



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN
INGENIERÍA AGRÍCOLA

**DISEÑO Y PERFORACIÓN DE UN POZO PARA FINES DE RIEGO
EN EL INGENIO SAN ANTONIO, EN EL MUNICIPIO DE
CHICHIGALPA, DEPARTAMENTO DE CHINANDEGA.**

Trabajo Monográfico Elaborado por:

Br. González Valera, Juan Pablo
Br. Rosales Rivera, Norlan Reynaldo
Br. Bellanger Marín, José Esteban

Como requisito para optar al título de:

Ingeniero Agrícola

Tutor:

Chamorro Blandón, Francisco Efraín.

Managua, Nicaragua – 2017

INDICE

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCION.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 JUSTIFICACION.....	3
1.4 OBJETIVOS:	4
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.	4
1.5 LOCALIZACIÓN	5
1.5.1 MACROLOCALIZACION.....	5
1.5.2 MICROLOCALIZACION.	6
CAPITULO II: DATOS DE LA ZONA.....	7
2.1 CLIMATOLOGIA DE LA ZONA.	7
2.1.1 PRECIPITACION MEDIA MENSUAL.....	7
2.1.2 TEMPERATURA.....	8
2.1.3 HUMEDAD RELATIVA.	8
2.1.4 EVAPORACION.	9
2.1.5. RADIACION.....	9
2.1.6. VIENTO.	9
2.1.7 CLASIFICACION CLIMATICA.....	10
2.2. HIDROGEOLOGIA DEL ACUIFERO.....	10
2.2.1. Límites y extensiones del acuífero.....	10
2.2.2. Basamento hidrogeológico.	11
2.2.3. Composición del material acuífero.....	11

2.2.4. Recarga del acuífero.	12
2.2.5. Tipos de recarga.....	12
2.2.6. Mecanismo de descarga del acuífero.	13
2.2.7. Descarga y extracción de ríos efluentes.	13
2.2.8 Extracciones por pozos.	15
2.2.9. Flujo y almacenamiento de aguas subterráneas.	16
2.2.10. Superficie freática y sus fluctuaciones estacionales.	16
2.3 HIDRAULICA DEL ACUIFERO.	17
2.3.1. TRANSMISIVIDAD (T).....	17
2.3.2. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (K).	18
2.3.3. COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S).	18
2.3.4. CAUDAL Y CAPACIDAD ESPECÍFICA POTENCIALES.....	19
CAPITULO III: MARCO TEORICO	21
3.1 CONCEPTOS BASICOS.....	21
3.2 AGUA SUBTERRANEA.....	21
3.2.1. Acuífero.	22
3.2.2 Acuicludo, acuitardo y acuífugo.....	23
3.2.3 Clasificación de los acuíferos	25
3.2.4 Características litológicas	25
3.2.5 Tipo de porosidad	26
3.2.6 Presión Hidrostática o desde el punto de vista hidráulico.....	27
3.2.7 Propiedades Hidrogeológicas de los Acuíferos.	29
3.2.7.1 Ley de Darcy	29
3.2.7.2 Porosidad (n).....	33
3.2.7.3 Permeabilidad o Conductividad Hidráulica (K)	37

3.2.7.4 Transmisividad (T)	49
3.2.7.4.1 Método de Theis.	49
3.2.7.5 Capacidad Específica (CE).....	52
3.2.7.6 Coeficiente de Almacenamiento (s).....	52
3.3 Conceptos Básicos (pozos)	53
3.3.1. Pozo.	53
3.3.2 Abatimiento.....	53
3.3.3 Cono de depresión:	54
3.3.4 Radio de influencia y descensos.	54
3.3.5 Ademe.	55
3.3.6 Tubería siega.....	55
3.3.7 Tubería ranurada.	56
3.3.8 Empaque de grava.	56
3.3.9 Rejilla.....	57
3.3.9.1 Función de la rejilla.....	58
3.3.9.2 Características que debe reunir una rejilla.	60
3.3.10 Perfil litológico.....	61
3.3.11 Prueba de bombeo.	61
3.3.12 Estación de bombeo	69
3.3.13 Carga estática	71
3.3.14 Carga dinámica (Fricción).....	71
3.3.15 Sello sanitario.	71
3.4 Diseño de Pozos de Agua.	72
3.4.1 METODOS DE PERFORACION DE POZOS.....	72
3.4.1.1 Método de percusión.	72

3.4.1.2 Método Californiano.....	75
3.4.1.3 Método de Rotación.....	75
3.4.1.4 Perforación por tubos Hidráulicos.....	76
3.4.1.5 Perforación por taladro	77
3.4.2 Diámetro del pozo.....	77
3.4.2.1 Diámetros Recomendados de Pozos.	79
3.4.3 Profundidad del pozo.....	79
3.4.4 Selección de la rejilla.	80
3.4.4.1 Longitud de la Rejilla	80
3.4.4.2 Tamaño de las aberturas.....	81
3.4.4.3 Diámetro de la Rejilla.....	82
3.4.4.4 Selección del material componente de la Rejilla.....	85
3.4.4.5 Diseño de filtros de grava	85
CAPITULO IV: DISEÑO METODOLOGICO.....	87
4.1 Clasificación de la investigación	87
4.2 PERFORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA DEL ÁREA DEL POZO.	87
4.2.1 Perforación.	87
4.2.2 Descripción del perfil litológico.	88
4.2.3 Porosidad.	88
4.2.4 Espesor del acuífero (m).	88
4.2.5 Capacidad Específica.....	88
4.2.6 Permeabilidad.....	89
4.2.7 Transmisividad (T).....	90
4.2.8 coeficiente de almacenamiento.	91

4.3 Determinar y caracterizar los parámetros para el diseño del pozo.....	91
4.3.1 El ademe.	91
4.3.2 El filtro de grava.....	91
4.3.3 Selección de la rejilla.....	92
4.4 Diseñar y seleccionar el equipo de bombeo según la demanda y el rendimiento del pozo.	92
4.4.1 Prueba de bombeo	92
4.4.2 Selección del equipo de bombeo.....	93
CAPITULO V: CÁLCULO Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	94
5.1 CARACTERIZACION DE LA HIDROGEOLOGIA DEL AREA DEL POZO.	94
5.1.1 TIPO DE ACUIFERO.....	94
5.1.2. ESPESOR DEL ACUIFERO.....	94
5.1.3. PERMEABILIDAD.....	95
5.1.4 POROSIDAD.	96
5.1.5 CAPACIDAD ESPECÍFICA.	97
5.1.6 TRANSMISIVIDAD.	97
5.2 Determinación y caracterización de los parámetros para el diseño del pozo. ..	98
5.3 Determinación del método de perforación.	99
5.4 Perfil Estratigráfico.....	99
5.5 DETERMINACION DE LA POROSIDAD.....	99
5.5.1 ESPESOR DEL ACUIFERO.....	99
5.5.2 CAPACIDAD ESPECÍFICA.	100
5.6 Determinación del diámetro del pozo.	100
5.6.1 Diámetros recomendados para pozos.....	101
5.7 Profundidad del pozo.....	102

5.8 Longitud de la Rejilla	102
5.8.1 Calculo de la Rejilla.	104
5.10 Prueba de bombeo.	107
5.11 Calculo de HP de la bomba:	112
5.11 Selección de bomba.	114
6.1 CONCLUSIONES.....	115
BIBLIOGRAFIA.....	117

1.1 INTRODUCCION.

El agua es un elemento indispensable para los seres vivos, tiene múltiples usos, ya sea para consumo doméstico, industriales, irrigación entre otros, podemos obtenerlas de manantiales, ríos, lagos, lagunas, y de fuentes subterráneas. Cuando la extraemos de una fuente subterránea es necesario la construcción de pozos, el cual se realiza por medio de un diseño, que no es más que la delimitación de las dimensiones apropiadas para su estructura y de los materiales a utilizar en su construcción.

En el municipio de Chichigalpa, Departamento de Chinandega se encuentra ubicado el Ingenio San Antonio, uno de los principales a nivel nacional, el cual cuenta con varios pozos perforados para fines de irrigación, para tales perforaciones el Ingenio solicita los servicios de la empresa Irrigación y perforaciones Mc Gregor S.A.

Actualmente la empresa realizo la perforación de un pozo que genero 1100 gpm para suplir un riego por goteo en una de sus áreas de producción, el diseño de este pozo se realizó en base a todas sus etapas, como son: la necesidad o caudal requerido, que se suplirá dependiendo de las características hidrogeológicas del acuífero, construcción del agujero, descripción de un perfil litológico de la perforación, diámetro del pozo, determinación de la profundidad del pozo, elección de la rejilla, longitud de rejilla , diámetro de la rejilla, abertura de las ranuras, diseño tomando en cuenta el nivel estático y el caudal a explotar, el encamisado, diseño del filtro de grava, desarrollo del pozo, Una prueba de bombeo escalonada y una prueba de bombeo definitiva, la cual finalizo con la elección e instalación del equipo de bombeo.

Al final se entregó un perfil stratigráfico, así como su diseño y el informe de la prueba de bombeo realizada al pozo.

1.2 ANTECEDENTES.

No se sabe a ciencia cierta cuando, como y donde se realizó el primer pozo, lo que sí es seguro es de que alguien estaba necesitando el vital líquido, y que no tenía un río cerca ni tampoco un manantial, y ni se le ocurrió la idea de que excavando en el suelo podía encontrarla. Cualquiera que haya sido su inicio no se sabe, lo que sí es seguro es que las excavaciones de pozo eran ya conocidas en los tiempos primitivos mencionado en el antiguo testamento.

Los antiguos chinos desarrollaron técnicas de perforación, no de excavación que les permitieron llegar aunque en forma lenta a profundidades importantes. En Europa también se realizaron obras de captación de agua, las cuales fueron primeramente norias, posteriormente con el descubrimiento en condiciones artesianas o brotantes en Artois y otras regiones de Francia, Bélgica e Inglaterra, llevo al desarrollo de métodos de perforación para captar aguas más profundas.

El uso del agua para irrigación está concentrado en el Pacífico de Nicaragua, donde se utiliza en algunos cultivos, como lo hace el Ingenio San Antonio que desde 1997 contaba con 84 pozos cavados y 106 perforados, la profundidad de los pozos cavados variaba de 1.01 hasta 13.18 m. La profundidad de los pozos perforados en explotación variaba entre los 160 y 200 pies, con una profundidad promedio de 180 pies, la producción de los pozos promedio variaba entre 547 y 2660 gpm siendo el valor medio de 1076 gpm. En la actualidad el Ingenio San Antonio cuenta aproximadamente con 300 pozos, siendo la profundidad promedio de 200 pies y una producción promedio de 1200 gpm.

En la región del pacifico podemos encontrar muchos pozos perforados para distintas necesidades, como usos domésticos, industriales y de irrigación entre otros, todos estos trabajos realizados con máquinas modernas. En nuestro país la empresa Irrigación y perforaciones Mc Gregor, es una constructora de pozo referente que cuenta con dichas máquinas.

1.3 JUSTIFICACION

En la medida que los ciclos de lluvia han sido afectados por fenómenos tales como El Niño, y en consideración al hecho que Nicaragua se está insertando en mercados de exportación de otros productos agrícolas no Tradicionales, el aumento del consumo de agua para la agricultura ha aumentado, aunque todavía no sobrepasa en importancia la del consumo directo humano.

Siempre que exista una necesidad de obtener el recurso agua en grandes cantidades, para fines de riego, en zonas donde no se haga posible la captación de agua de un río, se hace imprescindible la perforación y diseño de pozos que permitan suplir las demandas del riego. Al realizar este pozo, y con la ayuda de un buen equipo de bombeo, el cual se seleccionara en base a cálculos y pruebas, se podrá explotar al máximo la fuente de abastecimiento de la cual se dispone.

Ante la necesidad de expandir sus áreas de producción, el Ingenio “San Antonio” se ve obligado a perforar nuevos pozos que le permitan abastecer sus sistemas de riego utilizados.

Estas perforaciones de pozos requieren de un diseño minucioso y detallado, en este trabajo se presentara paso a paso la metodología de este diseño, con la finalidad de que cualquier persona interesada en conocer de las perforaciones de pozos y su diseño puedan documentarse y aprovechar esta información para su propósito, somos consiente de que la comunidad universitaria también carece de información relevante en cuanto a este tema por tales razones pretendemos entregarles esta valiosa información para que puedan usarla.

1.4 OBJETIVOS:

1.4.1 OBJETIVO GENERAL.

Diseñar y perforar un pozo para fines de riego en el Ingenio san Antonio, en el municipio de Chichigalpa, Departamento de Chinandega.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

1. Realizar la perforación y caracterizar la hidrogeología del área del pozo.
2. Determinar y caracterizar los parámetros para el diseño del pozo.
3. Diseñar y seleccionar el equipo de bombeo según la demanda y el rendimiento del pozo.

1.5 LOCALIZACIÓN

1.5.1 MACROLOCALIZACION.

El departamento de Chinandega está ubicado en la región del pacífico de Nicaragua a 140 km de la capital, comprendida entre las siguientes coordenadas geográficas 12°37'46" latitud norte y 87°07'52" longitud oeste. Limita al norte con Madriz y Honduras, al Sur con el océano pacifico, al este con León y Estelí y al Oeste con el océano pacifico y Honduras, .posee una extensión territorial de 4926 km².

Fig.1. Macro Localización del Proyecto



Fuente: Google.

1.5.2 MICROLOCALIZACION.

El proyecto se desarrolló en el municipio de Chichigalpa ubicado a 130 km de la capital el cual se encuentra en la región Nor- Occidental del país a 12° 34' Latitud Norte, 87° 01' Longitud Oeste.

Limita al norte con Chinandega, al Sur con León, al este con Posoltega y Quezalaguaque y al Oeste: Corinto, El Realejo y Chinandega.

El municipio de Chichigalpa posee una extensión territorial de 222.54 Km², se encuentra a 85.45 m.s.n.m. y su densidad poblacional corresponde a los 167 hab/Km².

Fig.2. Micro Localización del Proyecto.



Fuente: Google Eart.

CAPITULO II: DATOS DE LA ZONA.

2.1 CLIMATOLOGIA DE LA ZONA.

A continuación describiremos la climatología de la zona del acuífero de occidente en el cual se desarrolló la perforación del pozo.

2.1.1 PRECIPITACION MEDIA MENSUAL.

La Región posee dos períodos bien marcados: uno relativamente seco, que se extiende desde Diciembre hasta Marzo de cada año, y otro lluvioso, que abarca desde Mayo hasta Octubre; siendo Noviembre y Abril meses de transición entre la época lluviosa y la seca y de la época seca a la lluviosa, respectivamente.

Durante el período seco las precipitaciones son escasas en toda la Región, manifestándose dicha sequedad en la interrupción de las corrientes en la mayoría de los ríos. En el período lluvioso se incrementa considerablemente la precipitación, ocurriendo los máximos en los períodos Mayo - Junio, y Septiembre - Octubre. Estos meses son los más lluviosos del año, debido principalmente, a que la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se ubica en su posición más Norte, y a un debilitamiento de los vientos alisios del Este; adquiriendo el flujo una componente Sur/Suroeste, por la cual se transportan grandes masas de aire húmedo hacia dicha Región.

Los valores medios anuales de precipitación oscilan entre 1,152 mm y 2,648 mm. Una característica importante que se presenta a mitad del período lluvioso, expresada en una disminución significativa de la precipitación, ocurre entre los meses de Julio y Agosto; fenómeno conocido como “La Canícula”.

Respecto a la distribución espacial de la precipitación dentro de los departamentos de Chinandega y León, los valores máximos de ésta se encuentran en una zona ubicada alrededor del Ingenio San Antonio, con valores superiores a los 2,000 mm por año.

Por otra parte, los mínimos de precipitación acumulada anual se presentan al Noreste de la Cordillera Volcánica, en las localidades de Malpaisillo, y Mina la India, fuera del área de estudio.

2.1.2 TEMPERATURA.

Respecto al comportamiento de la temperatura media mensual en la Región, se puede decir que las máximas ocurren entre Marzo y Abril; siendo éstos los meses más cálidos del año, con valores medios por encima de los 28° grados Celsius.

Las temperaturas medias más bajas se presentan en los meses de Diciembre y Enero; notándose que ésta empieza a disminuir a partir de Octubre, durante el cual predominan grandes mantos nubosos que atenúan la radiación solar directa, refrescando relativamente la temperatura ambiente.

La fluctuación de la temperatura media mensual durante todo el año la podemos considerar bastante suave, si tomamos como referencia los datos de temperatura de Corinto y Chinandega.

La estación de Corinto, presenta una fluctuación de 2,3° C, influyendo sobre este comportamiento su cercanía al mar. Chinandega que se ubica entre la costa del Pacífico y la Cordillera Volcánica, presenta una fluctuación de la temperatura media mensual de 2,7° C. La estación de El Sauce, cercana a las mesas escalonadas del Noreste, tiene una fluctuación de 3,6° C.

2.1.3 HUMEDAD RELATIVA.

En cuanto a la humedad relativa, los valores más altos se encuentran distribuidos en dos periodos. Uno en el mes de Junio, que oscilan entre 74% y 85% y otro en los meses de Septiembre y Octubre con valores entre 77% y 89%, respectivamente; ya que dichos meses son los más lluviosos del año.

Por otra parte, existe una disminución de la humedad relativa entre Diciembre y Abril, con valores que van desde 76% hasta el 50%. Además hay una disminución menos marcada en el mes de Julio, con valores entre 69% y 80%, la cual coincide con “La Canícula”, que afecta a toda la Región Centroamericana en esta época del año.

2.1.4 EVAPORACION.

Los valores máximos de este parámetro se presentan en los meses que corresponden a la estación seca (Diciembre-Abril), teniendo sus picos más altos en los meses Marzo a Abril, con valores que oscilan entre los 213 mm y 312 mm por mes.

