

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

**"GUÍA DE ASPECTOS TÉCNICOS Y DE CALIDAD DEL AGUA PARA EL APROVECHAMIENTO Y
EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRANEA EN GUATEMALA"**

TESIS DE GRADO

NANCY ANABELLA MARTÍNEZ PONCE

CARNET 20010-11

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, MAYO DE 2017
CAMPUS CENTRAL

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

**"GUÍA DE ASPECTOS TÉCNICOS Y DE CALIDAD DEL AGUA PARA EL APROVECHAMIENTO Y
EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRANEA EN GUATEMALA"**

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA

POR

NANCY ANABELLA MARTÍNEZ PONCE

PREVIO A CONFERÍRSELE

EL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADA

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, MAYO DE 2017
CAMPUS CENTRAL

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.
VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO
VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS
SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

VICEDECANA: MGTR. KAREN GABRIELA MORALES HERRERA DE ZUNIGA
SECRETARIA: MGTR. MARYA ALEJANDRA ORTIZ PATZAN
DIRECTOR DE CARRERA: ING. OSMAN CARRILLO SOTO

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

ING. JOSE FERNANDO SAMAYOA ROLDAN

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN

MGTR. JORAM MATIAS GIL LAROJ
ING. GRETTEL MARISSA DE LA CRUZ HERRERA
ING. GUNTHER STANLEY CARRANZA LOPEZ

Guatemala, 27 de marzo de 2017

Ingeniera
Karen Morales
Secretaria de Facultad
Facultad de Ingeniería

Estimada Inga. Morales:

Por este medio me es grato saludarle y desearle toda clase de éxitos en sus labores diarias.

El motivo de la presente es para informarle que he revisado el informe final del Trabajo de Graduación titulado: **"GUÍA DE ASPECTOS TÉCNICOS Y DE CALIDAD DEL AGUA PARA EL APROVECHAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA EN GUATEMALA"**, de la estudiante **Nancy Anabella Martínez Ponce**, quien se identifica con número de carnet **20010-11**. Después de haber revisado el informe final y de acuerdo con los requerimientos establecidos por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar, doy como aprobado dicho trabajo.

Sin otro particular, me suscribo de Ud.

Atentamente,



José Fernando Samayoa R.
Ingeniero Civil e Hidrogeólogo
Asesor



Universidad
Rafael Landívar
Tradición Jesuita en Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
No. 0259-2017

Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado de la estudiante NANCY ANABELLA MARTÍNEZ PONCE, Carnet 20010-11 en la carrera LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL, del Campus Central, que consta en el Acta No. 02310-2017 de fecha 31 de enero de 2017, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

"GUÍA DE ASPECTOS TÉCNICOS Y DE CALIDAD DEL AGUA PARA EL APROVECHAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRANEA EN GUATEMALA"

Previo a conferírsele el título de INGENIERA CIVIL en el grado académico de LICENCIADA.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 5 días del mes de mayo del año 2017.

MGTR. MARYA ALEJANDRA ORTIZ PATZAN, SECRETARIA
INGENIERÍA
Universidad Rafael Landívar



AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen.

Por iluminarme y darme las fuerzas para seguir adelante día con día.

A mi abuelita, mi Wita.

Mi ángel.

A mis papás.

Por ser los pilares de mi vida. Por apoyarme y amarme siempre, ante toda circunstancia. Por su esfuerzo para poder brindarme mejores oportunidades a pesar de cualquier dificultad. Por ser mi ejemplo de vida.

A mis hermanas.

Por su apoyo, amor y la alegría que me dan. Por los ánimos brindados para seguir adelante.

A mis tíos,
Raúl, Anabella y Guisella.

Por ser una razón indispensable para lograr culminar mi etapa universitaria. Por quererme y brindarme soporte siempre que lo necesité.

A mis primos.

Por su compañía y ayuda durante estos años.

A mis amigos.

Por la compañía que día a día me dieron. Por las risas, los buenos momentos y la ayuda que me brindaron.

A mi asesor.

Por la guía brindada para la realización del presente trabajo.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo es una guía que contiene información relacionada con el aprovechamiento de agua subterránea, específicamente por medio de pozos verticales mecánicamente perforados. Como parte inicial, se presenta un apartado de antecedentes con el fin de comprender el origen, comportamiento y almacenamiento de las aguas subterráneas. Previo a introducirse en el tema de pozos verticales, se menciona otros tipos de captación del recurso hídrico subterráneo.

Siendo los pozos verticales las obras de captación y extracción de agua subterránea de los acuíferos más utilizadas, se incluye una serie de consideraciones de diseño y aspectos importantes que van desde la exploración del agua, abarcando métodos de perforación más usuales, hasta la construcción y terminación del pozo. Para finalizar, se presenta una sección dedicada a la caracterización y calidad del agua subterránea, aspecto relevante en cuanto al uso que se le dará al recurso.

DESCRIPTORES

1. Infiltración de agua.
2. Acuífero.
3. Captación de agua subterránea.
4. Pozos perforados mecánicamente.
5. Hidráulica de pozos.
6. Métodos de perforación.
7. Entubado del pozo.
8. Rejillas para pozos.
9. Desarrollo de pozos.
10. Equipo de bombeo.
11. Caracterización y calidad de agua subterránea.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
III. JUSTIFICACIÓN	3
IV. OBJETIVOS	4
i. Objetivo general	4
ii. Objetivos específicos.....	4
V. ALCANCES Y LÍMITES	5
i. Alcances.....	5
ii. Límites.....	5
1. MARCO TEÓRICO	6
1.1. Ciclo Hidrológico del Agua	6
1.1.1. Condensación.....	6
1.1.2. Precipitación	7
1.1.3. Evapotranspiración	8
1.1.4. Infiltración y percolación	10
1.1.5. Flujo interno o interflujo	15
1.1.6. Escorrentía y escorrentía superficial.....	16
1.2. Agua subterránea.....	16
1.2.1. Distribución del agua por debajo de la superficie del suelo	17
1.3. Acuíferos	20
1.3.1. Tipo de rocas	21
1.3.2. Procesos geológicos y formación de acuíferos	23
1.3.3. Tipos de acuíferos	25

1.3.4.	Propiedades de los acuíferos	27
1.4.	Hidrogeología de Guatemala	32
1.4.1.	Geología y unidades hidrogeológicas de Guatemala	33
1.4.2.	Cuencas hidrográficas de Guatemala.....	37
1.4.3.	Regiones acuíferas de Guatemala	38
1.4.4.	Estudio Hidrogeológico en Guatemala	41
2.	EXPLORACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	43
2.1.	Perforación exploratoria	43
2.2.	Métodos de información geológica.....	46
2.2.1.	Mapas geológicos.....	46
2.2.2.	Secciones transversales.....	47
2.2.3.	Fotografías aéreas e imágenes satelitales	47
2.3.	Métodos geofísicos	48
2.3.1.	Refracción (método sísmico)	49
2.3.2.	Gravimetría	49
2.3.3.	Métodos geoeléctricos.....	50
2.4.	Métodos electromagnéticos	50
2.4.1.	Métodos magnetoteléuticos.....	50
2.4.2.	Método de polarización inducida	51
2.4.3.	Método de radar terrestre	51
2.4.4.	Resonancia Magnética	52
2.5.	Registro de pozos existentes	52
2.6.	Señales superficiales de existencia de agua subterránea.....	53
3.	CAPTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	53
3.1.	Galerías filtrantes o de captación	54

3.2.	Zanjas y zanjas drenantes	58
3.3.	Pozos y sondeos	60
3.4.	Pozos con drenes	61
4.	POZOS SONDEO-POZOS MECÁNICOS	63
4.1.	Hidráulica de pozos.....	64
4.1.1.	Análisis bajo régimen permanente.....	68
4.1.2.	Análisis bajo régimen no permanente (variable).....	71
4.2.	Pruebas de bombeo	76
4.2.1.	Pozos de observación	77
4.2.2.	Realización de la prueba de bombeo	78
4.2.3.	Prueba bombeo para determinar parámetros del pozo de bombeo... 80	
4.2.4.	Medición del caudal de agua durante una prueba de bombeo	88
4.3.	Consideraciones generales de diseño de pozos	95
4.4.	Métodos de perforación de pozos	98
4.4.1.	Método de percusión	99
4.4.2.	Método de rotación	111
4.4.3.	Método de rotopercusión	124
4.4.4.	Método de voladura	127
4.5.	Terminación de pozos	129
4.5.1.	Tubería de revestimiento (casing)	129
4.5.2.	Rejilla	136
4.5.3.	Empaque de grava	145
4.5.4.	Sellado del pozo	150
4.6.	Desarrollo de pozos	151
4.6.1.	Sistemas de desarrollo de pozos.....	153

4.7.	Desinfección del pozo	158
4.8.	Selección del equipo de bombeo para la extracción de agua	160
4.8.1.	Tipo de bombas	160
4.8.2.	Carga dinámica total.....	164
4.8.3.	Potencia de la bomba	171
4.9.	Ejemplo de diseño de pozo	172
5.	CARACTERÍSTICAS Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA	179
5.1.	Naturaleza del agua subterránea	179
5.1.1.	Principales componentes del agua subterránea.....	180
5.1.2.	Parámetros de caracterización de agua subterránea	180
5.2.	Calidad del agua subterránea	186
5.2.1.	Normas de calidad de agua para consumo humano	186
5.2.2.	Agua subterránea para uso agrícola y uso industrial.....	188
5.3.	Contaminación del agua subterránea.....	189
5.3.1.	Fuentes de contaminación de agua subterránea.....	189
5.3.2.	Causas y efectos de la contaminación del agua subterránea.....	191
5.3.3.	Tratamientos para agua contaminada	192
VI.	CONCLUSIONES.....	204
VII.	RECOMENDACIONES	206
VIII.	REFERENCIAS.....	208
IX.	ANEXOS	219
	Anexo A: unidades hidrogeológicas de Guatemala.	220
	Anexo B: mapa de cuencas hidrográficas de Guatemala.	221
	Anexo C: mapa de acuíferos principales en Guatemala.	222

Anexo D: valores de la función $Ko(x)$ para la utilización de la fórmula de De Glee-Jacob en régimen permanente, para utilizar en Ecuación No. 14.	223
Anexo E: valores de la función $W(\mu_A \text{ y } \mu_B)$ para la función de Neuman, para régimen variable para utilizar en Ecuación No. 15.	224
Anexo F: curva de Theis para la obtención de parámetro W para análisis de acuíferos confinados en régimen variable para utilizar en Ecuación No. 19. ...	226
Anexo G: valores de Hantush para función W , para acuíferos semiconfinados en régimen variable, con y sin almacenamiento de agua en el acuitardo, para utilización de Ecuaciones No. 21 y 23.	227
Anexo H: caudales para vertedero rectangular, según diversos anchos y tirantes de agua.	229
Anexo I: diferentes caudales con variaciones de ángulos y tirantes de agua para vertederos triangulares.	230
Anexo J: propiedades físicas de las tuberías de revestimiento según variaciones de espesores y diámetros.	231
Anexo K: tabla para determinación de viscosidad para cálculo de número de Reynolds.	232
Anexo L: diagrama de Moody para la determinación del factor f de la fórmula de Darcy & Weisbach.	233
Anexo M: largos equivalentes para pérdidas de carga por accesorios, expresados en metros de tubería recta.	234
Anexo N: modelo de presentación resultados análisis de muestra de agua. ...	235
Anexo O: norma COGUANOR 29001.	236
Anexo P: normas EPA.	248
Anexo Q: resultados de análisis físico químico y microbiológico en pozo ubicado en zona 16, en cercanías a la Universidad Rafael Landívar, en el año 2013. .	254
Anexo R: resultados de análisis físico químico en pozo ubicado en zona 16, en el sector de San Isidro, en el año 2012.	256

Anexo S: resultados de análisis físico químico y microbiológico en pozo ubicado en km 18.8 carretera al Pacífico, Villa Nueva, en el año 2012.	257
Anexo T: límites de parámetros de agua para riego, adaptadas de Ayer y Wescot por International Plan Nutrition Institute.	258

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1: valores de S para diversos materiales y tipos de acuífero.	32
Tabla No. 2: unidades hidrogeológicas de Guatemala y sus características.	34
Tabla No. 3: tipos de obras de captación.	54
Tabla No. 4: materiales y sus características.	56
Tabla No. 5: métodos a utilizar para el análisis de la prueba de bombeo bajo diversas condiciones acuíferas.	68
Tabla No. 6: tiempos recomendados para prueba de bombeo.	79
Tabla No. 7: lecturas de caudal y descenso de agua.	86
Tabla No. 8: ventajas y desventajas método perforación pozos por percusión. ...	110
Tabla No. 9: ventajas y desventajas método perforación rotativo convencional. ...	119
Tabla No. 10: ventajas y desventajas método de perforación rotativo invertido. ...	121
Tabla No. 11: velocidades de aire recomendadas según el tipo de roca.	123
Tabla No. 12: recomendación diferencia de diámetros, cálculo espacio anular. ...	123
Tabla No. 13: ventajas y desventajas del método de perforación rotopercutivo. ...	126
Tabla No. 14: diámetros óptimos y mínimos casing según diámetro de bomba. ...	135
Tabla No. 15: valores relación granulometría de formación-empaque de grava. ...	147
Tabla No. 16: tamaño de grava para empaque para pozos desarrollados.	147
Tabla No. 17: tamaño de grava para empaque para pozos sin desarrollo.	148
Tabla No. 18: recomendación diámetros tubería aire y de descarga de agua. ...	156
Tabla No. 19: cantidades necesarias para preparación de 1000 litros de solución clorada con hipoclorito de calcio.	159
Tabla No. 20: cantidades necesarias para preparación de 1000 litros de solución clorada con hipoclorito de sodio.	159

Tabla No. 21: valores C para fórmula Hazen-Williams.....	166
Tabla No. 22: disminución de presión atmosférica según altura.	170
Tabla No. 23: presión de vapor de agua.	170
Tabla No. 24: iones fundamentales de la composición del agua subterránea. ...	180
Tabla No. 25: resultados de análisis de agua subterránea en diversos puntos de la ciudad capital.	187
Tabla No. 26: fuentes de contaminación de agua subterránea.	190
Tabla No. 27: problemas causados por la contaminación del agua subterránea.	191
Tabla No. 28: valores de la función de Hantush.....	223
Tabla No. 29: valores $1/\mu_A$ y factor β	224
Tabla No. 30: valores $1/\mu_A$ y factor β	225
Tabla No. 31: valores de Hantush (con almacenamiento en el acuitardo).	227
Tabla No. 32: valores de Hantush (sin almacenamiento en el acuitardo).	228
Tabla No. 33: caudales experimentales para vertederos rectangulares.....	229
Tabla No. 34: caudales experimentales para vertederos triangulares.....	230
Tabla No. 35. propiedades físicas de tubería de revestimiento.....	231
Tabla No. 36: propiedades físicas del agua.	232
Tabla No. 37: pérdidas de carga localizadas (por accesorios).	234
Tabla No. 38: hoja para resultados de análisis de muestras de agua.	235
Tabla No. 39: resultados análisis fisicoquímico pozo zona 16 (1).	254
Tabla No. 40: resultados de análisis bacteriológico pozo zona 16 (1).	255
Tabla No. 41: resultados análisis fisicoquímico pozo zona 16 (2).	256
Tabla No. 42: resultados análisis fisicoquímico-microbiológico pozo Villa Nueva	257
Tabla No. 43: parámetros de calidad de agua para riego.	258

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica No. 1: relación tiempo-descenso en un bombeo escalonado totalmente recuperado.	81
Gráfica No. 2: relación tiempo-descenso en un bombeo escalonado parcialmente recuperado.	81

Gráfica No. 3: relación tiempo-descenso en un bombeo escalonado sin recuperación, con niveles estabilizados.	82
Gráfica No. 4: relación tiempo-descenso en un bombeo escalonado sin recuperación y sin estabilización de niveles.....	83
Gráfica No. 5: pares de datos que no se alinean, lo cual indica que debe buscarse otro valor de n.	86
Gráfica No. 6: pares de datos alineados que representan un valor correcto de n.	86
Gráfica No. 7: factores de descarga K según la relación entre los diámetros del agujero y la tubería.....	91
Gráfica No. 8: curva de rendimiento de bomba (de determinado fabricante, para determinada bomba).	163
Gráfica No. 9: Curva de Theis.	226
Gráfica No. 10: Diagrama de Moody.	233

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen No. 1: constituyentes del suelo.....	11
Imagen No. 2: vista perfil de las zonas de distribución de agua en el subsuelo....	20
Imagen No. 3: diferentes tipos de acuíferos.	26
Imagen No. 4: reducción de mapa de unidades hidrogeológicas de Guatemala...	37
Imagen No. 5: reducción de mapa de cuencas hidrográficas de Guatemala.	38
Imagen No. 6: reducción de mapa de regiones acuíferas de Guatemala.....	40
Imagen No. 7: ejemplo de perfil litológico y eléctrico de una formación.	45
Imagen No. 8: ejemplo de sección transversal geológica.	47
Imagen No. 9: fotografía satelital en donde se puede observar variación de accidentes geográficos y superficie del terreno.....	48
Imagen No. 10: ejemplificación de método de refracción sísmica.....	49
Imagen No. 11: ejemplificación de método geoelectrico para la medición de resistividad.	50
Imagen No. 12: persona utilizando equipo de radar para penetración terrestre....	51

Imagen No. 13: equipo geológico de resonancia magnética.....	52
Imagen No. 14: perfil longitudinal de una galería de infiltración.	58
Imagen No. 15: zanja drenante.	60
Imagen No. 16: ejemplificación isométrica de pozo con drenes horizontales.	62
Imagen No. 17: vista en planta de pozo con drenes radiales.....	63
Imagen No. 18: superficies cilíndricas imaginarias por las cuales el flujo de agua converge hacia el pozo.	66
Imagen No. 19: vista en perfil. Representación cono de depresión de un pozo....	66
Imagen No. 20: ejemplo de sonda eléctrica para medición de nivel de agua dentro de un pozo.....	80
Imagen No. 21: sistema de agujero calibrado para medición de caudal de agua extraído.	90
Imagen No. 22: vista en elevación de vertedero rectangular.	92
Imagen No. 23: vista en elevación de vertedero triangular.	93
Imagen No. 24: método de la escuadra para medir caudales de agua.	94
Imagen No. 25: trépano californiano. Vista en perfil y sección transversal de la parte inferior.	103
Imagen No. 26: trépano cruciforme. Vista en perfil y sección transversal de la parte inferior.	104
Imagen No. 27: trépano salomónico. Vista en perfil.	104
Imagen No. 28: ángulo de penetración y ángulo de despeje de un trépano. Vista en perfil.	105
Imagen No. 29: válvula o cuchara de bisagra.	109
Imagen No. 30: vista en perfil vástago Kelly de sección hexagonal y cuadrada.	112
Imagen No. 31: tricono. Se observa el agujero de salida de fluido.....	114
Imagen No. 32: vista de perfil de trépano cola de pez. La vista de las cuchillas es sección transversal de la parte inferior.....	114
Imagen No. 33: trépano de corona de diamante.	115
Imagen No. 34: movimiento de aire comprimido en perforación (vista en perfil).	124
Imagen No. 35: martillo DTH y bocas de botón.....	126
Imagen No. 36: conexión acoplada.	132

Imagen No. 37: conexiones acopladas con y sin aumento de diámetro de tubería.	132
Imagen No. 38: conexión integral de tubería.....	133
Imagen No. 39: conexión cuadrada y biselada.....	133
Imagen No. 40: conexión campana-espiga.	134
Imagen No. 41: representación de diámetro de perforación, tubería de revestimiento y tubería de bomba sumergible (vista en planta).	136
Imagen No. 42: distribución de rejilla por secciones en un mismo espesor de acuífero. La longitud total de la rejilla es la misma en ambos casos pero el flujo convergente de agua se minimiza en la rejilla por secciones.....	138
Imagen No. 43: ubicaciones incorrectas de rejillas.	139
Imagen No. 44: rejilla ranurada verticalmente.	140
Imagen No. 45: rejilla con ranuras puente.....	141
Imagen No. 46: rejilla con base de tubería y cable enrollado.....	141
Imagen No. 47: rejilla de persianas.	142
Imagen No. 48: rejilla de cable enrollado.	143
Imagen No. 49: columna de pozo (tubería unida a rejilla) con empaque de grava alrededor.	149
Imagen No. 50: detalle de empaque de grava y flujo de agua.	150
Imagen No. 51: vista en perfil de la estructura de un pozo (sin bomba instalada).	151
Imagen No. 52: representación en perfil de desarrollo por pistón o émbolo de limpieza.	154
Imagen No. 53: Representación en perfil de método de desarrollo por aire comprimido.....	156
Imagen No. 54: eyector de boquillas.	157
Imagen No. 55: salida de flujo de agua inyectada a alta presión por medio de las ranuras de la rejilla.	157
Imagen No. 56: bomba sumergible en pozo (perfil).....	161
Imagen No. 57: bomba centrífuga de eje horizontal.....	162
Imagen No. 58: bomba centrífuga de eje vertical no sumergible (perfil).	162

Imagen No. 59: ejemplificación de perfil de pozo.	178
Imagen No. 60: difusor circular de membrana.....	194
Imagen No. 61: difusores tubulares de membrana.....	195
Imagen No. 62: aireador de turbina con proyección de agua hacia la superficie. La turbina sumergida succiona el agua, ésta asciende y posteriormente sale a la superficie para volver a caer al cuerpo de agua.	195
Imagen No. 63: vista en elevación de aireador de bandejas.	196
Imagen No. 64: perfil de aireador de cascada.....	197
Imagen No. 65: filtro de tanque de varias capas de material.	199
Imagen No. 66: ejemplo de filtro lento convencional, con flujo descendente.	200
Imagen No. 67: ejemplo de tanque ablandador y tanque con salmuera para regeneración de resina.....	201

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama No. 1: componentes de la evapotranspiración.....	8
Diagrama No. 2: requerimientos de un estudio hidrogeológico en Guatemala.	42
Diagrama No. 3: procesos generales del método de percusión.	100

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa No. 1: provincias geológicas de Guatemala.	34
Mapa No. 2: unidades litológicas de Guatemala.	220
Mapa No. 3: cuencas hidrográficas de Guatemala.....	221
Mapa No. 4: acuíferos principales de Guatemala.....	222

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación No. 1: volumen total del suelo	11
Ecuación No. 2: porosidad total.....	28
Ecuación No. 3: porosidad efectiva	28
Ecuación No. 4: velocidad de flujo de agua bajo la Ley de Darcy	29
Ecuación No. 5: velocidad de flujo (simplificada)	30
Ecuación No. 6: caudal de agua.....	30
Ecuación No. 7: caudal de agua tomando en cuenta la transmisividad (1)	30
Ecuación No. 8: caudal de agua tomando en cuenta la transmisividad (2)	31
Ecuación No. 9: coeficiente de almacenamiento.....	32
Ecuación No. 10: caudal por medio del principio de Dupuit para acuíferos libres, en régimen permanente	68
Ecuación No. 11: caudal por medio del principio de Dupuit para acuíferos confinados, en régimen permanente	69
Ecuación No. 12: caudal por medio del principio de Thiem para acuíferos confinados, en régimen permanente	69
Ecuación No. 13: factor de filtración.....	70
Ecuación No. 14: abatimiento por medio del principio de De Glee-Jacob para acuíferos semiconfinados, en régimen permanente.....	71
Ecuación No. 15: abatimiento por medio del principio de Neuman para acuíferos libres, en régimen variable	72
Ecuación No. 16: factor UA para principio de Neuman	73
Ecuación No. 17: factor UB para principio de Neuman	73
Ecuación No. 18: factor β para principio de Neuman	73
Ecuación No. 19: abatimiento por medio del principio de Theis para acuíferos confinados, en régimen variable.....	74
Ecuación No. 20: factor u para principio de Theis	74
Ecuación No. 21: abatimiento por medio de principio de Hantush, acuíferos semiconfinados, en régimen variable, (almacenamiento de agua en el acuitardo).....	75
Ecuación No. 22: factor de filtración (2)	75

Ecuación No. 23: abatimiento por medio de principio de Hantush, acuíferos semiconfinados, en régimen variable, (almacenamiento de agua en el acuitardo)	76
Ecuación No. 24: factor β para principio de Hantush	76
Ecuación No. 25: abatimiento real.....	83
Ecuación No. 26: abatimiento teórico.....	84
Ecuación No. 27: descensos a causa de rozamiento.....	84
Ecuación No. 28: ecuación general de descensos.....	84
Ecuación No. 29: eficiencia del pozo.....	84
Ecuación No. 30: arreglo de ecuación de descensos (1)	87
Ecuación No. 31: arreglo de ecuación de descensos (2)	87
Ecuación No. 32: arreglo de ecuación de descensos (3)	87
Ecuación No. 33: arreglo de ecuación de descensos sin factor B y C	87
Ecuación No. 34: caudal por medio del método volumétrico.....	88
Ecuación No. 35: caudal por el método del orificio calibrado	90
Ecuación No. 36: caudal para vertederos rectangulares.....	92
Ecuación No. 37: caudal para vertederos triangulares.....	93
Ecuación No. 38: caudal para vertederos con ángulo de 90°.....	93
Ecuación No. 39: caudal por medio del método de la escuadra.....	94
Ecuación No. 40: desviación del pozo.....	98
Ecuación No. 41: presión hidrostática del fluido de perforación	116
Ecuación No. 42: ecuación de continuidad (cálculo de caudal).....	123
Ecuación No. 43: longitud de tubería de revestimiento	134
Ecuación No. 44: volumen de grava.....	148
Ecuación No. 45: carga dinámica total	164
Ecuación No. 46 y 47: pérdida de carga por fricción según Hazen-Williams	165
Ecuación No. 48: pérdida de carga por fricción según Darcy & Weisbach.....	166
Ecuación No. 49: número de Reynolds	167
Ecuación No. 50: pérdida de carga en accesorios.	168
Ecuación No. 51: carga neta de succión positiva disponible	169
Ecuación No. 52: potencia de bomba.....	171
Ecuación No. 53: potencia de bomba (2)	182

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para el ser humano y la vida en el planeta, no solamente en cuanto a procesos fisiológicos de los seres vivos, sino también es esencial para la producción y crecimiento de alimentos y para mantener un equilibrio en el medio ambiente y los diversos fenómenos que ocurren en él. Existen varias fuentes aprovechables de agua para consumo humano y otros usos; una de las más importantes es el agua subterránea, siendo un componente significativo de los recursos hídricos de agua dulce explotables a nivel mundial. En Guatemala, el agua subterránea es un recurso hídrico importante y su disponibilidad varía según las diversas regiones del país y las características hidrogeológicas que se presenten.

Numerosas actividades humanas requieren la utilización del recurso hídrico. Estas actividades cada vez son más y se han ido diversificando con el paso del tiempo, por lo que también ha habido un aumento en cuanto a la demanda de agua utilizada y por lo tanto en la explotación del agua subterránea. Para dicho aprovechamiento se construyen obras de captación del recurso, las cuales pueden variar según aspectos técnicos, de accesibilidad, económicos, entre otros.

Las obras de captación de agua subterránea más utilizadas mundialmente son los pozos excavados verticalmente, los cuales han mejorado cada vez más sus técnicas de construcción mediante procesos mecanizados, aunado a una serie de aspectos de diseño que deben ser considerados para lograr un eficiente aprovechamiento del recurso, cumpliendo con los requerimientos deseados. Además del conjunto de aspectos técnicos a tomar en cuenta al momento del diseño y equipamiento de pozos verticales, la calidad del agua subterránea juega un papel de suma importancia, por lo que entra en juego las características naturales que ésta posea, de acuerdo a sus condiciones hidrogeológicas, que influirán en el uso del recurso, de acuerdo al tipo de proyecto.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua subterránea se explota cada vez más, tanto nacional como internacionalmente, en el sector doméstico, industrial, agrícola y demás. Por lo tanto es necesario que los diversos procedimientos que se apliquen para dicha explotación sean los adecuados y garanticen un correcto aprovechamiento del recurso.

Mediante correctas prácticas y procedimientos, el aprovechamiento del agua subterránea es eficiente y para que se logren llevar a cabo se requiere criterios y guías profesionales y técnicas desde el momento de la planificación y diseño hasta la construcción y mantenimiento de la obra de captación del recurso.

En el territorio nacional, el tema del agua subterránea necesita ser estudiado de manera más profunda, tanto en el ámbito público como privado, permitiendo la generación de información acerca del recurso y su explotación y generando bases sólidas para la creación e implementación de normas y leyes de gestión del recurso hídrico subterráneo. El carecer de dicha información conlleva a prácticas incorrectas que implican consecuencias negativas en aspectos ambientales y sociales.

Académicamente, la mayoría de universidades guatemaltecas carecen de cursos enfocados en el agua subterránea. Al mismo tiempo, profesionalmente, no se cuenta con documentos de referencia que describan y den a conocer los aspectos técnicos más importantes para el aprovechamiento del recurso.

III. JUSTIFICACIÓN

Debido a la carencia de material técnico e informativo acerca del aprovechamiento del agua subterránea en Guatemala, el presente trabajo de graduación es una herramienta que sirve de guía para estudiantes universitarios, así como para personas profesionales; trabajo en la cual se exponen los diversos procesos relacionados con el agua subterránea y su aprovechamiento, describiendo aspectos técnicos importantes, consideraciones y recomendaciones según situaciones que puedan presentarse.

La información contenida en la presente guía es útil para diversos campos profesionales como la ingeniería civil, agronomía, ingeniería ambiental, geología e hidrogeología y demás campos relacionados con el agua subterránea. El contar con un documento guía aplicable al mejoramiento de las prácticas de aprovechamiento de dicho recurso, es un aspecto benéfico para los municipios del país y sus habitantes.

Debido a que el agua subterránea varía su disponibilidad según la región en la que se encuentre, es importante conocer el funcionamiento de diversas obras de captación del recurso para evaluar las diversas situaciones y decidir cuál construir.

IV. OBJETIVOS

i. Objetivo general

Proveer una guía de aspectos, procesos y consideraciones de diseño involucrados en la explotación de agua subterránea, para lograr un adecuado aprovechamiento del recurso hídrico.

ii. Objetivos específicos

- Proporcionar y definir conceptos hidrogeológicos relacionados con el agua subterránea y entender el comportamiento de la misma en las capas del subsuelo y en los acuíferos.
- Exponer diversas obras de captación de agua subterránea, explicando su mecanismo de funcionamiento y características generales.
- Detallar los diversos procesos y consideraciones de diseño relacionados con los pozos verticales mecánicamente perforados, así como describir los componentes físicos que los conforman.
- Demostrar la importancia del conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas del agua subterránea y los diversos parámetros y límites de calidad de la misma, para saber si es apta para el consumo humano.

V. ALCANCES Y LÍMITES

i. Alcances

El trabajo de graduación presente se centra especialmente en los pozos perforados mecánicamente, abarcando aspectos técnicos relacionados con el diseño de los mismos, desde la etapa de planificación y diseño, hasta la etapa de perforación y equipamiento de los mismos. Al mismo tiempo, se mencionan y describen aspectos de calidad del agua; se expone las características naturales generales del agua subterránea y los parámetros que deben ser evaluados para determinar la calidad de la misma, así como tratamientos adecuados para mejorar dicha calidad, si fuese necesario.

Aunado a lo anterior, el trabajo incluye, inicialmente, una serie de conceptos hidrogeológicos que son necesarios de conocer al momento de tratar con el agua subterránea. Se contextualiza las características geológicas e hidrogeológicas para el territorio guatemalteco, así como los requerimientos de un estudio hidrogeológico nacional. Como información complementaria se incluye una sección que contiene los aspectos generales sobre otras obras de captación de agua subterránea, aparte de los pozos mecánicos.

ii. Límites

Las limitaciones encontradas al realizar el presente trabajo de graduación se encontraron al momento de llevar a cabo la investigación de información acerca de aspectos de agua subterránea en Guatemala. Existe poca información que detalle las condiciones pasadas y actuales de la situación del recurso hídrico subterráneo dentro del territorio nacional, información que sería útil como base para profundizar en investigaciones y proyectos relacionados.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Ciclo Hidrológico del Agua

El ciclo hidrológico del agua es un fenómeno relacionado directamente con las reservas de agua subterránea que existen en el planeta. Éste alberga más de 480 millones de kilómetros cúbicos entre el agua superficial, subterránea y la atmósfera, y durante dicho ciclo se ve involucrado un transporte del recurso a través del aire, sobre y debajo de la superficie del suelo, separándose el flujo de agua en escorrentía superficial y escorrentía subterránea. Por lo tanto, el ciclo hidrológico muestra la circulación del agua en los varios sistemas de la Tierra a través de diversos procesos, los cuales son los siguientes:

- Precipitación y condensación.
- Evaporación y transpiración (evapotranspiración).
- Infiltración y percolación.
- Flujo interno o interflujo.
- Escorrentía.

1.1.1. Condensación

Para que este proceso ocurra, una masa de aire se debe saturar con humedad y el agua cambia de estado gaseoso a líquido.

La condensación se da cuando el vapor de agua hace contacto con otra superficie o núcleo que posea una temperatura más fría que la del vapor de agua. Un ejemplo de condensación es el rocío de la mañana, que se da sobre superficies frías. Un ejemplo de núcleo se da en forma de nubes, las cuales posteriormente, cuando alcanzan una dimensión suficiente y condiciones adecuadas, precipitan.

1.1.2. Precipitación

Este proceso implica la caída de agua de la atmósfera hacia la superficie de la tierra, ya sea en estado líquido o sólido (lluvia, nieve, granizo). Para que ocurra, se requieren de ciertas condiciones como condensación, unión de gotas de lluvia, tamaño adecuado de gotas de lluvia para precipitar y no evaporarse en el trayecto.

En la atmósfera, el agua que se evapora de la tierra se almacena de manera temporal como vapor de agua. Pequeñas gotas que están en la atmósfera junto con el vapor de agua, forman nubes y cuando se llega a un punto de saturación, se da el proceso de caída de la precipitación hacia la superficie. Este punto de saturación se da cuando el aire llega a su máxima capacidad para retener agua (conforme el aire se enfría, su capacidad para retener agua decrece).

El enfriamiento del aire en la atmósfera es mayormente causado por elevaciones de masas de aire que pueden ser causadas por tres factores que producen diversos tipos de precipitación:

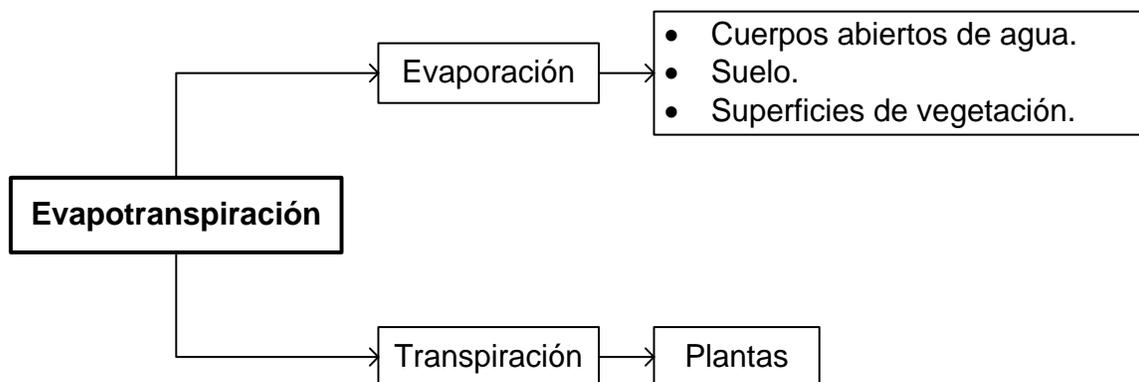
- a. Precipitación de frente o frontal: este tipo de precipitación se da cuando una masa de aire liviana o caliente se encuentra con una masa de aire pesada o fría y la masa de aire liviana se monta sobre la masa pesada. La región en donde se da el encuentro de estas dos masas de aire se conoce como frente y la lluvia producida es frontal.
- b. Precipitación convectiva: en este caso, el aire se expande debido al calor de la energía solar y se vuelve más ligero que el resto de aire a su alrededor. El aire ligero se levanta por movimientos convectivos y causa este tipo de precipitación. Se dan en temporales cálidos y se pueden presentar fuertes vientos y características de tormentas.

- c. Precipitación orográfica: se da cuando la masa de aire se encuentra con montañas o colinas, las cuales la obligan a ascender. El aire ascendido se enfría y se produce la precipitación.

1.1.3. Evapotranspiración

La evapotranspiración está formada por los procesos de evaporación y transpiración. El proceso de evaporación se da en las superficies de cuerpos de agua como lagos, estanques, reservas de agua y también en grandes superficies de suelo y vegetación. El proceso de transpiración se da por medio de las plantas.

Diagrama No. 1: componentes de la evapotranspiración.



Fuente: Andy D. Ward y William J. Elliot (1995).

La evaporación se da cuando el agua cambia de estado líquido a gaseoso. Moléculas de agua, en estado líquido y gaseoso, se encuentran en constante movimiento y se da un intercambio continuo entre ellas. Algunas de estas moléculas de agua poseen la suficiente energía para atravesar la superficie de agua en la atmósfera y algunas moléculas de vapor de agua pueden cruzar de nuevo al líquido. Cuando la cantidad de moléculas que cambian a estado gaseoso es mayor que la cantidad que cambia a estado líquido, se da el proceso de evaporación. Por lo tanto, la evaporación requiere un suministro de energía que provea un calor latente de vaporización y típicamente es

proporcionado por la radiación solar. Este calor latente de vaporización es la energía que una molécula necesita para atravesar la superficie del agua y quedar en la atmósfera como gas. La evaporación se dará hasta un punto de saturación del aire con humedad.

El proceso de transpiración es la pérdida de agua de las plantas en forma de vapor. En este proceso las raíces de las plantas absorben agua del suelo (debido a la presión osmótica) y ésta es transportada a través de la planta hacia las hojas, en las cuales el agua, en mayor porcentaje, se vuelve vapor y es transpirado a la atmósfera (a través de los estomas de la hoja). La cantidad de transpiración depende del tamaño y la densidad de la vegetación y es relevante solamente cuando la planta está en proceso de crecimiento.

Para conocer la pérdida total de agua, la evaporación y transpiración se estudian juntas para condiciones de campo ya que se desea conocer la pérdida total de agua en la región de estudio (evapotranspiración).

El proceso de evapotranspiración es complejo de analizar ya que la razón de pérdida de vapor de agua se da en función de la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie, el viento, contenido de agua en el suelo, la abertura de los estomas, el tipo de suelo y el tipo de planta. Para simplificar el estudio y los cálculos necesarios en el análisis de este proceso, sin tomar en cuenta el motivo de pérdida de agua, se determina la evapotranspiración potencial, que es la pérdida de agua que se da cuando no existe falta de agua en el suelo para uso de la vegetación, o sea, que las condiciones de suelo y vegetación fuesen óptimas. Esta situación no es aplicable para condiciones reales de campo ya que a menudo no existe disponibilidad suficiente de agua en el suelo y por lo tanto se emplea el término evapotranspiración real.

1.1.4. Infiltración y percolación

El proceso de infiltración consiste en el paso de agua a través de la superficie hacia el perfil del suelo, por medio de poros o pequeñas aberturas. Este es un proceso que afecta directamente a otros procesos como el flujo subterráneo, la percolación y la escorrentía.

Una vez el agua se infiltra en el suelo, la gravedad hace que el agua se mueva hacia los estratos inferiores de suelo. Cuando el proceso de movimiento del agua se da por debajo de la zona de raíces de las plantas y otras capas de transición debajo de éstas hacia la zona de saturación (el tema se amplía más adelante), se da el proceso de percolación, proceso en el cual el agua posee un movimiento muy lento. La mayor parte del agua percolada profundamente contribuye al suministro y reposición del agua subterránea (recarga subterránea).

El agua que se infiltra en el perfil del suelo y la cantidad infiltrada variará según el lugar ya que depende de las propiedades del suelo natural como textura, densidad, material orgánico, contenido de agua del suelo, porosidad, permeabilidad (medida de la rapidez de flujo del agua a través de ciertos suelos o capas de roca).

Al mismo tiempo, otros factores de los cuales puede depender la infiltración son la pendiente, la topografía y la rugosidad del terreno, y actividades humanas como urbanizaciones y agricultura, en donde las condiciones naturales del terreno se ven alteradas.

1.1.4.1. Relación agua-suelo

En un perfil de suelo, las partículas sólidas poseen diferentes tamaños, formas y composición mineral. También existe material orgánico

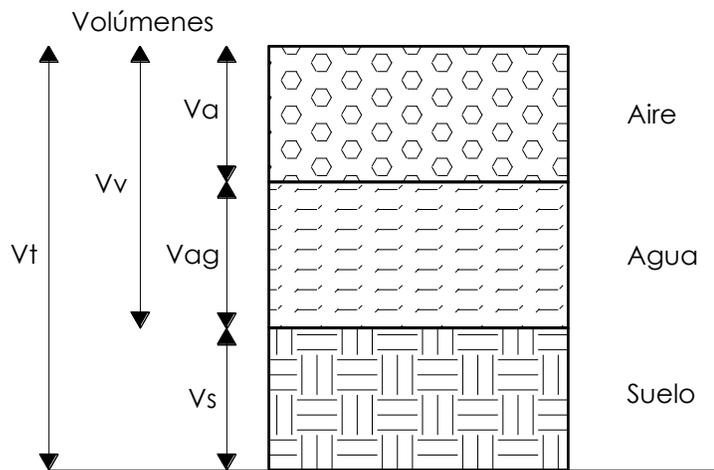
proveniente de animales, plantas y microorganismos. Generalmente, los suelos son clasificados según el tamaño de las partículas.

Entre las partículas de suelo y material orgánico existen espacios vacíos conocidos como poros. El agua que entra al perfil del suelo llena parte o todos los poros y es conocida como agua de suelo. Cuando ésta llena todos los poros, el suelo se conoce como suelo saturado.

Por lo tanto, el suelo posee un volumen total (V_t) compuesto por un volumen de agua (V_{ag}), uno de aire (V_a) y otro de las partículas de suelo (V_s). La suma del volumen de agua y aire, es el volumen de vacíos (V_v)

$$V_t = V_{agua} + V_{aire} + V_s [cm^3] \quad \text{Ecuación No. 1}$$

Imagen No. 1: constituyentes del suelo.



Fuente: elaboración propia (2016).

La porosidad del suelo es un factor de suma importancia para cuestiones de volúmenes de agua y movimiento de ésta.

1.1.4.2. Proceso de infiltración

En el suelo se dan fuerzas de tensión y fuerzas gravitacionales, lo que provoca un movimiento descendente del agua a través del perfil del suelo y dentro de éste existe un laberinto de poros de diversos tamaños conectados por fisuras y canales. El agua es contenida en la matriz del suelo debido a las fuerzas de tensión en los poros en las interfaces aire-agua dentro de éstos. Estas fuerzas también son llamadas fuerzas de capilaridad o de succión. Los poros más pequeños son los que se llenan primero porque ejercen las mayores fuerzas de tensión superficial y los poros de mayor tamaño se irán llenando hasta que se llegue a un equilibrio entre las fuerzas de capilaridad y las gravitacionales.

Conforme el agua se va infiltrando desde la superficie y percolando hacia el interior del suelo, las capas de éste se van humedeciendo, de arriba hacia abajo, por lo que la capa que se saturará primero será la superior. La lluvia proveniente del proceso de precipitación, por lo general, no saturará todo el suelo sino solamente las capas superficiales. Cuando la contribución de agua en la superficie para, la infiltración también y la humedad interna del suelo es redistribuida de manera inversa, por lo que la humedad termina siendo menor en la superficie y mayor en las capas inferiores. El suelo posee una capacidad de infiltración y es el potencial que posee para absorber agua; esta capacidad se va recuperando según la humedad de las capas superiores se va perdiendo.

Cuando la capacidad de infiltración es mayor a la intensidad de la precipitación, el agua atraviesa la superficie del suelo, penetra en el perfil de éste y la capacidad de infiltración disminuye. Puede darse el caso que esta capacidad se iguale con la intensidad de la precipitación y el agua que no se infiltra produce escorrentía superficial que corre hacia regiones más bajas para infiltrarse en caso las condiciones lo permitiesen.

1.1.4.3. Factores que afectan el proceso de infiltración

El movimiento del agua en el perfil del suelo depende de diversos factores relacionados con condiciones de la superficie del suelo y del subsuelo, características del fluido y condiciones de hidrofobicidad del suelo.

- a. Condiciones de la superficie: dependiendo de la cubierta que posea el suelo, la infiltración se verá afectada. La escorrentía superficial se da cuando la tasa de infiltración es menor que la tasa de aplicación del agua y las cavidades superficiales han sido llenadas de agua.

En suelos que presentan cubierta vegetal, la lluvia cae sobre dicha cubierta y protege al suelo del impacto. La cubierta vegetal frena el recorrido superficial del agua y hace que el tiempo de exposición a la infiltración sea mayor. Al mismo tiempo, poseer un suelo con cubierta vegetal implica penetración de las raíces de las plantas al suelo, lo que provoca una abertura de grietas que facilitan el proceso de infiltración.

En suelos que no poseen vegetación sino una superficie desnuda, la entrada de agua es retardada o evitada ya que se da una disgregación y arrastre de materiales finos y compactación debido a las gotas de lluvia que caen. Estos suelos poseen una capacidad de infiltración baja causada por el sellado de la superficie y capas superiores.

Otras condiciones superficiales que afectan la infiltración son la pendiente del terreno, ya que se relaciona con el tiempo de que la escorrentía permanece en la superficie y en el espesor de la lámina del flujo de agua sobre el suelo.

- b. Condiciones del subsuelo: dentro de estas condiciones se puede mencionar la textura del suelo, que es un factor relacionado con la disgregación de los materiales del suelo y también se puede mencionar la estructura de los agregados del mismo, que define la distribución de los poros, así como su tamaño.

La permeabilidad o conductividad hidráulica es un factor de suma importancia para condicionar el movimiento del agua en el suelo y depende de otras características del subsuelo como la textura y estructura mencionada, así como del contenido de materia orgánica, grado de saturación, tamaño de partículas, entre otras. Se mencionó brevemente que la permeabilidad es la medida de la rapidez de flujo del agua a través de ciertos suelos o capas de roca, por lo que es una característica que define la habilidad del suelo para transmitir agua bajo una unidad de gradiente hidráulico. La infiltración y la permeabilidad son mayores en suelos arenosos, gravosos y roca fracturada que en suelos arcillosos o roca sólida. O sea que, mientras más gruesa es la textura del suelo, mayor permeabilidad poseerá. Según la estructura del suelo, si es laminar, la permeabilidad será baja; si es en bloque o prismática será medio lenta y si es granular, alta.

El suelo es homogéneo cuando no varía grandemente en cuanto a sus propiedades, pero en general, la mayoría de los suelos son heterogéneos y presentan variabilidad en sus propiedades, tanto vertical como horizontalmente. Cuando el suelo presenta la misma permeabilidad en todas las direcciones, se conoce como isotrópico, mientras que si existen diferencias verticales y horizontales, es un suelo anisotrópico.

- c. Características del fluido: en estas condiciones interviene la viscosidad del agua, lo cual aumentará o disminuirá la cantidad de agua infiltrada. La viscosidad del agua se ve afectada por la temperatura que ésta posea y mientras más fría esté, mayor será la viscosidad y menor la infiltración. Al mismo tiempo, el agua puede presentar condiciones de contaminación con partículas finas o coloidales, lo cual hace que el movimiento del agua al través del suelo se vea afectado.

- d. Hidrofocibidad del suelo: existen suelos que poseen una capa de cera de materiales orgánicos que producen un ángulo de contacto negativo entre ella y el agua que cae. Esta agua no penetrará en el suelo debido a las fuerzas de succión sino que formará gotas en la superficie. Este suelo, conocido como hidrofóbico, es un efecto, normalmente, de incendios forestales y de pastos y matorrales; lo que ocurre es que la materia orgánica que se encuentra en y sobre la superficie del suelo se vaporiza durante el incendio y posteriormente se condensa en forma de materiales céreos sobre el suelo descubierto.

1.1.5. Flujo interno o interflujo

Según el agua se infiltra y percola, cierta parte puede llegar a una capa de suelo o roca que restringirá su movimiento hacia abajo. Cuando el agua alcanza dicha capa de restricción, se puede mover lateralmente a lo largo de la capa y eventualmente ser descargada en un cuerpo de agua superficial. El movimiento lateral mencionado es el proceso que se conoce como flujo interno o interflujo.

Debido a la gravedad y presión, el agua contenida en los acuíferos no se queda solamente en un lugar (un acuífero es una zona geológica subterránea que permite el almacenamiento y circulación del agua subterránea).

El agua subterránea puede fluir y alimentar cuerpos superficiales como océanos, lagos y ríos y al mismo tiempo otros acuíferos. El flujo de agua subterránea posee una dirección que sigue una trayectoria curva a través de un acuífero que se encuentra en un área con altos niveles de agua hacia áreas donde dichos niveles son bajos. Por lo tanto, el agua fluye subterráneamente desde un terreno elevado (áreas de recarga) hacia puntos de descarga de agua subterránea ubicados en valles o en el mar.

1.1.6. Escorrentía y escorrentía superficial

La escorrentía es provocada por una parte de la precipitación, derretimiento de nieve o agua de riego que fluye sobre el suelo. La escorrentía posee varias contribuciones como la escorrentía superficial, el interflujo y el flujo de agua subterránea.

La escorrentía superficial se da cuando las cavidades superficiales del suelo se llenan de agua, la precipitación continúa y se excede la tasa de infiltración del suelo y el agua que precipita empieza a correr superficialmente cuesta abajo como una corriente superficial o a través de canales definidos. También puede producirse escorrentía superficial cuando el perfil del suelo es saturado. Según las características de la cuenca y la variación de la topografía, el comportamiento de la escorrentía superficial variará.

1.2. Agua subterránea

No toda el agua que se infiltra en el suelo llega a ser agua subterránea. Puede darse el caso que las raíces de las plantas absorban el agua y la transpiren o también que las fuerzas capilares del suelo la devuelvan a la superficie y posteriormente se evapore.

Cuando estos casos no se dan, el agua se infiltra y es percolada profundamente en el suelo hasta alcanzar una zona de saturación y es en donde el agua es almacenada subterráneamente (en acuíferos).

Existe un nivel llamado nivel freático y por debajo de éste se dispone el agua subterránea. Ésta satura los poros y grietas del suelo y naturalmente fluye hacia la superficie, ya sea en forma de manantiales, vertientes o cauces fluviales (no ocurre con toda el agua almacenada de los acuíferos). Como se mencionó anteriormente, el flujo de agua subterránea posee un movimiento de zonas de altos niveles de agua hacia zonas de bajos niveles, o sea de zonas de recarga a zonas de descarga.

El movimiento del agua subterránea no posee velocidades elevadas como las de las corrientes superficiales. El agua subterránea posee un desplazamiento lento a través de los acuíferos, aunque con suelos con rocas que presentan muchas fracturas y acuíferos kársticos, la velocidad del flujo se eleva.

De manera natural, ocurre lo mencionado anteriormente, pero con la intervención del hombre, el agua subterránea es un gran recurso hídrico que puede ser aprovechado de diversas maneras por medio de perforaciones, túneles, galerías de drenajes.

1.2.1. Distribución del agua por debajo de la superficie del suelo

Para la comprensión del tema del agua subterránea y sus diversas manifestaciones, es necesario el estudio y análisis de la distribución vertical que la misma posee en el perfil del suelo.

La corteza terrestre está formada por diferentes formaciones geológicas que pueden presentar condiciones de porosidad, permeabilidad o no, ya sean

materiales consolidados (calizas, granitos), o no consolidados (arenas, arcillas) y pueden estar saturados completa o parcialmente de agua.

En la parte superior, en donde los poros y grietas se encuentran parcialmente llenos de agua, se encuentra la zona de aireación o zona no saturada. Por debajo de esta zona está la zona de saturación, en donde las aberturas están saturadas completamente de agua.

1.2.1.1. Zona no saturada o de aireación

Se encuentra entre la superficie del suelo y el nivel freático. Sus aberturas poseen agua y aire. La división de esta zona es la siguiente:

- a. Zona edáfica: se conoce también como zona de evapotranspiración o zona de humedad del suelo. Esta región va desde la superficie del suelo hasta donde llegan las raíces de las plantas. Dependiendo del tipo de suelo y la vegetación, el espesor de esta capa será variable. En ella se dan procesos químicos y biológicos que se relacionan con mucha materia orgánica. Las plantas utilizan el agua contenida en esta zona y es retenida debido a atracción molecular y fuerzas capilares contra la fuerza de gravedad. Mediante la atracción molecular se retiene el agua a manera de película alrededor de las partículas de suelo y por la acción capilar se retiene en pequeños espacios que hay entre las partículas.

El agua que se mueve hacia abajo debido a la fuerza de gravedad es el agua que las fuerzas capilares ya no logran retener debido a que se sobrepasa su capacidad.

- b. Zona intermedia: en esta zona pasa el agua que se infiltra de la zona de humedad. Es una región de la cual no se puede recuperar el agua

para su utilización y solamente funciona como transición para que el agua llegue a la zona capilar. Presenta un espesor variable.

- c. Zona capilar: se ubica por debajo de la zona intermedia y por encima de la zona saturada. Es una zona que se humedece por el ascenso de agua de la zona saturada. Es llamada zona capilar ya que la suspensión de agua en ella se da debido a fuerzas capilares. El espesor de esta capa depende de la textura del suelo y mientras más pequeños sean los poros, el agua se elevará más y el espesor variará.

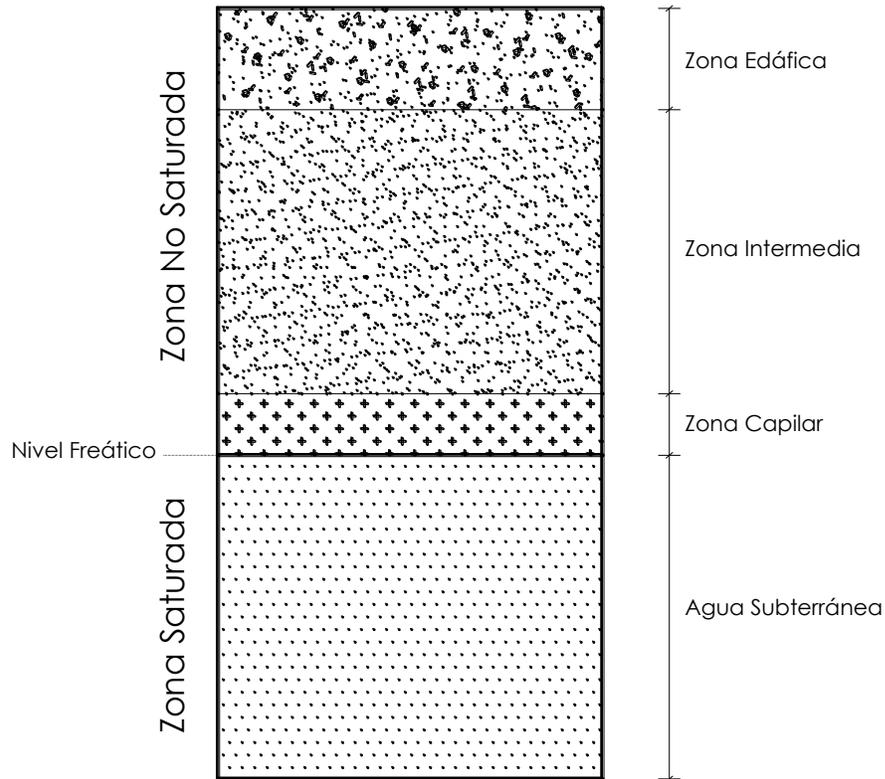
1.2.1.2. Zona saturada

Es la zona ubicada debajo de la zona capilar. Presenta condiciones en donde los poros y fisuras se encuentran llenos de agua (saturados).

En esta zona es donde se encuentra el agua subterránea en sí. El movimiento que el agua posee en esta zona es el más lento de todos debido a la saturación que presenta y es la región de donde se extrae el recurso para su aprovechamiento.

Esta región saturada se conoce como manto freático y el nivel superior, en donde se encuentra la zona libre del agua, es el nivel freático o superficie freática. La parte inferior en donde se encuentra almacenada el agua es de material impermeable, lo que impide que siga el descenso de la misma.

Imagen No. 2: vista en perfil de las zonas de distribución de agua en el subsuelo.



Fuente: elaboración propia (2016).

1.3. Acuíferos

Un acuífero es una formación geológica en donde el agua subterránea puede ser almacenada. Puede estar constituido por roca dura, con permeabilidad secundaria (materiales rocosos consolidados como granito, arenisca o caliza) o roca suave, con permeabilidad primaria (materiales rocosos no consolidados como barro, arena y grava). Ya sea material consolidado o no, el medio acuífero debe ser poroso y permeable para poder permitir que el agua pase entre las partículas de suelo.

Un acuífero almacena y transmite agua debido a sus grietas y poros, brindando espacio de almacenaje y al mismo tiempo una red de canales o conductos por donde fluye el agua.

Existen formaciones geológicas que, aunque pareciera que pudiesen ser acuíferos, no lo son. Cuando dichas formaciones pueden almacenar agua pero no transmitirla, se les conoce como acuicludos; cuando no logran almacenar ni transmitir agua son acuífugos; son acuitrados cuando transmiten el agua de manera lenta debido a la semipermeabilidad que presentan y es complicada la extracción de agua.

1.3.1. Tipo de rocas

Según el tipo de rocas, el medio acuífero puede estar formado por rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias.

- a. Rocas sedimentarias: se originan a partir de procesos de erosión y procesos climáticos que hacen que se formen depósitos. Poseen muy buenas características acuíferas y almacenan aproximadamente el 95% del agua subterránea, aún cuando solamente forman un 5% de la corteza terrestre.

Debido a los diversos procesos de formación de este tipo de rocas, éstas pueden consolidarse o no y dependerá del tipo de transporte, el tiempo, compactación, grado de acumulación, la forma del depósito, meteorización, entre otros.

Una condición importante es la meteorización, en donde se ve involucrado el proceso de desintegración y al mismo tiempo la descomposición, uniendo procesos mecánicos y químicos. Cuando lo que predomina es la desintegración, los sedimentos serán gruesos, mientras que cuando predomina la descomposición, los sedimentos mayoritarios serán limos y arcillas.

La desintegración de materiales de suelo se da más en terrenos con pendientes pronunciadas, en climas secos y fríos. Sucede lo contrario en climas húmedos y cálidos que presentan pendientes moderadas.

La transformación de material no consolidado en consolidado depende de la composición química del material original, así como de las condiciones del medio ambiente. Por ejemplo, si el material desintegrado original es arcilla, las capas acuíferas serán pobres, mientras que si el material original forma sedimentos provenientes de granito o rocas cristalinas, las capas acuíferas presentan buenas condiciones, generalmente formando estratos material no consolidado de grava y arena.

En cuanto a rocas sedimentarias consolidadas, la caliza y dolomita son buenas en cuanto a características acuíferas. Los movimientos de la tierra provocan grietas en los estratos de estas rocas y se van agrandando a consecuencia del flujo de agua, formando canales de disolución por los que el agua se comunica y circula.

Otras rocas sedimentarias, como la arcillosa, que se forma por la compactación de arena de ríos, actúa como estrato acuífero, mientras que las arcillas no son consideradas como estratos acuíferos.

- b. Rocas ígneas: este tipo de rocas es originado a causa del enfriamiento y solidificación del magma (material derretido caliente) originado en lugares profundos de la tierra.

Cuando dichos procesos se dan cerca o sobre la superficie del suelo, el magma se conoce como lava y el enfriamiento y solidificación son más rápidos. Las rocas que se originan se conocen como extrusivas o volcánicas y también se incluyen los materiales que se expulsan de los

volcanes, como cenizas y escoria (material granular conocido como piroclasto). Si ocurre lo contrario, en lugares profundos, los procesos son lentos y se produce una roca gruesa, conocidas como intrusivas o plutónicas.

Las rocas extrusivas enfriadas en la superficie son generalmente finas y cristalizadas. Un ejemplo de este tipo de roca que funciona como estrato acuífero, es el basalto fracturado, que presenta características de elevada porosidad y permeabilidad debido a las grietas que se forman en ella a causa del enfriamiento del magma que produce burbujas de aire.

La ceniza y escoria expulsada por los volcanes forman estratos acuíferos muy buenos, ya sea de material fino o bloques de gran tamaño.

- c. Rocas metamórficas: dentro de este tipo de rocas se encuentran rocas ígneas y sedimentarias que han sufrido variaciones de presión y calor. Por ejemplo, la arsénica se transforma en cuarcita; yeso y mica se originan de la lutita; el granito se transforma en gneis. Estos materiales no conforman buenos acuíferos.

Un buen material acuífero metamórfico es el mármol (caliza bajo efectos de metamorfosis), que es duro y cuando se fractura puede formar canales de disolución.

1.3.2. Procesos geológicos y formación de acuíferos

Los diversos tipos de rocas y sus transformaciones se ven alterados por procesos geológicos. Se dan procesos continuos, aunque demasiado lentos, que pueden producir acuíferos y al mismo tiempo destruirlos. Se dan procesos de levantamientos y descensos de montañas, relleno o profundización de valles, avance o retroceso de costas, creación o destrucción de acuíferos.

