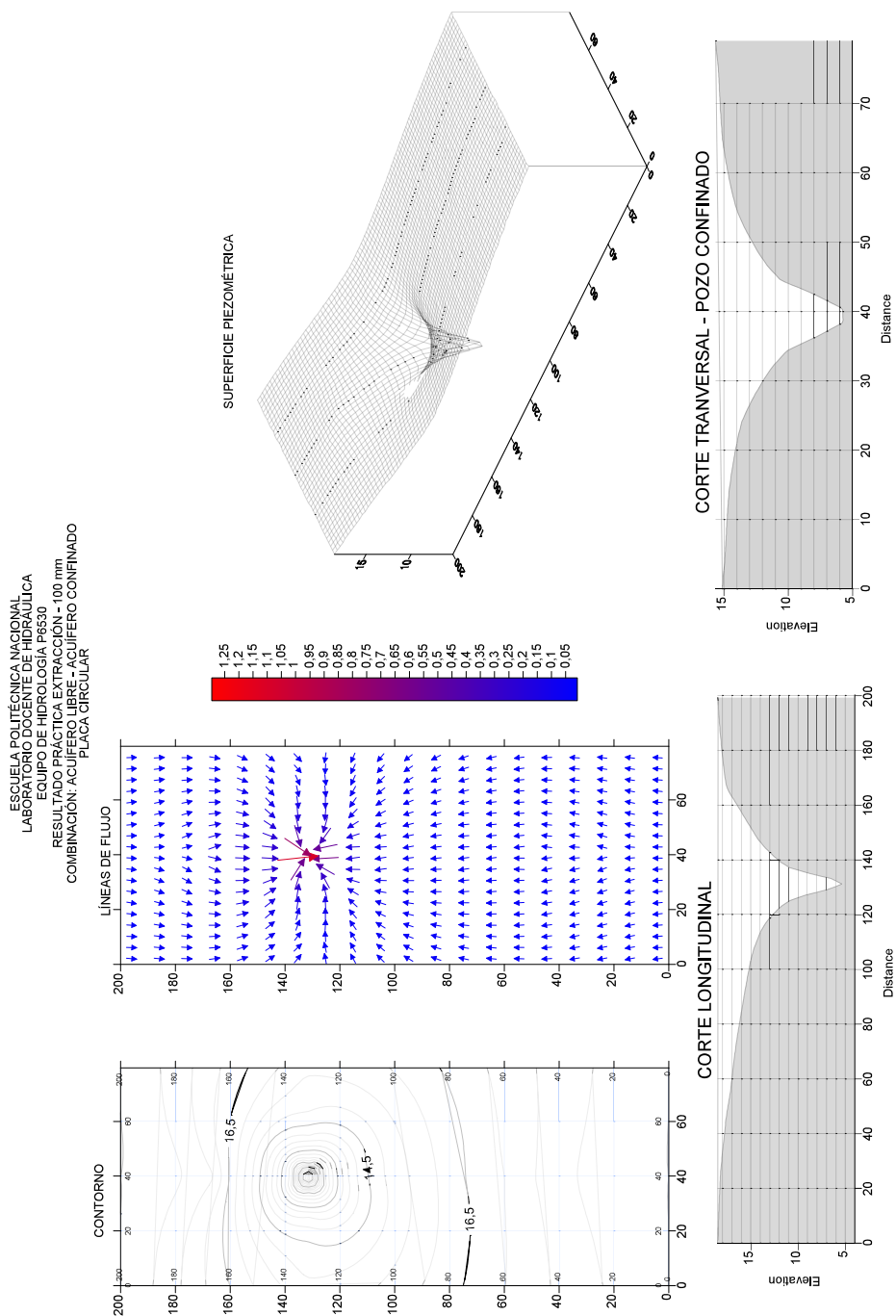


Figura 4.12 Resultados del ensayo de extracción de agua en acuífero confinado con placa circular, descenso aproximado 100 mm.

El ANEXO 7 contiene los datos de la práctica.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.5. INTERACCIÓN DE LOS CONOS DE DESCENSO DE UN POZO EN UN ACUÍFERO LIBRE

4.1.5.1. Objetivo

- Investigar la interacción de los conos de depresión para dos pozos que se comportan hidráulicamente como libres y se encuentran en estrecha proximidad.

4.1.5.2. Preparación del equipo

Preparar el equipo bajo las siguientes especificaciones.

Partes del equipo	Izquierda	Derecha
Pantallas	Permeable	Permeable
Revestimiento de los pozos	Ajustado	Ajustado
Válvulas de control de los pozos	Cerradas	Cerradas
Pendiente del tanque de arena	Nivelada	
Arena	180 mm a 200 mm de profundidad, nivelada a la base del tanque, seca	
Boquillas	No se usan este experimento	
Válvulas de suministro de boquilla	Cerradas	
Válvulas de suministro del tanque de cabecera	Cerradas	Cerradas
Altura de la tubería de rebose en el tanque de cabecera	20 mm bajo el nivel de la arena	20 mm bajo el nivel de la arena

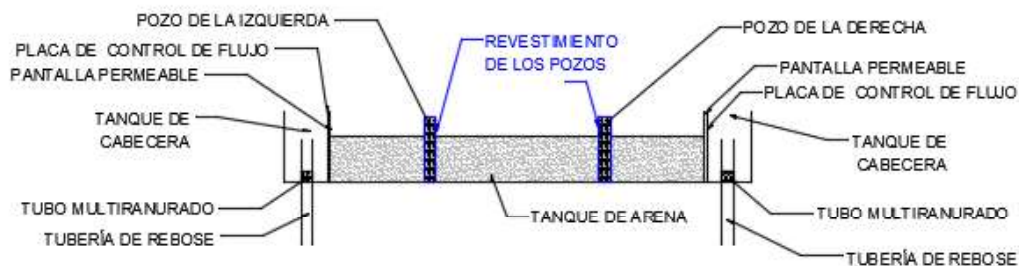


Figura 4.13. Esquema del equipo para el ensayo de interacción de cono de descenso en acuífero libre.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.5.3. Procedimiento experimental

1. Encender la bomba de agua de flujo subterránea.
2. Abrir las dos válvulas de suministro del tanque de cabecera y dejar un pequeño flujo de agua en exceso hacia cada tubería de rebose.
3. Esperar hasta que los manómetros del tanque de arena indiquen que este tanque está saturado con una superficie de nivel freático.
4. Abrir con cuidado las válvulas de control de los dos pozos para lograr un descenso aproximadamente de 50 mm en cada pozo.
5. Esperar hasta que las lecturas se estabilicen para todos los manómetros del tanque de arena. Registrar las lecturas de los manómetros de vertedero de control del pozo de la derecha, de la izquierda y todas las lecturas de los manómetros del tanque de arena en la hoja de datos de la práctica, ANEXO 4.
6. Aumentar la apertura de la válvula de control de la derecha para obtener un descenso de 100 mm aproximadamente. Cuando las lecturas de los manómetros del tanque se estabilicen, registrar las lecturas de los manómetros del vertedero de control del pozo de la derecha y todas las lecturas de los manómetros del tanque de arena.
7. Si es necesario repetir el procedimiento para valores de descenso de 150 mm y 200 mm aproximadamente.

4.1.5.4. Cálculos

1. Determinar los caudales de extracción de cada pozo a partir de la lectura de los manómetros del vertedero de los pozos y la ecuación de la curva de calibración del vertedero, ecuación (3.1).
2. Obtener la gráfica de la superficie freática de los valores medidos por los tubos manométricos y comparar con los resultados obtenidos en la práctica de extracción de agua de un acuífero libre.

4.1.5.5. Redes de flujo

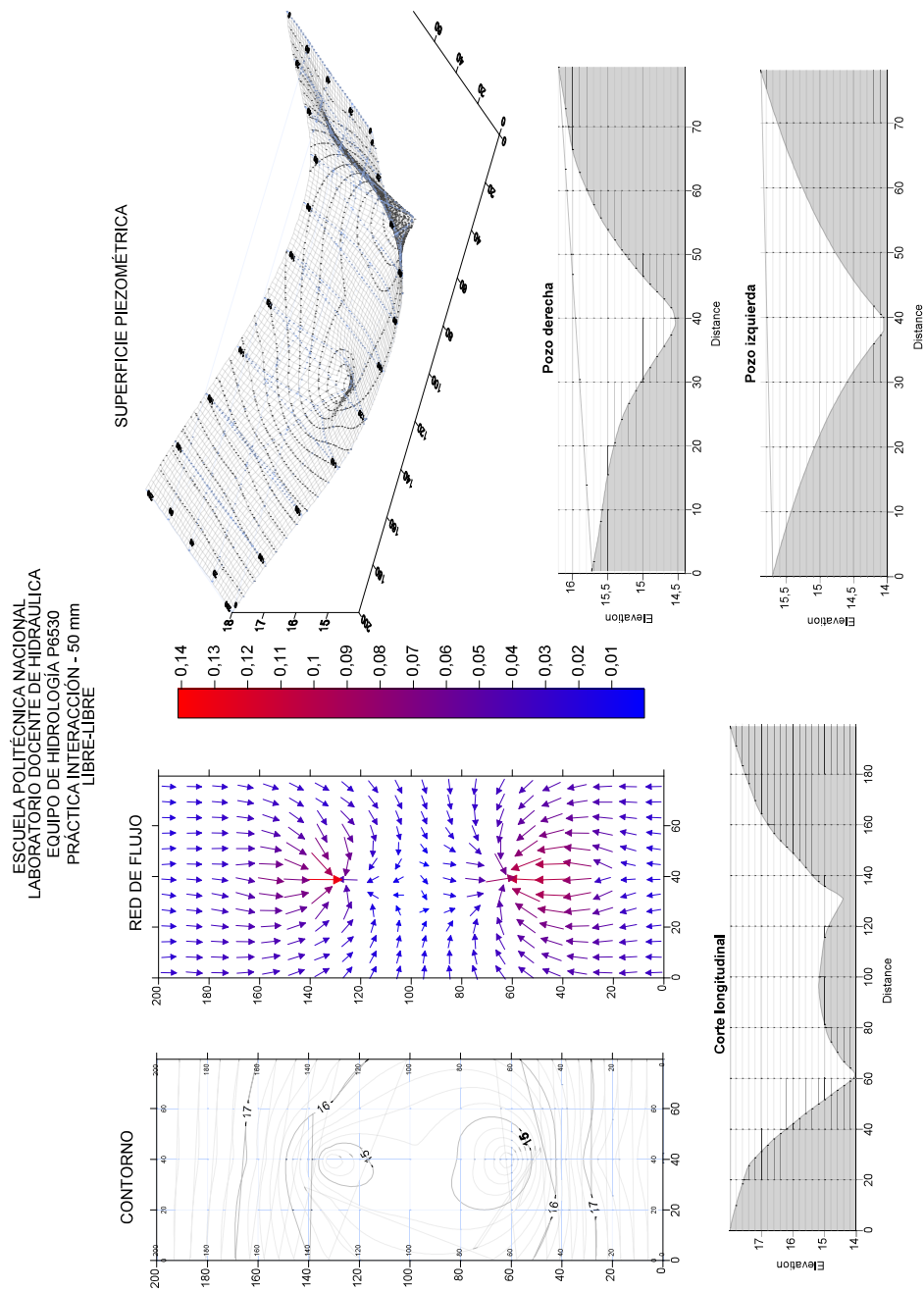


Figura 4.14 Resultados del ensayo de interacción de agua en un acuífero libre, descenso aproximado de 50 mm.