La evaporación empieza a disminuir al inicio del período lluvioso (Mayo), presentando sus valores mínimos en los meses de Septiembre y Octubre, (meses en que ocurre mayor nubosidad), con valores que van de 178 mm a 96 mm. El comportamiento general de este parámetro manifiesta una fluctuación simple, con sus máximos en el período seco y mínimos en el período lluvioso.

2.1.5. RADIACION.

El máximo anual de insolación, Chinandega, León, e Ingenio San Antonio, tiene lugar en Marzo, con valores que oscilan entre 429.3 y 454.8 cal/cm²-día. Los mínimos, se presentan en los meses del período lluvioso, particularmente en Junio y Octubre, con valores de radiación que varían entre 335.3 y 379.4 cal/cm²-día. En el mes de Julio, la radiación sufre un aumento, debido al fortalecimiento espacial y estructural del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte, el cual produce un estado del tiempo con poca nubosidad.

2.1.6. VIENTO.

En León y Chinandega, se observa el predominio del viento calmo en am. En la zona de León, el viento presenta dos componentes predominantes del Este y del Sureste, con velocidades medias comunes de 2.7 m/seg. y con una frecuencia de 16% y 12.4%, respectivamente. Lo cual indica la marcada influencia de los Vientos Alisios en esta zona.

En Chinandega, se observa una mayor influencia del viento del Norte, con frecuencia del 11.4% y del Este, con un 10.4%. Este predominio no es tan marcado, ya que el viento con componentes Noreste y Sureste, presenta frecuencias por encima del 8%.

2.1.7 CLASIFICACION CLIMATICA.

El clima predominante del área en estudio, es de Sabana Tropical (Aw).

Estudios climatológicos de la zona demuestran que las zonas ubicadas entre el Litoral Pacífico y la Cordillera Volcánica, tienen un clima de Sabana Tropical (Aw), con un período muy húmedo que va de Mayo a Octubre y con temperaturas que varían entre los 27°C y 28°C. Las zonas al Norte y Noreste de la Cordillera Volcánica, presentan también un clima de Sabana Tropical, pero con un período sub-húmedo de cinco meses, y temperaturas que oscilan entre los 25°C y los 26°C.

2.2. HIDROGEOLOGIA DEL ACUIFERO.

2.2.1. Límites y extensiones del acuífero.

El Sistema Acuífero de Occidente (Acuífero Chinandega-León-Nagarote), geográficamente se delimita en el siguiente orden:

- ✓ El límite Noroeste, corresponde al contacto geológico entre las ignimbritas y basaltos de la formación Coyol, localizados al Oeste del Ingenio Monterrosa.
- ✓ Al Nor-Noreste se encuentra la divisoria regional de aguas subterráneas, alineada a lo largo de la Cadena Volcánica.
- ✓ El límite Suroeste del sistema acuífero, lo representa la zona costera del Océano Pacífico.
- ✓ En la parte Este, el límite lo constituyen dos divisorias hidrogeológicas; una que se extiende hacia el Suroeste hasta el contacto con la Formación Tamarindo y la otra hacia el lago de Managua.

El Acuífero de Occidente, tiene una extensión total de 2,945.9 km². En este estudio se excluyen unos 200 km² que se asocian a la zona de manglares (humedales) en la zona costera.

2.2.2. Basamento hidrogeológico.

El basamento hidrogeológico representa la parte inferior o lecho impermeable del Acuífero y está constituido, principalmente por las ignimbritas de la Form. Tamarindo. No obstante, según el estudio de Naciones Unidas de 1971, por efectos de meteorización, los depósitos arcillosos de gran espesor podrían cumplir la misma función, principalmente en las zonas más profundas.

La geometría del basamento, representada por una estructura de fosa o graben, forma una cuña cuya parte más delgada se conecta con la zona costera, donde se observan afloramientos del lecho; mientras que la parte más profunda se encuentra debajo de la Cadena Volcánica. Dicha geometría es irregular, presentando su mayor hundimiento entre Posoltega y Chichigalpa, donde la profundidad oscila entre 300 y 400 metros.

El basamento hidrogeológico, no solo determina la geometría inferior del acuífero, sino también la condición del flujo subterráneo, que produce flujos verticales ascendentes en la parte baja y provoca que los flujos subterráneos se descarguen como caudal base en los ríos.

2.2.3. Composición del material acuífero.

El Acuífero de Occidente, está compuesto por depósitos aluviales, piroclásticos recientes y piroclásticos de la Formación Las Sierras. Los primeros son característicos de la parte superior del sistema acuífero, por lo general aflorante, y lo conforman gravas, arenas finas a gruesas, limos y arcillas.

Las Sierras subyace y, en ciertos lugares, se interdigita con el Piroclástico Holocénico, y contiene materiales de bajo a mediano grado de consolidación, con cierto nivel de cementación.

Específicamente en el área de estudio se representa por gruesas capas de tobas, con intercalaciones de flujos lapílicos y con suelos fósiles limo-arcillosos, aglomerados tobáceos grises y en menor proporción por pómez.

2.2.4. Recarga del acuífero.

La recarga principal del agua subterránea proviene de las lluvias, la cual se infiltra hasta llegar al nivel de la zona saturada. En la recarga intervienen varios factores, como el clima, la geología y la topografía, la vegetación, el suelo y el uso del suelo.

2.2.5. Tipos de recarga.

Existen dos tipos de recarga que alimentan el acuífero, como son: la recarga natural y la artificial.

La recarga natural se produce a su vez de dos maneras: como recarga natural directa y como recarga lateral. La recarga directa es la que se origina por las lluvias y que se infiltra verticalmente hasta el nivel del acuífero. La recarga lateral se origina también por aguas de lluvia, cuando ésta cae sobre áreas relativamente impermeables y escurre superficial, o sub-superficialmente, hacia áreas permeables del acuífero.

La recarga artificial es la provocada por la acción del hombre, y la constituyen principalmente las pérdidas por exceso de riego, las fugas en los sistemas de suministro a zonas urbanas, y la recarga por inducción. La recarga por inducción ocurre principalmente cuando se bombea en pozos próximos a ríos o cuerpos de agua. Cuando se bombea en pozos cercanos al mar y el cono de bombeo llega hasta el límite de intrusión salina, puede provocar un avance de la misma.

Para evaluar la recarga natural se han aplicado métodos recientes como el de Gunther Shosinsky, que utiliza las condiciones climáticas en la zona y las características edafológicas de los suelos, como son: la precipitación, la evapotranspiración, pendiente topográfica, textura de los suelos, la litoestratigrafía, punto de marchitez y la profundidad de raíces de los cultivos.

2.2.6. Mecanismo de descarga del acuífero.

Los mecanismos de descarga de aguas subterráneas, tienen dos componentes principales; la primera es natural y dependiente del régimen climático, la cual se concibe como el volumen de agua que descarga hacia el mar, llevado por el flujo subterráneo, y el que descarga como flujo base en los ríos. La segunda componente está definida por

Las extracciones de agua para distintos usos, principalmente en pozos perforados.

2.2.7. Descarga y extracción de ríos efluentes.

Debido al régimen de precipitación, en el período lluvioso el drenaje superficial se inicia entre las cotas 60 y 150 m.s.n.m; mientras que en el estiaje el nacimiento se localiza entre los 20 y 40 m.s.n.m. La extracción de agua superficial para todos los usos, según Aguilar y Amador (1,998) alcanza en el área unos 198.7 MMC/Año.

Tabla 1. Balance Hídrico de Suelos.

Zona de Recarga	Criterios Principales Utilizados						Infiltración %	Recarga Prom.	
	Textura	ETP	NEA	F _c Prom. (mm/A)	P (mm/A)	Fact. Geol.		Valor Promedio (%)	(mm)
	Arenoso-Franco			1,070.00	1,926.00	Piroc.	100	45.7	593
ZRD1	Arenoso ó Texturas	1,778.00		1,680.00	1,836.00	Holoc.	97	37.7	881
	Más Gruesas								
ZRD2	Franco	1,836.00		439	1,572.00		80.6	20	316
	Franco-Arenoso	1,778.00		592	1,926.00		86.8	35.2	678
ZRD3	Arcilloso	1,778.00		12	1,926.00	S.Re.	14.9	0	0
	Franco-Arcilloso	1,836.00		189	1,572.00	S.Re.	62	10	146
ZRD4	Zona Costera		0-1		1,926.00		0	0	0
	Humedales								
	Recarga Lateral	1,836.00			1,572.00	F. Tam			
	Recarga Rechazada	1,778.00				F. Co			

NEA. =Nivel Estático del Agua. S.Re.=Suelos de Relleno Volcánico Aluvial

Piroc.=Piroclastos F.Tam. = Formación Tamarindo.

Holoc.= Holocénicos F. Co. = Formación Coyol.

2.2.8 Extracciones por pozos.

La extracción realizada mediante el bombeo de pozos perforados y excavados, determinada del inventario ejecutado durante el año 1999, asciende a 237.4 millones de metros cúbicos anuales (MMC/A). La distribución de dichas extracciones entre pozos perforados y excavados se muestra en la tabla 2.

TABLA 2. Distribución de Pozos de Acuerdo al Uso de Agua.

USO	POZOS PERFORADOS				POZOS EXCAVADOS				Volumen
	CUANTIFICACIÓN		EXTRACCION		CUANTIFICACIÓN		EXTRACCION		Total
	# pozos	% (pozos)	Vol. (MMC)	% (Vol.)	# Pozos	% (pozos)	Vol. (MMC)	% (Vol.)	Extracción (MMC)
DOMESTICO	78	11.40%	13.33	5.69%	219	92.41%	2.87	0.95	16.2
RIEGO	345	50.45%	176.8	75.44%	6	2.53%	0.11	0.04	176.91
INDUSTRIAL	66	9.64%	20.44	8.72%	6	2.53%	0.03	0.01	20.47
MUNICIPAL	60	8.77%	23.8	10.15%					23.8
ABANDONADOS	31	4.53%			4	1.69%			
EXPLORATORIOS	14	2.04%							
SIN USO	90	13.15%			2	0.84%			
ACTUAL									
TT. INVENTARIO	684	100%	234.37	100%	237	100%	3.01	100%	237.38

2.2.9. Flujo y almacenamiento de aguas subterráneas.

El agua subterránea se encuentra bajo condiciones de “superficie libre”; la cual guarda estrecha relación con la topografía del terreno.

La dirección del escurrimiento subterráneo es predominantemente en sentido Sur-Oeste, hacia el mar; sin embargo existen otras direcciones de flujo, como producto de una divisoria hidráulica localizada al Este de la ciudad de León, que separa la planicie en dos cuencas subterráneas.

Los gradientes hidráulicos indican movimientos más acelerados en la parte alta, respecto a la zona baja. En la zona alta (cota 150-200) el gradiente promedio es de 9.2 por mil, mientras que bajando progresivamente hacia Chinandega y León el gradiente se ubica en el rango de 7.0 a 4.0 por mil; en la zona de descarga el gradiente medio es de 4.5 por mil.

Comparativamente, en la parte alta la configuración de las líneas de flujo en el estado actual (año 1,999) se muestra de manera similar a la de los años 1965-75; sin embargo, desde la zona intermedia hasta la baja se observan algunas desviaciones preferenciales, principalmente en las inmediaciones del Ingenio San Antonio; lo que se corresponde con el incremento en la extracción de aguas superficiales y subterráneas que reflejan los registros del Ingenio.

2.2.10. Superficie freática y sus fluctuaciones estacionales.

Las fluctuaciones estacionales y anuales de la superficie de agua subterránea han sido determinadas, a partir de medidas periódicas del nivel de las aguas, en los años comprendidos entre 1970 y 1978, en una red de pozos monitores.

Las fluctuaciones estacionales, anuales e interanuales de nivel en los pozos son resultados, principalmente, de las variaciones de la recarga natural del acuífero, durante y después de los períodos de lluvia, y de la extracción de agua del acuífero mediante pozos.’

Considerando el carácter freático del acuífero, las precipitaciones constituyen una de las mayores fuentes de recarga, por tanto existe una influencia directa entre el régimen hidrológico y los niveles de agua subterránea. La mayor correspondencia se produce donde el nivel freático se encuentra más cercano a la superficie del terreno; cuanto más profundo es el nivel, mayor es el retraso de dichas variaciones respecto a las lluvias.

2.3 HIDRAULICA DEL ACUIFERO.

Los parámetros hidráulicos son por excelencia los datos de entrada, o insumos, esenciales en la cuantificación del potencial del flujo subterráneo y de la capacidad de almacenamiento del acuífero. Estos datos son producto del monitoreo de los pozos, forman la base de los estudios de la hidrodinámica del acuífero, y constituyen elemento de juicio para el adecuado aprovechamiento y manejo del acuífero.

2.3.1. TRANSMISIVIDAD (T).

La transmisividad, o capacidad del acuífero de permitir el flujo del agua, varía de acuerdo a las condiciones geológicas, reflejadas en la litoestratigrafía, granulometría, nivel de consolidación y fracturamiento de los materiales. En el Sector Oeste de la Región, la formación predominante la constituyen coladas lávicas intercaladas con piroclastos basálticos (QvI). Adicionalmente se encuentra pómez dacítica que, en conjunto con los materiales anteriores, hacen suponer transmisividades mayores que en el Sector Este.

En el Sector Este la litología del área procede, tanto de la Formación. Las Sierras (TQps), constituida principalmente por aglomerados y toba brechosa, como de la Formación. Tamarindo Medio (Tmtm), representada por lava andesítica, aglomerados, e ignimbritas; las que poseen propiedades hidráulicas bastantes inferiores, con respecto a la Formación de las Sierras.

En consecuencia, en el acuífero se presentan zona hidrogeológicas, que están caracterizadas principalmente por la forma del lecho del acuífero, los materiales que constituyen el acuífero, los tipos de suelo y textura de los mismos.

A lo largo del acuífero las transmisividades potenciales (T) presentan una oscilación desde 500 hasta 7,000 m²/d, respectivamente, desde la cota 20 hasta los 200 m.s.n.m. Las zona de transmisividad de mayor importancia, están localizadas en los entornos de Chinandega, Posoltega, Telica, Comarca Las Chácaras y La Paz Centro- Nagarote.

En general, la capacidad del acuífero de dejar pasar, almacenar y transmitir el agua, es mayor en el área de la Cordillera Volcánica, donde el acuífero es más profundo y el medio poroso saturado se caracteriza por tener mayor granulometría y menor nivel de consolidación.

2.3.2. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (K).

La conductividad hidráulica (K) del acuífero, se refiere a la permeabilidad de las distintas formaciones geológicas. La capacidad total del acuífero de almacenar, circular, y transmitir el agua no está muy bien definida o aprovechada, aparentemente debido a la limitante en la profundidad y diseño de los pozos, sobre todo los de la parte alta del acuífero; donde además, tanto los valores de transmisividad como los de conductividad hidráulica son más bien inferidos.

El acuífero satisface la calibración con valores de permeabilidad (K) de 10 a 20 m/d, lo que es similar a la media calculada para el acuífero, de 21 m/d. Así mismo, los valores medios de permeabilidad en el Sector Oeste y Este, de 23 y 20 m/d, respectivamente, muestran un comportamiento muy parecido al de la transmisividad, incrementándose desde la costa hacia la Cadena Volcánica.

2.3.3. COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S).

Los valores de este coeficiente varían entre 0.10 y 0.01, comportándose en sentido descendente, desde el Sector Oeste hacia el Sector Este, lo que está en correspondencia con la transmisividad (T), que tiene similar tendencia; y, si ésta

última es un índice de porosidad de la litología del acuífero, debe existir, por lo tanto, una mayor capacidad de almacenamiento y transmisión del agua en el Sector Oeste, que en el Sector Este, principalmente al Este de León; lo que se corrobora con los datos de la conductividad hidráulica registrados por los pozos, a partir de pruebas de bombeo.

2.3.4. CAUDAL Y CAPACIDAD ESPECÍFICA POTENCIALES.

La magnitud de los caudales de extracción (Q) en el Acuífero de Occidente depende de las formaciones geológicas y sus características hidráulicas intrínsecas, así como de la cercanía entre pozos, la profundidad alcanzada por los mismos, y de la demanda de cada usuario.

Los pozos ubicados entre León y El Viejo presentan un caudal de extracción medio (Q) de 212 m³/hr, el cual puede causar abatimientos (s) de 12.6 m; siendo la profundidad teórica media para alcanzar esta condición de 56.0 m. Similarmente, en el Sector de Nagarote se observan abatimientos promedios (s) de 12.2 m, pero su caudal de extracción (Q) es de 204 m³/hr, y la profundidad media para alcanzar estas condiciones es de 82.0 m.

Los caudales potenciales de extracción (Q) en el Acuífero de Occidente, tienen un rango de oscilación desde los 100 hasta los 1,000 m³/hr, respectivamente entre las cotas 60 y 100 m.s.n.m. Este comportamiento no es uniforme a lo largo del acuífero, sino que presenta zonas que son determinadas principalmente por la geología, propiedades hidrodinámicas del medio poroso, profundidad del basamento, y nivel de penetración de los pozos.

Mencionando la zona de Chinandega como caso especial, se nota que el caudal de extracción potencial varía desde los 200 hasta los 400 m³/hr, entre las cotas 60 y 100 m.s.n.m.

Otro aspecto en relación con esta zona es que, a partir de las aguas del Río Chiquito hacia el Oeste, la profundidad del basamento del acuífero varía desde los 140 hasta los 480 m, en dirección Este, hacia las zonas de recarga del acuífero.

Lo cual hace que Chinandega esté en un área con relativa limitación hídrica, ya que en la misma las profundidades del lecho del acuífero andan entre 60 y 90 m bajo el terreno.

Una zona particular se observa también entre Chichigalpa y Posoltega, la cual está delimitada entre las elevaciones de 40 a 100 m.s.n.m., donde se podrían generar extracciones potenciales desde los 200 hasta los 1,000 m³/hr, con pozos totalmente penetrantes.