Tanto rocas antiguas como jóvenes pueden conformar acuíferos y son los procesos geológicos los que condicionan su forma, tamaño, hidráulica y flujo.

Los acuíferos de rocas sedimentarias pueden formarse por diversos tipos de depósitos según la naturaleza de los sedimentos. Los siguientes son sedimentos terrestres, que pueden ser materiales sedimentados en la tierra, arrastrados por la acción del viento, de las corrientes, los lagos y de manera glacial:

- a. Depósitos de corriente o aluviales: también llamados fluviales. Son los sedimentos que deja un río que solía fluir anteriormente en terrenos con una elevación mayor o también en valles en donde las corrientes cambiaron de curso. Suelen ser angostos y largos.

Los acuíferos con este tipo de material son variables en cuanto a tamaño, pudiendo ser arena o grava. También se puede dar un depósito de estos materiales cuando una corriente de agua que fluye velozmente encuentra un cambio brusco de pendiente debido a la disminución de la velocidad, por ejemplo, agua que corre sobre una montaña y llega al pie de la misma. Estos depósitos se conocen como abanico aluvial.

- b. Depósitos glaciales: en este caso, el material derretido de restos de glaciares y nieve que va en corrientes rápidas, son los que forman mejores acuíferos. Pueden presentar variación en cuanto a forma y tamaño de material, conteniendo limos, arcillas, arenas, gravas y cantos rodados.
- c. Depósitos de lagos o lacustres: estos depósitos se dan en aguas pacíficas y el material depositado es muy fino, por lo que sólo cuando el espesor de estos depósitos es considerable, el acuífero es bueno.

1.3.3. Tipos de acuíferos

La clasificación de los acuíferos queda determinada según su estructura o según la porosidad. Según la estructura, la clasificación es la siguiente:

1.3.3.1. Acuíferos libres

Llamados también acuíferos freáticos o no confinados. La parte superior de estos acuíferos está a presión atmosférica y la parte inferior, el piso, es impermeable. En otras palabras, el nivel freático es una superficie física en donde el agua subterránea está a presión atmosférica. Se caracteriza por poseer una recarga de tipo directa a través de la infiltración de agua de lluvia o de ríos o lagos.

1.3.3.2. Acuíferos confinados

Llamados también cautivos o a presión. En su parte superior e inferior poseen superficies con permeabilidad baja o impermeables y por lo tanto no está a presión atmosférica. Estos acuíferos siempre poseen la característica de estar saturados de agua y ésta siempre poseerá una presión mayor a la atmosférica.

Al momento de una perforación de pozo, el agua del acuífero subirá rápido hasta que se alcance un equilibrio entre las presiones (artesianismo). Cuando la presión es la suficiente, el agua puede alcanzar la superficie del terreno y se conoce como surgencia. El agua ascenderá cierta altura y se le conoce como nivel piezométrico. Se posee entonces una superficie que se conoce como superficie piezométrica y es el lugar geométrico del nivel piezométrico. Es una superficie imaginaria que puede asimilarse a la superficie líquida real de un acuífero libre.

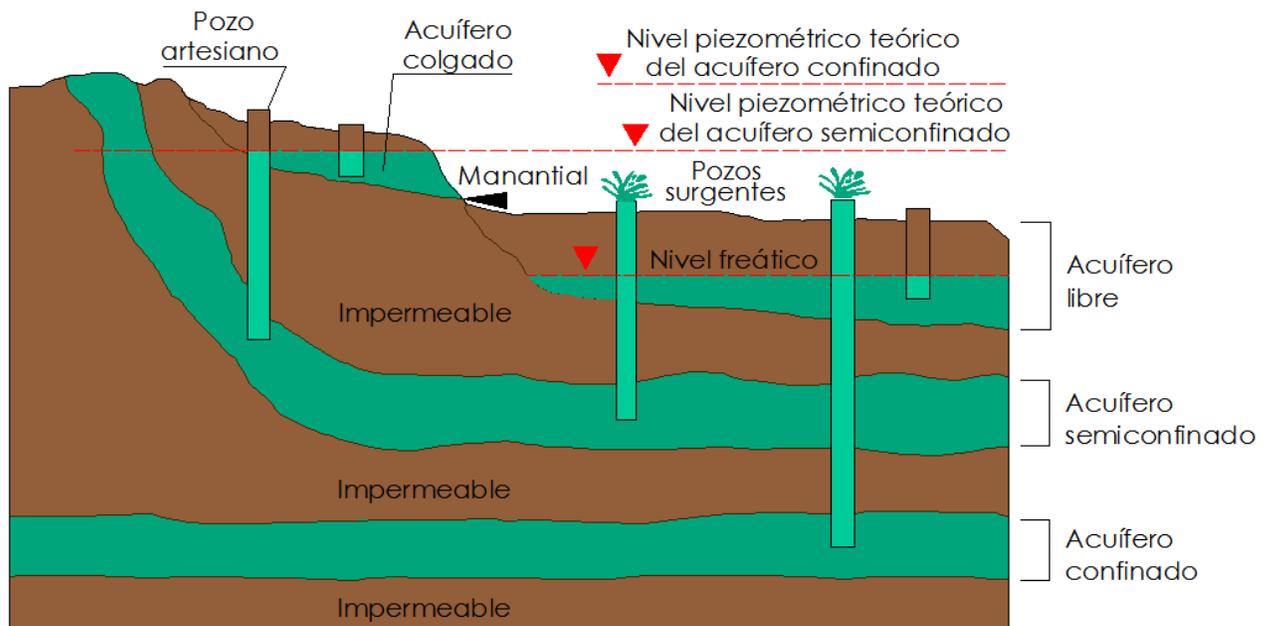
1.3.3.3. Acuíferos semiconfinados

También llamados semicaútivos. Este tipo de acuíferos poseen la superficie superior, la inferior o ambas, con características de permeabilidad baja que permiten que el agua pueda moverse verticalmente aún con las condiciones de permeabilidad que se presentan. Podría decirse que son un tipo de acuífero con características intermedias entre los acuíferos libres y confinados. Los acuitardos son los encargados de la recarga de los acuíferos semiconfinados.

1.3.3.4. Acuíferos colgados

Son acuíferos no saturados que se ubican sobre un cuerpo importante de agua, separados por medio de una zona no saturada. En otras palabras, es un acuífero formado por el almacenamiento de agua en una capa aislada que se encuentra sobre el nivel freático principal.

Imagen No. 3: diferentes tipos de acuíferos.



Fuente: Samayoa, F. (2013).

Según la porosidad, los acuíferos se clasifican en:

- a. Acuíferos de porosidad-permeabilidad primaria: llamados porosos o también sedimentarios, debido a su composición geológica. Pueden presentarse materiales consolidados o no consolidados.
- b. Acuíferos de porosidad-permeabilidad secundaria: también se conocen como fisurados o fracturados. Se conforman de rocas duras ígneas o metamórficas. Las fracturas y fallas que estas rocas presenten serán las que determinarán la porosidad del acuífero ya que serán el medio de circulación del agua.
- c. Acuíferos por disolución: llamados también químicos o kársticos. La porosidad de estos acuíferos depende de los agujeros que se formen a causa de la disolución de carbonato, que es el componente de las rocas que conforman este tipo de acuífero.

1.3.4. Propiedades de los acuíferos

Los acuíferos varían su capacidad de almacenamiento y transmisión de agua según las propiedades que posean. A continuación se mencionan algunas de ellas:

1.3.4.1. Porosidad

Es la parte del volumen del acuífero que no está ocupado por materia sólida, o sea, el volumen de los poros. La porosidad relaciona el volumen de vacíos y el volumen total del suelo o de la roca e indica la cantidad de agua que el acuífero puede almacenar, aunque no ceder o transmitir.

La porosidad puede ser expresada de la siguiente manera:

$$m = \frac{V_v}{V_t} \quad \text{Ecuación No. 2}$$

Donde:

$m = \text{porosidad total [adimensaional]}$.

$V_v = \text{volumen de vacios [cm}^3\text{]}$.

$V_s = \text{volumen de sólidos [cm}^3\text{]}$.

$V_t = V_v + V_s = \text{volumen total [cm}^3\text{]}$.

Existen dos condiciones que determinan directamente la porosidad del acuífero. Primero se encuentra el rendimiento específico, que es cuánta agua se escapa debido al drene por gravedad en un volumen unitario de material. Luego se encuentra la retención específica, que es la cuánta agua es retenida y no drenada por la gravedad, en un volumen unitario de material. Esta retención se da debido a la capilaridad y atracción molecular, que actúan en contra de la fuerza de gravedad. Estas dos condiciones, expresadas en forma de fracción o como porcentaje, y sumadas entre sí, dan como resultado la porosidad.

Otra manera de expresar la porosidad es por medio de la porosidad efectiva, que relaciona el volumen de agua que drene por gravedad, o sea que es liberado, y el volumen total del agua:

$$m_e = \frac{V_d}{V_t} \quad \text{Ecuación No. 3}$$

Donde:

$m_e = \text{porosidad efectiva [adimensaional]}$.

$V_d = \text{volumen de agua drenada debido a la gravedad [cm}^3\text{]}.$

$V_t = \text{volumen total [cm}^3\text{]}.$

1.3.4.2. Permeabilidad

Esta característica indica la capacidad del medio del acuífero para la transmisión de agua. Cuando se da una variación de presiones entre dos puntos, se da un movimiento de agua. Como se mencionó anteriormente en la sección de infiltración del ciclo hidrológico del agua, esta propiedad del suelo depende de diversos factores como la porosidad, tamaño y forma de las partículas, su arreglo y compactación, así como la viscosidad del fluido.

La permeabilidad se rige bajo la Ley de Darcy, la cual determina el flujo de agua subterránea. Esta ley fue demostrada por Henri Darcy, quien realizó estudios del flujo de agua a través de medios filtrantes de arena y demostró que dicho flujo a través de una capa saturada de arena es directamente proporcional al diferencial de cargas hidrostáticas en los extremos de dicha capa o columna y es inversamente proporcional a su longitud. Esta ley viene dada por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{K(h_1 - h_2)}{l} \quad \text{Ecuación No. 4}$$

Donde:

$V = \text{velocidad del flujo } \left[\frac{m}{s}\right].$

$h_1 = \text{presión, en metros de agua, en el punto de entrada [m].}$

$h_2 = \text{presión, en metros de agua, en el punto de salida [m].}$

$h_1 - h_2 = \text{diferencial de carga hidráulica [m].}$

$l = \text{longitud del punto de entrada al punto de salida [m].}$

$K = \text{coeficiente de permeabilidad } \left[\frac{m}{s}\right].$

El coeficiente de permeabilidad es una constante dependiente del material y sus propiedades. La diferencia de presiones entre los puntos de entrada y salida es un diferencial de carga hidráulica. Esta diferencia dividida entre la longitud mencionada, o sea la pendiente del nivel freático, se conoce como gradiente hidráulico (I), por lo que la ecuación queda de la siguiente manera:

$$V = K * I \quad \text{Ecuación No. 5}$$

Donde V se expresa en $[m/s]$, K en $[m/s]$ e I es adimensional.

El gradiente hidráulico, en un acuífero libre, es la pendiente del nivel freático y en un acuífero confinado, es la superficie piezométrica. Más que la velocidad, un parámetro importante es el caudal de agua y por lo tanto la ecuación queda así:

$$Q = A * V = K * I * A \quad \text{Ecuación No. 6}$$

Donde:

$$Q = \text{caudal de agua} \left[\frac{m^3}{s} \right].$$

$$A = \text{área de la sección transversal por donde fluye el agua} [m^2].$$

1.3.4.3. Transmisividad

Indica cuánta agua es transmitida de manera horizontal por el espesor saturado del acuífero. Este término se introdujo a partir del cálculo del caudal total que pasa en una sección transversal vertical del acuífero, lo cual se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = K * m * I \quad \text{Ecuación No. 7}$$

Donde:

$$Q = \text{flujo por metro de ancho de la sección} \left[\frac{m^3}{s} \right].$$

$$K = \text{promed. coef. permeabilidad del techo al suelo del acuífero} \left[\frac{m}{s} \right].$$

$$m = \text{espesor del acuífero} [m^3].$$

$$I = \text{gradiente hidráulico} [\text{adimensional}].$$

El resultado de la multiplicación $K*m$ se conoce como coeficiente de transmisividad (T), que es la razón del flujo a través de una sección transversal. Esta sección se considera con un ancho de un metro y un espesor igual a la altura del acuífero. Por consiguiente, utilizando la Ley de Darcy, queda la siguiente ecuación para la determinación del caudal:

$$Q = T * I * W$$

Ecuación No. 8

Donde:

$$T = \text{coeficiene de transmitividad} \left[\frac{m^2}{s} \right].$$

$$Q = \text{caudal de agua} \left[\frac{m^3}{s} \right].$$

$$I = \text{gradiente hidráulico} [\text{adimensional}].$$

$$W = \text{ancho de la sección vertical por donde pasa el flujo} [m].$$

1.3.4.4. Coeficiente de almacenamiento

De manera teórica podría decirse que este coeficiente es una medida de la cantidad de agua utilizable de un acuífero. Es el volumen de agua que el acuífero puede liberar cuando se desciende una unidad de nivel piezométrico. Por lo tanto, es un indicador del volumen de agua liberada

cuando la presión en el acuífero disminuye. También es conocido como coeficiente de almacenamiento elástico ya que, en un acuífero confinado, el agua que se libera proviene de la descompresión del acuífero. Se representa con la letra S y es una medida adimensional que puede definirse de la siguiente manera:

Ecuación No. 9

$$S = \frac{\text{volumen de agua liberado [m}^3\text{]}}{\text{volumen total que ha bajado la superficie piezométrica [m}^3\text{]}}$$

En la siguiente tabla se presentan valores típicos de coeficiente de almacenamiento para diversos tipos de material:

Tabla No. 1: valores de S para diversos materiales y tipos de acuífero.

Tipo de material	Tipo de acuífero	Coeficiente de almacenamiento (S)
Material kárstico (calizas y dolomías)	Libre	0.02-0.06
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$
Material poroso (gravas y arenas)	Libre	0.05-0.15
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
Material kárstico y poroso (calcarenitas)	Libre	0.15-0.18

Fuente: Grupo de Investigación de Recursos Hídricos de la Universidad Jaume I de Castellón (2007).

1.4. Hidrogeología de Guatemala

Dentro del área guatemalteca, la disponibilidad y condiciones de agua subterránea varían según las regiones del país. Estas regiones poseen diferencias, entre otros factores, en la geología y tipos de suelo, cantidad, intensidad y frecuencia de lluvia. Por lo tanto, la naturaleza de los diversos acuíferos queda determinada según su ubicación y caracterización hidrogeológica.

1.4.1. Geología y unidades hidrogeológicas de Guatemala

Las características geológicas de una región están ligadas directamente con el agua subterránea ya que en formaciones geológicas es en donde el recurso se almacena y circula.

Tectónicamente, en Guatemala existen tres placas tectónicas cuyos movimientos establecen gran parte de sus características topográficas. Dichas placas son la de Norteamérica, la de Cocos y la del Caribe. La placa de Cocos pasa por debajo de la placa del Caribe y el contacto entre ambas ha sido el fenómeno principal para la formación de los volcanes en la zona Sur del país. El contacto entre las placas de Norteamérica y la del Caribe ha provocado expresiones superficiales en forma de fallas, originando el sistema principal de fallas Motagua-Chixoy-Polochic y Jocotán. Al mismo tiempo, existen fallas secundarias como las de Jalpatagua, Mixco, Santa Catarina Pinula, entre otras. Geomorfológica y fisiográficamente (relieve), Guatemala puede dividirse en las siguientes provincias:

- a. Planicie costera del Pacífico: planicie formada a partir de la erosión de las Tierras Altas Volcánicas. Posee 50 kilómetros de ancho, en promedio.
- b. Provincia volcánica o cinturón volcánico: se extiende en la región occidental, oriental y sur del país. Está formada por cadenas de montañas y volcanes y por las cuencas hidrográficas donde se encuentra el lago de Atitlán, Amatitlán y la laguna de Ayarza, así como valles rellenados de depósitos de pómez cuaternarios.
- c. Cordillera central: se extiende a lo largo del centro del país. Posee rocas plutónicas, metamórficas y sedimentarias plegadas.

- d. Tierras bajas del Petén: en una región caracterizada por ser bosque tropical húmedo. También hay terrenos muy accidentados debido al desarrollo de karst sobre material calizo y dolomías cretácicas.

Mapa No. 1: provincias geológicas de Guatemala.



Fuente: Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas de la Universidad de San Carlos de Guatemala (2015).

El territorio guatemalteco puede dividirse en provincias o unidades con variación de características hidrogeológicas. La geología de cada región determina características del acuífero y por lo tanto, de la disponibilidad de agua subterránea. Las principales unidades hidrogeológicas del país son las siguientes:

Tabla No. 2: unidades hidrogeológicas de Guatemala y sus características.

Unidad	Geología	Característica hidrogeológica
1: Aluviones cuaternarios (Qa).	Materiales aluviales (gravas, arenas, arcillas. El diámetro no es uniforme.	• Acuíferos con porosidad primaria. Buena productividad.

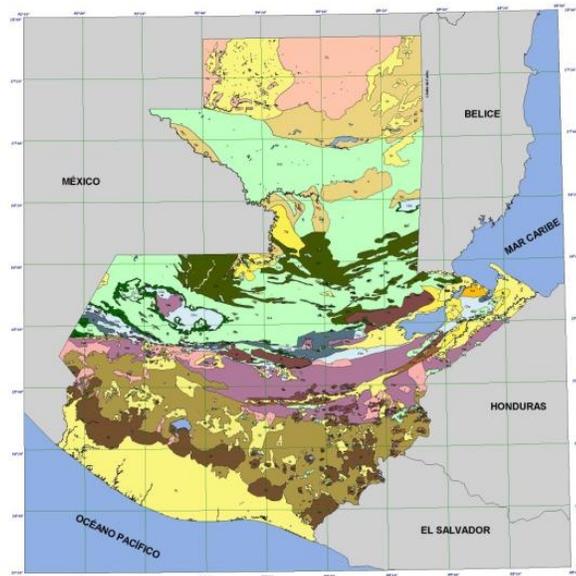
		<ul style="list-style-type: none"> • Transmisividad: 100 a 2500m²/día. • Coeficiente de almacenamiento: 0.10 a .20. • Infiltración: 10-15% de la precipitación media anual.
2: Depósitos piroclásticos cuaternarios (Qp).	Caída y flujo de ceniza intercalados con niveles lacustres aluviales y paleosuelos.	<ul style="list-style-type: none"> • Acuíferos con múltiples estratos de porosidad primaria. Buena productividad. • Transmisividad: 50 a 750 m²/día. • Coeficiente de almacenamiento: 0.01 q 0.03. • Infiltración: 8-22% de la precipitación media anual.
3: Lavas cuaternarias (Qv).	Flujos de lava procedente de actuales volcanes, intercalados con niveles de varios productos volcánicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Acuíferos con permeabilidad primaria o secundaria. Es área de recarga importante de acuíferos inferiores. • Hipótesis de infiltración: 10-20% de la precipitación media anual.
4: Lavas y tobas terciarias (Td).	Coladas de lava de diversa composición y tobas con variación de grado de consolidación y diversa naturaleza litológica.	<ul style="list-style-type: none"> • Acuíferos con porosidad secundaria que varía según el grado de facturación. Muy buena productividad. • Transmisividad: 500-5000 m²/día. • Hipótesis de infiltración: 5-10% de la precipitación media anual.
5: Depósitos sedimentarios terciarios (Tsp, Tsd, Tic, Tpe).	Rocas sedimentarias poco consolidadas que se alternan con estratos de arenisca, mergas, caliza, siltitas, yeso y dolomía.	<ul style="list-style-type: none"> • Acuíferos de varios estratos con productividad moderada. • Permeabilidad primaria o secundaria baja,

		generalmente. Se intercalan con niveles permeables o semi permeables.
6: Depósitos sedimentarios cretácico terciarios (KTsb, KTs).	Rocas sedimentarias de naturaleza arcillosa y siltítica.	<ul style="list-style-type: none"> • Se consideran formaciones regionalmente impermeables.
7: Calizas y dolomías cretáceas (Ksd).	Calizas y dolomías con alto grado de permeabilidad debido a la fracturación que presentan. Presencia de fenómenos de circulación kárstica.	<ul style="list-style-type: none"> • Acuíferos con buena potencialidad, con bastante variación de permeabilidad. • Hipótesis de infiltración: 25.50% de la precipitación media anual.
8: Depósitos prevalentemente clásticos Jurásico – Cretácicos (JKts).	Rocas sedimentarias clásicas. Prevalece el material arcilloso y siltítico.	<ul style="list-style-type: none"> • Se consideran formaciones regionalmente impermeables.
9: Calizas y dolomías pérmicas (Pc).	Calizas y dolomías que constituyen bancos gruesos, intercalados con algunos estratos de arcillitas. Poca evidencia de fenómenos kársticos.	<ul style="list-style-type: none"> • Acuíferos de secundaria porosidad por fracturación de muy baja productividad.
10: depósitos prevalentemente clásticos permo – carboníferos (CPsr).	Rocas sedimentarias como arcillitas y siltitas intercaladas con cuarcita, calizas, dolomía y variación de tipo de vocanitas.	<ul style="list-style-type: none"> • Se consideran formaciones regionalmente impermeables.
11: Rocas ígneas y metamórficas (I, Pi, Pzm).	Rocas plutónicas sin dividir, como granitos y dioritas, de edad pre-Pérmico, Cretácico y Terciario. También se puede encontrar serpentinitas terciarias y pre Mestrichtiano. Hay otro tipo constituido por rocas metamórficas sin dividir, de edad Paleozoica, como filitas, esquistos, cloríticos y granatíferos.	<ul style="list-style-type: none"> • Se consideran formaciones regionalmente impermeables. • En zonas de intensa fracturación, se puede desarrollar condiciones locales que permiten una modesta acumulación de agua subterránea.

Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (1991).

En el Anexo A se presenta el siguiente mapa a una escala mayor, que muestra la distribución de las unidades hidrogeológicas del país:

Imagen No. 4: reducción de mapa de unidades hidrogeológicas de Guatemala.



Fuente: Instituto Geográfico Nacional (2001).

1.4.2. Cuencas hidrográficas de Guatemala

Una cuenca hidrográfica comprende el conjunto de área y profundidad de un terreno en el cual se da precipitación y posteriormente fluye (escurre de manera superficial o en las capas del subsuelo) a un lugar específico como un río, lago o mar. En otras palabras, es un área territorial donde el agua superficial y el agua subterránea, con uno o más cauces, desembocan en un cuerpo de agua principal como río, mar, lago.

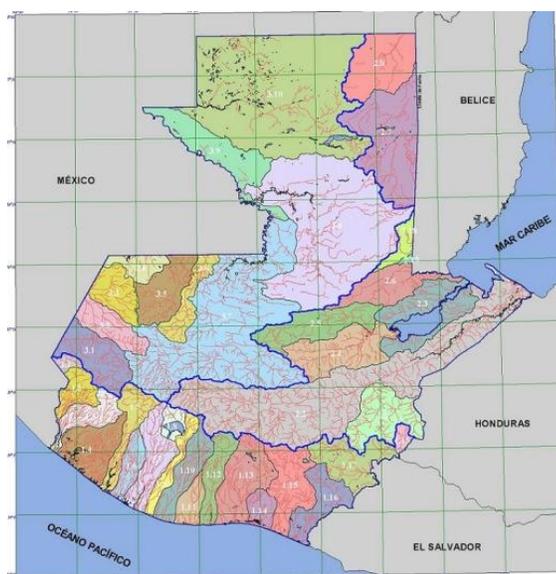
Dentro de una cuenca hidrográfica se dan flujos de agua ya sea en forma de recarga o descarga, relacionándose el agua superficial con la subterránea. Se da un flujo de recarga de agua cuando el agua superficial se infiltra en las capas del subsuelo y se da un flujo de descarga por parte de los acuíferos cuando el agua almacenada en éstos sale y se conduce hacia un cuerpo de agua superficial. Por lo tanto, en una cuenca hidrográfica se dan diversas

interacciones como por ejemplo, entre la geología del subsuelo y de los acuíferos, el nivel de agua de los cuerpos de agua superficiales y de los niveles freáticos.

En el territorio guatemalteco existen 38 cuencas hidrográficas que en total albergan 27,000 kilómetros lineales de escorrentía superficial que desembocan en 3 vertientes que son la del Océano Pacífico (18 cuencas), la del Mar Caribe (10 cuencas) y la del Golfo de México (10 cuencas).

En el Anexo B se muestra el mapa de las cuencas hidrográficas de Guatemala.

Imagen No. 5: reducción de mapa de cuencas hidrográficas de Guatemala.



Fuente: Instituto Geográfico Nacional (2001).

1.4.3. Regiones acuíferas de Guatemala

La información que se presenta a continuación es la distribución de los principales acuíferos dentro del territorio guatemalteco, cada uno con propias características de caudal de agua subterránea posible a explotar y profundidad a la cual puede encontrarse, según una evaluación de los recursos de agua de

Guatemala, realizada por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América, en el año 2000:

- a. Acuíferos aluviales: estos se ubican en la planicie del Pacífico y en zonas de Petén, principalmente al noroeste del departamento. El agua subterránea en este tipo de acuíferos se almacena en arena no consolidada y grava, junto con algunos sedimentos y barro. Los caudales con los cuales podría extraerse el agua varían de 1 l/s hasta 100 l/s, en profundidades de 1 a 6 metros. Al mismo tiempo, acuíferos aluviales se encuentran en la costa pacífica; estos almacenan grandes cantidades de agua salina y el agua dulce es escasa. (Ver regiones identificadas con los colores de los recuadros 1 y 6 del mapa de recursos subterráneos, presentado en el Anexo C).

- b. Acuíferos de piedra caliza, de naturaleza cárstica: estos acuíferos se ubican, en su mayoría, en el sur y centro del departamento de Petén, así como en cadenas montañosas como la Sierras de los Cuchumatanes, de Chama y de Santa Cruz (abarcando Quiché, Alta Verapaz, Huehuetenango y parte de Izabal). Resultan ser acuíferos con agua dulce abundante y con viabilidad de explotación, aunque si se da mezcla de sulfato de calcio con material calizo, sales se disuelven y se produce agua salobre, o sea, menos salada que el agua de mar pero más que el agua dulce. Los posibles caudales de agua rondan entre los 0.25 l/s a 100 l/s, a profundidades entre 3 y 30 metros. (Ver regiones identificadas con los colores del recuadro 2 del mapa de recursos subterráneos, presentado en el Anexo C).

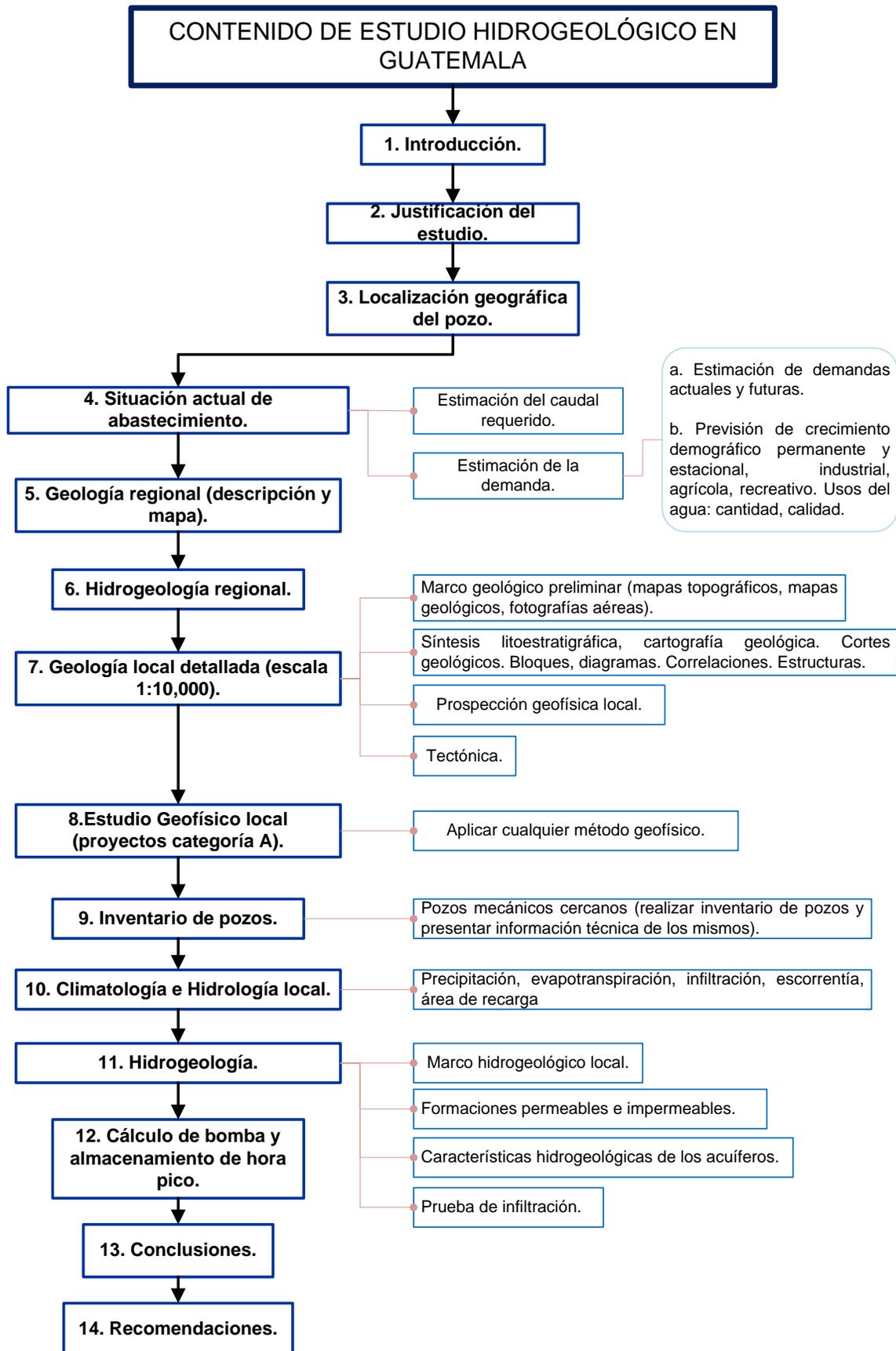
- c. Acuíferos volcánicos: estos están formados por material piroclástico y lava, lo cual hace que se eleven las cantidades grandes de cloruros y sulfatos. Estos acuíferos se extienden en las tierras altas centrales, por debajo de Baja Verapaz, El Progreso, Zacapa, Quiché y Huehuetenango, sobre la planicie del Pacífico. Son los acuíferos de más importancia para la explotación del agua subterránea en el área de la ciudad de Guatemala. En

1.4.4. Estudio Hidrogeológico en Guatemala

En Guatemala existen diversos aspectos ambientales que deben tomarse en cuenta al momento de llevar a cabo una obra, construcción, proyecto o actividad. Dependiendo de cada actividad, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales solicita una serie de requerimientos para evitar altos impactos al medio ambiente y realizar medidas preventivas, correctivas y de mitigación.

Para poder llevar a cabo la perforación de un pozo, como Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, el Ministerio solicita la ejecución de un Estudio Hidrogeológico, el cual debe contener una serie de aspectos que se presentan en el diagrama de la siguiente página.

Diagrama No. 2: requerimientos de un estudio hidrogeológico en Guatemala.



Fuente: elaboración propia a base de información de los requerimientos del MARN (2017).

2. EXPLORACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

Para que el agua subterránea pueda ser aprovechada como recurso hídrico, es necesario realizar trabajos de exploración para encontrar almacenamientos con volúmenes de agua adecuados para que exista un flujo ininterrumpido hacia los pozos en considerables periodos de tiempo y adecuadas velocidades.

Una exploración incluye estudios, trabajos y operaciones que emplean diversas técnicas para localizar acuíferos y así lograr una adecuada captación de agua subterránea.

En Guatemala, el método más utilizado es el sondeo eléctrico vertical, lo que conlleva perforaciones exploratorias para la detección directa de agua subterránea. Aunado a eso, previamente se realizan estudios hidrogeológicos o se analizan los existentes.

Existen diversas herramientas para llevar a cabo una exploración de agua subterránea. A continuación se presentan algunas de ellas.

2.1. Perforación exploratoria

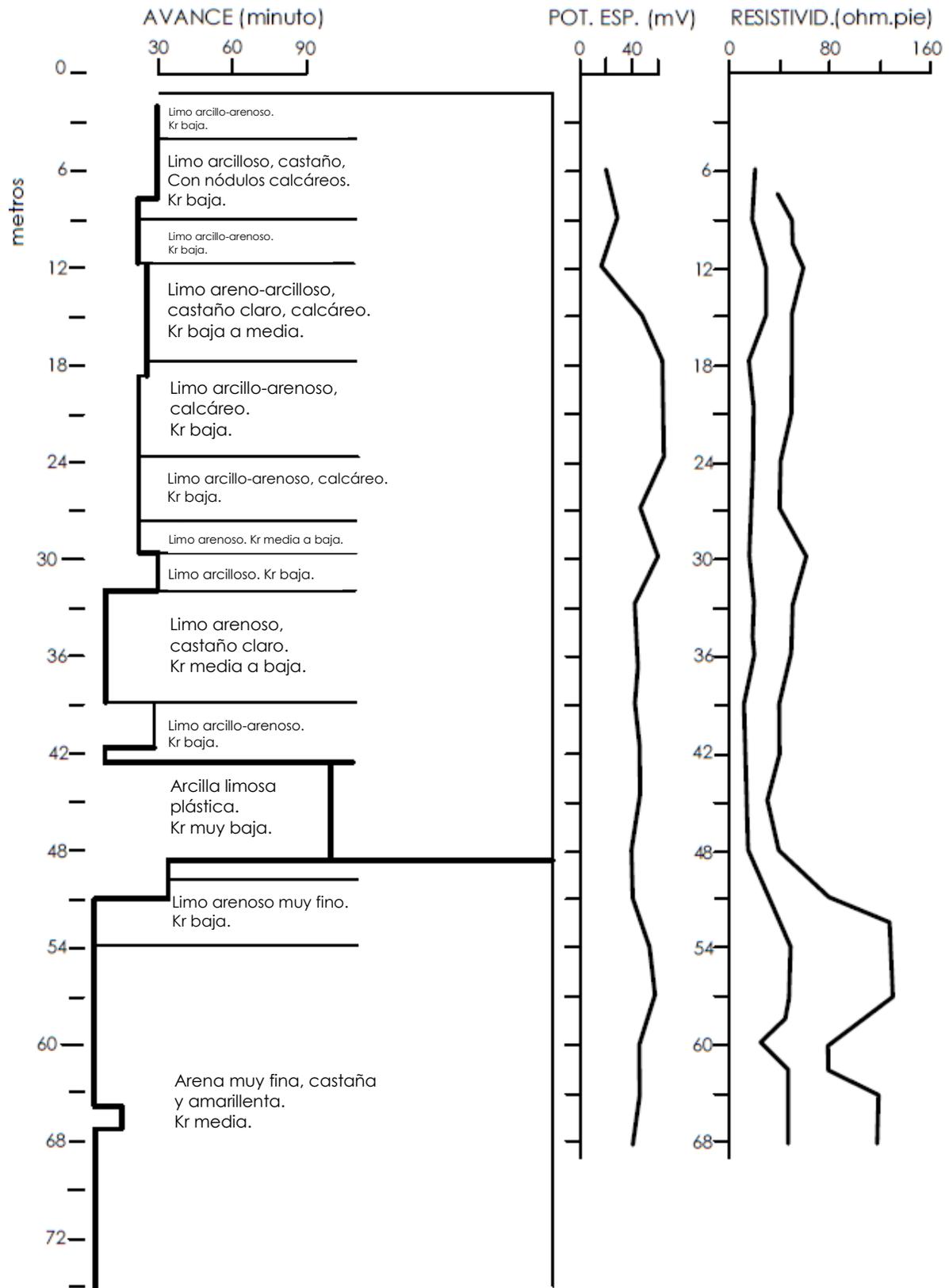
Son perforaciones de prueba (pozos piloto) que se realizan para conocer las características del subsuelo, así como registro de datos eléctricos, velocidades de perforación y, junto con el análisis de las muestras de suelo obtenidas, permiten conocer las características de los diversos estratos, así como su profundidad y espesor. En conjunto, los datos que se obtengan del estudio permiten realizar evaluaciones de la existencia de agua subterránea.

Existen diversos métodos para realizar perforaciones exploratorias tales como la perforación rotatoria, la de percusión o la combinación de ambos tipos de movimiento.

Cuando se ha perforado la profundidad deseada y se ha tomado muestras del subsuelo a lo largo de dicha profundidad, es posible construir un perfil litológico y un perfil eléctrico que indique las características encontradas. El perfil litológico muestra el tipo de material encontrado mientras que el perfil eléctrico muestra el potencial espontáneo y la resistividad. El potencial espontáneo indica la diferencia de potencial eléctrico del material encontrado y se expresa en milivoltios. Esta diferencia se registra por medio de dos electrodos, uno fijo ubicado en la superficie y otro móvil dentro de la perforación, en la cual hay fluido de perforación que presentará diferencias entre su salinidad y la de la formación con la que tenga contacto. Mediante la interpretación del potencial espontáneo se logra ubicar de manera cualitativa horizontes con más permeabilidad; si la curva de potencial espontáneo generada se desplaza hacia la derecha, significa que las zonas son más permeables, mientras que un desplazamiento a la izquierda significa menor permeabilidad (arenas y arcillas, respectivamente). Otra manera de interpretación de la curva es que cuando ésta está desplazada hacia la derecha, la salinidad del fluido de perforación es mayor a la de la formación, mientras que la curva desplazada hacia la izquierda indica que la salinidad del fluido es menor a la de la formación.

La curva de resistividad desplazada hacia la derecha indica que el material es permeable y poco poroso, mientras que hacia la izquierda indica que el material es poroso y poco permeable, como limo y arcilla. Mientras más a la derecha esté la curva, mayores serán los valores de resistividad y sucede lo contrario con la curva desplazada hacia la izquierda. Para medir la resistividad se administra una corriente eléctrica en la pared de la perforación y se registra qué tan intenso es su retorno. Esto varía según el tipo de material y la cantidad de sal presente. La siguiente imagen es un ejemplo de un perfil litológico y eléctrico.

Imagen No. 7: ejemplo de perfil litológico y eléctrico de una formación.



Fuente: Auge, M. (2005).

2.2. Métodos de información geológica

Mediante datos geológicos existentes, generados por estudios previos, es posible estudiar el área a investigar. Estos datos pueden ser interpretados de manera variable según la persona que los maneje, por lo que es necesario que ésta posea un conocimiento amplio a cerca de la hidrogeología. Dentro de este grupo de métodos puede haber mapas, fotografías, imágenes, entre otros.

2.2.1. Mapas geológicos

Estos mapas son una representación de las características del terreno bajo aspectos geológicos, tales como formaciones rocosas, ya sea consolidadas o no, con afloramiento o no a la superficie, la dirección en la que descansan, ángulo respecto a la horizontal. También incluye información relevante a cerca de curvas de nivel del terreno y fallas del mismo. Mediante dichos datos se pueden determinar diversos factores como los siguientes:

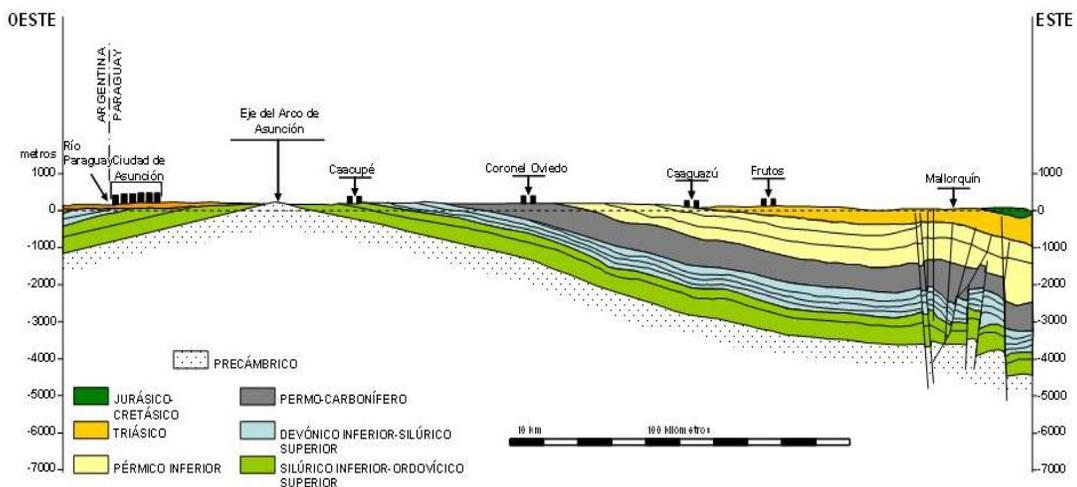
- La localización de fallas, así como el tipo y lugar de afloramientos de rocas, son indicadores de la ubicación de acuíferos y la extensión territorial de las capas de los mismos.
- El ángulo de inclinación de los afloramientos de rocas y su ancho, pueden ser indicación de espesor de las capas acuíferas y a qué profundidad se pueden encontrar.
- La inclinación y la veta se utilizan para encontrar el mayor espesor de la capa acuífera y así lograr una adecuada ubicación de pozos.
- Afloramientos rocosos superficiales pueden ser indicadores de zonas de recarga y por lo tanto, de dirección de flujo.

- El contorno del lecho rocoso puede indicar un límite máximo para la profundidad de perforación para un pozo.

2.2.2. Secciones transversales

Proporcionan información geológica de la sección transversal del terreno y representan una fuente principal de indicios de propiedades del agua subterránea del lugar. Pueden ser indicadores del espesor, tipo y sucesión de formaciones inferiores y del espesor y profundidad de los estratos acuíferos existentes. Puede ser posible que también indiquen la existencia de rasgos de niveles freáticos o artesianos en un acuífero. Las secciones transversales geológicas se forman a partir de información de registros de pozos existentes y condiciones naturales de roca que no presente gran deterioro debido al tiempo.

Imagen No. 8: ejemplo de sección transversal geológica.



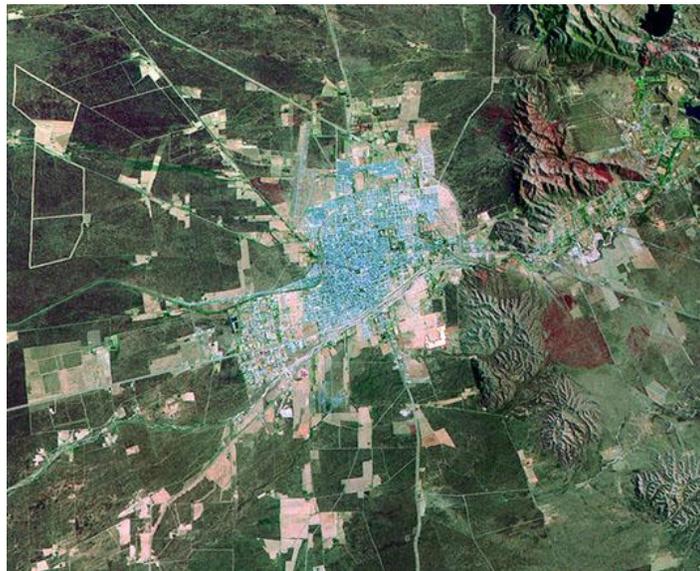
Fuente: Universidad Nacional de Asunción, Paraguay (2011).

2.2.3. Fotografías aéreas e imágenes satelitales

Después de ser tomadas las fotografías o imágenes, éstas deben ser interpretadas y se debe analizar los diversos factores que son observados.

Estos factores son características superficiales que pueden indicar las condiciones del subsuelo, por ejemplo, la existencia de vegetación y el tipo de la misma, uso de la tierra, drenajes y sus cauces, erosión, depósitos de material gravoso, terrazas, entre otros. Al momento de interpretar las fotografías, se puede deducir qué regiones presentan más probabilidad de poseer agua subterránea y poder aprovecharla.

Imagen No. 9: fotografía satelital en donde se puede observar variación de accidentes geográficos y superficie del terreno.



Fuente: Gifex (2017).

2.3. Métodos geofísicos

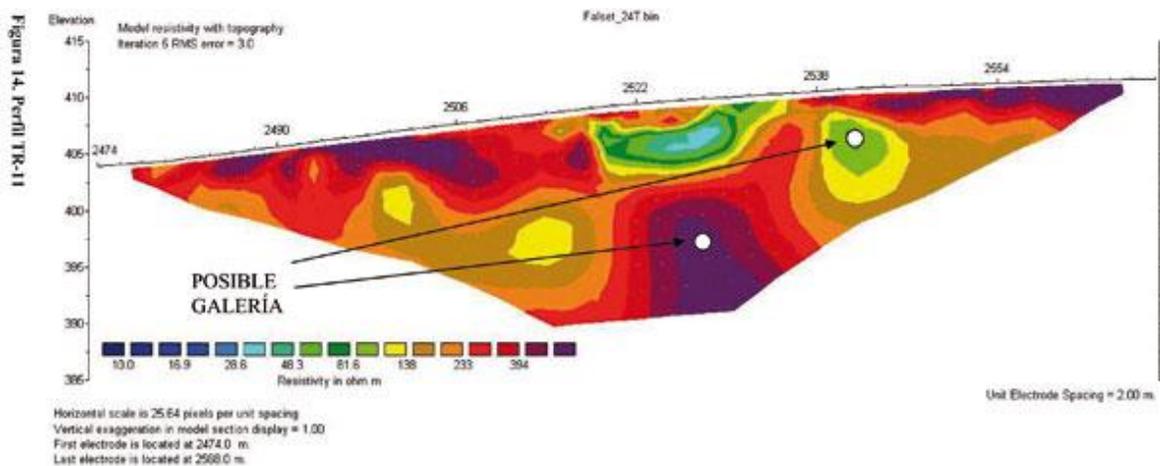
Los métodos geofísicos trabajan de manera indirecta utilizando características físicas del subsuelo, los cuales son una orientación para la localización de regiones con condiciones acuíferas, no directamente de agua subterránea.

Este tipo de métodos pueden realizarse en la superficie del terreno o debajo de la misma, por medio de aberturas.

2.3.1. Refracción (método sísmico)

Por medio de este método se logra conocer características físicas del subsuelo a través de un análisis de la transmisión de ondas a través de formaciones geológicas. Cuando estas ondas viajan por las diferentes capas del subsuelo, su velocidad varía debido a factores como humedad, cambios de densidad y textura, presencia de vacíos. Cuando la velocidad cambia, se genera una señal sonora de indicación de dicho cambio. Se pueden obtener información acerca de bancos de material, conocer la geometría del suelo, profundidad de roca que no ha sido afectada por factores atmosféricos, entre otros aspectos.

Imagen No. 10: ejemplificación de método de refracción sísmica.



Fuente: GEAS INTEGRAL (2011).

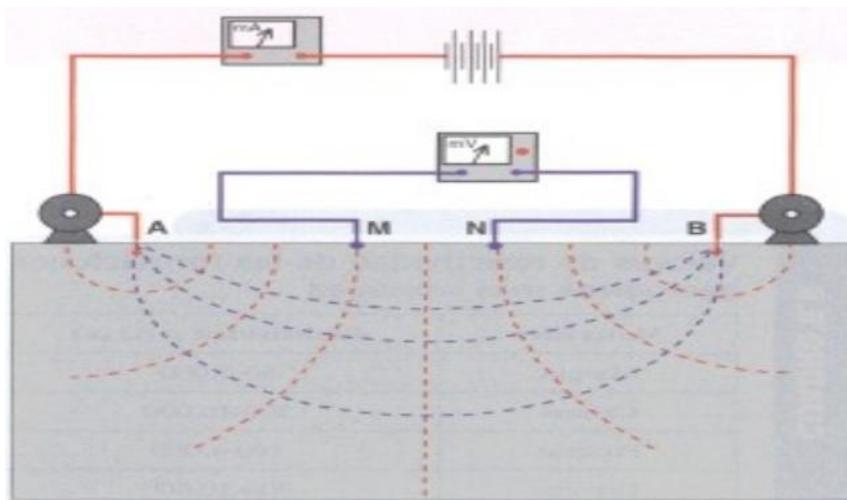
2.3.2. Gravimetría

Los métodos gravimétricos permiten la construcción de mapas que delimitan formaciones acuíferas, a partir del análisis de las diferencias de densidad de las rocas. Con las diferencias de densidades se deduce si las regiones son impermeables y compactas, o al contrario, regiones con material fracturado, más poroso.

2.3.3. Métodos geoelectricos

Es uno de los métodos geofísicos más interesantes y más utilizados en la prospección del agua subterránea, como un método indirecto. Conllevan la utilización de procesos de resistividad del subsuelo que emplean electrodos y corriente continua. Se logra conocer la resistividad en diferentes puntos, variando la profundidad y distribución lateral.

Imagen No. 11: ejemplificación de método geoelectrico para la medición de resistividad.



Fuente: Andrés, C. (2011).

2.4. Métodos electromagnéticos

Estos métodos permiten conocer diferenciales de resistividad con más sensibilidad que los métodos geoelectricos y al mismo tiempo se puede trabajar con mayores profundidades.

2.4.1. Métodos magnetotelúricos

Brindan información de ubicación de fracturas y puntos con resistividad elevada, así como la delimitación de zonas acuíferas. La resistividad puede indicar características de porosidad y permeabilidad del material.

2.4.2. Método de polarización inducida

Permite el análisis del contenido de arcillas en material arenoso y siempre se utiliza junto con otros métodos geoelectrónicos. Con este método se logra analizar las cargas de las formaciones del suelo y se puede detectar contaminación a causa de hidrocarburos.

2.4.3. Método de radar terrestre

Este método posee una limitante de profundidad (25 m) pero logra presentar un conjunto de información a cerca de estratificación del suelo, profundidad del nivel freático, concavidades a causa de fenómenos kársticos, entre otros.

Es un método de suma importancia para el estudio de contaminación del subsuelo, detectando regiones alteradas por hidrocarburos.

Imagen No. 12: persona utilizando equipo de radar para penetración terrestre.



Fuente: Stockholms Universitet (2008).

2.4.4. Resonancia Magnética

Este método es el único que detecta directamente la presencia o no de agua subterránea. Por medio de este método se analizan los siguientes parámetros:

- Amplitud: indica cómo el agua está distribuida según la profundidad.
- Tiempo de atenuación: indica la dimensión media de los poros del medio acuífero.
- Fase: brinda datos de conductividad eléctrica profunda.

Imagen No. 13: equipo geológico de resonancia magnética.



Fuente: IGEOTEST Andorra (2014).

2.5. Registro de pozos existentes

Brindan información de las características del subsuelo por medio de antecedentes de pozos existentes. Estos antecedentes contienen datos tales como profundidades de dichos pozos, así como su manera constructiva, variaciones del nivel del agua subterránea. Al mismo tiempo también es posible conocer la calidad del agua encontrada en los pozos, así como el rendimiento de los mismos.

Con la diversa información recopilada, es posible realizar planos acotados del nivel freático o del nivel superior de la zona saturada, brindando también el gradiente hidráulico y dirección de flujo de agua.

2.6. Señales superficiales de existencia de agua subterránea

Es importante estudiar la superficie de la zona donde se realiza la exploración. Se debe analizar características de los accidentes geográficos, hidrografía, tipo de vegetación, tipo de depósitos, etc. Por ejemplo, cuando existe una espesa vegetación, posiblemente el nivel freático no se encuentra tan profundamente; cuando un río cruza una formación arenosa, es posible que la zona sea buena para ubicar un pozo.

3. CAPTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

Existen diversas obras que tienen como finalidad lograr la captación de agua subterránea para su aprovechamiento. Para que este aprovechamiento sea eficiente, se debe elegir un método que logre la obtención del mayor volumen de agua con la mínima cantidad de energía consumida, o sea, un balance entre los factores técnicos y los económicos.

Las obras de captación de agua subterránea logran la finalidad de la extracción para el aprovechamiento del recurso y para la elección de dichas obras es necesario tomar en cuenta diversos factores como:

- Condiciones hidrogeológicas de la región.
- La hidrodinámica del material del acuífero.
- La cantidad de agua que se necesita y la manera de su distribución.

Existen tres categorías para clasificar a las diversas obras de captación de agua subterránea:

Tabla No. 3: tipos de obras de captación.

Horizontales	Verticales	Mixtos
<ul style="list-style-type: none">• Galerías filtrantes o de captación.• Zanjas drenantes.	<ul style="list-style-type: none">• Pozos excavados.• Sondeos o pozos mecánicos.	<ul style="list-style-type: none">• Pozos con drenes radiales.

Fuente: elaboración propia (2016).

3.1. Galerías filtrantes o de captación

Este tipo de captación se conforma por medio de túneles con una pendiente pequeña. A través de dichos túneles, el agua escurre por medio de la fuerza de gravedad. Por lo tanto, es una obra de captación que al mismo tiempo es el medio de transporte del agua.

Para su construcción, las galerías deben poseer una dimensión adecuada para que los obreros y el equipo que se utilice pueda ser movilizado adecuadamente, por lo que pueden existir variaciones en la misma.

Al momento de construir galerías es necesario que se construyan pozos verticales a lo largo del desarrollo de la longitud de las mismas. Estos pozos permiten ventilación y también son utilizados para la extracción del material que deba ser retirado. La distancia para colocar dichos pozos puede variar y generalmente pueden disponerse entre distancias de 40 a 100 m entre cada uno, cubriendo la longitud de la galería.

Para la construcción de galerías de captación es necesario un estudio que analice si el sitio es adecuado o no y para ello se debe tener consideraciones previas, como por ejemplo, el conocimiento de la conductividad hidráulica del acuífero. Para conocer dicha propiedad se llevan a cabo pruebas de bombeo y se determina si el acuífero posee la capacidad para brindar el caudal requerido.

Para que en una galería el agua del acuífero escurra propiamente, es necesario que se ubique cerca de la superficie del terreno y que el clima en épocas de

sequía no agote la reserva de recurso hídrico. Que se presente dicha situación no es común, por lo que las galerías de captación son usualmente construidas cercanas a las orillas de lagos y ríos o por debajo de su lecho, para así lograr aprovechar la recarga hídrica que estos cuerpos de agua producen. Esto último resulta conveniente para evitar grandes excavaciones y es conveniente construir las galerías en lugares planos para poseer poca diferencia de elevación entre la superficie del terreno y el nivel del agua. Con ello, unido a la granulometría que presente el subsuelo, el método de trabajo de la galería sería como un filtro lento.

Según las opciones de ubicación de las galerías, la calidad del agua variará y habrá menor probabilidad de que la que proviene de un acuífero con escurrimiento propio posea menos contaminantes bacteriológicos que el agua proveniente de las cercanías a las orillas de ríos y lagos. La ventaja con ésta última ubicación, es que el rendimiento de agua es mayor.

Las galerías son construidas a manera que la finalización de la misma sea en un depósito o cámara de captación o bien, pueden poseer extensiones por medio de canales o conductos auxiliares que conducen el agua hacia los lugares donde la misma será utilizada. Puede terminar en un punto donde el agua alumbre en la superficie o en arquetas de toma.

Las galerías poseen un conducto colector con cierta sección para que el caudal de agua que fluya sea el adecuado y para ello existen diversos factores importantes que deben considerarse al momento de realizar el diseño del mismo. A continuación se mencionan algunos:

- Para el conducto se puede utilizar diversos materiales como PVC, hierro fundido, concreto, entre otros, y para su elección se debe analizar los requerimientos de resistencia y la reacción relacionada con la calidad de agua. Al mismo tiempo, el conducto debe producir las mínimas pérdidas a

causa de la fricción. Algunas características de los materiales mencionados son las siguientes:

Tabla No. 4: materiales y sus características.

PVC	Hierro fundido	Concreto
<ul style="list-style-type: none"> • Bajo precio. • Liviano. • Fácil instalación. • Sencillo de perforar. • No corrosión. • Menores pérdidas por fricción. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia elevada. • Costo elevado de la tubería. • Alta durabilidad. • Vulnerabilidad a corrosión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Frágiles y pesadas. • Permiten instalaciones en pequeños tramos.

Fuente: elaboración propia (2016).

- El conducto debe poseer un diámetro que permita que el caudal de agua que fluya no sea mayor al 50% de dicho diámetro.
- El conducto no debe ser de menos de 20 cm de diámetro.
- El conducto debe poseer una pendiente adecuada que permita que el agua fluya y al mismo tiempo se posea una autolimpieza que arrastre el material fino hasta un lugar adecuado para su disposición. Para ello se requiere que las velocidades de flujo oscilen entre 0.60 y 0.90 m/s.
- El conducto poseerá agujeros y éstos pueden variar su forma y dimensión. Al mismo tiempo la distribución de los mismos debe evitar la reducción de la resistencia de la tubería, por lo que se debe analizar adecuadamente cuánta área del conducto se reducirá.

De manera general y convencional, algunos de los tipos de galerías son los siguientes:

- a. Nacientes: el agua que se capta en este tipo de galerías proviene de acuíferos colgados con cercanía a la superficie del terreno.

- b. Convencionales: estas galerías drenan el agua proveniente de una capa saturada general, por lo que son perforaciones profundas (pueden ser mayores a 2 kilómetros).
- c. Socavones: estas obras poseen longitudes pequeñas.

Según el régimen de escurrimiento hacia la captación, es posible que se presente condición de equilibrio o desequilibrio. El equilibrio se da cuando el escurrimiento posee una velocidad estable después que transcurre cierto tiempo, al igual que la estabilización del descenso del nivel de agua y para ello caudal que se extrae por unidad de longitud de la galería debe ser menor o igual que el caudal que alimenta al acuífero. El descenso del nivel del agua debe ser el adecuado para permitir escurrimiento.

Sucede lo contrario cuando se dan condiciones de desequilibrio. En este caso, el escurrimiento no se estabiliza ya que el descenso del nivel del agua aumenta con el tiempo y la velocidad de escurrimiento se reduce. Esta situación es común cuando el acuífero posee una provisión de agua que viene de un terreno con baja capacidad de recarga hídrica.

En la siguiente imagen se esquematiza el perfil de una galería de captación; la galería inicia en un punto donde se logre captar agua del acuífero para que ésta fluya por gravedad a través de la obra, hasta un punto donde se logre almacenar u obtener el recurso.

Imagen No. 14: perfil longitudinal de una galería de infiltración.



Fuente: elaboración propia (2016).

3.2. Zanjas y zanjas drenantes

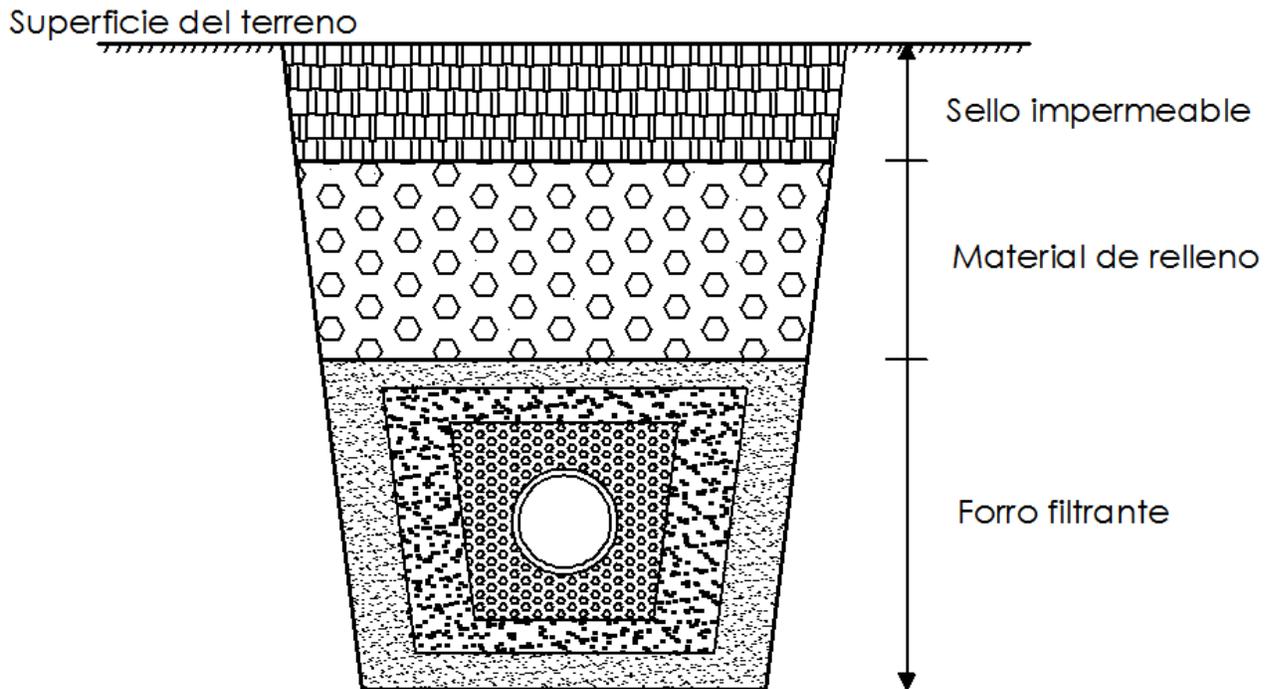
Una zanja es una excavación que se realiza cuando el nivel de agua subterránea se encuentra cercano a la superficie del terreno, por lo que suelen ser excavaciones a cielo abierto. Generalmente, estas obras de captación no son profundas y no sobrepasan los 6 metros. Estas obras pueden considerarse obras que captan agua sub-superficial y no subterránea, ya que generalmente los niveles freáticos principales se encuentran a mayores profundidades. De igual manera se describen sus características ya que permiten el aprovechamiento del recurso hídrico por debajo de la superficie del terreno.