El ANEXO 4 contiene la tabla de valores.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 LABORATORIO DOCENTE DE HIDRÁULICA
 EQUIPO DE HIDROLOGÍA P6530
 PRÁCTICA INTERACCIÓN DE AGUA LIBRE-LIBRE

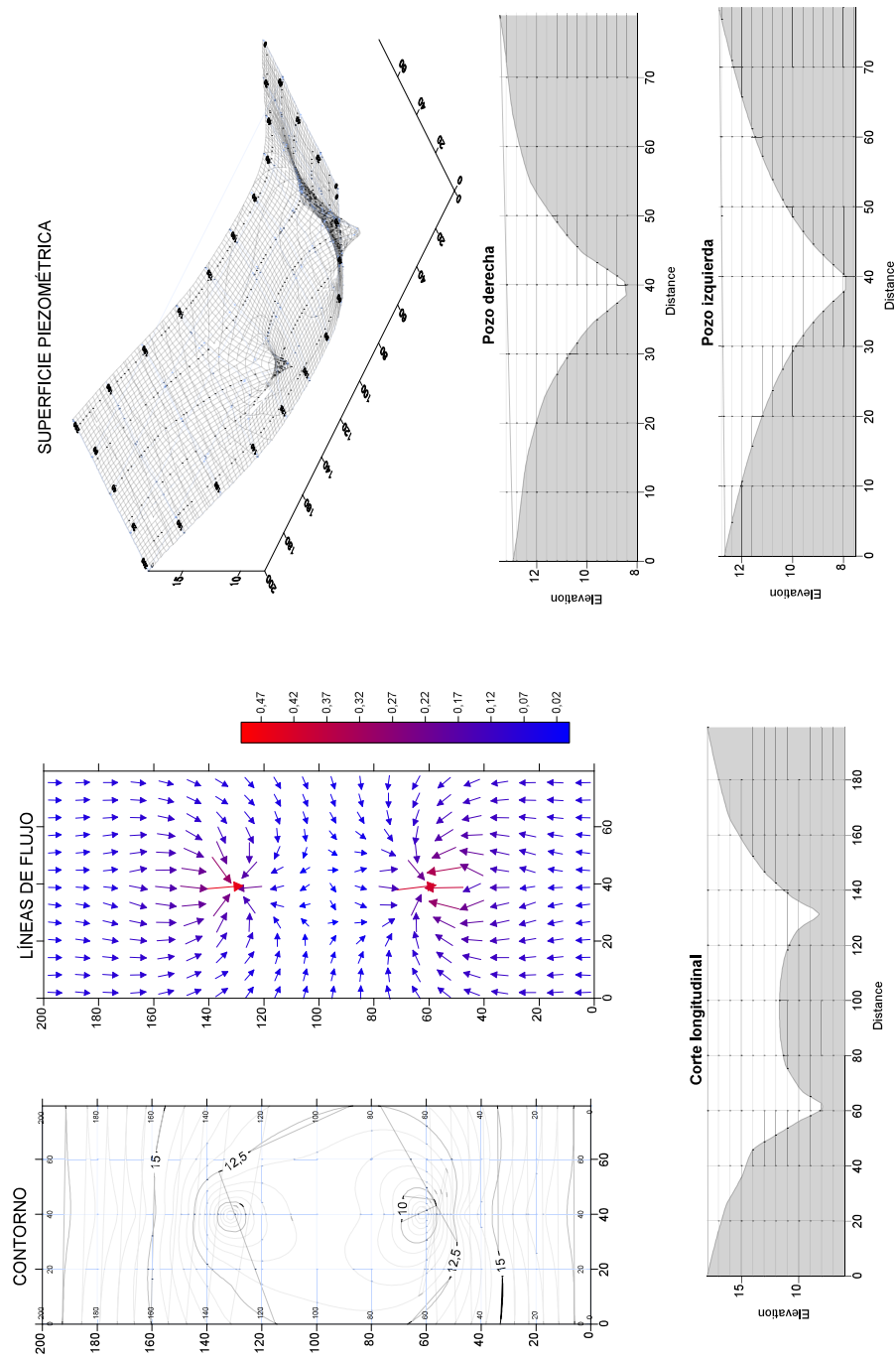


Figura 4.15 Resultados del ensayo de extracción de agua en un acuífero libre, descenso aproximado de 100 mm.

El ANEXO 4 contiene la tabla de valores.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

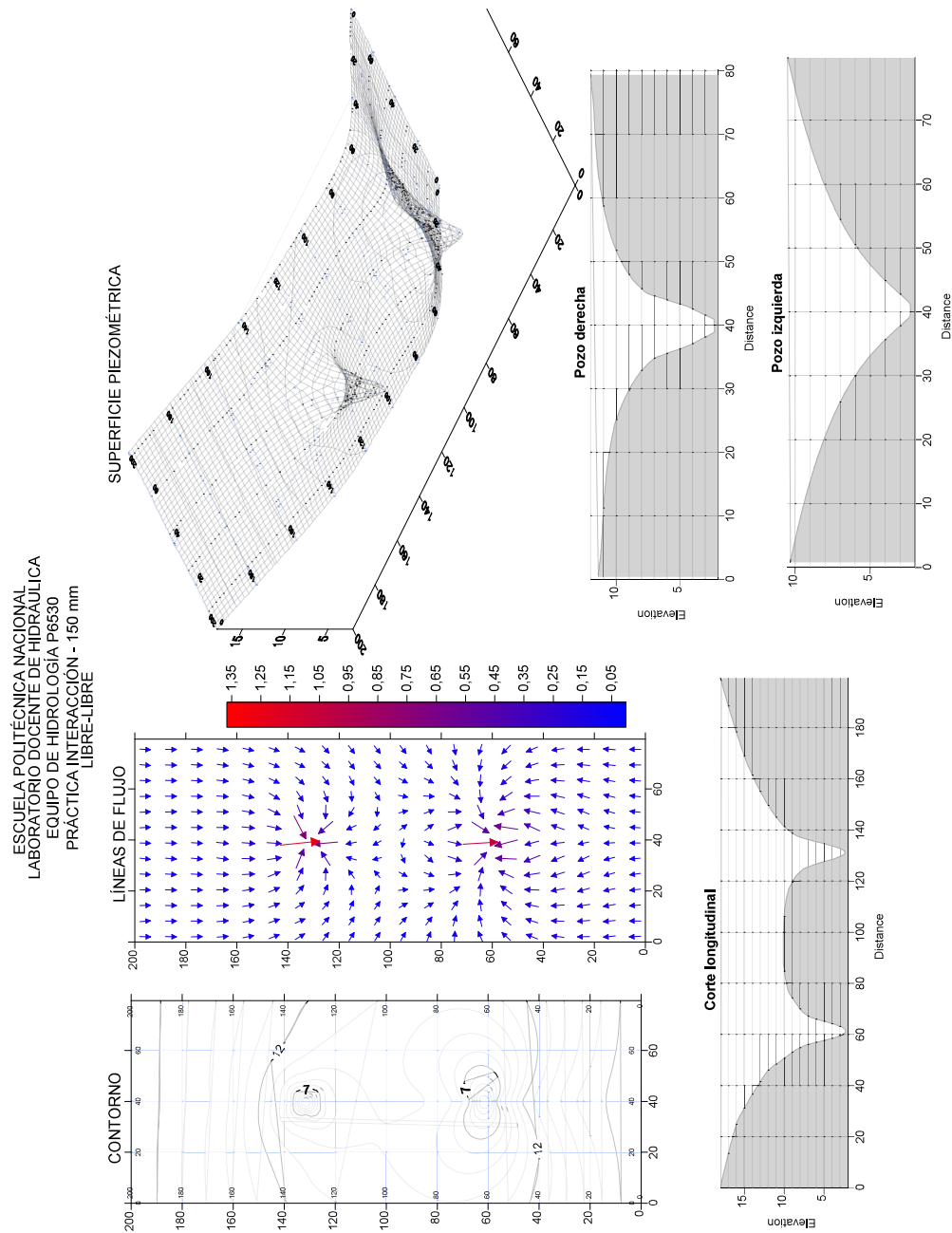


Figura 4.16 Resultados del ensayo de interacción en un acuífero libre, descenso aproximado de 150 mm.

El ANEXO 4 contiene la tabla de valores.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.6. INTERACCIÓN DE LOS CONOS DE DESCENSO DE UN POZO EN ACUÍFERO UN CONFINADO

4.1.6.1. Objetivo

- Investigar la interacción de los conos de descenso para dos pozos en un acuífero libre-confinado en estrecha proximidad entre sí.

4.1.6.2. Preparación del equipo

Preparar el equipo bajo las siguientes especificaciones.

Partes del equipo	Izquierda	Derecha
Pantallas	Permeable	Permeable
Revestimiento de los pozos	Ajustado	Ajustado
Válvulas de control de los pozos	Cerradas	Cerradas
Pendiente del tanque de arena	Nivelada	
Arena	180 mm a 200 mm de profundidad, nivelada a la base del tanque, seca Excavar a una profundidad de 50 mm alrededor del pozo de la derecha y colocar el recinto cerrado circular o rectangular concéntricamente alrededor del pozo. Asegurarse que la base del accesorio se encuentre paralelo a la base del tanque. Añadir pesos al accesorio para evitar que flote.	
Boquillas	No se usan este experimento	
Válvulas de suministro de boquilla	Cerradas	
Válvulas de suministro del tanque de cabecera	Cerradas	Cerradas

Altura de la tubería de rebose en el tanque de cabecera	20 mm bajo el nivel de la arena	20 mm bajo el nivel de la arena
---	---------------------------------	---------------------------------

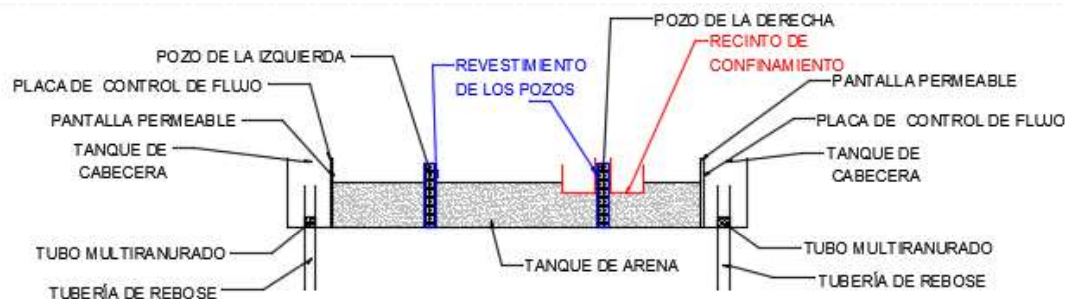


Figura 4.17 Esquema del equipo para el ensayo de interacción de conos

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.6.3. Procedimiento experimental

1. Encender la bomba de agua de flujo subterránea.
2. Abrir las dos válvulas de suministro del tanque de cabecera y dejar un pequeño flujo de agua en exceso hacia cada tubería de rebose.
3. Esperar hasta que los manómetros del tanque de arena indiquen que este tanque está saturado con una superficie de nivel freático.
4. Abrir con cuidado las válvulas de control de los dos pozos para lograr un descenso aproximado de 50 mm en cada pozo.
5. Esperar hasta que las lecturas se estabilicen para todos los manómetros del tanque de arena. Registrar las lecturas de los manómetros de vertedero de control del pozo de la derecha, de la izquierda y todas las lecturas de los manómetros del tanque de arena en la hoja de datos de la práctica, ANEXO 4
6. Aumentar la apertura de la válvula de control de la derecha para obtener un descenso de 100 mm aproximadamente. Cuando las lecturas de los manómetros del tanque de arena estén estabilizadas registrar las lecturas de los manómetros del vertedero de control del pozo de la derecha y todas las lecturas de los manómetros del tanque de arena.
7. Si es necesario repetir el procedimiento para valores de descenso de 150 mm y 200 mm aproximadamente.

4.1.6.4. Cálculos

1. Determinar los caudales de extracción de la derecha y de la izquierda de la lectura de los manómetros del vertedero y la curva de calibración del vertedero, con la ecuación (3.1).
2. Obtener la gráfica de la superficie freática de los valores medidos por los tubos manométricos y comparar con los resultados para la extracción de un solo pozo obtenidos de experimento 4.