Así como el entorno hidrogeológico zonifica el caudal potencial, también lo hace con la Capacidad Específica (Q/s), la cual está definida como la relación entre caudal y el descenso de nivel en el pozo. Por dicha causa, en el acuífero se puede esperar una capacidad específica con variación de 10 a 600 m³/hr/m, donde los valores menores se asocian a la zona costera y los mayores se ubican hacia la Cadena Volcánica.

Existen unas zonas de capacidad específica potencial, (Q/s) que se corresponden con elevaciones de los 40 a 100 m.s.n.m, siendo estos valores de 40 a 60 m³/hr/m. Así mismo, hay zona para el mismo rango de elevación, cuyos valores de Q/s varían de 80 a 100 m³/hr/m, ubicadas entre La Paz Centro y Nagarote, así como al Sur y Oeste de Posoltega. Zonas locales con valores de capacidad específica potencial mayores a los 200 m³/hr/m se pueden encontrar en el área de Posoltega; así también, entre La Paz Centro y Nagarote se presentan valores que pueden alcanzar los 600 m³/hr/m.

Un aspecto importante, comprobado en estos estudios, es la estrecha correlación entre la Transmisividad y Capacidad Específica, para un 100 % de espesor captado del acuífero.

CAPITULO III: MARCO TEORICO

3.1 CONCEPTOS BASICOS.

El diseño de un pozo consiste en seleccionar los factores dimensionales apropiados de este, y de los materiales que se van a utilizar en su construcción. Un buen diseño exige la seguridad de una combinación óptima de comportamiento, larga vida de servicio y un costo razonable. Deben analizarse detalladamente los factores técnicos y los relativos al costo.

Un pozo se debe considerar como una estructura que consiste de dos elementos principales.

- ✓ Constituido por aquella parte del pozo que sirve de alojamiento del equipo de bombeo y como conducto vertical a través del cual fluye el agua.
- ✓ El otro elemento, es el intervalo de captación del pozo, puesto que es aquí donde el agua proviene del acuífero hace su entrada al pozo.

Antes de la realización del diseño de un pozo es necesario considerar las características del acuífero que se va a explotar.

3.2 AGUA SUBTERRANEA.

El agua subterránea representa una fracción importante de la masa de agua presente en cada momento en los continentes. Esta se aloja en los acuíferos bajo la superficie de la tierra. El volumen del agua subterránea es mucho más importante que la masa de agua retenida en lagos o circulante, y aunque menor al de los mayores glaciares, las masas más extensas pueden alcanzar hasta millones de km². El agua del subsuelo es un recurso importante y de este se abastece a una tercera parte de la población mundial, pero de difícil gestión, por su sensibilidad a la contaminación y a la sobre explotación.

Es una creencia común que el agua subterránea llena cavidades y circula por galerías. Sin embargo, no siempre es así, pues puede encontrarse ocupando los intersticios del suelo, del sustrato rocoso o del sedimento sin consolidar, los

cuales la contienen como una esponja. La única excepción significativa, la ofrecen las rocas solubles como las calizas y los yesos, susceptibles de sufrir el proceso llamado karstificación, en el que el agua excava simas, cavernas y otras vías de circulación, modelo que más se ajusta a la creencia popular.

El agua subterránea es utilizada para el abastecimiento de agua potable, tanto en viviendas individuales, como en aglomeraciones urbanas, en proyectos agropecuarios para riego y para uso animal; igualmente, muchas industrias consumidoras de grandes cantidades de agua hacen uso de este recurso.

Uno de los aspectos que hacen particularmente útil el agua subterránea para el consumo humano es la menor contaminación a la que está sometida y la capacidad de filtración del suelo que la hace generalmente más pura que las aguas superficiales. Además que este recurso es poco afectado por períodos prolongados de sequía.

3.2.1. Acuífero.

Etimológicamente la palabra acuífero está compuesta por dos palabras que provienen del latín, aqua y fero que significan agua y llevar, respectivamente (Custodio, E. y Llamas, M., 1976).

Un acuífero se define como un estrato, formación o unidad geológica porosa y con permeabilidad no nula, capaz de almacenar y transmitir agua por medio de sus poros, grietas o fracturas (Custodio y Llamas, 1976; Bear, J., 1979; Freeze y Cherry, 1979; Fetter, C., 2001; Price, M., 2003; Pinder y Celia, 2006). Tanto la capacidad de almacenamiento como transmitir el agua en cantidades grandes, requiere relativamente de una resistencia baja para que fluya, o una alta permeabilidad para fluir (Pinder y Celia, 2006).

.Algunos ejemplos de las rocas que forman los acuíferos son: aluviones de ríos formados por una mezcla de gravas y arenas, gravas no consolidadas, areniscas poco cementadas, arenillas, limos y dolomías, algunos tipos de rocas volcánicas, formaciones calcáreas muy karstificadas, así como rocas metamórficas

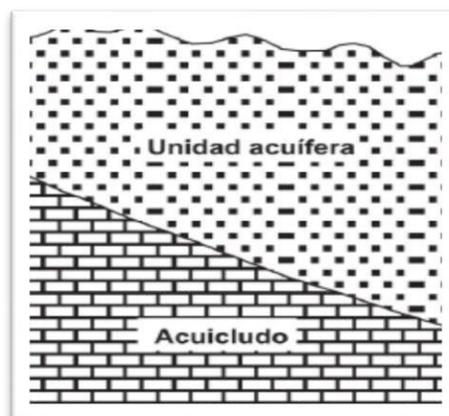
y plutónicas fracturadas (Custodio y Llamas, 1976), rocas sedimentarias tales como areniscas y calizas (Freeze y Cherry, 1979).

3.2.2 Acuicludo, acuitardo y acuífugo.

A la secuencia de estratos, formaciones o unidades geológicas que sobreyacen, subyacen o limitan lateralmente a los acuíferos se les conoce como: Acuicludo, acuitardo y acuífugo. Etimológicamente Acuicludo acuitardo y acuífugos están compuestas por dos palabras en latín, (coincidiendo las tres palabras con agua que significa agua) cludo o claudere tardo o tardere, fugo o fugere que significan encerrar o cerrar impedir o retardar, ahuyentar o huir, respectivamente (Custodio y Llamas, 1976).

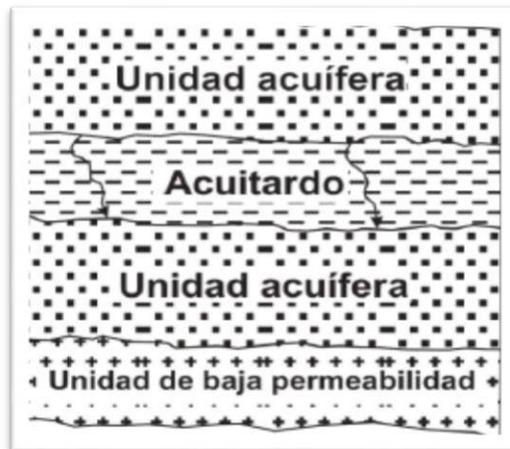
Acuicludo: se define como el estrato o formación geológica porosa y permeabilidad baja pero no nula, capaz de almacenar una apreciable cantidad de agua, incluso hasta la saturación, pero no es capaz de transmitirla bajo gradientes hidráulicos comunes (Deming D., 1954; Custodio y Llamas, 1976; Freeze y Cherry, 1979; Price M., 2003; Pinder y Celia, 2006), además de muy difícil recuperación. Por ejemplo: una capa de arcilla o limo (Bear J., 1979). Además en los sistemas hidrológicos subterráneos constituyen estratos o formaciones geológicas confinantes (ver figura 3)

Figura.3. Modelo conceptual de un Acuicludo.



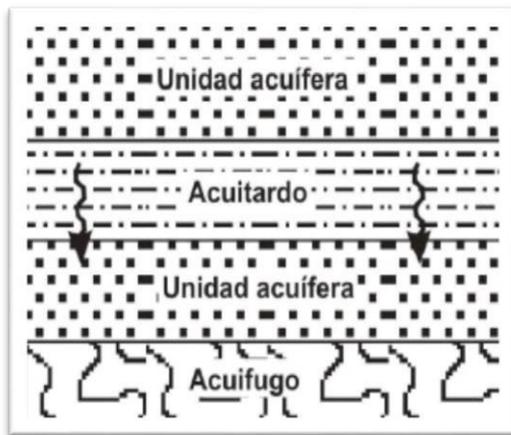
Acuitardo: Se define como el estrato o formación geológica de baja permeabilidad pero no nula, la cual puede almacenar agua y transmitirla en pequeñas cantidades de una unidad acuífera a otra (Deming D., 1954; Bear J., 1979; Freeze y Cherry, 1979; Fetter, 2001; Price M., 2003; Pinder y Celia, 2006). Un ejemplo típico es un material arcilloso, el cual tiene una alta porosidad, pero muy baja permeabilidad; Otros ejemplos son: las arenas arcillosas, areniscas, rocas compactadas con alteración y/o fracturamiento moderado, arcillas limosas o arenosas (Custodio y Llamas, 1976; Freeze y Cherry, 1979). Además en los sistemas hidrológicos subterráneos se les aplica el término de estratos o formaciones geológicas semiconfinantes (Fetter, 2001) (ver fig. 4)

Figura 4. Modelo conceptual de un acuitardo.



Acuífugo: Se define como el estrato, unidad o formación geológica absolutamente impermeable, es decir, no tiene la capacidad de almacenar ni transmitir el agua. Por ejemplo: un macizo granítico no alterado, o esquistos inalterados y no fracturados (Custodio y Llamas, 1976; Bear j., 1979; Fetter 2001). Los acuífugos constituyen estratos o formaciones geológicas completamente confinantes en los sistemas hidrológicos subterráneos. (ver fig. 5)

Figura 5. Modelo conceptual de un acuífugo



3.2.3 Clasificación de los acuíferos

Dependiendo de las características que presenten los estratos o formaciones geológicas, formadoras de unidades acuíferas, éstos se pueden clasificar de acuerdo a sus características litológicas, tipo de porosidad que presente y la presión hidrostática a la que se encuentre.

3.2.4 Características litológicas

Según las características litológicas de la unidad acuífera se clasifica en: detrítica, carbonatada, aluvial y volcánica, es decir:

Unidad acuífera detrítica: está formada por masas de rocas fragmentadas, como arenas o gravas, que almacenan el agua en los espacios intersticiales. Su capacidad de contener y transmitir agua es función del porcentaje de huecos disponibles,

Entre sus partículas. Se localiza en material geológico cuyo origen está en relación con el proceso de erosión, arrastre y sedimentación.

Unidad acuífera carbonatada: está formada por un estrato de alta porosidad primaria, por ejemplo: caliza, dolomía, mármol y alguna marga calcárea, aunque su permeabilidad está en relación a su porosidad secundaria, desarrollada a través de procesos de disolución química a lo largo de fracturas, conocido como karstificación, como sucede en las calizas y dolomitas compactas.

Unidad acuífera aluvial: es de estrato o capa formada en ambiente fluvial y de abanico (Custodio y Llamas, 1976), con permeabilidad no nula, se apoya sobre un material de menor permeabilidad, por ejemplo una capa arcillosa o la superficie freática libre, se encuentra a unos metros o decenas de metros de profundidad. El agua contenida en este acuífero presenta diferentes grados de mineralización (Plata Torres, J.L., 2002-2003).

Unidad acuífera volcánica: está formado por rocas volcánicas de elevada permeabilidad y presencia de cavidades o vesículas, más o menos comunicadas entre sí, que son producto de la liberación de gases o circulación hídrica durante los procesos efusivos (Custodio y Llamas, 1976; Price M., 2003). La infiltración puede alcanzar el valor superior a la mitad de la precipitación, por ejemplo el flujo de lava (Price M., 2003).

3.2.5 Tipo de porosidad

Según la porosidad que presente la unidad acuífera, se clasifica como: kárstica, fisurada y porosa, es decir:

Unidad acuífera kárstica: también llamada unidad acuífera química o por disolución. Algunas rocas son disueltas por el agua y forman una estructura geológica típica llamada karst, capaz de almacenar gran cantidad de agua. Habitualmente las calizas son las rocas que forman karst, pero también las dolomías, los yesos y las sales pueden formarlo. Se desarrollan fundamentalmente sobre roca carbonatada, aunque puede albergarlo una formación evaporítica.

Unidad acuífera fisurada: es aquella en el que el agua circula a través de las fisuras o grietas que hay entre las rocas. Está compuesto por capas o estratos que desarrollan porosidad secundaria, es decir, por la presencia de fracturas o grietas debido a fallas, o diaclasas. La circulación puede ser libre o con carga hidrostática.

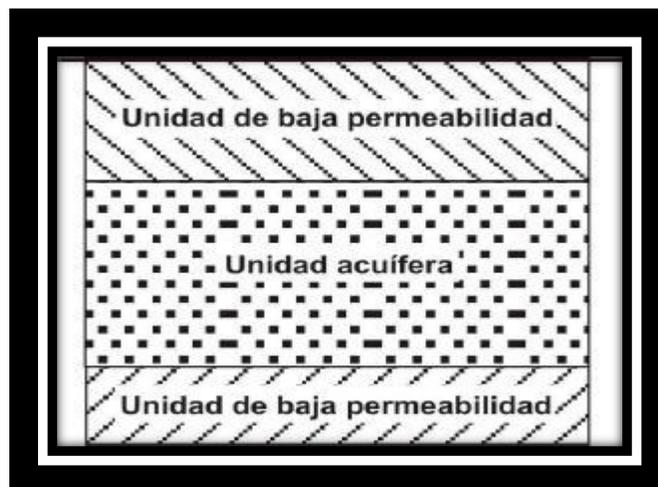
Unidad acuífera porosa: también llamada unidad acuífera no consolidada. Está formada por sedimentos granulares como las arenas o areniscas, en el cual el agua ocupa poros existentes entre los granos de arena

3.2.6 Presión Hidrostática o desde el punto de vista hidráulico

Según la estructura geológica de los materiales que conforman a la unidad acuífera y las condiciones hidráulicas del agua que contiene puede ser confinada, libre y semiconfinada, es decir:

Unidad acuífera confinada: también se le llama unidad acuífera cautiva, a presión o en carga (Custodio y Llamas, 1976; Bear J., 1979; Fetter, 2001). Es una formación geológica permeable, confinada entre dos capas o estratos de baja permeabilidad (Acuícludo), tanto superior como inferiormente, todo el espesor del acuífero está saturado de agua y la presión del agua en los poros o fisuras es mayor que la atmosférica, (Custodio y Llamas, 1976; Pinder y Celia, 2006). (Ver fig. #6).

Figura 6. Modelo conceptual de una unidad acuífera confinada.



A causa del exceso de extracción del agua subterránea, a ésta unidad acuífera se le puede considerar como unidad acuífera libre, debido a que el nivel freático desciende y el agua no estaría en contacto directo con la capa o estrato de baja permeabilidad superior o acuícludo. La recarga de esta unidad acuífera puede ocurrir a través de una zona de recarga superior en el cual los estratos afloran en la superficie del terreno, o a través de una infiltración muy lenta por medio de una capa semiconfinante (Fetter, 2001).

Unidad acuífera libre: también se le llama unidad acuífera no confinada o freática (Custodio y Llamas, 1976; Bear J, 1979). Es aquella que no está limitada por un acuitardo o Acuícludo superiormente, sin embargo tienen una superficie freática como límite superior (sujeta a presión atmosférica) que yace sobre otro estrato de baja permeabilidad (Custodio y Llamas, 1976; Fetter, 2001; Pinder y Celia, 2006). (Ver fig. 7)

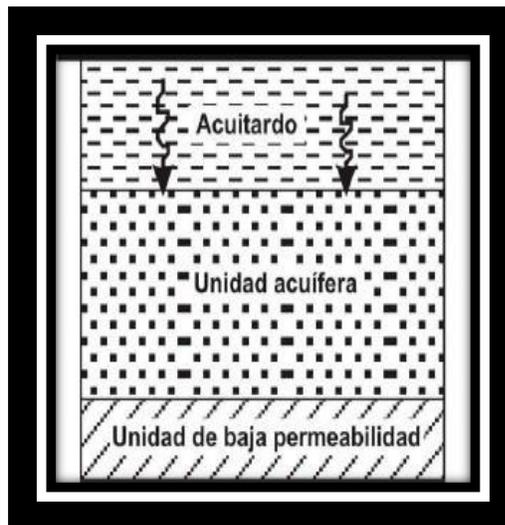
Figura 7. Modelo conceptual de una unidad acuífera libre.



La recarga de esta unidad acuífera se produce debido a una infiltración vertical a través de la zona no saturada. La recarga también se puede producir a través de flujo subterráneo lateral o desde estratos inferiores (Fetter, 2001).

Unidad acuífera con características semiconfinadas: ésta unidad acuífera consiste de formaciones que son separadas por acuitardos, acuicludos o acuífugos, en las cuales existe un intercambio de agua entre los acuitardos y la unidad acuífera. A este sistema de unidad acuífera acuitardo se le llamará aquí, unidad acuífera semiconfinada. Generalmente el intercambio de agua entre los dos unidades acuíferas es conocido como “goteo” (Cheng, 2000). En algunos textos (Custodio y Llamas, 1976; Bear J., 1979; Pinder y Celia, 2006). Se define a la unidad acuífera semiconfinada como la unidad acuífera que recibe el goteo (sin incluir al acuitardo). (Ver fig. 8)

Figura 8. Modelo conceptual de una unidad acuífera semiconfinada.



3.2.7 Propiedades Hidrogeológicas de los Acuíferos.

3.2.7.1 Ley de Darcy

En 1856, en la ciudad francesa de Dijon, el ingeniero Henry Darcy fue encargado del estudio de la red de abastecimiento a la ciudad. Parece que también debía diseñar filtros de arena para purificar agua, así que se interesó por los factores que influían en el flujo del agua a través de los materiales arenosos, y presentó el resultado de sus trabajos como un apéndice a su informe de la red de distribución.

Ese pequeño apéndice fue la base de todos los estudios físico-matemáticos posteriores sobre el flujo del agua subterránea. Darcy para su análisis utilizó un aparato de laboratorio llamado Permeámetro de carga constante.