Cuando en el fondo de las zanjas se colocan tuberías con agujeros (drenes), se conocen como zanjas drenantes. Estos drenes pueden variar su dimensión, pero generalmente poseen un diámetro por encima de los 20 cm y las tuberías se disponen con una pendiente entre 1 a 5/1000.

El relleno de las zanjas debe funcionar como filtro y es un aspecto determinante para que el desempeño de la obra sea adecuado. Se debe evitar que el material fino del acuífero ingrese a los drenes pero no se debe ver afectada la velocidad de infiltración (el forro filtrante que se elabore no abarcará toda la profundidad de la zanja, por lo que se debe poseer otro material de relleno común). Las capas del forro filtrante deben poseer un arreglo descendente en cuanto a granulometría, siendo la primera capa la que se ubica sobre la tubería (el resto de capas se ubican sobre la primera capa). Aunado al forro filtrante, para evitar contaminación del agua que se capte del acuífero, se coloca un sello impermeable que evita que el agua que se estanque en la superficie de la zanja sea infiltrada hacia la zanja.

Cuando las zanjas no poseen drenes, éstas se rellenan con material drenante, en donde el centro de la zanja estará relleno de material grueso. Tanto con tuberías o sin ellas, el material drenante que se utilice debe funcionar como medio filtrante para evitar la contaminación del agua que será captada.

Imagen No. 15: zanja drenante.



Fuente: elaboración propia. Adaptación de "Distribución de capas concéntricas en el forro filtrante", de Manual de Diseño de Galerías Filtrantes, OPS/CEPIS (2002).

3.3. Pozos y sondeos

Generalmente, cuando se habla de extracción de agua subterránea, se mencionan los pozos como obras convencionales. Se definirá como pozo excavado a aquella obra que conlleva una excavación vertical generalmente no mayor a 30 m de profundidad, con diámetros aproximados entre 1.5 – 3 m. La excavación de dichos pozos puede realizarse manualmente cuando no se requieren grandes profundidades o de lo contrario se utilizan medios mecánicos, como martillos, o explosivos. Estas obras convencionales poseen las paredes revestidas con mampostería hueca o aros de concreto. En las aberturas del material utilizado, el agua entra y es almacenada en el pozo.

Cuando se poseen acuíferos poco profundos, los pozos son obras de captación adecuadas. Éstos sobrepasan la superficie saturada pero no se puede profundizar mucho más allá de ésta, por lo que la profundidad total del pozo no será elevada.

También son obras adecuadas para acuíferos poco espesos o con problema de arrastre, así como acuíferos con baja permeabilidad, lo que permite que los pozos funcionen como depósito.

Un sondeo es un tipo de perforación y se realiza por medios mecánicos. A diferencia de los pozos convencionales, los sondeos trabajan con diámetros generalmente menores a 1 metro y alcanzan profundidades de cientos de metros, pudiendo penetrar de manera profunda la zona saturada. Este tipo de perforación posee un revestimiento metálico en forma de tubería ciega y secciones de tubería con agujeros, la cual muchas veces posee un filtro alrededor, para evitar el paso de arenas finas.

Actualmente, a los sondeos se les conoce también como pozos sondeo o pozos mecánicos y, coloquialmente, suele llamarse solamente pozo, por ser la obra de captación de agua subterránea más común y conocida.

3.4. Pozos con drenes

Estas obras se conocen como pozos con drenes radiales u horizontales. Constan de un pozo y un conjunto de drenes horizontales conectados al él, de manera radial, ubicados en un solo nivel o en varios. Estos drenes logran un aumento en la capacidad de drenaje del pozo debido a que se abarca más superficie de la capa acuífera y así se logran mayores caudales de agua.

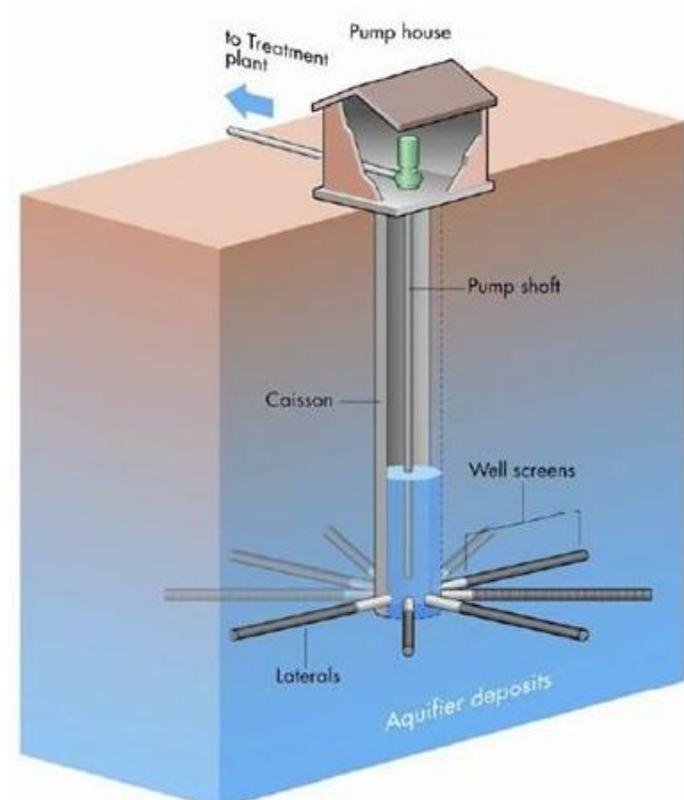
La construcción de estos pozos inicia con la excavación del pozo (debe ser una estructura resistente e impermeable) y en el fondo del mismo se hincan horizontalmente las tuberías drenantes, utilizando medios mecánicos. Cuando estas tuberías drenantes son utilizadas al mismo tiempo para realizar las perforaciones horizontales, se dice que el pozo es tipo Ranney. Existe otro método conocido como Fehlmann, el cual implica la utilización de tuberías de perforación, las cuales son retiradas posteriormente.

Los drenes pueden poseer una pendiente que permita una mejor penetración en el acuífero (inclinación hacia arriba). Éstos generalmente poseen longitudes entre 30 y 50 metros.

Comparado con un pozo vertical convencional, los pozos con drenes horizontales permiten que el caudal de agua sea mayor debido a la gran superficie filtrante que se abarca con los drenes. Esta gran superficie hace que la velocidad de filtración sea lenta y que la obra tenga largos periodos de vida útil.

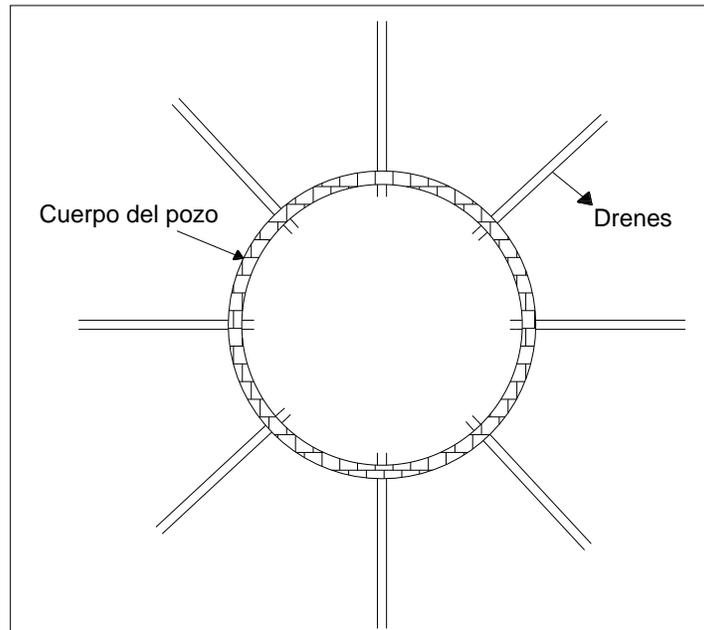
Al mismo tiempo, los pozos con drenes presentan la ventaja que se puede sacar provecho de varios acuíferos de manera simultánea, jugando con alturas y direcciones adecuadas.

Imagen No. 16: ejemplificación isométrica de pozo con drenes horizontales.



Fuente: Casado, G. (2015).

Imagen No. 17: vista en planta de pozo con drenes radiales.



Fuente: elaboración propia (2016).

4. POZOS SONDEO-POZOS MECÁNICOS

Se le llama pozos sondeo a aquellos pozos en los cuales interviene una perforación mecánica, procedimiento que hoy en día es el más utilizado para la construcción de pozos de extracción de agua subterránea (pozos perforados mecánicamente).

El diseño y construcción de pozos involucra una serie de aspectos que garantizan la eficiencia del proceso de extracción de agua subterránea; es necesario que se aplique correctamente la hidráulica de pozos, que se analicen las condiciones hidrogeológicas de la región, que el proceso de perforación y construcción sea el adecuado según lo que se requiera, que se seleccione adecuadamente los diferentes materiales a utilizar, etc.

Al realizar perforaciones de pozos mecánicos, se posee la ventaja de conseguir profundidades grandes y no requiere de una elevada inversión económica comparada con otros sistemas de captación de agua subterránea.

4.1. Hidráulica de pozos

Para lograr un buen rendimiento de un pozo, es necesario que se aplique correctamente los principios de la hidráulica, tanto en el análisis y diseño del mismo como en la naturaleza del acuífero, logrando así un adecuado desempeño del sistema pozo-acuífero.

Inicialmente es necesario conocer algunos conceptos básicos relacionados con el comportamiento hidráulico de un pozo:

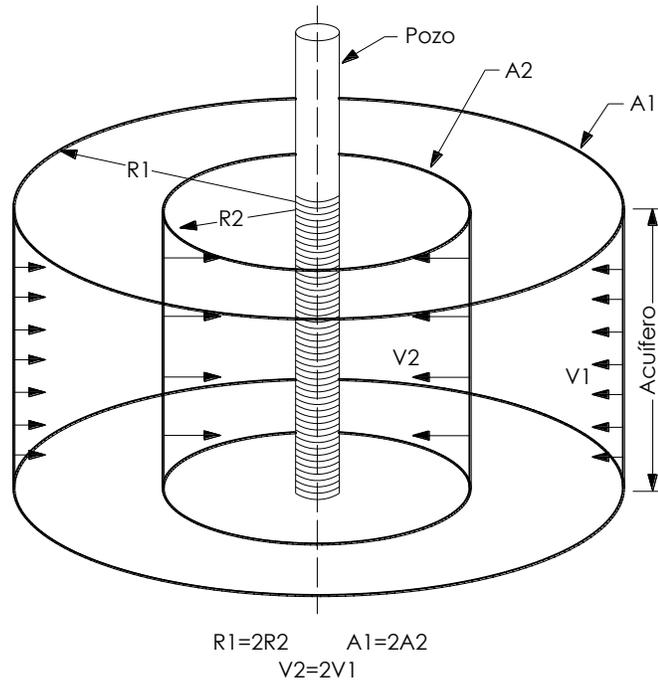
- Nivel estático: es el nivel al que se encuentra el agua en el acuífero cuando no hay bombeo. Es expresado como la distancia entre la superficie del terreno y el nivel de agua. Cuando no hay bombeo, el nivel estático se ve afectado por factores como la precipitación y la infiltración, así como también por otros pozos cercanos que causan descarga.
- Nivel dinámico o de bombeo: según se da el bombeo, el nivel del agua dentro del pozo varía y es a lo que se conoce como nivel dinámico. Este nivel variará según el tiempo y caudal de bombeo, así como de las propiedades del acuífero.
- Abatimiento: es el descenso del nivel del agua cuando hay bombeo en el pozo, aunque también puede existir descenso por factores naturales. Es la diferencia de distancia entre el nivel estático y el dinámico.
- Cono de depresión: cuando se está bombeando agua, al descender el nivel estático, en el pozo se genera un movimiento radial hacia él, desde toda

dirección. Esto sucede ya que se crea un gradiente hidráulico debido a dicho descenso de agua.

El agua que fluye hacia el pozo pasa por varias superficies cilíndricas imaginarias que poco a poco disminuyen su diámetro hasta que se llega al pozo. El flujo de agua cambia de velocidad y mientras más cerca esté del pozo, mayor velocidad poseerá. Debido a esto, el nivel de agua que desciende toma una mayor pendiente hacia el pozo y la superficie de agua toma forma de una depresión cónica. Por ello, a la forma de dicha superficie se le conoce como cono de depresión, el cual, en un plano vertical, representa una curva conocida como curva de abatimiento. El cono de depresión posee forma, alcance y profundidad que vienen condicionados por la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento que posea el acuífero, así como del tiempo de bombeo y caudal de agua. Desde el centro del pozo existirá una distancia hasta el límite del cono de depresión, conocida como radio de influencia.

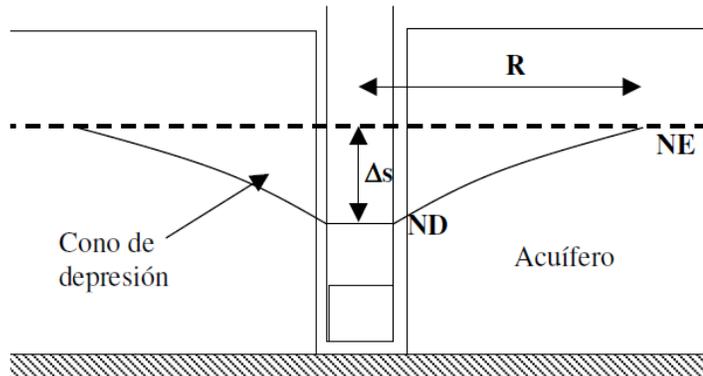
En la siguiente imagen, R_1 y R_2 hacen referencia a los radios de las superficies cilíndricas imaginarias, así como las áreas, A_1 y A_2 , correspondientes a cada una de ellas. De la misma manera, a cada superficie cilíndrica le corresponde una magnitud de velocidad de flujo de agua, V_1 y V_2 . El aumento de los radios y el descenso de las velocidades se da según se aleja del pozo; mientras mayor sea el área, porque mayor será el radio, menor será la velocidad. Por lo tanto, la velocidad mayor se dará en las cercanías del pozo, cuando el radio es menor. Por ejemplo, la velocidad de la primera superficie es dos veces mayor que el de la segunda, mientras que el radio es menor (siendo la primera superficie la más cercana al pozo).

Imagen No. 18: superficies cilíndricas imaginarias por las cuales el flujo de agua converge hacia el pozo.



Fuente: Johnson Division (1966).

Imagen No. 19: vista en perfil. Representación de cono de depresión de un pozo.



Fuente: Barra, Leonel (2010).

En la imagen anterior, R hace referencia al radio de influencia del cono, NE es el nivel estático del agua, ND es el nivel dinámico del agua y Δs es el abatimiento del pozo.

- Capacidad específica: es un valor resultante de la relación del caudal de agua extraída del pozo entre el abatimiento que se produce en él.

Para conocer las propiedades hidráulicas de un acuífero se realizan pruebas de bombeo, lo cual resulta un método sencillo y confiable. Las pruebas de bombeo se pueden analizar bajo condiciones de régimen permanente o no permanente.

Un régimen permanente presenta condiciones de forma y tamaño del cono de depresión que se mantienen aún cuando haya bombeo ininterrumpido. Cuando no hay alguna fuente de alimentación de agua hacia el acuífero, el cono de depresión se haría cada vez más grande y el nivel del agua descendería cada vez más lento pero si naturalmente existen fuentes de alimentación como agua de ríos, lagos u otros acuíferos, el cono de depresión adquiere agua, se equilibra el descenso del agua y se logra un régimen permanente. En pocas palabras, en condiciones de régimen permanente, el sistema no varía con el paso del tiempo, mientras que en un régimen no permanente sucede lo contrario (variable).

La prueba de bombeo puede variar o no el caudal con el que trabaja; cuando es fijo se conoce como prueba de bombeo de gasto constante, mientras que cuando cambia se conoce como prueba de bombeo de gasto variable. El pozo poseerá un caudal máximo que podrá entregar y cuando éste es alcanzado, la prueba se conoce como prueba de agotamiento.

Aunado con el tipo de régimen, el método para analizar los acuíferos varía dependiendo del tipo de acuífero. En la siguiente tabla se muestran diversos métodos o principios que pueden ser aplicados para el análisis, bajo diferentes condiciones. Los principios que se presentan no son métodos estándar; existen otros principios desarrollados por diferentes personas y también, con el paso del tiempo, se han desarrollado y modificado varios de los mismos. De manera general, las ecuaciones de cada principio se enfocan en determinar características

del acuífero y radios de influencia de los pozos, esto con el fin de observar posibles interferencias con los mismos y evitar perjudicar la producción de agua.

Tabla No. 5: métodos a utilizar para el análisis de la prueba de bombeo bajo diversas condiciones acuíferas.

Tipo de régimen	Tipo de acuífero	Principio a utilizar
Permanente	Libre	Dupuit-Forchheimer (1863)
	Semiconfinado	De Glee-Jacob (1930)
	Confinado	Thiem (1906)
No permanente	Libre	Neuman (1935)
	Semiconfinado	Hantush (1964)
	Confinado	Theis (1935)

Fuente: adaptación de Universidad CompuTense (2009).

4.1.1. Análisis bajo régimen permanente

El análisis se puede realizar por medio de los siguientes métodos:

4.1.1.1. Acuíferos libres

Para este tipo de acuíferos se utiliza el principio de Dupuit, que queda expresado de la siguiente manera:

$$Q = \frac{\pi * K(H^2 - h^2)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad \text{Ecuación No. 10}$$

Donde:

$$K = \text{permeabilidad o conductividad hidráulica} \left[\frac{m}{s} \right].$$

$$Q = \text{caudal del agua que se extrae, constante} \left[\frac{m^3}{s} \right].$$

$$H = \text{nivel estático} [m].$$

$h = \text{nivel del agua en el pozo durante el bombeo [m]}.$

$R = \text{radio de influencia del cono de depresión [m]}.$

$r = \text{radio efectivo del pozo [m]}.$

La diferencia entre los niveles del agua ($H-h$) es el abatimiento del pozo.

Para la utilización de esta expresión se consideran varias condiciones: permeabilidad uniforme dentro del acuífero, puede aplicarse la ley de Darcy para el análisis del flujo de agua dentro del acuífero, el bombeo es constante, el cono de depresión ha alcanzado el equilibrio.

4.1.1.2. Acuíferos confinados

También existe una expresión de Dupuit para acuíferos confinados bajo régimen permanente:

$$Q = \frac{2\pi * K * H(H - h)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad \text{Ecuación No. 11}$$

Esta expresión también considera las condiciones mencionadas para la fórmula de Dupuit para acuíferos libres.

Otro principio para acuíferos confinados en régimen permanente es el de Thiem, que se basa en las expresiones de Dupuit, utilizando dos pozos de observación. La expresión es la siguiente:

$$Q = \frac{2\pi * K * H(s_1 - s_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad \text{Ecuación No. 12}$$

Donde:

$s_1 =$ descenso del nivel de agua en el pozo de observación 1 [m].

$s_2 =$ descenso del nivel de agua en el pozo de observación 2 [m].

$r_1 =$ distancia del pozo de bombeo hacia el pozo de observación 1 [m].

$r_2 =$ distancia del pozo de bombeo hacia el pozo de observación 2 [m].

La diferencia entre los descensos del agua (s_1-s_2) es el abatimiento del pozo en condiciones estables.

4.1.1.3. Acuíferos semiconfinados

Para este tipo de acuíferos, deducciones de la Ley de Darcy sustituidas en la ecuación de continuidad logran que se obtenga un factor conocido como factor de filtración, que se expresa con la siguiente ecuación:

$$B^2 = \frac{b * b' * K}{K'} \quad \text{Ecuación No. 13}$$

Donde:

$B =$ factor de filtración [m^2].

$b =$ espesor del acuífero [m].

$b' =$ espesor del acuitardo (capa semiconfinante) [m].

$K =$ permeabilidad del acuífero [$\frac{m}{s}$].

$K' =$ permeabilidad del acuitardo (capa semiconfinante) [$\frac{m}{s}$].

Para el análisis de la hidráulica de los acuíferos semiconfinados se utiliza la ecuación de De Glee-Jacob, que deducida y simplificada es la siguiente:

$$s = \frac{Q}{2\pi * T} * K_0 \left(\frac{r}{B} \right)$$

Donde:

s = abatimiento en condiciones de equilibrio [m].

Q = caudal $\left[\frac{m^3}{s} \right]$.

T = transmisividad del acuífero = $K * \text{espesor del acuífero}$ $\left[\frac{m^2}{s} \right]$.

K_0 = modificador de Hantush, función de $\frac{r}{B}$ [adimensional].

r = distancia hacia el pozo a la cual se desea conocer el abatimiento [m].

B = factor de filtración $[m^2]$.

El factor de modificación de Hantush K_0 es una función tabulada. En el Anexo D se muestra la tabla de valores de la función $K_0(x)$ para la utilización de la fórmula de De Glee-Jacob en régimen permanente ($x=r/B$).

4.1.2. Análisis bajo régimen no permanente (variable)

4.1.2.1. Acuíferos libres

Para este tipo de acuíferos se utiliza la ecuación de Neuman, bajo ciertas condiciones como: bombeo constante, cumplimiento de la Ley de Darcy, el acuífero es penetrado completamente por el pozo, el material acuífero es homogéneo anisotrópico y la conductividad hidráulica principal es paralela a los ejes coordenados.

Para el análisis de Neuman bajo régimen variable en acuíferos libres se consideran tres fases de bombeo:

- Fase I: pareciera que el acuífero se comportase como confinado, donde el descenso del agua inicialmente es rápido debido a una descompresión. En esta fase el descenso de agua no se da por vaciado de los poros del material por lo que sobre la superficie freática aún quedan poros saturados de agua.
- Fase II: en esta etapa el descenso de agua es muy lento, lo que casi hace que el sistema se estabilice. Este descenso se debe a que los poros saturados de agua por encima de la superficie freática empiezan a liberar lentamente agua debido a la gravedad. Cuando se da dicha liberación de agua se da lo que se conoce como drenaje diferido.
- Fase III: existe de nuevo un descenso de agua aunque no tan rápido como en la fase I. Se da cuando el drenaje diferido se agota y el agua que se extrae proviene de la porosidad eficaz del acuífero.

La expresión de Neuman es la siguiente:

$$s = \frac{Q}{4\pi * T} * W(u_A, u_B, \beta) \quad \text{Ecuación No. 15}$$

Donde:

s = abatimiento para un tiempo t y distancia r [m].

Q = caudal del bombeo de agua [m^3].

T = transmisividad del acuífero libre $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

W = factor en función de $\frac{1}{u_A}$ y $\frac{1}{u_B}$ [adimensional].

Para el cálculo de los factores u_A y u_B se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$u_A = \frac{r^2 * S_e}{4 * t * T}$$

Ecuación No. 16

$$u_B = \frac{r^2 * S_y}{4 * t * T}$$

Ecuación No. 17

$$\beta = \frac{r^2 * K_v}{b^2 * K_h}$$

Ecuación No. 18

Donde:

t = tiempo en el cual se desea conocer el abatimiento [segundos].

r = distancia a la cual se desea conocer el abatimiento [m].

u_A, u_B, β = factores de la función *W* según Neuman [adimensional].

K_v = permeabilidad vertical $\left[\frac{m}{s}\right]$.

K_h = permeabilidad horizontal $\left[\frac{m}{s}\right]$.

S = coeficiente de almacenamiento elástico del acuífero [adimensional].

S_y = porosidad efectiva [adimensional].

b = espesor saturado inicial del acuífero [m].

Para la primera y segunda fase de bombeo se utilizará el factor *u_A* de la función *W*, mientras que para la tercera se utilizará *u_B*. Los valores de dicha función se presentan en el Anexo E.

4.1.2.2. Acuíferos confinados

Para este tipo de acuíferos se emplea la expresión de Theis, considerando ciertos aspectos como: acuífero homogéneo e isotrópico (misma permeabilidad vertical y horizontal), caudal de bombeo constante, el pozo penetra todo el acuífero. La ecuación que expresa el principio de Theis es la siguiente:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi * T} * W(u)$$

Ecuación No. 19

Donde:

s = abatimiento para una distancia r y un tiempo t [m].

Q = caudal de bombeo $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.

T = transmisividad $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

W = valor en función de $\frac{1}{u}$ [adimensional].

Para el cálculo del factor u se utiliza la siguiente ecuación:

$$u = \frac{r^2 * S}{4\pi * t * T}$$

Ecuación No. 20

Donde:

r = distancia en donde se desea conocer el abatimiento [m].

S = coeficiente de almacenamiento [adimensional].

t = tiempo en el cual se desea conocer el abatimiento [segundos].

T = transmisividad $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

El parámetro W se obtiene a partir de la curva de Theis, la cual se muestra en el Anexo F.

4.1.2.3. Acuíferos semiconfinados

Se utiliza el principio de Hantush, que se basa el principio de Theis excepto que el parámetro W es en función no solamente de u . Se considera que el acuitardo superior al acuífero semiconfinado no almacena agua sino sólo transmite la que proviene de un acuífero superior. La expresión de Hantush es la siguiente:

$$s = \frac{Q}{4\pi * T} * W\left(u, \frac{r}{B}\right) \quad \text{Ecuación No. 21}$$

Las variables significan lo mismo que en la expresión de Theis. El factor u se calcula de la misma manera que con el principio de Theis. Para el cálculo del factor B se utiliza la siguiente ecuación (otra manera de calcularlo):

$$B = \sqrt{\frac{T * b'}{K'}} \quad \text{Ecuación No. 22}$$

Donde:

$B =$ factor de goteo o filtración [m^2].

$T =$ transmisividad del acuífero semiconfinado $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

$b' =$ espesor del acuitardo [m].

$K' =$ permeabilidad del acuitardo $\left[\frac{m}{s}\right]$.

El parámetro W , en función de u y r/B , se logra obtener según la Tabla No. 31 presentada en el Anexo G.

Si se considera que el acuitardo que se ubica sobre el acuífero semiconfinado sí almacena agua y la cede, se debe considerar el coeficiente del almacenamiento del acuitardo S' . La expresión que debe utilizarse es la siguiente:

Ecuación No. 23

$$s = \frac{Q}{4\pi * T} * H(u, \beta)$$

Las variables son las mismas que las mencionadas anteriormente. La diferencia es el parámetro H , que se determina en función a u , que se calcula de la misma manera, y del factor β , el cual se calcula así:

Ecuación No. 24

$$\beta = \frac{r}{4 * B} \sqrt{\frac{S'}{S}}$$

El parámetro H , en función de u y β , se logra obtener según la Tabla No. 30 presentada en el Anexo G.

4.2. Pruebas de bombeo

Las pruebas de bombeo en pozos se llevan a cabo para realizar dos funciones. La primera de ellas es permitir la caracterización hidráulica del acuífero (mediante los principios anteriormente mencionados). La segunda función es brindar información de la producción del pozo, la cual es necesaria para la selección del equipo de bombeo que extraerá agua.

Mediante una prueba de bombeo de acuífero se miden diferencias entre niveles piezométricos del pozo y de pozos de observación. Cuando la prueba de bombeo es para aforo, el procedimiento es más sencillo ya que no se necesitan pozos de observación sino solamente medición de caudal y abatimiento dentro del pozo.

4.2.1. Pozos de observación

Como se mencionó, las diferencias entre los niveles piezométricos del pozo se miden en el mismo pozo y en pozos de observación. Al trabajar con pozos de observación se logra corroborar diversos valores como coeficiente de almacenamiento, rendimiento específico, isotropía o anisotropía del acuífero, entre otros factores. La cantidad de piezómetros con los que se trabajará dependerá de la calidad y exactitud con la que se desea trabajar, así como de aspectos económicos.

Los pozos de observación son perforaciones que alcanzan el nivel freático y se introduce una tubería ranurada en los últimos 0.5 – 1.80 metros de su longitud (puede ser PVC). Esta tubería ranurada se conoce como piezómetro. Puede emplearse también una rejilla convencional pero se incurre en mayores costos. Los piezómetros son instalados a cierta distancia y profundidad del pozo principal de bombeo y variarán según el tipo de acuífero, la litología que se posea, duración del bombeo, longitud del piezómetro, la distancia y profundidad de los piezómetros. Las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos varían entre unos y otros, por lo que no existe una determinada distancia para la colocación de piezómetros, pero se pueden colocar entre distancias de 10 y 100 metros respecto al pozo de bombeo. Estas distancias pueden ser más grandes cuando el acuífero es confinado y de gran espesor (puede ser de 100 a 250 metros o más). Para que se logre la medición de abatimientos representativos se recomienda que el piezómetro se coloque a una profundidad tal que se ajuste con la mitad de la longitud de la rejilla del pozo de bombeo. Se recomienda también que los piezómetros se coloquen en todas las capas permeables que se encuentren la perforación, por lo que pueden instalarse también en acuitardos para conocer su comportamiento.

4.2.2. Realización de la prueba de bombeo

Al momento de llevar a cabo las pruebas de bombeo es necesario que se realicen las mediciones del abatimiento en intervalos de tiempo adecuados, tanto en los pozos de observación como en el pozo de bombeo. El abatimiento y la recuperación del nivel son más significativos al inicio del bombeo y durante las dos horas iniciales, las mediciones deben realizarse en intervalos de tiempo más cortos.

Idealmente se desea que el bombeo logre alcanzar condiciones de flujo permanente, por lo que no existe una duración fija para la prueba de bombeo de todos los pozos. Ésta dependerá, entre otros factores, del tipo de acuífero, la precisión de la evaluación hidrogeológica del mismo y características del pozo.

Para que los resultados de la prueba de bombeo sean confiables, generalmente el mínimo de duración de la prueba son 24 horas; cuando se presentan dificultades para realizar bombeos de larga duración, se aconseja que mínimo se cumplan 12 horas. Cuando las pruebas se realizan con otro fin, por ejemplo la evaluación de barreras impermeables, relaciones entre ríos y acuífero, análisis de acuíferos libres y semiconfinados, la prueba puede durar hasta 6 días o más, hasta que se logre conocer el comportamiento real del acuífero, no el aparente.

Después que el bombeo deja de ocurrir se prosigue a realizar mediciones de la recuperación de los niveles de agua, en intervalos de tiempo entre 10% y 30% de los que se emplearon para medir el abatimiento. En la siguiente tabla se muestran intervalos de tiempo recomendados para realizar las mediciones del abatimiento (el tiempo indicado es a partir de que se pone en marcha el bombeo):

Tabla No. 6: tiempos recomendados para prueba de bombeo.

No. de medición	Tiempo	No. de medición	Tiempo
1	Antes del bombeo	18	20 min.
2	15 seg.	19	50 min.
3	30 seg.	20	1 hora
4	45 seg.	21	1 hora 20 min.
5	1 min.	22	1 hora 40 min.
6	2 min.	23	2 horas
7	3 min.	24	2 horas 30 min.
8	4 min.	25	3 horas
9	5 min.	26	4 horas
10	6 min.	27	5 horas
11	8 min.	28	7 horas
12	10 min.	29	9 horas
13	12 min.	30	13 horas
14	15 min.	31	19 horas
15	20 min.	32	25 horas
16	25 min.	33	31 horas
17	30 min.	34	39 horas

Fuente: Comisión Nacional del Agua de México (2007).

Si las condiciones deseables del acuífero aún no se han conseguido y es necesario seguir con la prueba de bombeo, las mediciones siguientes pueden realizarse cada 8 horas.

Para la medición del nivel del agua dentro de los pozos es común utilizar una sonda eléctrica. Ésta está formada por un cable y un electrodo de contacto. El cable debe poseer una longitud mayor a la profundidad del nivel dinámico máximo y debe estar elaborado de un material que no se extienda. Al mismo tiempo, es necesario que el cable esté graduado adecuadamente (cinta métrica). El electrodo de contacto se encarga de indicar en dónde se encuentra el nivel del agua; cuando hace contacto con la misma se genera una señal que puede ser luz o sonido en la unidad externa.

Imagen No. 20: ejemplo de sonda eléctrica para medición de nivel de agua dentro de un pozo.



Fuente: PLM equipments (2016).

Es importante ser cuidadoso cuando se realizan las mediciones ya que el electrodo puede hacer contacto con partículas de agua durante el recorrido hasta donde se encuentre el nivel de agua (se pueden realizar sacudidas para que dichas partículas se remuevan del electrodo).

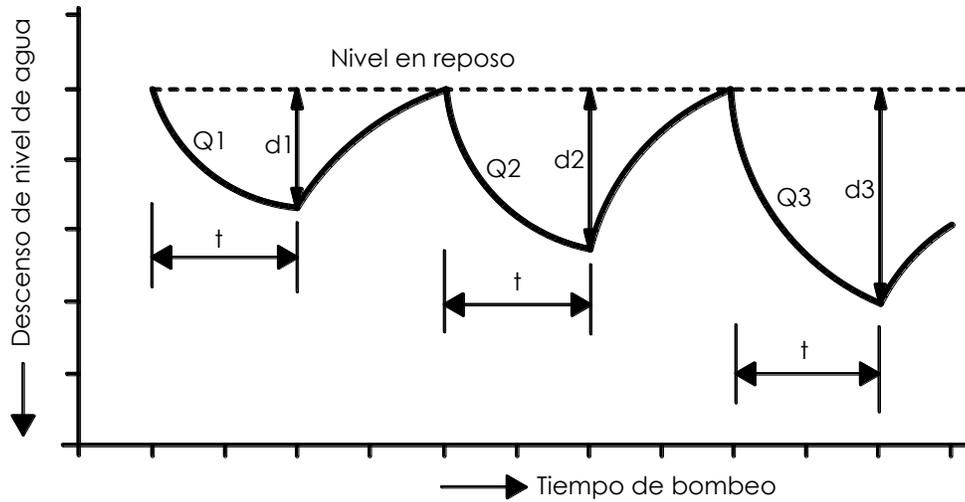
4.2.3. Prueba de bombeo para determinar parámetros del pozo de bombeo

Para conocer las características del pozo se realiza una prueba de bombeo conocida como prueba escalonada. Mediante su realización es posible conocer la capacidad específica y la eficiencia del pozo, así como el caudal de explotación, lo que permite determinar la bomba que se utilizará para la extracción futura del agua, así como evaluar los métodos de mantenimiento que puede requerir el pozo. Mediante la prueba de bombeo escalonado se trabaja con un caudal variable; la magnitud del caudal aumenta durante la prueba, unas tres o cuatro veces pero durante cada etapa se mantiene constante. En cada etapa, con los diferentes caudales, se mide el abatimiento.

La prueba escalonada se puede realizar con o sin recuperación. Cuando la prueba es con recuperación, con cada escalón o etapa (con la misma duración de tiempo) se aumenta el caudal, se mantiene constante en cada uno y se deja que el nivel estático inicial se recupere al finalizar cada escalón, ya sea total o parcialmente. Un bombeo escalonado con recuperación implica más tiempo que uno sin recuperación debido a que las recuperaciones son lentas. Las

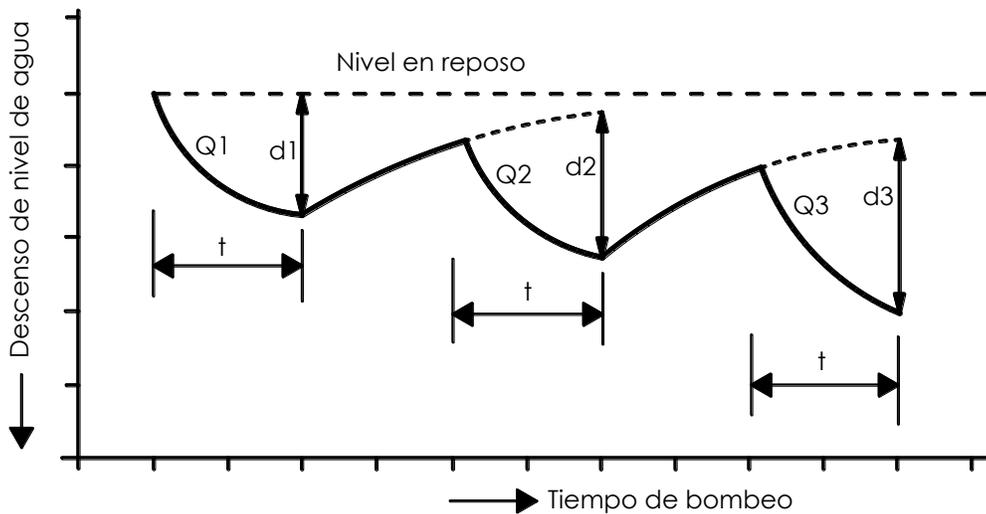
siguientes gráficas muestran la relación tiempo-descenso para cada bombeo de tres fases con recuperación, donde Q hace referencia a los caudales en cada fase de bombeo (1, 2 y 3), con un tiempo t determinado y d es cada descenso de nivel de agua para cada fase.

Gráfica No. 1: relación tiempo-descenso en un bombeo escalonado totalmente recuperado.



Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (1984).

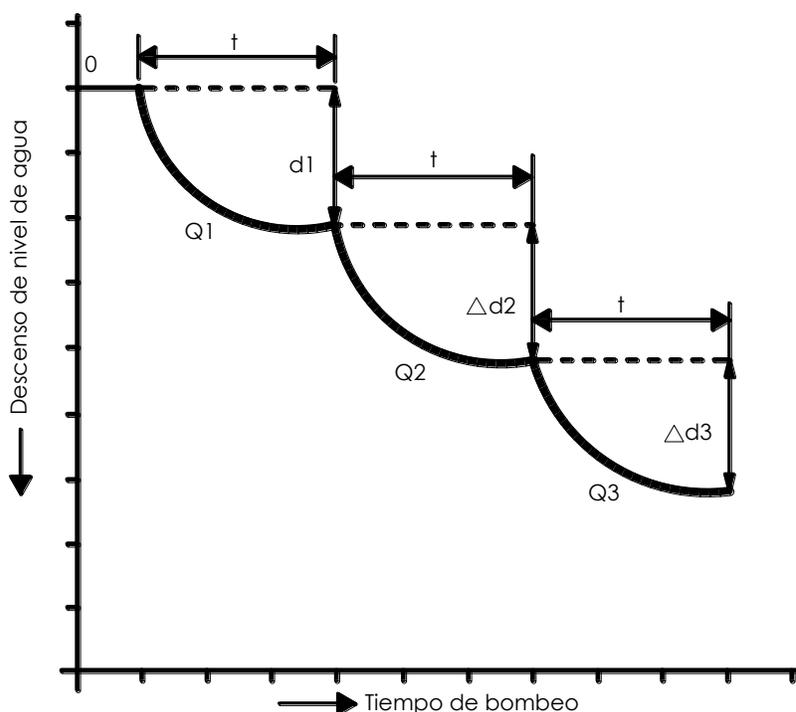
Gráfica No. 2: relación tiempo-descenso en un bombeo escalonado parcialmente recuperado.



Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (1984).

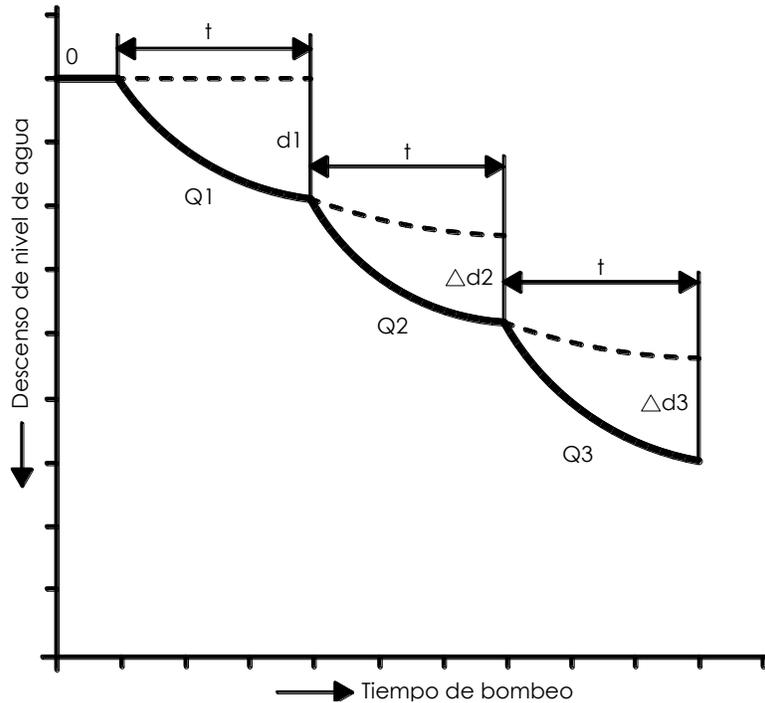
Sucede lo contrario cuando la prueba es sin recuperaci3n: el aumento de caudal no se interrumpe entre cada escal3n para esperar recuperaci3n. Cuando se d3e el primero bombeo, se producir3 un descenso de agua d_1 y viene siendo el nivel inicial de la segunda fase del bombeo. Para esta segunda fase, el descenso d_2 ser3 el ocurrido en dicha fase m3s d_1 . Por lo tanto, el descenso d_3 es el ocurrido en la fase 3 m3s los descensos d_1 y d_2 . Al terminar cada escal3n, los niveles pueden o no estabilizarse, aunque lo m3s com3n es que no ocurra (no se debe confundir estabilizaci3n con recuperaci3n). Las siguientes gr3ficas lo representan:

Gr3fica No. 3: relaci3n tiempo-descenso en un bombeo escalonado sin recuperaci3n, con niveles estabilizados.



Fuente: Instituto Geol3gico y Minero de Espa1a (1984).

Gráfica No. 4: relación tiempo-descenso en un bombeo escalonado sin recuperación y sin estabilización de niveles.



Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (1984).

El abatimiento real de un pozo siempre es mayor al obtenido mediante las expresiones matemáticas debido a que existen pérdidas de energía producidas por fuerzas de rozamiento no incluidas en las expresiones. Las pérdidas que deben tomarse en cuenta son las siguientes: pérdidas en la rejilla del pozo, pérdidas en la bomba y en el entubado del pozo, pérdidas en el acuífero (en cercanías al pozo, en donde la velocidad del agua es muy alta y no se cumple la Ley de Darcy).

Por lo tanto, el abatimiento s viene dado por los descensos teóricos más los descensos debido a las pérdidas mencionadas. Puede expresarse de la siguiente manera:

$$s_{real} = s_{teórico} + s_{pérdidas}$$

Ecuación No. 25

En el cálculo del abatimiento teórico, siempre se calcula de manera directamente proporcional al caudal y se puede expresar así:

Ecuación No. 26

$$S_{teórico} = B * Q$$

Donde:

$$B = \text{coeficiente de pérdida del acuífero} \left[\frac{s}{m^2} \right].$$

$$Q = \text{caudal de agua} \left[\frac{m^3}{s} \right].$$

Según deducciones de Jacob, descensos a causa de rozamientos pueden quedar expresados según la fórmula general de descensos (para Jacob, $n=2$):

$$S_{pérdidas} = C * Q^n$$

Ecuación No. 27

Y por lo tanto:

$$S_{real} = B * Q + C * Q^n$$

Ecuación No. 28

Donde:

$$C = \text{coeficiente de pérdida del pozo} \left[\frac{s}{m^2} \right].$$

$n = \text{exponente que puede variar entre } 1 - 3.5 \text{ (según Lennox) [adimensional]}.$

Utilizando las expresiones anteriores se logra el cálculo de la eficiencia E del pozo de la siguiente manera (expresado en porcentaje):

Ecuación No. 29

$$E = \frac{S_{teórico}}{S_{real}} * 100 = \frac{B * Q}{B * Q + C * Q^n} * 100 = \frac{B}{B + C * Q^{n-1}}$$

Las variables involucradas en las expresiones anteriores se pueden interpretar de la siguiente manera:

- Exponente n : el valor de n dependerá de las características constructivas y de equipamiento del pozo, así como de las características del acuífero. Según Lennox, el valor de n puede variar entre 1 y 3.5. Jacob utilizó $n=2$ para un régimen de agua intermedio, lo cual no siempre se da y mientras menos laminar sea el flujo, mayor será el valor de n . Esto se puede presentar cuando el espesor de la capa saturada en acuíferos libres disminuye. Cuando n es mayor que 2, el flujo de agua suele ser turbulento y más pérdidas de carga se ven implicadas (esto se puede presentar en el movimiento del agua cerca del pozo). Cuando se realiza la prueba de bombeo es conveniente que se trabaje con bombeos cercanos al caudal de explotación, evitándose así cambios bruscos de un caudal a otro y por lo tanto un cambio en el régimen del flujo.
- Constante B : corresponde a las pérdidas de circulación en el acuífero, lo cual depende su transmisividad, del coeficiente de almacenamiento y del tipo de bombeo.
- Constante C : este valor depende de las características constructivas del pozo, por ejemplo del filtro de grava, características de la rejilla, tipo de perforación utilizado, desarrollo y limpieza.

Para el cálculo de las constantes B y C se puede emplear el siguiente procedimiento gráfico:

- a. Se obtiene los valores de caudal y descenso de agua según lo medido durante la prueba de bombeo:

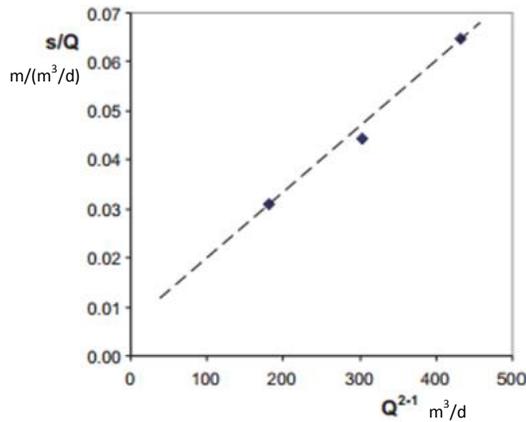
Tabla No. 7: lecturas de caudal y descenso de agua.

Q^{n-1} [m ³ /día]	s [metros]	s/Q [m/(m ³ /d)] (abatimiento específico)
Q_1	s_1	s/Q_1
Q_2	s_2	s/Q_2
Q_3	s_3	s/Q_3

Fuente: adaptación de Sánchez, J. (2015).

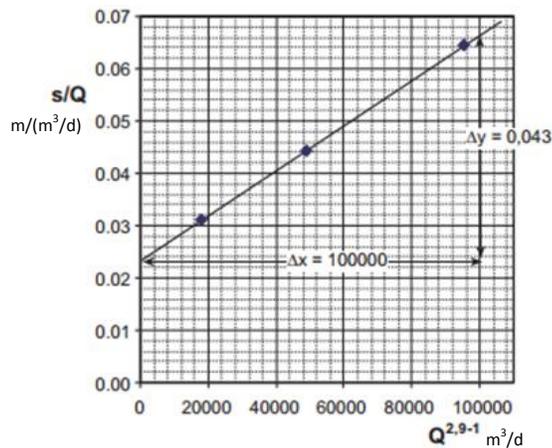
- b. Con los datos que se tienen se construye una gráfica de caudal contra abatimiento específico. Para el valor de n , se debe probar con las posibilidades existentes hasta que la gráfica que se realizará represente una recta con puntos alineados. Generalmente se inicia trabajando con $n=2$.

Gráfica No. 5: pares de datos que no se alinean, lo cual indica que debe buscarse otro valor de n .



Fuente: Sánchez, J. (2015).

Gráfica No. 6: pares de datos alineados que representan un valor correcto de n .



Fuente: Sánchez, J. (2015).

- c. Posterior a la construcción de la gráfica con un valor n correcto, se procede a determinar el valor de las constantes B y C . El valor de B corresponde al valor donde la recta corta el eje “y”. El valor de C se determina mediante el cálculo de la pendiente de la recta.
- d. Teniendo los valores de n , B y C , es posible calcular la eficiencia del pozo mediante la fórmula expresada con anterioridad.

Puede utilizarse también un método analítico para la determinación de los valores mencionados:

- a. Se tiene el sistema de ecuaciones a partir de la ecuación de descensos:

$$\frac{S_1}{Q_1} = B + C * Q_1^{n-1} \quad \text{Ecuación No. 30}$$

$$\frac{S_2}{Q_2} = B + C * Q_2^{n-1} \quad \text{Ecuación No. 31}$$

$$\frac{S_3}{Q_3} = B + C * Q_3^{n-1} \quad \text{Ecuación No. 32}$$

- b. Se elimina B y C para obtener:

$$\frac{\frac{S_2}{Q_2} - \frac{S_1}{Q_1}}{\frac{S_3}{Q_3} - \frac{S_2}{Q_2}} = \frac{Q_2^{n-1} - Q_1^{n-1}}{Q_3^{n-1} - Q_2^{n-1}} \quad \text{Ecuación No. 33}$$

- c. Se prueba con diversos valores de n hasta que la anterior igualdad se cumpla.

- d. Encontrado el valor de n adecuado, se puede calcular los valores de B y C mediante sustitución.

4.2.4. Medición del caudal de agua durante una prueba de bombeo

Durante la prueba de bombeo se necesita conocer la magnitud de caudal de agua que se extrae, aspecto más importante a determinar durante este tipo de prueba ya que se relaciona directamente con el futuro desempeño del pozo relacionado con la bomba que se seleccionará para la extracción final de agua.

Existen diversos métodos para la medición del caudal de agua que se extrae. Éstos son algunos de los más empelados:

4.2.4.1. Método volumétrico

Es un método fácil de emplear que implica la utilización de un recipiente de volumen conocido. El agua que se extrae llena el recipiente y debe medirse el tiempo que conllevó dicha llenada. Se procede a calcular el caudal de la siguiente manera:

$$Q = \frac{Vol}{t} \quad \text{Ecuación No. 34}$$

Donde:

$$Q = \text{caudal de agua} \left[\frac{\text{unidad de volumen}}{\text{unidad de tiempo}} \right].$$

Vol = volumen del recipiente que será llenado on agua [litros o m^3].

t = tiempo que tardó el recipiente en llenarse de agua [seg, por ejemplo].

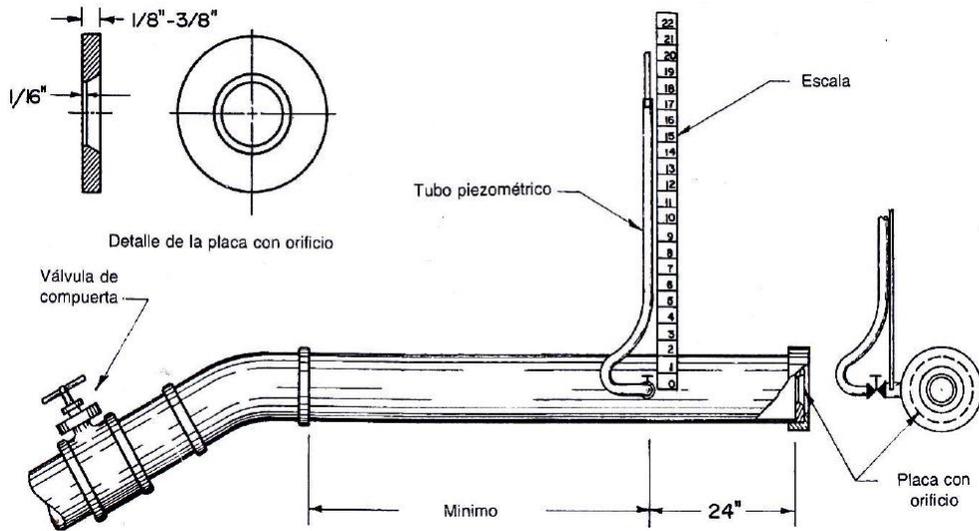
4.2.4.2. Método del agujero calibrado

Es un método bastante utilizado que consta en la utilización de un equipo conformado por una tubería que se conecta con la cabeza de descarga del pozo, un portaplaca para placas que poseen agujeros de diversos diámetros, un tubo plástico transparente y una cinta métrica o regla graduada. La tubería se conecta con la cabeza del pozo y a ésta tubería se conecta una placa por medio de un portaplacas. Esta placa es la que contiene el agujero calibrado. Se debe realizar un orificio a 61 cm del agujero calibrado, con un diámetro que oscile entre los 0.5 – 2 cm, en el cual se instalará un tubo transparente que servirá para observar y medir el nivel que el agua alcance dentro del mismo, por lo que debe utilizarse una cinta métrica o una regla graduada que permita la lectura de dicho nivel. Los siguientes son aspectos importantes que deben respetarse al momento de armar el sistema:

- Los bordes del agujero calibrado deben ser biselados, con un ángulo de 45° - 60°.
- Es necesario que la placa quede instalada perpendicular al eje de la tubería.
- La longitud total de la tubería debe ser mínimo de 2.40 metros
- El diámetro del agujero calibrado oscila entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ del diámetro de la tubería.
- El espesor de la placa varía entre $\frac{1}{8}$ y $\frac{3}{8}$ de pulgada.
- El tubo transparente debe poseer una longitud entre 1.20 y 1.50 metros.

En la siguiente imagen se muestra el sistema con los detalles necesarios para su correcto armado:

Imagen No. 21: sistema de agujero calibrado para medición de caudal de agua extraído.



Fuente: Johnson Division (1966).

Este método se basa en el principio de Bernoulli, en donde se logra el cálculo del caudal según la presión. El nivel de agua que se alcance en el tubo transparente indica la presión del agua.

El cálculo del caudal se puede calcular de la siguiente manera:

$$Q = K * A * \sqrt{2 * g * h} = 4.43 * A * K * \sqrt{h} \quad \text{Ecuación No. 35}$$

Donde:

$$Q = \text{caudal de agua} \left[\frac{m^3}{s} \right].$$

$$K = \text{factor de descarga [adimensional]}.$$

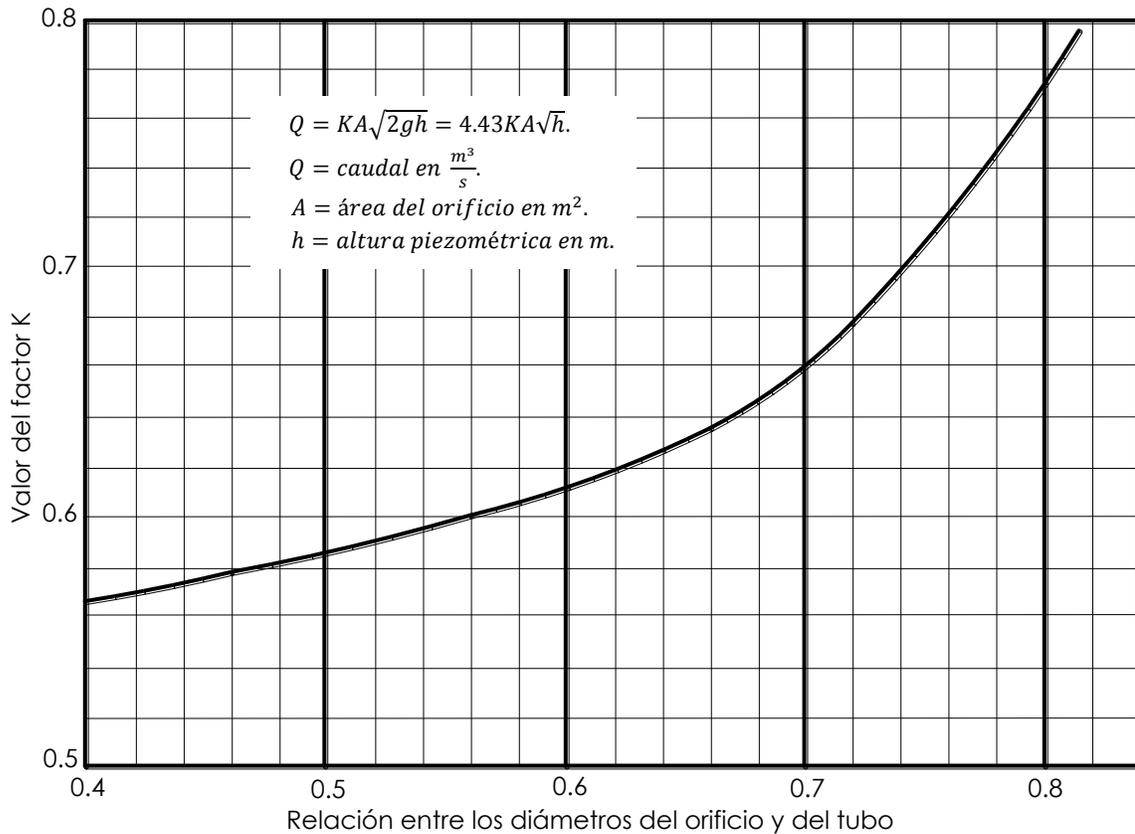
$$g = \text{grvedad} \left[\frac{m}{s^2} \right].$$

$$A = \text{área del agujero calibrado} [m^2].$$

$$h = \text{altura del agua en el tubo transparente} [m].$$

La constante K se puede obtener mediante la siguiente gráfica, basada en los diámetros del agujero y de la tubería:

Gráfica No. 7: factores de descarga K según la relación entre los diámetros del agujero y la tubería.



Fuente: Johnson Division (1966).

4.2.4.3. Método de vertederos

El empleo de vertederos implica un canal con una barrera o pared de determinada geometría por el cual pasará el flujo de agua. El caudal se determina midiendo la altura del nivel del agua que ésta alcance en dicha barrera y aplicando las fórmulas establecidas según el tipo de vertedero.

Las paredes de un vertedero, sin importar qué geometría posea, deben poseer un espesor pequeño, aproximadamente de 2 mm, lo que logra que

el flujo de agua no se vea alterado grandemente, así como también poseer el recorte biselado a 45°.

Los siguientes son los vertederos más utilizados:

- o Vertedero rectangular: la barrera de este vertedero posee un recorte en forma rectangular en la parte superior (recorte biselado). La expresión que se utiliza cuando se trabaja con vertederos rectangulares es la siguiente:

$$Q = 0.00028317 \left(68 * b * h^{1.48} - \frac{0.18 * b^{1.18} * h^{1.9}}{1 + 0.004263 * b^{1.8}} \right), \text{ cuando } b > h$$

Ecuación No. 36

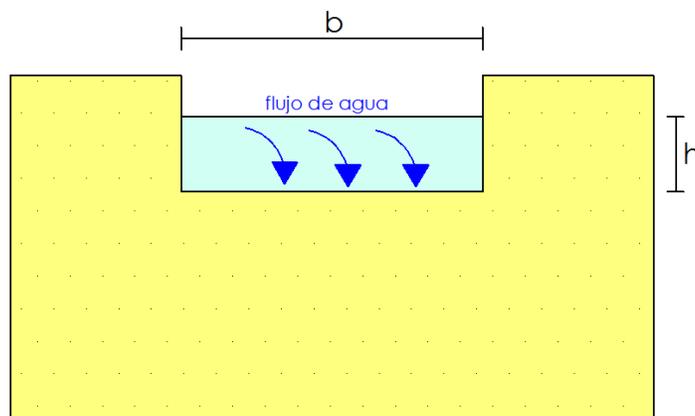
Donde:

$$Q = \text{caudal de agua} \left[\frac{l}{s} \right].$$

$b =$ ancho del recorte rectangular [cm].

$h =$ tirante de agua en el recorte rectangular [cm].

Imagen No. 22: vista en elevación de vertedero rectangular.



Fuente: elaboración propia (2016).

A partir de procesos experimentales se ha logrado tabular una serie de caudales para diversos anchos y tirantes de agua. Se presenta una tabla con dichos datos en el Anexo H.

- o Vertedero triangular: varía con el rectangular en cuanto a la geometría del recorte de la barrera. En este caso es triangular y es posible determinar el caudal utilizando la siguiente expresión:

$$Q = 0.01447 * \tan \frac{\alpha}{2} * h^{2.48} \quad \text{Ecuación No. 37}$$

$$\text{Cuando } \alpha = 90^\circ \rightarrow Q = 0.01447 * h^{2.48} \quad \text{Ecuación No. 38}$$

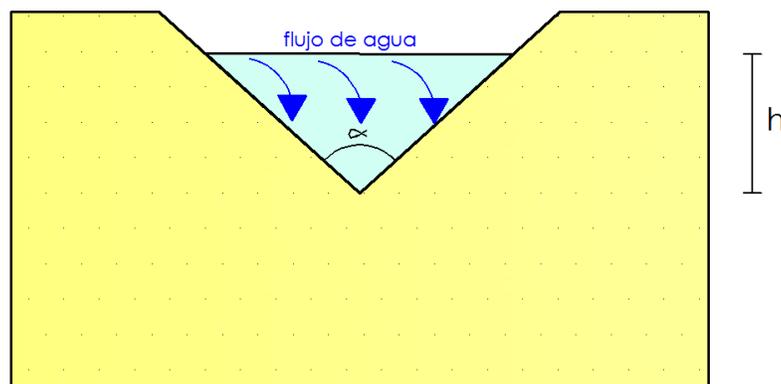
Donde:

$$Q = \text{caudal de agua en } \left[\frac{l}{s} \right].$$

$\alpha =$ ángulo entre aristas del recorte triangular [cm].

$h =$ tirante de agua en el recorte triangular [cm].

Imagen No. 23: vista en elevación de vertedero triangular.



Fuente: elaboración propia (2016).