4.1.6.5. Redes de flujo

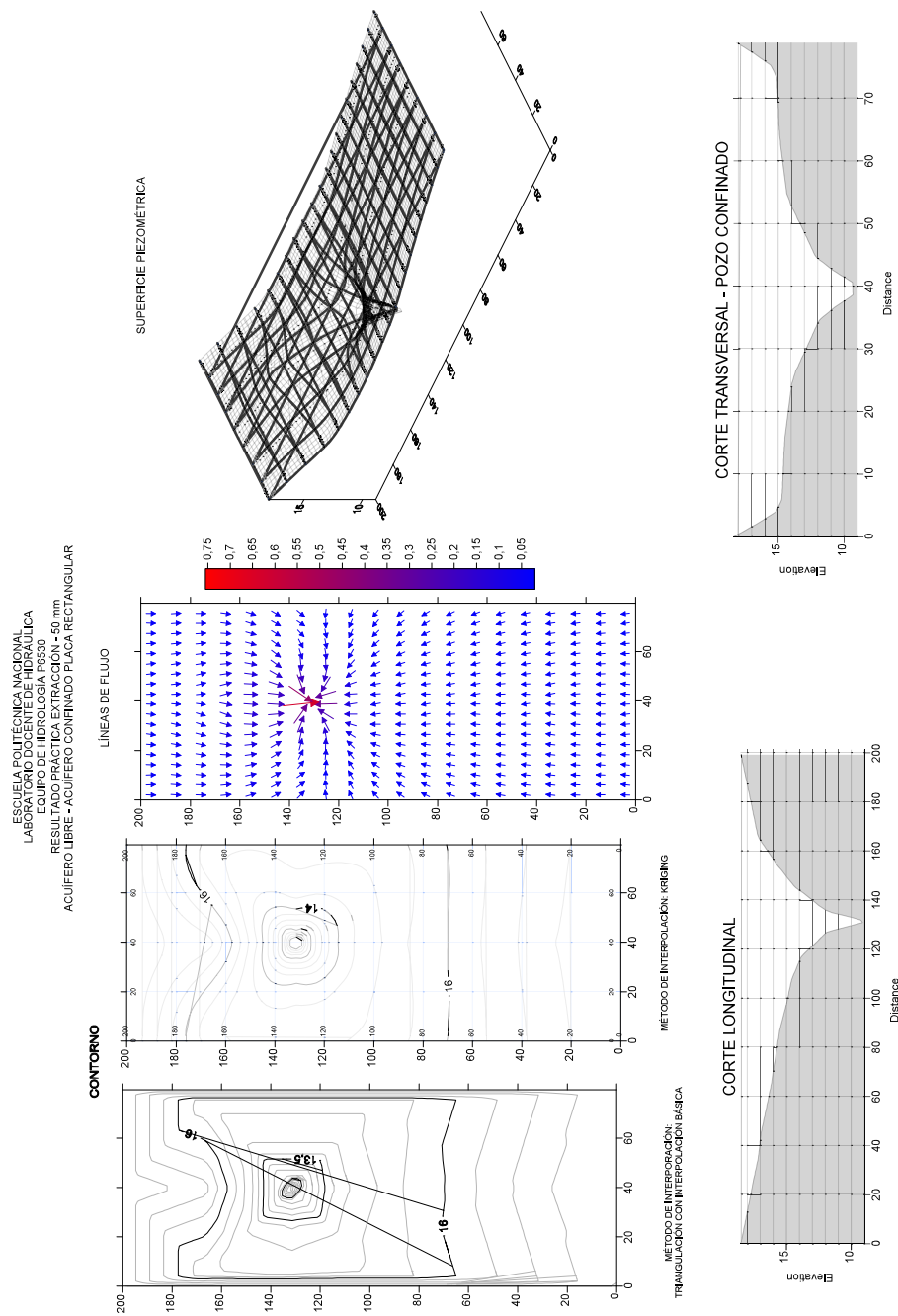


Figura 4.18 Resultados del ensayo de extracción de agua en acuífero confinado con placa rectangular, descenso aproximado 50 mm.

El ANEXO 6 contiene los datos de la práctica.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

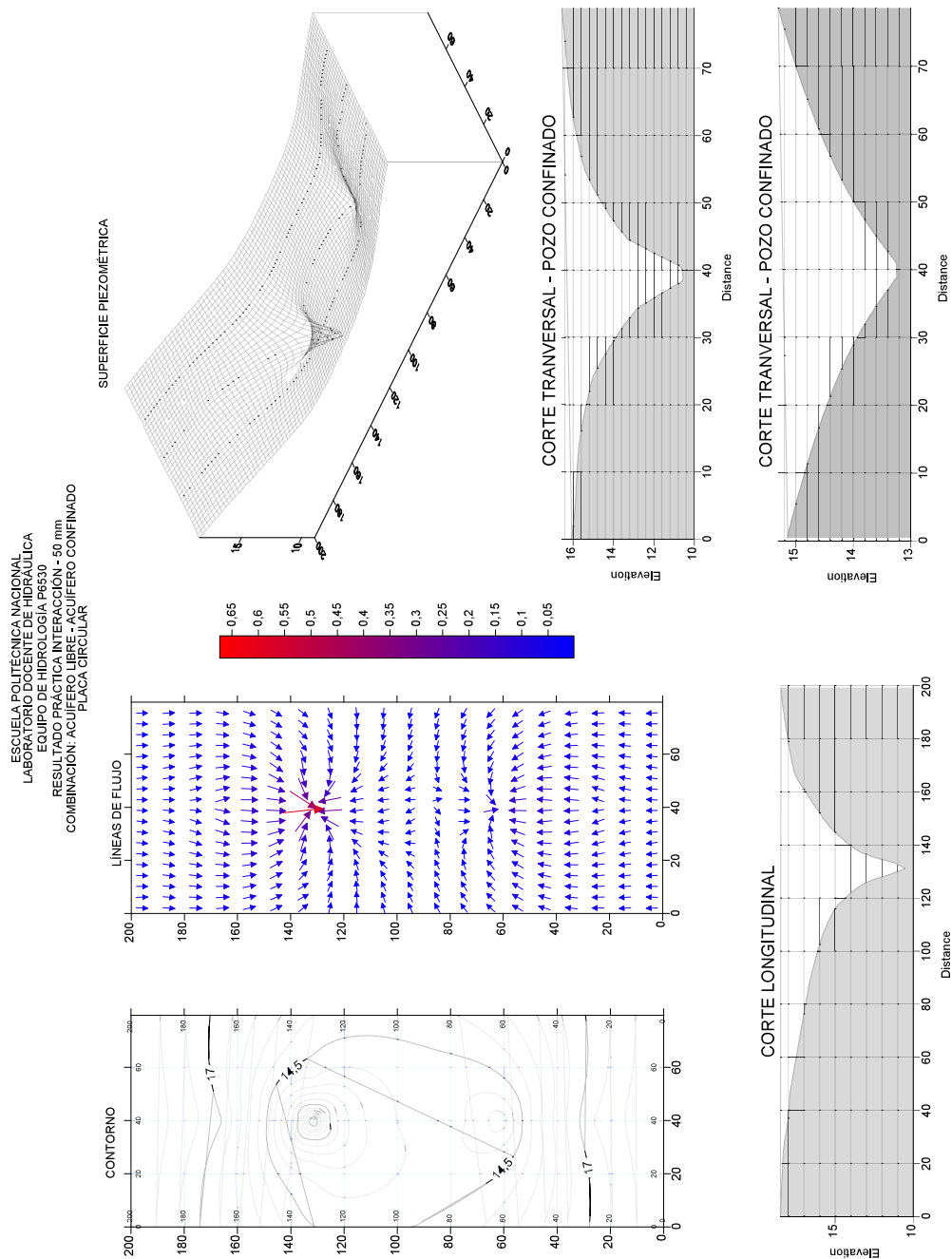


Figura 4.19 Resultados del ensayo de interacción en un acuífero confinado con placa circular, descenso aproximado de 50 mm.

El ANEXO 6 contiene la tabla de valores.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

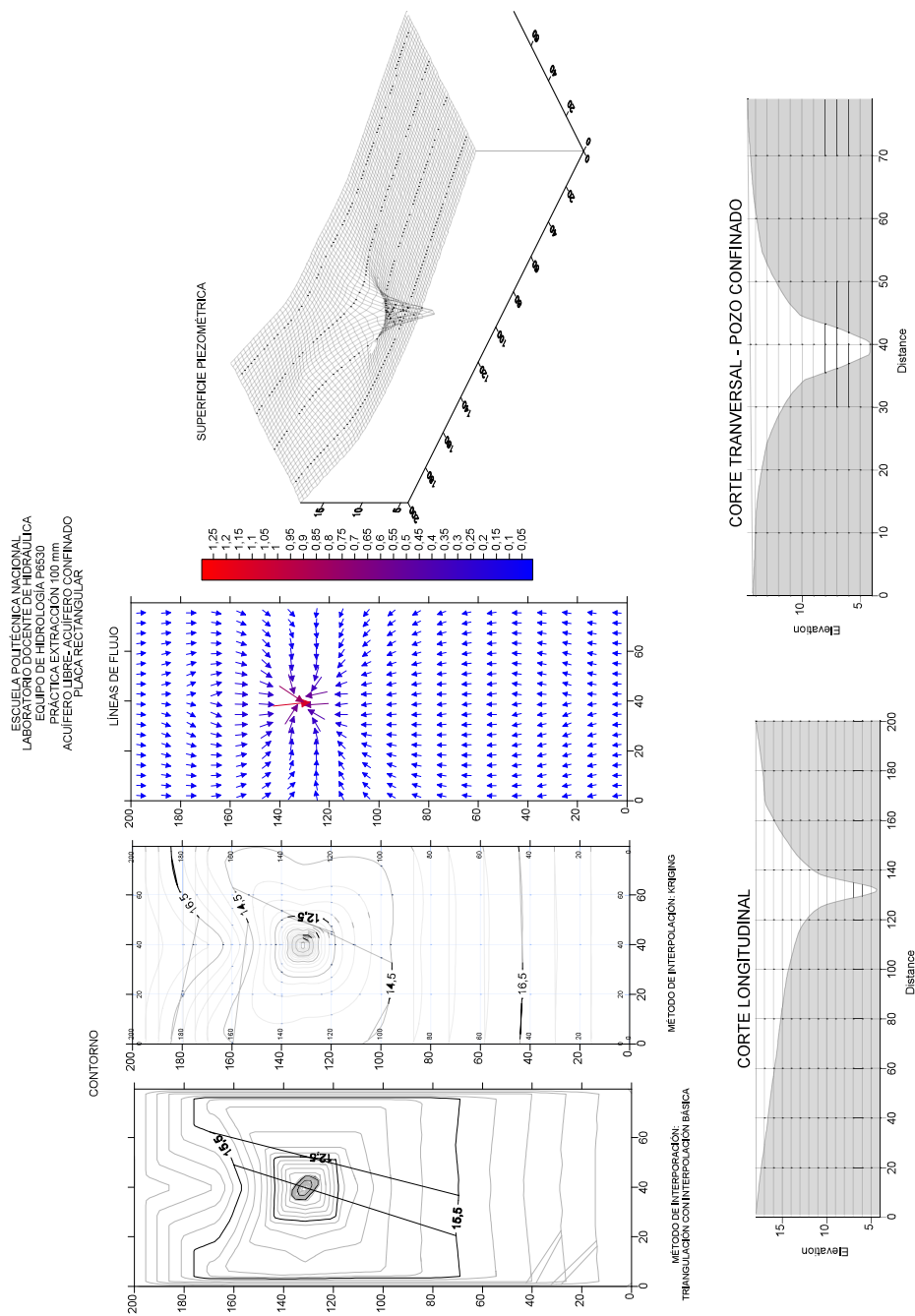


Figura 4.20 Resultados del ensayo de extracción de agua en acuífero confinado con placa rectangular, descenso aproximado 100 mm.

El ANEXO 6 contiene los datos de la práctica.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

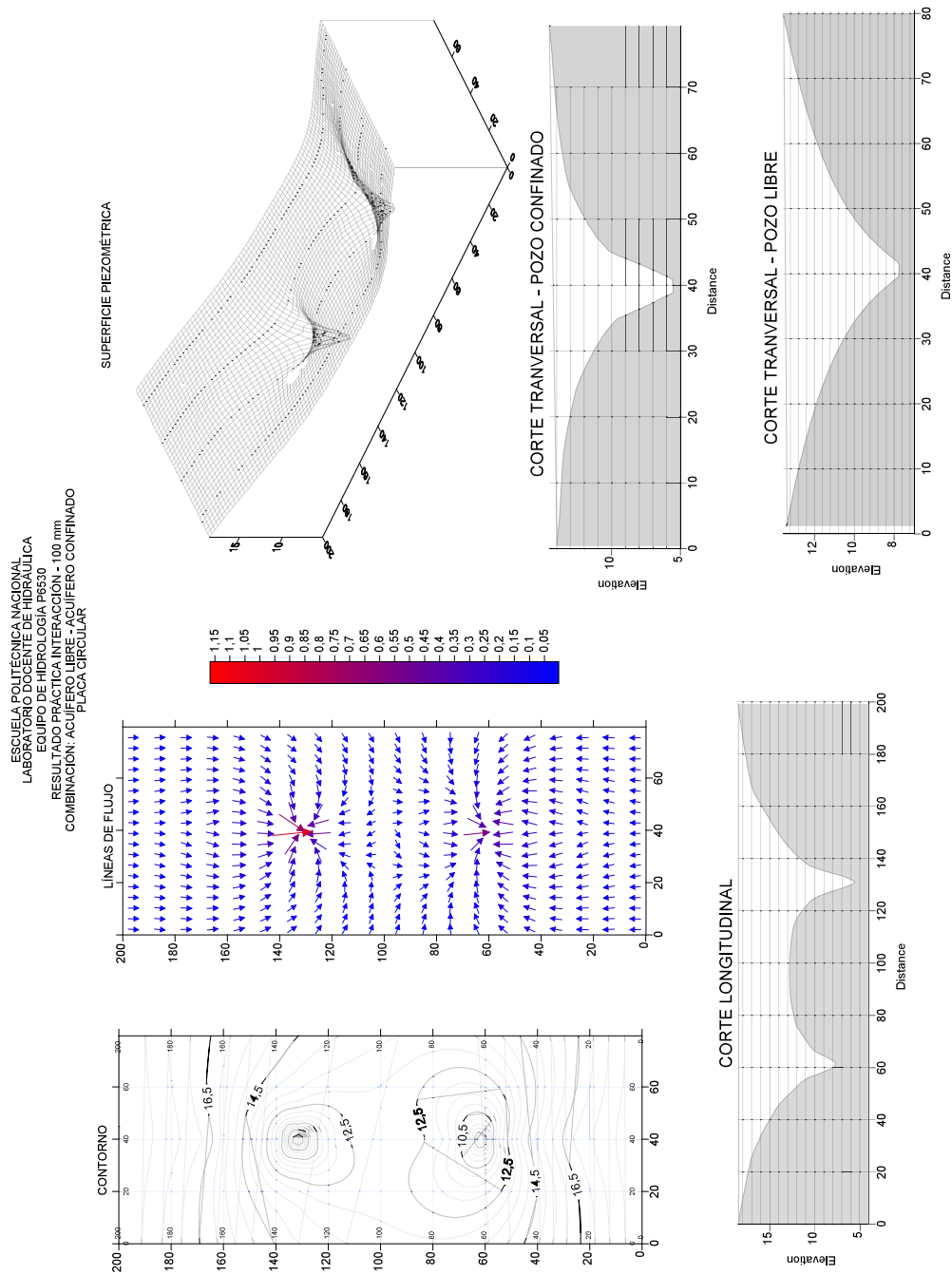


Figura 4.21 Resultados del ensayo de interacción en un acuífero confinado con placa circular, descenso aproximado de 100 mm.