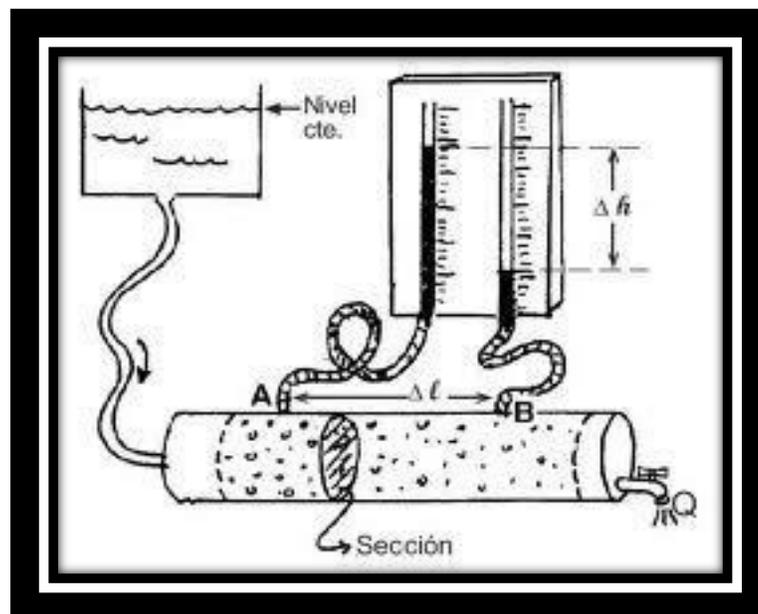
Dónde:

Q = Caudal

Δh = Diferencia de Potencial entre A y B

Gradiente hidráulico = $\Delta h / \Delta l$

Básicamente un permeámetro es un recipiente de sección constante por el que se hace circular agua conectando a uno de sus extremos un depósito elevado de nivel constante. En el otro extremo se regula el caudal de salida mediante un grifo que en cada experimento mantiene el caudal también constante. Finalmente, se mide la altura de la columna de agua en varios puntos (como mínimo en dos, como en la Figura 9).



Darcy encontró que el caudal que atravesaba el permeámetro era linealmente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico

Gradiente es el incremento de una variable entre dos puntos del espacio, en relación con la distancia entre esos dos puntos. Si la variable considerada fuera la altitud de cada punto, el gradiente sería la pendiente entre los dos puntos considerados.

Es decir: variando el caudal con el grifo y/o moviendo el depósito elevado, los niveles del agua en los tubos varía. Podemos probar también con permeámetros de distintos diámetros y midiendo la altura de la columna de agua en puntos más o menos próximos. Pues bien: cambiando todas las variables, siempre que utilicemos la misma arena, se cumple que:

$$Q = cte. \times \text{Sección} \times (\Delta h / \Delta l) \quad (\text{EC. 1})$$

Darcy encontró que utilizando otra arena (más gruesa o fina, o mezcla de gruesa y fina, etc.) y jugando de nuevo con todas las variables, se volvía a cumplir la ecuación anterior, pero que la constante de proporcionalidad lineal era otra distinta.

Concluyó, por tanto, que esa constante era propia y característica de cada arena y la llamó *permeabilidad* (K).

La Ley de Darcy se expresa de esta forma:

$$q = - K (dh / dl) \quad (\text{EC. 2})$$

Donde:

$q = Q/\text{sección}$ (es decir: caudal que circula por m^2 de sección)

$K = \text{Conductividad Hidráulica}$ (“permeabilidad”)

$(dh/dl) = \text{Gradiente hidráulico}$ expresado en incrementos infinitesimales (el signo menos se debe a que el caudal es una magnitud vectorial, cuya dirección es hacia dh decrecientes; es decir, que Δh o dh es negativo y por tanto, el caudal será positivo).

Sabemos que en cualquier conducto por el que circula un fluido se cumple que:

Caudal = Sección x Velocidad

$$L^3/T = (L^2) (L/T) \quad (\text{EC. 3})$$

Si aplicamos esta consideración al cilindro del permeámetro de Darcy y calculamos la velocidad a partir del caudal y de la sección, que son conocidos, obtendremos una velocidad falsa, puesto que el agua no circula por toda la sección del permeámetro, sino solamente por una pequeña parte de ella. A esa velocidad falsa (la que llevaría el agua si circulara por toda la sección del medio poroso) se denomina “velocidad Darcy” o “velocidad de flujo”:

$$\text{Velocidad Darcy} = \text{Caudal} / \text{Sección total} \quad (\text{EC. 4})$$

Esa parte de la sección total por la que puede circular el agua es la porosidad eficaz; si una arena tiene una porosidad del 10% (0,10), el agua estaría circulando por el 10% de la sección total del tubo. Y para que el mismo caudal circule por una sección 10 veces menor, su velocidad será 10 veces mayor. Por tanto, se cumplirá que:

$$\text{Velocidad Real} = \text{Velocidad Darcy} / e \quad (\text{EC. 5})$$

Donde:

e= Porosidad eficaz

Considerando la cuestión con más precisión, esto sólo sería exacto si el agua siguiera caminos rectilíneos, cuando en la realidad no es así. Por tanto, la “Velocidad Real” de la fórmula (5) hay que denominarla “Velocidad lineal media”. Entonces se cumpliría que:

$$\text{Velocidad Real} = \text{Velocidad lineal media} \times \text{coeficiente} \quad (\text{EC. 6})$$

Ese coeficiente depende de la tortuosidad del medio poroso, y suele valer de 1,0 a 1,2 en arenas.

3.2.7.2 Porosidad (n)

La porosidad es una medida del espacio intersticial de una roca y por consiguiente, de la cantidad de fluido que el medio puede almacenar. En general se distinguen dos tipos de porosidad:

1) Porosidad total o verdadera (n): que se define como la relación entre el volumen de los vacíos (V_v) y el volumen total de la roca (V), expresado en %.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (\text{EC. 7})$$

2) La porosidad eficaz o efectiva neta (e): que se define como la relación entre el volumen del agua gravítica y el volumen total V expresada en porcentaje. Esta representa un porcentaje, en general bajo, de la porosidad total.

En mecánica de suelos se utiliza también como un parámetro indicativo de la porosidad de una roca el índice de vacíos e , definido como la relación entre el volumen de vacíos (V_v) y el volumen de sólidos (V_s).

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{EC. 8})$$

Este índice de vacíos está ligado a la porosidad total y expresa, de hecho, una misma propiedad del terreno. Las expresiones que relacionan estos dos parámetros son:

$$n = \frac{e}{1+e} \quad e = \frac{n}{1-n} \quad (\text{EC. 9})$$

La porosidad total depende de los siguientes factores principales:

a) La forma de los granos: la cual determina a su vez la forma y dimensiones de los poros. Así, por ejemplo, un suelo en el cual prevalece la forma esférica tiene una porosidad menor que otro para el cual los granos tienen forma cúbica.

b) La colocación de los granos: por ejemplo, para el caso de granos esféricos existen varios tipos de arreglos posibles, los cuales afectan en forma directa la porosidad,

de tal forma que a diámetro igual de los granos la porosidad total es función de la colocación de los granos.

c) La granulometría: mientras más uniforme sea la granulometría mayor es la porosidad. Esto debido a que en los suelos con granulometría heterogénea los granos pequeños tienden a llenar los vacíos que quedan entre los granos de mayor tamaño.

d) El grado de compactación: a causa de una mayor compactación se pueden reducir considerablemente tanto el volumen de los poros como la interconexión entre ellos. Determinación de los factores. La forma de los granos puede ser determinada en el laboratorio con la ayuda de un microscopio y la granulometría igualmente por medio del análisis granulométrico. La colocación de los granos es de muy difícil determinación debido a que al tomar la muestra generalmente ésta es perturbada.

Valores numéricos de la porosidad:

En general la porosidad total de las rocas no compactas varía entre el 5 y el 40%, siendo el valor más frecuente el 15%. Una porosidad mayor de 20% se puede considerar grande, entre el 5% y el 20% es mediana y menor del 5% es pequeña. La Tabla 1 presenta valores de porosidad para algunos materiales.

TABLA 3. Valores de Porosidad

Material	Porosidad (%)
Grava	25-40
Arenas y gravas	36
Arenas	25-50
Limos	35-50
Arcillas	40-70
Mármoles	0.1-0.2
Esquistos	1--10
Dolomitas	2.9
Granitos	1.5-0.02
Basaltos	0.1-2.9

Otros parámetros relacionados con la porosidad son:

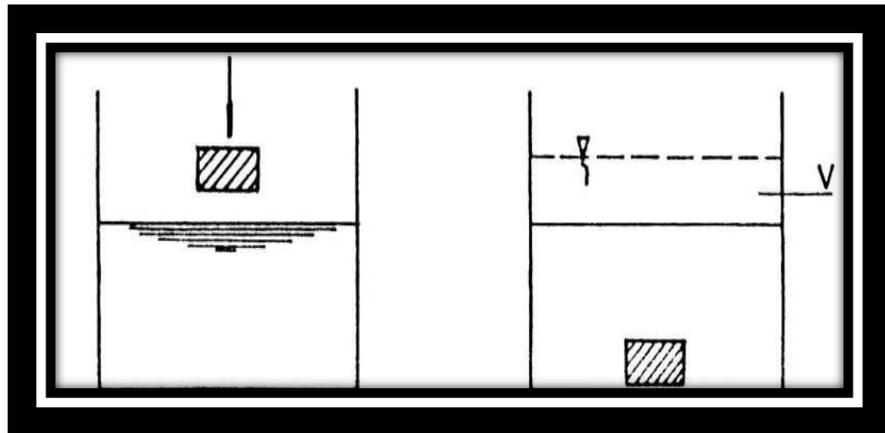
- Porosidad de superficie: Se define para una sección de un medio poroso cualquiera como la relación entre la superficie de los vacíos y la superficie total.
- Superficie específica: Se define como la relación entre la superficie total de los vacíos y el volumen total del medio. Como es claro la superficie específica aumenta a medida que el tamaño de los granos es más pequeño. Así mientras para una arena puede valer de 150 a 220 cm^2/cm^3 , para una arcilla puede alcanzar varios millones de cm^2/cm^3 . Este parámetro reviste una gran importancia en el estudio de los fenómenos que acompañan el comportamiento de la fase líquida en el suelo.

Algunas medidas de la porosidad:

- a) En laboratorio sobre una muestra: Se introduce la muestra aislada por parafina o caucho en un líquido y se determina su volumen total V . Se seca la muestra a 105 - 110 grados centígrados hasta obtener peso constante y se determina el peso de la muestra seca P_1 . La muestra se introduce nuevamente en agua hasta su saturación y se determina su peso P_2 .

$$V = P_2 - P_1 \quad n = n = n = \left[\frac{V_v}{V} \right] \% \quad (\text{EC. 10})$$

Figura 10. Determinación del volumen V de una muestra.



- b) Medidas in situ: Aunque hay varios métodos para realizar estas medidas: diagrama neutrón, bombardeo del terreno con rayos gamma, velocidad del sonido, el más común es inferir porosidades a través de medidas de resistividad del terreno.

Características físicas del medio permeable.

El medio permeable presenta tres parejas de características físicas:

- Continuidad o discontinuidad
- Isotropía o anisotropía
- Homogeneidad o heterogeneidad

Un medio permeable con vacíos interconectados, en el sentido del flujo, se dice que es continuo. Las rocas porosas y las rocas compactadas, con sistemas de fisuras o fracturas interconectados, se dice que constituyen medios continuos. Las rocas con macro fisuras y las rocas kársticas son medios discontinuos. Si la resistencia al flujo del agua es la misma en todas direcciones se dice que el medio es isótropo. Si la resistencia al flujo varía de acuerdo a las distintas direcciones se presenta la anisotropía del medio poroso.

El medio se dice que es homogéneo si sus propiedades de isotropía o anisotropía son las mismas en todos los puntos, y es heterogéneo si esas propiedades varían de un punto a otro del medio.

Un medio puede ser isotrópico y heterogéneo a la vez, como puede ser el caso en que la permeabilidad no varíe en ninguna dirección, pero sí varíe en el espacio de un punto a otro. Las leyes de la hidrodinámica subterránea debido a la complejidad de las ecuaciones generalmente no se aplican sino a medios homogéneos, isotrópicos y continuos. La isotropía y la homogeneidad están ligadas a la escala del dominio considerado. Este dominio, se llama volumen elemental de referencia VER. El tamaño de este VER está comprendido entre dos límites extremos: debe ser tan pequeño como para que el medio se pueda considerar homogéneo e isotrópico y debe ser lo suficientemente grande para permitir la continuidad del escurrimiento y representar las características estadísticas significativas de los parámetros del acuífero. Las dimensiones del VER pueden variar desde centímetros, hasta kilómetros. Así un acuífero de aluviones puede ser considerado como homogéneo a escala regional. Cortado en volúmenes más pequeños, es heterogéneo y cada volumen es homogéneo.

3.2.7.3 Permeabilidad o Conductividad Hidráulica (K)

La conductividad hidráulica es una propiedad muy importante de los medios porosos, que indica la movilidad del agua dentro del suelo y depende del grado de saturación y la naturaleza del mismo. Las utilidades del conocimiento del valor de la conductividad hidráulica, son innumerables, de ahí la importancia de su estimación.

Dentro de estos beneficios se puede resaltar, que sirve como indicador de la hidrodinámica del agua subterránea, y este entendimiento es fundamental para analizar problemas hidrogeológicos en relación con las obras civiles, como en presas y embalses; problemas hidrogeológicos en estudios geotécnicos y de minería; y el diseño de drenajes.

Otra utilidad del conocimiento de la hidrodinámica del acuífero es la caracterización para su explotación y gestión, ya sea para abastecimiento de agua potable o para riego o uso conjunto, y por lo tanto definir los perímetros de protección de las captaciones y modelos de simulación y de gestión con el fin de plantear regulaciones de los sistemas de explotación y hacer el seguimiento del estado de las aguas subterráneas, por medio de redes de control piezométrico y redes de monitoreo de calidad y cantidad.

La conductividad hidráulica sirve para la definición de la interacción agua superficial y agua subterránea, esto permite realizar la valoración de las reservas y recursos subterráneos, porque ayuda a la estimación de la recarga, siendo insumo de los modelos precipitación – infiltración – recarga, procesos que se presentan en el tránsito de flujo por la zona parcialmente saturada. También es materia prima importante para la realización de modelos numéricos directos e inversos en hidrogeología de flujo y transporte. Por último se puede destacar su empleo en estudios de calidad y contaminación de las aguas subterráneas,

Estudios de contaminación puntual y difusa, almacenamiento de residuos y descontaminación de acuíferos.

La medición y estimación de la conductividad hidráulica es tema de constante investigación, dada la gran incertidumbre que arrojan los diferentes métodos de cálculo y medida. Una alternativa para representar los medios porosos son los modelos teóricos. Estos modelos también llamados abstractos (Chow et al., 1988), representan el sistema analizado en forma matemática y la operación del sistema se describe por medio de un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de entrada y de salida.

Existen dos tipos de modelos teóricos: los determinísticos y los estocásticos. Entre los primeros se pueden citar el modelo de Kozeny para flujo basado en el concepto del Radio Hidráulico como longitud característica del medio poroso y el modelo Hagen-Poiseuille fundamentado en la teoría de flujo en tubos capilares.

Pero dado que el medio poroso natural es extremadamente desordenado y resulta muy difícil representarlo con modelos ordenados, consecuentemente se puede recurrir a conceptos probabilísticos que representen la aleatoriedad del suelo.

Conductividad hidráulica (K): Es la velocidad de descarga de agua bajo condiciones de flujo laminar a través de una sección transversal unitaria de un medio poroso y bajo condiciones de temperatura estándar 20°C). Es decir es la propiedad de una formación acuífera en lo referente a su función transmisora o de conducto, indica la capacidad que posee un medio poroso para transmitir agua.

Es propiedad muy importante porque engloba el conjunto de las propiedades del suelo transmisoras de agua; depende del número y diámetro de los poros. Las dimensiones de la permeabilidad son de una velocidad. La permeabilidad de los suelos alcanza en la práctica los siguientes valores:

Arenas: Desde 0.1 m/d en arenas muy finas, hasta 30 m/d en arenas gruesas.

Arcillas: Desde 0.01 m/d hasta 30 m/d.

Algunas arcillas son más permeables que las arenas gruesas. Sin embargo las arcillas son generalmente el material menos permeable de los que constituyen el suelo. Es relativamente frecuente la existencia de suelos arcillosos prácticamente impermeables ($K = 0$ m/d). Turbas: Desde 0.01 m/d hasta 10 m/d. Los valores de la permeabilidad se pueden clasificar de la forma siguiente:

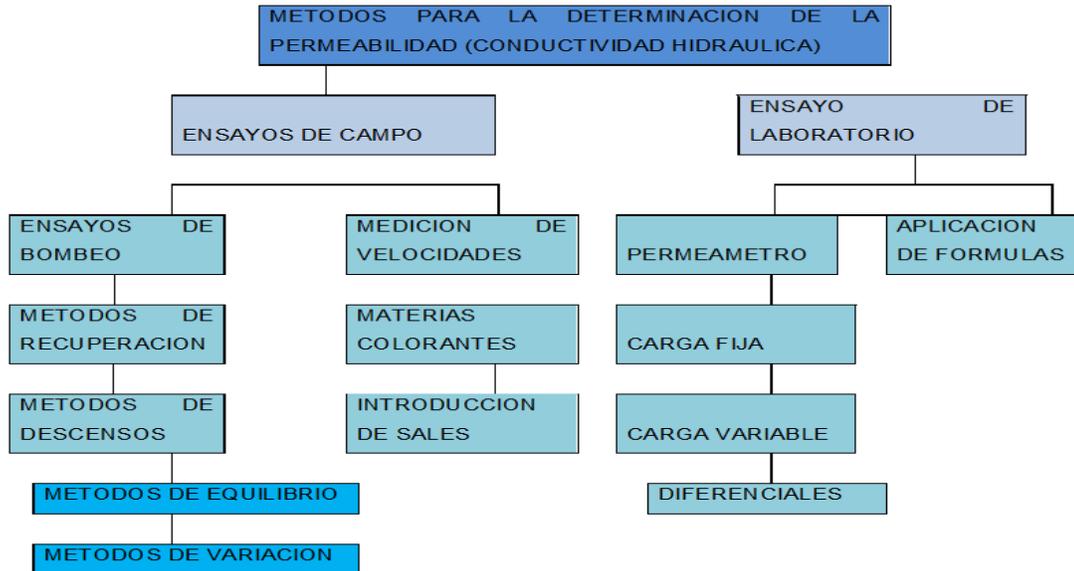
Tabla 4. Valores de Permeabilidad

Clase	K(m/d)
Muy baja	< 0.05
Baja	0.05-0.03
Media	0.3-1
Alta	1.0-5.0
Muy Alta	< 5.0

Coeficiente de permeabilidad (k): es la cantidad de agua que puede fluir a través de una sección transversal de área unitaria dentro de un material poroso, por unidad de tiempo y bajo un gradiente hidráulico.