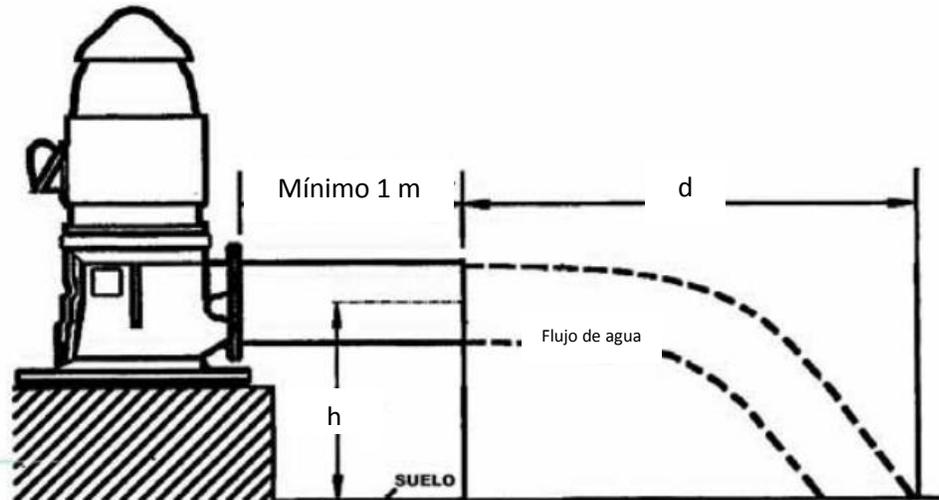
De la misma manera que con los vertederos rectangulares, según procesos experimentales se han determinado diversos caudales para

varios ángulos entre aristas y tirantes de agua. En el Anexo I se presentan dichos valores.

4.2.4.4. Método de la escuadra

Al utilizar este método es necesario que el flujo de agua sea horizontal. Para ello se utiliza una tubería de descarga en dicha posición a determinada altura y se mide la distancia que el flujo de agua alcanza a partir del extremo de salida de la tubería.

Imagen No. 24: método de la escuadra para medir caudales de agua.



Fuente: Comisión Nacional del Agua de México (2007).

Para el cálculo del caudal se utiliza la siguiente expresión:

$$Q = \frac{0.02216 * d * A}{\sqrt{h}} \quad \text{Ecuación No. 39}$$

Donde:

$$Q = \text{caudal de agua} \left[\frac{l}{s} \right].$$

$d = \text{distancia horizontal de la salida de agua al final del chorro [cm]}.$

$A = \text{área de la tubería [cm}^2\text{]}.$

$h = \text{altura desde la superficie del terreno al centro de la tubería [cm]}.$

4.3. Consideraciones generales de diseño de pozos

Para que un pozo sea eficiente es necesario realizar una adecuada planificación y diseño. Por medio de un correcto diseño se logra: una descarga de agua requerida según las características del acuífero y del bombeo, que el pozo trabaje a su máxima eficiencia y con tasas de producción previstas, extraer agua con calidad adecuada y no contaminada, maximizar la vida útil del pozo tomando en cuenta la eficacia de los aspectos económicos.

Las características del terreno donde se llevará a cabo la perforación deben ser analizadas ya que de ellas dependerá el método de perforación a utilizar y todos los aspectos requeridos en el diseño. Se debe realizar evaluaciones hidrogeológicas en el sitio para poder conocer el volumen de agua subterránea disponible para ser explotada.

Es necesario considerar que las formaciones geológicas del sitio donde se realizará la perforación son las que definen la calidad del agua subterránea, por lo que habrá situaciones donde el diseño pueda requerir consideraciones especiales para aguas que posean características contaminantes. Para evitar extraer agua contaminada, es necesario realizar pruebas en los acuíferos para conocer la naturaleza del recurso y en caso posea una calidad indeseada, se debe tener conocimiento a cerca de la extensión de la misma, tanto vertical como horizontalmente, para poder realizar sellados de las zonas contaminadas y así explotar el recurso en el área adecuada.

Un aspecto importante a tomar en cuenta en el diseño del pozo es la disponibilidad de agua para los procesos de perforación. Al momento de realizarse la perforación por el método de rotación, ya sea convencional o inverso, se

requiere el uso de grandes volúmenes de agua potable. También es requerido el recurso cuando se realizan procesos de terminación y desarrollo de pozos. Cuando se utiliza la percusión por cable, la cantidad de agua a utilizar es considerablemente menor, pero siempre necesaria.

Cuando la perforación se realiza en un campo abierto, fuera del ámbito urbano, es necesario que el terreno sea lo suficientemente extenso para poseer pozas para la descarga de fluido de perforación, cuando se emplea el método de perforación rotatoria. Cuando se perforara en áreas urbanas, el fluido de perforación debe transportarse en camiones hacia un vertedero destinado para ese fin.

A continuación se menciona diversos criterios de selección de diseño de pozos:

- a. Profundidad del pozo: la profundidad total que poseerá el pozo queda determinada según la producción deseada y las características del acuífero a explotar. Éste debe ser penetrado una profundidad necesaria para conseguir la producción requerida. Esta profundidad es mayor que la profundidad de la tubería de revestimiento.
- b. Profundidad de la tubería de revestimiento (casing): la profundidad de esta tubería dependerá de los requerimientos de la bomba, características del pozo y requerimientos de descarga de agua. Al mismo tiempo se debe proyectar a una mayor profundidad de lo requerido por la bomba debido a cuestiones como disminución del nivel freático, interferencias de otros pozos o requerimiento de aumento de producción.
- c. Diámetro de la tubería de revestimiento: se selecciona según el diámetro de la bomba a utilizar, la cual a su vez se elige según los requerimientos de producción.

- d. Diámetro de la rejilla: es determinado según el diámetro que posea la tubería de revestimiento.
- e. Diámetro de la perforación: se determina en función del diámetro de la tubería de revestimiento y la rejilla. Estos son algunos de los factores generales que se utilizan:
- Cuando se posee empaque de grava, el pozo poseerá de 8 a 12 pulgadas más que el diámetro de la tubería de revestimiento y la rejilla.
 - Cuando el pozo posee desarrollo natural, el diámetro de la perforación será ligeramente mayor que el diámetro externo de la tubería de revestimiento, a manera que se logre introducirla.
- f. Verticalidad y alineamiento: estos dos factores son de importancia para que el pozo funcione correctamente según lo diseñado. Debe quedar claro que un pozo puede estar recto pero no implica necesariamente que esté vertical, ya que pueden existir desviaciones. El alineamiento posee más importancia que la verticalidad ya que sólo cuando existe alineamiento, se logra instalar una bomba a la profundidad deseada (si no hay alineación, la bomba no pasa desde cierto punto). La verticalidad puede poseer más desviaciones pero siempre dentro de límites razonables que eviten que la operación de la bomba se vea afectada. Para realizar las mediciones se utiliza un trípode que se coloca en la superficie del terreno; del trípode cuelga un cable que, mediante un gancho, se une a un componente cilíndrico de acero (plomada) en su extremo inferior. El cilindro posee menor diámetro que la tubería de revestimiento y debe tener el peso suficiente para tensionar el cable del que suspende. El trípode se coloca a manera que el cable y la plomada queden centrados en la parte superior de la tubería de revestimiento; así se logra ir descendiendo con la plomada

dentro de la tubería y se van observando y midiendo desviaciones cada cierta profundidad hasta alcanzar la deseada.

Al momento que se lleva a cabo la perforación, para evitar pérdida de verticalidad, se debe controlar la nivelación de la torre de perforación y la mesa de trabajo; para ello se emplean niveles que miden dicha característica y se logra observar si la verticalidad se ha perdido de manera significativa. Para el control de la desviación, ésta debe medirse a varias profundidades para corroborar que la magnitud de la misma no sea grande, utilizando la siguiente expresión:

$$X = \frac{D(H + h)}{h} \qquad \text{Ecuación No. 40}$$

Donde:

X = desviación del pozo a cierta profundidad [pulgadas].

D = distancia que se mueve el cable del centro de la tubería [pulgadas].

H = distancia de la parte superior de la plomada a la parte superior de la tubería [pies].

h = distancia del centro de la polea del trípode a la parte superior de la tubería [pies].

- g. Sellado de la superficie del pozo: el pozo debe protegerse de fuentes de contaminación superficial, por lo que se aplica un sellado en la superficie que permita aislamiento.

4.4. Métodos de perforación de pozos

Existen diversos métodos mecánicos de perforación de pozos y, sin importar el que se utilice, se debe poseer un conjunto de procesos y herramientas que

permitan el rompimiento del terreno, un motor, un procedimiento para extraer los residuos y un sistema que permita el mantenimiento de las paredes de la obra.

Los métodos de perforación son variados pero los más utilizados son el de percusión, el de rotación y el de rotopercusión. Cada uno de ellos posee ventajas en cuanto a construcción, costos, tipo de formación geológica a traspasar, la profundidad y diámetro requeridos, entre otros factores.

Según las características geológicas del sitio, se puede presentar dos condiciones de construcción, generalmente. Se puede trabajar con penetraciones que alcancen acuíferos conformados por roca consolidada; esta situación implica que por el material suelto se debe extender un ademe (tubería que recubre la obra y se encarga de su protección) y que en la roca inferior a este material se posea un orificio abierto o bien, una rejilla. El otro caso se presenta cuando el acuífero posee arena; aquí si es necesaria la instalación de rejillas para el ingreso de agua.

De manera generalizada y resumida, la construcción de un pozo se realiza por medio de diversas etapas que son la perforación, la instalación de un ademe y de una rejilla, el proceso de protección sanitaria del pozo y el desarrollo del mismo.

Existen diversos métodos de perforación de pozos, pero los más utilizados son los siguientes:

- a. Método de percusión.
- b. Método de rotación.
- c. Método de rotopercusión.

4.4.1. Método de percusión

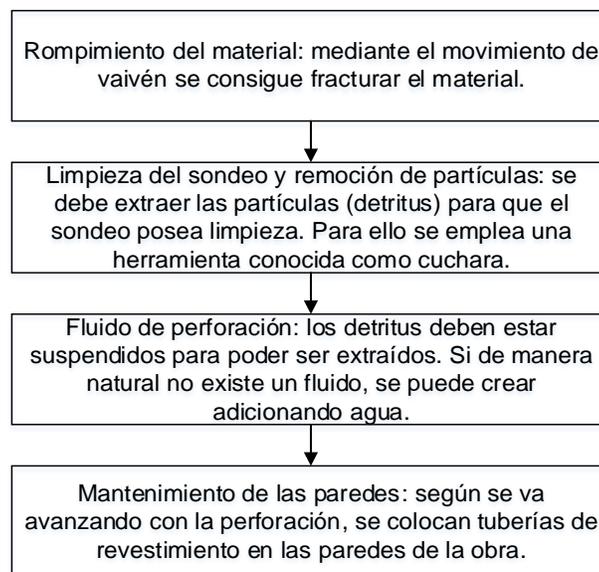
Mediante este método de perforación, por medio de golpes se consigue el rompimiento de materiales rígidos, como roca, o la desintegración de otro tipo

de materiales. La fracturación y trituración del material se consigue por medio de una herramienta pesada que se levanta y se deja caer sobre el material.

El método de percusión puede llevarse a cabo mediante dos sistemas que difieren en cuanto al mecanismo de transmisión de movimiento de golpeo. Puede ser un sistema canadiense, en donde el movimiento de vaivén es transmitido por medio de un tren de varillaje, lo que implica que para alcanzar mayores profundidades es necesario realizar acoples de piezas según se va avanzando en la perforación. El otro sistema es el de Pensilvania, que utiliza un cable de acero para crear el movimiento de vaivén.

Emplear el método de perforación por medio de percusión implica una serie de acciones que se describen a continuación:

Diagrama No. 3: procesos generales del método de percusión.



Fuente: Dirección General de Industria del Gobierno de Canarias (2012).

4.4.1.1. Percusión por medio de cable de acero

El sistema de percusión que más se utiliza es el de cable de acero (pensivaniense). Este sistema requiere de la utilización de un equipo conformado por los siguientes componentes:

- Tarima del equipo: la torre, los motores, cajas de cambio, las bobinas de cable y otros componentes, se disponen sobre una plataforma. Se poseen ejes que transmiten tracción a los diversos componentes, cuando sea necesario.
- Torre: ésta es una estructura que debe ser capaz de resistir grandes esfuerzos, por lo que su resistencia condiciona la capacidad de todo el equipo. La torre puede ser un mástil individual o puede ser un conjunto de vigas soldada que conforman una estructura.
- Carretes: son las bobinas que contienen los cables y al mismo tiempo permiten su arrastre (carrete principal). También existen carretes secundarios o auxiliares para los cables de limpieza.
- Compartimiento de mando: es la cabina en donde se controla el motor, la caja de cambios, los carretes de cable, etc. Es importante que esta cabina se ubique en un lugar que permita que el operador pueda tener una adecuada visibilidad de la perforación.
- Equipo de perforación y limpieza: son los taladros (trépano), válvulas, barras, etc., que se utilizan para la perforación y limpieza.
- Herramientas auxiliares: se incluyen llaves de apriete, mazos, equipo de soldadura, etc.

4.4.1.2. Maquinaria y herramientas de perforación

El movimiento de vaivén que produce el golpe debe poseer uniformidad en cuanto a frecuencia y recorrido, condiciones controlables desde la cabina de mando. Para que se cumpla lo anterior, se requiere un balancín que se conecta con la transmisión del motor. Generalmente, el promedio son de 45 a 60 golpes/min y el trépano cae entre 30 y 90 cm.

El motor del equipo se encarga de la transmisión de fuerza motriz a una rueda excéntrica y luego el movimiento giratorio se transforma en movimiento vertical, el cual es transmitido al balancín. Éste va unido con el cable que sostiene la columna de perforación y se apoya en la torre.

Durante el proceso de perforación es necesario que el golpeo que posea el trépano sea adecuado para lograr avanzar y al mismo tiempo realizar la extracción de detritus. Se debe corregir el desplazamiento y frecuencia cuando sea necesario, así como tomar en cuenta las tendencias a desvíos o enganches, lo cual debe ser controlado por la persona encargada de la perforación.

Dependiendo del tipo de material que posea el terreno, la percusión fractura el material o lo afloja. Este último caso se presenta en materiales suaves y no consolidados; cuando éstos se mezclan con agua se forma un lodo que debe ser retirado de la perforación ya que su acumulación afecta el golpe a manera que se genera una amortiguación y se disminuye la velocidad de penetración (tales condiciones determinan la frecuencia de extracción del lodo). Este lodo se forma cuando el material hace contacto con el agua, ya sea adicionándola o que la misma se encuentre de presente de forma natural en el agujero.

Los elementos que componen la herramienta de golpeo son el trépano, la barra de carga y la montera. A continuación se describe cada uno de ellos:

- Trépano: este elemento es el que, por medio de la percusión, realiza la rotura del material.

Es de acero forjado y las esquinas de corte están hechas de aleaciones duras. Dependiendo de la dimensión del pozo, la longitud del trépano puede ser, generalmente, de 1 a 3 metros, con un peso entre 100 y 500 kg en pozos pequeños y 500 a 12000 kg en pozos con grandes diámetros.

Un trépano está conformado por un ángulo de penetración, una parte trituradora y pasos de agua. Puede poseer diversas formas:

- Californiano: posee los hombros biselados, lo que evita que, cuando el trépano ascienda, se produzcan atascos.

Imagen No. 25: trépano californiano. Vista en perfil y sección transversal de la parte inferior.



Fuente: Miliarium (2006).

- De hombros rectos: su utilización permite el alisado de las paredes de la perforación y golpeo hacia arriba.

- Cruciforme: también conocido como trépano de estrella. Resulta ser eficiente en perforaciones donde se tienda a desviaciones y produce rendimientos buenos en cualquier tipo de material que presente el terreno.

Imagen No. 26: trépano cruciforme. Vista en perfil y sección transversal de la parte inferior.



Fuente: Miliarium (2006).

- Salomónico: este trépano es apropiado para utilizado en formaciones blandas y plásticas, que tienden a desprenderse ya que sus caras raspan y compactan las paredes de la perforación con el rozamiento que se produce en ellas.

Imagen No. 27: trépano salomónico. Vista en perfil.

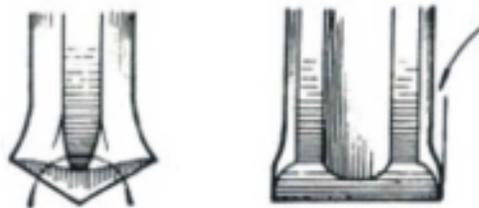


Fuente: Miliarium (2006).

De manera general, sin importar la morfología del trépano, este cuenta con un cuerpo cilíndrico con una rosca en forma de cono en la parte superior, en donde se conecta la barra de carga y también un cuadrado de llave para el control del roscado. El cuerpo restante posee un tallado que variarán según la morfología del trépano.

En la parte inferior del trépano se encuentra la boca de golpeo. Aquí es donde se produce el desgaste en el perímetro del trépano, por lo que define el diámetro que realmente se estará utilizando. Esta boca posee dos características que son el ángulo de despeje o ángulo del cincel y el ángulo cortante o de penetración.

Imagen No. 28: ángulo de penetración y ángulo de despeje de un trépano. Vista en perfil.



Fuente: Miliarium (2006).

Según el tipo de material que conforma el terreno donde se realizará el sondeo, la geometría del trépano variará. Cuando se perforará un terreno con rocas blandas, el trépano debe poseer una superficie de trituración grande y una sección del cuerpo pequeña, en donde se permita un paso grande de agua, ya que la función de los trépanos en este tipo de material es mezclar. Cuando se presenta lo contrario y se perforará un terreno con roca dura, el trépano cumple con la función de penetración y alisado. En este caso, cuando la roca es abrasiva (aristas agudas y forma irregular), el ángulo de penetración del trépano debe ser obtuso (mayor a 90°) y el ángulo de despeje debe ser amplio y en caso que la roca dura sea no abrasiva, el ángulo de penetración también debe ser

obtuso, consiguiendo una superficie de desgaste amplia y debe poseer un pequeño ángulo de despeje.

Según la dureza del terreno y de la profundidad de fondo de perforación, el trépano variará la altura de su caída. De manera general, cuando el material es roca dura, la altura de caída del trépano es corta entre 20-30 cm, mientras que en material no consolidado primero se trabaja con una altura de caída corta (en los primeros 5-10 metros) y posteriormente se va aumentando, llegando a los 60 cm.

En perforaciones donde se presenta roca consolidada, el trépano funciona como un desmoronador y existen diversos aspectos que determinan la velocidad y eficiencia de la perforación, tales como: desplazamiento de las herramientas, las rocas y su resistencia, peso del equipo, golpeteo por unidad de tiempo, el trépano y su diámetro, entre otros.

Cuando la perforación se da en formaciones suaves, según se avanza, el trépano es seguido por un ademe que evita socavamiento y cerramiento de la perforación. Mientras que en roca dura el trépano desmorona, en material no consolidado afloja y mezcla.

El ademe mencionado se hinca en la perforación y en la parte inferior se acopla una zapata de acero para la protección del tubo. Este hincado implica un procedimiento que consume tiempo, tanto como la misma perforación y la velocidad del mismo se verá afectada por el tipo de material, ya sea arcilla, grava, arena, mezcla, etc.

Conforme se realiza el hincado y la perforación, se va generando acumulación de material y agua (lodo) y se extrae utilizando una

cuchara, por lo que resulta ser un procedimiento de hincado, perforación y limpieza, así hasta alcanzar la profundidad requerida.

- Tijera: esta es una herramienta de destrabado, condición que puede presentarse cuando se perfora un material propenso a desprendimiento o quebradizo, lo que puede hacer que el trépano quede atrapado. Las tijeras permiten un golpeteo ascendente que ayuda con la liberación del trépano, por medio de jalones de cable (15-30 cm).
- Barra de carga: este elemento se encarga de tributar el peso adecuado para realizar la perforación y al mismo tiempo permite que ésta se mantenga vertical. Puede variar su peso y longitud entre los 400 y 1000 kg y de 3 a 5 metros, respectivamente.

La barra de carga va enroscada con el trépano y la montera, o en caso el equipo requiera de tijeras, también se enrosca con las mismas.

- Cabezal giratorio o montera: como su nombre lo indica, permite un movimiento giratorio. Une la barra de carga con el cable.
- Cable: este componente no presenta características rígidas sino, al contrario, son elásticas y dúctiles. El golpe del trépano resulta eficiente cuando el impacto se realiza cuando el cable se encuentra tenso, a manera de aprovechar la energía cinética de la herramienta.

Generalmente, las máquinas de perforación poseen un equipo de amortiguación, lo cual hace que el sistema sea elástico. Se coloca en la parte superior de la torre y va conectado con la polea principal. Por medio de ese sistema se logra amortiguar los efectos de los rebotes y así evitar que las grandes vibraciones puedan producir fatiga en los materiales del sistema de perforación.

El cable de perforación se somete a diversos efectos que requieren que sea altamente resistente a esfuerzos de tensión y al mismo tiempo debe ser flexible y resistente a la abrasión. Debe resistir las variadas fuerzas de tensión, el desgaste que produce el contacto constante con el agua y el lodo, el roce con las paredes de la perforación, el enrollado y desenrollado que produce fricción en las poleas. Los cables más utilizados son los de acero no galvanizado con núcleo de cáñamo o polivinilo, de arrollamiento cruzado y una resistencia a la tensión de 1500-1800 MPa.

Las bobinas o tambores para el cable, así como las poleas, deben tener un diámetro adecuado para que el uso del cable sea óptimo. Los cables más utilizados, generalmente, son de 5/8 y 3/4 de pulgada.

Una regla general para la elección de diámetros de polea y bobinas es la siguiente:

$$\text{diámetro de bobina} > 400D$$

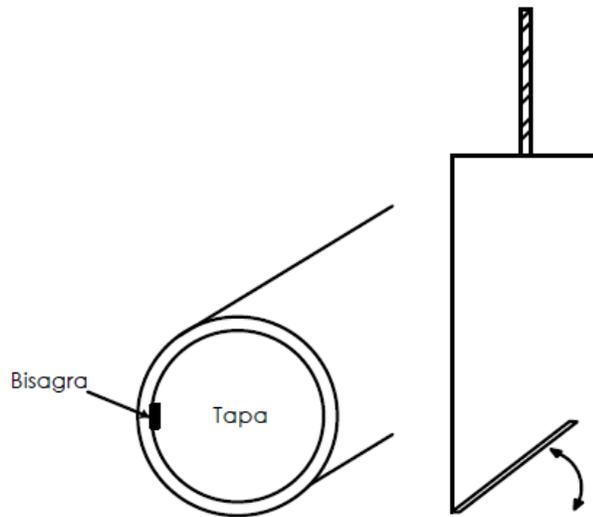
$$\text{diámetro de poleas} > 450D$$

Donde D es el diámetro de los alambres más gruesos del cable.

- Equipo auxiliar: dentro de este equipo se encuentran las cucharas o válvulas, herramientas utilizadas para la extracción de detritus, en caso no se posea un sistema de circulación que realice la acción. Estas cucharas están formadas por una porción de tubería que posee una articulación o bisagra que funciona como dispositivo de cierre.

Esta herramienta desciende por medio de un cabrestante auxiliar, pero antes se debe extraer el trépano. Mientras las cucharas van descendiendo a lo largo de la perforación, van abiertas y cuando inicia el ascenso, éstas se cierran para volver a abrirlas en el exterior y vaciarlas.

Imagen No. 29: válvula o cuchara de bisagra.



Fuente: elaboración propia (2016).

Otras herramientas auxiliares pueden ser las que se utilizan para el apriete que requieren los diversos elementos de equipo de perforación (movimientos de rosca). También se puede mencionar las herramientas de pesca, que son utilizadas para recuperar otras herramientas cuando se dan situaciones en donde se requiere el agarre de éstas.

4.4.1.3. Ventajas y desventajas del método de percusión

De manera general, el método de perforación a percusión será ideal para sondeos con mayores diámetros, pero la profundidad de los mismos dependerá del tipo de terreno con el que se trabajará. Por ejemplo, cuando la dureza del material es media o baja, la profundidad puede llegar hasta los 300 metros (980 pies). En cambio, cuando las formaciones son de material suelto, la percusión rinde adecuadamente en profundidades menores a 50 metros (165 pies).

Tabla No. 8: ventajas y desventajas del método de perforación de pozos por percusión.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- No se necesita de lodos para la estabilización de las paredes de la perforación y la naturaleza del material expuesto no se ve afectada.- Resulta ser un método adecuado para emplear en terrenos con formaciones que presentan muchas fisuras y características kársticas, ya que al emplear un método en donde se dependa fuertemente de fluidos, la estabilización de la perforación se ve afectada debido a la falta de circulación de los mismos.	<ul style="list-style-type: none">- Es un método lento en formaciones muy duras, por lo que el avance diario de perforación es bajo en comparación con otros métodos.- Cuando las formaciones son muy suaves, la eficiencia del método se ve afectada.- El agujero no posee forma circular lisa debido a que no se controla el giro de la barra.- Requiere de una constante limpieza de detritus para evitar que el gran volumen de material que se desmenuza se acumule en el fondo del agujero y se vea afectada la eficiencia del golpeteo. Si no se realiza dicha limpieza, el material acumulado y desmenuzado solamente se vuelve más fino y queda en el fondo.

Fuente: elaboración propia (2016).

4.4.2. Método de rotación

Este método está basado en el desgaste y rotura del material a partir del movimiento giratorio de un trépano o barreno y una continua circulación de un fluido de perforación o lavado, el cual remueve el material resultante según se va avanzando en la perforación.

Según el sentido en el cual el fluido de perforación circula, la rotación puede ser directa (convencional) o inversa. En la manera convencional, el fluido se bombea a través de la tubería de perforación hasta el fondo de la misma; en la parte inferior de la tubería se encuentra el trépano y unas boquillas por donde se expulsa el fluido, el cual posteriormente regresa de manera vertical a la superficie por medio del espacio anular que se encuentra alrededor de la tubería. Luego, en la superficie del terreno, el fluido extraído es conducido hacia pozas de lodo, de donde posteriormente se volverá a bombear para volver a ser utilizado.

4.4.2.1. Equipo de método de rotación convencional

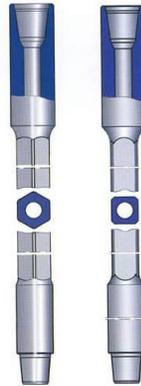
El equipo de perforación a rotación debe realizar dos operaciones de manera simultánea, logrando la abertura del agujero y al mismo tiempo, la circulación del fluido de perforación. A continuación se describe el equipo requerido para las perforaciones a rotación:

- Máquina para perforar: brinda el movimiento giratorio al trépano y permite ir avanzando en la perforación. Para que exista dicho movimiento se requiere de una mesa de rotación, la cual gira y al mismo tiempo hace que gire simultáneamente una varilla “Kelly”. La mesa de rotación se conforma por un anillo de forma circular y dentado, con un agujero cuadrado o hexagonal en el centro. A esta mesa se le transmite el movimiento por medio del motor de la maquinaria.

El vástago o varilla Kelly es un elemento de rotatorio de acero que se ubica en la parte más elevada de la columna de perforación. Generalmente, su longitud ronda entre los 12 y 16 metros y puede tener sección cuadrada o hexagonal. Este componente consigue un deslizamiento ascendente y descendente por medio de cojinetes guías ubicados a su alrededor y conectados a la mesa de rotación. Se logra entonces que el movimiento giratorio y descendente del vástago haga que el trépano descienda, gire y se realice la perforación. El vástago Kelly es hueco y por medio del mismo se inyecta el lodo o fluido de perforación, a través de un cabezal de inyección ubicado sobre él.

El vástago Kelly, junto con tramos de tubería de perforación y barras de peso, conforman la barra o columna de perforación. Estas barras de peso resultan siendo también tubería de perforación.

Imagen No. 30: vista en perfil de vástago Kelly de sección hexagonal y cuadrada.



Fuente: RUGAO YAOU CO., LTD. (2010).

Dicha tubería permite la circulación del fluido de perforación, por lo que es de suma importancia que se seleccione un diámetro adecuado que permita que se disminuyan pérdidas debido a la fricción y así trabajar con una tasa de circulación de fluido adecuada, lo que a su vez implica el requerimiento de potencia de la bomba. Los diámetros exteriores, generalmente rondan entre los 60 y 114 mm.

La máquina para perforar requiere de una torre o mástil resistente como parte del sostén del equipo. Suspendido de esta torre se encuentra un eslabón giratorio de cual suspende a su vez, el conjunto de elementos de perforación.

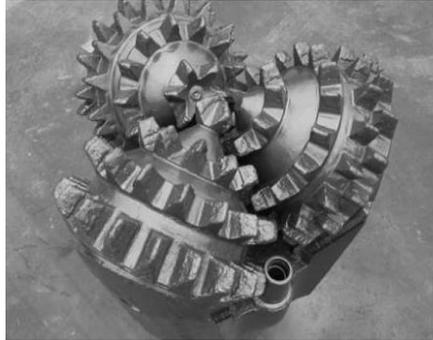
La torre variará su altura dependiendo de la profundidad de perforación que se requiera. Al mismo tiempo, aunado al mástil, la mesa rotatoria y el vástago Kelly, que permiten el avance y movimiento de la perforación, se requiere que la maquinaria sea capaz de permitir que se instalen tuberías y filtros y se permita el bombeo del fluido por toda la columna de perforación.

- Barreno o trépano: este componente se encarga del corte del material que conforma el terreno a perforar. Pueden presentar variación en cuanto a material y forma, según la naturaleza de la formación. Se ubica en la parte inferior de la barra de perforación. Entre los trépanos más utilizados se encuentran los siguientes:
 - De rodetes o rodillos dentados: se le denomina también trépano para roca ya que logra cortar y triturar el material y resulta efectivo para formaciones con naturaleza dura. Los rodetes tienen forma cónica y poseen la capacidad de girar, lo cual se realiza simultáneo al giro de la maquinaria de perforación. Este tipo de trépanos pueden ser de 2 rodetes, de 3 (tricono), de 4 (roller bits) y su selección, tanto en cantidad de rodetes como en forma, dependerá de la clase de formación a perforar.

Con la morfología de rodetes dentados, se conduce el fluido de perforación hacia las superficies que se van cortando, por medio de vías para conducir el mismo. De igual manera, se encarga del

enfriamiento y lubricación de los rodets, así como la limpieza de los dientes.

Imagen No. 31: tricono. Se observa el agujero de salida de fluido.



Fuente: Tube Technologies, Inc. (2011).

- De arrastre: se incluye el de cola de pez y el de tres aletas. Estos trépanos consisten en aletas cortas filosas y con la superficie endurecida. Debajo de dichas aletas se encuentran unas boquillas por donde salen chorros del fluido de perforación.

Este tipo de trépanos resultan eficientes cuando el material a perforar es blando y plástico, más no en roca dura y material gravoso.

Imagen No. 32: vista de perfil de trépano cola de pez. La vista de las cuchillas es sección transversal de la parte inferior.



Fuente: Freud (2016).

- De coronas de diamante: este trépano no posee componentes que giren, sino que el movimiento de giro es brindado por la máquina de perforación en sí, por lo que viene siendo un trépano de cortador fijo. Es utilizado cuando la formación a perforar es demasiado dura y abrasiva.

Imagen No. 33: trépano de corona de diamante.



Fuente: Dirección General de Industria del Gobierno de Canarias (2012).

4.4.2.2. Fluido o lodo de perforación

Dentro del método de rotación, el fluido de perforación juega un papel primordial y debe poseer las características adecuadas para que se cumpla una serie de aspectos relevantes, tales como: permitir la suspensión y extracción de los detritus, brindar protección y sellado a las paredes de la perforación y así prevenir que se socave, brindar enfriamiento y lubricación al trépano, compensar las presiones de las formaciones del subsuelo, optimización de velocidad de perforación y limpieza, entre otros.

Este fluido previene el socavamiento del agujero por medio de la presión hidrostática que actúa sobre sus paredes, la cual es efectiva cuando es mayor que la presión de las formaciones. Al mismo tiempo se debe controlar que la presión del fluido no sobrepase la presión de rotura de la roca, ya que si se excede dicho punto, se da una pérdida de circulación

debido a que el lodo fluye hacia dentro de la formación. El fluido de perforación debe poseer una capacidad de transporte que permita que los detritus puedan ser movilizados hacia la superficie del terreno y para ello se juega con la viscosidad y velocidad de flujo.

La presión hidrostática del fluido de perforación, en un punto de referencia de interés, viene dado por la siguiente ecuación:

$$P.H = \frac{Prof * \rho}{10} \quad \text{Ecuación No. 41}$$

Donde:

Prof = profundidad de la columna de fluido de perforación [m].

ρ = densidad del fluido de perforación $\left[\frac{gr}{cm^3}\right]$.

P.H = presión hidrostática del fluido de perforación $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$.

Los fluidos de perforación están compuestos por una parte continua (líquida) y otra discontinua (sólida). Dependiendo de dichas partes, el fluido puede manejarse y modificar así su densidad y viscosidad. Generalmente están formados por agua (fluido acuoso) y arcillas (de manera sencilla), aunque se puede emplear arcillas comerciales como la bentonita (arcilla de grano muy fino que no pierde estabilidad y consistencia cuando se mezcla con agua).

Existen también fluidos con parte continua no acuosa, los cuales emplean en lugar de agua, materiales como aceites minerales y ésteres, que permiten un mejor control en las velocidades de perforación y aspectos de lubricación.

Las características del subsuelo demandarán el peso del fluido, así como su viscosidad. Cuando se presentan situaciones donde se inicia socavación, el fluido puede ser modificado y se le agrega bentonita, lo cual aumenta el peso del fluido y evita la tendencia al desmoronamiento. Cuando se aumenta el peso del fluido, éste es más espeso y por lo tanto, más viscoso, lo cual puede presentar un inconveniente para el bombeo. En este caso, se puede agregar otros aditivos especiales que brindan propiedades específicas al fluido.

El control de la viscosidad y la velocidad del fluido es importante para mantener los detritus suspendidos ya que cuando dichos parámetros aumentan, la capacidad de suspensión también. Cuando los detritus son transportados hacia la superficie del terreno es necesario que se separen del fluido de perforación y esto se realiza por medio de fosos o pozos de lodo, llamados también fosas de sedimentación. El fluido es recirculado y vuelto a ser utilizado para la perforación del pozo.

Mientras se da la circulación del fluido en la perforación, éste experimenta un desplazamiento en los poros del material de las paredes de la perforación hasta un punto adecuado en donde se genere un sellado de las mismas. Este sellado debe formarse a manera que el desplazamiento que sufra el fluido no sea demasiado invasivo y extenso en el material de las paredes. Posteriormente, en la etapa conocida como desarrollo del pozo, este el sellado es eliminado.

El sellado implica que en las paredes de la perforación se da un depósito de partículas del fluido y éstas expulsarán agua, lo cual se relaciona con el grosor que tendrá dicho sellado. Dependiendo de la clase de arcilla que se utilice para el fluido, la cantidad de agua expulsada por las partículas variará; cuando la expulsión se da de manera rápida, el sellado o filtro será

grueso, lo cual resulta negativo para el movimiento de la tubería de perforación.

De manera general, el fluido de perforación debe poseer ciertas características para poder efectuar adecuadamente su papel en la perforación por rotación. Se requiere un fluido que no permita socavamiento, por lo que no debe ser liviano; también se requiere un fluido que no afecte el bombeo por ser muy espeso. Por lo tanto, algunas de las propiedades del fluido deben ser controladas in situ y se realizan pruebas en la obra. Entre algunas de las características se puede mencionar la viscosidad, densidad, propiedades de gel (consistencia gelatinosa), propiedades filtrantes y cuánta arena se empleará.

Entre las características que pueden ser exceptuadas de ser ensayadas en obra está la consistencia gelatinosa; ésta se logra controlar y garantizar cuando se emplea una eficiente bentonita como parte mayoritaria del volumen de arcilla del fluido de perforación. Al mismo tiempo, pruebas de campo para las propiedades filtrantes del fluido también pueden ser omitidas al ser utilizada una bentonita de buena calidad.

Por otro lado, la viscosidad, densidad y el volumen de arena resultan ser propiedades que requieren pruebas de campo. La densidad es determinada por medio de una balanza que posee un recipiente en uno de sus lados y un brazo por el cual se desliza una pieza de peso. El recipiente posee un volumen específico y es llenado con fluido; cuando se consigue un equilibrio o balance en dicho recipiente debido al deslizamiento de la pieza de peso, la densidad es determinada. Esta densidad es indicada por el brazo de la balanza, el cual está calibrado en unidades de peso por volumen. Según historiales de perforación y actuales sondeos, para la mayoría de perforaciones resulta efectivo un fluido con densidad aproximada de 1.1 kg/l.

Para el ensayo in situ de la viscosidad se emplea un embudo Marsh, el cual no indica una magnitud real de la viscosidad del fluido pero indica valores que logran ser útiles para el control de la misma. Este embudo es cónico con un tubo de descarga de diámetro pequeño. El embudo Marsh es llenado hasta un determinado volumen y luego se retira el dedo para que el lodo fluya. El flujo por gravedad que experimenta el lodo es observado y se toma el tiempo que tarda para que un cuarto del volumen sea descargado. El tiempo obtenido debe expresarse en segundos y se conoce como viscosidad por embudo Marsh. Cuando el fluido posee una adecuada densidad (1.1kg/l), la viscosidad por embudo Marsh debe ser entre 30 y 40 segundos.

En cuanto a la cantidad de arena que contenga el fluido de perforación, se expresará en porcentaje de volumen. Para conocer dicho porcentaje se debe pasar un determinado volumen de fluido de perforación lavado con agua limpia por un tamiz No. 200, el cual retendrá partículas que serán dispuestas en un recipiente graduado, una probeta por ejemplo. El volumen que indique dicho recipiente se puede expresar como un porcentaje del volumen total del fluido utilizado como modelo. Cuando un fluido posee viscosidad y densidad adecuadas, tendrá un desempeño grato con un 5% de arena.

4.4.2.3. Ventajas y desventajas de la rotación convencional

Tabla No. 9: ventajas y desventajas del método de perforación rotativo convencional.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se logran perforaciones profundas con velocidad de progreso elevada. - Se necesita menos cantidad de tubería auxiliar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor costo comparado con el método de percusión. - Los diámetros no son grandes. - Facilidad a perder

<ul style="list-style-type: none"> - Método adecuado para formaciones blandas. 	<ul style="list-style-type: none"> verticalidad en la perforación. - Producir un efecto impermeabilizante en las paredes de la perforación, lo cual resulta perjudicial para la captación de agua.
---	--

Fuente: elaboración propia (2016).

4.4.2.4. Método de rotación invertida

En este método el equipo que se utiliza es parecido al utilizado en la rotación convencional pero es más grande. El funcionamiento del método de rotación invertida implica una circulación invertida del fluido de perforación: el fluido se desplaza ascendentemente a través de la tubería por medio de la aspiración de la bomba, mientras que retornará a la perforación por el espacio anular alrededor de la tubería y debido a la gravedad, no por bombeo. Cuando el fluido va descendiendo va atrapando detritus y luego son llevados a la superficie por medio de la aspiración mencionada. Al mismo tiempo, el desplazamiento ascendente dentro de la tubería atrapa también detritus que se han introducido por los agujeros del trépano. El fluido bombeado es dispuesto en fosas de sedimentación.

Para el caso de la rotación invertida, el fluido de perforación es menos elaborado que el de rotación convencional y resulta ser más un agua lodosa, la cual va recogiendo material arcilloso y limoso de las paredes de la perforación mientras realiza su recorrido descendente por el espacio anular. Para estos casos no se requiere aumento de la viscosidad del fluido, por lo que regularmente no se agrega bentonita.

Otra diferencia entre la rotación invertida y la convencional, es que con la invertida no se tiende a generar una capa de sellado en las paredes de la

perforación, por la diferencia en la naturaleza del fluido de perforación. Cuando se da la etapa de desarrollo del pozo en la rotación invertida, si se diera el caso de que se formase un sellado con el fluido, éste sería sencillo de eliminar ya que es ligero y no gelatinoso.

Entre las ventajas y desventajas del empleo del método de rotación invertida se pueden mencionar las siguientes:

Tabla No. 10: ventajas y desventajas del método de perforación rotativo invertido.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Favorable para formaciones de limo y arcilla. - Puede utilizarse en formaciones de arcilla suave o bien, terrenos con ausencia de la misma. - Se puede trabajar con diámetros mayores a 600 mm. - Comparado con el método de rotación convencional, el método invertido tiene a impermeabilizar menos las formaciones acuíferas y erosiona menos las paredes del sondeo por la baja velocidad de descenso del fluido. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduce la eficiencia en terrenos duros. - No se puede trabajar con diámetros menores a los 300 mm. - La potencia de la bomba de aspiración limita la profundidad a alcanzarse.

Fuente: elaboración propia (2016).

4.4.2.5. Método de rotación con aire comprimido

En este método, el lodo de perforación no es líquido; aire comprimido funciona como fluido, circula a presión a través de la tubería de perforación y sale por los orificios del trépano para posteriormente ascender por el espacio anular alrededor de la tubería.

La presión y velocidad que el aire lleva hace que los detritus puedan ser desplazados hacia la superficie. Al mismo tiempo es capaz de introducirse en las grietas de las rocas y expulsar fragmentos de material.

En este método de rotación se emplean compresores que se ubican junto con el resto de maquinaria en la superficie del terreno. El aire fluye con presión gracias a los compresores, es inyectado en el cabezal de rotación y se desplaza a través de la tubería de perforación. Para que el flujo de aire cumpla con las funciones de barrido y extracción de detritus, es necesario que su velocidad de ascenso sea adecuada, así como el caudal que se emplee en el sistema.

La velocidad de ascenso que el aire debe poseer será determinada según la densidad de las formaciones del terreno a perforar, aunado al tamaño de las partículas. Atendiendo este último aspecto, resulta complicado trabajar con datos precisos del tamaño promedio de las partículas del subsuelo, por lo que estudios y aplicaciones llevadas a cabo, conforme ha transcurrido el tiempo, han indicado las velocidades de aire que se recomiendan según el tipo de roca (blandas, duras, medias). Sin los datos que las experiencias han dejado, sería necesario utilizar fórmulas empíricas que involucren la densidad del material a perforar, así como el diámetro promedio de las partículas involucradas. Aunque dichas fórmulas existen, resulta conveniente utilizar las velocidades recomendadas según el tipo de roca.

Tabla No. 11: velocidades de aire recomendadas según el tipo de roca.

Roca	Velocidad Mínima	Velocidad Máxima
Dura	1.8 m/min	2.4 m/min
Media	1.5 m/min	2.1m/min
Blanda	1.2 m/min	1.8 m/min

Fuente: Biblioses (2006).

En cuanto al caudal de aire necesario, este se calcula de la siguiente manera:

$$Q = V * A$$

Ecuación No. 42

Donde:

$$Q = \text{caudal de aire de barrido} \left[\frac{m^3}{s} \right].$$

$$V = \text{velocidad de flujo de aire} \left[\frac{m}{s} \right].$$

$$A = \text{área de sección transversal de espacio anular} [m^2].$$

Según la experiencia operacional, la diferencia entre el diámetro de las paredes de la perforación $[\phi_p]$ y el diámetro exterior de la tubería $[D]$ (espacio anular) pueden ser las siguientes:

Tabla No. 12: recomendación de diferencia de diámetros para cálculo de espacio anular.

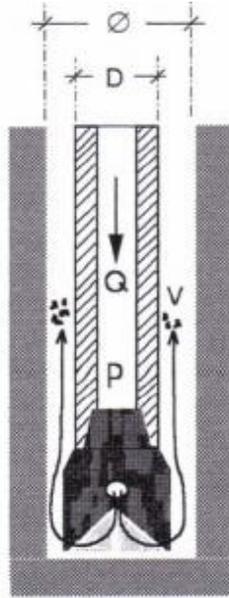
Roca	$[\phi_p - D]$
Dura	38 mm
Media	51 mm
Blanda	76 mm

Fuente: Biblioses (2006).

En la siguiente imagen se muestra una representación del movimiento del aire comprimido, en donde el caudal del mismo desciende por el interior de la tubería de perforación y posteriormente asciende por el espacio anular, a

determinada velocidad. Al mismo tiempo, el caudal de aire llega al tricono con un valor de presión P:

Imagen No. 34: movimiento de aire comprimido en la perforación (vista en perfil).



Fuente: Biblioses (2006).

4.4.3. Método de rotopercusión

Como su nombre lo indica, es un método que une los métodos de percusión y rotación. Mediante su utilización se logra romper y fragmentar el material por medio de la percusión y al mismo tiempo se realiza rotación simultánea para que el golpe que se dé posea una mejor distribución en la superficie de fondo. El fluido empleado para la rotación es aire comprimido y se encarga de extraer los detritus que se producen. Para que esta limpieza sea mejor, se puede utilizar también agua y agentes espumantes (estos agentes producen una espuma densa que mejora el arrastre de detritus y ayuda con la lubricación del equipo).

Pueden emplearse dos maneras de rotopercusión, una con martillo fuera de la perforación (en la cabeza, THD por sus siglas en inglés que significan top

hammer drilling) y otra con martillo en el fondo. Cuando el martillo está en la cabeza, la rotación y percusión son producidas fuera de la tubería de perforación y por medio de ésta se da la transmisión de los movimientos hacia la boca (parte percutora y de corte). Por medio de esta tubería el aire comprimido se mueve descendentemente a presión y sale por los agujeros de la boca para subir por el espacio anular y arrastrar los detritus. Usualmente la rotopercusión de cabeza se utiliza para perforar material duro y se alcanzan profundidades aproximadas no mayores a 100 m (328 ft).

La manera más utilizada es la de martillo de fondo (DTH por sus siglas en ingles que significan down the hole) la cual se diferencia del método anterior en cuanto a la ubicación del martillo que imprime el movimiento de percusión. En este caso, el martillo se ubica en la parte inferior de la tubería de perforación, lo que hace que la percusión sea directa sobre la boca y exista menos pérdida de energía en la transmisión del movimiento. La rotación, producida por un motor hidráulico o neumático, se realiza fuera de la perforación y es transmitida por medio de la tubería. La circulación del aire se realiza de la misma manera que con el martillo de cabeza.

Para la perforación a rotopercusión se utiliza maquinaria similar a la utilizada en el método rotativo, excepto que en la rotopercusión se utiliza una boca, que vendría siendo como un trépano y un martillo para imprimir la percusión. Éste último va unido a la boca, a la cual se le transmite el movimiento de golpeteo.

Un martillo DTH es un cilindro que contiene un pistón que se desplaza dentro de él y su accionamiento se da debido a la presión del aire comprimido, lo cual produce el movimiento de golpeteo. La boca del equipo de rotopercusión se ubica en el extremo inferior de dicho martillo y variará dependiendo del tipo de material a perforar. Por ejemplo, si el terreno es blando o normal, se puede emplear una boca en forma de cruz, la cual se asemeja a un trépano como el utilizado en la percusión convencional. Por otro lado, cuando el terreno es duro,

se emplea una boca de botón. Estas bocas de botón generalmente son construidas de acero aleado al carbono o de cromo de molibdeno y los dientes de la boca de carburo de tungsteno. Estos dientes pueden tener forma de bala o forma redondeada y la superficie de la boca puede ser cóncava, plana, en forma de domo (convexa) o domo doble, según la dureza de la roca.

Imagen No. 35: martillo DTH y bocas de botón.



Fuente: Yepes, V. (2013).

El avance de la perforación quedará determinado por factores importantes como la presión de aire, la velocidad de rotación y el empuje sobre el martillo. Es de suma importancia la presión del aire y el área de trabajo del pistón ya que de ellas depende la potencia con la que se trabaja, la cual puede definirse como energía de impacto por frecuencia de golpes.

4.4.3.1. Ventajas y desventajas de la rotopercusión con martillo de fondo

Tabla No. 13: ventajas y desventajas del método de perforación rotopercutivo.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se logra buena verticalidad y pocas desviaciones de la boca de perforación. - Se requiere de una velocidad de rotación menor a la utilizada en el método convencional de rotación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando hay presencia de mucha agua se puede generar problemas. - La utilización del martillo limita la variedad de diámetros posibles. - No es recomendada para

<ul style="list-style-type: none"> - Se logra una velocidad de penetración constante. - Se necesita menos energía de impacto y se logra aumentar la frecuencia de golpeteo (comparado con la percusión convencional). - No es necesario utilizar barras de carga para ejercer peso sobre la boca de perforación. - Efectiva en perforaciones en terrenos duros. 	<p>terrenos con material no consolidado.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Compresores de aire consumen gran cantidad de energía.
---	---

Fuente: elaboración propia (2016).

4.4.4. Método de voladura

Existen situaciones en donde una perforación no puede avanzar debido a que se encuentra material como cantos rodados, los cuales pueden variar de 64 a 250 mm, o se encuentra material aún más grande. Al momento que se producen obstrucciones, se impide que el equipo de perforación avance, por lo que se recurre a la utilización de explosivos para lograr la fragmentación del material y así proseguir con la perforación. Por lo tanto, el método de voladura es un sistema que se utiliza cuando el terreno presenta propiedades que impiden la extracción de material por medios mecánicos.

El método de voladura consta de dos períodos: la perforación y posteriormente la voladura en sí. Es un método bifásico con etapas de ejecución independientes entre sí pero en donde el resultado de una determina el resultado de la otra. El ciclo principal del sistema se da de la siguiente manera:

1. Perforación.
2. Voladura.
3. Acarreo de material.

La manera a realizar la voladura dependerá del tipo de método de perforación que se emplee:

- Método de percusión: la carga explosiva se ubica en el fondo por medio de una tubería de 20 cm de diámetro que se coloca dentro del ademe más largo. Se debe tratar que la tubería que se inserta pueda penetrar al menos 3 metros del material a explotar. Cuando la carga ya está en el fondo, ésta se debe cubrir con una capa de arena (1 metro aproximado) y el agujero puede rellenarse con agua para evitar movimientos ascendentes.

La carga es detonada eléctricamente por medio de cables que posteriormente deben extraerse del agujero. Esta carga variará su cantidad según las propiedades del material a explotar, tamaño de las partículas, diámetro del pozo, entre otros.

- Método de rotación: en este caso también se instala una tubería para preparar la carga explosiva. Dentro de esta tubería se coloca un trépano que consiga perforar el material que se encuentre debajo de la misma. El agujero que se obtenga debe ser llenado con un fluido muy viscoso (lo que permita la bomba) y se debe tratar de alcanzar 3 metros de columna de fluido. La perforación continúa, en presencia del fluido, y se debe penetrar el material con una rotación lenta, añadiendo peso al trépano. Cuando se llegue al punto necesario, la carga explosiva se coloca y detona de igual manera que para el método de percusión.

4.5. Terminación de pozos

Posterior a la perforación del pozo, es necesario que se apliquen ciertos procedimientos que garanticen el correcto funcionamiento de la obra, en donde exista estabilidad en las paredes del pozo y al mismo tiempo se obtenga buen rendimiento en donde el agua que se extraiga posea una calidad adecuada.

Dentro de término terminación de pozos o sondeos se incluyen los procesos de entubación o instalación de tubería de revestimiento o ademe (casing), así como la colocación de la rejilla, el empaque de grava y procesos de cementación.

4.5.1. Tubería de revestimiento (casing)

Por medio de un proceso de entubación se lleva a cabo la instalación de una tubería que reviste las paredes de la perforación, brindando aislamiento y al mismo tiempo protección (también es conocida como ademe). Esta protección es necesaria para que no se presenten derrumbes de las paredes y no se vea afectado el funcionamiento de la obra. Al mismo tiempo, con el aislamiento, se evitan pérdidas de circulación y se bloquean regiones donde exista material con plasticidad y propiedades de expansión que puedan ser peligrosas. Aunado a lo anterior, el revestir con tubería las paredes de la perforación evita que se dé contaminación debido a aguas superficiales y se facilita la instalación de equipo de producción y de superficie. Por medio de esta tubería el flujo de agua se extraerá hacia la superficie para poder ser aprovechada.

Cuando se realiza una entubación, ésta puede ser de varios tipos: puede ser definitiva cuando se instala al finalizar la perforación y queda permanente en la misma; puede ser provisional cuando se necesita aislamiento de acuíferos para análisis de sus propias características; o puede ser auxiliar cuando la tubería se instala al momento que se lleva a cabo la perforación y se retira cuando finaliza, aunque puede darse casos en donde también queda como tubería final. Esta

tubería auxiliar protege la sarta de perforación al momento de realizar el sondeo.

La tubería de revestimiento que vaya a ser utilizada debe ser seleccionada adecuadamente y debe soportar las cargas a las cuales estará sometida, tanto de las paredes de las formaciones geológicas como de las cargas producidas al momento de la operación del pozo. Para ello es necesario que se contemplen diversos factores desde el momento de la planificación y diseño de la obra de captación.

La tubería que se utiliza comúnmente es la que se fabrica de acero pero pueden existir casos en donde se emplee PVC especial para pozos, ya que la naturaleza química del agua pueda corroer fácilmente la tubería de acero. La resistencia al colapso de las tuberías de revestimiento de pozos se determina según su diámetro exterior, espesor de sus paredes y su elipticidad (desviación de la geometría circular de la tubería para formar una elipse). En el Anexo J se presenta una tabla con valores de resistencia al colapso, compresión axial y tensión para tuberías de acero, con variaciones en diámetros y espesores de paredes.

Existen normas AWWA (American Water Works Association) que indican especificaciones de resistencia para la tubería de revestimiento para pozos de agua. Para perforaciones de pozos de diversas finalidades, internacionalmente, existen tuberías elaboradas por varias industrias, tal como la API (American Petroleum Institute), quien las produce con variadas propiedades físicas y de resistencia, bajo estándares de control de calidad. API produce dos tipos de tubería que pueden ser utilizadas como revestimiento de paredes de pozos: clase A y clase B, en donde la A posee una resistencia a la tensión de 3360 kg/cm² (47790 psi) y la B 4200 kg/cm² (59738 psi). Esta tubería posee elevada resistencia debido a que su finalidad primordial es la extracción de petróleo pero

existen empresas internacionales que la utilizan debido a los estrictos diseños con los cuales trabajan.

Es necesario que la superficie de la tubería de revestimiento sea lisa, o lo más que se pueda, interior y externamente. Esto evita atoramientos de herramientas y al mismo tiempo se reduce la fricción entre las paredes de la perforación y la tubería.

El diámetro que posea la tubería dependerá de factores como el diámetro de la bomba para extracción del agua y el espesor de la pared dependerá de la resistencia necesaria según los esfuerzos a los cuales quedará sometida pero generalmente se trabaja con espesores entre 5 y 8 mm.

La tubería de revestimiento posee en su extremo inferior una zapata que sirve como guía de la tubería hacia el fondo del pozo al momento de su instalación y al mismo tiempo protege el extremo mencionado.

Generalmente, la tubería de revestimiento se instala en secciones de 20 pies, por lo que se requiere de conexiones entre una y otra sección para cubrir la profundidad de la perforación. Dichas conexiones deben ser herméticas y resistentes a los esfuerzos a los cuales estarán sometidas. Las conexiones pueden ser de los siguientes tipos:

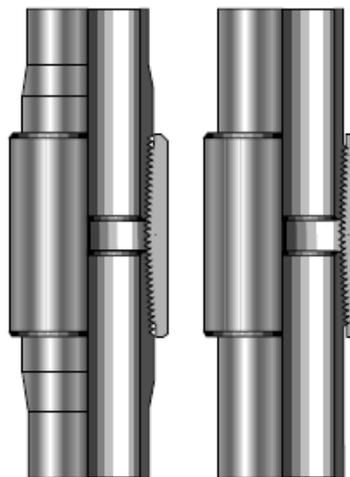
- Acopladas: la conexión se da por medio de un cople, elemento que une dos extremos de tubería por medio de rosca. Los extremos de las tuberías poseen roscas externas mientras que el cople las posee internamente. Un extremo de la tubería se une al cople en planta mientras que la otra tubería se une al momento de su instalación en campo.

Imagen No. 36: conexión acoplada.



Fuente: Del Castillo F. y Luna, O. (2009).

Imagen No. 37: conexiones acopladas con y sin aumento de diámetro de tubería.



Fuente: Enzo (2013).

- Integrales: en este tipo de conexión, el roscado se realiza en los extremos de las tuberías a unir, en donde un extremo posee rosca interna y el otro extremo rosca externa. No se necesita cople.

Imagen No. 38: conexión integral de tubería.



Fuente: Direct Industry (2015).

- Extremos cuadrados y biselados: en este caso, las tuberías poseen extremos biselados que se unen y luego son soldados. Este tipo de unión presenta la ventaja que la tubería queda lisa exteriormente y así se reduce la tendencia de crearse puentes en el empaque de grava. Entre las desventajas de este tipo de conexión está que resulta complicada la soldadura en posición vertical y que resultan situaciones dificultosas cuando se necesita realizar re ensambles de la tubería.

Imagen No. 39: conexión cuadrada y biselada.



Fuente: Roscoe Moss Company (1990).

- Campana - espiga: este tipo de conexión, aunque resulte económica, presenta la desventaja que requiere mayor tiempo para la instalación debido a la dificultad para alinear las secciones de tubería. También se utiliza soldadura para fijar la unión.

Imagen No. 40: conexión campana-espiga.



Fuente: Roscoe Moss Company (1990).

4.5.1.1. Longitud de la tubería de revestimiento

La longitud de la tubería queda determinada según el nivel estático del agua, así como la reducción considerada del mismo y condiciones de la bomba de extracción de agua. Para calcular la longitud de la tubería, puede utilizarse la siguiente fórmula:

$$L = H + R + FS + RB$$

Ecuación No. 43

Donde:

L = longitud de la tubería de revestimiento [m].

H = profundidad del nivel estático del agua [m].

R = reducción del nivel estático [m].

FS = factor de seguridad(extras).

RB = requerimientos de la bomba [m].

La reducción del nivel estático es considerada en el diseño y es en función de los requerimientos de descarga de agua y la transmisividad del acuífero. Se toma en cuenta un factor de seguridad en caso puedan existir variaciones en la transmisividad original, por pérdidas de energía causadas

por la circulación de agua a través del empaque de grava y por medio de la rejilla, por posibles obstrucciones que puedan darse en el pozo según el clima, entre otros.

En cuanto a los requerimientos de la bomba, se debe sumar la sumersión de la entrada del impulsor, más la longitud de la bomba por debajo de ese punto, más un espacio libre por debajo de ese punto, lo cual será recomendado según la marca de la bomba.

4.5.1.2. Diámetro de la tubería de revestimiento

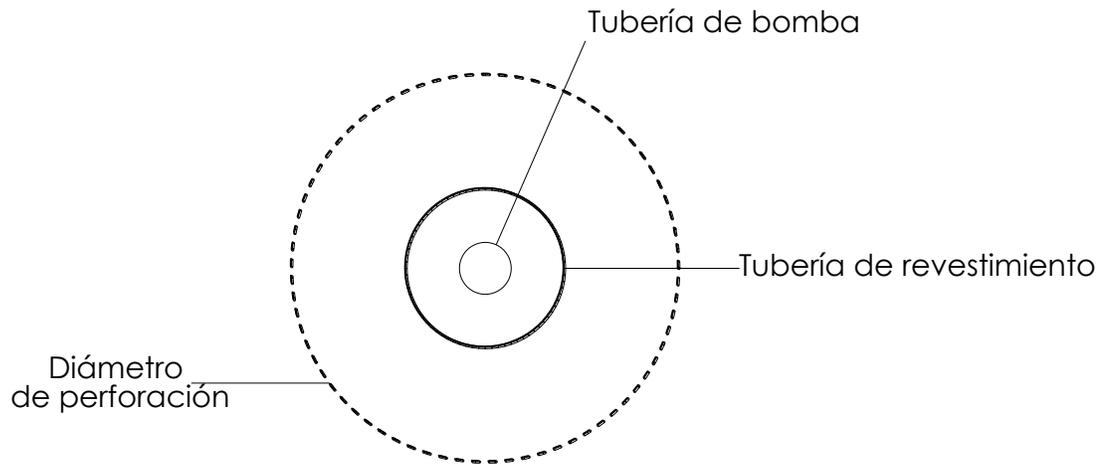
El diámetro de la tubería de revestimiento depende del diámetro de la bomba. La siguiente tabla puede utilizarse como referencia:

Tabla No. 14: diámetros óptimos y mínimos de casing según diámetro de bomba.

Producción del pozo	Diámetro nominal de la bomba		Diámetro óptimo de la tubería de revestimiento		Diámetro mínimo de la tubería de revestimiento	
	m ³ /día	pulg	mm	pulg	mm	pulg
Menos que 545	4	102	6 (interno)	152 (interno)	5 (interno)	127 (interno)
409-954	5	127	8 (interno)	203 (interno)	6 (interno)	152 (interno)
818-1910	6	152	10 (interno)	254 (interno)	8 (interno)	203 (interno)
1640-3820	8	203	12 (interno)	305 (interno)	10 (interno)	245 (interno)
2730-5450	10	254	14 (externo)	356 (externo)	12 (interno)	305 (interno)
4360-9810	12	305	16 (externo)	406 (externo)	14 (externo)	356 (externo)
6540-16400	14	356	20 (externo)	508 (externo)	16 (externo)	406 (externo)
10900-20700	16	406	24 (externo)	610 (externo)	20 (externo)	508 (externo)
16400-32700	18	508	30 (externo)	762 (externo)	24 (externo)	610 (externo)

Fuente: House of Water and Environment (2008).