El ANEXO 6 contiene la tabla de valores.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

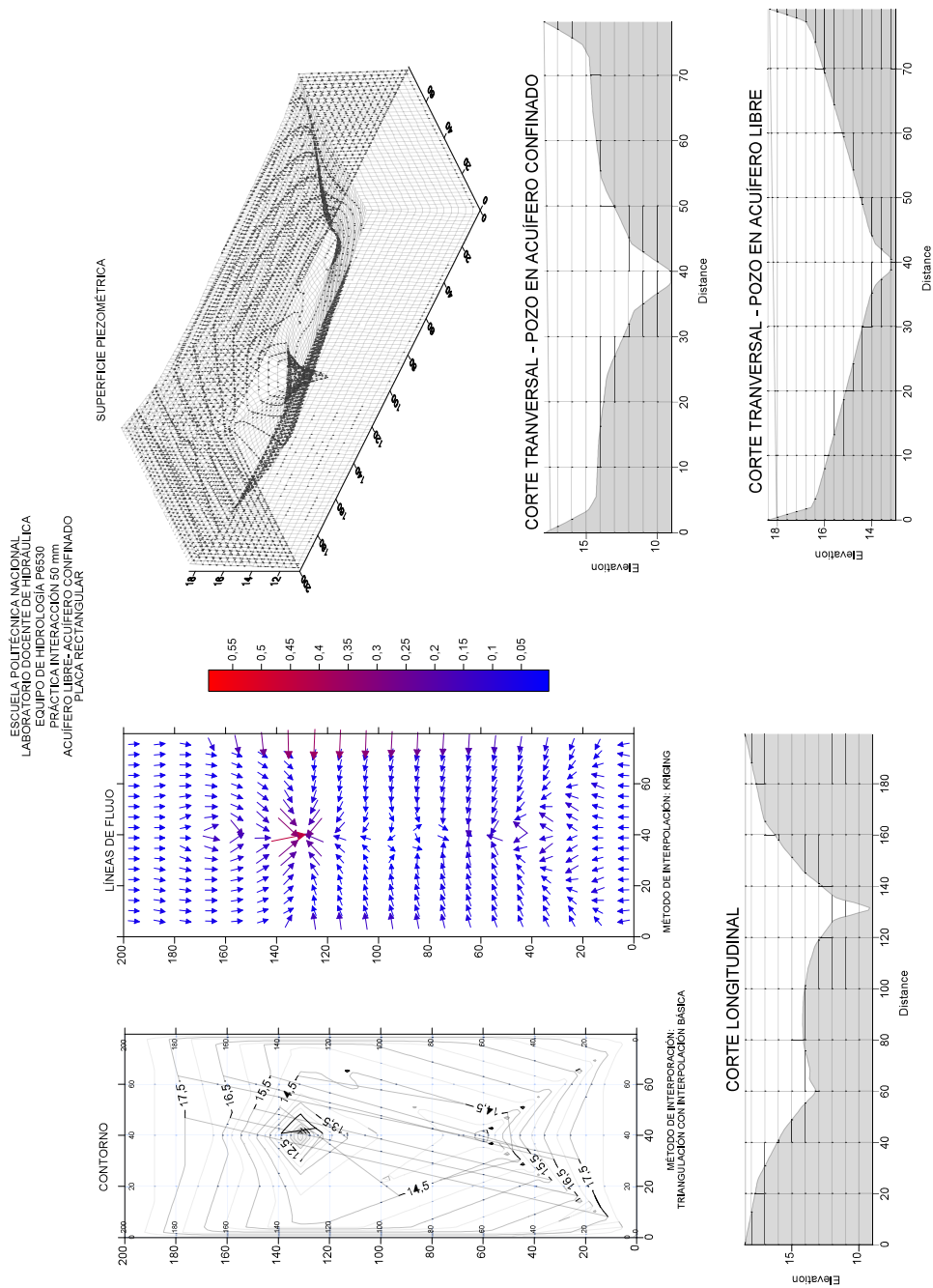


Figura 4.22 Resultados del ensayo de interacción en un acuífero confinado con placa rectangular, descenso aproximado de 50 mm.

El ANEXO 7 contiene la tabla de valores.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

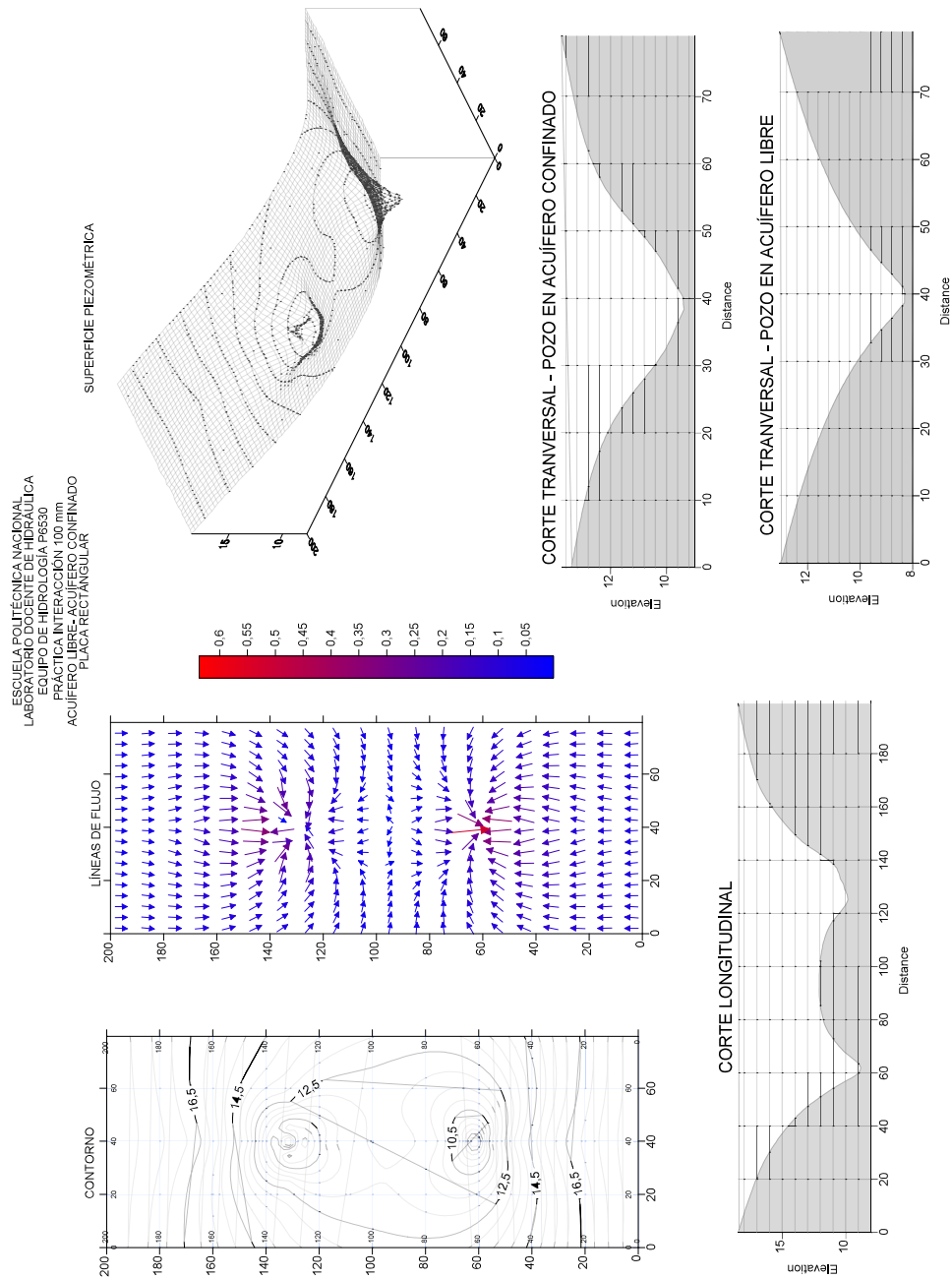


Figura 4.23 Resultados del ensayo de interacción en un acuífero confinado con placa rectangular, descenso aproximado de 100 mm.

El ANEXO 7 contiene la tabla de valores.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.7. DEMOSTRACIÓN DE LA MECÁNICA FLUVIAL DEL CAUCE DE UN RÍO.

4.1.7.1. Objetivo

- Demostrar la erosión y el transporte de sedimentos en un río

4.1.7.2. Preparación del equipo

Preparar el aparato bajo las siguientes especificaciones.

Partes del Equipo	Izquierda	Derecha
Pantallas	Permeable	Permeable
Revestimiento de los pozos	Ajustado	Ajustado
Válvulas de control de los pozos	Cerradas	Cerradas
Pendiente del tanque de arena	Nivelada	
Arena	180 mm a 200 mm de profundidad, nivelada a la base del tanque, seca .Usar el perfilador para formar la sección del río	
Boquillas	No se usan en este experimento	
Válvulas de suministro de boquilla	Cerradas	
Válvulas de suministro del tanque de cabecera	Cerradas	Cerradas
Altura del tubo en el tanque de cabecera	Al nivel de la parte superior de la arena	Al nivel de la parte superior de la arena

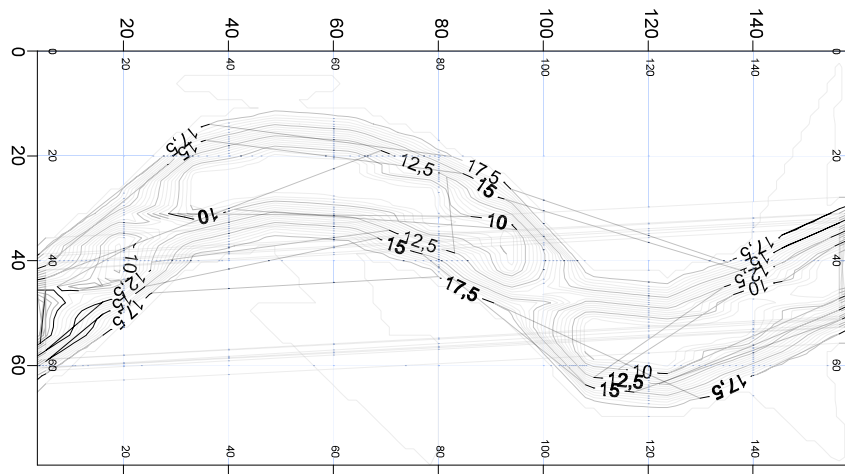


Figura 4.24 Trazado en planta del río para realizar la práctica.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

4.1.7.3. Procedimiento experimental

1. Encender la bomba de flujo de agua subterránea
2. Abrir las válvulas de suministro del tanque de cabecera de la izquierda y mantener la apertura durante toda la práctica.
3. Observar el proceso de erosión y transporte de sedimentos.

4.1.7.4. Observaciones

La práctica a pesar de estar fuera del alcance del estudio se la realiza para comprobar que el equipo puede facilitar la comprensión de los principios de erosión y transporte de sedimentos en un río con meandros.