El coeficiente de permeabilidad es una característica de los suelos, específicamente está ligado a la Ley de Darcy que se refiere al flujo de fluidos a través de los suelos. El coeficiente de permeabilidad, generalmente representado por la letra k , es extremadamente variable, según el tipo de suelo.

Esquema 1. Métodos para determinar la conductividad hidráulica.



Métodos de laboratorio:

El método más efectivo para la determinación de la conductividad hidráulica y de la permeabilidad intrínseca es desde las pruebas de bombeo llevadas a cabo en campo. Los valores de la conductividad hidráulica, determinada por experimentos llevados cuidadosamente a cabo en laboratorio son completamente exactos y reproducibles. Por necesidad las muestras para laboratorio son extremadamente pequeñas comparadas con el acuífero entero.

Además algún grado de disturbio siempre acompaña a las muestras colectadas. Por estas razones es extremadamente difícil caracterizar la conductividad hidráulica de un acuífero o una pequeña porción de él por las mediciones hechas en un laboratorio. (McWhorter y Sunada, 1977; Benitez, 1972; De Wiest, 1965).

Métodos Indirectos:

Consisten en la determinación en laboratorio de magnitudes tales como el tamaño de las partículas, su composición granulométrica, la porosidad de la muestra, etc. Y después la aplicación de fórmulas más o menos empíricas que hacen uso de las magnitudes medidas. Existe un gran número de fórmulas desarrolladas por multitud de investigadores, con límites de aplicación muy variables.

Por las razones apuntadas anteriormente, se recomienda aplicar estas fórmulas con gran reserva al cálculo de caudales y considerar sus resultados como indicaciones de orden general de magnitud y no como elementos del cálculo final del caudal. (Benítez, 1972)

Formula de Terzaghi

$$K=k*(\mu_{10}/\mu_1)*((n-0.13) / (\sqrt[3]{1-n})^2)*(d_e)^2 \quad (\text{EC.11})$$

Donde:

K: coeficiente de permeabilidad.

k: coeficiente de forma.

μ_{10} : viscosidad del agua a 10°C.

μ_1 : viscosidad del agua a la temperatura t.

n: porosidad.

d_e : diámetro eficaz.

La fórmula asimila el flujo de agua en la masa porosa a la que tendría lugar a través de una serie de tamices superpuestos, en donde la pérdida de carga ocurre sólo al cruzar un tamiz y es nula entre dos tamices consecutivos, en la hipótesis de que los canalículos mayores por los que transcurre el agua tengan, por lo menos una sección transversal cinco veces mayor que los más estrechos: es decir, que la pérdida de carga en los primeros será 25 veces más pequeña que en los segundos. (Benítez, 1972)

Formula de Hazen.

$$v = \frac{c*d_e^2*h}{l} (0.70 + 0.03\theta) \quad (\text{EC. 12})$$

Donde:

v = Velocidad del agua en m/día en una sección de la misma superficie que la de la arena.

C = Coeficiente dependiente del coeficiente de uniformidad y que decrece cuando éste aumenta.

C = 1000 para un coeficiente de uniformidad menor de 5 y diámetro eficaz de 0.10 a 0.30mm.

C = 1200 para arena perfectamente uniforme y limpia.

C = 400 para arena de granulometría variable compactada y con sales de hierro y alúmina.

de = Diámetro eficaz en mm.

h = Pérdida de carga = Espesor de la capa filtrante.

Θ= Temperatura en grados centígrados.

FORMULA DE SLICHTER

$$Q = 0.2012 \frac{h \cdot d_c^2 \cdot A}{\mu l c} \quad (\text{EC. 13})$$

Donde:

Q = Caudal en pies cúbicos por minuto.

h = carga en pies de agua.

A= Área total de la sección en pies cuadrados.

l = Longitud de la columna filtrante en pies.

de = Diámetro eficaz en mm.

μ= Coeficiente de viscosidad del agua

C = Factor dependiente de la porosidad

Medición de Velocidades:

Introduciendo sustancias fácilmente detectables en un punto del acuífero y detectando su llegada en otro punto situado aguas abajo (freáticamente hablando) puede deducirse la velocidad del movimiento del agua subterránea y por lo tanto la permeabilidad del acuífero. Puesto que la velocidad media del agua subterránea es directamente proporcional a la permeabilidad K, a la porosidad p y al gradiente hidráulico I, puede deducirse K si se conoce las otras variables.

La cantidad de agua que fluye a través de una sección de terreno de área A es:

$$Q = p \cdot A \cdot V \quad (\text{EC. 16})$$

Por otra parte, por definición de coeficiente de permeabilidad:

$$Q = K \cdot I \cdot A \quad (\text{EC. 17})$$

Igualando tendremos:

$$p \cdot A \cdot V = K \cdot I \cdot A \quad (\text{EC. 18})$$

Lo cual nos queda

$$K = (p \cdot V) / I \quad (\text{EC. 19})$$

Si se determina la porosidad p en el laboratorio, el gradiente I por medición de distancias y diferencias de niveles freáticos en el campo y v también en el campo por introducción de sustancias detectables, podemos obtener así una determinación de la permeabilidad media de la zona.

Materias colorantes: el empleo de los colorantes en la determinación de la velocidad y curso de corrientes de agua subterránea es ya antiguo, especialmente en relación con la detección de fuentes de epidemias de enfermedades hídricas.

El colorante casi exclusivamente usado es la fluoresceína, Trillat en 1899 lo determinó como el más adecuado para su detección en aguas subterráneas, inventó el fluoroscopio que es capaz de detectarla en diluciones de una parte en 10^{10}

El ensayo se realiza vertiendo una pequeña cantidad de fluoresceína en un pozo, anotando la hora y tomando muestras a intervalos regulares en otro para observar el color. Un inconveniente del método, observado en los ensayos de Morón, es que la formación se contaminó de fluoresceína, e incluso después de bombear intensamente durante varias semanas algunos de los pozos de la zona, todos ellos seguían acusando rastros de colorante. Sólo es práctico, pues, para determinar la velocidad del agua subterránea una vez en cada zona al mismo tiempo.

Otros sistemas de detectar el curso y velocidad de aguas subterráneas especialmente en relación con problemas de ingeniería sanitaria, consisten en contaminar la formación con materias fecales en un punto y determinar la presencia

de bacilos coli y uranina en muestras tomadas a intervalos de tiempo en otros puntos de la formación.

Método Químico:

Es análogo, en principio, al de colorantes. Se introduce sal en uno de los pozos y se toman muestras en los restantes para determinar cuándo se ha detectado la sal en el agua. Como en el método de colorantes, tiene el inconveniente de que al tomar la muestra, siempre se aumenta al fiel gradiente hacia el pozo donde se toma.

Método Electrolítico:

Introducido por Slichter en 1902, consiste en disponer dos electrodos en cada uno de los pozos para detectar la llegada de la sal introducida en otro por brusco aumento de la conductividad del agua. Este método no tiene el inconveniente que acabamos de apuntar. Varios autores lo han experimentado con éxito. La sal generalmente usada es el cloruro amónico. En general el sondeo de entrada de la sal y los de detección electrolítica se colocan en línea recta, siguiendo la línea propuesta de máxima pendiente freática.

Pruebas de Bombeo:

Las pruebas de bombeo se realizan para la determinación del comportamiento de un pozo, predicción de caudales y descensos futuros, también para la obtención de valores que nos indiquen el comportamiento del acuífero que no se pueden determinar en el laboratorio (Custodio, 1983). Para Zekai (1984), Walton (1970) y Cruickshank, (s/a) las pruebas de bombeo sirven para determinar los parámetros de los acuíferos, que son, el coeficiente de almacenamiento y la transmisividad. Por otra parte, McWhorter (1975) menciona que las pruebas de bombeo se realizan con dos objetivos principales:

1. Determinar las características del pozo de bombeo, así como su comportamiento y eficiencia.

2. Dar datos de los cuales se obtienen los factores principales para calcular el comportamiento de los acuíferos.

Métodos de equilibrio:

Los métodos de equilibrio en la determinación de permeabilidades operan pues con los resultados de medición de niveles freáticos cuando tal estado de equilibrio del cono de abatimiento se ha alcanzado.

Fórmulas de Thiem:

Supongamos un acuífero indefinido, de espesor y permeabilidad uniformes, reposando sobre un terreno horizontal Totalmente impermeable. Se supone también que inicialmente la superficie freática es horizontal. En esas condiciones un pozo A, que atraviesa el acuífero en toda su longitud, se bombea con un caudal constante Q. Hay en el acuífero alineados con A, dos pozos de observación B y C, a distancias r_1 y r_2 de A.

En estas condiciones cabe distinguir dos casos:

- a) Que el acuífero esté en condiciones libres
- B) Que el acuífero esté en condiciones artesianas.

En condiciones de equilibrio, el caudal que se filtra por la superficie lateral de un círculo de radio r , concéntrico en el pozo es el mismo caudal bombeado Q.

Aplicando la fórmula de Darcy $Q = KIA$

A este cilindro para condiciones libres (figura 13), siendo:

Q = caudal bombeado.

$I =$ gradiente hidráulico = dh/dh

$h =$ altura del agua

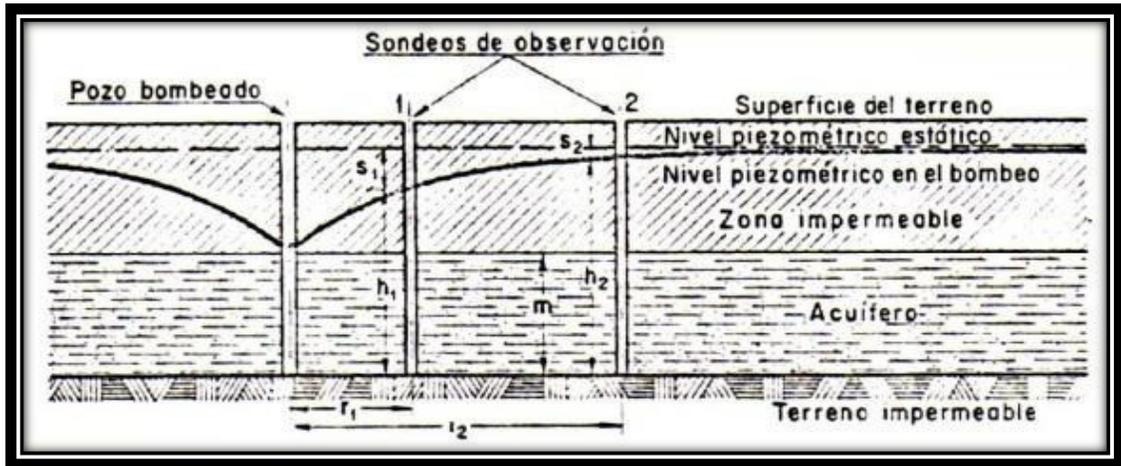
K = permeabilidad uniforme a determinar

A = área lateral del cilindro = $2\pi rh$

1. Para condiciones libres:

$$K = \frac{Q}{\pi(h_1 - h_2)(s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{EC. 20})$$

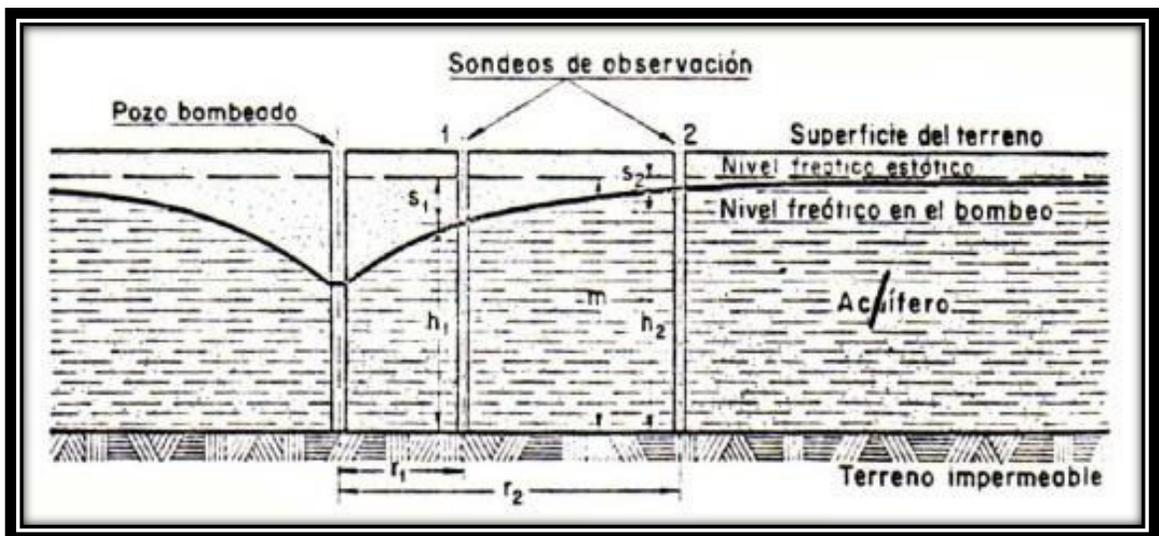
Figura 13. Acuífero infinito en condición libre.



2. Para condiciones artesianas:

$$K = \frac{Q}{2\pi * m * (s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{EC. 21})$$

Figura 14. Acuífero infinito en condiciones artesianas.



Para determinar la permeabilidad por el método de Thiem suele procederse del modo siguiente:

Se sitúan en papel semilogarítmico los puntos indicativos de los descensos observados, a partir del nivel de reposo, en función de las distancias, representadas éstas en la escala logarítmica de los respectivos pozos de observación al pozo de bombeo.

- ✓ Se dibuja la recta que se aproxime más a los puntos anteriores.
- ✓ Se elige un ciclo en la escala logarítmica de abscisas cuyos extremos corten a la recta dentro de los límites del papel. Los puntos de intersección con la gráfica dan los respectivos descensos.

Si suponemos que $2m \approx h_1 + h_2$ siendo m el espesor del acuífero saturado y llamando Δs a la diferencia de descensos correspondiente a un ciclo logarítmico en la escala de abscisas y pasando a logaritmos decimales.

$$K = \frac{2.3}{2 \cdot \pi} * \frac{Q}{m \cdot \Delta s} \log_{10} \quad \text{o bien} \quad 0.366 \frac{Q}{m \cdot \Delta s} \quad (\text{EC. 22})$$

Fórmula de Slichter.

Para las mismas hipótesis simplificativas anteriores y para condiciones artesianas, Slichter dedujo la fórmula:

$$K = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot s \cdot m} * \ln \left(1 + \frac{R}{r} \right) \quad (\text{EC. 23})$$

Donde:

s = descenso en el propio pozo de bombeo.

R = distancia de la pared del pozo a un punto donde el descenso es inapreciable.

r = radio del pozo bombeado.

La fórmula de Slichter sin embargo conduce a resultados mucho menos exactos que la de Thiem, ya que hace intervenir el nivel del agua en el propio pozo bombeado, lo cual tiene los siguientes inconvenientes:

1. Es muy difícil de obtener una medición exacta en el propio pozo de bombeo debido a que siempre tiene ligeras oscilaciones de nivel.
2. interviene como causa de error, a veces muy importante, la brusca pérdida de carga al entrar el agua del acuífero al pozo. Esta pérdida depende de la construcción del pozo y de las condiciones del terreno en contacto con él, es muy variable e imposible de estimar, excepto por medición directa.

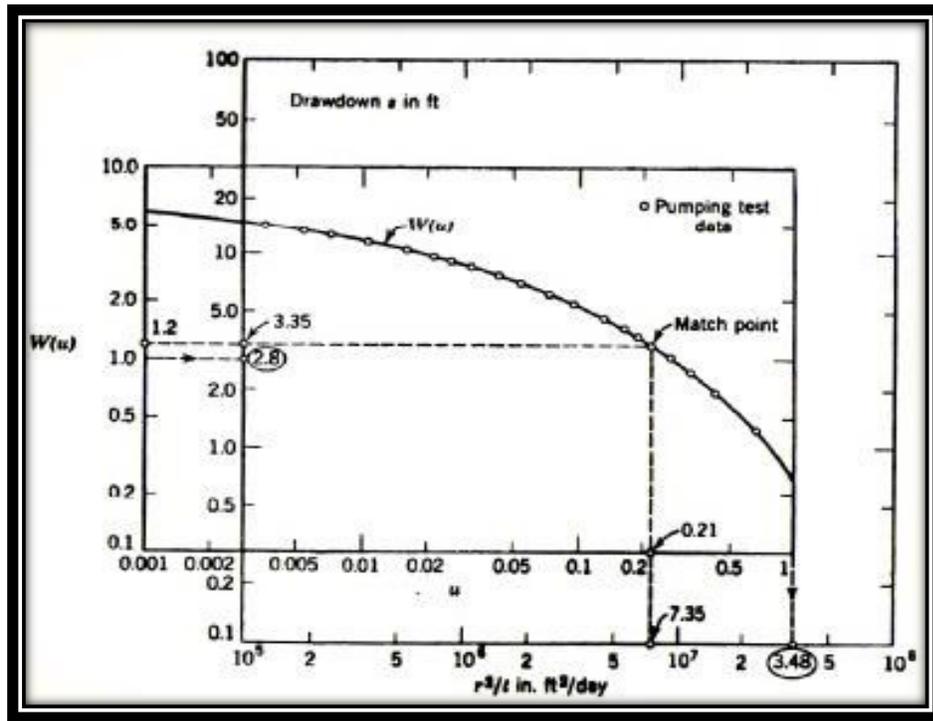
3.2.7.4 Transmisividad (T)

Uno de los progresos más notable en el conocimiento de la hidráulica subterránea fue hecho por Theis el cual, basándose en analogías de transmisión de calor a través de medios homogéneos, descubrió, en 1935, la fórmula que expresa que el descenso de nivel freático en un sondeo de observación en función del tiempo de duración del bombeo desde las condiciones de reposo. Posteriormente Jacob obtuvo las mismas fórmulas basándose exclusivamente en conceptos hidráulicos.