Imagen No. 41: representación de diámetro de perforación, tubería de revestimiento y tubería de bomba sumergible (vista en planta).



Fuente: elaboración propia (2016).

4.5.2. Rejilla

Las rejillas son elementos metálicos filtrantes que se unen a la tubería de revestimiento para completar la columna de conducto del pozo. Son el componente de admisión del agua del acuífero, permitiendo que se dé un flujo libre de la misma hacia la tubería de conducción del pozo.

Aparte de permitir dicha admisión de flujo de agua, la rejilla sirve como elemento de contención del empaque gravoso a lo largo de la longitud de la misma y, como aspecto muy relevante, evita que se de ingreso a materiales indeseados.

Para que el caudal de agua que brinde el acuífero pueda ser aprovechado eficientemente, se debe seleccionar una rejilla que cumpla con las características necesarias para un buen rendimiento. Entra en juego la geometría y tamaño de las aberturas (lo cual influye directamente en el porcentaje de área abierta), el diámetro y longitud, el material del cual estará elaborada, entre otros aspectos.

4.5.2.1. Longitud y ubicación de la rejilla

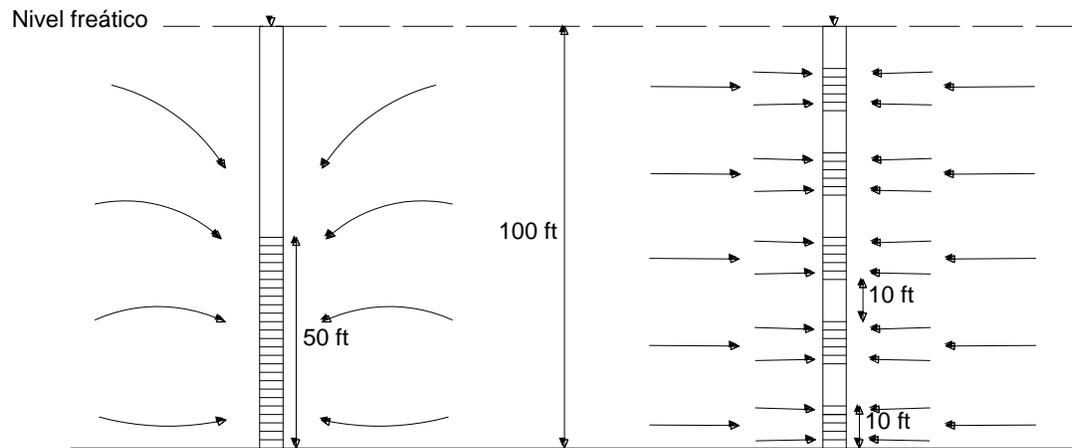
Son varios los criterios para seleccionar la longitud óptima de la rejilla: espesor del acuífero, reducción del nivel estático del agua, estratificación del material dentro del acuífero, confinamiento o no en el acuífero.

- Acuífero homogéneo confinado: para este caso, la longitud de la rejilla puede variar según el espesor del acuífero. Cuando es menor que 8 metros, se debe enrejillar 70% del acuífero; cuando el espesor se encuentra entre 8 y 16 metros, 75% del acuífero; cuando el espesor es mayor a 16 m, 80% del acuífero.

Generalmente no es conveniente colocar la rejilla en todo el espesor del acuífero debido a que se elevan los costos y al mismo tiempo la velocidad de entrada del agua es muy lenta. Para mejores resultados se divide la rejilla en varias secciones separadas se por medio de tubería de revestimiento y así se logra mejorar el rendimiento del pozo, ya que se minimiza la convergencia de las líneas de flujo de agua.

La ubicación de las secciones enrejilladas se decide según los registros eléctricos y el perfil litológico construido, en las regiones que presenten mayor permeabilidad.

Imagen No. 42: distribución de rejilla por secciones en un mismo espesor de acuífero. La longitud total de la rejilla es la misma en ambos casos pero el flujo convergente de agua se minimiza en la rejilla por secciones.



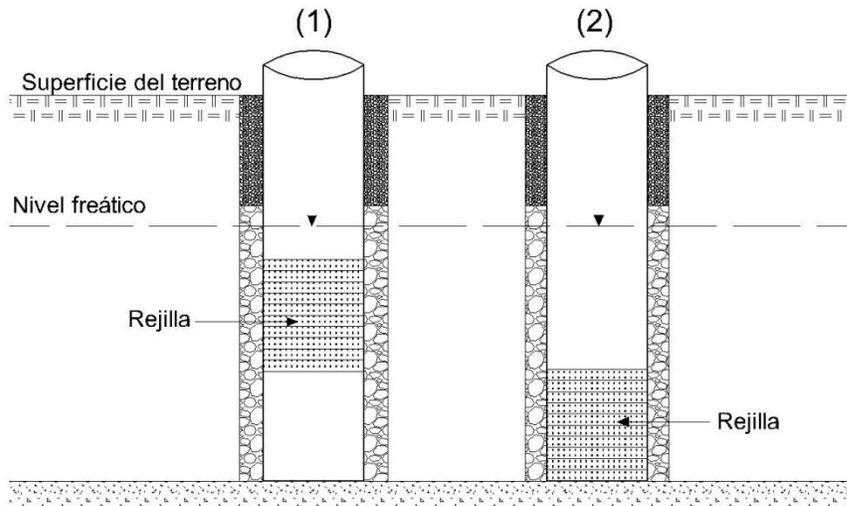
Fuente: adaptación de House of Water and Environment (2008).

- Acuífero heterogéneo confinado: es un acuífero estratificado. En este caso, se debe colocar rejilla en un 80%-90% de los estratos más permeables.
- Acuífero homogéneo no confinado: para este tipo de acuíferos resulta óptimo colocar la rejilla en 1/3 de la zona saturada, desde el fondo de la misma.

En general, es incorrecto colocar la rejilla a manera que la parte inferior del acuífero quede carente de la misma ya que se reduce el aprovechamiento del caudal potencial del acuífero debido a que el tramo sin rejilla no se logrará desarrollar (imagen 43 (1)). También es incorrecto dejar sin rejilla más del 50% del espesor superior del acuífero ya que se aumenta el descenso del nivel del agua en el mismo (imagen 43 (2)). La disposición de la rejilla, como la mostrada en la segunda manera en la Imagen No. 42, resulta eficiente para ser aplicada en acuíferos con espesores grandes donde se pudiese presentar fuerzas laterales elevadas que necesitan ser

resistidas; la tubería de revestimiento colocada entre las secciones de rejilla permite el aumento de la consistencia de la columna.

Imagen No. 43: ubicaciones incorrectas de rejillas.



Fuente: adaptación de Grupo de Investigación de Recursos Hídricos de Universidad Jaime I de Castellón (2005).

4.5.2.2. Tipos de rejilla

Para seleccionar el tipo de rejilla a utilizar deben considerarse varios aspectos como la presencia o no de empaque de grava, material a utilizar por la resistencia a la corrosión, tamaño de la apertura de la rejilla, propiedades físicas e hidráulicas, entre otros.

Si el pozo posee empaque de grava, los principales tipos de rejilla que pueden ser utilizados son los siguientes:

- De ranuras verticales: esta rejilla posee ranuras que son perforadas por medio de cortadores axiales (de forma mecanizada). Presentan la desventaja que la distribución entre las ranuras es amplia y por lo tanto no se posee gran área abierta para que el flujo de agua ingrese. Aunado a eso, se puede producir obstrucción debido a que las

aberturas pueden quedar paralelas a las superficies de la grava y mientras ésta sea más gruesa, la obstrucción puede ser mayor.

Presentan un 2.5% de área abierta.

Imagen No. 44: rejilla ranurada verticalmente.



Fuente: Roscoe Moss Company (1990).

- De ranuras horizontales: poseen características similares a la ranurada verticalmente pero en este caso, el material del empaque de grava se estabiliza con mayor facilidad alrededor de las ranuras.
- De ranuras puente: con esta morfología se logra una ranura vertical con dos orificios paralelos entre sí. Con este tipo de rejilla se logra que se aumente el área abierta para que ingrese el agua pero se posee la desventaja que posee una baja resistencia al colapso debido a las numerosas ranuras verticales. El tamaño de las ranuras debe ser pequeño comparado con el de la grava, para así evitar la obstrucción por la orientación vertical de las ranuras. Presentan un 11% de área abierta.

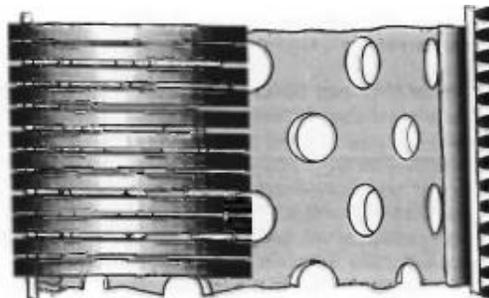
Imagen No. 45: rejilla con ranuras puente.



Fuente: Roscoe Moss Company (1990).

- Con base de tubería: en este caso, se posee una tubería perforada a la cual se le enrolla un cable de recubrimiento. Se utiliza para pozos profundos que demandan altas resistencias al colapso. Generalmente el material de la tubería base es acero al carbono mientras que el cable es de acero inoxidable.

Imagen No. 46: rejilla con base de tubería y cable enrollado.



Fuente: Roscoe Moss Company (1990).

- De persiana: esta rejilla posee una morfología con pestañas horizontales con inclinación hacia abajo (como persianas). Entre sus ventajas está la alta resistencia al colapso, la cual puede ser mayor que la que posea la tubería de revestimiento que posea el mismo espesor, por lo que es considerada la rejilla con más resistencia. Con esta rejilla se logra que el empaque de grava se instale más fácilmente, así como el desarrollo del pozo. Presentan un 17% de área abierta.

Imagen No. 47: rejilla de persianas.



Fuente: Roscoe Moss Company (1990).

Cuando el pozo posee desarrollo natural y no se trabaja con empaque de grava, las principales rejillas utilizadas son las siguientes:

- De ranura continua o cable enrollado: se conoce también como rejilla Johnson. Esta rejilla se construye enrollando un cable alrededor de varillas longitudinales y se suelda a ellas, consiguiendo una forma cilíndrica. Esta rejilla permite una mayor área abierta que el resto de rejillas, logra controlar el ingreso de partículas finas en ausencia de un empaque de grava y minimiza pérdidas de carga del caudal de agua. El cable posee una sección transversal triangular y se consigue que las ranuras posean una forma de "V", lo cual reduce obstrucciones. Entre las desventajas de este tipo de rejilla se presenta el caso de que es muy difícil o imposible de reparar para lograr su forma e integridad estructural originales, en caso se presenten daños. Al mismo tiempo, cuando las rejillas se fabrican en acero al carbón, el área superficial está más expuesta a la corrosión y se incurre más rápidas pérdidas de peso y resistencia. Presentan un 25% de área abierta.

Imagen No. 48: rejilla de cable enrollado.



Fuente: Roscoe Moss Company (1990).

- Tubería ranurada en campo: para pozos perforados por el método de percusión por cable, en terrenos aluviales no consolidados, es normal que la tubería de revestimiento sea introducida en toda la profundidad del pozo y posteriormente sea ranurada. Generalmente se perfora en forma de persiana por medio de perforadores accionados hidráulicamente o en forma vertical, por medio de cuchillos mecanizados.

4.5.2.3. Diámetro de la rejilla

El diámetro de la rejilla variará según las siguientes condiciones:

- Cuando la bomba para extracción de agua se colocará fuera de la tubería de revestimiento: en este caso, el diámetro de la rejilla estará determinado según la capacidad de admisión de caudal de bombeo a una específica velocidad. Se desea que la velocidad de entrada del caudal de agua hacia la rejilla sea igual o menor a 3 m/s. El diámetro de la rejilla debe aumentarse cuando dicha velocidad se supera o bien, aumentar la longitud.

- Cuando la bomba para extracción de agua se colocará dentro de la tubería de revestimiento: en este caso, el diámetro de la rejilla quedará determinado por el diámetro de la tubería de revestimiento, el cual puede seleccionarse según la Tabla No. 14.

4.5.2.4. Tamaño de las ranuras

Cuando se posee un pozo con empaque de grava, el tamaño de las aperturas de la rejilla debe ser el necesario para que no ocurran inserciones de gran volumen de material fino del empaque de grava y al mismo tiempo no se den grandes pérdidas de carga y reducción del caudal. Por lo tanto, las ranuras no pueden ser muy grandes ni muy pequeñas.

Las rejillas se deben diseñar para que se evite, lo más que se pueda, el paso del empaque de grava hacia el interior de la rejilla. Cuando la rejilla es de ranuras verticales, la apertura de las mismas debe ser pequeña para que se reduzca la tendencia a la obstrucción debido a las partículas más pequeñas, lo cual dificulta el posterior desarrollo del pozo.

Cuando las ranuras son de persiana, la apertura permite que un adecuado porcentaje de material grueso quede en cada una de ellas y se forme un filtro estable. Con este arreglo, se permite que ingrese un 10%-20% del material a la ranura, y es el porcentaje que se recomienda. En base a dicho porcentaje se puede lograr determinar un tamaño adecuado para las aberturas de la rejilla.

Cuando se selecciona una abertura de ranura equivocada, la producción del pozo se ve afectada ya que ingresa material particulado proveniente de la formación acuífera. Al mismo tiempo, la eficiencia de la bomba puede resultar perjudicada debido a que el material que ingresa provoca obstrucciones en el equipo. Ambas situaciones producen una disminución

de la eficiencia del pozo. Aunado a eso, la calidad del agua que se extrae también se ve modificada negativamente por contener más materia suspendida.

En pozos con desarrollo natural, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones para la selección del tamaño de las ranuras de las rejillas:

- Se debe calcular el coeficiente de uniformidad de la formación; si es menor que 6 y mayor que 3, las ranuras deben retener 40%-50% del material. El coeficiente de uniformidad se calcula dividiendo el D_{60} dentro del D_{10} resultante del análisis granulométrico de la formación, lo cual significa que se relaciona el tamaño de las partículas que quedan debajo del 60% del peso de la muestra de suelo con el tamaño de las partículas que quedan debajo del 10% de la misma.
- Si el agua presenta carácter corrosivo, el tamaño de la ranura debe retener 60% de material (cuando la rejilla es de acero al carbón).
- Cuando el material de la formación acuífera es grueso, se puede seleccionar una ranura que permita un 30% de retención del material.

4.5.3. Empaque de grava

En el espacio anular entre las paredes de la perforación y la tubería de revestimiento, se coloca a manera de empaque un relleno filtrante de grava. La colocación de un empaque de grava resulta necesaria cuando la formación del acuífero no posee una granulometría adecuada para formar un prefiltro natural y resulta sumamente necesario cuando el material del subsuelo es inestable y pueden ocurrir desprendimientos. Por lo tanto, es un elemento estructural y de pre filtración ya que funciona como componente sujeción de las paredes de la perforación y como barrera filtrante de retención de partículas. Mediante un

empaques de grava eficiente se logra una mayor retención de material fino y se obtiene una mayor permeabilidad comparada con la del terreno alrededor de la perforación; por lo tanto se disminuyen pérdidas de carga y se mejora el rendimiento del pozo.

Para seleccionar adecuadamente el tamaño de las partículas que formarán el empaque de grava es necesario analizar la granulometría de las formaciones del subsuelo donde se realiza la perforación. Esta granulometría es posible de conocer a partir de muestras de suelo obtenidas durante el proceso de perforación del pozo. Las muestras deben extraerse adecuadamente según el método de perforación utilizado. Mediante el adecuado diseño del empaque de grava se logra extender la vida útil del pozo y se reducen sus costos de mantenimiento.

Según el análisis granulométrico se logra conocer el porcentaje de material más fino que desea retenerse y así se puede determinar el diámetro mínimo de las partículas de grava que se requieren. Un método recomendado es el de multiplicar el D_{50} de la formación por un factor entre 4 y 6 para estabilizar el D_{50} del empaque gravoso (la D se refiere al tamaño del grano o diámetro aparente de la partícula de suelo y el subíndice 50 es el porcentaje de material menor o igual a dicho diámetro, según el peso total de la muestra). El D_{50} de la formación se logrará determinar según el análisis granulométrico realizado.

En la siguiente tabla se presentan valores de la relación entre el tamaño de las partículas de la formación y las del empaque de grava (D_{50} formación/ D_{50} empaque de grava):

Tabla No. 15: valores de relación entre granulometría de formación y empaque de grava.

Relación D_{50} formación/ D_{50} empaque de grava	
4-5	Eficiencia máxima. Las partículas de arena no ingresan.
7-10	Eficiencia disminuye.
>10	Eficiencia disminuye e ingresan arenas.
>20	El empaque de grava es ineficiente y se da un gran ingreso de arenas.

Fuente: Grupo de Investigación de Recursos Hídricos de Universidad Jaume I de Castellón (2005).

Existen casos donde las formaciones acuíferas son aptas para un desarrollo natural en donde se crea un sistema de permeabilidad alrededor de la rejilla por medio de diversos métodos (el tema de desarrollo de pozos se amplía más adelante). Cuando se presenta desarrollo natural, el empaque de gravas es necesario sólo para cumplir la función de estabilización de las paredes de la perforación. El tamaño de la grava a utilizar dependerá del tamaño de las aberturas de la rejilla a emplearse. La siguiente tabla muestra valores típicos de material para el empaque de grava, a menudo trabajando con rejillas de aberturas entre 3/32 a 1/8 de pulgada:

Tabla No. 16: tamaño de grava para empaque para pozos desarrollados.

Número de tamiz (U.S. Standard)	3	4	8	16	20
Pulgadas	---	0.187	0.093	0.047	0.0328
% que pasa	100	85-95	25-35	5-20	2-10

Fuente: Roscoe Moss Company (1990).

Cuando se requiere de la aplicación de un empaque de grava para funcionar como prefiltro (porque no se dará desarrollo natural), la selección del tamaño de la grava del empaque quedará determinada según el análisis granulométrico mencionado anteriormente. En la siguiente tabla se muestra la graduación de la grava utilizada generalmente con rejillas de aberturas de 1/16 de pulgada:

Tabla No. 17: tamaño de grava para empaque para pozos sin desarrollo.

Número de tamiz (U.S. Standard)	4	6	8	12	16
Pulgadas	0.187	0.130	0.093	0.068	0.047
% que pasa	100	95-100	70-80	15-25	0-5

Fuente: Roscoe Moss Company (1990).

El material utilizado para el empaque de grava debe poseer forma redondeada, con superficie lisa y de composición silíceas. Se utiliza grava redondeada ya que una forma con ángulos pronunciados y caras afiladas y ásperas es más propensa a generar residuos finos durante su transporte y manipulación. Al mismo tiempo, la grava que se utilice debe estar limpia, libre de materia orgánica, limos y arcillas. Para conocer el volumen de grava necesaria se puede emplear la siguiente fórmula:

$$V = H * \pi * \left(\frac{D_p^2}{4} - \frac{D_t^2}{4} \right) * 1.05 \quad \text{Ecuación No. 44}$$

Donde:

V = volumen de grava [m^3].

H = profundidad de la columna que se empacará con grava [m].

D_p = diámetro de la perforación [m].

D_t = diámetro externo de la tubería de revestimiento [m].

1.05 = factor de seguridad.

4.5.3.1. Colocación de empaque de grava

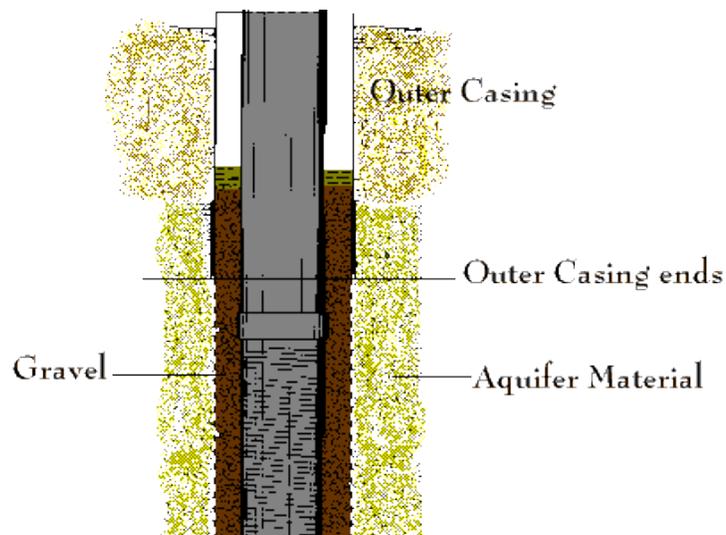
Antes de ser colocada, la grava debe estar limpia (se lava con agua dulce). Para su colocación se pueden emplear diversos métodos y siempre se debe evitar que no se forme un arreglo por tamaño en dirección vertical. Generalmente, el empaque de grava ronda entre los 8 y 15 cm de espesor.

El empaque de grava cubre cierta profundidad desde el fondo del pozo y generalmente se eleva hasta cercanías del nivel freático.

Existen varios métodos para la colocación del empaque gravoso. Uno de ellos es el método de caída libre, el cual no resulta efectivo ya que presenta la inadecuada situación del arreglo vertical mencionado. Aunado a esto, se pueden formar espacios vacíos cuando se poseen grandes profundidades de perforación.

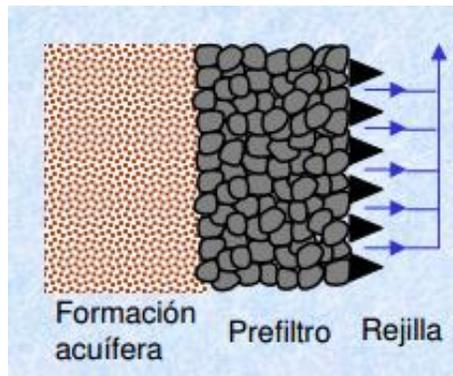
Otro método es el vertido directo en el espacio anular a través de una tubería auxiliar (suele tener diámetro de 2 pulgadas o más). Esta tubería se coloca en el fondo de la perforación y se va retirando según el espacio anular se vaya rellenando. Esta operación se puede combinar con la circulación de agua o fluido de perforación a través de la misma tubería auxiliar o bien aplicando el fluido por medio de circulación inversa.

Imagen No. 49: columna de pozo (tubería unida a rejilla) con empaque de grava alrededor.



Fuente: Albert, D. (2000).

Imagen No. 50: detalle de empaque de grava y flujo de agua.



Fuente: Grupo de Investigación de Recursos Hídricos de Universidad
Jaume I de Castellón (2005).

4.5.4. Sellado del pozo

La superficie del pozo debe ser sellada para evitar contaminación del agua subterránea. La defensa que se crea se conoce como sello sanitario, el cual es un módulo impermeable que evita que el agua superficial ingrese al pozo y llegue a zonas permeables del acuífero. Dicho sello es conformado por una mezcla de materiales que se colocan en el espacio anular, por encima del empaque de grava.

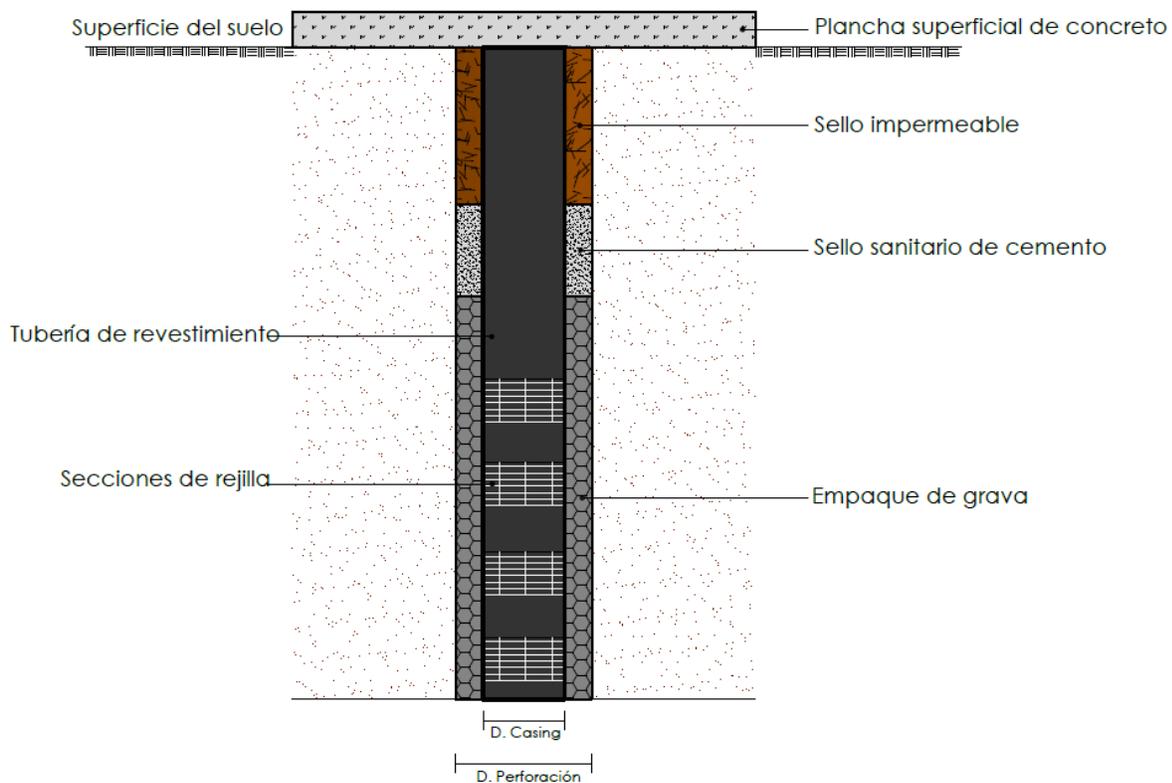
Cuando no se sella un pozo, el espacio anular podría constituir una vía directa desde la superficie hacia el agua subterránea. Dicha vía transportaría fluidos a un ritmo más elevado que la tasa de infiltración en el suelo natural y por lo tanto el proceso de limpieza que implica la infiltración natural no se presentaría adecuadamente a través del espacio anular, lo que da lugar al ingreso de bacterias y otros contaminantes al agua subterránea.

El sello sanitario está formado por una mezcla de cemento, arena y agua y se coloca a sobre el empaque de grava, cubriendo variedad de profundidades que variarán según el diseño y el tipo de material de la formación. Existen casos donde se puede cementar el resto de la profundidad faltante, por lo que el sello sanitario llega hasta la superficie del terreno.

Cuando el sello no llega hasta la superficie, el resto de la profundidad se rellena con un sello impermeable formado por material cortado en la perforación junto con arcilla.

Sobre la superficie del terreno es conveniente construir una plancha de concreto que soporte cargas externas, por lo que se dan casos en donde se requiere de la utilización de concreto armado.

Imagen No. 51: vista en perfil de la estructura de un pozo (sin bomba instalada).



Fuente: elaboración propia (2016).

4.6. Desarrollo de pozos

Como una fase integral de la construcción de un pozo se encuentra el desarrollo del mismo, el cual implica operaciones que aseguran una máxima descarga de agua y la mínima producción de materia particulada, a una máxima capacidad específica, para así lograr una adecuada productividad.

El desarrollo de un pozo inicia con procesos de limpieza durante el proceso de perforación y prosigue con otros procedimientos posteriores a la misma. El desarrollo puede dividirse de la siguiente manera:

- a. Pre-desarrollo: es un proceso de limpieza que busca el desalojo de material extraño durante la perforación, con el fin de disminuir el daño a la formación. Dentro de este proceso se puede mencionar el control del fluido de perforación cuando se perfora con el método de rotación y al momento de que el mismo se utiliza en la colocación de empaque de grava.
- b. Desarrollo: estas acciones preliminares se dan posterior a la instalación de la tubería de revestimiento, rejilla y empaque de grava.

El proceso de desarrollo es necesario en cualquier pozo, aunque se requiera en unos más que en otros y dependerá de las características del acuífero, contenido de arena, construcción del pozo, etc.

El desarrollo de un pozo se centra en tres funciones principales:

- a. Creación de una zona de filtración efectiva en la región comprendida entre el acuífero y la rejilla, ya sea en pozos con desarrollo natural o con empaque de grava.
- b. Aumento de la conductividad hidráulica en regiones cercanas al pozo.
- c. Aumento del radio efectivo del pozo cuando se presenta desarrollo natural.

Cuando se cumplen las funciones mencionadas, los resultados benéficos para el pozo son los siguientes:

- Extracción de residuos de fluido de perforación y de detritus, eliminando obstrucciones provocadas durante la perforación. Estas obstrucciones son más comunes que se presenten cuando se perforó con método de rotación,

en donde el fluido de perforación crea un sello en las paredes de perforación.

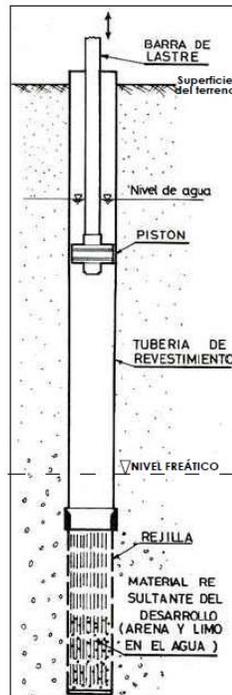
- Clasificación del material de la formación acuífera alrededor de las secciones de rejilla, lo cual aumenta la estabilidad de la formación y se elimina más cantidad de arena (pozos con desarrollo natural).

4.6.1. Sistemas de desarrollo de pozos

Existen diversas técnicas aplicables para el desarrollo de un pozo y pueden ser de carácter físico-mecánico o de carácter químico. En cuanto a las técnicas físico-mecánicas se pueden mencionar las siguientes:

- Desarrollo con pistón: esta técnica es adecuada cuando la formación acuífera presenta material suelto y cuando se posee empaque de grava. Se utiliza un pistón de discos de goma o caucho que se ajustan al diámetro de la tubería de revestimiento (émbolo de limpieza). El pistón es introducido cierta profundidad por debajo del nivel del agua y mediante la tubería de perforación o algún equipo de la sarta de perforación, se le aplica un peso adecuado para que se genere un movimiento de vaivén. Esto hace que el movimiento del agua asiente el material suelto: el descenso del pistón fuerza al agua fuera de la rejilla hacia la formación acuífera, mientras que el ascenso del mismo crea una succión sobre el agua, los sedimentos y material fino.

Imagen No. 52: representación en perfil de desarrollo por pistón o émbolo de limpieza.



Fuente: Miliarium (2006).

- Desarrollo por bombeo: esta técnica utiliza equipo de bombeo para generar aumentos en la velocidad del flujo del agua. Se consigue un efecto parecido al del desarrollo con pistón pero con mayores penetraciones. En este tipo de desarrollo puede aplicarse un proceso de sobrebombeo, el cual consiste en realizar un bombeo a tasas mayores que las de diseño, por encima del régimen de explotación. Con las altas velocidades de flujo se logra un movimiento de material fino rápido, cuestión que no sucedería si la explotación se diera bajo condiciones normales.

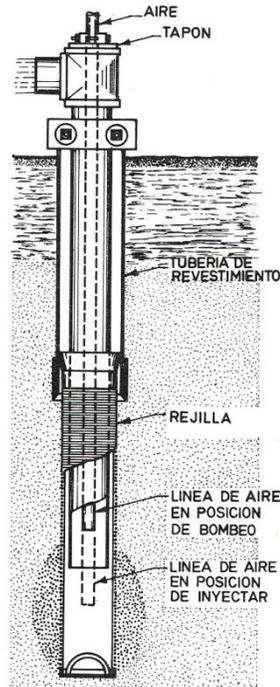
Otro método de bombeo es el alternante, que consiste en detenciones y arranques bruscos y sucesivos de bombeo que produzcan un retroceso en el agua, consiguiendo una inversión alternada del caudal de agua. Con el caudal de salida se logra deshacer puentes de arena, mientras que el caudal de entrada moviliza la materia fina hacia el interior del pozo, para su posterior extracción.

- Desarrollo mediante aire comprimido: este método utiliza dos tuberías auxiliares, una para la inyección de aire comprimido y otra para la descarga de agua.

Cuando el cabezal del pozo está abierto, el método consiste en una combinación de oleada de aire y bombeo de agua; la oleada de aire se consigue por la inyección fuerte de aire comprimido y el bombeo se da naturalmente debido a la elevación que sufre el agua a causa del aire inyectado. La tubería de aire se coloca de forma que su parte inferior quede a cierta altura sobre la parte inferior de la tubería de descarga y se inicia con la inyección de aire hasta llegar a un punto donde se observe que el agua descargada está libre de arena. Luego, se cierra la válvula del equipo de aire comprimido para que la presión en el equipo llegue a los 7kg/cm^2 . Posteriormente se baja la tubería de aire para que quede aproximadamente a 12 pulgadas por debajo de la tubería de descarga y se prosigue a abrir la válvula del equipo para que el aire ingrese fuertemente al pozo. Con esto se logra crear una oleada que permite que el agua se movilice con fuerza a través de las ranuras de la rejilla hacia la formación.

Para completar el movimiento de vaivén, se debe elevar la tubería de aire para que el bombeo en la tubería de descarga sea restablecido y así se crea un fuerte cambio en la dirección del caudal, lo que produce una agitación en la formación acuífera.

Imagen No. 53: Representación en perfil de método de desarrollo por aire comprimido.



Fuente: Miliarium (2006).

Los diámetros de la tubería de aire y la tubería de descarga de agua deben relacionarse adecuadamente. En la siguiente tabla se muestra algunas relaciones recomendadas:

Tabla No. 18: recomendación de diámetros de tubería de aire y de descarga de agua.

Diámetro tubería de revestimiento [pulgadas]	Diámetro tubería de aire [pulgadas]	Diámetro tubería de descarga de agua [pulgadas]
4	0.5	2
5	1	3
6	1-1.25	3.5-4
8	1.5-2	5-6
10	2.5	8

Fuente: Auge, M. (2005).

- Desarrollo por Jetting: es un método de inyección de agua alta presión. Con esta técnica se utiliza un equipo formado por un varillaje de fondo cerrado

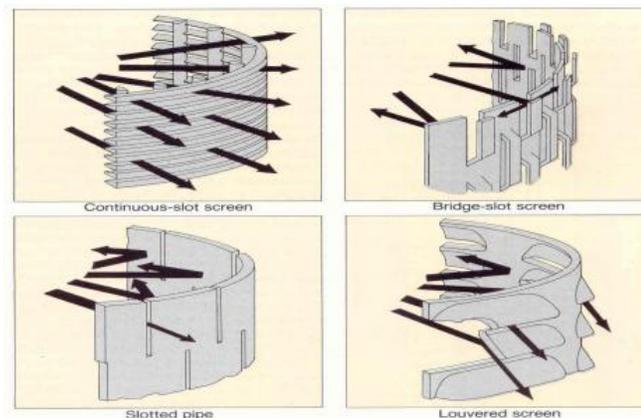
que posee varios inyectoros horizontales. El varillaje se une a un equipo de inyección que puede ser una bomba de pistones o un compresor que genere elevada presión. Esta presión hace que el agua salga a grandes velocidades y así se logre la limpieza y desarrollo de la formación acuífera, el empaque de grava y la rejilla. Es uno de los sistemas de desarrollo más eficientes ya que se logra que se movilice materia fina a través del empaque de grava y la formación acuífera debido a que los chorros de agua que salen de los eyectores, a través de las ranuras de las rejillas, concentran el flujo en pequeñas áreas. Puede emplearse para pozos con o sin empaque de grava.

Imagen No. 54: eyector de boquillas.



Fuente: Flatwater Fleet (2008).

Imagen No. 55: salida de flujo de agua inyectada a alta presión por medio de las ranuras de la rejilla.



Fuente: House of Water and Environment (2008).

En cuanto a los métodos químicos se pueden mencionar los siguientes:

- Desarrollo por polifosfatos: este método se auxilia de algún método físico-mecánico para poder aplicar los fosfatos. Estos compuestos son disueltos en agua y permiten una dispersión de arcillas, permitiendo que se elimine la capa de material arcilloso tanto natural como el agregado en fluidos (bentonita), que queda en las paredes de la perforación, en el empaque de grava y en la rejilla.
- Desarrollo por acidificación: con este método se utilizan sustancias ácidas disueltas y se emplea en acuíferos con naturaleza caliza o dolomítica. Cuando la sustancia ácida reacciona con material carbonatado de las formaciones fisuradas y/o karstificadas, se logra una limpieza o ampliación en los conductos de circulación, por lo que la transmisividad mejora, debido a la disolución de material. Generalmente el ácido clorhídrico es el más utilizado.

4.7. Desinfección del pozo

Debido a las diversas operaciones y manipulación del equipo y componentes del pozo, el pozo y el sistema de bombeo deben ser desinfectados para eliminar microorganismos. El método generalmente utilizado para realizar la desinfección del pozo es la cloración, resultando económico y efectivo.

La aplicación de la sustancia clorinadora es en solución y se recomienda que se realice por medio de una tubería auxiliar. Después de aplicada la solución, se debe mezclar adecuadamente con el agua presente en la tubería de revestimiento. Dicha aplicación se realiza después de instalada la bomba de extracción de agua, cuando puede decirse que la construcción del pozo está finalizada.

Las dos sustancias más utilizadas son el hipoclorito de sodio y el hipoclorito de calcio:

- Hipoclorito de calcio: se encuentra en grano y se diluye en agua limpia para posteriormente inyectarlo al pozo. Para la desinfección del pozo se inyectan soluciones concentradas de 50 a 200 partes por millón de cloro. En la siguiente tabla se muestran las cantidades de hipoclorito de calcio necesarias para conseguir cierta concentración de cloro en 1000 litros (1m^3) de agua:

Tabla No. 19: cantidades necesarias para preparación de 1000 litros de solución clorada con hipoclorito de calcio.

Concentración de cloro [mg/L]	Hipoclorito de calcio seco [gramos]
50	70
100	140
150	200
200	300
300	400
400	500

Fuente: Auge, M. (2005).

- Hipoclorito de sodio: se encuentra comercialmente en solución debido a su inestabilidad, con una concentración máxima de 20% de cloro (el cloro para uso en el hogar posee una concentración de 5%). En la siguiente tabla se muestran las cantidades necesarias de hipoclorito de sodio en diversas concentraciones para conseguir cierta concentración de cloro:

Tabla No. 20: cantidades necesarias para preparación de 1000 litros de solución clorada con hipoclorito de sodio.

Concentración de cloro [mg/L]	Litros de hipoclorito de sodio con diferentes concentraciones		
	5%	7%	10%
50	1	0.71	0.5
100	2	1.43	1
150	3	2.14	1.5
200	4	2.86	2

300	6	4.28	3
400	8	5.72	4

Fuente: Auge, M. (2005).

4.8. Selección del equipo de bombeo para la extracción de agua

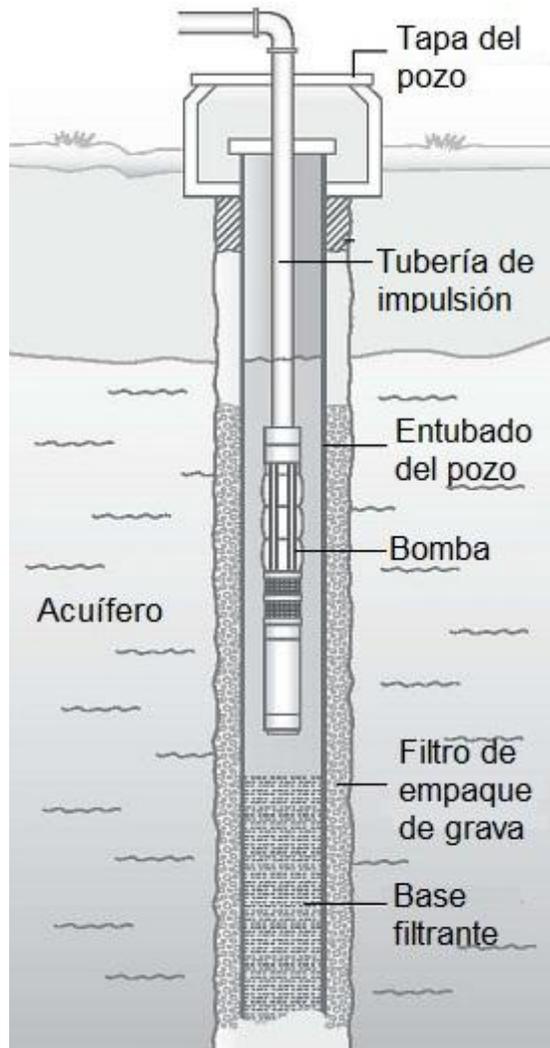
Para que la extracción del recurso hídrico sea adecuada, no sólo basta con una correcta construcción del pozo y conocimiento de las características del mismo y del acuífero. Aunado a eso es necesario que el equipo de bombeo que extraerá el caudal de explotación sea el indicado y trabaje según el mejor rendimiento del pozo. Es por ello que la selección de dicho equipo debe realizarse bajo un procedimiento en el cual se calcula la potencia necesaria de la bomba para la eficiente extracción de agua, siendo capaz de la impulsión del caudal máximo que brinde el pozo.

4.8.1. Tipo de bombas

Para la extracción de agua se pueden utilizar bombas de diversos tipos. A continuación se mencionan las más utilizadas:

- a. Bombas sumergibles o de turbina verticales: estas bombas funcionan sumergidas en el agua, en un determinado punto. Tanto la bomba como su motor se encuentran acoplados y sumergidos. Poseen la ventaja de ser reducidas en diámetro y por lo tanto se pueden instalar en pozos profundos estrechos. Al mismo tiempo, el diámetro reducido hace que el cuerpo de las bombas sea más alargado y se dificulte su instalación y mantenimiento. Existen también bombas sumergibles de motor seco, en donde la parte sumergida no se acopla directamente al motor sino por medio de un eje.

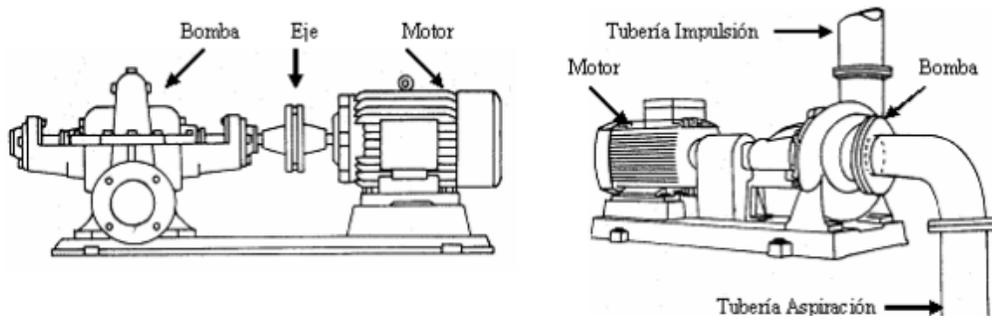
Imagen No. 56: bomba sumergible en pozo (perfil).



Fuente: Rodríguez, H. (2014).

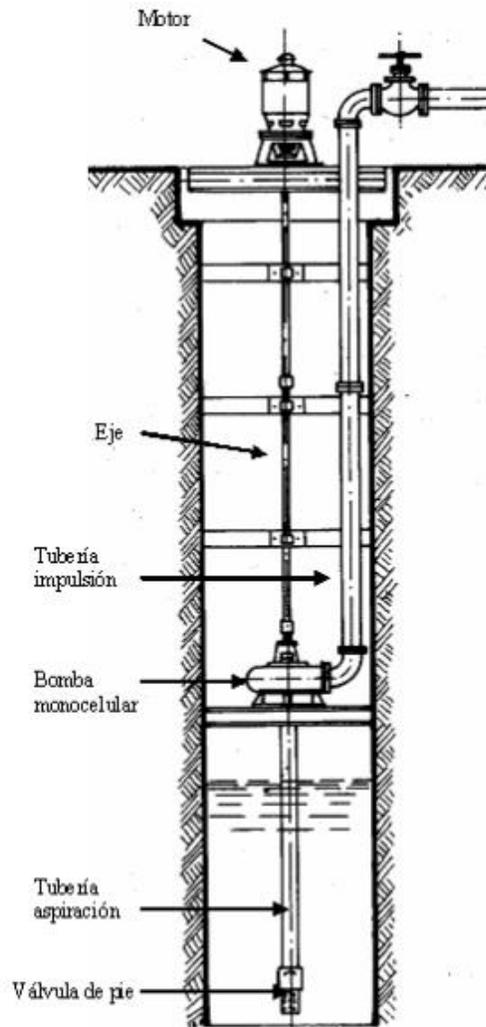
- b. Bombas centrífugas: estas bombas poseen impulsores ubicados en el punto de captación que inducen el agua hacia la superficie, en donde se encuentra el motor. Poseen un eje de rotación y transmisión horizontal o vertical. Cuando el eje es horizontal, el motor y la bomba se ubican al mismo nivel y el agua se extrae por medio de una tubería de succión. Cuando el eje es vertical, la bomba se encuentra a una altura inferior a la del motor y puede estar sumergida o no en el agua a extraer.

Imagen No. 57: bomba centrífuga de eje horizontal.



Fuente: Universidad de Sevilla (2003).

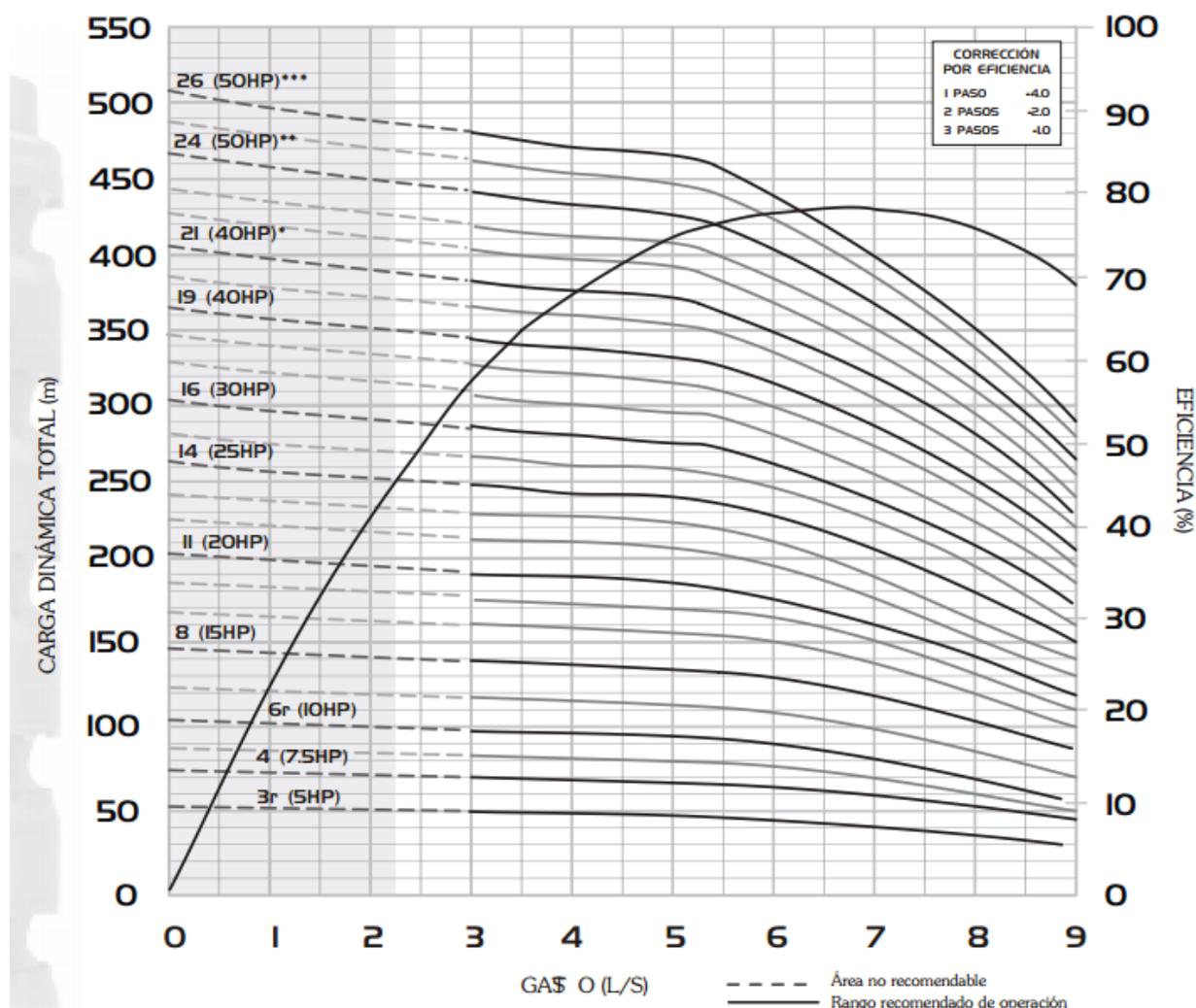
Imagen No. 58: bomba centrífuga de eje vertical no sumergible (perfil).



Fuente: Universidad de Sevilla (2003).

El rendimiento de una bomba se puede representar por medio de una gráfica que posee curvas características para diversos caudales, carga dinámica total y eficiencia de la bomba. Relacionando dichos parámetros se logra una correcta selección del equipo según lo que solicite el diseño. Se debe localizar la carga dinámica total requerida y dibujar una línea horizontal; luego se localiza el caudal requerido y se traza una línea vertical. El punto de intersección de ambas líneas es el punto de trabajo y se logra conocer la eficiencia con la que trabajaría la bomba, así como conocer la potencia de la bomba.

Gráfica No. 8: curva de rendimiento de bomba (de determinado fabricante, para determinada bomba).



Fuente: Bombas Suárez (2013).

4.8.2. Carga dinámica total

La bomba a utilizar impulsará el agua desde una profundidad determinada a la cual se suman diversos factores de pérdida de carga y energía cinética.

La sumatoria de los factores mencionados se conoce como carga dinámica total (CDT) del bombeo y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$CDT = hd \pm hs + hf_{tubería} + hf_{accesorios} + \frac{V^2}{2 * g} \quad \text{Ecuación No. 45}$$

Donde:

$hd =$ carga estática de descarga [m].

$hs =$ carga estática de succión [m].

$hd \pm hs =$ carga estática total [m].

$hf_{tubería} =$ pérdida de carga por fricción en la tubería [m].

$hf_{accesorios} =$ pérdida de carga por fricción en accesorios [m].

$\frac{V^2}{2 * g} =$ pérdida de energía cinética [m].

- Carga estática de descarga hd : es la distancia vertical entre el centro de la bomba y la superficie o nivel superior al cual llegará el agua.
- Carga estática de succión hs : distancia vertical entre la superficie del agua y el centro de la bomba. Puede ser positiva o negativa:
 - Positiva: se da si el nivel de agua se encuentra sobre el eje central de la bomba (el valor se resta).

- Negativa: si el nivel de agua se encuentra debajo del eje central de la bomba (el valor se suma).
- Pérdida de carga por fricción en la tubería $hf_{tubería}$: esta es una pérdida hidráulica producida por la fricción de la tubería. Cuando se posee una bomba sumergible, ésta se ubicará por debajo del nivel dinámico y debe tomarse en cuenta dicha profundidad para el cálculo de pérdidas de carga por fricción en tubería. Puede ser calculada por medio de la fórmula de Hazen-Williams o por medio de la fórmula de Darcy-Weisbach:

$$\text{Hazen - Williams} \rightarrow hf_{tubería} = \frac{10.643}{D^{4.87}} * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.85} * L \quad \text{Ecuación No. 46}$$

Donde:

D = diámetro de tubería de bomba [m].

hf = pérdida de carga [m].

Q = caudal de agua $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.

C = coeficiente de rugosidad de la tubería.

L = longitud de la tubería [m].

En Guatemala existe una variación de la fórmula de Hazen-Williams y queda de la siguiente manera:

Ecuación No. 47

$$hf_{tubería} = \frac{1743.811 * L * Q^{1.85}}{C^{1.852} * D^{4.87}}$$

Donde:

hf = pérdida de carga [m].

$D = \text{diámetro de tubería de bomba [in]}.$

$Q = \text{caudal de agua } \left[\frac{l}{s} \right].$

$C = \text{coeficiente de rugosidad de la tubería.}$

$L = \text{longitud de la tubería [m]}.$

El coeficiente de rugosidad C depende el material de la tubería. La siguiente tabla muestra algunos valores:

Tabla No. 21: valores C para fórmula Hazen-Williams.

Material	C
Asbesto cemento	140
Latón	130-140
Hierro fundido	
Nuevo	130
10 años	107-113
20 años	89-100
30 años	75-90
40 años	64-83
Concreto	120-140
Cobre	130-140
Hierro dúctil	120
Hierro galvanizado	120
PVC	150
Plomo	130-140
Acero	100-130

Fuente: Miliarium (2008).

La otra alternativa es la siguiente:

$$\text{Darcy \& Weisbach} \rightarrow h_{f_{\text{tubería}}} = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g}$$

Ecuación No. 48

Donde:

$f =$ coeficiente de fricción.

$L =$ longitud de la tubería [m].

$D =$ diámetro de la tubería de la bomba [m].

$V =$ velocidad del flujo $\left[\frac{m}{s}\right]$.

$g =$ gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.

Para el cálculo del factor f se debe seguir el siguiente procedimiento:

a. Calcular el número de Reynolds mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu} = \frac{V * D}{\nu} \quad \text{Ecuación No. 49}$$

Donde:

$\rho =$ densidad del agua $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.

$V =$ velocidad del flujo de agua $\left[\frac{m}{s}\right]$.

$D =$ diámetro de la bomba [m].

$\mu =$ viscosidad dinámica del agua $\left[\frac{kg}{m * s}\right]$.

$\nu = \frac{\rho}{\mu} =$ viscosidad cinemática del agua $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

$Re \leq 2100 =$ régimen laminar.

$2100 \leq Re \leq 4000 =$ régimen transitorio.

$Re \geq 4000 =$ régimen turbulento.

El chequeo del número de Reynolds se realiza con el fin de trabajar con un flujo de agua no turbulento, para evitar cavitación en el equipo de bombeo y al mismo tiempo, arrastre de material de la formación.

Para los valores de densidad y viscosidad del agua se consulta la tabla de propiedades del agua, en el Anexo K.

- b. Utilizar la gráfica del Anexo L, la cual se denomina gráfico de Moody. En dicha tabla se debe ubicar el número de Reynolds en el eje “x” y en el eje “y” del lado derecho se debe ubicar la rugosidad relativa, la cual viene dada según la relación de la rugosidad absoluta y el diámetro de la tubería. La rugosidad absoluta varía dependiendo del material de la tubería. En la misma gráfica se presenta una tabla con valores de rugosidad absoluta para varios materiales.

Cada rugosidad relativa posee una curva en la gráfica y ubicada ésta, se procede a determinar el factor f en el eje “y” del lado derecho de la gráfica.

- c. Con el valor de f determinado, se procede a calcular la pérdida de carga por fricción en tubería mediante la ecuación de Darcy & Weisbach.
- Pérdida de carga por fricción en accesorios $hf_{accesorios}$: los accesorios también generan fricción y por lo tanto pérdida de carga (se toman en cuenta todos los accesorios desde el nivel al que se encuentre la bomba hasta el tanque de almacenamiento). Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$hf_{accesorios} = \frac{K * V^2}{2 * g}$$

Ecuación No. 50

Las variables involucradas representan lo mismo que en las expresiones anteriores y K es el coeficiente de resistencia para cada tipo de accesorio (ver Anexo M).

- Pérdida de energía cinética: es una pérdida de carga que se produce debido a la salida de agua en la tubería de impulsión.

Un aspecto importante al momento de seleccionar una bomba es evitar el fenómeno de cavitación, el cual se puede presentar por cambios bruscos de velocidad en los cuales se aspira aire y se puede generar daños en el equipo. Para evitar la cavitación se debe conocer el NPSH (carga neta de succión positiva). Cada bomba posee un NPSH requerido que queda definido por el diseño de fábrica de la misma y debe compararse con el NPSH disponible, el cual queda definido según el sistema de succión de la bomba (el NPSH disponible debe ser mayor al requerido para evitar cavitación). El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$NPSH_{disponible} = P_{atm} - (P_{vap} \pm h_s + hf_{tubería y accesorios}) \quad \text{Ecuación No. 51}$$

Donde:

P_{atm} = presión atmosférica transformada en carga [m].

P_{vap} = presión de vapor de agua transformada en carga [m].

h_s = presión estática de succión [m].

Tabla No. 22: disminución de la presión atmosférica según variaciones de alturas.

Altura sobre el nivel del mar		Presión atmosférica (Pa)	
m	ft	m	Pa
0	0	10.33	14.69
250	820	10.03	14.26
500	1640	9.73	13.83
750	2640	9.43	13.41
1000	3280	9.13	12.98
1250	4101	8.83	12.55
1500	4291	8.53	12.13
1750	5741	8.25	11.73
2000	6561	8.00	11.38
2250	73.81	7.75	11.02
2500	8202	7.57	10.68
2750	9022	7.28	10.35
3000	9842	7.05	10.02
3250	10662	6.83	9.71
3500	11483	6.62	9.42
3750	12303	6.41	9.12
4000	13123	6.20	8.82
4250	13943	5.98	8.52
4500	14764	5.78	8.22

Fuente: OMS y CEPIS (2005).

Tabla No. 23: Presión de vapor de agua.

Temperatura		Peso específico Kg/dm ³	Presión de vapor (P.V.P)	
C°	F°		M. Abs.	P.SI.Abs
0	32	0.9998	0.062	0.088
5	41	1.000	0.089	0.127
10	50	0.9996	0.125	0.1781
5	59	0.9990	0.174	0.247
20	68	0.9982	0.238	0.338
25	77	0.9970	0.323	0.459
30	86	0.9955	0.432	0.614
35	95	0.9939	0.573	0.815
40	104	0.9921	0.752	1.070
45	113	0.9900	0.977	1.389
50	122	0.9880	1.258	1.789
55	131	0.9857	1.605	2.283
60	140	0.9831	2.031	2.889
70	158	0.977	3.177	4.519
75	167	0.9748	3.931	5.591
80	179	0.9718	4.829	6.869
85	185	0.9687	5.894	8.383
90	194	0.9653	7.149	10.168
95	203	0.9619	8.619	12.259
100	212	0.9583	10.332	14.696

Fuente: OMS y CEPIS (2005).

4.8.3. Potencia de la bomba

La bomba debe poseer una potencia requerida según la carga dinámica total y se calcula de la siguiente manera:

$$P = \frac{Q * CDT}{76 * e} \quad \text{Ecuación No. 52}$$

Donde:

P = potencia requerida de la bomba [HP].

Q = caudal de agua $\left[\frac{l}{s}\right]$.

CDT = carga dinámica total [m].

e = eficiencia de la bomba [%].

Otra ecuación que puede utilizarse es la siguiente:

$$P = \frac{Q * CDT}{3960 * \eta} \quad \text{Ecuación No. 53}$$

Donde:

P = potencia requerida de la bomba [HP].

Q = caudal de agua [gal/min].

CDT = carga dinámica total [ft].

η = eficiencia de la bomba [%].

Para conocer la eficiencia de la bomba se debe consultar la información provista por el fabricante de la misma (cada bomba varía sus características). Se debe buscar una bomba que trabaje con más de 70% de eficiencia y sea capaz de impulsar el agua por toda la CDT.

4.9. Ejemplo de diseño de pozo

En esta sección se ejemplifica varios aspectos del proceso de diseño de un pozo mecánico para ciertas condiciones dadas.

Se perforó un pozo en la zona 16 de la ciudad de Guatemala con la finalidad de abastecer de agua para uso doméstico a una población aledaña.

Dentro del análisis de las características de la región se consultó registros de pozos existentes en las cercanías al punto de interés. Al mismo tiempo se realizó un estudio hidrogeológico como estudio de impacto ambiental requerido por el MARN y se logró obtener información para ser utilizada dentro del diseño de la obra. También se consultó información histórica a cerca de características hidrogeológicas de la región.

En base a registros de pozos existentes, los niveles freáticos de la región pueden llegar a encontrarse hasta los 300 metros de profundidad. El nivel freático de varios pozos cercanos al punto de interés varía entre los 90 y 150 metros (300-500 ft).

Según las características geológicas de la región, ésta se caracteriza por poseer, generalmente, formaciones ígneas y metamórficas, predominando las rocas y sedimentos volcánicos junto con formaciones arenosas.

En base a la información recolectada, la perforación se realizó por medio de rotopercusión ya que resulta eficiente para perforaciones en formaciones duras y al mismo tiempo el movimiento de rotación permite un desempeño adecuado en regiones donde se pueda encontrar formaciones blandas, como arenas y arcillas.

La profundidad total de perforación fue de 1000 ft (305 m). Durante la perforación se llevó a cabo muestreos del material y se encontraron los siguientes:

- 0-120 ft: sedimento de roca ígnea (depósitos piroclásticos).
- 120-406 ft: relleno de roca volcánica.
- 406-507 ft: relleno de arenisca.
- 507-548 ft: relleno de roca volcánica.
- 548-602 ft: relleno de arenisca con roca arcillosa.
- 602-710 ft: relleno de roca volcánica.
- 710-844: relleno de arenisca y grava.
- 844-1000 ft: relleno de roca volcánica.

Durante la perforación se midió la verticalidad y desviación de la misma por medio del método del trípode y plomada. La primera medición se realizó a los 100 ft de profundidad perforada, la segunda a los 300 ft y se prosiguió a los 450 ft, 600 ft, 800 ft y 1000 ft.