4.1.7.1. Red de flujo

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 LABORATORIO DOCENTE DE HIDRÁULICA
 EQUIPO DE HIDROLOGÍA P6530
 PRÁCTICA-RÍO
 MÉTODO DE INTERPOLACIÓN:
 Método de triangulación con interpolación lineal

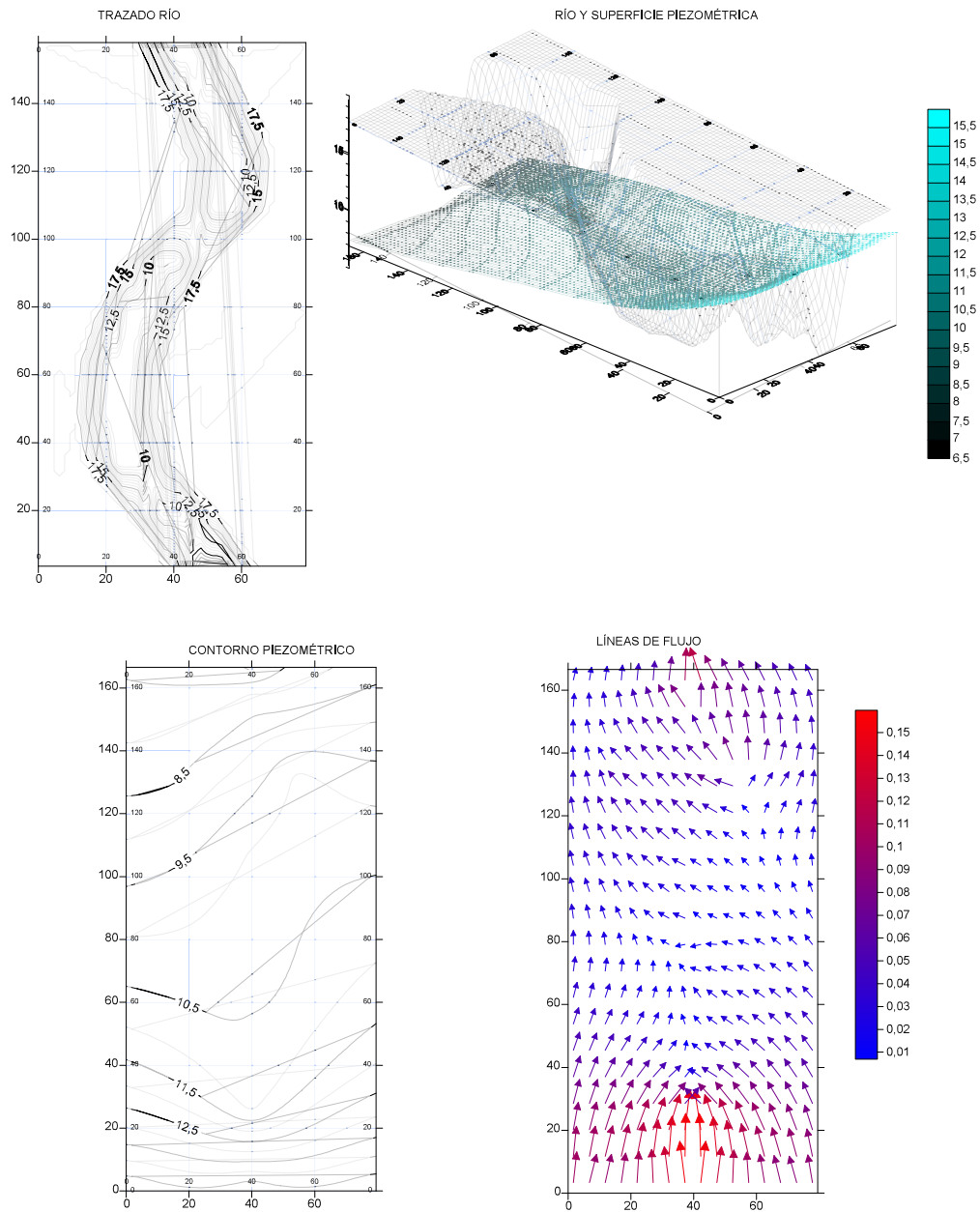


Figura 4.25 Resultados del ensayo de demostración de la mecánica fluvial del cauce de un río. El ANEXO 8 contiene la tabla de valores.

ELABORACIÓN: Mena V, 2019.

Las tablas en los anexos agrupan las prácticas de flujo de agua subterránea, extracción e interacción para las mismas condiciones del equipo, además de los caudales respectivos obtenidos a partir de la ecuación (3.1). Adicionalmente los datos y gráficas para las distintas combinaciones de condiciones propuestas se encuentran a partir del ANEXO 9.

4.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON ACUÍFEROS REALES

Como condición inicial se tiene que el material granular del equipo representa un medio isotrópico, donde las líneas de flujo cruzarán las líneas equipotenciales en ángulos rectos en todas las prácticas, el acuífero está limitado en el fondo por un estrato impermeable y que los pozos de bombeo penetran completamente el acuífero. La comparación se agrupa por condiciones similares de bombeo.

4.2.1. FLUJO DE AGUA

En las gráficas de superficies freáticas de la Figura 4.27 a la Figura 4.31, se observa que el flujo va de la zona de recarga a la zona de descarga, y que para pequeños gradientes de la capa freática las líneas de flujo son horizontales y las líneas equipotenciales son verticales. Este comportamiento del flujo de agua es independiente de las condiciones de los acuíferos (localización geográfica, clima, geología, topografía e inclusive la presencia de un cauce en los límites del acuífero, o sobre el acuífero), y de las condiciones que se tienen en laboratorio (granulometría definida, capa de material granular aproximada de 18 cm). Además, en laboratorio (Figura 4.26) se observa que el gradiente hidráulico es igual a la pendiente del nivel freático bajo la premisa de que se trabaja con pequeñas franjas de suelo.

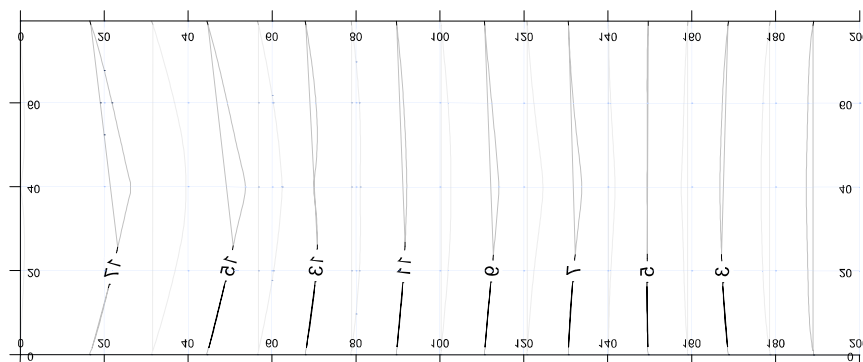


Figura 4.26 Contorno de superficie freática, resultado de la práctica de flujo de agua un acuífero libre

ELABORACIÓN: Mena

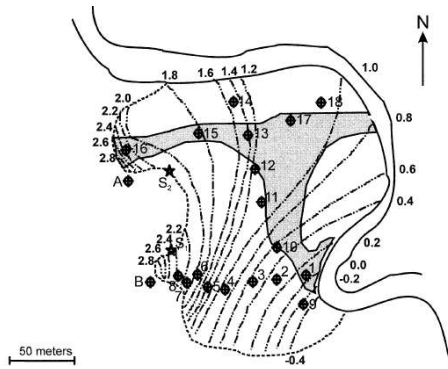


Figura 4.27 Mapas de la capa freática del humedal de Lost Creek al nivel máximo de agua el 19 de junio de 1997, Estados Unidos

(Woods et al., 2006)

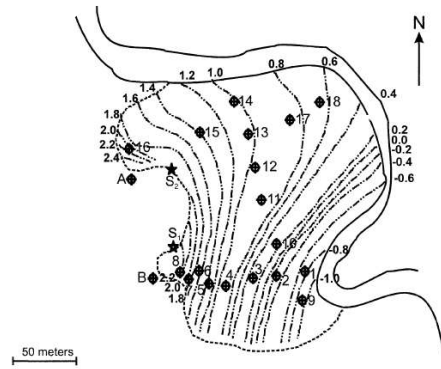


Figura 4.28 Mapas de la capa freática del humedal de Lost Creek al nivel mínimo de agua el 16 de julio 1997, Estados Unidos.

(Woods et al., 2006)

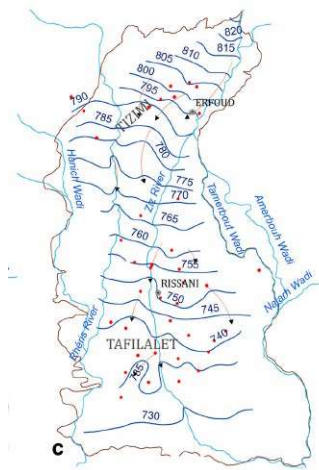


Figura 4.29 Mapas de la carga hidráulica del acuífero del sistema de oasis de Tafilalet (TOS) en febrero del 2011, Marruecos

(Bouaamlal et al., 2016)

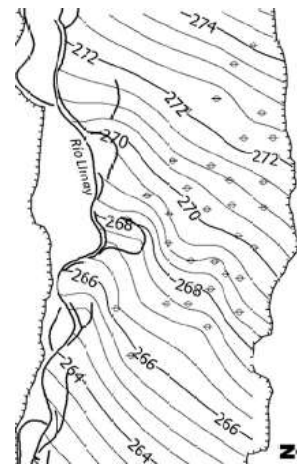


Figura 4.30 Mapa equipotencial del mes de junio de la llanura aluvial en los alrededores de la ciudad de Neuquén, Argentina

(Deluchi et al., 2013)

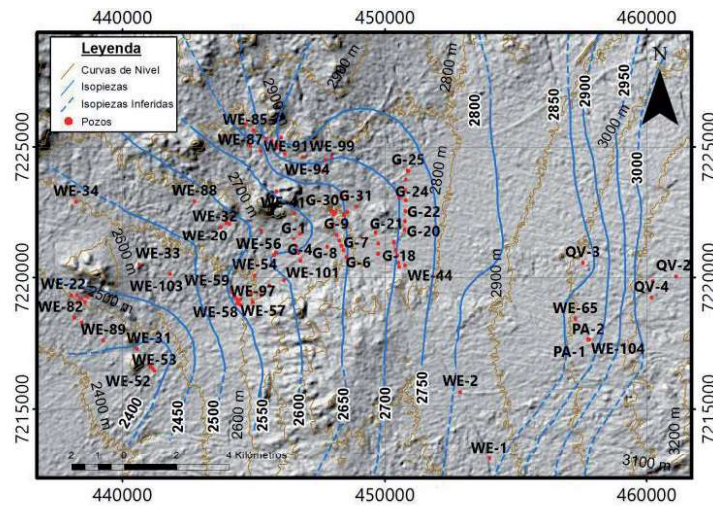


Figura 4.31 Mapa de isopiezas del sector Minero Guanacó, Chile
(Gamboa et al., 2015)

A pesar de tener la limitación en laboratorio y no poder representar un acuífero infinitamente confinado, el flujo de agua obtenido en la práctica de flujo de agua subterránea en un acuífero confinado (Figura 4.32) y mapas de superficie piezométrica de acuíferos infinitamente confinados como los de la Figura 4.33 y la Figura 4.34, muestran que donde hay un movimiento constante de agua subterránea en un acuífero confinado, se presenta un gradiente en la superficie piezométrica del acuífero. Del mismo modo para dos pozos confinados en laboratorio con las placas circular y rectangular (Figura 4.35), la superficie piezométrica presenta una pendiente similar al nivel estático del acuífero Méndez-San Fernando (Figura 4.36). De las comparaciones de flujo de agua realizadas se aprecia la buena representación que el equipo permite tener, sin importar la limitación del modelo al ser en una escala tan pequeña y accesible para un laboratorio e indistintamente de las características de los acuíferos como: geología, condiciones de confinamiento o diferencia de localización geográfica.