3.2.7.4.1 Método de Theis.

El artificio gráfico de Theis consiste en representar, en papel logarítmico en ambos ejes, tanto la función de pozo $W(u)$ en función de u (curvas tipo), como valores experimentales de s en función de r^2/t . Las distancias que aparecen en la escala gráfica de la curva tipo son $\log u$ y $\log W(u)$. Si se relaciona en papel logarítmico del mismo tamaño de ciclo s y r^2/t se nota que es idéntica a la que relaciona $W(u)$ y u

Figura 15. Método grafico de Theis.



El método de Theis consiste en dibujar en papel logarítmico $W(u)$ en función de u . Después dibujar en papel logarítmico idéntico, pero transparente la curva obtenida de la prueba de bombeo, es decir los datos de los descensos s en función de r^2/t y superponer ambas curvas (manteniendo los ejes paralelos), hasta que se logre la mejor superposición posible. Una vez hecho esto de un pinchazo que atraviese los dos papeles, se obtiene un punto para cada una de las gráficas, en una gráfica se tienen los valores de $W(u)$ y u , y en la otra los valores de s y r^2/t , los cuales se sustituyen dentro de las siguientes ecuaciones y se resuelve para S y T .

$$T = \frac{q}{4\pi s} * W(u) \quad \text{y para} \quad S = \frac{4Tt}{r^2u} \quad (\text{EC. 24})$$

2.2.8.4.2 Método de Jacob.

Jacob propone que la simplificación de fórmulas a partir de un cierto intervalo después de iniciado el bombeo, despreciando en el desarrollo de $W(u)$.

El método más generalmente usado es el de representar en papel semilogarítmico los valores observados de s y t (figura 16).

A partir de un cierto valor del tiempo puede observarse que los puntos se aproximan a una recta. Dibujando la recta que mejor se ajuste a los puntos observados, tomemos en ella dos puntos cualesquiera (t_1, s_1) , (t_2, s_2) . Es práctica útil tomarlos de manera que el intervalo de (t_2-t_1) corresponda a un ciclo en el papel semilogarítmico; entonces $t_2/t_1=10$

$$T = 0.1832 \frac{Q}{s_1-s_2} = 0.1832 \frac{Q}{\Delta s} \quad (\text{EC. 25})$$

Donde:

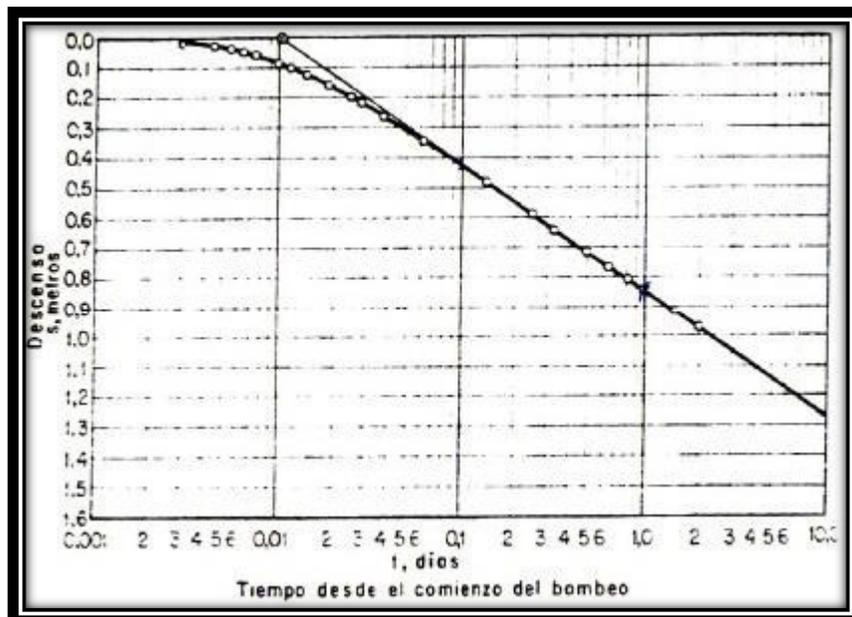
s = metros

Q = $\text{m}^3/\text{día}$

T = $\text{m}^2/\text{día}$

S = adimensional

Figura 16. Método grafico de Jacob



3.2.7.5 Capacidad Específica (CE)

Es la relación que existe entre el caudal que se obtiene de un pozo y el abatimiento producido y se expresa en unidades de caudal por longitud, GPM/ft Este valor es constante para acuíferos confinados y variables para los acuíferos libres; es un término que representa el grado de eficiencia de un pozo ya que de dos pozos perforados en una misma formación acuífera, el de menor capacidad específica tendrá menos eficiencia. El grado de eficiencia de un pozo lo determinaremos con base en la Transmisividad y el coeficiente de almacenamiento de la formación acuífera, (con la cual podremos calcular un valor de la capacidad específica teórica) el valor de la capacidad específica real medida en el pozo.

3.2.7.6 Coeficiente de Almacenamiento (s)

Es un valor adimensional. Se refiere al volumen que es capaz de liberar el acuífero al descender en una unidad el nivel piezométrico (o la presión). Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección igual a la unidad y altura la del espesor saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico.

Toma valores diferentes según sea el acuífero libre o cautivo.

En un acuífero libre el valor del coeficiente de almacenamiento coincide con el valor de la porosidad eficaz. En un acuífero cautivo, sin embargo, este volumen de agua que causa un descenso de una unidad en el nivel piezométrico, coincide con la suma del agua liberada por el acuífero como consecuencia de la dilatación que ésta sufre al descomprimirse y el agua que cede el terreno al compactarse el armazón por tener que soportar en mayor parte el peso del terreno suprayacente.

En un acuífero libre: $S = 0'05 - 0'03$

En acuíferos confinados: $S = 10^{-3}; 10^{-2}$

3.3 Conceptos Básicos (pozos)

3.3.1. Pozo.

Estructura hidráulica que debidamente diseñada y construida permite efectuar la extracción económica de agua de una formación acuífera.

La extracción económica del agua depende de:

- ✓ Aplicación inteligente de los principios de la hidráulica en el análisis del pozo y del comportamiento del acuífero.
- ✓ Destreza al perforar y construir pozos, lo que permite obtener ventaja de las condiciones geológicas.
- ✓ Una selección tal de los materiales que asegure una larga duración a la estructura.

3.3.2 Abatimiento.

Magnitud de descenso del nivel del agua, cuando se inicia el bombeo. El abatimiento es menor a mayores distancias desde el pozo y existe un punto a cierta distancia de este en que es casi imperceptible. Depende del caudal de bombeo y tiempo de bombeo. Ver. Fig. 17

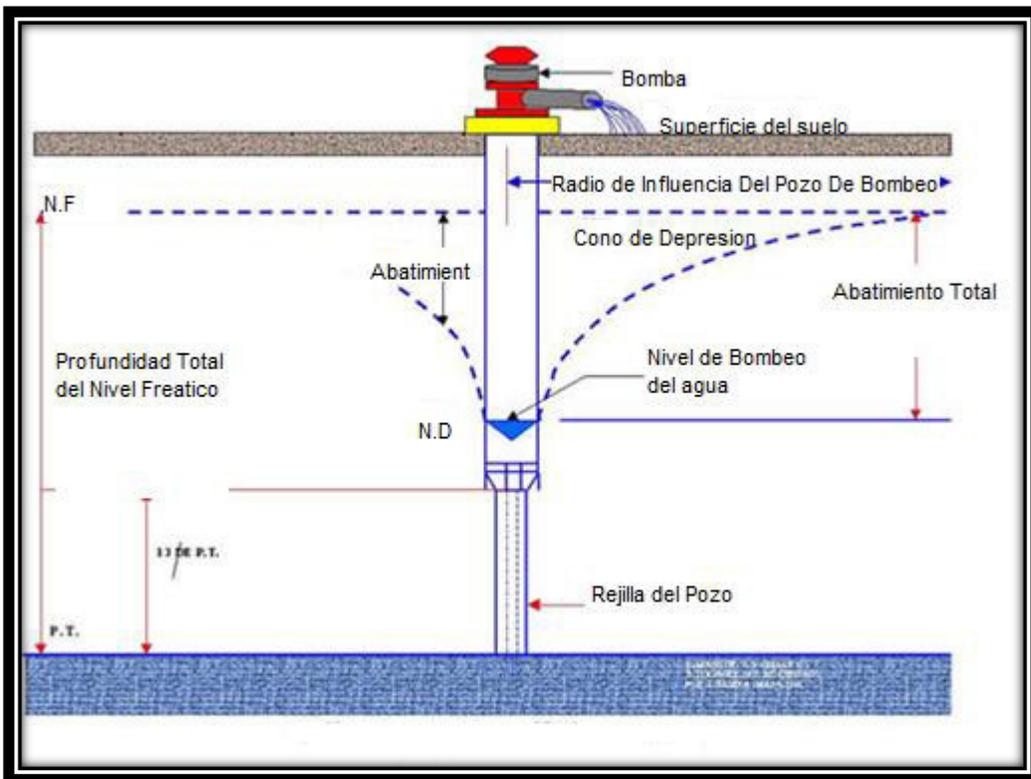
La determinación del abatimiento del nivel de bombeo para pozos proporciona información útil para el mejoramiento y rehabilitación de la infraestructura de

Extracción del agua subterránea. Es una herramienta básica para determinar la eficiencia hidráulica y las características del comportamiento hidráulico de un pozo. Su expresión gráfica se conoce como curva característica, la cual prevé la posibilidad de incrementar o no el caudal extraído, así como la estabilidad del pozo en el acuífero, o sea, su capacidad para mantener el gasto o caudal.

3.3.3 Cono de depresión:

Como resultado de lo anterior, en el momento del bombeo, la superficie líquida que desciende desarrolla una pendiente cada vez más pronunciada hacia el pozo, la forma de esta superficie se asemeja a una depresión cónica, es por ello que recibe el nombre de “cono de depresión” Ver. Fig.17

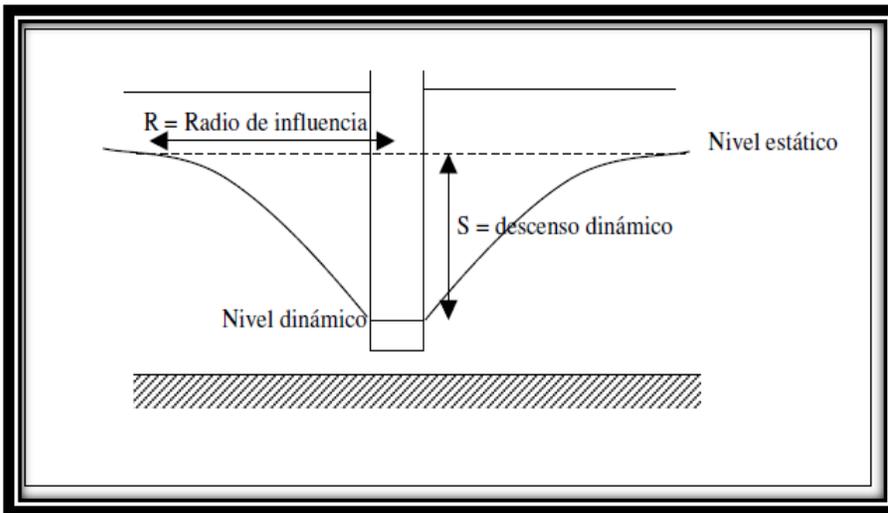
Fig.17 Abatimiento y Cono de Depresión.



3.3.4 Radio de influencia y descensos.

Radio de influencia o radio de acción es la distancia hasta la que el bombeo en un cierto pozo afecta a la posición del nivel piezométrico. Ver. Fig.18

Fig. 18. Radio de Influencia Y Descensos.



3.3.5 Ademe.

Es un tubo de acero al carbono que se introduce dentro del pozo de agua para evitar que el suelo se desgaje y taponee nuevamente la perforación. Es un elemento de carácter estructural que se ve sometido a diferentes esfuerzos del terreno por lo que para su diseño se requiere de un cálculo tanto del material (acero de bajo carbono, con contenido de cobre, baja aleación de alta resistencia, o inoxidable) como del espesor del mismo. Generalmente tiene el tubo un tramo liso y otro ranurado.

3.3.6 Tubería siega

Como bien su nombre lo dice, es aquella que forma parte del ademe pero no contiene orificios o ranuras por donde filtre el agua, es simplemente un soporte que brinda estabilidad a la perforación. Ver.fig.21

3.3.7 Tubería ranurada.

Es la que filtra el agua después de haber pasado por un empaque de grava que se encuentra entre el ademe y el contra ademe y evita el arrastre de arenas dentro del pozo. Ver.fig.19.

Una vez hecha la perforación, el ademe ranurado se debe hacer descender dentro del agujero perforado con todo cuidado. El asunto crítico de esta tarea (en relación a las fallas de los pozos) consiste en que no se debe permitir que la columna del ademe liso y ranurado descansa contra el fondo del agujero perforado. Si eso llegara a pasar, el ademe ranurado del pozo tendría que soportar el peso colgante completo del terreno, lo cual puede conducir al colapso del pozo. De manera similar, si la columna se llega a caer durante la instalación, el impacto resultante podría ejercer la fuerza suficiente para pandear al ademe ranurado del pozo.

Durante la instalación del empaque de grava, es práctica habitual instalarla por caída libre dentro del espacio anular, provocando que la grava se puentee a medida que lentamente se va asentando y consolidando. Cuando la grava se puentea, su peso es impuesto contra el ademe ranurado (y el ademe liso), lo cual puede ocasionar una falla del tipo de tensión, de modo que el método preferente consiste en bombear la grava dentro del espacio anular, a través de un tubo tipo tolva.

Este método reduce, en gran medida, la posibilidad del puenteo y la posibilidad de que se ejerzan esfuerzos indeseables contra el ademe ranurado del pozo.

3.3.8 Empaque de grava.

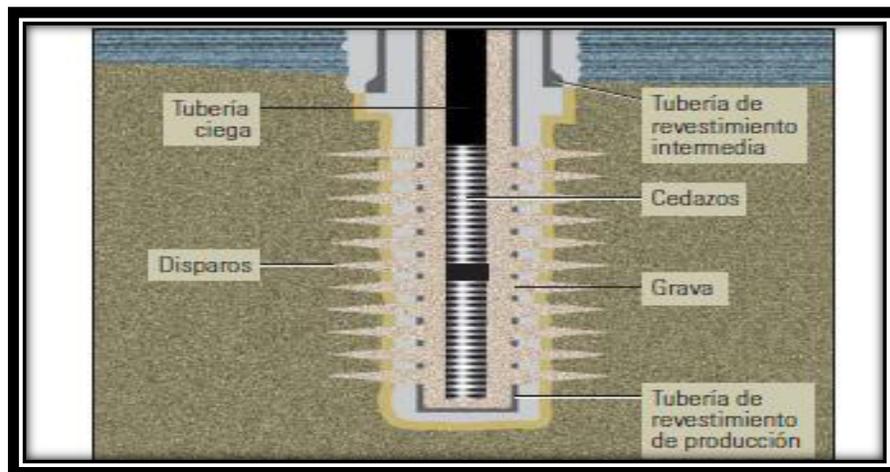
Es un elemento fundamental en la construcción del pozo que se emplea para crear alrededor de la rejilla y tubo ranurado, una zona de muy alta permeabilidad que posibilite un flujo laminar del agua a través de él, de forma tal que pueda evitar turbulencias que generen pérdidas de carga que se traducirán en mayores costos energéticos. Ver. Fig. 19

Por lo anterior la concepción y diseño del Empaque de Grava debe ser tratado de una manera distinta a la convencional que de tanto repetirse por décadas se ha

convertido en una verdad que nadie discute. Debe, por ejemplo, cuidarse en el diseño que el Radio Crítico del pozo no exceda el Radio Nominal del mismo.

Se define Radio Crítico la distancia desde el centro del pozo hasta el punto en que el flujo pasa de ser laminar a turbulento. Igualmente debe tenerse presente que el Empaque de Grava no tenga una capacidad ilimitada de transmitir agua y que, dependiendo de su granulometría, tiene su propio, por así decirlo, Gasto Específico, es decir, con una determinada longitud de rejilla o tubo ranurado con Empaque Grava.

Fig.19. Empaque o Filtro de Grava.