Las desviaciones fueron las siguientes:

$$X_{100} = \frac{0.3(100 + 105)}{105} = 0.59 \text{ in}$$

$$X_{300} = \frac{0.38(300 + 305)}{305} = 0.75 \text{ in}$$

$$X_{450} = \frac{0.35(450 + 455)}{455} = 0.70 \text{ in}$$

$$X_{600} = \frac{0.42(600 + 605)}{605} = 0.84 \text{ in}$$

$$X_{800} = \frac{0.51(800 + 805)}{805} = 1.02 \text{ in}$$

$$X_{1000} = \frac{0.32(1000 + 1005)}{1005} = 0.64 \text{ in}$$

La prueba de bombeo realizada para conocer ciertas características del acuífero y la producción adecuada del pozo, se efectuó durante 24 horas, con una bomba sumergible colocada a 840 ft de profundidad. La prueba se realizó a un caudal máximo de 300 gal/min y se logró observar los cambios en el nivel del agua. La prueba realizada determinó que el pozo es eficiente para cubrir la demanda de agua requerida para el uso determinado (240 gal/min).

Posteriormente se procedió a calcular el equipamiento del pozo:

Tipo acuífero: confinado heterogéneo.

$$\text{Caudal de producción} = Q = 240 \frac{\text{gal}}{\text{min}} = 1308.1 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 0.01514 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 15.14 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$\text{Nivel Estático N.E.} = 327 \text{ ft} = 99.7 \text{ m.}$$

$$\text{Nivel Dinámico N.D.} = 370 \text{ ft} = 112.8 \text{ m.}$$

$$\text{Profundidad total de perforación} = 1000 \text{ ft} = 304.88 \text{ m.}$$

$$\text{Espesor del acuífero} = 673 \text{ ft} = 205.183 \text{ m}$$

(asumiendo un espesor que va desde el nivel estático al fondo de la perforación).

Según la Tabla No.13, se selecciona el diámetro de la bomba y de la tubería de revestimiento recomendada, según el caudal de producción de $Q=1308.1 \text{ m}^3/\text{d}$:

Producción del pozo	Diámetro nominal de la bomba		Diámetro óptimo de la tubería de revestimiento		Diámetro mínimo de la tubería de revestimiento	
	m ³ /día	pulg	mm	pulg	mm	pulg
Menos que 545	4	102	6 (interno)	152 (interno)	5 (interno)	127 (interno)
409-954	5	127	8 (interno)	203 (interno)	6 (interno)	152 (interno)
818-1910	6	152	10 (interno)	254 (interno)	8 (interno)	203 (interno)
1640-3820	8	203	12 (interno)	305 (interno)	10 (interno)	245 (interno)
2730-5450	10	254	14 (externo)	356 (externo)	12 (interno)	305 (interno)
4360-9810	12	305	16 (externo)	406 (externo)	14 (externo)	356 (externo)
6540-16400	14	356	20 (externo)	508 (externo)	16 (externo)	406 (externo)

Por lo tanto:

Se recomienda un diámetro nominal de la bomba de 6 in.

Se recomienda un diámetro óptimo de la tubería de revestimiento de 10 in (interno).

Se recomienda un diámetro mínimo de la tubería de revestimiento de 8 in (interno).

(se trabajará con el diámetro óptimo de 10 in).

Según la sección 4.3, inciso e, se determina el diámetro de la perforación:

$$\text{Diámetro perforación} = \text{diámetro tubería revestimiento} + (8 \text{ a } 12 \text{ in}).$$

$$\text{Diámetro perforación} = 10 \text{ in} + 10 \text{ in} = 20 \text{ in}.$$

Según la sección 4.5.2.1., la longitud de la rejilla es la siguiente:

$$\text{Longitud de rejilla} = 673 \text{ ft} * 80\% = 538.4 \text{ ft} = 164.15 \text{ m}.$$

Esta longitud de rejilla se distribuirá a lo largo de los estratos más permeables del espesor del acuífero. El diámetro de la rejilla será el mismo que el de la tubería de revestimiento, 10 in.

En cuanto al empaque de grava, éste irá por debajo del nivel inferior del sello sanitario, hasta el fondo de la perforación. El sellado del pozo se conformará de 15 ft de sello impermeable y 200 ft de sello sanitario.

Por lo tanto, el empaque de grava cubre los 785 ft restantes de perforación. El volumen de grava se determina según la Ecuación No. 44:

$$V = 785 * \pi * \left(\frac{(20/12)^2}{4} - \frac{(10/12)^2}{4} \right) * 1.05 = 1348.68 \text{ ft}^3$$

La bomba se ubicará por debajo del nivel dinámico (bomba sumergible), a una profundidad que permita la explotación del recurso sin verse alterada por el descenso del nivel del agua. La bomba se colocará 550 ft de profundidad, a partir de la superficie del terreno. Para la selección de la bomba, se procede a calcular la CDT, según la Ecuación No. 45, la cual requiere del cálculo previo de otros factores que a continuación se presentan:

$$N. D. = 370 \text{ ft} = 112.8 \text{ m}$$

$$\text{Nivel de bombeo} = hd = 550 \text{ ft} = 167.69 \text{ m}$$

$$hs = 550 \text{ ft} - 370 \text{ ft} = 180 \text{ ft} = 54.9 \text{ m}$$

Se procede al cálculo de las pérdidas de carga por fricción en la tubería mediante la fórmula de Hazen-Williams (Ecuación No. 46):

$$h_{f_{tubería}} = \frac{10.643}{\left(\frac{10}{12 * 3.28}\right)^{4.87}} * \left(\frac{0.01514}{115}\right)^{1.85} * (167.68 + 12) = 1.21 \text{ m.}$$

Los 12 metros sumados a los 167.68 metros, corresponden a 12 metros de tubería de conducción de agua hacia el tanque de almacenamiento de la misma (tanque a nivel del terreno). El factor 115 corresponde al coeficiente de rugosidad C para tuberías de acero.

Se calcula la pérdida de carga por fricción en accesorios. Los accesorios a utilizar son un codo de 90° y una válvula de retención tipo chapaleta. Se utiliza la Tabla No. 35 (Anexo M) para determinar los factores K:

$$K_{codo\ 90^\circ} = 2.1$$

$$K_{válvula} = 12.9$$

Se calcula la velocidad del flujo de agua:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.01514}{\pi * \frac{0.1524^2}{4}} = 0.83 \frac{m}{s}$$

Se procede a utilizar la Ecuación No. 50:

$$hf_{\text{accesorios}} = \frac{(2.1 + 12.9) * 0.83^2}{2 * 9.8} = 0.53 \text{ m}$$

Luego se calcula la pérdida de energía cinética:

$$hf_{\text{energía cinética}} = \frac{0.83^2}{2 * 9.8} = 0.035 \text{ m}$$

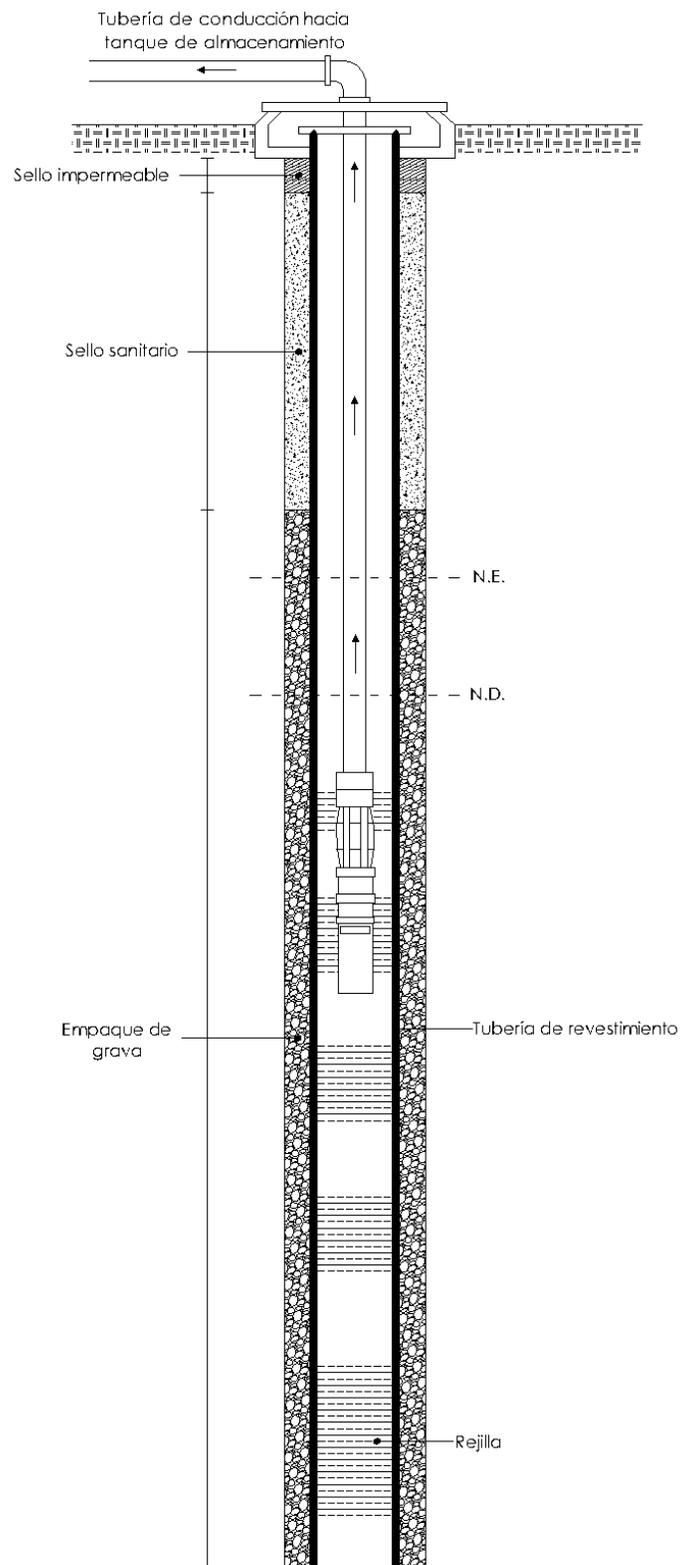
Finalmente se realiza la sumatoria para conocer la CDT:

$$CDT = 167.68 \text{ m} - 54.88 \text{ m} + 1.21 \text{ m} + 0.53 \text{ m} + 0.035 \text{ m} = 114.57 \text{ m} = 375.8 \text{ ft}$$

Con la CDT determinada, se prosigue al cálculo de la potencia requerida por la bomba a emplear, con un 75% de eficiencia, según Ecuación No. 52:

$$P = \frac{15.14 * 114.57}{76 * 75\%} = 30.43 \text{ HP}$$

Imagen No. 59: ejemplificación de perfil de pozo.



Fuente: elaboración propia (2017).

5. CARACTERÍSTICAS Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

5.1. Naturaleza del agua subterránea

Aunado con los aspectos técnicos de diseño y construcción de pozo, la naturaleza del agua subterránea que se explotará es un aspecto importante que debe ser determinada para así conocer su calidad y lograr mejorarla si se requiere, dependiendo del uso que se le dará.

El agua subterránea está expuesta a factores directamente del acuífero así como externos, lo que hace que su naturaleza y calidad varíen dependiendo de los mismos. Según el agua se infiltra en el subsuelo, ésta va teniendo contacto con diversas sustancias orgánicas e inorgánicas y algunas de ellas pueden ser solubles en agua. Mientras más desplace el agua, mayor contenido mineral disuelto poseerá y dependiendo de éste, el tratamiento y que se le dé al recurso varía. Junto con esto, una serie de factores externos se ven involucrados, tales como el clima de la región, calidad del agua de recarga, contaminación, etc.

Existen sustancias que son solubles en agua con contenido de dióxido de carbono, el cual se obtiene del aire o de materia orgánica en descomposición. Cuando el agua presenta dichas características, es capaz de disolver manganeso y hierro de las partículas de suelo, lo cual prolifera el desarrollo de ciertas bacterias. Otro caso que se da en las aguas subterráneas es la presencia de sulfuro de hidrógeno, el cual puede provenir de la descomposición de materia orgánica y/o ausencia de oxígeno.

De manera general, las aguas subterráneas son más claras, incoloras y duras que las aguas superficiales y suelen contener menos cantidad de bacterias. Cuando el agua subterránea posee gran cantidad de bacterias es debido a contaminación proveniente de diversas fuentes. Según el tipo de formación, la naturaleza del agua subterránea es diferente. Por ejemplo, en formaciones calizas, el agua posee

una dureza elevada mientras que en formaciones graníticas, el agua es suave y con poca cantidad de minerales disueltos, pero son muy corrosivas y poseen una elevada cantidad de dióxido de carbono libre.

5.1.1. Principales componentes del agua subterránea

Los componentes del agua subterránea se encuentran mayoritariamente en forma de iones, tanto cationes como aniones. La siguiente tabla muestra los iones constituyentes principales y secundarios del agua subterránea:

Tabla No. 24: iones fundamentales de la composición del agua subterránea.

Cationes	Aniones
Principales (concentraciones entre 1-1000 mg/l).	
<ul style="list-style-type: none"> • Sodio (Na^+) • Potasio (K^+) • Calcio (Ca^{+2}) • Magnesio (Mg^{+2}) 	<ul style="list-style-type: none"> • Cloruro (Cl^-) • Sulfato (SO_4^{-2}) • Bicarbonato (HCO_3^{-}) • Carbonato (CO_3^{-2}) • Nitrato (NO_3^-)
Secundarios (concentraciones entre 0.01-10 mg/l).	
<ul style="list-style-type: none"> • Boro (Br^{+3}) • Manganeso (Mn) • Sílice (Si) • Circón (Zr^{+2}) • Cobre (Cu^+) • Hierro (Fe^{+2}) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bromuro (Br^-) • Fosfato (PO_4^{-3}) • Fluoruro (F^-) • Yoduro (I^-)

Fuente: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay, (2012).

5.1.2. Parámetros de caracterización de agua subterránea

Para conocer las características del agua subterránea es necesario realizar análisis de muestras. Dichos análisis brindan información sobre diversos parámetros y así se logra conocer la calidad del agua y por consiguiente, el uso

que puede dársele o bien, el tratamiento necesario para alcanzar la calidad deseada para dicho uso.

Los análisis que se realizan a las muestras de agua se deben realizar en laboratorios, bajo procedimientos establecidos. Los recipientes en donde se almacenan las muestras de agua deben estar esterilizados para que no se vean modificados los resultados de los análisis y el volumen de agua a tomar como muestra debe ser el indicado según los requerimientos del laboratorio. Cada recipiente a utilizar debe estar correctamente identificado y se debe apuntar la fecha y hora en la cual se realizó el muestreo.

Al momento de realizar el muestreo, se deben tomar mediciones in situ de ciertos parámetros por medio de equipo portátil de fácil utilización. Se deben realizar mediciones directas de pH, temperatura y conductividad eléctrica, antes de manipular las muestras y llevarlas al laboratorio para el resto de análisis.

Los resultados de los análisis de las muestras de agua se presentan según el modelo que cada laboratorio utilice, pero de manera general, se presentan tabulados los parámetros, los resultados de cada uno y los límites aceptables y máximos según la norma a la que se apeguen. En el Anexo N se muestra un ejemplo de un típico modelo de presentación de resultados de análisis de parámetros de agua en Guatemala.

En las siguientes secciones se presentarán los principales parámetros de caracterización de aguas subterráneas, clasificados en físicos, químicos y biológicos.

5.1.2.1. Parámetros físicos

- Temperatura: la temperatura del agua subterránea es relativamente constante y aproximadamente 15 metros debajo de la superficie del

suelo, la temperatura es la temperatura ambiente del lugar (se conoce como zona neutra). Debajo de esta zona se considera un gradiente geotérmico de 3°C/100 m. Como se mencionó, este parámetro se debe medir in situ y antes de que la muestra se vea modificada por la temperatura ambiente.

- Conductividad eléctrica: este parámetro indica la capacidad del agua para la conducción de la corriente eléctrica, lo cual variará según el contenido de iones que posea. Mientras la concentración de iones aumenta, la conductividad eléctrica también lo hace (hasta cierto límite).

La unidad de medida de este parámetro es conocida como Siemens y se expresa en Siemens/metro [S/m] o microSiemens/centímetro [$\mu S/cm$]. Conociendo la conductividad del agua es posible determinar de manera aproximada la concentración de sales disueltas mediante la siguiente multiplicación:

$$\text{Suma de sales disueltas } \left[\frac{mg}{l} \right] \approx \text{conductividad } \left[\frac{\mu S}{cm} \right] * \text{factor}$$

Ecuación No. 54

El factor para conocer la suma de sales disueltas puede variar entre 0.55 y 0.75: cuando el agua es salina, el factor es mayor y cuando el agua posee ácidos libres, el factor disminuye.

Cuando la conductividad del agua es elevada se puede generar corrosión en el hierro y acero ya que mientras mayor sea el valor de dicho parámetro, mayor es la actividad de iones con carga eléctrica y por lo tanto mayor probabilidad de acciones electroquímicas.

- Sólidos Disueltos Totales SDT: como se mencionó en el parámetro anterior, la conductividad puede ser utilizada para conocer una aproximación de las sales disueltas o sólidos disueltos. Los SDT indican el peso de todas las sustancias disueltas en un volumen específico de agua, tomando en cuenta sustancias volátiles o no. Cuando el agua presenta alta cantidad de SDT se considera corrosiva en un alto grado y por lo tanto puede resultar perjudicial para la rejilla del pozo y otros componentes.

Otro parámetro que suele confundirse con los SDT es el Residuo Seco RS, el cual hace referencia al peso de las sustancias sobrantes al momento de la evaporación de un determinado volumen de agua.

- Color: en las aguas subterráneas, el color que éstas posean dependerá de las sustancias que puedan estar disueltas en ella. La disolución de materia orgánica es la principal fuente de color.
- Olor y sabor: estos parámetros son relativos según quién perciba la característica. Según las concentraciones de los minerales, el sabor y olor variarán. De manera general, el sabor del agua será salado, cuando posee una concentración de cloruros mayor a 300 mg/l y será salado y amargo cuando posea más de 400 mg/l de SO_4^{-2} .
- Turbiedad: este parámetro lo determina la presencia y cantidad de sólidos en suspensión, los cuales determinan la facilidad o no del agua para lograr dejar pasar la luz. Por lo tanto, un agua turbia posee falta de transparencia. Se mide en NTU (unidades nefelométricas de turbiedad) mediante un turbidímetro que realiza la medición de la intensidad de luz que se dispersa a 90° al momento que un rayo de luz atraviesa la muestra de agua.

5.1.2.2. Parámetros químicos

- Potencial de hidrógeno pH: este parámetro indica la concentración de iones hidrógeno H^+ y determina si un agua es ácida o alcalina. Según el equilibrio de los iones presentes en el agua subterránea, así como las diversas reacciones químicas que ocurran en ella, el potencial de hidrógeno variará. Cuando los iones H^+ se presentan en cantidades mucho mayores que otros iones disueltos en el agua, ésta será ácida; de lo contrario, será neutra o alcalina. En el agua subterránea, este parámetro es determinado por la cantidad de gases de dióxido de carbono disueltos y al mismo tiempo por los carbonatos y bicarbonatos disueltos en las sales minerales.

El pH es preferible que se mida en el campo ya que al momento de la obtención de la muestra (por bombeo), se ve disminuida la cantidad de gas original que el agua posee en el acuífero.

Generalmente el valor del pH para aguas subterráneas varía entre 5.5-8.5. Cuando los valores se encuentran debajo de 4.5, el agua subterránea contiene ácidos minerales libres, lo cual puede significar que el agua se relaciona con minas, gases volcánicos o indica la presencia de contaminación producida por residuos industriales.

- Dureza: parámetro determinado principalmente por la cantidad de Calcio y Magnesio presente en el agua. Generalmente, en aguas subterráneas, la dureza varía entre 10 y 30 mg/l de carbonato de calcio $CaCO_3$ (un agua se considera dura cuando la magnitud es mayor a 120 mg $CaCO_3/l$). Mientras más dura sea el agua, mayor cantidad de jabón se requerirá para crear espuma. Según la naturaleza del acuífero, la dureza varía a manera que mientras mayor caliza exista (acuífero carbonatado), mayor será el valor de dicho parámetro. Cuando el acuífero posee

composición principalmente silicatada, como el granito, el agua presenta poca cantidad de Calcio y Magnesio y se dice que es un agua blanda.

- Demanda química de oxígeno DQO: esta demanda indica la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación de materia orgánica a través de medios químicos. En aguas subterráneas la DQO suele estar entre 1 y 5 mg O₂/l.
- Demanda bioquímica de oxígeno DBO: este parámetro mide la cantidad de oxígeno necesario para descomponer materia orgánica por medio de procesos aerobios biológicos (por medio de bacterias). En aguas subterráneas generalmente se encuentra menos de 1 mg O₂/l y cuando el valor aumenta es señal de contaminación.

En caso de que el agua presente señas de contaminación, una relación entre la DBO y la DQO logra indicar qué tipo de contaminante se posee: cuando $DBO/DQO < 0.2$, el contaminante es tipo inorgánico y cuando es mayor a 0.5, el contaminante es orgánico. Cuando el contaminante es inorgánico, éste no se biodegrada y suele proceder de procesos industriales, lo cual exige que al agua se le aplique tratamiento adecuado antes de su uso. Cuando se encuentran contaminantes de tipo orgánico, pueden proceder de la descomposición de materia residual doméstica vertida en el suelo. También se puede dar a causa de actividades de ganadería. Cuando a la materia orgánica no se le da un correcto tratamiento o disposición, los compuestos nitrogenados orgánicamente se incorporan al suelo y después de ocurrir reacciones químicas, se convierten en nitratos y pueden llegar a contaminar el agua subterránea.

5.1.2.3. Parámetros microbiológicos

Mediante el análisis de este tipo de parámetros se determinan el tipo y cantidad de microorganismos presentes en una muestra de agua (bacterias, protozoos y otros tipos de microorganismos). La presencia de bacterias en el agua subterránea es evidencia de contaminación. Los análisis bacteriológicos se realizan principalmente para determinar la presencia o no de bacterias coliformes, siendo la de mayor interés la *Escherichia Coli*, la cual indica contaminación fecal.

Para dicho análisis se utilizan bacterias indicadoras de contaminación, cultivos e incubación y, en general, se desea que en muestras de 100 ml de agua, no se detecte la presencia de las bacterias del grupo coliforme, más aun si el agua es para consumo humano.

5.2. Calidad del agua subterránea

Los análisis de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de las muestras de agua, son indicadores del nivel de calidad que ésta posea. Según el uso que se le dará al recurso, las cantidades permisibles de dichos parámetros varían según el estándar o norma que se utilice como referencia. En base a los resultados se determina si el recurso es adecuado para el uso deseado o se deben emplear métodos de tratamiento para mejorar la calidad.

5.2.1. Normas de calidad de agua para consumo humano

Cuando el agua subterránea será destinada para el consumo humano, ésta debe estar libre de agentes patógenos que produzcan perjuicios en la salud del consumidor. Para lograr que las aguas posean una calidad adecuada, existen normas que indican los requerimientos para que el agua sea potable. Estas normas existen en diferentes países y muchas se basan en estándares

internacionales como los de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA (Anexo P) y de la Organización Mundial de la Salud OMS por medio de sus guías para el agua potable.

En Guatemala, por ejemplo, existe una comisión nacional de normas para establecer límites y requerimientos relacionados con diversos ámbitos. Para la calidad del agua para el consumo humano se debe consultar la norma COGUANOR CTG-29001, la cual contiene límites máximos y permisibles para diversos parámetros que caracterizan el agua (Anexo O).

Dentro del territorio nacional, la calidad del agua subterránea varía según las características hidrogeológicas de la región, así como por posibles fuentes de contaminación que puedan estar cercanas al lugar de la captación de agua. En los Anexos Q y R, se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de muestras de agua en dos puntos distintos de la zona 16 de la ciudad capital. Al mismo tiempo, en el Anexo S, se presenta los resultados de análisis de agua para un pozo ubicado en el km. 18.8, carretera al Pacífico, Villa Nueva. Los análisis de agua fueron realizados por diferentes laboratorios en diversas fechas.

A continuación se presentan algunos datos antiguos (año 1997), obtenidos de análisis de muestras de agua de pozos ubicados en diversos pozos de la ciudad de Guatemala:

Tabla No. 25: resultados de análisis de agua subterránea en diversos puntos de la ciudad capital.

	Pozo Zona 18	Pozo Mixco	Pozo Zona 11	Pozo Zona 12
pH	6.8	7.6	7.1	7.5
Turbiedad	5.6	4.2	3.6	3.9
Olor	No rechazable	No rechazable	No rechazable	No rechazable
Cl [mg/l]	2.47	24.7	5.4	5.9
SO₄ [mg/l]	113	8.2	7.7	4.3
Sólidos Totales Disueltos [mg/l]	95	76	50	68

Coliforme fecal MPN/100 ml (número más probable en 100 ml de agua).	< 3	< 3	< 3	< 3
--	-----	-----	-----	-----

Fuente: adaptación de Evaluación de Recursos de Agua de Guatemala, Cuerpo de Ingenieros de los EEUU (2000).

5.2.2. Agua subterránea para uso agrícola y uso industrial

Dentro de esta categoría se incluye el agua subterránea destinada para actividades de riego de cultivos y para consumo animal (ganado). Para ésta último uso, el agua subterránea debe poseer calidad adecuada para no perjudicar la salud del animal.

En cuanto a uso para riego, dependiendo del cultivo, la calidad del agua subterránea a utilizar variará. De manera general se desea que se respeten los límites de agua potable en cuanto al contenido de cloruros, nitratos y sulfatos. En el Anexo T se muestran ciertos límites para que el agua subterránea sea apta para uso de riego. Dichos límites son parte del documento “Water quality for agriculture” de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).

Para el uso industrial, el agua subterránea variará su calidad según el proceso en el cual será empleada. La diversidad de actividades industriales hace que se deba determinar la calidad del agua deseada tomando en cuenta no solamente el producto final para el cual se realiza dicha actividad, sino también se debe tomar en cuenta el equipo a utilizar para protegerlo de daños que pueden ocurrir por la naturaleza del agua (no debe ser agresiva y no debe generar incrustaciones en el equipo).

5.3. Contaminación del agua subterránea

Las características químicas, físicas y biológicas del agua subterránea algunas veces se ven afectadas a causa de efectos naturales o artificiales y resultan ser perjudiciales para la naturaleza del agua, afectando su calidad. Cuando se habla de contaminación, la más común hace referencia a modificación de la calidad del agua subterránea debido a actividades humanas, ya sea de origen doméstico, industrial o agropecuario. La contaminación a causa de efectos naturales se produce por razones en donde las actividades humanas no son la causa.

La contaminación en aguas subterráneas es diferente que en aguas superficiales; por ejemplo, la detección de algún tipo de contaminación es más fácil en aguas superficiales ya que se percibe visiblemente de manera rápida y en aguas subterráneas se necesita de la extracción del recurso para poder obtener muestras del mismo y la contaminación puede haber estado presente desde mucho tiempo atrás. Por otro lado, la velocidad del flujo en aguas superficiales es rápida, lo cual es benéfico para cuestiones de contaminación. Por el contrario, el flujo en aguas subterráneas es lento y por lo tanto la contaminación es más persistente.

5.3.1. Fuentes de contaminación de agua subterránea

La manera en cómo se origina la contaminación y cómo los contaminantes llegan a las formaciones acuíferas puede variar. Las vías de llegada más comunes de los contaminantes a los acuíferos son las siguientes:

- Filtración de agua de un río con influencia sobre el acuífero.
- Infiltración superficial, ya sea por sustancias situadas en la superficie o por medio del agua de lluvia.
- Filtración y/o disolución de sustancias ubicadas en el subsuelo.

En cuanto a fuentes de contaminación, se pueden mencionar las siguientes:

Tabla No. 26: fuentes de contaminación de agua subterránea.

Tipo de fuente	
Contaminación derivada de descarga de sustancias	<ul style="list-style-type: none"> • Infiltración de fosas sépticas y pozos negros o de absorción. En América Latina es una de las principales fuentes de contaminación de agua subterránea debido a la falta de saneamiento básico en muchas regiones. • Agua residual en la superficie.
Contaminación de espacios de almacenamiento, disposición y tratamiento de sustancias	<ul style="list-style-type: none"> • Basureros y rellenos sanitarios. • Almacenamiento de residuos peligrosos. • Cementerios. • Almacenamiento superficial y subterráneo de derivados de petróleo. • Disposición de residuos radioactivos.
Contaminación durante el transporte de sustancias	<ul style="list-style-type: none"> • Conducción de aguas residuales. • Transporte de sustancias.
Contaminación como resultado de diversas actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Actividades de riego que implican sustancias como pesticidas, herbicidas y fertilizantes. • Alimentación de animales. • Desagüe urbano. • Detritos y drenaje de minería.
Contaminación derivada de descargas inducidas	<ul style="list-style-type: none"> • Pozos de petróleo y gas. • Pozos de exploración/observación. • Excavaciones.
Contaminación de origen natural	<ul style="list-style-type: none"> • Lixiviado natural. • Agregado natural de sustancias contenidas en depósitos radioactivos, petrolíferos o metalíferos. • Intrusión salina o interacción con agua de calidad diferente.

Fuente: Valencia, M. (2010).

5.3.2. Causas y efectos de la contaminación del agua subterránea

Según la fuente de contaminación, las consecuencias sobre el agua subterránea son variables. En la siguiente tabla se muestran algunos de los problemas más comunes junto con el tratamiento que dicho problema requiere para ser eliminado:

Tabla No. 27: problemas causados por la contaminación del agua subterránea.

Causa	Efectos producidos	Tratamiento (básico o sugerido/viable).
Agua con acumulación de sales minerales que causa aumento de la dureza en el agua.	<ul style="list-style-type: none"> • Obstrucción de tubería y componentes de equipos. • Cambio de sabor en el agua. • Bacterias pueden desarrollarse en zonas con incrustaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Agregar inhibidor de dureza o ablandador de agua.
Presencia de cantidades inadecuadas de hierro y/o manganeso.	<ul style="list-style-type: none"> • Agua con sabor metálico. • Obstrucciones en tubería e incrustaciones en equipos electrodomésticos o industriales. • Agua con color indeseable (negro-rojizo). 	<ul style="list-style-type: none"> • Aireación y filtración. • Desinfección. • Eliminación de fuente de contaminación.
Presencia de bacterias reductoras de sulfatos y/o presencia de sulfuro de hidrógeno (compuestos de azufre. Una fuente de compuestos de azufre es la acción volcánica).	<ul style="list-style-type: none"> • Agua con olor y sabor a huevo podrido. • El consumo de agua puede llevar a problemas de piel, ojos y respiratorios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desinfección. • Aireación y filtración.
Presencia de cloruros o agua de mar o salina.	<ul style="list-style-type: none"> • Agua con sabor salado. • El exceso de estos minerales puede causar obstrucciones en tuberías y 	<ul style="list-style-type: none"> • Control en la reducción del caudal de extracción.

	equipo electrodoméstico o industrial.	
Presencia de patógenos.	<ul style="list-style-type: none"> • Agua que causa enfermedades gastrointestinales (fiebre tifoidea, disentería, diarrea). 	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de fuente de contaminación. • Desinfección del pozo. • Desinfección del agua. • Abandono de pozo.
Presencia de petróleo.	<ul style="list-style-type: none"> • Agua con olor y sabor indeseados. • Aumento de salinidad del agua. • El consumo de agua puede causar dolor de cabeza, vómitos, sarpullidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de fuente de contaminación.

Fuente: Valencia, M. (2010).

5.3.3. Tratamientos para agua contaminada

Según la naturaleza que presente el agua subterránea, ésta puede requerir o no que se le aplique algún tratamiento para mejorar su calidad y poder ser utilizada según se desee.

Una de las grandes diferencias entre las aguas superficiales y las subterráneas es la turbiedad que presenta cada una; las superficiales casi siempre poseen mayor cantidad de sólidos suspendidos, lo cual requiere más tratamientos previos a una filtración y desinfección. Generalmente, cuando el agua superficial será utilizada como potable, ésta debe tratarse completamente por medio de una planta de tratamiento que incluya procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (procesos convencionales). Por medio de la coagulación y floculación se logra que la materia suspendida se conglomere en la superficie del agua y posteriormente se precipita en el fondo por medio de gravedad, a través de tanques de sedimentación. Estos tratamientos eliminan la materia suspendida de mayor tamaño en el agua y se procede a filtrarla, para retener la materia de menor tamaño. Por último, el agua

debe ser desinfectada por medio de algún método, ya sea cloración, rayos ultravioleta, ozonización, entre otros.

Con el agua subterránea lo anterior no se requiere completamente ya que, como se mencionó, la cantidad de materia suspendida, y por lo tanto el nivel de turbiedad, es mucho menor que con el agua superficial. A continuación se presentan los tratamientos más usuales y convencionales para mejorar la calidad del agua subterránea:

- Aireación: por medio de este proceso, el agua es puesta en contacto con el aire, aumentando el contenido de oxígeno, para que se logre la liberación de gases presentes en la misma, que causen que calidad de esta se vea afectada. También se logra un proceso de oxidación de metales disueltos que posteriormente quedan en suspensión en el agua y se procede a filtrarla.

La aireación de las aguas subterráneas permite que se remueva hierro y manganeso presente en el agua, así como sulfuro de hidrógeno, elementos y compuesto que hace que el agua posea un sabor, olor y/o color indeseables. También se disminuye el contenido de dióxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles.

Los procesos de aireación pueden variar su mecanismo, ya sea de manera mecánica o por gravedad.

- Aireación mecánica: utiliza energía mecánica para mezclar el agua y así crear turbulencia y transporte de aire. Uno de estos sistemas son las bombas verticales con impulsor sumergido, en donde se bombea el agua, se crea movimiento y burbujas de aire. Otro tipo es el sistema de inyección de aire, como el difusor-hélice, el cual consiste en un eje hueco rotativo por donde el aire

entra en la parte superior que se ubica fuera de la superficie del agua; posteriormente este aire pasa por el difusor y la hélice y finalmente se crean pequeñas burbujas que entran al agua.

Existen también los sistemas difusores sumergidos en donde se utilizan tuberías con agujeros finos que permiten la salida de aire, o bien, difusores de membranas, ya sea en forma tubular o circular.

También hay sistemas de turbinas, ya sea que posean o no, proyección de agua hacia la superficie.

Imagen No. 60: difusor circular de membrana.



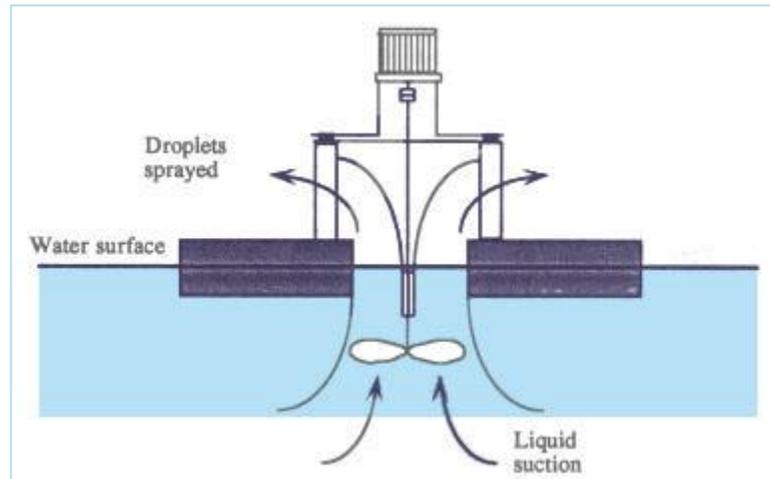
Fuente: Biotecnología Industrial (2012).

Imagen No. 61: difusores tubulares de membrana.



Fuente: Green Business Technology (2015).

Imagen No. 62: aireador de turbina con proyección de agua hacia la superficie. La turbina sumergida succiona el agua, ésta asciende y posteriormente sale a la superficie para volver a caer al cuerpo de agua.



Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations (1996).

- Aireación por gravedad: este tipo de aireación es más convencionales y económicos ya que funciona por gravedad y no necesita motores para funcionar.

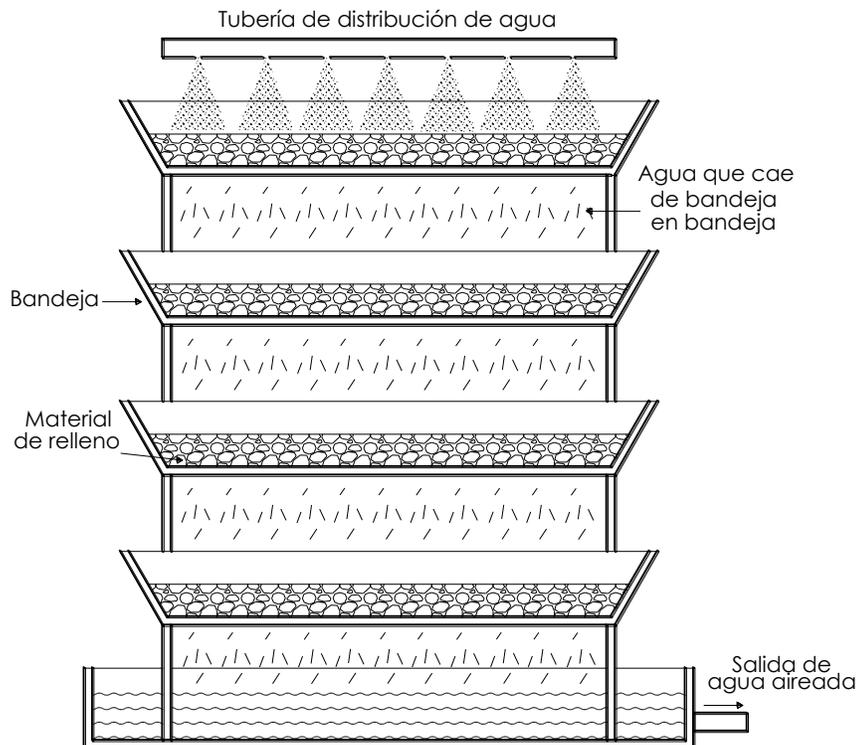
Entre los métodos de aireación por gravedad se encuentra la aireación de bandeja. Este sistema se conforma de un conjunto

de bandejas con agujeros en la parte inferior (generalmente se colocan de 3 a 9 bandejas), colocadas una sobre otra, separadas de 30 a 75 cm. entre sí. El agua es proporcionada en la parte superior de la torre de bandejas y va cayendo de bandeja en bandeja; estas bandejas poseen un material de relleno para aumentar la superficie de contacto entre el aire y el agua.

El material de relleno puede ser caliza, carbón activado u otro material que pueda absorber minerales, generalmente abarcando un espesor entre 5 y 15 cm.

Dependiendo del área total de contacto, el caudal a tratar variará; por cada metro cuadrado de lecho de contacto se puede tratar de 3.5 a 7 l/s.

Imagen No. 63: vista en elevación de aireador de bandejas.

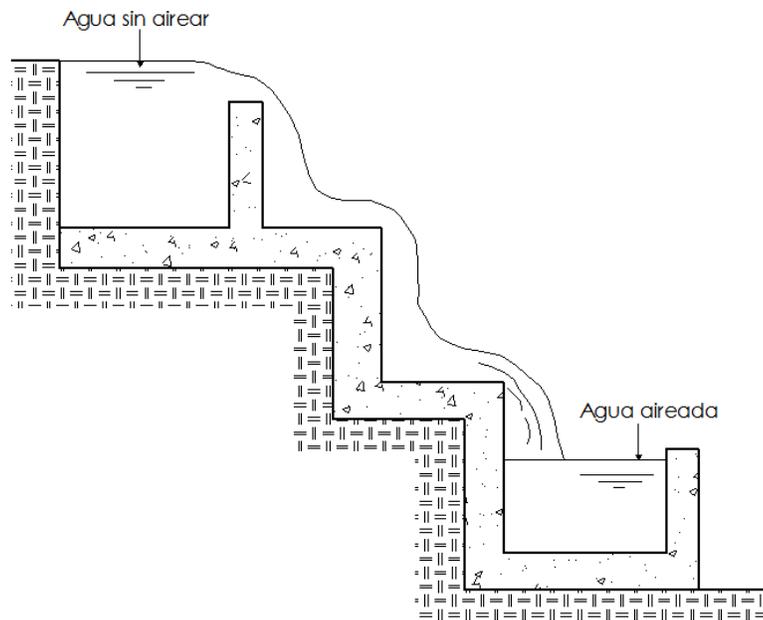


Fuente: elaboración propia (2017).

Otro sistema de aireación por gravedad es el de cascadas; su funcionamiento se basa en la caída de agua en escalones.

Convencionalmente, estos escalones se elaboran de concreto y cuando el agua cae de escalón a escalón, en el área de salpicadura es donde se da la aireación. Generalmente, los escalones tienen una altura entre 20 y 40 cm, con una altura total de 1 a 3 m. Según el caudal a tratar y su relación con el área horizontal del aireador, la carga hidráulica de estos puede variar de 10 a 30 l/s*m². Con una altura de 40 cm de cascada, se pueden tratar aproximadamente 100 l/s.

Imagen No. 64: perfil de aireador de cascada.



Fuente: adaptación de Vera, Nancy (2007).

- Filtración: por medio de procesos de filtración es posible retener partículas suspendidas presentes en el agua. Por medio de las unidades de filtración (filtros) se logra la remoción de materia particulada como arcilla y materia orgánica, precipitados de hierro y manganeso, microorganismos, entre otros. Un proceso de filtración posterior al de

aireación permite que materia que ha sido oxidada pueda ser removida. Aunado con la remoción de material suspendido, un filtro diseñado correctamente puede remover microorganismos y ser un tratamiento de desinfección.

La filtración se logra a través de un medio poroso (lecho filtrante), el cual puede variar su composición, espesor, arreglo del material. El lecho filtrante puede estar compuesto de un solo material granular como arena o una combinación de varios materiales, como arena, antracita y grava, por ejemplo. También existen filtros de membrana y de carbón activado.

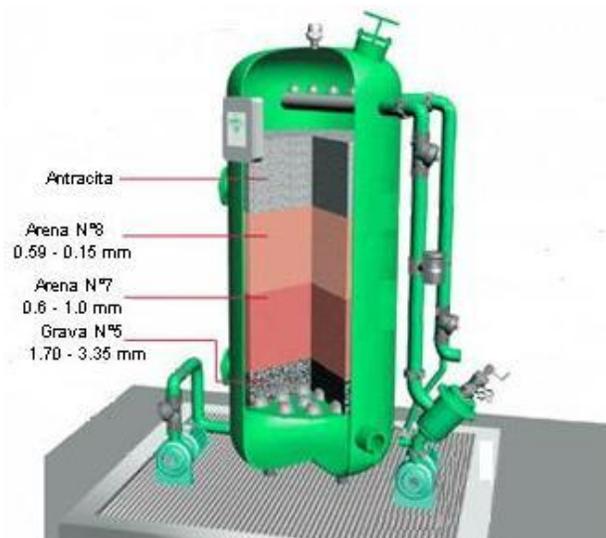
El proceso de filtrado en arena puede ser rápido o lento; es lento cuando el tamaño efectivo de la arena varía entre 0.25 mm – 0.4 mm y es rápido cuando el tamaño varía entre 0.4 mm – 1.2 mm. La granulometría empleada determina la tasa de filtración: para una filtración lenta, la tasa es de 0.1 -0.3 m³/m²/h mientras que para la filtración rápida es de 5 -15 m³/m²/h.

En un filtro lento, la materia retenida queda entre los poros del material del lecho filtrante, en los primeros centímetros de la capa, y cada cierto tiempo requiere limpieza que implica la remoción de uno o dos centímetros del material en la parte superficial para luego colocarlo limpio o bien, nuevo. Cuando no se limpia, se genera obstrucción y la eficiencia del filtro descende. Por otro lado, con un filtro rápido, los poros del lecho son más grandes y por lo tanto la materia llega al fondo del filtro, la cual es removida por retrolavado (lavado por corriente de agua ascendente que no implica mucho tiempo y se puede realizar diariamente).

La manera más convencional de filtración, ya sea rápida o lenta, es donde el lecho arenoso se coloca sobre una capa de grava y el flujo de

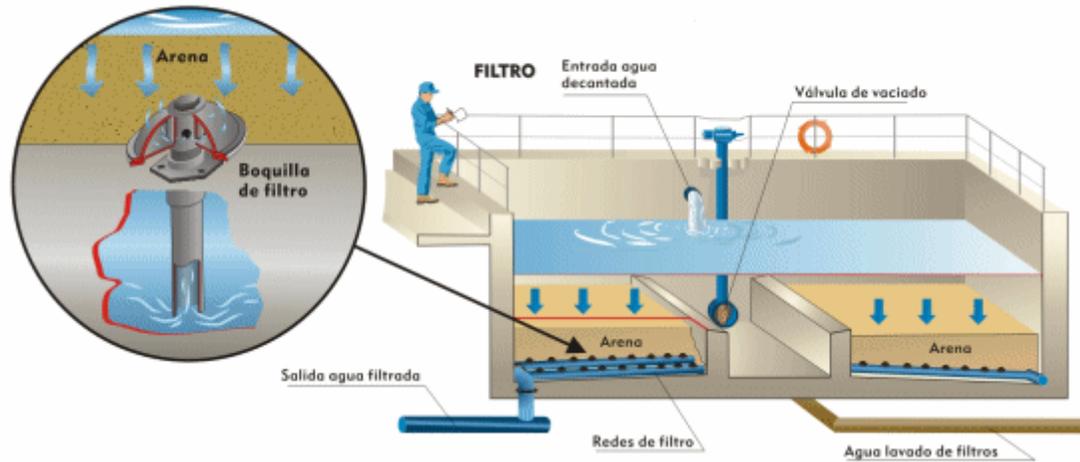
agua es descendente; el agua ingresa a la unidad de filtración e inicia el recorrido en la capa de arena, terminando en la capa inferior de grava. También se da el caso de que el flujo sea ascendente e ingrese a la unidad de filtración desde la parte inferior hacia arriba. Con el paso del tiempo se han desarrollado diversas tecnologías para mejorar la eficiencia del filtrado y una de ellas es la utilización de un lecho filtrante conformado por materiales de diversas densidades y granulometrías, aunado con un flujo de agua ascendente. Con una filtración de flujo ascendente, el agua recorre el lecho filtrante en sentido decreciente de la granulometría del mismo, o sea que el recorrido del agua inicia en el material con la mayor granulometría y finaliza con la más pequeña. Con este tipo de filtración y arreglo del lecho filtrante, se logra que la permeabilidad de éste disminuya con la profundidad, lo que permite que el material que se desea remover pueda penetrar y llegar a las capas más finas del lecho. El material grueso debe poseer menor densidad mientras que el material fino debe poseerla mayor (se utilizan arenas, antracita, carbón, entre otros).

Imagen No. 65: filtro de tanque de varias capas de material.



Fuente: Inquinat (2015).

Imagen No. 66: ejemplo de filtro lento convencional, con flujo descendente.



Fuente: El Agua Potable (2002).

- **Ablandamiento de agua:** cuando el agua subterránea presenta elevadas cantidades principalmente de calcio y magnesio, es necesario reducirlas y se logra por medio del ablandamiento de la misma, o sea, reducir su dureza. Para lograr dicha reducción se emplean intercambiadores iónicos que se aplican para que los iones duros que posea el agua intercambien lugar con los iones blandos de los intercambiadores. Un ejemplo de intercambio se da entre el calcio y magnesio con el sodio y potasio, elementos contenidos en sales (cloruro de sodio y cloruro de potasio). Un sistema utilizado actualmente es el de resinas; éstas poseen los iones de sodio y/o potasio y el intercambio de iones se lleva a cabo cuando el agua se mueve a través del material. Con el paso del tiempo, las resinas se saturan de iones de calcio y magnesio y deben regenerarse. Para ello se necesita una recarga de iones de sodio y/o potasio, situación que puede conseguirse al lavar la resina en soluciones con las sales mencionadas para sustituir el calcio y magnesio y así poder volver a hacer eficiente el sistema de ablandamiento.

Imagen No. 67: ejemplo de tanque ablandador y tanque con salmuera para regeneración de resina.



Fuente: OsmoVic (2015).

- **Desinfección:** es un procedimiento primordial dentro del proceso de tratamiento de agua para consumo humano, con el fin de eliminar microorganismos patógenos responsables de producir enfermedades.

Existen diversos métodos para realizar la desinfección del agua, siendo el más común la cloración de la misma. Es un método accesible económicamente y de fácil empleo. El cloro puede ser aplicado de diversas formas como hipoclorito de sodio y calcio, de forma gaseosa o cal clorada. Sin importar qué método se utilice, es necesario realizar una correcta dosificación de la sustancia clorinadora, en base a la cantidad de agua que será tratada. En la sección 4.7. Desinfección del pozo, se describe las cantidades adecuadas de hipoclorito de sodio y de calcio para un determinado volumen de agua.

Otro método de desinfección del agua es por medio de radiación ultravioleta, el cual consiste en exponer cierto tiempo el agua a dicha radiación, que tendrá una intensidad determinada. Los rayos actúan a manera que afectan el ADN del microorganismo y logran su destrucción. Es un método muy eficiente y que requiere poco tiempo para llevarse a cabo.

La ozonización del agua es otro método para su desinfección. Para aplicar ozono al agua se necesita un equipo que prepare y genere el gas para aplicarlo al agua. El procedimiento inicia con la preparación de gas, ya sea oxígeno puro o aire, el cual debe enfriarse a una temperatura adecuada y después se realizan procesos dieléctricos que permiten que se convierta en ozono y pueda aplicarse al agua.

Otra solución para la desinfección del agua es la utilización de rayos solares, aunque es un método menos eficaz aunque simple y económico. El agua se dispone en recipientes que estén elaborados de material absorbente de calor (es adecuado utilizar recipientes negros ya que absorbe mejor el calor). Es un método que generalmente se emplea al momento de no poderse utilizar cloración u otro método, debido a los costos y facilidad de empleo, por ejemplo, en comunidades rurales donde existen dificultades económicas. Mediante la radiación solar se logra eliminar ciertos microorganismos presentes en el agua y así mejorar la calidad de la misma, aunque como se mencionó, no presenta la misma eficiencia que el resto de métodos de desinfección.

Con el paso del tiempo se han desarrollado sistemas que mejoran la captación del calor solar y su transferencia hacia el agua. Existen calentadores solares, los cuales constan de un colector de energía solar de marco de aluminio y tubos de cobre de color negro, cubiertos por una superficie de vidrio (un panel solar), el cual se une por otras tuberías de

cobre al tanque donde estará el agua; el tanque generalmente es de plástico y fibra de vidrio con aislamiento de poliuretano. Existen también los sistemas de estufas o cocinas solares, las cuales consisten en dos cajas dispuestas una dentro de otra; la radiación se atrapa en la caja pequeña y se posee una superficie de vidrio para evitar que salga. Dentro de la caja hay ollas que contienen el agua, a las cuales se les transfiere el calor.

VI. CONCLUSIONES

1. La infiltración y percolación del agua en el subsuelo queda condicionada según parámetros hidrogeológicos tales como la porosidad y permeabilidad del material, características que dependerán de la naturaleza del mismo, que varían según las diversas regiones de la Tierra. Al mismo tiempo, el almacenamiento y movimiento del agua subterránea en un acuífero, queda condicionada también por dichos parámetros junto con características de transmisividad y capacidad de almacenamiento. Para efectos de un pozo, los aspectos hidrogeológicos mencionados deben ser determinados y analizados para lograr que el diseño de la obra sea adecuado y ésta posea un desempeño eficiente.
2. Para el aprovechamiento y extracción de agua subterránea se pueden emplear diversas obras, las cuales varían en funcionamiento y eficiencia, Se requiere de una evaluación adecuada de las condiciones hidrogeológicas de la región, aspectos técnicos y económicos que permitan la selección correcta de la obra a utilizar.
3. En pozos excavados verticalmente, es necesario el análisis del abatimiento del nivel del agua según la naturaleza del acuífero y las condiciones de bombeo, por medio de la utilización de principios de hidráulica de pozos. Dicho análisis manifiesta su importancia en la determinación de características hidrogeológicas del acuífero y en la determinación de caudales de producción de agua del pozo, para lograr encontrar el más eficiente según lo requerido. Las pruebas de bombeo que se realicen deben realizarse en tiempos determinados, al igual que las mediciones de nivel de agua y recuperación del mismo. Para que dichas mediciones sean más certeras y brinden resultados más confiables, resulta adecuado la utilización de pozos de observación, los cuales deben estar ubicados a distancias correctas del pozo de bombeo. Según los resultados de las pruebas de

bombeo que brindan información del acuífero y del rendimiento del pozo, se logra un análisis de datos que permite una correcta terminación de la obra.

Cuando se perfora y equipa un pozo mecánico, existen numerosos criterios de selección que deben evaluarse de manera técnica, como la ubicación del mismo, el tipo de perforación y equipo a utilizar, tipo de tubería de revestimiento y rejilla, bomba, entre otros. Esta profundidad junto con características de la bomba a utilizar y otros aspectos, determinan la profundidad de la tubería de revestimiento a colocar.

4. Debido al constante contacto del agua subterránea con los diversos materiales de las formaciones, ésta adquiere un carácter químico diferente al de las aguas superficiales. Es por ello que es necesario realizar un análisis de muestra de agua, el cual indicará la calidad de la misma y se podrá determinar los tratamientos necesarios o no para el mejoramiento de dicha calidad.

VII. RECOMENDACIONES

Técnicas:

- Revisar información existente de las condiciones hidrogeológicas de la región donde se desee realizar la obra de captación de agua subterránea, para conocer previamente características importantes y así aplicar los procedimientos adecuados y evitar operaciones innecesarias que puedan conllevar a más gastos económicos.
- Analizar la naturaleza de las formaciones geológicas a perforar, así como el diámetro de perforación requerido por el pozo, para seleccionar el método de perforación que se adecúe mejor a la situación.
- Utilizar agua con calidad adecuada para el fluido de perforación ya sea por medio de percusión, rotación o rotopercusión, ya que ésta circula por todo el perímetro de la perforación. El agua debe ser libre de agentes contaminantes que perjudiquen la naturaleza de la formación y del agua subterránea.
- Evaluar qué método de desarrollo de pozos es el mejor ya que es un proceso importante que permite que el desempeño de la obra sea correcto y aumenta su vida útil.
- Realizar el análisis de calidad de agua por medio de laboratorios certificados y con experiencia, que garanticen que los resultados de los análisis físicos, químicos y biológicos sean confiables y certeros.

- Realizar muestreos cada cierto tiempo para corroborar que los valores de los parámetros no hayan cambiado negativamente, por ejemplo, 2 veces al año.

A las entidades académicas nacionales:

- Implementar cursos relacionados con el aprovechamiento del agua subterránea, donde se presenten y expliquen aspectos técnicos que deben aplicarse al momento de realizar obras de extracción del recurso.

A individuos y entidades profesionales y gubernamentales:

- Crear documentos que funcionen como guía estándar nacional, aplicada al campo del aprovechamiento de agua subterránea, para que se trabaje bajo lineamientos normados que prevengan la mala explotación del recurso y se logre trabajar eficientemente.
- Realizar estudios de la situación actual del agua subterránea en Guatemala para evaluar la evolución del estado del recurso comparado con información antigua. En base a dicha información se lograría proponer proyectos para la mejora de la gestión del recurso hídrico subterráneo.
- Fomentar la creación de cursos libres, diplomados, congresos, etc., para la retroalimentación de la importancia del correcto aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo.

VIII. REFERENCIAS

- American Ground Water Trust. The importance of sealing a well casing. Consultado en internet el 12/09/2016, en: <https://agwt.org/content/sealing-well-casing>
- American Water Works Association. (1968). Agua: su calidad y tratamiento. (Trad. Jack M. Verrey). México. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana.
- Arrieta, M. (2010). Revestimiento y Cementación de Pozos, presentación. Bolivia.
- Asociación de Laboratorios de Control de Calidad de la Construcción de Castilla y León. Drenaje-Drenes Subterráneos. Consultado en internet el 11/05/2016, en: <http://www.alcal.org/legislacion/pg3/Parte%204-%20Drenaje-%20Drenes%20subterraneos.pdf>
- Auge, M. Perforaciones Hidrogeológicas. Manuscrito inédito. Universidad de Buenos Aires, investigación del CONICET. Argentina.
- Barberii, E. (1998). El pozo ilustrado. (4a. Ed.). Caracas. Fondo Editorial del Centro Internacional de Educación y Desarrollo.
- Barra, L. Hidráulica de Pozos. Manuscrito inédito. Universidad Católica de Chile. Chile.
- Bautista, Dagoberto. (2014). Reconocimiento hidrogeológico de la zona urbana del municipio de Quetzaltenango, departamento de Quetzaltenango. Tesis inédita. Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Biblioises, biblioteca digital del Instituto Salesiano de Estudios Superiores. Perforación por rotación. Consultado en internet el 09/08/2016, en: <http://www.biblioises.com.ar/Contenido/600/620/Minas%20perforaciones%20.pdf>
- Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Conceptos modernos sobre el diseño de unidades de filtración. Consultado en internet el 14/02/2017, en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/002320/002320-concep.htm>
- Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Desinfección del agua. Consultado en internet el 21/02/2017, en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/fulltext/libro.pdf>
- Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Filtración rápida. Consultado en internet el 14/02/2017, en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/020867/020867-17.pdf>
- Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Filtros de flujo ascendente. Consultado en internet el 14/02/2017, en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/027757/027757-12d.pdf>
- Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Filtración lenta. Consultado en internet el 14/02/2017, en: http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d23/069_Filtro_Lento_de_Arena/Filtro_Lento_de_Arena.pdf
- Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Guía para la selección de equipos de bombeo para sistemas abastecimiento de agua y saneamiento para el medio rural. Consultado en internet el 02/11/2016, en:

<http://www.bvsde.ops-oms.org/tecapro/documentos/miscela/guiaselectquiposbombeo-rural.pdf>

- Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Guía para el diseño de estaciones de bombeo de agua potable. Consultado en internet el 03/11/2016, en: http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guia/calde/2sas/d23/023_Diseño_estaciones_bombeo/Dise%C3%B1o%20estaciones%20de%20bombeo.pdf
- Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Métodos de perforación de pozos. Consultado en internet el 25/07/2016, en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/020867/020867-22.pdf>
- Campos Aranda, D.F. (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico. (3a. Ed.). México. Editorial Universitaria Potosina.
- Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas. Síntesis de la Geología de Guatemala. Manuscrito inédito. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Chanda, S. (2013). Well Cementing Technology, presentación. Estados Unidos.
- Ciclo Hidrológico. Condensación. Consultado en internet el 13/04/2016, en: <http://www.ciclohidrologico.com/condensacin>
- Civil Geeks: Ingeniería y Construcción. Obras de Captación: Sistema de Agua Potable. Consultado en internet el 25/05/2016, en: <http://civilgeeks.com/2010/10/08/obras-de-captacion-sistema-de-agua-potable/>
- Collazo, M., Montañó, J. (2012). Manual de Agua Subterránea. (1a. Ed.). Montevideo, Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

- Comisión Nacional del Agua. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Manuscrito inédito. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Del Castillo Flores, J., Hurtado Luna, O. (2009). Diseño de tubería de Revestimiento para Pozos de Alta Presión y Alta Temperatura. Tesis inédita. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Distrito de Mobile y Centro de Ingeniería Topográfica del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América. Evaluación de Recursos de Agua de Guatemala. Manuscrito inédito. Ingenieros del Comando Sur de los Estados Unidos. Guatemala.
- Donado Garzón, L. (1999). Hidráulica de Pozos. Manuscrito inédito.
- Edward E. Johnson, Inc. (1975). El agua subterránea y los pozos. (1a. Ed.). Minnesota, Estados Unidos. Johnson Division, UOP Inc.
- Enciclopedia y Biblioteca Virtual de las Ciencias Sociales, Económicas y Políticas. Primera Parte: El Agua. Consultado en internet el 04/02/2017, en: <http://www.eumed.net/libros-gratis/2005/jmfb-h/1u.htm>
- Estaba, J. Tuberías de Revestimiento y Cementación de Pozos. (2010). Manuscrito inédito.
- Facultad de Ingeniería, Universidad de la República-Uruguay. Captaciones de agua subterránea y su construcción. Consultado en internet el 19/05/2016, en: <http://www.fing.edu.uy/imfia/ghs/subterrugas/temas/captaciones/captaciones.htm>

- Forsythe, W. (1985). Física de suelos: manual de laboratorio. (1a . Ed., 2a. Reimpresión). San José, Costa Rica. Editorial IICA.
- Fuentes Yagüe, J. Aguas Subterráneas. Manuscrito inédito. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.
- Gibson, U., Singer, R. (1976). Manual de los pozos pequeños: localización, diseño, construcción, uso y conservación. (2a. Ed. 1a. Reimpresión). México. Editorial Limusa.
- Global Water Partnership. Ciclo Hidrológico. Consultado en internet el 13/04/2016, en: http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Ciclo_Hidrologico.pdf
- Gonzáles, J., Gorgua, I. (2009). Pozo Ranney, presentación. Hidalgo, México.
- Grundfos Industrial Solutions. (2004). Manual de Bombeo. Manuscrito inédito. GRUNDFOS Management A/S.
- Hernández, I., Timón, S., Arroyo, E. (2012). Manual técnico para la ejecución de pozos. (1a. Ed.). España. Mythagos Estudio.
- House of Water and environment. Chapter Five: Groundwater Wells Design. Consultado en internet el 05/09/2016, en: <http://www.hwe.org.ps/Education/Birzeit/GroundwaterEngineering/Chapter%205%20-%20Groundwater%20Well%20Design.pdf>
- Instituto Geológico y Minero de España. Composición química de las aguas subterráneas naturales. Consultado en internet el 07/11/2016, en: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf

- Instituto Geológico y Minero de España. Los sistemas acuíferos. Consultado en internet el 05/10/2016, en: http://www.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro20/pdf/lib20/los_s_a_1.pdf
- Instituto Geológico y Minero de España. Método de bombeos escalonados. Consultado en internet el 26/10/2016, en: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro35/pdf/lib35/in_7.pdf
- Instituto Geológico y Minero de España. Métodos en régimen variable. Consultado en internet el 18/10/2016, en: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro35/pdf/lib35/in_3.pdf
- Instituto Nacional del Agua. Diseño Hidrológico. Consultado en internet el 13/04/2016, en: http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf
- LA-WETnet: Red Latinoamericana de desarrollo de capacidades para la gestión integrada del agua. Conceptos Hidrológicos Básicos. Consultado en internet el 28/04/2016, en: <http://www.la-wetnet.org/lasmiradasdelagua/descargas/Conceptos%20Hidrol%C3%B3gicos%20B%C3%A1sicos.pdf>
- López-Geta, J., Fornés, J. (2009). Las aguas subterráneas: un recurso natural del subsuelo. (4a. Ed.). Madrid, España. Grupo Industrial de Artes Gráficas Ibersaf Industrial, S. L.
- Maderey, L. (2005). Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. (1a. Ed.). México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.