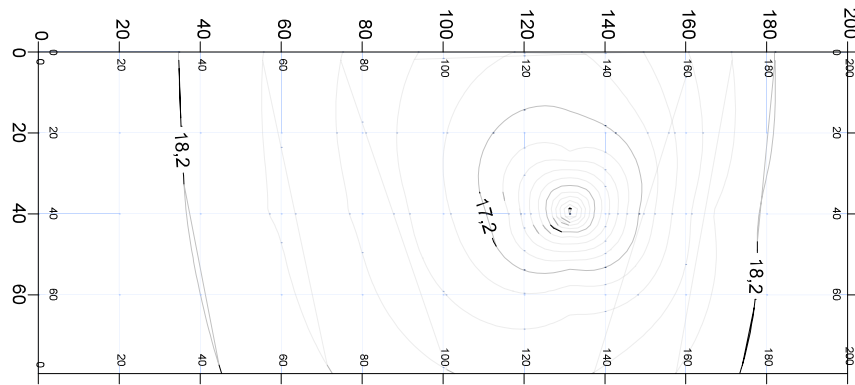


Figura 4.32 Mapa de contorno de la superficie piezométrica debido al flujo de agua en acuífero combinación libre – confinado circular

ELABORACIÓN: Mena

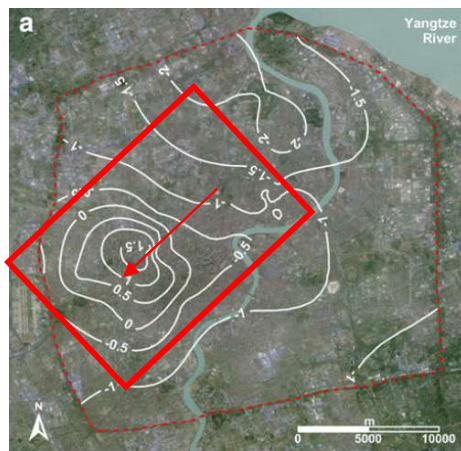


Figura 4.33 Mapa de la superficie piezométrica medida el 30 de diciembre de 1995 en el acuífero confinado A2, Shanghai, China

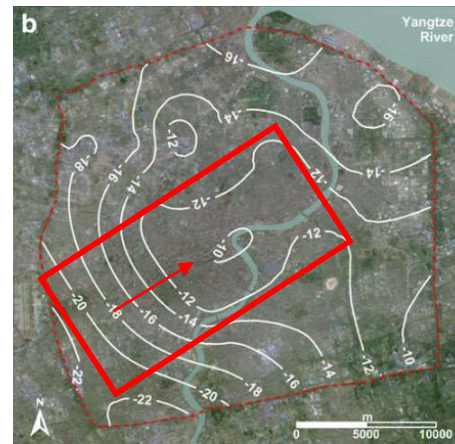


Figura 4.34 Mapa de la superficie piezométrica medida el 30 de diciembre de 1995 en el acuífero confinado A4, Shanghai, China

(Ye et al., 2016)

(Ye et al., 2016)

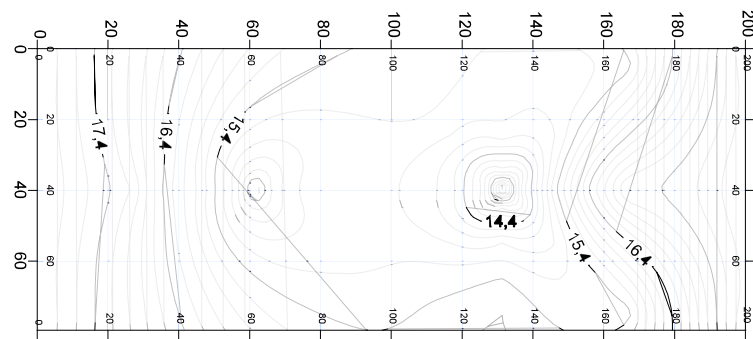


Figura 4.35 Contorno superficie piezométrica flujo de agua combinación de un acuífero confinado con placa circular y un acuífero confinado con placa rectangular

ELABORACIÓN: Mena

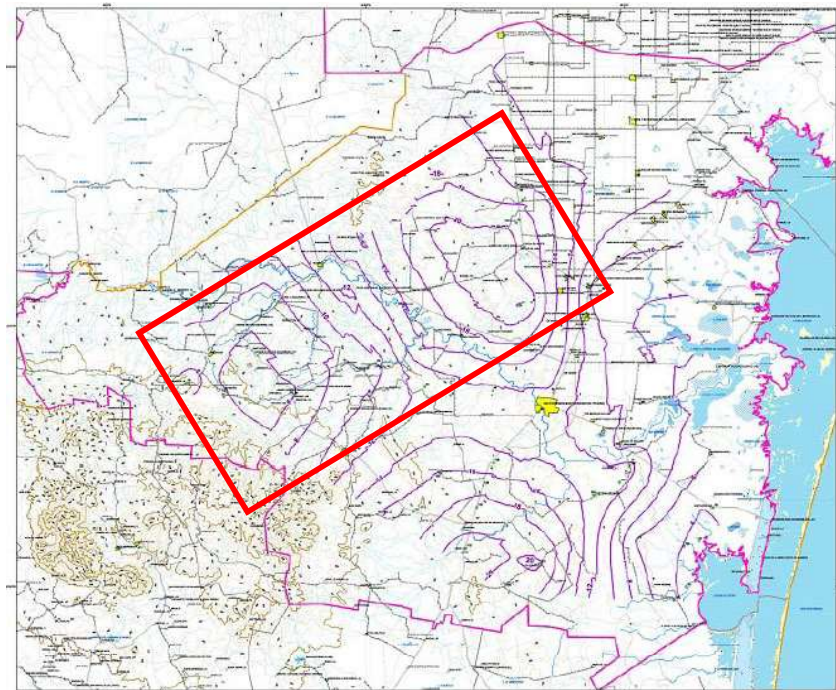


Figura 4.36 Profundidad al nivel estático, septiembre 2002, acuífero Méndez-San Fernando, México

(CONAGUA, 2009)

4.2.2. EXTRACCIÓN DE AGUA

La extracción de agua en laboratorio se la realiza mediante un pozo totalmente penetrante a una superficie piezométrica horizontal antes del bombeo. Al realizar el bombeo se observa en las redes de flujo un flujo radial hacia el pozo. Para el pozo en acuífero libre el agua es entregada inicialmente como en un acuífero confinado y luego por drenaje real, es decir, el agua almacenada en los poros del acuífero. En laboratorio (Figura 4.37) y en resultados publicados de acuíferos (Figura 4.38 y Figura 4.39), a pesar de que posee localizaciones dispersas, condiciones geológicas diferentes, topografías diversas y caudales de extracción diferentes la formación de flujo radial hacia un pozo de extracción es evidente, a pesar de la limitación en laboratorio, donde la reducción de altura de agua no es insignificante comparada al espesor del acuífero.

Para la extracción de agua de un pozo perforado en un acuífero confinado, la limitante en laboratorio es que se tiene un pozo confinado por el área de la placa que se utiliza (circular o rectangular). La superficie piezométrica antes del bombeo es horizontal. El agua que se extrae proviene del almacenamiento elástico, principalmente de la expansión del agua al disminuir la presión en el acuífero por la misma extracción. A pesar de la limitación se observa un flujo radial y la formación de un cono de abatimiento en el pozo tanto en laboratorio para la placa de confinamiento circular (Figura 4.40) o rectangular (Figura 4.44) y en las superficies piezométricas (Figura 4.41, Figura 4.42, Figura 4.43, Figura 4.45 y Figura 4.46) de acuíferos con diversas condiciones como geología, topografía, superficie de confinamiento y periodo de tiempo en que se realizaron los ensayos de bombeo.

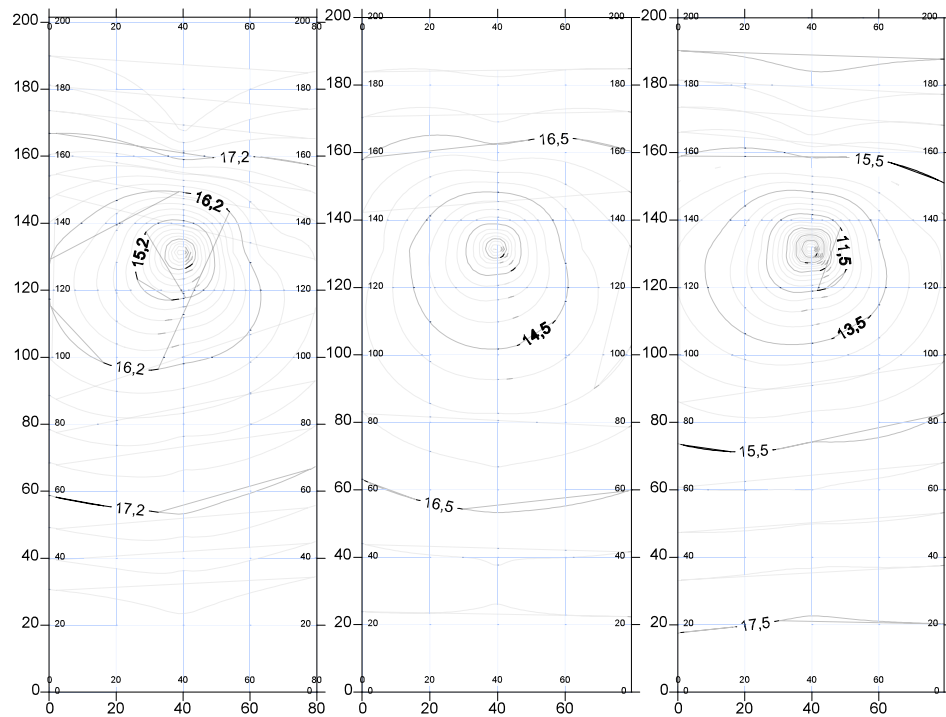


Figura 4.37 Contorno descensos de agua aproximadamente 50 mm, 100 mm y 150 mm en acuífero libre, obtenidos a partir de los datos de la práctica de extracción en laboratorio

ELABORACIÓN: Mena

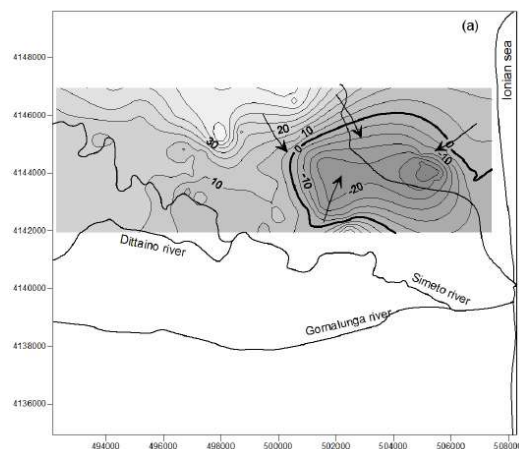


Figura 4.38 Mapa de contorno de la superficie piezométrica del acuífero San Leonardo, octubre del 2005, Sicilia, Italia
(Ferrara et al., 2007)

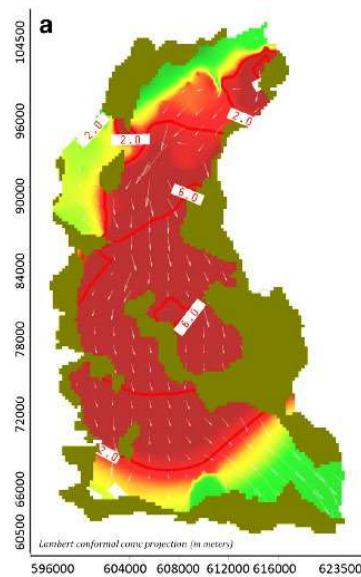


Figura 4.39 Extracción de agua en el acuífero del sistema de oasis de Tafilalet (TOS) en 1984 registrado como un año seco, Marruecos

(Bouaamlat et al., 2016)

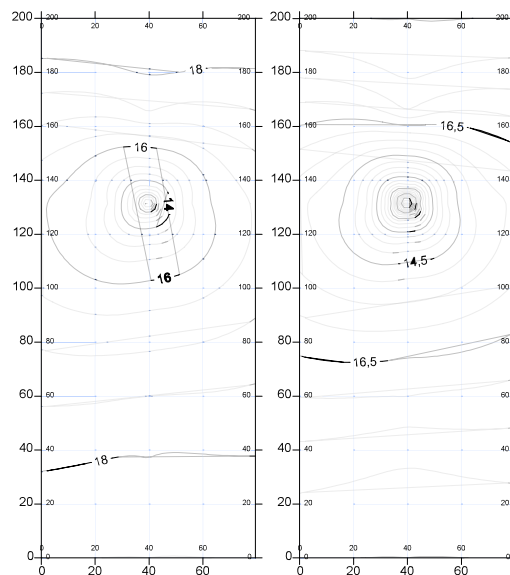


Figura 4.40 Contorno superficie piezométrica ensayo de extracción de agua de 50 mm y 100 mm, combinación de un acuífero libre y un acuífero confinado con placa circular.