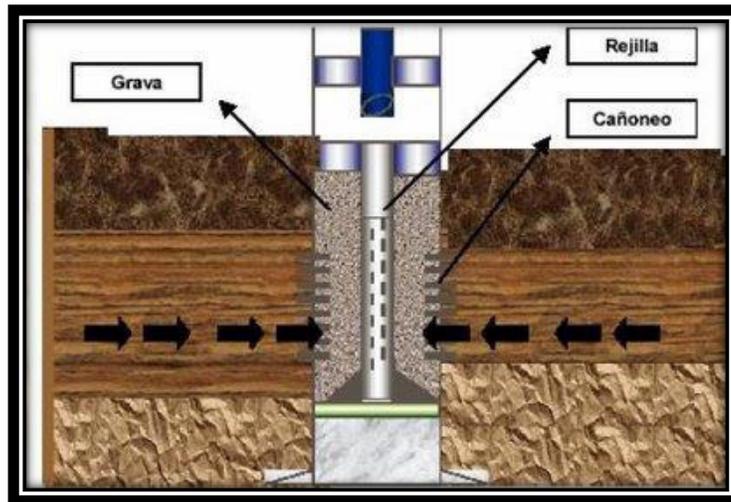
3.3.9 Rejilla.

Una vez que se ha terminado un sondeo para captación de agua en formaciones acuíferas no consolidadas o poco consolidada, es necesario colocar este dispositivo de admisión para retener los materiales sueltos, permitir que el agua entre al pozo sin pérdida excesiva de carga e impedir el paso de material fino durante el bombeo. Ver. Fig. 20.

Es decir, la colocación de la rejilla tiene por objeto la admisión en el pozo de agua libre de arena y en cantidad elevada, con un mínimo de pérdida de carga. La rejilla es, sin lugar a dudas, el elemento más importante, en un pozo que extraiga agua de una formación poco o nada consolidada, en especial cuando se trata de arenas y gravas.

Lo ideal sería que la rejilla impidiera la penetración de las arenas acuíferas sin disminuir sensiblemente el caudal de agua que entra en el pozo. Pero desgraciadamente, muchos pozos tienen una baja eficiencia debido a una construcción inadecuada, que se traduce en un menor, incluso mucho menor, caudal específico (caudal de descenso de nivel de agua en el pozo).

Figura. 20 Rejilla en la formación del pozo.



3.3.9.1 Función de la rejilla.

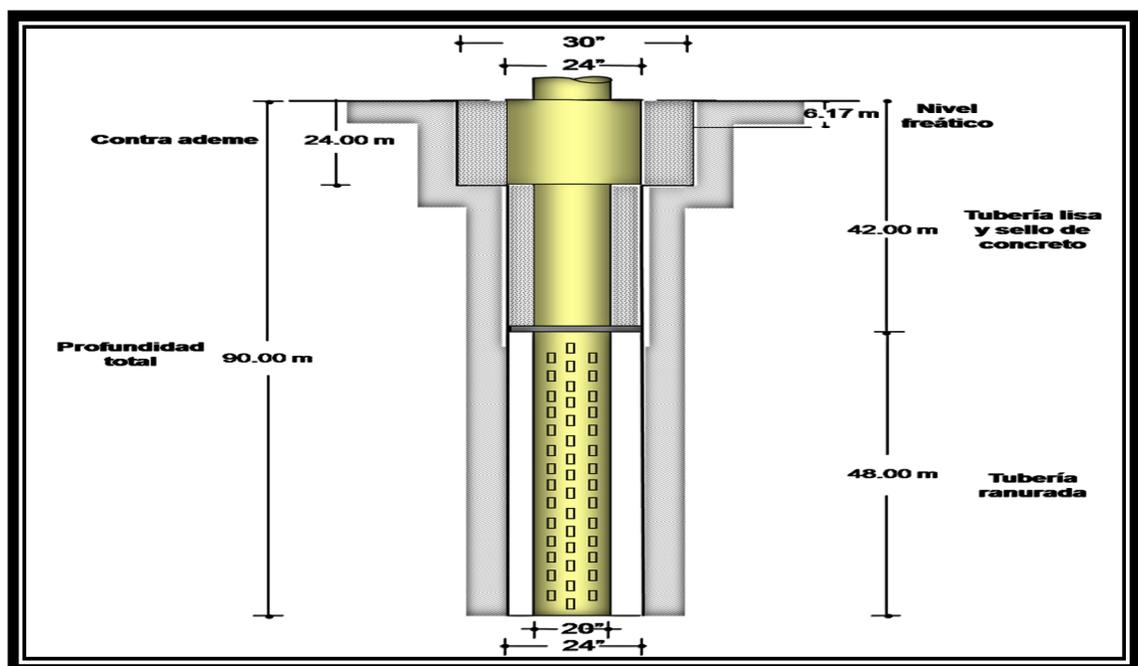
La colocación de la rejilla tiene por objeto la admisión en el pozo de agua libre de arena y en cantidad elevada, con un mínimo de pérdida de carga.

Actualmente se escogen las aberturas de rejilla para permitir que del 50 al 70% de la formación acuífera pueda pasar al pozo durante el desarrollo, y que del 30 al 50% de los granos de arena y grava queden retenidos.

Por ello se fabrican rejillas con aberturas de medidas distintas para adaptarlas a la granulometría de las arenas y gravas acuíferas. No obstante, es importante tener en cuenta que la medida y forma de las aberturas de la rejilla no pueden ser cualesquiera pues han de permitir que las operaciones de desarrollo del pozo logren su propósito.

Generalmente se tiende a considerar que un pozo bien construido es eficiente y está concluido en cuanto el agua que se bombea es limpia y no presenta granos de arena a simple vista. Sin embargo, para que el pozo sea realmente eficiente es necesario que el caudal específico sea el mayor posible sin bombear arena. Un tamaño inadecuado de las ranuras de la rejilla, un mal desarrollo, las incrustaciones y la entrada de arena son causas que contribuyen al mal funcionamiento de un pozo.

Con frecuencia se acepta un funcionamiento deficiente, con tal de que el pozo dé el caudal que se precisa. Pero esto termina ocasionando el gasto de sumas importantes de dinero a causa de un incremento de los costes de bombeo y de mantenimiento que se podrían evitar con el empleo de materiales y técnicas de construcción apropiados que mejoren el caudal específico y prolonguen la vida del pozo. En la Fig.21 se muestra un ejemplo de algunos elementos que componen un pozo.

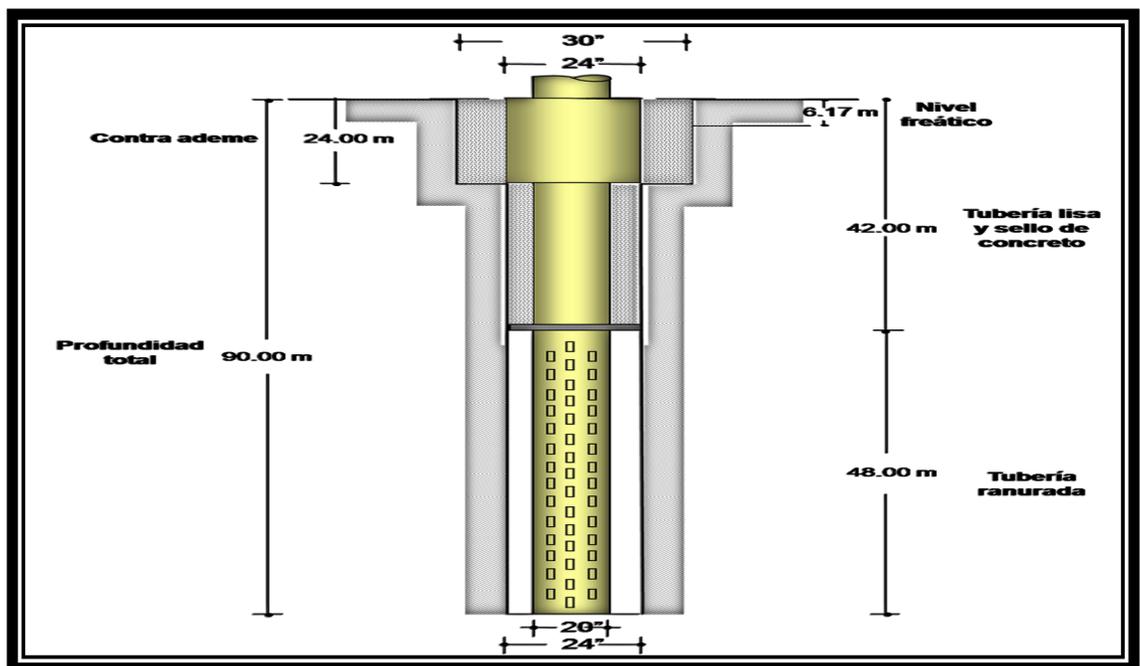


3.3.9.2 Características que debe reunir una rejilla.

Una rejilla ideal debe cumplir las siguientes características:

- ✓ La abertura de la rejilla debe estar diseñada de forma que evite la obstrucción por arena y grava. Esto se puede conseguir haciendo que el ancho de la ranura crezca hacia el interior.
- ✓ Proporcionar la cantidad máxima de área abierta sin sacrificar la resistencia necesaria.
- ✓ La distribución de las ranuras debe ser uniforme de manera que el flujo del agua hacia el pozo sea fácil y no tortuoso, y permita que el desarrollo logre sus fines.
- ✓ La rejilla debe estar construida de un solo metal, el cual debe ser resistente a la corrosión y a los ácidos utilizados para desincrustar.
- ✓ Debe ser resistente al paso del agua y no provocar incrustaciones.
- ✓ Debe ser fuertemente resistente al colapso y a la compresión.
- ✓ El precio debe ser razonablemente económico.

Figura 21. Componentes de un Pozo



3.3.10 Perfil litológico.

Un perfil litológico o columna litológica representa gráficamente la estratigrafía generalizada del pozo. Abajo se describen los estratos más profundos y arriba los estratos cercanos a la superficie.

3.3.11 Prueba de bombeo.

Una prueba de bombeo se efectúa con el objetivo de observar el comportamiento hidráulico del pozo.

La magnitud rendimiento y abatimiento tienen una aplicación directa para la selección de los elementos de un equipo permanente de bombeo que se ajuste a las características de operación del pozo.

Una prueba de bombeo realizada lo más exacta posible y ejecutada anticipada a la compra del equipo, está de sobre pagada por las economías que permite al seleccionar el equipo apropiado y por la reducción que logra en los costos de energía.

Muchas veces los excesivos costos de operación y el funcionamiento imperfecto de la bomba, se le involucra al pozo, cuando en realidad los errores provienen de la selección de una bomba que no se adapta a este.

Las pruebas revelan hechos importantes en cuanto al depósito de agua subterránea que no se puede establecer de ninguna otra manera.

Para la ejecución de una prueba de bombeo es necesario entender claramente el significado de los términos comunes que se emplean en está.

Nivel estático de agua: es el nivel a que el agua permanece dentro de un pozo cuando no se está extrayendo agua del acuífero por bombeo o descarga libre, generalmente se expresa como la distancia desde la superficie del terreno hasta el nivel de agua en el pozo. En el caso de un pozo surgente, el nivel estático está por encima de la superficie del terreno, este se podrá medir cuando se impida la salida de flujo natural.

Nivel de bombeo o nivel Dinámico: este es el nivel a que se encuentra el agua dentro del pozo, conforme avanza el bombeo. En el caso de los pozos surgentes, es el nivel con el cual el agua fluye desde el pozo.

Abatimiento: es el descenso que experimenta el nivel del agua cuando se está bombeando o cuando fluye de manera natural, no es más que la diferencia que existe entre el nivel estático y el nivel dinámico.

Abatimiento Residual: una vez que el bombeo se ha detenido, el nivel del agua comienza a ascender tratando de alcanzar el mismo nivel existente antes de empezar el bombeo. Durante este periodo de recuperación, la distancia a que el agua se halla por debajo del nivel estático inicial recibe el nombre de abatimiento residual.

Rendimiento del pozo: es el volumen de agua por unidad de tiempo que el pozo está descargando ya sea por bombeo o por flujo natural.

Capacidad específica: la capacidad específica de un pozo es igual a su descarga por unidad de abatimiento.

Objetivos de las pruebas:

1. Obtener información acerca del comportamiento y eficiencia del pozo mientras se bombea.
2. Seleccionar el equipo de bombeo.
3. Suministrar datos para calcular los parámetros hidráulicos del acuífero.

Métodos para medir la descarga de un pozo:

La verificación de la razón de descarga o caudal durante una prueba, necesita de un aditamento preciso para medir la descarga de la bomba y una manera de ajustarla para mantener esta lo más constante posible, a continuación se describirán algunos de los métodos más utilizados para la medida de la descarga de un pozo.

- Método volumétrico.

Es un método simple y exacto de determinar la descarga de la bomba, este consiste en observar el tiempo necesario para llenar un recipiente de volumen conocido.

$$Q = V/t \quad (\text{EC. 26})$$

Q= caudal en, galones /min

V= volumen en galones.

t: tiempo de llenado en, min.

- Medidor de flujo comercial.

Este método es más directo, consiste en una caratula que muestra el volumen total en metros cúbicos descargado a través del medidor, luego se substraen dos lecturas tomadas un minuto aparte, la diferencia entre el lapso de tiempo nos denota el caudal.

$$Q = (L_f - L_i)/t \quad (\text{EC. 27})$$

Donde:

Q= Caudal en m³/hr

L_f= Lectura final. (m³)

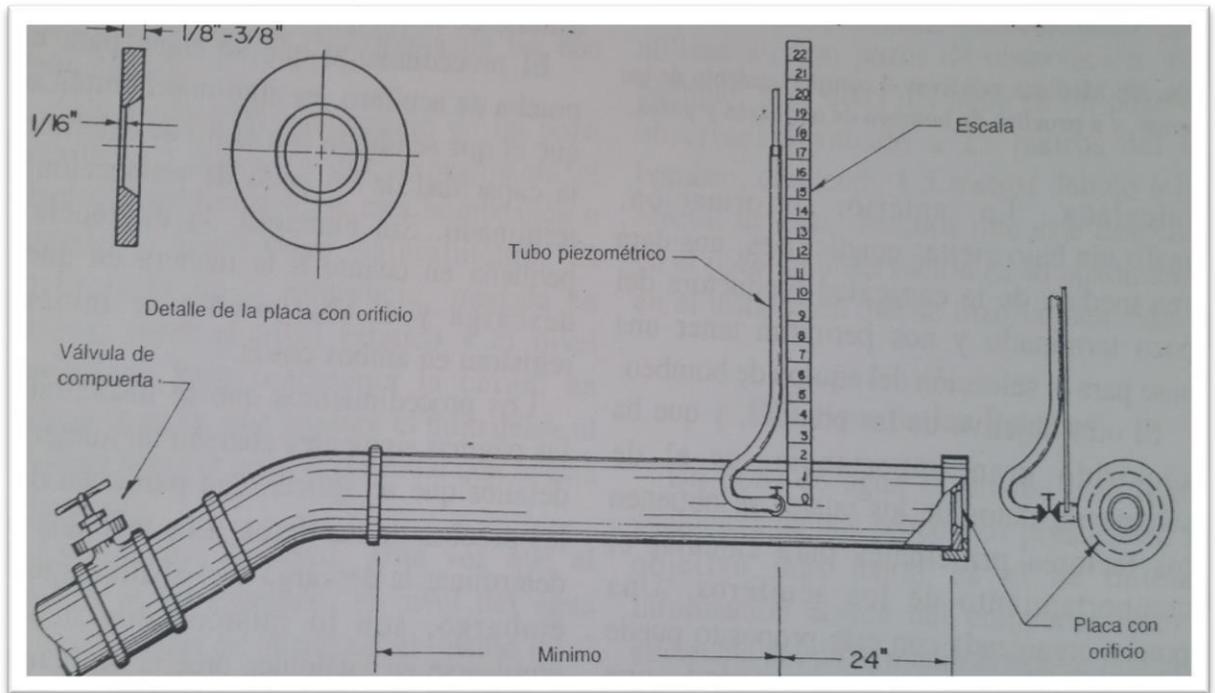
L_i= Lectura inicial.(m³)

T= Tiempo (hr)

- Vertedero de orificio Circular.

Es el instrumento más usado para medir la descarga de una bomba centrifuga o turbina. La fig. 22 muestra los detalles esenciales de la construcción y armado del instrumento.

Fig. 22 Detalles de construcción del Vertedero de orificio Circular.



El orificio consiste de una abertura perfectamente redonda situada en el centro de una placa circular de acero. El orificio debe tener bordes a escuadra definidos. La placa debe ser de un espesor de 1.6 mm. Alrededor de la circunferencia de la abertura. Esta placa deberá fijarse contra el extremo exterior de una tubería de descarga a nivel, de modo q el orificio quede centrado en esta. El extremo del tubo debe cortarse a escuadra, de modo que la placa quede en posición vertical. El interior de la tubería debe ser liso y encontrarse libre de cualquier obstrucción que pudiera causar turbulencia anormal. La tubería de descarga debe ser recta y a nivel en una distancia de por lo menos 1.80 metros hacia atrás de la placa de orificio. De ser posible esta conducción deberá ser más larga. A 0.60 metros exactamente de la placa de orificio, deberá perforarse el tubo con un agujero de 3.2 mm o 6.4 mm de diámetro, situado en un plano coincidente con el diámetro horizontal. Las rebabas internas que resulten de esta perforación deberán eliminarse completamente.

Para medir la carga de agua a presión dentro de la tubería de descarga, se fija a este orificio un aditamento especial. Este se denomina tubo piezométrico. Consiste de un tubo plástico o de hule de 1.20 a 1.50 metros de longitud, al cual se le agrega un tubo de vidrio en el extremo exterior. El otro extremo se conecta adecuadamente mediante accesorios de plomería a la perforación efectuada en el tubo de descarga. El niple que se enrosca a la perforación no debe proyectarse hacia adentro de este. El nivel de agua en el tubo piezométrico representa la presión existente en el tubo de descarga, cuando el agua fluye en el orificio de salida. Este nivel puede observarse en el tubo de vidrio, sosteniéndolo verticalmente a una altura justamente encima del punto al cual rebosaría.

Fijando a un soporte una escala graduada precisa, se puede leer la distancia en pulgadas desde el centro de la tubería de descarga hasta el nivel que el agua alcanza en el tubo piezómetro. Esta equivale a la carga de presión sobre el orificio. Para cualquier tamaño de orificio, el flujo o caudal a través de esta varía con la carga de presión medida de la manera anterior. Existen tablas estándar que denotan los valores de la descarga, para varias combinaciones de diámetros de orificio y de descarga.