- Martínez Alfaro, P., Martínez Santos, P., Castaño, S. (2006). Fundamentos de Hidrogeología. (1a.Ed.). España. Ediciones Mundi-Prensa.
- Miliarium, Ingeniería Civil y Medio Ambiente. Cálculo de pérdidas de carga en tuberías. Consultado en internet el 03/09/2016, en: <http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp>
- Miliarium, Ingeniería Civil y Medio Ambiente. Cementación. Consultado en internet el 21/08/2016, en: http://www.miliarium.com/Proyectos/EstudiosHidrogeologicos/Anejos/Entubacion_Cementacion/Cementacion.asp
- Miliarium, Ingeniería Civil y Medio Ambiente. Engravillado. Consultado en internet el 31/08/2016, en: <http://www.miliarium.com/Proyectos/EstudiosHidrogeologicos/Anejos/Engravillado/Engravillado.asp>
- Miliarium, Ingeniería Civil y Medio Ambiente. Métodos de desarrollo físico-mecánico. Consultado en internet el 21/09/2016, en: http://www.miliarium.com/Proyectos/EstudiosHidrogeologicos/Anejos/Desarrollos/Metodos_Fisico_Mecanicos.asp
- Miliarium, Ingeniería Civil y Medio Ambiente. Perforación a percusión. Consultado en internet el 07/07/2016, en: http://www.miliarium.com/Proyectos/EstudiosHidrogeologicos/Anejos/Metodos_Perforacion/Percusion.asp
- Miliarium, Ingeniería Civil y Medio Ambiente. Tipos de pozos verticales. Consultado en internet el 11/05/2016, en: http://www.miliarium.com/Proyectos/EstudiosHidrogeologicos/Memoria/Captaciones/Tipos_Pozos.asp#Pozos_radiales

- Ministerio de Agroindustria, Presidencia de la Nación. Sistemas de Recirculación y Tratamiento de Agua. Consultado en internet el 08/02/2017, en:
http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/acuicultura/cultivos/otros/_archivos//000003-Sistemas%20de%20recirculaci%C3%B3n%20y%20tratamiento%20de%20agua.pdf
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental. Consultado en internet el 15/02/2017, en:
http://www.marn.gob.gt/paginas/Instrumentos_de_Evaluacin_Ambiental
- Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Comisión interinstitucional para analizar el fenómeno de agrietamiento de paredes en algunas casas adyacentes al proyecto minero Marlin I, San Marcos. Consultado en internet el 04/02/2017, en:
<http://www.comunicaciones.gob.gt/MinaMarlin/AspectosGeologicos.pdf>
- Pulido B., A. (2007). Nociones de Hidrogeología para Ambientólogos. (1a. Ed.). Almería, España. Editorial Universidad de Almería.
- Rocha Felices, Arturo. (2015). Fórmulas de Vertederos. Manuscrito inédito. Universidad Nacional de Ingeniería. Perú.
- Roscoe Moss Company. (1990). Handbook of Ground Water Development. (1a. Ed.). Los Ángeles, California. John Wiley & Sons.
- RWL Water. Qué es la aireación del agua. Consultado en internet el 08/02/2017, en: <https://www.rwlwater.com/que-es-la-aireacion-del-agua/?lang=es>

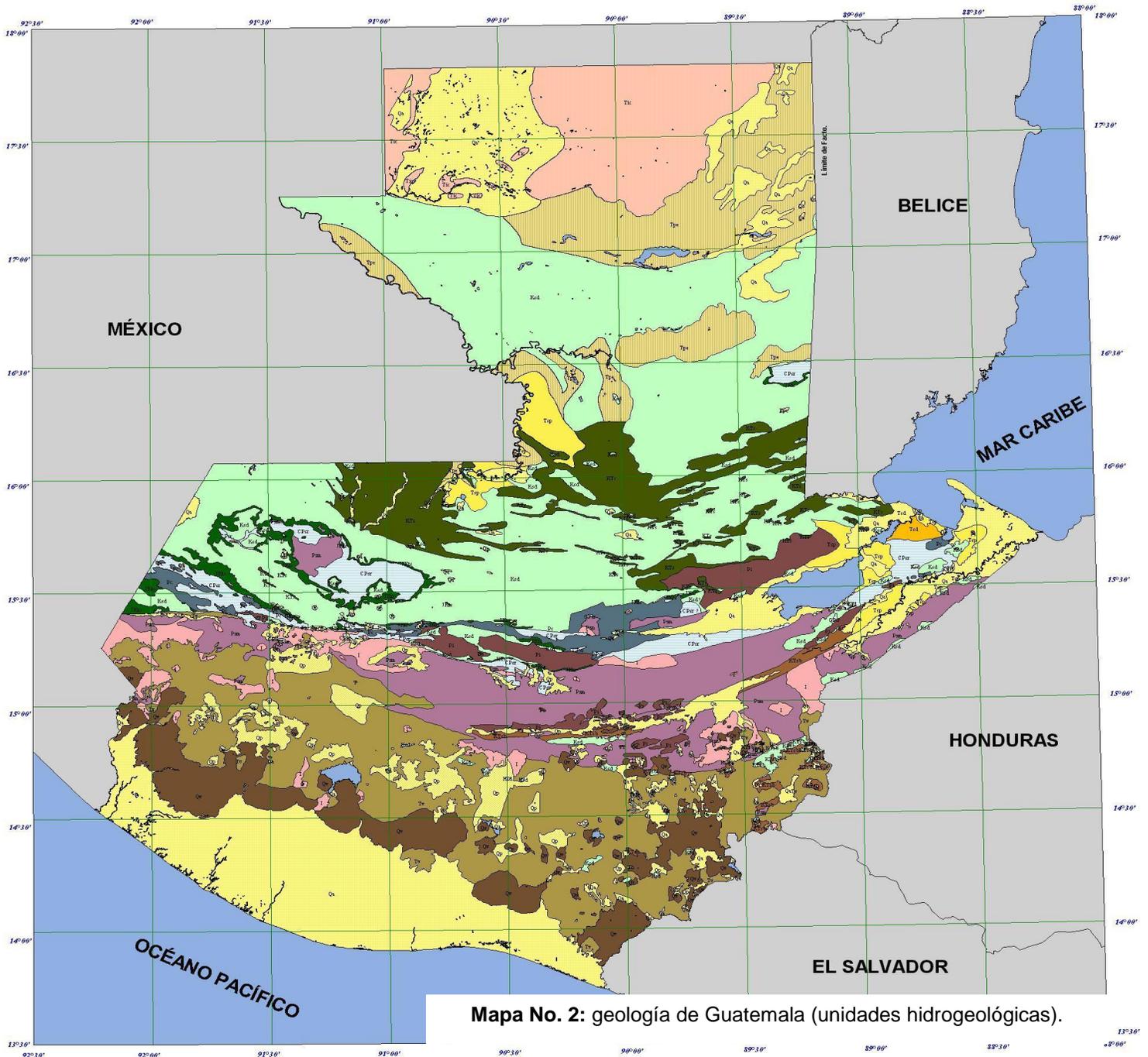
- Schulberger. Fundamentos de los fluidos de perforación. Consultado en internet el 02/08/2016, en: http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish13/spr13/defining_fluids.pdf
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Galerías Filtrantes. Consultado en internet el 12/05/2016, en: http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/FICHA%20TECNICA_GALER%C3%8DAS%20FILTRANTES.pdf
- Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación. Métodos de perforación. Consultado en internet el 10/08/2016, en: <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1189/2/T-SENESCYT-000319%20A.pdf>
- Sistemas Hidroneumáticos C.A. Manual de procedimientos para el cálculo y selección de Sistemas de Bombeo. Manuscrito inédito. Sistemas Hidroneumáticos C.A. Venezuela.
- UK Groudwater Forum. Groundwater flow and quality. Consultado en internet el 28/04/2016, en: http://www.groundwateruk.org/downloads/groundwater_flow_and_quality.pdf
- Universidad de Cantabria. Geología, Tema 10: Aguas Subterráneas. Consultado en internet el 05/05/2016, en: <http://ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/geologia/Materiales/tema10.pdf>
- Universidad de Navarra. Contaminación de las aguas subterráneas. Consultado en internet el 14/11/2016, en: <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/11CAgu/170AgSub.htm>

- Universidad De Piura. Capítulo 3: Infiltración. Consultado en internet el 25/04/2016, en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_136_147_89_1258.pdf
- Universidad de Salamanca, Hidrología, Hidrogeología. Acuíferos libres en régimen variable. Consultado en internet el 12/10/2016, en: http://hidrologia.usal.es/temas/Acuiferos_libres.pdf
- Universidad de Salamanca, Hidrología, Hidrogeología. Conceptos Fundamentales de Hidrogeología: Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico. Consultado en internet el 05/10/2016, en: http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf
- Universidad de Salamanca, Hidrología, Hidrogeología. Contaminación de las aguas subterráneas. Consultado en internet el 14/11/2016, en: <http://hidrologia.usal.es/temas/contaminacion.pdf>
- Universidad de Salamanca, Hidrología, Hidrogeología. Eficiencia de una captación: bombeos escalonados. Consultado en internet el 26/10/2016, en: <http://hidrologia.usal.es/temas/Eficiencia.pdf>
- Universidad Jaume. Sondeos a rotoperusión. Consultado en internet el 10/08/2016, en: <http://www.agua.uji.es/pdf/presentacionPEG05.pdf>
- Universidad Politécnica de Valencia. Perforación a rotoperusión. Consultado en internet el 10/08/2016, en: <http://victoryepes.blogs.upv.es/tag/perforacion-a-rotoperusion/>
- Valencia Cuesta, M. (2010). Tema 13: La calidad del agua subterránea. Presentación. Colombia.

- Vera Brito, N. (2007). Alternativas de potabilización para el agua que abastecerá a la ampliación del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Tesis inédita. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Watson, I., Burnett, A. (1995). Hydrology. An Environmental Approach. Theory and Applications of Ground Water and Surface Water for Engineers and Geologists. (1ra. Ed.). United States of America. CRC Press LLC.

IX. ANEXOS

Anexo A: unidades hidrogeológicas de Guatemala.



Mapa No. 2: geología de Guatemala (unidades hidrogeológicas).

<p>Rocas Sedimentarias CUATERNARIOS</p> <p>Qa ALUIONES CUATERNARIOS</p> <p>Rocas Sedimentarias Terciario Superior OLIGOCENO-PLEOCENO</p> <p>Tsp</p> <p>Rocas Sedimentarias Terciario Superior OLIGOCENO-MIOCENO</p> <p>Tst</p> <p>Formaciones Río Dulce (caliza), Lacantón (capas rojas), y Desempeño (conglomerados)</p> <p>Rocas Sedimentarias EOCENO</p> <p>Tic</p> <p>Formación Icaohé y parte del Grupo Petén (Yeso y margas)</p>	<p>Rocas Sedimentarias PALEOCENO-EOCENO</p> <p>Sedimentos marinos</p> <p>Rocas Sedimentarias CRETÁCICO-EOCENO</p> <p>Formación S'ubinal (capas rojas, predominantemente Terciarias)</p> <p>Rocas Sedimentarias CRETÁCICO-TERCIARIO</p> <p>Formación Segua, Campanano-Eoceno</p> <p>Predominantemente sedimentos clásticos marinos. Incluye Formaciones Toledo, Reforma y Cambio, y Grupo Venapaz</p> <p>Rocas Sedimentarias CRETÁCICO</p> <p>Carbonatos Neocomiano-Campananos</p> <p>Incluye Cobán, Jacoy, Campus, Sierra Madre y Grupo Yojoa</p> <p>Kid</p>	<p>Rocas Sedimentarias JURÁSICO CRETÁCICO</p> <p>Formación Todos Santos, Jurásico Superior-Neocomiano (capas rojas)</p> <p>Incluye Formación San Ricardo</p> <p>Pc</p> <p>Rocas Sedimentarias PERMIICO</p> <p>Formación Chochal (carbónífero)</p> <p>Rocas Sedimentarias CARBONIFERO-FERMICO</p> <p>Grupo Santa Rosa (lutitas, arenosas, tonglomerados y filitas)</p> <p>Formaciones Santa Rosa, Sacapulas, Tactic y Macal</p> <p>ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS CUATERNARIO</p> <p>Relieños y cubiertas gruesas de cenizas, pómez de origen diverso</p> <p>JKts</p> <p>CPr</p> <p>Qp</p>	<p>ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS CUATERNARIO</p> <p>Rocas volcánicas. Incluye coladas de lava, material lábrico, tobas y edificios volcánicos</p> <p>ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS TERCARIO</p> <p>Rocas volcánicas sin dividir</p> <p>Predominantemente Mio-Plioceno</p> <p>Incluye tobas, coladas de lava, material lábrico, y sedimentos volcánicos</p> <p>ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS TERCARIO</p> <p>Rocas platónicas sin dividir</p> <p>Incluye granitos y dioritos de edad pre-Pérmico, Cretácico y Terciario</p> <p>Qy</p> <p>Tv</p> <p>I</p>	<p>ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS TERCARIO</p> <p>Rocas ultrabásicas de edad disconcordia</p> <p>Predominantemente serpentinitas. En parte pre-Miocenico en edad</p> <p>ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS PALEOZOICO</p> <p>Rocas metamórficas sin dividir: Filitas, esquistos clásticos y granulíticos, esquistos y gneissos de quartzo-marc-feldespato, mármol, y migmatitas</p> <p>Pi</p> <p>Pzm</p> <p>Agua</p>
--	--	--	---	--

Escala : 1 : 1,000,000

50 0 50 100 Kilómetros

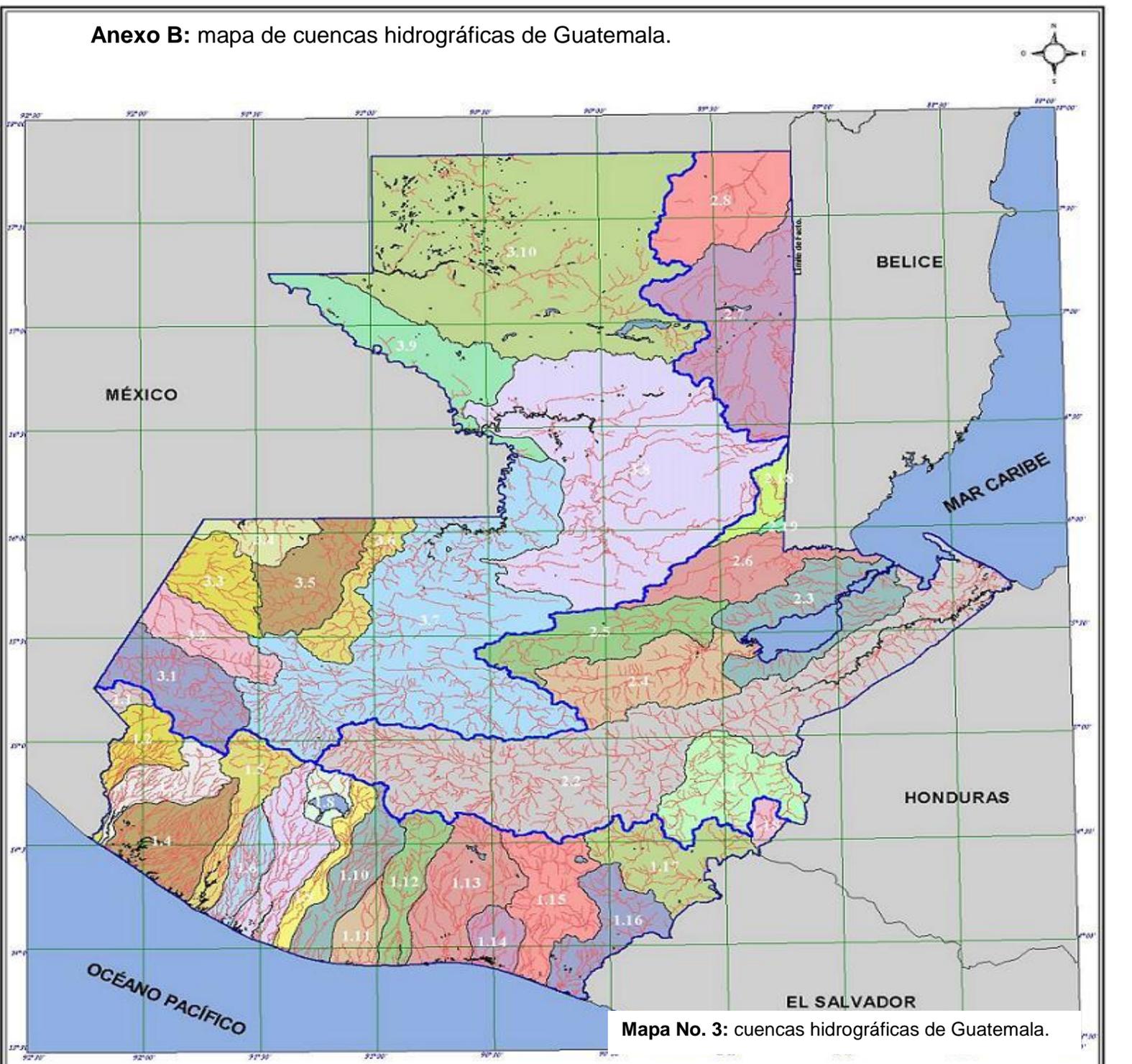
Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM NAD 27.
 Proyección del mapa impreso: Coordenadas Geográficas, Esferoide de Clarke 1866.

Fuente: Mapa Geológico de la República de Guatemala.
 Instituto Geográfico Nacional, Esc. 1:500,000.
 Compilado por ICAITI, 1970.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA).
 Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE).
 Programa de Emergencia por Desastres Naturales (PEDN).
 Guatemala, Marzo 2001.



Anexo B: mapa de cuencas hidrográficas de Guatemala.



Mapa No. 3: cuencas hidrográficas de Guatemala.

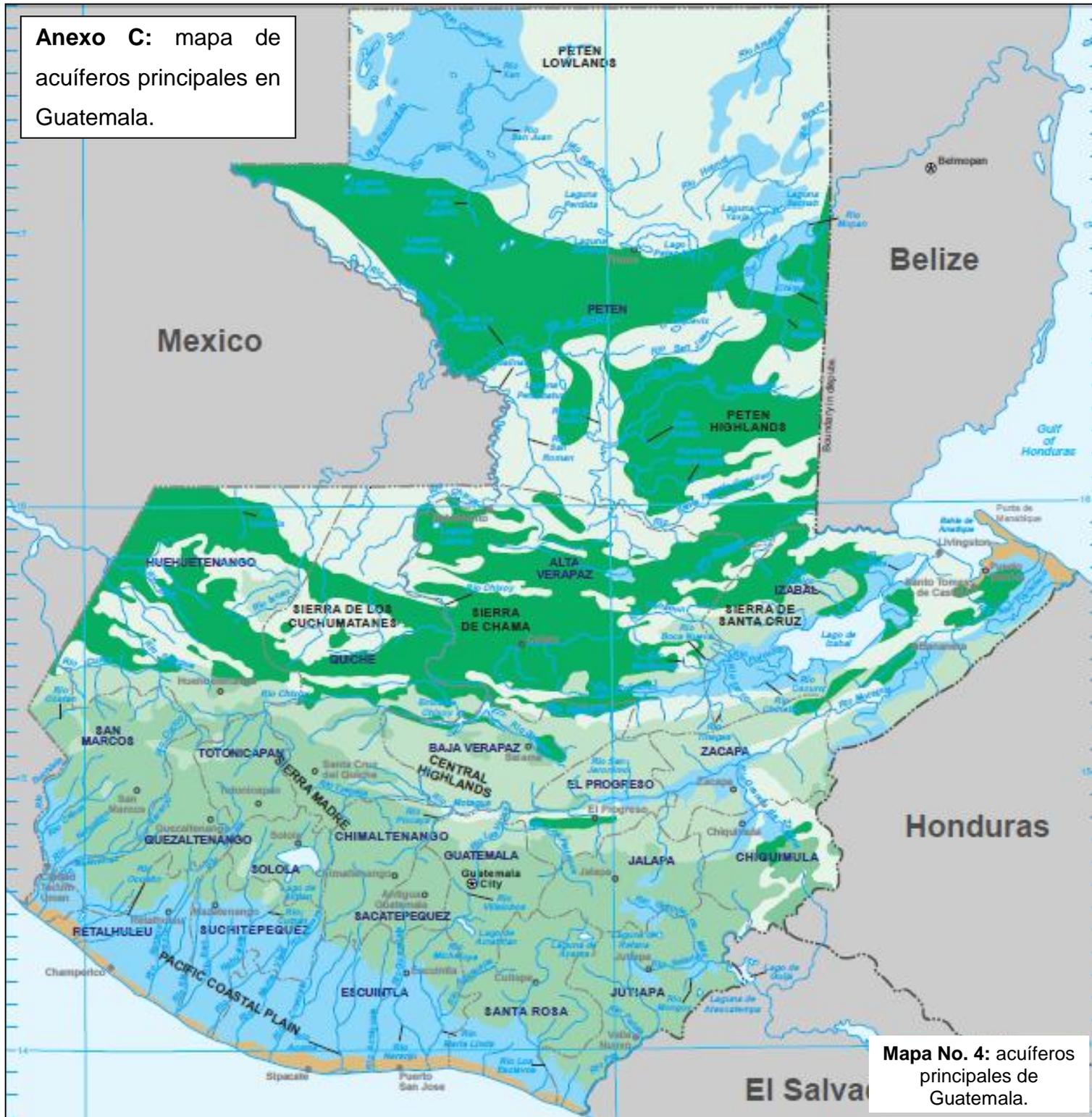
Vertiente Pacífico		Vertiente Mar de las Antillas		Vertiente Golfo de México	
Cuenca	Cuenca	Cuenca	Cuenca	Cuenca	Cuenca
1.1 Río Coatán	1.11 Río Acomé	2.1 Río Grande de Zacapa	3.1 Río Culico	3.1 Río Culico	
1.2 Río Suchiate	1.12 Río Achiguate	2.2 Río Motagua	3.2 Río Selegua	3.2 Río Selegua	
1.3 Río Naranjo	1.13 Río María Linda	2.3 Lago de Izabal-Río Dulce	3.3 Río Nentón	3.3 Río Nentón	
1.4 Río Ocosito	1.14 Río Paso Hondo	2.4 Río Polochic	3.4 Pojóm	3.4 Pojóm	
1.5 Río Samalá	1.15 Río Los Esclavos	2.5 Río Cahabón	3.5 Río Ixcán	3.5 Río Ixcán	
1.6 Río Sis-Icán	1.16 Río Paz	2.6 Río Sarstún	3.6 Xacbal	3.6 Xacbal	
1.7 Río Nahualate	1.17 Río Ostúa Güija	2.7 Río Mopán Belice	3.7 Río Salinas	3.7 Río Salinas	
1.8 Lago de Atitlán	1.18 Río Olopa	2.8 Río Hondo	3.8 Río La Pasión	3.8 Río La Pasión	
1.9 Río Madre Vieja	Principales Ríos	2.18 Río Moho	3.9 Río Usumacinta	3.9 Río Usumacinta	
1.10 Río Coyolate		2.19 Río Temash	3.10 Río San Pedro	3.10 Río San Pedro	

Escala: 1 : 2,000,000
 50 0 50 100 Kilometers
 Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM NAD 27.
 Proyección del mapa impreso: Coordenadas Geográficas, Esferoide de Clarke 1866.
 Fuente: Proyecto de Asistencia Técnica y Generación de Información, CATIE, con base en el mapa de cuencas de la República de Guatemala, ID 1000000.
 Este mapa ha sido elaborado sobre la base cartográfica escala 1: 250,000, propiedad del Instituto Geográfico Nacional.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA).
 Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE).
 Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica.
 Guatemala, Agosto del 2001.



Anexo C: mapa de acuíferos principales en Guatemala.



Mapa No. 4: acuíferos principales de Guatemala.

GUATEMALA		GROUND WATER RESOURCES¹	
Límite internacional	----- International boundary	Map Unit	FRESH WATER GENERALLY PLENTIFUL
Límite departamento	----- Department boundary	1	Very small to very large quantities of fresh water available from alluvium at depths ranging from 1 to 8 m.
Capitolo departamento	o Department capital	2	FRESH WATER LOCALLY PLENTIFUL
Capital nacional	⊗ National capital	3	Meager to very large quantities of fresh water available from karst limestones at depths from 3 to 30 m.
Centros pobaldos	● Populated place	4	Very small to very large quantities of fresh water available from volcanic ash, cinder, sand, and lava flows at depths from 10 to 300 m.
Escala 1:1,500,000 Scale		5	Meager to small quantities of fresh water available from igneous and metamorphic rocks at depths from 3 to 150 m.
Kilometros 0 50 Kilometers		6	FRESH WATER SCARCE OR LACKING
Millas 0 50 Miles			Very small to very large quantities of brackish to saline water available from unconsolidated sands at depths from 1 to 8 m.

Anexo D: valores de la función $Ko(x)$ para la utilización de la fórmula de De Glee-Jacob en régimen permanente, para utilizar en Ecuación No. 14.

Tabla No. 28: Valores de la función de Hantush.

x	Ko(x)								
0,010	4,721	0,054	3,038	0,098	2,447	0,520	0,892	0,960	0,446
0,011	4,626	0,055	3,019	0,099	2,437	0,530	0,877	0,970	0,440
0,012	4,539	0,056	3,001	0,100	2,427	0,540	0,861	0,980	0,433
0,013	4,459	0,057	2,984	0,110	2,333	0,550	0,847	0,990	0,427
0,014	4,385	0,058	2,967	0,120	2,248	0,560	0,832	1,000	0,421
0,015	4,316	0,059	2,950	0,130	2,170	0,570	0,818	1,100	0,3656
0,016	4,251	0,060	2,933	0,140	2,097	0,580	0,804	1,200	0,3185
0,017	4,191	0,061	2,916	0,150	2,030	0,590	0,791	1,300	0,2782
0,018	4,134	0,062	2,900	0,160	1,967	0,600	0,778	1,400	0,2437
0,019	4,080	0,063	2,884	0,170	1,909	0,610	0,765	1,500	0,2138
0,020	4,028	0,064	2,869	0,180	1,854	0,620	0,752	1,600	0,1880
0,021	3,980	0,065	2,853	0,190	1,802	0,630	0,740	1,700	0,1655
0,022	3,933	0,066	2,838	0,200	1,753	0,640	0,728	1,800	0,1459
0,023	3,889	0,067	2,823	0,210	1,706	0,650	0,716	1,900	0,1288
0,024	3,846	0,068	2,809	0,220	1,662	0,660	0,704	2,000	0,1139
0,025	3,806	0,069	2,794	0,230	1,620	0,670	0,693	2,100	0,1008
0,026	3,766	0,070	2,780	0,240	1,580	0,680	0,682	2,200	0,0893
0,027	3,729	0,071	2,766	0,250	1,542	0,690	0,671	2,300	0,0791
0,028	3,692	0,072	2,752	0,260	1,505	0,700	0,661	2,400	0,0702
0,029	3,657	0,073	2,738	0,270	1,470	0,710	0,650	2,500	0,0623
0,030	3,623	0,074	2,725	0,280	1,436	0,720	0,640	2,600	0,0554
0,031	3,591	0,075	2,711	0,290	1,404	0,730	0,630	2,700	0,0493
0,032	3,559	0,076	2,698	0,300	1,373	0,740	0,620	2,800	0,0438
0,033	3,528	0,077	2,685	0,310	1,343	0,750	0,611	2,900	0,0390
0,034	3,499	0,078	2,673	0,320	1,314	0,760	0,601	3,000	0,0347
0,035	3,470	0,079	2,660	0,330	1,286	0,770	0,592	3,100	0,0310
0,036	3,442	0,080	2,647	0,340	1,259	0,780	0,583	3,200	0,0276
0,037	3,414	0,081	2,635	0,350	1,233	0,790	0,574	3,300	0,0246
0,038	3,388	0,082	2,623	0,360	1,208	0,800	0,565	3,400	0,0220
0,039	3,362	0,083	2,611	0,370	1,183	0,810	0,557	3,500	0,0196
0,040	3,336	0,084	2,599	0,380	1,160	0,820	0,548	3,600	0,0175
0,041	3,312	0,085	2,587	0,390	1,137	0,830	0,540	3,700	0,0156
0,042	3,288	0,086	2,576	0,400	1,115	0,840	0,532	3,800	0,0140
0,043	3,264	0,087	2,564	0,410	1,093	0,850	0,524	3,900	0,0125
0,044	3,241	0,088	2,553	0,420	1,072	0,860	0,517	4,000	0,0112
0,045	3,219	0,089	2,542	0,430	1,052	0,870	0,509	4,100	0,0100
0,046	3,197	0,090	2,531	0,440	1,032	0,880	0,501	4,200	0,0089
0,047	3,176	0,091	2,520	0,450	1,013	0,890	0,494	4,300	0,0080
0,048	3,155	0,092	2,509	0,460	0,994	0,900	0,487	4,400	0,0071
0,049	3,134	0,093	2,499	0,470	0,976	0,910	0,480	4,500	0,0064
0,050	3,114	0,094	2,488	0,480	0,958	0,920	0,473	4,600	0,0057
0,051	3,094	0,095	2,478	0,490	0,941	0,930	0,466	4,700	0,0051
0,052	3,075	0,096	2,467	0,500	0,924	0,940	0,459	4,800	0,0046
0,053	3,056	0,097	2,457	0,510	0,908	0,950	0,452	4,900	0,0041

Fuente: <http://hidrologia.usal.es/temas/semiconfinados.pdf>

Anexo E: valores de la función $W(\mu_A \text{ y } \mu_B)$ para la función de Neuman, para régimen variable para utilizar en Ecuación No. 15.

Tabla No. 29: Valores $1/\mu_A$ y factor β .

$1/\mu_A$	$\beta = 0.001$	$\beta = 0.004$	$\beta = 0.01$	$\beta = 0.03$	$\beta = 0.06$	$\beta = 0.1$	$\beta = 0.2$	$\beta = 0.4$	$\beta = 0.6$	$\beta = 0.8$	$\beta = 1.0$	$\beta = 1.5$	$\beta = 2.0$	$\beta = 2.5$	$\beta = 3.0$	$\beta = 4.0$	$\beta = 5.0$	$\beta = 6.0$	$\beta = 7.0$
0.4	0.0248	0.0243	0.0241	0.0235	0.023	0.0224	0.0214	0.0199	0.0188	0.0179	0.017	0.015	0.0138	0.0125	0.0113	0.0093	0.0077	0.0064	0.0053
0.8	0.145	0.142	0.14	0.136	0.131	0.127	0.119	0.108	0.0988	0.0915	0.085	0.071	0.0603	0.0511	0.0435	0.0317	0.0234	0.0174	0.0131
1.4	0.358	0.352	0.345	0.331	0.318	0.304	0.279	0.244	0.217	0.194	0.175	0.136	0.107	0.0846	0.0678	0.0445	0.0302	0.021	0.0151
2.4	0.662	0.648	0.633	0.601	0.57	0.54	0.483	0.403	0.343	0.296	0.256	0.182	0.133	0.101	0.0767	0.0476	0.0313	0.0214	0.0152
4	1.02	0.992	0.963	0.905	0.849	0.792	0.688	0.542	0.438	0.36	0.3	0.199	0.14	0.103	0.0779	0.0478			0.0215
8	1.57	1.52	1.46	1.35	1.23	1.12	0.918	0.659	0.497	0.391	0.317	0.203	0.141						
14	2.05	1.97	1.88	1.7	1.51	1.34	1.03	0.69	0.507	0.394									
24	2.52	2.41	2.27	1.99	1.73	1.47	1.07	0.696											
40	2.97	2.8	2.61	2.22	1.85	1.53	1.08												
80	3.56	3.3	3	2.41	1.92	1.55													
140	4.01	3.65	3.23	2.48	1.93														
240	4.42	3.93	3.37	2.49	1.94														
400	4.77	4.12	3.43	2.5															
800	5.16	4.26	3.45																
1400	5.4	4.29	3.46																
2400	5.54	4.3																	
4000	5.59																		
8000	5.62																		
14000	5.62	4.3	3.46	2.5	1.94	1.55	1.08	0.696	0.507	0.394	0.317	0.203	0.141	0.103	0.0779	0.0478	0.0313	0.0215	0.0152

Fuente: http://hidrologia.usal.es/temas/Acuiferos_libres.pdf (2012).

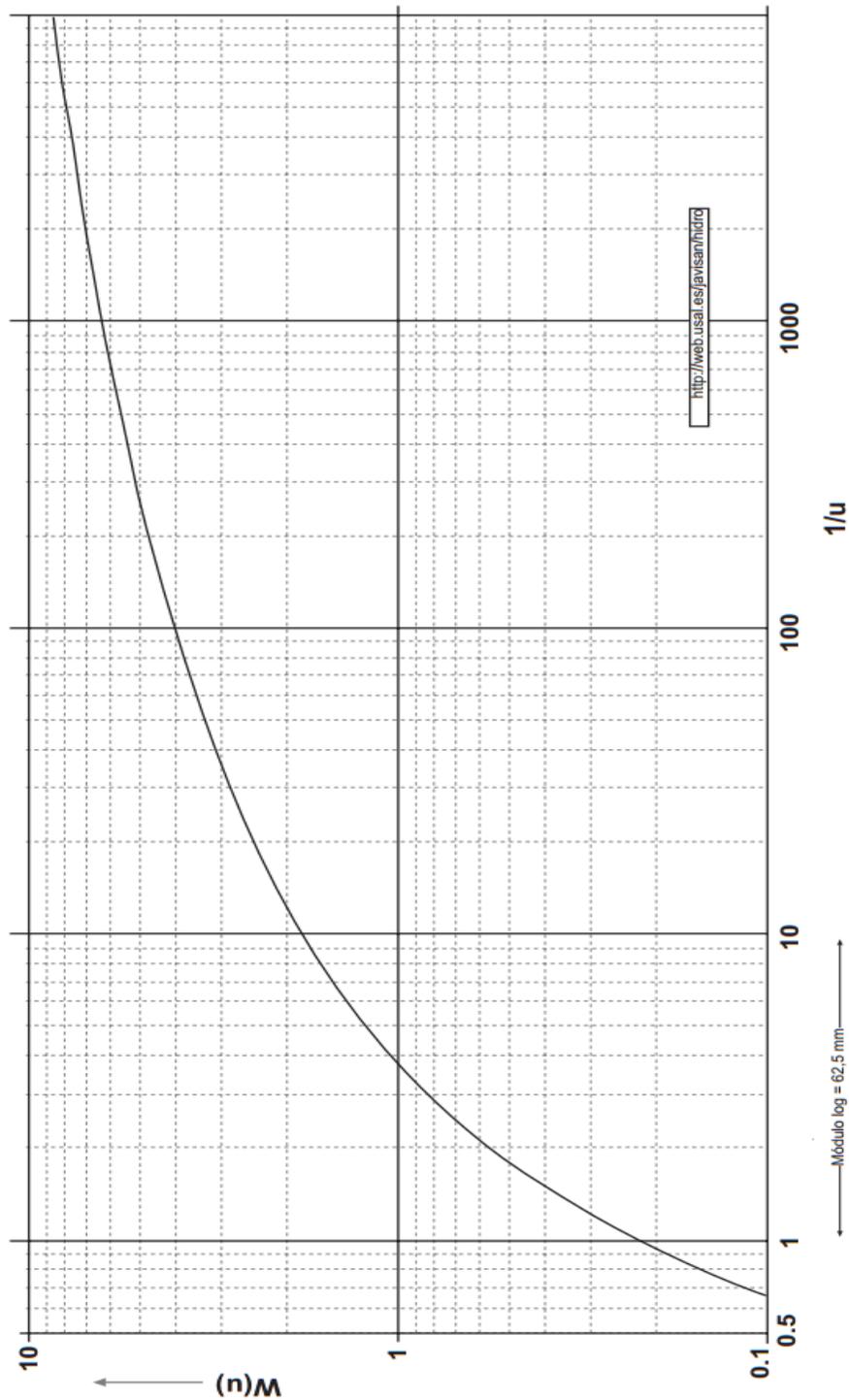
Tabla No. 30: Valores $1/\mu_A$ y factor β .

$1/\mu_B$	$\beta = 0.001$	$\beta = 0.004$	$\beta = 0.01$	$\beta = 0.03$	$\beta = 0.06$	$\beta = 0.1$	$\beta = 0.2$	$\beta = 0.4$	$\beta = 0.6$	$\beta = 0.8$	$\beta = 1.0$	$\beta = 1.5$	$\beta = 2.0$	$\beta = 2.5$	$\beta = 3.0$	$\beta = 4.0$	$\beta = 5.0$	$\beta = 6.0$	$\beta = 7.0$
4E-04	5.62	4.3	3.46	2.5	1.94	1.56	1.09	0.697	0.508	0.395	0.318	0.204	0.142	0.104	0.078	0.0479	0.0314	0.0215	0.0153
8E-04															0.0781	0.048	0.0315	0.0216	0.0153
0.001														0.103	0.0783	0.0481	0.0316	0.0217	0.0154
0.002														0.104	0.0785	0.0484	0.0318	0.0219	0.0156
0.004								0.697	0.508	0.395	0.318	0.204	0.142	0.104	0.0789	0.0487	0.0321	0.0221	0.0158
0.008								0.697	0.509	0.396	0.319	0.205	0.143	0.105	0.0799	0.0496	0.0329	0.0228	0.0164
0.014								0.698	0.51	0.397	0.321	0.207	0.145	0.107	0.0814	0.0509	0.0341	0.0239	0.0173
0.024								0.7	0.512	0.399	0.323	0.209	0.147	0.109	0.0838	0.0532	0.0361	0.0257	0.0189
0.04								0.703	0.516	0.403	0.327	0.213	0.152	0.113	0.0879	0.0568	0.0393	0.0286	0.0215
0.08						1.56	1.09	0.71	0.524	0.412	0.337	0.224	0.162	0.124	0.098	0.0661	0.0478	0.0362	0.0284
0.14					1.94	1.56	1.1	0.72	0.537	0.425	0.35	0.239	0.178	0.139	0.113	0.0806	0.0612	0.0486	0.0398
0.24					2.5	1.95	1.11	0.737	0.557	0.447	0.374	0.265	0.205	0.166	0.14	0.106	0.0853	0.0714	0.0614
0.4					2.51	1.96	1.13	0.763	0.589	0.483	0.412	0.307	0.248	0.21	0.184	0.149	0.128	0.113	0.102
0.8	5.62	4.3	3.46	2.52	1.98	1.61	1.18	0.829	0.667	0.571	0.506	0.41	0.357	0.323	0.298	0.266	0.245	0.231	0.22
1.4	5.63	4.31	3.47	2.54	2.01	1.66	1.24	0.922	0.78	0.697	0.642	0.562	0.517	0.489	0.47	0.445	0.43	0.419	0.411
2.4	5.63	4.31	3.49	2.57	2.06	1.73	1.35	1.07	0.954	0.889	0.85	0.792	0.763	0.745	0.733	0.718	0.709	0.703	0.699
4	5.63	4.32	3.51	2.62	2.13	1.83	1.5	1.29	1.2	1.16	1.13	1.1	1.08	1.07	1.07	1.06	1.06	1.05	1.05
8	5.64	4.35	3.56	2.73	2.31	2.07	1.85	1.72	1.68	1.66	1.65	1.64	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
14	5.65	4.38	3.63	2.88	2.55	2.37	2.23	2.17	2.15	2.15	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14
24	5.67	4.44	3.74	3.11	2.86	2.75	2.68	2.66	2.65	2.65	2.65	2.65	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64
40	5.7	4.52	3.9	3.4	3.24	3.18	3.15	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14
80	5.76	4.71	4.22	3.92	3.85	3.83	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82
140	5.85	4.94	4.58	4.4	4.38	4.38	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37	4.37
240	5.99	5.23	5	4.92	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91
400	6.16	5.59	5.46	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42

Fuente: http://hidrologia.usal.es/temas/Acuiferos_libres.pdf (2012).

Anexo F: curva de Theis para la obtención de parámetro W para análisis de acuíferos confinados en régimen variable para utilizar en Ecuación No. 19.

Gráfica No. 9: Curva de Theis.



Fuente: http://hidrologia.usal.es/practicas/confinado/Theis_grafico_patron.pdf

Anexo G: valores de Hantush para función W , para acuíferos semiconfinados en régimen variable, con y sin almacenamiento de agua en el acuitardo, para utilización de Ecuaciones No. 21 y 23.

Tabla No. 31: Valores de Hantush (con almacenamiento en el acuitardo).

		β													
		0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20
u	10 ⁻⁶	11.98	11.40	10.59	9.93	9.25	8.34	7.65	6.96	6.05	5.36	4.67	3.78	3.11	2.47
	2.10 ⁻⁶	11.50	11.00	10.20	9.57	8.89	7.99	7.30	6.61	5.70	5.01	4.33	3.44	2.79	2.16
	4.10 ⁻⁶	11.10	10.60	9.84	9.20	8.54	7.64	6.95	6.27	5.36	4.67	3.99	3.11	2.47	1.86
	6.10 ⁻⁶	10.80	10.30	9.61	8.99	8.33	7.44	6.57	6.06	5.16	4.47	3.80	2.92	2.28	1.69
	8.10 ⁻⁶	10.50	10.10	9.45	8.84	8.18	7.29	6.61	5.92	5.01	4.33	3.66	2.79	2.16	1.57
	10 ⁻⁶	10.37	10.00	9.32	8.71	8.07	7.18	6.49	5.81	4.90	4.22	3.55	2.68	2.06	1.48
	2.10 ⁻⁵	9.82	9.51	8.90	8.33	7.70	6.82	6.15	5.46	4.56	3.88	3.22	2.37	1.76	1.22
	4.10 ⁻⁵	9.24	8.99	8.46	7.93	7.33	6.47	5.80	5.12	4.22	3.55	2.89	2.06	1.48	0.973
	6.10 ⁻⁵	8.88	8.67	8.19	7.69	7.11	6.26	5.59	4.91	4.02	3.35	2.70	1.88	1.32	0.841
	8.10 ⁻⁵	8.63	8.43	8.00	7.52	6.95	6.11	5.44	4.77	3.88	3.21	2.57	1.76	1.22	0.753
	10 ⁻⁴	8.43	8.25	7.84	7.38	6.82	5.99	5.33	4.66	3.77	3.11	2.47	1.67	1.14	0.688
	2.10 ⁻⁴	7.79	7.66	7.33	6.93	6.42	5.62	4.97	4.31	3.43	2.78	2.15	1.39	0.899	0.504
	4.10 ⁻⁴	7.14	7.04	6.78	6.45	6.00	5.25	4.62	3.96	3.10	2.46	1.85	1.14	0.688	0.351
	6.10 ⁻⁴	6.75	6.67	6.45	6.16	5.74	5.02	4.40	3.76	2.91	2.28	1.68	0.94	0.577	0.277
	8.10 ⁻⁴	6.48	6.40	6.21	5.99	5.55	4.86	4.25	3.62	2.77	2.15	1.57	0.898	0.504	0.230
	0.001	6.26	6.20	6.02	5.77	5.40	4.73	4.13	3.50	2.67	2.05	1.48	0.827	0.451	0.198
	0.002	5.59	5.54	5.41	5.22	4.91	4.32	3.76	3.15	2.34	1.75	1.21	0.624	0.308	0.116
	0.004	4.91	4.88	4.78	4.64	4.40	3.89	3.38	2.80	2.03	1.47	0.966	0.450	0.197	0.0619
	0.006	4.52	4.49	4.41	4.29	4.08	3.62	3.14	2.60	1.84	1.31	0.833	0.362	0.146	0.0404
	0.008	4.23	4.21	4.14	4.04	3.85	3.43	2.98	2.45	1.72	1.20	0.744	0.306	0.116	0.0290
0.01	4.02	4.00	3.93	3.84	3.67	3.28	2.84	2.33	1.62	1.11	0.678	0.267	0.0955	0.0221	
0.02	3.34	3.33	3.28	3.21	3.09	2.78	2.42	1.97	1.32	0.868	0.491	0.165	0.0487	0.00831	
0.04	2.67	2.66	2.63	2.58	2.50	2.27	1.98	1.61	1.04	0.647	0.336	0.0931	0.0216	0.00253	
0.06	2.29	2.28	2.26	2.22	2.15	1.96	1.72	1.39	0.884	0.530	0.259	0.0630	0.0124	0.00112	
0.08	2.02	2.01	1.99	1.96	1.90	1.74	1.53	1.24	0.776	0.453	0.212	0.0464	0.00797	5.87 E-04	
0.1	1.82	1.81	1.79	1.77	1.72	1.58	1.39	1.12	0.695	0.397	0.179	0.0359	0.00552	3.40 E-04	
0.2	1.22	1.22	1.21	1.19	1.16	1.07	0.950	0.767	0.460	0.245	0.0971	0.0143	0.00149	4.93 E-05	
0.4	0.701	0.699	0.694	0.685	0.668	0.622	0.554	0.448	0.262	0.130	0.0441	0.00448	2.83 E-04	4.24 E-06	
0.6	0.453	0.452	0.449	0.444	0.433	0.404	0.361	0.293	0.169	0.0799	0.0247	0.00195	8.73 E-05		
0.8	0.31	0.309	0.307	0.304	0.297	0.277	0.248	0.201	0.115	0.0529	0.0152	9.86 E-04	3.40 E-05		
1	0.219	0.218	0.217	0.214	0.210	0.196	0.176	0.143	0.0812	0.0365	0.00993	5.47 E-04	1.51 E-05		
2	0.0488	0.0487	0.0484	0.0479	0.0468	0.0439	0.0395	0.0322	0.0180	0.00760	0.00173	5.51 E-05			
4	0.00377	0.00376	0.00374	0.00370	0.00362	0.00340	0.00307	0.00250	0.00139	5.58 E-04	1.08 E-04	1.89 E-06			
6	3.59 E-04	3.59 E-04	3.56 E-04	3.53 E-04	3.45 E-04	3.25 E-04	2.93 E-04	2.39 E-04	1.33 E-04	5.19 E-05	9.26 E-06				
	3.76 E-05	3.75 E-05	3.73 E-05	3.69 E-05	3.62 E-05	3.40 E-05	3.07 E-05	2.51 E-05	1.39 E-05	5.36 E-06					

Fuente: <http://hidrologia.usal.es/temas/semiconfinados.pdf>

Tabla No. 32: Valores de Hantush (sin almacenamiento en el acuitardo).

	r/B																		
	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,5	2	4	6
0,000002	12,10	11,22	10,46	9,89	9,44	8,06	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,000004	11,62	11,06	10,43	9,88	9,44	8,06	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,000006	11,29	10,88	10,36	9,87	9,44	8,06	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,000008	11,04	10,72	10,28	9,84	9,43	8,06	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,00001	10,83	10,57	10,20	9,80	9,42	8,06	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,00002	10,19	10,05	9,84	9,58	9,30	8,06	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,00004	9,52	9,45	9,34	9,19	9,01	8,03	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,00006	9,13	9,08	9,00	8,89	8,77	7,98	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,00008	8,84	8,81	8,75	8,67	8,57	7,91	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,0001	8,62	8,59	8,55	8,48	8,40	7,84	6,67	5,87	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,0002	7,94	7,92	7,90	7,86	7,82	7,50	6,62	5,86	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,0004	7,24	7,24	7,22	7,21	7,19	7,01	6,45	5,83	5,29	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,0006	6,84	6,84	6,83	6,82	6,80	6,68	6,27	5,77	5,27	4,85	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,0008	6,55	6,55	6,54	6,53	6,52	6,43	6,11	5,69	5,25	4,84	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,001	6,33	6,33	6,32	6,32	6,31	6,23	5,97	5,61	5,21	4,83	3,51	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,002	5,64	5,64	5,63	5,63	5,63	5,59	5,45	5,24	4,98	4,71	3,50	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,004	4,95	4,95	4,95	4,49	4,94	4,92	4,85	4,74	4,59	4,42	3,48	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,006	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,53	4,48	4,41	4,30	4,18	3,43	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,008	4,26	4,26	4,26	4,26	4,26	4,25	4,21	4,15	4,08	3,98	3,36	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,01	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,03	4,00	3,95	3,89	3,81	3,29	2,23	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,02	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,34	3,31	3,28	3,24	2,95	2,18	1,55	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,04	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,67	2,66	2,65	2,63	2,48	2,02	1,52	1,13	0,842	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,06	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,29	2,29	2,28	2,27	2,26	2,17	1,85	1,46	1,11	0,839	0,428	0,228	0,0223	0,0025
0,08	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,02	2,02	2,01	2,00	1,94	1,69	1,39	1,08	0,832	0,427	0,228	0,0223	0,0025
0,1	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,81	1,80	1,75	1,56	1,31	1,05	0,819	0,427	0,228	0,0223	0,0025
0,2	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,19	1,11	0,996	0,857	0,715	0,413	0,227	0,0223	0,0025
0,4	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,701	0,7	0,693	0,665	0,621	0,565	0,502	0,341	0,210	0,0223	0,0025
0,6	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,453	0,450	0,436	0,415	0,387	0,354	0,263	0,177	0,0222	0,0025
0,8	0,311	0,311	0,311	0,311	0,311	0,311	0,311	0,310	0,310	0,310	0,308	0,301	0,289	0,273	0,254	0,199	0,144	0,0218	0,0025
1	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,218	0,213	0,206	0,197	0,185	0,151	0,114	0,0207	0,0025
2	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,048	0,047	0,046	0,044	0,0394	0,034	0,0110	0,0021

Fuente: <http://hidrologia.usal.es/temas/semiconfinados.pdf>

Anexo H: caudales para vertedero rectangular, según diversos anchos y tirantes de agua.

Tabla No. 33: Caudales experimentales para vertederos rectangulares.

Altura h en cm	Anchura b del vertedor en cm								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	0.38	0.57	0.76	0.95	1.14	1.34	1.53	1.72	1.91
2	1.05	1.58	2.11	2.65	3.18	3.72	4.26	4.79	5.33
3	1.91	2.87	3.84	4.81	5.79	6.76	7.74	8.72	9.70
4	2.92	4.39	5.87	7.35	8.84	10.34	11.83	13.33	14.83
5	4.05	6.09	8.14	10.21	12.29	14.36	16.44	18.52	20.61
6	5.29	7.95	10.65	13.35	16.07	18.79	21.51	24.24	26.96
7	6.63	9.97	13.35	16.75	20.16	23.58	27.00	30.42	33.85
8	8.06	12.13	16.24	20.38	24.54	28.70	32.87	37.04	41.21
9	9.57	14.41	19.31	24.23	29.18	34.13	39.09	44.05	49.02
10	11.17	16.82	22.53	28.29	34.06	39.85	45.65	51.45	57.25
11	12.84	19.34	25.91	32.54	39.18	45.85	52.52	59.20	65.89
12	14.58	21.96	29.44	36.97	44.53	52.11	59.70	67.29	74.89
13	16.39	24.69	33.10	41.57	50.08	58.61	67.16	75.71	84.27
14	18.27	27.52	36.89	46.35	55.84	65.36	74.89	84.43	93.98
15	20.20	30.44	40.82	51.28	61.79	72.33	82.89	93.45	104.03
16	22.20	33.44	44.86	56.37	67.93	79.53	91.14	102.76	114.40
17	24.25	36.54	49.02	61.61	74.25	86.93	99.63	112.35	125.07
18	26.35	39.72	53.30	66.99	80.75	94.54	108.37	122.20	136.05
19	28.52	42.98	57.68	72.51	87.41	102.36	117.33	132.32	147.32
20	30.73	46.32	62.17	78.16	94.24	110.36	126.51	142.68	158.86
21	32.99	49.74	66.77	83.95	101.23	118.55	135.91	153.29	170.69
22	35.30	53.23	71.46	89.87	108.37	126.93	145.52	164.14	182.77
23	37.66	56.79	76.26	95.91	115.66	135.48	155.34	175.22	195.12
24	40.07	60.43	81.15	102.07	123.11	144.21	165.36	186.53	207.72
25	42.52	64.13	86.13	108.35	130.69	153.11	175.57	198.06	220.57
26	45.01	67.90	91.20	114.75	138.42	162.18	185.98	209.81	233.67
27	47.55	71.74	96.37	121.26	146.29	171.40	196.57	221.77	246.99
28	50.13	75.64	101.62	127.88	154.29	180.79	207.35	233.94	260.56
29	52.75	79.60	106.96	134.61	162.42	190.33	218.30	246.31	274.35
30	55.41	83.62	112.38	141.44	170.68	200.03	229.44	258.89	288.36

Fuente: http://consultas.alianzaporelagua.org/img/foros/527ba02f42e4e/Pruebas_de_Bombeo.pdf
(2007).

Anexo I: diferentes caudales con variaciones de ángulos y tirantes de agua para vertederos triangulares.

Tabla No. 34: Caudales experimentales para vertederos triangulares.

Altura h en cm	Caudal en lps			Altura h en cm	Caudal en lps		
	$\alpha=90^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=45^\circ$		$\alpha=90^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=45^\circ$
2.0	0.08	0.05	0.03	20.0	24.38	14.08	10.10
2.5	0.14	0.08	0.06	21.0	27.52	15.89	11.40
3.0	0.22	0.13	0.09	22.0	30.88	17.83	12.79
3.5	0.32	0.19	0.13	23.0	34.48	19.91	14.28
4.0	0.45	0.26	0.19	24.0	38.32	22.12	15.87
4.5	0.60	0.35	0.25	25.0	42.40	24.48	17.56
5.0	0.78	0.45	0.32	26.0	46.73	26.98	19.36
5.5	0.99	0.57	0.41	27.0	51.32	29.63	21.26
6.0	1.23	0.71	0.51	28.0	56.16	32.42	23.26
6.5	1.50	0.87	0.62	29.0	61.27	35.37	25.38
7.0	1.80	1.04	0.75	30.0	66.64	38.47	27.60
7.5	2.14	1.24	0.89	32.0	78.21	45.15	32.39
8.0	2.51	1.45	1.04	34.0	90.89	52.48	37.65
8.5	2.92	1.69	1.21	36.0	104.74	60.47	43.38
9.0	3.37	1.94	1.39	38.0	119.77	69.15	49.61
10.0	4.37	2.52	1.81	40.0	136.01	78.53	56.34
11.0	5.54	3.20	2.29	42.0	153.51	88.63	63.58
12.0	6.87	3.97	2.84	44.0	172.28	99.47	71.36
13.0	8.38	4.84	3.47	46.0	192.36	111.06	79.68
14.0	10.07	5.81	4.17	48.0	213.77	123.42	88.55
15.0	11.94	6.90	4.95	50.0	236.55	136.57	97.98
16.0	14.02	8.09	5.81	52.0	260.71	150.52	107.99
17.0	16.29	9.41	6.75	54.0	286.29	165.29	118.58
18.0	18.77	10.84	7.78	56.0	313.31	180.89	129.78
19.0	21.47	12.39	8.89	58.0	341.80	197.34	141.58

Fuente: http://consultas.alianzaporelagua.org/img/foros/527ba02f42e4e/Pruebas_de_Bombeo.pdf
(2007).

Anexo J: propiedades físicas de las tuberías de revestimiento según variaciones de espesores y diámetros.

Tabla No. 35. Propiedades físicas de tubería de revestimiento.

Inside Diameter		Wall Thickness		Weight		Collapsing Strength				Axial Compression Strength		Tensile Strength	
Inches	mm	Inches	mm	lbs/ft	kg/mt	PSI	ft/water	Kg/cm ²	m/water	Tons	KG	Tons	Kg
6.406	163	.1094	2.77	7.61	11.33	199	459	13.9	139	39.2	35,552	67.7	60,946
6.344	161	.1406	3.57	9.74	14.45	371	857	26.1	261	50.1	45,471	85.9	77,952
6.281	159	.1719	4.36	11.85	17.63	593	1369	41.7	417	61.0	55,326	104.5	94,845
6.250	158	.1875	4.76	12.81	19.08	720	1662	50.6	506	66.4	60,192	113.7	103,147
6.125	156	.250	6.35	17.02	25.35	1288	2974	90.5	905	87.6	79,442	150.1	136,196
8.406	213	.1094	2.77	9.95	14.80	99	229	7.0	70	51.2	46,464	87.8	79,653
8.344	212	.1406	3.57	12.74	18.96	192	444	13.5	165	65.6	59,497	112.4	101,995
8.281	210	.1719	4.36	15.52	23.09	319	736	22.4	224	79.9	72,474	137.0	124,241
8.250	208	.1875	4.76	16.79	25.01	393	908	27.7	277	87.0	78,905	149.1	135,265
8.125	206	.2500	6.35	22.36	33.30	756	1745	53.2	532	115.1	104,427	197.3	179,018
10.375	264	.1875	4.76	21.15	31.47	228	528	16.1	161	108.9	98,777	18637	169,332
10.250	260	.2500	6.35	28.04	41.72	461	1065	32.5	325	144.3	130,923	247.4	224,440
10.125	257	.3125	7.94	34.71	51.70	760	1756	53.5	535	179.3	162,680	307.4	278,880
12.375	314	.1875	4.76	25.16	37.44	147	340	10.4	104	129.5	117,480	222.0	201,395
12.250	311	.2500	6.35	33.38	49.67	306	707	21.6	216	171.8	155,861	294.5	267,191
12.125	308	.3125	7.94	41.52	61.78	521	1203	36.7	367	213.7	193,852	366.3	322,318
12.00	305	.3750	9.53	49.57	73.84	795	1835	55.9	559	262.4	238,067	437.4	396,778
13.625	346	.1875	4.76	27.73	41.16	115	265	8.1	81	142.4	129,170	244.1	221,434
13.500	343	.2500	6.35	36.71	54.63	242	560	17.1	171	189.0	171,447	324.0	293,910
13.375	340	.3125	7.94	45.68	67.98	419	967	29.5	295	235.2	213,335	403.1	365,717
13.250	337	.3750	9.53	54.57	81.21	636	1469	44.8	448	280.9	254,833	481.6	436,857
14.125	359	.1875	4.76	28.66	42.65	105	242	7.4	74	147.5	133,846	252.9	229,450
14.00	356	.2500	6.35	38.05	56.62	222	512	15.6	156	195.9	177,682	335.8	304,597
13.875	352	.3125	7.94	47.36	70.47	385	890	27.1	271	243.8	221,128	417.9	379,077
13.750	349	.3750	9.53	56.57	84.12	588	1359	41.4	414	291.2	264,195	499.2	452,888
15.625	397	.1875	4.76	31.67	47.12	80	185	5.6	56	163.0	147,873	279.4	253,497
15.500	394	.2500	6.35	42.05	62.58	172	398	12.1	121	216.5	196,385	371.1	336,660
15.375	391	.3125	7.94	52.36	77.92	303	700	21.3	213	269.5	244,507	462.0	419,155
15.250	387	.3750	9.53	56.57	84.12	588	1359	41.4	414	291.2	264,195	499.2	452,888
16.250	413	.1875	4.76	32.29	46.05	72	167	5.1	51	169.4	153,718	290.5	263,517
16.125	410	.2500	6.35	43.73	65.07	156	360	11.0	110	225.1	204,178	385.8	350,020
16.000	406	.3125	7.94	54.45	81.02	276	637	19.4	194	280.3	254,249	480.4	435,854
15.875	403	.3750	9.53	65.09	96.96	429	991	30.2	302	335.0	303,929	574.3	521,022
17.625	448	.1875	4.76	35.67	53.08	58	134	4.1	41	183.6	166,577	314.8	285,560
17.500	445	.2500	6.35	47.39	70.53	126	292	8.9	89	244.0	221,323	418.2	279,411
17.375	441	.3125	7.94	59.03	87.85	226	521	15.9	159	303.9	275,680	520.9	472,594

Fuente: <http://roscoemoss.com/wp-content/uploads/publications/ggwc.pdf>

Anexo K: tabla para determinación de viscosidad para cálculo de número de Reynolds.