ELABORACIÓN: Mena

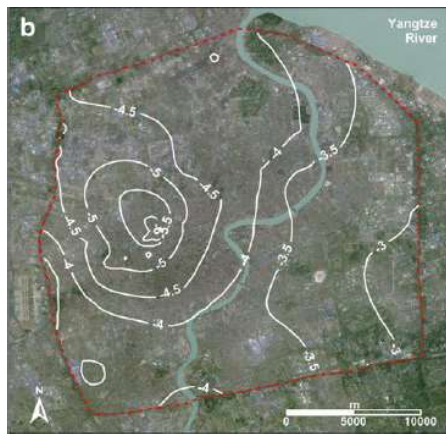


Figura 4.41 Mapa de la superficie piezométrica medida el 30 de diciembre de 1995 en el acuífero confinado A2 , Shanghai, China

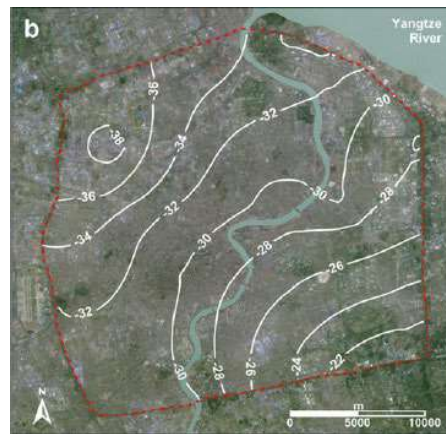


Figura 4.42 Mapa de la superficie piezométrica medida el 30 de diciembre de 1995 en el acuífero confinado A4 , Shanghai, China

(Ye et al., 2016)

(Ye et al., 2016)

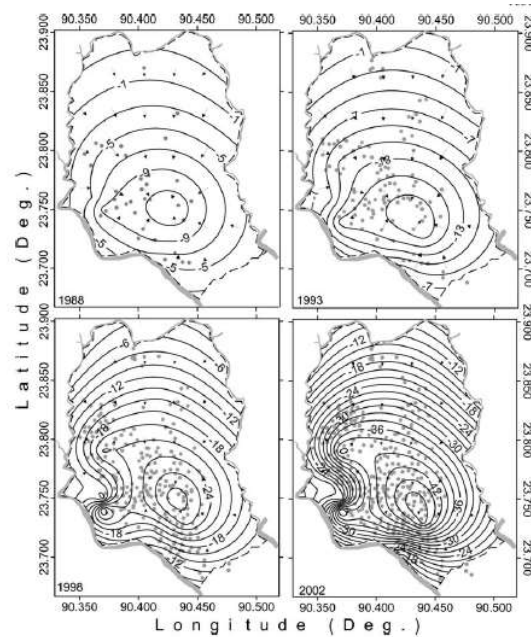


Figura 4.43 Contornos de las superficies del nivel de agua y conos de descenso para los años de 1988 a 2002, en Dhaka, Bangladesh

(Hoque et al., 2007)

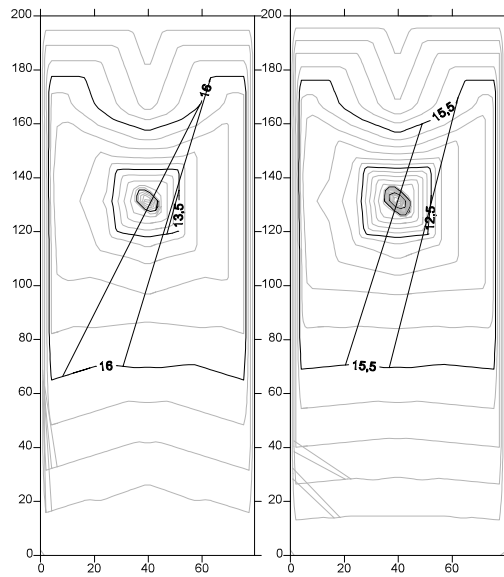


Figura 4.44 Contorno superficie piezométrica ensayo de extracción de agua combinación de un acuífero libre y un acuífero confinado con placa rectangular obtenidos por triangulación con interpolación básica. Extracción de agua aproximada de 50 mm y 100 mm.

ELABORACIÓN: Mena

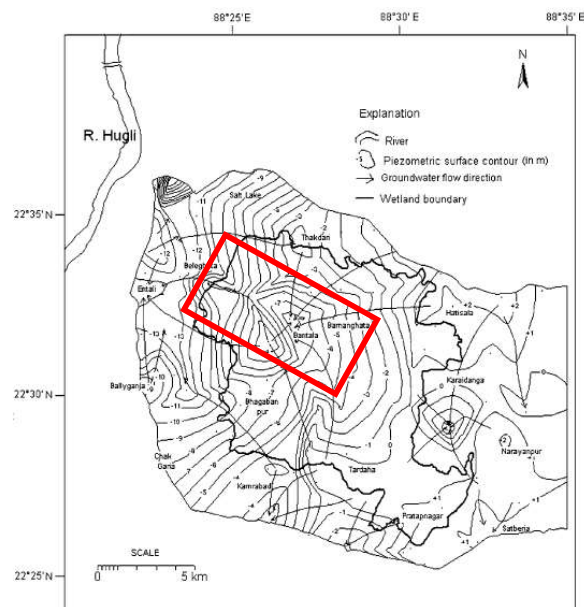


Figura 4.45 Contorno de las superficie piezométrica durante el pre-monsoon, 2005, Los humedales del este de Kolkata, India

(Sahu & P.K., 2008)

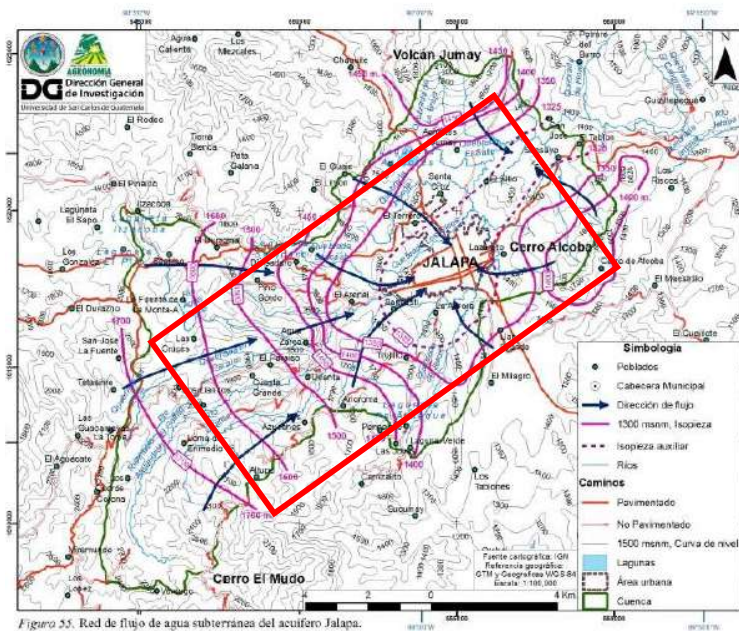


Figura 4.46 Red de flujo de agua subterránea del acuífero Jalapa, Guatemala

(Manzo, 2016)

4.2.3. INTERACCIÓN DE CONOS DE DESCENSO

En laboratorio bajo las indicaciones de la práctica y limitaciones respecto al área confinante limitada. Al comparar los resultados de la práctica para las condiciones de acuífero libre (Figura 4.47) y acuífero confinado (Figura 4.51) con los acuíferos de la Figura 4.48, Figura 4.49, Figura 4.50, Figura 4.52 y a pesar del tamaño del modelo en laboratorio, la ubicación geográfica, geología, extensión del acuífero, caudales de extracción se observa que la interferencia de pozos en los acuíferos se presentan como la superposición lineal del flujo radial por extracción de cada pozo. Esta superposición de efectos de extracción individuales se debe a la propiedad de linealidad de la transformada de Laplace.

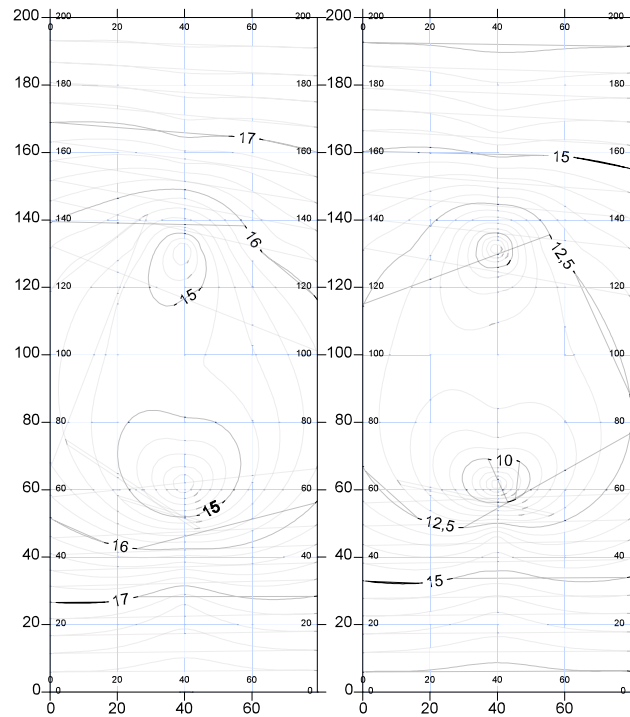


Figura 4.47 Contorno descenso de agua aproximadamente 50 mm, 100 mm y 150 mm en cada pozo del acuífero libre, obtenidos a partir de los datos de la práctica de interacción

ELABORACIÓN: Mena

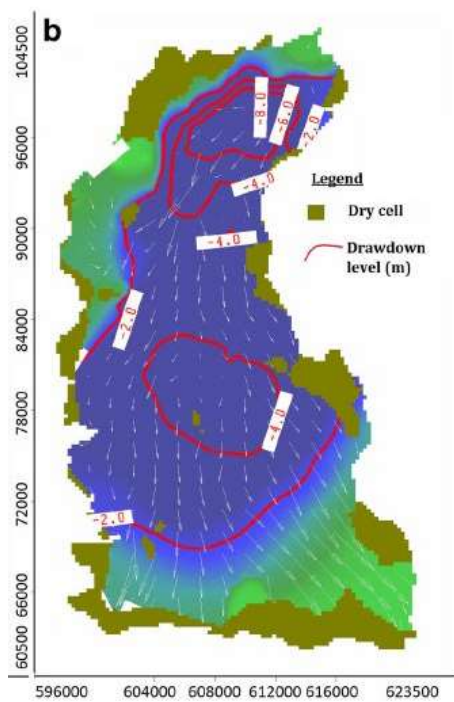


Figura 4.48 Extracción de agua en el acuífero del sistema de oasis de Tafilaleh (TOS) en 2001 registrado como un año húmedo, Marruecos

(Bouaamlat et al., 2016)



Figura 4.49 Carga hidráulica en el acuífero costero de Oropesa del año 1990, Castellón, España.

(Giménez y Morell, 1997)

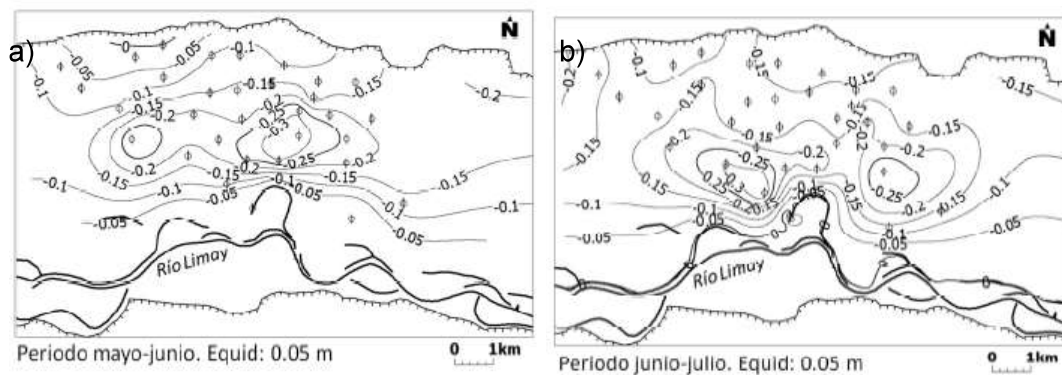


Figura 4.50 Mapa de isovariación de la llanura aluvial en los alrededores de la ciudad de Neuquén, Argentina a) periodo mayo-junio, b) periodo junio-julio

(Deluchi et al., 2013)

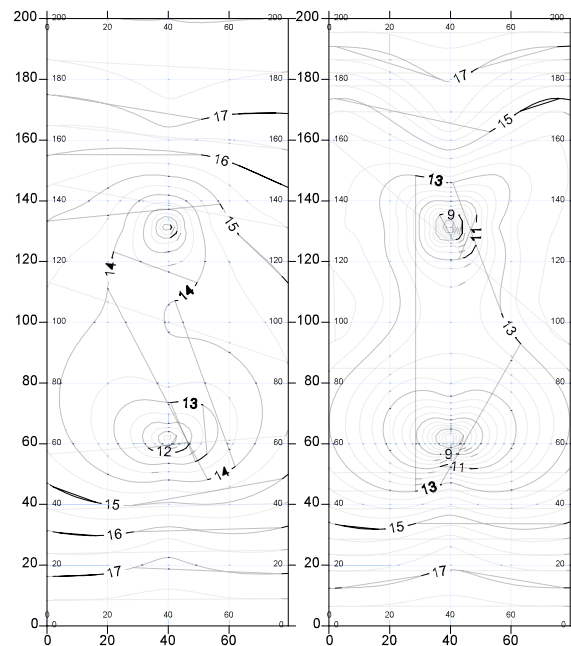


Figura 4.51 Contorno superficie piezométrica ensayo de interacción de conos de descenso combinación pozo de la izquierda en acuífero confinado con placa circular y pozo de la derecha en acuífero confinado con placa rectangular. Extracción de agua aproximada de 50 mm y 100 mm.