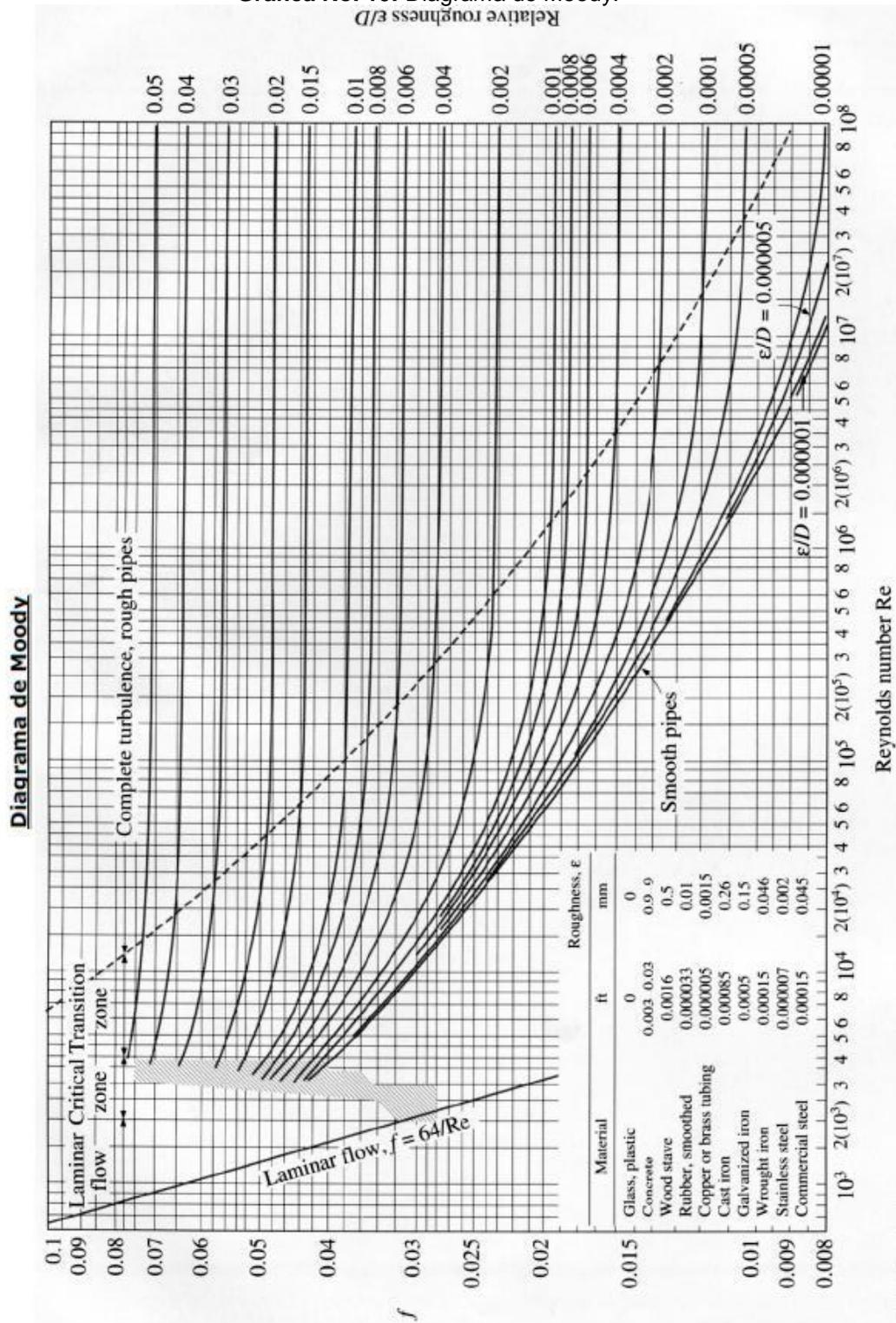
Tabla No. 36: Propiedades físicas del agua.

Temperatura (°C)	Peso específico (kN/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (kN/m ²)	Viscosidad dinámica (N·s/m ²)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Tensión superficial (N/m)	Presión de vapor (kN/m ²)
0	9,805	999,8	$1,98 \cdot 10^6$	$1,781 \cdot 10^{-3}$	$1,785 \cdot 10^{-6}$	0,0765	0,61
5	9,807	1000,0	$2,05 \cdot 10^6$	$1,518 \cdot 10^{-3}$	$1,519 \cdot 10^{-6}$	0,0749	0,87
10	9,804	999,7	$2,10 \cdot 10^6$	$1,307 \cdot 10^{-3}$	$1,306 \cdot 10^{-6}$	0,0742	1,23
15	9,798	999,1	$2,15 \cdot 10^6$	$1,139 \cdot 10^{-3}$	$1,139 \cdot 10^{-6}$	0,0735	1,70
20	9,789	998,2	$2,17 \cdot 10^6$	$1,102 \cdot 10^{-3}$	$1,003 \cdot 10^{-6}$	0,0728	2,34
25	9,777	997,0	$2,22 \cdot 10^6$	$0,890 \cdot 10^{-3}$	$0,893 \cdot 10^{-6}$	0,0720	3,17
30	9,764	995,7	$2,25 \cdot 10^6$	$0,708 \cdot 10^{-3}$	$0,800 \cdot 10^{-6}$	0,0712	4,24
40	9,730	992,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,653 \cdot 10^{-3}$	$0,658 \cdot 10^{-6}$	0,0696	7,38
50	9,689	988,0	$2,29 \cdot 10^6$	$0,547 \cdot 10^{-3}$	$0,553 \cdot 10^{-6}$	0,0679	12,33
60	9,642	983,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,466 \cdot 10^{-3}$	$0,474 \cdot 10^{-6}$	0,0662	19,92
70	9,589	977,8	$2,25 \cdot 10^6$	$0,404 \cdot 10^{-3}$	$0,413 \cdot 10^{-6}$	0,0644	31,16
80	9,530	971,8	$2,20 \cdot 10^6$	$0,354 \cdot 10^{-3}$	$0,364 \cdot 10^{-6}$	0,0626	47,34
90	9,466	965,3	$2,14 \cdot 10^6$	$0,315 \cdot 10^{-3}$	$0,326 \cdot 10^{-6}$	0,0608	70,10
100	9,399	958,4	$2,07 \cdot 10^6$	$0,282 \cdot 10^{-3}$	$0,294 \cdot 10^{-6}$	0,0589	101,33

Fuente: <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Aguas/PropiedadesFisicasAgua.asp>

Anexo L: diagrama de Moody para la determinación del factor f de la fórmula de Darcy & Weisbach.

Gráfica No. 10: Diagrama de Moody.



Fuente: <http://fisica.laguia2000.com/wp-content/uploads/2011/08/Moody3.jpg> (2011).

Anexo N: modelo de presentación de resultados de análisis de muestra de agua.

Tabla No. 38: hoja para resultados de análisis de muestras de agua.

Datos del Cliente			Identificación de la muestra			
Atención a:			Tipo de muestra:			
Empresa:			Lugar de captación:			
Dirección:			Fecha y hora de Captación:			
Telefono:			Captada por:			
Correo electrónico:			Identificación de la muestra:			
			Análisis solicitados:			
Datos de Ingreso al Laboratorio						
No. de orden de servicio:			Hora de Ingreso:			
No. De Laboratorio:			Temp. de transporte °C.:			
Fecha de Ingreso:			Tipo de recipiente:			
Fecha de inicio de análisis:						
Análisis Físico Químicos			Resultados de los análisis		Limite (COGUANOR NTG 29001)	
Parámetro	Dimensionales	Método de análisis	Laboratorio	Campo	Aceptable	Permisible
pH*	Unidades de PH	SMEWW ¹ -4500H+B		-	7.0-7.5	6.5-8.5
Conductividad*	µSiemens/cm	SMEWW ¹ -2510B		-	750	<1500
Salinidad ⁴	0/00	SMEWW ¹ -2520B		-	NE	NE
Temperatura	°C	SMEWW ¹ -2550B		-	15-25	34
Apariencia	-	SMEWW ¹ -210		-	NE	NE
Color	Unidades de color	SQM ³ -Color		-	5.0	35.0
Turbiedad	UNT	SQM ³ -Turbidez		-	5.0	15.0
Cloro residual	mg/L (ppm)	DPD ⁵		-	0.5	1
Cloro total ⁴	mg/L	OTO ²		-	NE	NE
Solidos Totales Disueltos (TDS)	mg/L	SMEWW ¹ -1030E		-	500.0	1000.0
Hierro total	mg/L	SQM ³ -14761		-	0.3	NE
Manganeso	mg/L	SQM ³ -14770		-	0.1	0.4
Nitritos	mg/L	SQM ³ -14776		-	NE	3.0
Sulfatos	mg/L	SQM ³ -14791		-	100	250
Nitratos	mg/L	SQM ³ -14773		-	NE	50.0
Silice ⁴	mg Si/L	SQM ³ -14794		-	NE	NE
Fluoruros ⁴	mg/L	SMQ ³ -14598		-	NE	1.7
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	SMEWW ¹ -2340C		-	100	500
Calcio	mg/L	SMEWW ¹ -3500CaB		-	75	150
Magnesio	mg/L	SMEWW ¹ -3500MgB		-	50	100
Cloruros	mg/L	SMEWW ¹ -4500-C1B		-	100.0	250.0
Alcalinidad de carbonatos pH 8.3	mg CaCO ₃ /L	SMEWW ¹ -2320B		-	NE	NE
Alcalinidad de bicarbonatos pH 4	mg CaCO ₃ /L	SMEWW ¹ -2320B		-	NE	NE
Microbiología						
Coliformes Totales	NMP/100 mL	SMEWW ¹ -9221B		-	NE	ND
Coliformes Fecales ⁴	NMP/100 mL	SMEWW ¹ -9221E		-	NE	NE
Escherichia coli	NMP/100 mL	SMEWW ¹ -9223B		-	NE	ND

LMA: Limite máximo aceptable LMP: permisible NMP: Número más Probable UFC: Unidades formadoras de colonia gr: gramo L: litro mL: mililitro ND: No detectable
 PPM: Partes por millón mg: miligramo o/oo: Partes por mil COGUANOR NTG 29001 NE: No Especificado "-" No Efectuado
 1. Stándar Methods For the Examination of Water and Wastewater 2th ed. 2. OTO: o-tolidina. 3. Spectro quant Merck 4. Parametros Adicionales a la Norma
 COGUANOR NTG 29001 *M etodo en proceso acreditación norma ISO 17025. 5. DPD: Dietil-p-fenilen-diamina
 Metodo de muestreo: SMEWW1-1060/9060 A Resultados NO REPRODUCIBLES sin previa autorización por escrito del laboratorio y válidos para la muestra tal y como fue recibida.
 Los registros se almacenan 4 años.

Fuente: confidencial (modelo propio de un determinado laboratorio guatemalteco).

Anexo O: norma COGUANOR 29001.

NORMA TÉCNICA GUATEMALTECA

Agua para consumo humano (*agua potable*). Especificaciones.



Comisión Guatemalteca de Normas
Ministerio de Economía

Edificio Centro Nacional de Metrología
Calzada Atanasio Tzul 27-32, zona 12
Teléfono: (502) 2476-6784 al 7
Info-coguanor@mineco.gob.gt
www.mineco.gob.gt

Referencia
ICS: 13.060.20

CONTENIDO

Prólogo COGUANOR	3
1. OBJETO	4
2. CAMPO DE APLICACIÓN	4
3. NORMAS A CONSULTAR.....	4
4. DEFINICIONES	4
5. CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES	6
5.1 Características físicas y organolépticas	6
5.2 Características químicas.....	7
6 CARACTERÍSTICAS BACTERIOLÓGICAS.....	10
6.1 Límites	10
7. ASPECTOS RADIOLÓGICOS	10
8. MÉTODOS DE ANÁLISIS.....	10
9. MUESTREO	11
10. CORRESPONDENCIA	11
BIBLIOGRAFÍA.....	12

Prólogo COGUANOR

La Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) es el Organismo Nacional de Normalización, creada por el Decreto No. 1523 del Congreso de la República del 05 de mayo de 1962. Sus funciones están definidas en el marco de la Ley del Sistema Nacional de la Calidad, Decreto 78-2005 del Congreso de la República.

COGUANOR es una entidad adscrita al Ministerio de Economía, su principal misión es la de proporcionar soporte técnico a los sectores público y privado por medio de la actividad de normalización.

El proceso de normalización se realiza a través de Comités Técnicos de Normalización (CTN), lo que garantiza la participación de todos los sectores interesados.

El estudio de la presente norma *COGUANOR NTG 29001. Agua para consumo humano (agua potable). Especificaciones*, estuvo a cargo del Comité Técnico de Normalización de Metodologías Microbiológicas, habiendo participado los siguientes profesionales, a título personal o en representación de organizaciones y entidades relacionadas con el contenido de la norma:

INTEGRANTES DEL CTN METODOLOGÍAS MICROBIOLÓGICAS

Licda. Maricruz Álvarez Mury	Universidad del Valle de Guatemala (UVG)
Lic. Julio César Flores	Alimentos Kern's
Lic. Sergio Lickes	Alimentos Kern's
Lic. Wiliam Estrada	Instituto de Fomento Municipal (INFOM)
Licda. Lilian de Batres	Programa Integral de Protección Agrícola y Ambiental (PIPAA)
Licda. Juventina González	GUATELABS
Licda. Patricia Maldonado de García	Independiente
Licda. Karin Herrera	Depto. Microbiología/Fac. CCQQ y Farmacia/USAC
Lic. Víctor Jiménez	Laboratorio Nacional de Salud (LNS)
Ing. Héctor Gudiel	Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA)
Licda. Teresita de Miranda	Independiente
Licda. Xiomara Juárez	UBL. S.A.
Licda. Claudia Alvarado	3M
Ing. Nelson Mendoza	COGUANOR

Agua para consumo humano. Especificaciones.

1. OBJETO

Esta norma establece los valores de las características que definen la calidad del agua apta para consumo humano.

2. CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma se aplica a toda agua para consumo humano, destinada para alimentación y uso doméstico, que provenga de fuentes como: pozos, nacimientos, ríos, etc. El agua podrá estar ubicada en una red de distribución, en reservorios o depósitos.

Se excluyen a las aguas purificadas envasadas y aguas carbonatadas, las cuales son cubiertas por normas específicas.

3. NORMAS A CONSULTAR

COGUANOR NGO 4010. Sistema Internacional de Unidades (SI).

COGUANOR NGO 29 018 h21. Agua. Prueba de sustrato enzimático para determinación de coliformes totales y *Escherichia coli*.

Mientras las normas COGUANOR relacionadas no sean actualizadas, se aplicarán los métodos normalizados establecidos en *Standard Methods for the Analysis of Water and Wastewater, APHA*, en su última edición.

Además de los métodos indicados, se podrán emplear los establecidos en la versión más reciente de las Normas ISO 5667 1 a la 19, ISO 9695 (beta total) e ISO 9696 (alfa total).

Measurement of radionuclides in food and the environment. A Guidebook. Technical Report. Series No. 295. International Atomic Energy, Vienna, 1989.

4. DEFINICIONES

4.1

agua apta para consumo humano

agua potable

es aquella que por sus características organolépticas, físicas, químicas y bacteriológicas, no representa un riesgo para la salud del consumidor y cumple con lo establecido en la presente norma.

4.2

características físicas y organolépticas del agua

son aquellas que se detectan sensorialmente o por medios analíticos de laboratorio.

4.3

características químicas del agua

son aquellas debidas a elementos o compuestos químicos orgánicos e inorgánicos,

4.4

características microbiológicas del agua

son aquellas que se originan por presencia de microorganismos que determinan su calidad.

4.5

cloro residual libre

parámetro que indica la concentración de cloro disuelto y químicamente disponible después de la cloración.

4.6

Límite Máximo Aceptable (LMA)

es el valor de la concentración de cualquier característica del agua, arriba de la cual estas características son percibidas por los consumidores desde el punto de vista sensorial pero sin que implique un daño a la salud del consumidor.

4.7

Límite Máximo Permisible (LMP)

es el valor de la concentración de cualquier característica del agua, arriba de la cual el agua no es adecuada para consumo humano.

4.8

programa de análisis mínimo

los análisis en esta etapa de control son: a. Análisis microbiológico: coliformes totales y *Escherichia coli*; b. Análisis fisicoquímico: color, turbiedad, potencial de hidrogeno (pH), conductividad, cloro residual libre, cloruros, dureza total, sulfatos, calcio, magnesio, nitratos, nitritos, hierro total y manganeso total.¹

4.9

programa de análisis complementario²

comprende la ejecución del programa de análisis mínimo, ampliado con: aluminio, cobre, arsénico, cadmio, cianuro, cromo total, mercurio total, plomo, selenio, cinc, sólidos totales disueltos y sustancias orgánicas (plaguicidas) que afecten la salud del consumidor.

Cuando se requiera un análisis específico, la norma contempla en los cuadros 1 al 8 aquellos parámetros que no han sido enunciados en los numerales 4.8 y 4.9 con sus respectivos Límites Máximos Permisibles (LMP)

¹ Para aguas sin tratamiento la autoridad competente será el ente encargado de indicar los parámetros mínimos a ser requeridos.

² Este análisis debe hacerse por lo menos una vez previo a autorizar la distribución o consumo del agua o cuando sea requerido por la autoridad competente.

4.10**redes de distribución**

conjunto de tuberías, accesorios y dispositivos que permiten la entrega del agua a los consumidores de forma constante, con presión apropiada y en cantidad suficiente para satisfacer sus necesidades. Se consideran parte de una red de distribución: camiones cisterna y depósitos de cualquier naturaleza.

4.11**sustancia plaguicida**

término genérico que incluye a compuestos que forman parte de los siguientes grupos: insecticidas, herbicidas, fungicidas, acaricidas, nematicidas, alguicidas entre otros, productos derivados y sus metabolitos, productos de degradación y de reacción de los mismos.

4.12**radionúclidos****radioisótopo**

Núcleo atómico que se caracteriza por emitir radiaciones ionizantes para transformarse en otro, que a su vez puede o no emitir radiaciones, hasta llegar a alcanzar la estabilidad nuclear, transformándose al final en un núclido estable.

5. CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES**5.1 Características físicas y organolépticas**

Cuadro 1. Características físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano

Características	LMA	LMP
Color	5,0 u	35,0 u ^(a)
Olor	No rechazable	No rechazable
Turbiedad	5,0 UNT	15,0 UNT ^(b)
Conductividad eléctrica	750 μ S/cm	1500 μ S/cm ^(d)
Potencial de hidrógeno	7,0-7,5	6,5-8,5 ^{(c) (d)}
Sólidos totales disueltos	500,0 mg/L	1000,0 mg/L

(a) Unidades de color en la escala de platino-cobalto
 (b) Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).
 (c) En unidades de pH
 (d) Límites establecidos a una temperatura de 25°C.

5.2 Características químicas

Cuadro 2. Características químicas que debe tener el agua para consumo humano

Características	LMA (mg/L)	LMP (mg/L)
Cloro residual libre ^(a)	0,5	1,0
Cloruro (Cl ⁻)	100,0	250,0
Dureza Total (CaCO ₃)	100,0	500,0
Sulfato (SO ₄ ⁻)	100,0	250,0
Aluminio (Al)	0,050	0,100
Calcio (Ca)	75,0	150,0
Cinc (Zn)	3,0	70,0
Cobre (Cu)	0,050	1,500
Magnesio (Mg)	50,0	100,0
Manganeso total (Mn)	0,1	0,4
Hierro total (Fe) ^(b)	0,3	---

a) El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social será el ente encargado de indicar los límites mínimos y máximos de cloro residual libre según sea necesario o en caso de emergencia.

b) No se incluye el LMP porque la OMS establece que no es un riesgo para la salud del consumidor a las concentraciones normales en el agua para consumo humano, sin embargo el gusto y apariencia del agua pueden verse afectados a concentraciones superiores al LMA.

Cuadro 3. Relación de las sustancias inorgánicas cuya presencia en el agua es significativa para la salud

Substancia	LMP (mg/L)
Arsénico (As)	0,010
Bario (Ba)	0,70
Boro (B)	0,30
Cadmio (Cd)	0,003
Cianuro (CN ⁻)	0,070
Cromo total (Cr)	0,050
Mercurio total (Hg)	0,001
Plomo (Pb)	0,010
Selenio (Se)	0,010
Nitrato (NO ₃ ⁻)	50,0
Nitrito (NO ₂ ⁻)	3,0

Cuadro 4. Substancias plaguicidas cuya presencia en el agua es significativa para la salud

Grupo	LMP (µg/L)
<u>Compuestos organoclorados^(a)</u>	
Aldrín y Dieldrín	0,03
Clordano	0,20
Clorotolurón	30,0
DDT y sus metabolitos	1,00
Endrín	0,60
Lindano	2,00
Metoxicloro	20,0
Pentaclorofenol	9,00
<u>Acidos fenoxi</u>	
2,4-D	30,0
2,4-DB	90,0
2,4,5-T	9,00
Mecoprop	10,0
Dicloroprop	100,0
MCPA	2,00
<u>Fumigantes</u>	
1,2-Dicloropropano	40,0
1,3-Dicloropropeno	20,0
DBCP (1,2-Dibromo-3-cloropropano)	1,00
<u>Triazinas</u>	
Atrazina	2,00
Simazina	2,00
<u>Acetanilidas</u>	
Alacloro	20,0
Metolacloro	10,0
<u>Carbamatos</u>	
Aldicarb y sus metabolitos	10,0
Carbofurán	7,00
Isoproturón	9,00
Molinato	6,00
Pendimetalina	20,0
<u>Amidas</u>	
Di (etil-hexil) ftalato	8,00
Trifluralín	20,0
<u>Organofosforados</u>	
Carbofurán	7,00
Clorpirifós	30,0
Dimetoato	6,00

^(a) Aunque algunas de estas sustancias ya no son permitidas se asignan los valores límite, debido a su persistencia ambiental.

Cuadro 5. Sustancias orgánicas cuya presencia en el agua es significativa para la salud

Compuesto	LMP (µg/L)
Acido edético (EDTA) ⁽⁴⁾	600,0
Acido nitrilo triacético	200,0
Benceno	10,0 ⁽¹⁾
Cloruro de vinilo	0,3, ⁽¹⁾
o-diclorobenceno	1000,0 ⁽²⁾
p-diclorobenceno	300,0 ⁽²⁾
1,2-dicloroetano	30,0 ⁽¹⁾
1,1-dicloroetano	30,0
1,2-dicloroetano	50,0
cis-1,2-dicloroetileno	50,0
trans-1,2-dicloroetileno	50,0
Diclorometano	20,0
1,2-dicloropropano	40,0 ⁽³⁾
Di(2-etilhexil)ftalato	8,0
1,4-dioxano	50,0 ⁽¹⁾
Estireno	20,0 ⁽²⁾
Etilbenceno	300,0 ⁽²⁾
Hexaclorobutadieno	0,6
Pentaclorofenol	9,0 ⁽¹⁾⁽³⁾
Tetracloruro de carbono	4,0
Tetracloroetano	40,0
Tolueno	700,0 ⁽²⁾
Tricloroetano	20,0 ⁽³⁾
Xileno	500,0 ⁽²⁾

(1) El valor de referencia de las sustancias que se consideran cancerígenas es la concentración en el agua asociada con un límite de riesgo adicional de cáncer durante toda la vida de 10^{-5} (un caso adicional de cáncer por cada 100,000 personas que ingieren agua de bebida con una concentración de la sustancia igual al valor de referencia durante 70 años). Las concentraciones asociadas con límites superiores estimados de riesgo adicional de cáncer de 10^{-4} y 10^{-6} pueden calcularse multiplicando y dividiendo, respectivamente, el valor de referencia por 10.

(2) Concentraciones de la sustancia iguales o superiores al valor de referencia basado en criterios de salud pueden afectar la apariencia, gusto u olor del agua, dando lugar a reclamos por parte de los consumidores.

(3) Valor de referencia provisional, dado que hay evidencia de que la sustancia es peligrosa, pero existe escasa información disponible relativa a sus efectos sobre la salud.

(4) Aplica al ácido libre.

6 CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS

6.1 Límites

Cuadro 6. Valores guía para verificación de la calidad microbiológica del agua

Microorganismos	Límite Máximo Permisible
Agua para consumo directo Coliformes totales y <i>E. coli</i>	No deben ser detectables en 100mL de agua
Agua tratada que entra al sistema de distribución Coliformes totales y <i>E. coli</i>	No deben ser detectables en 100mL de agua
Agua tratada en el sistema de distribución Coliformes totales y <i>E. coli</i>	No deben ser detectables en 100mL de agua

7. ASPECTOS RADIOLÓGICOS

Cuadro 7. Valores guía para los aspectos radiológicos en agua

Características	Valor Máximo Aceptable	Observaciones
Radioactividad alfa total	0,10 Bq/L ⁽¹⁾	Si se sobrepasa el valor límite, es necesario un análisis más detallado de los radionúclidos.
Radioactividad beta total	1,0 Bq/L	

⁽¹⁾ Bq es Bequerel que es la unidad radiométrica utilizada para medir la actividad de una fuente. Se simboliza por Bq y es equivalente a 1 desintegración/segundo.

Cuadro 8. Radionúclidos indicadores de radiación y sus valores guía en agua

Radiación	Indicador	Límites
Alfa artificial	Americio 241	0,1 Bequerel/L
Beta artificial	Estroncio 90	1,0 Bequerel/L
Gamma artificial	Cesio 137	No definido

8. MÉTODOS DE ANÁLISIS

8.1 Las determinaciones de las especificaciones y características fisicoquímicas, microbiológicas y aspectos radiológicos del agua, indicadas en la presente norma, se deben realizar de acuerdo con las normas COGUANOR correspondientes. Mientras las normas COGUANOR no estén actualizadas, se podrán emplear los métodos establecidos en el capítulo 3 de esta norma.

9. MUESTREO

9.1 El muestreo para el análisis fisicoquímico, microbiológico y los aspectos radiológicos del agua, indicado en la presente norma, y los criterios de aceptación o rechazo, se deben realizar de acuerdo con las normas COGUANOR correspondientes. Mientras las normas COGUANOR no estén actualizadas, se podrán emplear los métodos establecidos en el capítulo 3 de esta norma.

10. CORRESPONDENCIA

Para la elaboración de la presente norma se han tomado en cuenta los siguientes documentos.

- a) Norma COGUANOR NGO 29 001. Primera revisión 1999. AGUA POTABLE. Especificaciones.
- b) Guías para la Calidad del Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud. 3^a.edición, Ginebra. 1995, corresponden al volumen 1, 2^a. edición.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, de la American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Water Environment Federation (WEF), 21st Edition, 2005.
- [2] Solsona, Felipe. Guías para elaborar normas de agua potable en países en vías en desarrollo. Organización Mundial de la Salud. 2002.
- [4] UNIT 833:2008. Agua potable. Requisitos.
- [5] Normas oficiales para la calidad de agua Argentina. Disposiciones de la Ley 18284 (Código alimentario argentino) sobre aguas.
- [6] Norma Boliviana NB 512. 2005. Calidad de agua potable para consumo humano. Requisitos
- [7] Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- [8] Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01.04:2006. Agua. Agua potable.

--- Última Línea ---



National Primary Drinking Water Regulations

Contaminant	MCL or TT ¹ (mg/L) ²	Potential health effects from long-term ³ exposure above the MCL	Common sources of contaminant in drinking water	Public Health Goal (mg/L) ²
OC Acrylamide	TT ⁴	Nervous system or blood problems; increased risk of cancer	Added to water during sewage/wastewater treatment	zero
OC Alachlor	0.002	Eye, liver, kidney or spleen problems; anemia; increased risk of cancer	Runoff from herbicide used on row crops	zero
R Alpha/photon emitters	15 picocuries per Liter (pCi/L)	Increased risk of cancer	Erosion of natural deposits of certain minerals that are radioactive and may emit a form of radiation known as alpha radiation	zero
IOC Antimony	0.006	Increase in blood cholesterol; decrease in blood sugar	Discharge from petroleum refineries; fire retardants; ceramics; electronics; solder	0.006
IOC Arsenic	0.010	Skin damage or problems with circulatory systems, and may have increased risk of getting cancer	Erosion of natural deposits; runoff from orchards; runoff from glass & electronics production wastes	0
IOC Asbestos (fibers >10 micrometers)	7 million fibers per Liter (MFL)	Increased risk of developing benign intestinal polyps	Decay of asbestos cement in water mains; erosion of natural deposits	7 MFL
OC Atrazine	0.003	Cardiovascular system or reproductive problems	Runoff from herbicide used on row crops	0.003
IOC Barium	2	Increase in blood pressure	Discharge of drilling wastes; discharge from metal refineries; erosion of natural deposits	2
OC Benzene	0.005	Anemia; decrease in blood platelets; increased risk of cancer	Discharge from factories; leaching from gas storage tanks and landfills	zero
OC Benzo(a)pyrene (PAHs)	0.0002	Reproductive difficulties; increased risk of cancer	Leaching from linings of water storage tanks and distribution lines	zero
IOC Beryllium	0.004	Intestinal lesions	Discharge from metal refineries and coal-burning factories; discharge from electrical, aerospace, and defense industries	0.004
R Beta photon emitters	4 millirems per year	Increased risk of cancer	Decay of natural and man-made deposits of certain minerals that are radioactive and may emit forms of radiation known as photons and beta radiation	zero
DBP Bromate	0.010	Increased risk of cancer	Byproduct of drinking water disinfection	zero
IOC Cadmium	0.005	Kidney damage	Corrosion of galvanized pipes; erosion of natural deposits; discharge from metal refineries; runoff from waste batteries and paints	0.005
OC Carbofuran	0.04	Problems with blood, nervous system, or reproductive system	Leaching of soil fumigant used on rice and alfalfa	0.04
OC Carbon tetrachloride	0.005	Liver problems; increased risk of cancer	Discharge from chemical plants and other industrial activities	zero
D Chloramines (as Cl ₂)	MRDL=4.0 ¹	Eye/nose irritation; stomach discomfort; anemia	Water additive used to control microbes	MRDLG=4 ¹
OC Chlordane	0.002	Liver or nervous system problems; increased risk of cancer	Residue of banned termiticide	zero
D Chlorine (as Cl ₂)	MRDL=4.0 ¹	Eye/nose irritation; stomach discomfort	Water additive used to control microbes	MRDLG=4 ¹
D Chlorine dioxide (as ClO ₂)	MRDL=0.8 ¹	Anemia; infants, young children, and fetuses of pregnant women: nervous system effects	Water additive used to control microbes	MRDLG=0.8 ¹
DBP Chlorite	1.0	Anemia; infants, young children, and fetuses of pregnant women: nervous system effects	Byproduct of drinking water disinfection	0.8
OC Chlorobenzene	0.1	Liver or kidney problems	Discharge from chemical and agricultural chemical factories	0.1
IOC Chromium (total)	0.1	Allergic dermatitis	Discharge from steel and pulp mills; erosion of natural deposits	0.1
IOC Copper	TT ⁵ ; Action Level = 1.3	Short-term exposure: Gastrointestinal distress. Long-term exposure: Liver or kidney damage. People with Wilson's Disease should consult their personal doctor if the amount of copper in their water exceeds the action level	Corrosion of household plumbing systems; erosion of natural deposits	1.3
M <i>Cryptosporidium</i>	TT ⁷	Short-term exposure: Gastrointestinal illness (e.g., diarrhea, vomiting, cramps)	Human and animal fecal waste	zero

LEGEND

D Disinfectant	IOC Inorganic Chemical	OC Organic Chemical
DBP Disinfection Byproduct	M Microorganism	R Radionuclides

Contaminant	MCL or TT ¹ (mg/L) ²	Potential health effects from long-term ³ exposure above the MCL	Common sources of contaminant in drinking water	Public Health Goal (mg/L) ²
IOC Cyanide (as free cyanide)	0.2	Nerve damage or thyroid problems	Discharge from steel/metal factories; discharge from plastic and fertilizer factories	0.2
OC 2,4-D	0.07	Kidney, liver, or adrenal gland problems	Runoff from herbicide used on row crops	0.07
OC Dalapon	0.2	Minor kidney changes	Runoff from herbicide used on rights of way	0.2
OC 1,2-Dibromo-3-chloropropane (DBCP)	0.0002	Reproductive difficulties; increased risk of cancer	Runoff/leaching from soil fumigant used on soybeans, cotton, pineapples, and orchards	zero
OC o-Dichlorobenzene	0.6	Liver, kidney, or circulatory system problems	Discharge from industrial chemical factories	0.6
OC p-Dichlorobenzene	0.075	Anemia; liver, kidney or spleen damage; changes in blood	Discharge from industrial chemical factories	0.075
OC 1,2-Dichloroethane	0.005	Increased risk of cancer	Discharge from industrial chemical factories	zero
OC 1,1-Dichloroethylene	0.007	Liver problems	Discharge from industrial chemical factories	0.007
OC cis-1,2-Dichloroethylene	0.07	Liver problems	Discharge from industrial chemical factories	0.07
OC trans-1,2-Dichloroethylene	0.1	Liver problems	Discharge from industrial chemical factories	0.1
OC Dichloromethane	0.005	Liver problems; increased risk of cancer	Discharge from drug and chemical factories	zero
OC 1,2-Dichloropropane	0.005	Increased risk of cancer	Discharge from industrial chemical factories	zero
OC Di(2-ethylhexyl) adipate	0.4	Weight loss, liver problems, or possible reproductive difficulties	Discharge from chemical factories	0.4
OC Di(2-ethylhexyl) phthalate	0.006	Reproductive difficulties; liver problems; increased risk of cancer	Discharge from rubber and chemical factories	zero
OC Dinoseb	0.007	Reproductive difficulties	Runoff from herbicide used on soybeans and vegetables	0.007
OC Dioxin (2,3,7,8-TCDD)	0.00000003	Reproductive difficulties; increased risk of cancer	Emissions from waste incineration and other combustion; discharge from chemical factories	zero
OC Diquat	0.02	Cataracts	Runoff from herbicide use	0.02
OC Endothall	0.1	Stomach and intestinal problems	Runoff from herbicide use	0.1
OC Endrin	0.002	Liver problems	Residue of banned insecticide	0.002
OC Epichlorohydrin	TT ⁴	Increased cancer risk; stomach problems	Discharge from industrial chemical factories; an impurity of some water treatment chemicals	zero
OC Ethylbenzene	0.7	Liver or kidney problems	Discharge from petroleum refineries	0.7
OC Ethylene dibromide	0.00005	Problems with liver, stomach, reproductive system, or kidneys; increased risk of cancer	Discharge from petroleum refineries	zero
M Fecal coliform and <i>E. coli</i>	MCL ⁵	Fecal coliforms and <i>E. coli</i> are bacteria whose presence indicates that the water may be contaminated with human or animal wastes. Microbes in these wastes may cause short term effects, such as diarrhea, cramps, nausea, headaches, or other symptoms. They may pose a special health risk for infants, young children, and people with severely compromised immune systems.	Human and animal fecal waste	zero ⁶
IOC Fluoride	4.0	Bone disease (pain and tenderness of the bones); children may get mottled teeth	Water additive which promotes strong teeth; erosion of natural deposits; discharge from fertilizer and aluminum factories	4.0
M <i>Giardia lamblia</i>	TT ⁷	Short-term exposure: Gastrointestinal illness (e.g., diarrhea, vomiting, cramps)	Human and animal fecal waste	zero
OC Glyphosate	0.7	Kidney problems; reproductive difficulties	Runoff from herbicide use	0.7
DBP Haloacetic acids (HAA5)	0.060	Increased risk of cancer	Byproduct of drinking water disinfection	n/a ⁹
OC Heptachlor	0.0004	Liver damage; increased risk of cancer	Residue of banned termiticide	zero
OC Heptachlor epoxide	0.0002	Liver damage; increased risk of cancer	Breakdown of heptachlor	zero
M Heterotrophic plate count (HPC)	TT ⁷	HPC has no health effects; it is an analytic method used to measure the variety of bacteria that are common in water. The lower the concentration of bacteria in drinking water, the better maintained the water system is.	HPC measures a range of bacteria that are naturally present in the environment	n/a

LEGEND
D Disinfectant

IOC Inorganic Chemical

OC Organic Chemical

DBP Disinfection Byproduct

M Microorganism

R Radionuclides

Contaminant	MCL or TT ¹ (mg/L) ²	Potential health effects from long-term ³ exposure above the MCL	Common sources of contaminant in drinking water	Public Health Goal (mg/L) ²
OC Hexachlorobenzene	0.001	Liver or kidney problems; reproductive difficulties; increased risk of cancer	Discharge from metal refineries and agricultural chemical factories	zero
OC Hexachlorocyclopentadiene	0.05	Kidney or stomach problems	Discharge from chemical factories	0.05
IOC Lead	TT5; Action Level=0.015	Infants and children: Delays in physical or mental development; children could show slight deficits in attention span and learning abilities; Adults: Kidney problems; high blood pressure	Corrosion of household plumbing systems; erosion of natural deposits	zero
M <i>Legionella</i>	TT7	Legionnaire's Disease, a type of pneumonia	Found naturally in water; multiplies in heating systems	zero
OC Lindane	0.0002	Liver or kidney problems	Runoff/leaching from insecticide used on cattle, lumber, gardens	0.0002
IOC Mercury (inorganic)	0.002	Kidney damage	Erosion of natural deposits; discharge from refineries and factories; runoff from landfills and croplands	0.002
OC Methoxychlor	0.04	Reproductive difficulties	Runoff/leaching from insecticide used on fruits, vegetables, alfalfa, livestock	0.04
IOC Nitrate (measured as Nitrogen)	10	Infants below the age of six months who drink water containing nitrate in excess of the MCL could become seriously ill and, if untreated, may die. Symptoms include shortness of breath and blue-baby syndrome.	Runoff from fertilizer use; leaching from septic tanks, sewage; erosion of natural deposits	10
IOC Nitrite (measured as Nitrogen)	1	Infants below the age of six months who drink water containing nitrite in excess of the MCL could become seriously ill and, if untreated, may die. Symptoms include shortness of breath and blue-baby syndrome.	Runoff from fertilizer use; leaching from septic tanks, sewage; erosion of natural deposits	1
OC Oxamyl (Vydate)	0.2	Slight nervous system effects	Runoff/leaching from insecticide used on apples, potatoes, and tomatoes	0.2
OC Pentachlorophenol	0.001	Liver or kidney problems; increased cancer risk	Discharge from wood-preserving factories	zero
OC Picloram	0.5	Liver problems	Herbicide runoff	0.5
OC Polychlorinated biphenyls (PCBs)	0.0005	Skin changes; thymus gland problems; immune deficiencies; reproductive or nervous system difficulties; increased risk of cancer	Runoff from landfills; discharge of waste chemicals	zero
R Radium 226 and Radium 228 (combined)	5 pCi/L	Increased risk of cancer	Erosion of natural deposits	zero
IOC Selenium	0.05	Hair or fingernail loss; numbness in fingers or toes; circulatory problems	Discharge from petroleum and metal refineries; erosion of natural deposits; discharge from mines	0.05
OC Simazine	0.004	Problems with blood	Herbicide runoff	0.004
OC Styrene	0.1	Liver, kidney, or circulatory system problems	Discharge from rubber and plastic factories; leaching from landfills	0.1
OC Tetrachloroethylene	0.005	Liver problems; increased risk of cancer	Discharge from factories and dry cleaners	zero
IOC Thallium	0.002	Hair loss; changes in blood; kidney, intestine, or liver problems	Leaching from ore-processing sites; discharge from electronics, glass, and drug factories	0.0005
OC Toluene	1	Nervous system, kidney, or liver problems	Discharge from petroleum factories	1
M Total Coliforms	5.0 percent ⁸	Coliforms are bacteria that indicate that other, potentially harmful bacteria may be present. See fecal coliforms and <i>E. coli</i>	Naturally present in the environment	zero
DBP Total Trihalomethanes (TTHMs)	0.080	Liver, kidney or central nervous system problems; increased risk of cancer	Byproduct of drinking water disinfection	n/a ⁹
OC Toxaphene	0.003	Kidney, liver, or thyroid problems; increased risk of cancer	Runoff/leaching from insecticide used on cotton and cattle	zero
OC 2,4,5-TP (Silvex)	0.05	Liver problems	Residue of banned herbicide	0.05
OC 1,2,4-Trichlorobenzene	0.07	Changes in adrenal glands	Discharge from textile finishing factories	0.07
OC 1,1,1-Trichloroethane	0.2	Liver, nervous system, or circulatory problems	Discharge from metal degreasing sites and other factories	0.2
OC 1,1,2-Trichloroethane	0.005	Liver, kidney, or immune system problems	Discharge from industrial chemical factories	0.003
OC Trichloroethylene	0.005	Liver problems; increased risk of cancer	Discharge from metal degreasing sites and other factories	zero

LEGEND

D Disinfectant	IOC Inorganic Chemical	OC Organic Chemical
DBP Disinfection Byproduct	M Microorganism	R Radionuclides

Contaminant	MCL or TT ¹ (mg/L) ²	Potential health effects from long-term ³ exposure above the MCL	Common sources of contaminant in drinking water	Public Health Goal (mg/L) ²
M Turbidity	TT ⁷	Turbidity is a measure of the cloudiness of water. It is used to indicate water quality and filtration effectiveness (e.g., whether disease-causing organisms are present). Higher turbidity levels are often associated with higher levels of disease-causing microorganisms such as viruses, parasites and some bacteria. These organisms can cause short term symptoms such as nausea, cramps, diarrhea, and associated headaches.	Soil runoff	n/a
R Uranium	30µg/L	Increased risk of cancer, kidney toxicity	Erosion of natural deposits	zero
OC Vinyl chloride	0.002	Increased risk of cancer	Leaching from PVC pipes; discharge from plastic factories	zero
M Viruses (enteric)	TT ⁷	Short-term exposure: Gastrointestinal illness (e.g., diarrhea, vomiting, cramps)	Human and animal fecal waste	zero
OC Xylenes (total)	10	Nervous system damage	Discharge from petroleum factories; discharge from chemical factories	10

LEGEND

D Disinfectant	IOC Inorganic Chemical	OC Organic Chemical
DBP Disinfection Byproduct	M Microorganism	R Radionuclides

NOTES

1 Definitions

- Maximum Contaminant Level Goal (MCLG)—The level of a contaminant in drinking water below which there is no known or expected risk to health. MCLGs allow for a margin of safety and are non-enforceable public health goals.
 - Maximum Contaminant Level (MCL)—The highest level of a contaminant that is allowed in drinking water. MCLs are set as close to MCLGs as feasible using the best available treatment technology and taking cost into consideration. MCLs are enforceable standards.
 - Maximum Residual Disinfectant Level Goal (MRDLG)—The level of a drinking water disinfectant below which there is no known or expected risk to health. MRDLGs do not reflect the benefits of the use of disinfectants to control microbial contaminants.
 - Maximum Residual Disinfectant Level (MRDL)—The highest level of a disinfectant allowed in drinking water. There is convincing evidence that addition of a disinfectant is necessary for control of microbial contaminants.
 - Treatment Technique (TT)—A required process intended to reduce the level of a contaminant in drinking water.
- 2 Units are in milligrams per liter (mg/L) unless otherwise noted. Milligrams per liter are equivalent to parts per million (ppm).
- 3 Health effects are from long-term exposure unless specified as short-term exposure.
- 4 Each water system must certify annually, in writing, to the state (using third-party or manufacturers certification) that when it uses acrylamide and/or epichlorohydrin to treat water, the combination (or product) of dose and monomer level does not exceed the levels specified, as follows: Acrylamide = 0.05 percent dosed at 1 mg/L (or equivalent); Epichlorohydrin = 0.01 percent dosed at 20 mg/L (or equivalent).
- 5 Lead and copper are regulated by a Treatment Technique that requires systems to control the corrosiveness of their water. If more than 10 percent of tap water samples exceed the action level, water systems must take additional steps. For copper, the action level is 1.3 mg/L, and for lead is 0.015 mg/L.
- 6 A routine sample that is fecal coliform-positive or *E. coli*-positive triggers repeat samples—if any repeat sample is total coliform-positive, the system has an acute MCL violation. A routine sample that is total coliform-positive and fecal coliform-negative or *E. coli*-negative triggers repeat samples—if any repeat sample is fecal coliform-positive or *E. coli*-positive, the system has an acute MCL violation. See also Total Coliforms.
- 7 EPA's surface water treatment rules require systems using surface water or ground water under the direct influence of surface water to (1) disinfect their water, and (2) filter their water or meet criteria for avoiding filtration so that the following contaminants are controlled at the following levels:
- *Cryptosporidium*: 99 percent removal for systems that filter. Unfiltered systems are required to include *Cryptosporidium* in their existing watershed control provisions.
 - *Giardia lamblia*: 99.9 percent removal/inactivation
 - Viruses: 99.99 percent removal/inactivation
 - *Legionella*: No limit, but EPA believes that if *Giardia* and viruses are removed/inactivated according to the treatment techniques in the surface water treatment rule, *Legionella* will also be controlled.
 - Turbidity: For systems that use conventional or direct filtration, at no time can turbidity (cloudiness of water) go higher than 1 nephelometric turbidity unit (NTU), and samples for turbidity must be less than or equal to 0.3 NTU in at least 95 percent of the samples in any month. Systems that use filtration other than conventional or direct filtration must follow state limits, which must include turbidity at no time exceeding 5 NTU.
 - HPC: No more than 500 bacterial colonies per milliliter
 - Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment; Surface water systems or ground water systems under the direct influence of surface water serving fewer than 10,000 people must comply with the applicable Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment Rule provisions (e.g. turbidity standards, individual filter monitoring, *Cryptosporidium* removal requirements, updated watershed control requirements for unfiltered systems).
 - Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment; This rule applies to all surface water systems or ground water systems under the direct influence of surface water. The rule targets additional *Cryptosporidium* treatment requirements for higher risk systems and includes provisions to reduce risks from uncovered finished water storage facilities and to ensure that the systems maintain microbial protection as they take steps to reduce the formation of disinfection byproducts. (Monitoring start dates are staggered by system size. The largest systems (serving at least 100,000 people) will begin monitoring in October 2006 and the smallest systems (serving fewer than 10,000 people) will not begin monitoring until October 2008. After completing monitoring and determining their treatment bin, systems generally have three years to comply with any additional treatment requirements.)
 - Filter Backwash Recycling: The Filter Backwash Recycling Rule requires systems that recycle to return specific recycle flows through all processes of the system's existing conventional or direct filtration system or at an alternate location approved by the state.
- 8 No more than 5.0 percent samples total coliform-positive in a month. (For water systems that collect fewer than 40 routine samples per month, no more than one sample can be total coliform-positive per month.) Every sample that has total coliform must be analyzed for either fecal coliforms or *E. coli*. If two consecutive TC-positive samples, and one is also positive for *E. coli* or fecal coliforms, system has an acute MCL violation.
- 9 Although there is no collective MCLG for this contaminant group, there are individual MCLGs for some of the individual contaminants:
- Haloacetic acids: dichloroacetic acid (zero); trichloroacetic acid (0.3 mg/L)
 - Trihalomethanes: bromodichloromethane (zero); bromoform (zero); dibromochloromethane (0.06 mg/L)

National Secondary Drinking Water Regulation

National Secondary Drinking Water Regulations are non-enforceable guidelines regarding contaminants that may cause cosmetic effects (such as skin or tooth discoloration) or aesthetic effects (such as taste, odor, or color) in drinking water. EPA recommends secondary standards to water systems but does not require systems to comply. However, some states may choose to adopt them as enforceable standards.

Contaminant	Secondary Maximum Contaminant Level
Aluminum	0.05 to 0.2 mg/L
Chloride	250 mg/L
Color	15 (color units)
Copper	1.0 mg/L
Corrosivity	noncorrosive
Fluoride	2.0 mg/L
Foaming Agents	0.5 mg/L
Iron	0.3 mg/L
Manganese	0.05 mg/L
Odor	3 threshold odor number
pH	6.5-8.5
Silver	0.10 mg/L
Sulfate	250 mg/L
Total Dissolved Solids	500 mg/L
Zinc	5 mg/L

For More Information

EPA's Safe Drinking Water Web site:
<http://www.epa.gov/safewater/>

EPA's Safe Drinking Water Hotline:
(800) 426-4791

To order additional posters or other ground water and drinking water publications, please contact the National Service Center for Environmental Publications at :
(800) 490-9198, or
email: nscep@bps-lmit.com.

Anexo Q: resultados de análisis físico químico y microbiológico en pozo ubicado en zona 16, en cercanías a la Universidad Rafael Landívar, en el año 2013.

Tabla No. 39: resultados análisis fisicoquímico pozo zona 16 (1).

PARÁMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	RESULTADOS	LÍMITE MÁXIMO ACEPTABLE	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	MÉTODO DE ANÁLISIS
PH	UNIDADES DE PH	7.03	7.0-7.5	6.5-8.5	¹ SMEWW 4500-H
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	µSIEMENS/CM	222	---	<1,500	ELECTROQUÍMICO
SALINIDAD	G/L	0.0128	---	---	² HWAH 10073
TEMPERATURA	°C	NO REGISTRADA	15-25°C	34°C	SMEWW 2550-B
COLOR	UNIDADES PT-CO	107	5	35	HWAH 8025
OLOR	SENSORIAL	NO RECHAZABLE	---	---	ORGANOLÉPTICO
APARIENCIA	VISUAL	LIGERAMENTE TURBIA	---	---	SMEWW 2010
TURBIEDAD	UNT	13.2	5	15	HWAH 8237
CLORO RESIDUAL	MG/L	0.0	0.5	1	HWAH 10069
HIERRO TOTAL	MG/L	1.41	0.1	1	SMEWW 3500 Fe D
MANGANESO	MG/L	0.071	0.05	0.5	HWAH 8034
NITRITOS	MG/L	0.009	-	1	HWAH 8507
SULFATOS	MG/L	8	100	250	HWAH 8051
NITRATOS (COMO NITRÓGENO)	MG/L	1.1	---	10	HWAH 8039
FOSFATOS	MG/L	0.54	---	---	HWAH 8048
FLÚOR	MG/L	0.11	---	1.7	HWAH 8029
SODIO (COMO CLORURO DE SODIO)	MG/L	5.073	---	---	HWAH 8206-1
SÍLICE (SiO ₂)	MG/L	20	---	---	HWAH 8185
DUREZA TOTAL	MG/L (CaCO ₃)	66	100	500	SMEWW 2340 C
CALCIO	MG/L (CaCO ₃)	38	---	---	SMEWW 3500 Ca D
MAGNESIO	MG/L (CaCO ₃)	28	---	---	SMEWW 3500 Mg E
CALCIO (Ca)	MG/L	15.22	75	150	SMEWW 3500 Ca D
MAGNESIO (Mg)	MG/L	6.80	50	100	SMEWW 3500 Mg E
CLORURDS	MG/L	8	100	250	HWAH 8206
DIÓXIDO DE CARBONO	MG/L	14	---	---	HWAH 8205
POTASIO	MG/L	3.5	---	---	HWAH 8049
ALCALINIDAD TOTAL	MG/L (CaCO ₃)	87	---	---	HWAH 8204
ALCALINIDAD POR CARBONATOS	MG/L (CaCO ₃)	0	---	---	HWAH 8204
ALCALINIDAD POR HIDRÓXIDOS	MG/L (CaCO ₃)	0	---	---	HWAH 8204
ALCALINIDAD POR BICARBONATOS	MG/L (CaCO ₃)	87	---	---	HWAH 8204
TOTAL SÓLIDOS DISUELTOS (TDS)	MG/L	111	500	1000	ELECTROQUÍMICO
TANINOS	MG/L	0.2	---	---	HWAH 8193

1 = STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 21ST EDITION, 2005, USA

2 = HACH WATER ANALYSIS HANDBOOK

MG/L = MILIGRAMOS POR LITRO (PPM) < = MENOR DE

UNT = UNIDADES NEFELOMÉTRICAS DE TURBIEDAD

LÍMITES MÁXIMO ACEPTABLE Y MÁXIMO PERMISIBLE DE ACUERDO CON LA NORMA GUATEMALTECA COGUANOR NGD 29 001 99 PARA AGUA POTABLE

Fuente: confidencial (modelo propio de un determinado laboratorio guatemalteco contratado por una empresa perforadora específica).

Tabla No. 40: resultados de análisis bacteriológico pozo zona 16 (1).

Volumen y Condiciones de la Muestra: 100 mL de la muestra contenida en bolsa plástica estéril.

ANÁLISIS SOLICITADOS: Examen bacteriológico de potabilidad

MÉTODOS DE ANÁLISIS: American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st Edition, 2005, USA. Recuento Aeróbico Total Método 9215. Recuento de Coliformes y *E. coli* Método 9221.

RESULTADO:

No. Registro Laboratorio	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	RECuento AEROBICO TOTAL *UFC/mL	COLIFORMES TOTALES **NMP/100 mL	COLIFORMES FECALES NMP/100 mL	<i>ESCHERICHIA COLI</i> NMP/100 mL
098513	AGUA DE POZO NO. 2 ODT 11005	1,010	<2	<2	<2 Ausencia
NORMA SANITARIA GUATEMALTECA DE AGUA POTABLE COGUANOR NGO 29 001 VALORES DE CUMPLIMIENTO:		NO REFIERE	***<2 Ausencia	<2 Ausencia	<2 Ausencia

*UFC = Unidades formadoras de colonias

**NMP/100 ml = Número más probable por cien mililitros

***<2 = Significa AUSENCIA cuando se usa una prueba de 15 tubos

ml = mililitro

< = Menor que

Fuente: confidencial (modelo propio de un determinado laboratorio guatemalteco contratado por una empresa perforadora específica).

Anexo R: resultados de análisis físico químico en pozo ubicado en zona 16, en el sector de San Isidro, en el año 2012.

Tabla No. 41: resultados análisis fisicoquímico pozo zona 16 (2).

PARÁMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	RESULTADOS	LÍMITE MÁXIMO ACEPTABLE	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	MÉTODO DE ANÁLISIS
PH	UNIDADES DE PH	6.99	7.0-7.5	6.5-8.5	¹ SMEWW 4500-H
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	µSIEMENS/CM	240	---	<1,500	ELECTROQUÍMICO
SALINIDAD	G/L	0.0128	---	---	² HWAH 10073
TEMPERATURA	°C	NO REGISTRADA	15-25°C	34°C	SMEWW 2550-B
COLOR	UNIDADES PT-CO	33	5	35	HWAH 8025
OLOR	SENSORIAL	NO RECHAZABLE	---	---	ORGANOLÉPTICO
APARIENCIA	VISUAL	CLARA	---	---	SMEWW 2010
TURBIEDAD	UNT	4.08	5	15	HWAH 8237
CLORO RESIDUAL	MG/L	0.0	0.5	1	HWAH 10069
HIERRO TOTAL	MG/L	1.13	0.1	1	SMEWW 3500 FE D
MANGANESO	MG/L	0.100	0.05	0.5	HWAH 8034
NITRITOS	MG/L	0.005	-	1	HWAH 8507
SULFATOS	MG/L	0	100	250	HWAH 8051
NITRATOS (COMO NITRÓGENO)	MG/L	0.5	---	10	HWAH 8039
FOSFATOS	MG/L	0.42	---	---	HWAH 8048
FLÚOR	MG/L	0.34	---	1.7	HWAH 8029
SODIO (COMO CLORURO DE SODIO)	MG/L	5.073	---	---	HWAH 8206-1
SÍLICE (SiO ₂)	MG/L	96	---	---	HWAH 8185
DUREZA TOTAL	MG/L (CaCO ₃)	80	100	500	SMEWW 2340 C
CALCIO	MG/L (CaCO ₃)	38	---	---	SMEWW 3500 CA D
MAGNESIO	MG/L (CaCO ₃)	42	---	---	SMEWW 3500 MG E
CALCIO (CA)	MG/L	15.21	75	150	SMEWW 3500 CA D
MAGNESIO (MG)	MG/L	10.20	50	100	SMEWW 3500 MG E
CLORURDS	MG/L	8	100	250	HWAH 8206
DIÓXIDO DE CARBONO	MG/L	42	---	---	HWAH 8205
POTASIO	MG/L	3.8	---	---	HWAH 8049
ALCALINIDAD TOTAL	MG/L (CaCO ₃)	115	---	---	HWAH 8204
ALCALINIDAD POR CARBONATOS	MG/L (CaCO ₃)	0	---	---	HWAH 8204
ALCALINIDAD POR HIDRÓXIDOS	MG/L (CaCO ₃)	0	---	---	HWAH 8204
ALCALINIDAD POR BICARBONATOS	MG/L (CaCO ₃)	115	---	---	HWAH 8204
TOTAL SÓLIDOS DISUELTOS (TDS)	MG/L	120	500	1000	ELECTROQUÍMICO
TANINOS	MG/L	0.0	---	---	HWAH 8193

¹ = STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 21ST EDITION, 2005, USA.

² = HACH WATER ANALYSIS HANDBOOK

MG/L = MILIGRAMOS POR LITRO (PPM) < = MENOR DE

UNT = UNIDADES NEFELOMÉTRICAS DE TURBIEDAD

--- = NO ESPECIFICADO EN LA NORMA

LÍMITES MÁXIMO ACEPTABLE Y MÁXIMO PERMISIBLE DE ACUERDO CON LA NORMA GUATEMALTECA DOGUANOR NGO 29 001 99 PARA AGUA POTABLE

Fuente: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3603_C.pdf (2013).

Anexo S: resultados de análisis físico químico y microbiológico en pozo ubicado en km 18.8 carretera al Pacífico, Villa Nueva, en el año 2012.

Tabla No. 42: resultados análisis fisicoquímico y microbiológico pozo Villa Nueva.

Párametros	Dimensional	Valor	LMA*	LMP*
pH		7.8	7.0 - 7.5	6.5 - 8.5
C.S.	mohms/cm	0.39	--	<1500 mohm
DUREZA	mg/l CaCO ₃	43.3	100.0	500.0
TURBIEDAD	NTU	< 5.00	5.0	15.0
OLOR		NO RECHAZABLE	NO RECHAZABLE	--
COLOR	UPtCo	< 1.00	--	35.0

Elemento	Dimensional	Valor	LMA*	LMP*
Nitrato	mg/l NO ₃	3.10	---	50.00**
Nitritos	mg/l NO ₂	< 0.01	---	1.00
Calcio	mg/l Ca	10.30	75.00	150.00
Magnesio	mg/l Mg	4.27	50.00	100.00
Sulfato	mg/l SO ₄	20.80	100.00	250.00
Boro	mg/l B	0.84	---	0.30
Cobre	mg/l Cu	< 0.02	0.05	1.50
Hierro	mg/l Fe	< 0.06	0.10	1.00
Manganeso	mg/l Mn	0.01	0.05	0.50
Zinc	mg/l Zn	0.03	3.00	70.00
Cloruro	mg/l Cl	19.00	100.00	250.00

PARAMETROS	DIMENSIONALES	VALOR	* VALOR PERMITIDO	LIMITE DE DETECCION	METODOLOGIA
** CONTEO DE BACTERIAS AEROBIAS	UFC/ml	2,600	--	< 10	SM 9215
COLIFORMES TOTALES	NMP/100ml	< 3	< 3	< 3	SM 9221 B
COLIFORMES FECALES	NMP/100ml	< 3	< 3	< 3	SM 9221 E
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100ml	< 3	< 3	< 3	SM 9221 F

UFC: Unidades Formadoras de Colonia.

NMP: Número más probable.

< : Menor de

* Según Norma Guatemalteca COGUANOR (NGO 29 001:99) para analisis microbiologico de agua potable.

Fuente: <https://www.unops.org> (2012).

Anexo T: límites de parámetros de agua para riego, adaptadas de Ayer y Wescot por International Plan Nutrition Institute.

Tabla No. 43: Parámetros de calidad de agua para riego.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Rango usual
Salinidad			
Conductividad eléctrica	CEa	dS m ⁻¹	0 - 3
Total sólidos disueltos	TSD	mg l ⁻¹	0 - 2000
Cationes y aniones			
Calcio	Ca ⁺⁺	cmol(+) l ⁻¹	0 - 20
Magnesio	Mg ⁺⁺	cmol(+) l ⁻¹	0 - 5
Sodio	Na ⁺	cmol(+) l ⁻¹	0 - 40
Potasio	K ⁺	cmol(+) l ⁻¹	0 - 0.2
Carbonatos	CO ₃ ⁼	cmol(+) l ⁻¹	0 - 0.1
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻	cmol(+) l ⁻¹	0 - 10
Cloruros	Cl ⁻	cmol(+) l ⁻¹	0 - 30
Sulfatos	SO ₄ ⁼	cmol(+) l ⁻¹	0 - 20
Nitratos	NO ₃ ⁻	cmol(+) l ⁻¹	0 - 5
Misceláneos			
Boro	B	mg l ⁻¹	0 - 2
Reacción	pH		6 - 8.5
Relación adsorción de sodio	RAS*	[cmol(+) l ⁻¹] ^{1/2}	0 - 15

* $RAS = Na / [(Ca + Mg) / 2]^{1/2}$

Fuente: [http://www.ipni.net/publication/ia-la hp.nsf/0/B3BD6ED103283DDD85257A2F005EF91B/\\$FILE/6%20Art.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-la hp.nsf/0/B3BD6ED103283DDD85257A2F005EF91B/$FILE/6%20Art.pdf) (2012).