ELABORACIÓN: Mena



Figura 4.52 Red de flujo, septiembre 2002, acuífero Méndez-San Fernando, México

(CONAGUA, 2009)

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

A partir de las prácticas propuestas por el proveedor en el manual de equipo se realizan prácticas, adicionalmente el equipo permite realizar una serie de variaciones en las condiciones de confinamiento, bombeo y de frontera. De estas se propone una guía de prácticas para que los estudiantes puedan reproducir fenómenos hidráulicos subterráneos.

De las comparaciones realizadas a las superficies potenciométricas obtenidas a partir de los datos obtenidos en laboratorio y de los acuíferos recopilados en el estado del arte, a pesar de las limitaciones en laboratorio (un área de confinamiento delimitada por la placa de confinamiento utilizada y la reducción de altura de agua no es insignificante comparada con el espesor del acuífero) y de las características propias de los acuíferos (ubicación geográfica, geología, topografía, extensión o confinamiento) el equipo indistintamente reproduce adecuadamente los fenómenos de hidráulica subterránea.

Al tener un modelo físico de un acuífero se facilita la comprensión de los fenómenos hidráulicos subterráneos y comprender mejor lo que pasa en la naturaleza. Adicionalmente refuerza el conocimiento teórico de condiciones que se realizan en el estudio de agua subterránea, llegando a ser el equipo una herramienta con un potencial para la formación de profesionales que dominen los conceptos de hidrogeología y puedan extrapolar este conocimiento a su vida profesional.

5.2. RECOMENDACIONES

Considerar las medidas de seguridad del equipo para su operación, así se garantiza un funcionamiento adecuado del equipo y su conservación a largo plazo, además de precautelar la seguridad de los practicantes y operador.

Garantizar que el material granular y el agua no estén expuestos a contaminación y que cuenten con un proceso de desinfección adecuada, utilizando desinfectantes de preferencia los recomendados por el fabricante y con una frecuencia adecuada para limitar la población bacteriana a 10^3 colonias / ml como máximo.

Para evitar el crecimiento de algas en el interior de las tuberías que forman el sistema de recirculación del agua en el equipo, encender el mismo periódicamente ya que el crecimiento de algas se debe a bajas velocidades de flujo y la constante exposición a la luz del sol.

Para extraer granos de arena o burbujas de aire en el interior de los tubos tipo u de los manómetros ya sea del tanque de arena, de los pozos o del tablero de manómetros se recomienda sacarlos cuidadosamente de su lugar, dar la vuelta y dejar que se drene el agua hasta observar la salida de los granos de arena o burbujas de aire y volver a colocar el tubo de lugar donde lo tomo.

Se propone realizar prácticas para acuíferos confinados considerando los pesos de confinamiento, para poder comparar la influencia de estos en las superficies piezométricas.

Se propone realizar ensayos de bombeo para acuífero libre y obtener graficas de descenso-tiempo como herramienta para comprender las fases de bombeo y mecanismo de aportación de agua por el acuífero en cada fase.

A la práctica de flujo de agua en acuífero libre se le puede variar la altura del tubo en la zona de descarga para así variar la carga del tanque de desbordamiento y observar cómo cambia el gradiente hidráulico.

CAPÍTULO VI

6. BIBLIOGRAFÍA

- Arroyo, V., (2017). La paradoja de la escasez de agua en América Latina. *América economía*, Análisis y opinión .Recuperado desde: <https://www.americaeconomia.com/analisis-opinion/la-paradoja-de-la-escasez-de-agua-en-america-latina>
- Bouaamlat, I., Labari, A. L. & Mohamed, F., (2016). Hydrogeological investigation of an oasis-system aquifer in arid southeastern Morocco by development of a groundwater flow model. *Hydrogeol J*, 24 (6), pp. 1479-1496. DOI 10.1007/s10040-016-1409-8.
- Calvo, M., Revero, C., Vidal, M. P., Morcillo, J. G., García, E., (2007). El trabajo con modelos en aguas subterráneas. Revista: *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15(3), pp. 341-347.
- Cherry, J., Freeze, A., (1979). *Groundwater*. Primera edición. New Jersey: Prentice-Hall, 604 p.
- CONAGUA, (2009). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Mendez-San Fernando (2802), Estado de Tamaulipas, México*: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 28 p.
- Cruces, J. y Martínez, C. (2006). Modelos matemáticos en hidrogeología. Tesis para obtener el título de Master en ingeniería medioambiental y gestión del agua, Escuela de Negocios-EOI Escuela de Organización Industrial, Madrid, España, 15 p.
- CUSSONS. (2014). P6530 *Hydrology apparatus*. Manchester, Inglaterra. CUSSON. 55 p.
- Das, B., (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cuarta edición. México D.F., México: Cengage Learning. 623 p.
- Dávila, J., (2011). *Diccionario geológico*. Tercera edición. Lima, Perú: ARTHALYUNA. 901 p.
- Deluchi, M., Kruse, E. & Laurencena, P., (2013). Dinámica freática de la llanura aluvial en los alrededores de la ciudad de Neuquén, Argentina. En: N. González, M. Trovatto, P. Laurencena y E. Kruse, editores. *Agua subterránea recurso estrategico*. La Plata, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), 66-71 p.

- Fabeiro, E. (2018). Los coloides y su poder curativo. Revista: Natural. Recuperado de: <https://naturalrevista.com/los-coloides-y-su-poder-curativo/>.
- Fallas, J., (2003). Modelo De Elevación Digital Para Las Hojas Cartográficas Tilarán y Juntas Escala 1:50.000 Del Instituto Geográfico Nacional, Costa Rica., Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (TELESIG). Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre y Escuela de Ciencias Ambientales.83 p.
- Fernández, M., Vela, A. y Castaño, S. (1997). La utilización de modelos en hidrología. Revista de la facultad de educación de Albacete, 2171-9098(12), 305-317 p.
- Ferrara, V., Pappalardo, G. & Rapisarda, F., 2007. *Salinization factors affecting the coastal aquifers in eastern Sicily*. Madrid,España: Instituto Geológico y Minero de España, pp. 105-116.
- Fetter, C., (2001). *Applied Hydrogeology*. Cuarta edición. New Jersey, Estados Unidos: Pearson Education. 598 p.
- Fundación AQUAE. (2018). *Cantidad de agua potable, fuente de vida*. Recuperado de <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/datos-del-agua/cantidad-de-agua-potable-fuente-de-vida/> (Julio, 2018).
- Galindo Martínez, J. (1999). *Modelos hidrogeológicos*. Revista De La Universidad De La Salle,4551 (28), 63-74.
- Gamboa, C., Herrera, C., Urrutia, J. y Harry, U., (2015). *Evaluación hidrogeologica de la Depresión Central (25° - 25° 12' S) sector Minera Guanaco*. En: Congreso Geológico Chileno 14: 4-8, octubre, 2015: La Serena, Chile: Sociedad Geológica de Chile. 264-267p.
- Giménez, E. & Morell, I., (1997). Hydrogeochemical analysis of salinization processes in the coastal aquifer of Oropesa (Castellón, Spain). *Environmental Geology*, enero, Issue 29, pp. 118-131. DOI:10.1007/s002540050110.
- GOLDENSOFTWARE, (2015). *Surfer®13 Full User's Guide*. Colorado: Golden SoftwareLLC. 12 p.
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C., (2004). *Ingeniería geológica*. Primera edición. Madrid, España: Pearson Educacion. 744 p.

- Shiklomanov, I., (1993). World fresh water resources. In: Water in crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources, edited by P. Gleick, p. 13-24. New York: Oxford University.
- Hakoun, V., Mazzilli, N., Pistre, S. y Jourde, H., (2013). Teaching groundwater flow processes: connecting lecture to practical and field classes. *Hydrology Journal*, 24 05, Volumen 17(5), 1975–1984 p. DOI:10.5194/hess-17-1975-2013.
- Hoque, M. A., Hoque, M. M. & Ahmed, K. M., (2007). Declining groundwater level and aquifer dewatering in Dhaka metropolitan area, Bangladesh: causes and quantification. *Hydrogeology Journal*, 15(8), 1523-1534 p.DOI: 10.1007/s10040-007-0226-5.
- Juarez, E. & Rico, A., 1994. *Mecánica de suelos. Primera edición*. México D.F., México: LIMUSA.
- Lee, M. K. (1998). Hands-On Laboratory Exercises for an Undergraduate Hydrogeology Course, *Journal of Geoscience Education*, 46(5), p. 433-438. DOI:10.5408/1089-9995-46.5.433.
- Loheide II, S. y Shinga, K. (2011). Linking Physical and Numerical Modelling in Hydrogeology using Sand Tank Experiments and COMSOL Multiphysics. *International Journal of Science Education*, 33(4). p. 547-571. DOI: 10.1080/09500693.2010.490570.
- López, J., Fornés, J., Ramos, G. y Villarroya, F. (2009). Las aguas subterráneas: Un recurso natural del subsuelo. *Cuarta edición*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España. p. 90.
- Lopez-Maldonado, Y., Batllori-Sampedro, C. y Fath, B. (2017). Local groundwater balance model: stakeholders' efforts to address groundwater monitoring and literacy. *Hydrological Sciences Journal*, 62(14), p. 2297-2312. DOI:10.1080/02626667.2017.1372857
- Manzo, D., 2016. *Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la república de Guatemala*, República de Guatemala, Guatemala: Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales. p. 113.
- Mazari, M., 2003. El agua como recurso. *Revista: ¿cómo ves?*, 1(54). 10-12 p.
- OMM, 2012. *Glosario hidrológico internacional*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial (OMM), 469 p.

- Richey, AS, BF Thomas, M.-H. Lo, JT Reager, JS Famiglietti, K. Voss, S. Swenson, y M. Rodell (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment). *Water Resources Research.*, 17349(51), 5217-5238. DOI: 10.1002/2015WR017349.
- Rocha, A. (2003). Los modelos como herramienta valiosa para el diseño hidráulico. Ciclo de conferencias de Investigación en modelos físicos y matemáticos de obras hidráulicas (febrero 2003). (p.1-18). Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sánchez, J., (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea*. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. Salamanca, España. 414 p.
- Sahu, P. y Sikdar, P. (2008). Hydrochemical framework of the aquifer in and around East Kolkata Wetlands, West Bengal, India. *Environ Geol*, 55(4), p. 823-835. DOI: 10.1007/s00254-007-1034-x.
- Sotelo, G. (1997). *Hidráulica General*. Primera edición. México D.F.: Limusa. p. 522.
- Unesco
- Vergara, M. (1993). *Técnicas de modelación en hidráulica*. Primera edición. México D.F., México: Alfaomega. 292 p.
- Werner, J., 1996. *Introducción a la Hidrogeología*. Primera edición. Nuevo León, México: Linares. p. 174.
- Woods, S., MacDonald, L. y Westbrook, C. (2006). Hydrologic interactions between an alluvial fan and a slope wetland in the central Rocky Mountains, USA. *WETLANDS*; 26(1). 230-243 p. DOI; 230-243./10.1672/0277-5212(2006)26[230:HIBAAF]2.0.CO;2
- WWAP. (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015*, Perusa, Italia: UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). p. 12.
- Ye, S., Luo, Y., Wu, J., Yan, X., Wang, H., Jiao, X. y Teatini, P. (2016). Three-dimensional numerical modeling of land subsidence in Shanghai, China. *Hydrogeol J*, 24 (3), pp. 695-709. DOI 10.1007/s10040-016-1382-2.