El caudal a través del orificio se calcula mediante la fórmula:

$$Q = A * V * C \quad (\text{EC. 28})$$

Donde:

Q: es el flujo por unida de tiempo.

A: es el area del orificio.

C: es el coeficiente de descarga para el orificio.

La velocidad del agua conforme esta pasa a través del orificio, es la velocidad en el tubo de aproximación más la velocidad adicional creada por la caída de presión entre el punto en donde se mide la carga piezométrica y el punto en donde el agua descarga por el orificio. Puesto que el chorro descarga a presión atmosférica, toda la carga indicada por el tubo piezométrico se convierte en velocidad, haciendo caso omiso de la fricción en la tubería.

La velocidad puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$V = \sqrt{2gh} \quad (\text{EC. 29})$$

Donde:

V: es la velocidad en $\frac{m}{s}$

g: es la aceleración de la gravedad en m/s^2

h: es la caída de presión en metros de agua .

Para obtener el valor correcto de *V*, la velocidad real a través del orificio, el valor de *V* dado por la relación anterior, debe sumarse a la velocidad en el tubo de aproximación y a su vez, la suma debe corregirse mediante dos factores.

1. Una corrección es debida a la contracción del chorro que tiene lugar justamente afuera del orificio.
2. El súbito cambio de sección transversal del área de flujo y que está representado por el tamaño del orificio con relación al tamaño del tubo de aproximación.

Por conveniencia, la velocidad de aproximación y los factores de corrección pueden combinarse en un solo factor cuyo valor varía con la relación existente entre el diámetro del orificio y el diámetro de la descarga. Tal como se muestra en la figura 23.

Combinando las relaciones anteriores y llamando *K* al factor de descarga, tendremos la fórmula para la descarga a través del orificio.

$$Q = KA\sqrt{2gh} \quad (\text{EC. 30})$$

La raíz cuadrada de $2g$ es 9.8 m/s^2 de modo q la formula puede escribirse:

$$Q = 4.43KA\sqrt{h} \quad (\text{EC. 31})$$

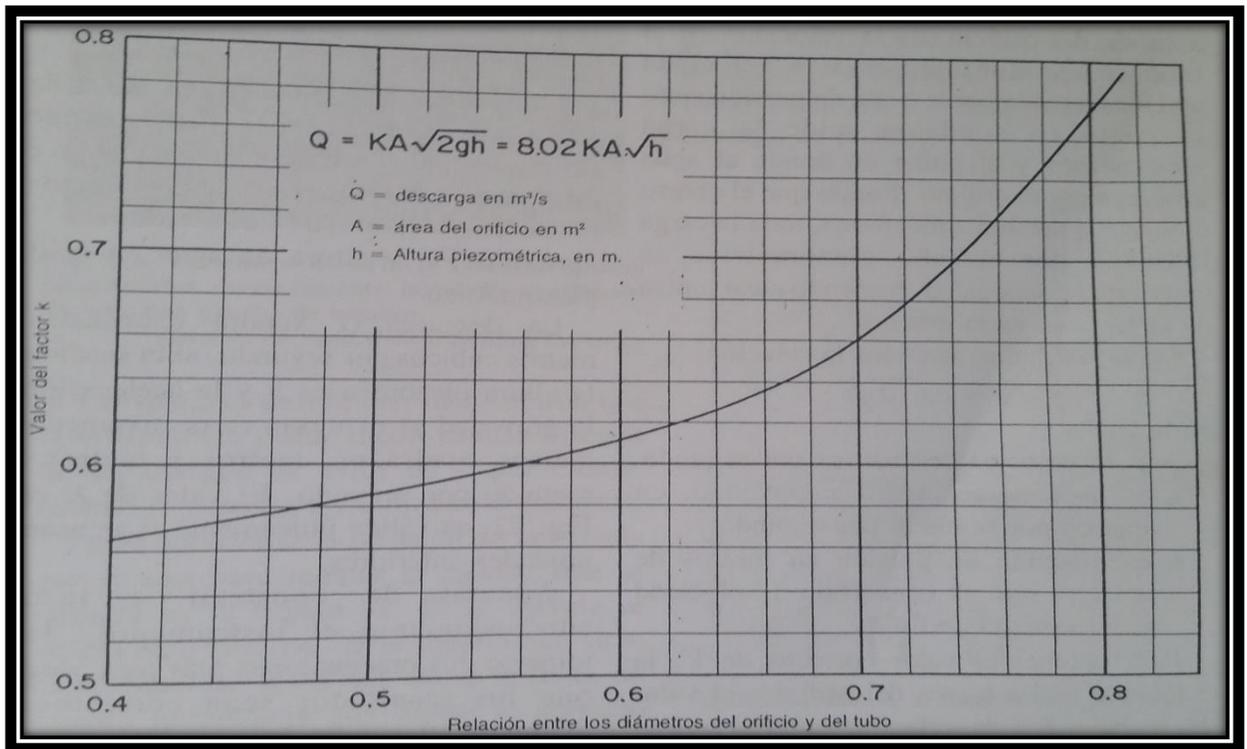
Los valores de *K* pueden obtenerse de la Fig. 23. Y la formula puede utilizarse para calcular la descarga con cualquier combinación de diámetro de orificio, diámetro de tubería de aproximación y altura de agua en el tubo piezométrico.

La descarga Q vendrá expresada en m^3/s , si la sección A , la altura piezométrica h y la aceleración de la gravedad se expresan en m^2 , m/s^2 .

Al instalarse adecuadamente el instrumento, deben tomarse dos precauciones mas para asegurar q los resultados sean correctos.

1. El diámetro de orificio debe ser menor 0.8 del diámetro interior del tubo de aproximación.
2. El tubo piezométrico debe estar completamente libre de obstrucciones y de burbujas de aire cuando se efectuó la medición.

Fig. 23. Valores del factor de descarga k .



- Estimación de la descarga en tubos abiertos.

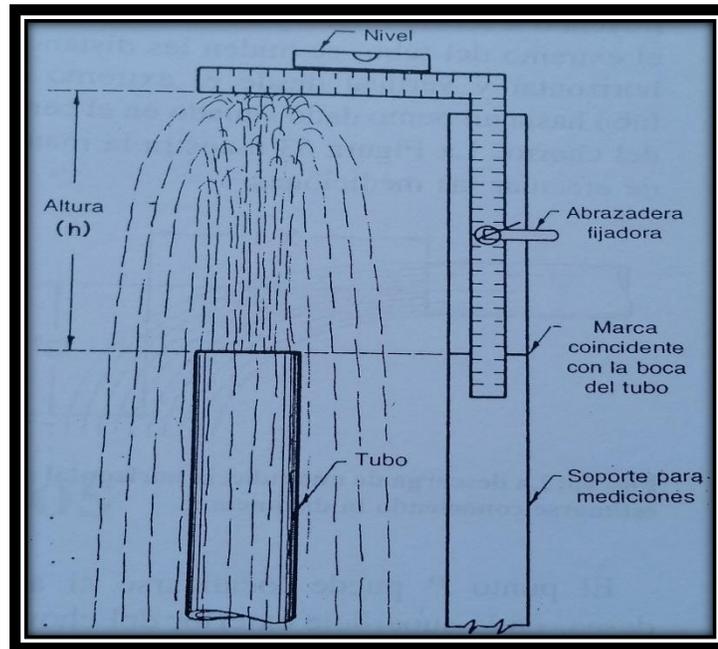
Las dimensiones de un chorro de agua que fluya en un tubo abierto, sea este vertical u horizontal, pueden utilizarse para un cálculo grosso modo de la descarga.

El diámetro de la tubería y la altura por la cual se eleve el agua sobre esta son los elementos que definen el flujo ascendente de un tubo vertical. F.E. Lawrence y P.L. de la universidad de Cornell, han investigado la descarga en tubos verticales y sus resultados fueron publicados en 1906.

Estos investigadores descubrieron que existen dos tipos de flujo que deben considerarse al estimar la descarga de tubos verticales. Cuando la altura del agua sobre el borde del extremo abierto del tubo es menor que cierto valor crítico, la descarga se asemeja a la que se produce en un vertedero. Cuando la altura de la lámina de agua sobrepasa otro valor crítico, el flujo es del tipo de descarga a chorro. Las descargas comprendidas entre estos dos valores límite, guardan una relación errática con respecto a la altura del agua. La figura 24, indica la manera en que debe medirse la altura de la cresta cuando prevalece el flujo a chorro, el flujo debe ser permanentemente constante de manera tal que la altura h no varíe apreciablemente.

El mejor procedimiento es el de promediar varias medidas. La Tabla 5 suministra las descargas para varios valores de la altura de la cresta sobre el borde del tubo. Los valores corresponden a tubería estándar de acero de los tamaños indicados y de superficie interior lisa. Este método puede utilizarse para estimar la descarga proveniente de un pozo artesiano surgente o de un pozo bombeado en el cual el tubo de descarga pueda volverse hacia arriba.

Fig. 24 Medición de altura de la cresta en descarga de una tubería vertical.



3.3.12 Estación de bombeo

Antes de determinar el tamaño de un sistema de bombeo de agua, es necesario entender los conceptos básicos que describen las condiciones hidráulicas de una obra. Como se mencionó anteriormente, el tamaño del sistema está en relación directa con el producto de la carga dinámica total (CDT) y el volumen diario necesario.

Este producto se conoce como ciclo hidráulico. La carga dinámica total es la suma de la carga estática (CE) y la carga dinámica (CD):

$$CDT = CE + CD = \text{Nivel estático} + \text{abatimiento} + \text{altura de la descarga} + \text{fricción}$$

Tabla 5. Descarga en tubos verticales (m³/min)

Altura de la cresta.	Altura de la cresta.	Diámetro Nominal del Tubo					
		2"-50.8 mm	3"-76.2 mm	4"-101.6 mm	5"-127 mm	6"-152.4 mm	8"-203.2 mm
38	1.5	0.083	0.163	0.257	0.322	0.416	0.606
51	2.0	0.098	0.208	0.352	0.454	0.606	0.871
76	3.0	0.125	0.28	0.492	0.7	0.926	1.457
102	4.0	0.144	0.333	0.587	0.871	1.211	1.978
127	5.0	0.167	0.375	0.662	1.022	1.438	2.385
152	6.0	0.182	0.416	0.719	1.136	1.628	2.763
203	8.0	0.212	0.473	0.852	1.363	1.93	3.407
254	10.0	0.235	0.53	0.965	1.514	2.195	3.974
305	12.0	0.261	0.606	1.06	1.665	2.422	4.353
381	15.0	0.295	0.662	1.192	1.893	2.65	4.921
457	18.0	0.322	0.738	1.325	1.908	2.952	5.299
523	20.6	0.352	0.795	1.438	2.251	3.217	5.867
609	24.0	0.379	0.879	1.514	2.422	3.482	6.245

3.3.13 Carga estática

La primera parte la carga estática, puede obtenerse con mediciones directas. Se trata de la distancia vertical que el agua se desplaza desde el nivel de abatimiento del pozo hasta la altura que se descarga el agua. La carga estática es entonces la suma del abatimiento, el nivel estático y la altura de descarga. Todos los pozos experimentan el fenómeno de abatimiento cuando se bombea agua.

3.3.14 Carga dinámica (Fricción)

La carga dinámica, es el incremento en la presión causado por la resistencia al flujo al agua debido a la rugosidad de las tuberías y componentes como codos y válvulas. Esta rugosidad depende del material usado en la fabricación de las tuberías. Los tubos de acero producen una fricción diferente a la de los tubos de plásticos PVC de similar tamaño. Además, el diámetro de los tubos influye en la fricción mientras más estrechos mayor resistencia producida.

Para calcular la carga dinámica, es necesario encontrar la distancia que recorre el agua desde el punto en que el agua entra a la bomba hasta el punto de descarga, incluyendo las distancias horizontales, así como el material de la línea de conducción y su diámetro.

3.3.15 Sello sanitario.

El objetivo de un sellado apropiado es remplazar el material nativo removido durante la perforación con un producto que satisfaga o supere la capacidad del material nativo removido. Un pozo provee un conducto para que los contaminantes se trasladen desde la superficie hacia el subsuelo.

El sello sanitario consiste en una argamasa impermeable que se coloca en el espacio anular existente entre el terreno perforado y el tubo del pozo, desde la superficie del terreno hasta una profundidad que no interfiera con la captación de agua, evitando así el paso de las sustancias peligrosas. La argamasa es una mezcla de materiales que después de colocada se endurece y permanece. Una muy efectiva consiste en arcilla, que por su impermeabilidad impide el pasaje de sustancias, bentonita que le

otorga flexibilidad a la mezcla, y cal que actúa como bactericida. Otra argamasa muy utilizada para sello sanitario se realiza con cemento. De este modo, no sólo se evita el ingreso de contaminantes desde la superficie del terreno sino desde otros estratos acuíferos que contengan agua de calidad no deseada.

3.4 Diseño de Pozos de Agua.

3.4.1 METODOS DE PERFORACION DE POZOS

En la actualidad la sociedad se pregunta cuáles de los métodos de perforación es el mejor y más eficiente, en cuanto a esta pregunta no existe una respuesta clara y concisa, ya que cada método tiene sus ventajas y desventajas con respecto a factores de costos, construcción, características de las formaciones que deben atravesarse, diámetro y profundidad de este, los métodos de perforación son tan numerosos que en este documento no se presentan todos, por tal razón solo describimos sus principios fundamentales y algunas de sus aplicaciones.

Cabe mencionar que las condiciones geológicas son las que estipulan el método de perforación e imponen dos tipos de perforaciones:

Un pozo que penetre una formación de roca consolidada: consiste básicamente en una porción ademada, que usualmente se extiende a través de los materiales sueltos sobre yacientes y de un agujero abierto sobre la roca inferior.

Un pozo que intercepte un acuífero de arena: este debe dotarse de un ademe en el intervalo correspondiente a los materiales sueltos y de una rejilla en el tramo correspondiente al acuífero.

3.4.1.1 Método de percusión.

La perforación de percusión con herramientas de cable es un método muy antiguo ya que se le usaba hace más de 1000 años en china. Básicamente el método no ha cambiado, pero se han mejorado enormemente las herramientas. Es adecuado para la perforación tanto de excavaciones pequeñas como de excavaciones grandes,

a profundidades de hasta 300-500 m. La perforación por percusión de cable usa un equipo relativamente barato. Su mayor desventaja está en que es un método muy lento. Esto constituye una limitación en su uso en países en desarrollo, en donde a menudo se necesita perforar un gran número de pozos lo más rápido posible.

El método de percusión consiste en levantar y dejar caer una pesada sarta de herramientas dentro del agujero que se va abriendo el barreno fractura o desmorona la roca dura y la convierte en pequeños fragmentos. Cuando se está perforando en formaciones suaves no consolidadas el barreno afloja el material, la acción de vaivén de las herramientas mezclan con aguas las partículas fracturadas y desprendidas formando así un lodo, cuando esta agua no se encuentra mientras se sigue la perforación es agregada de manera externa, por los perforadores. El lodo resultante debe ser extraído por una bomba de arena o de una cuchara, el problema de acumular mucho lodo en la perforación es que este amortigua el golpe de las herramientas en el lodo por lo cual debe ser extraído constantemente.

Una sarta completa se halla compuesta por los siguientes elementos:

1. Barreno.
2. Barra de peso.
3. Las tijeras de perforar.
4. Porta cable giratorio.

La barra le imprime un peso adicional al barreno y el efecto de su longitud ayuda a mantener un agujero recto cuando se perfora en roca dura. Las tijeras consisten en un par de barras de acero articuladas. Cuando se está perforando en aquellos materiales en los que el barreno esta propenso a quedar aprisionado, se utilizan las tijeras para aflojar las herramientas.

El porta cable giratorio es el que establece la conexión de las herramientas al cable, su peso suministra parte de la energía de los golpes ascendentes dados por las tijeras cuando se necesita usar estas, también permite que las herramientas giren ligeramente con respecto al cable.

Los elementos de la sarta de herramientas se acoplan entre sí mediante extremos roscados de la designación API. (American Petroleum Institute). El cable de alambre que soporta las herramientas de perforar se denomina comúnmente "línea de perforar" su dimensión varía por lo general 5/8"-1" de diámetro y su torcido es en sentido izquierdo. La línea de perforar se hace pasar sobre una polea de coronamiento que se halla sostenida en la corona de la torre. La cuchara está formada por un tramo de tubo con una válvula de retención en el fondo, el extremo superior de esta herramienta provee de un medio para suspenderla de un cable que corrientemente se denomina línea de arena.

La bomba de arena es una cuchara dotada de un embolo, el cual, al desplazarse hacia arriba provoca un vacío que abre la válvula y succiona el lodo, haciéndolo penetrar al tubo. La línea de arena se hace pasar por sobre una polea separada, en la cumbre de la torre y luego desciende hasta su tambor de arrollado.

La acción de subir y bajar es impartida a las herramientas de perforar y el cable correspondiente, por un brazo excéntrico. Este brazo excéntrico pivotea en uno de sus extremos. El extremo exterior que lleva una polea por la que pasa el cable de perforación, se mueve hacia arriba y hacia abajo mediante la acción de una excéntrica sencilla o doble, la cual se halla conectada al brazo del cigüeñal. El brazo del cigüeñal está movido por un piñón de engranajes montado en un freno de fricción. Este freno como también el de la línea de arena y el piñón del tambor del cable de perforar, se hallan todos montados en el mismo contraeje.

El desplazamiento vertical del brazo del cigüeñal y el de las herramientas, puede hacerse variar ajustando la posición del eje de la excéntrica en el piñón de aquel, en esta forma, se puede cambiar el número de golpes por minutos con solo hacer variar la velocidad del eje.

El tercer tambor de arrollado, llamado el tambor de ademado, viene por lo general incorporado a la máquina de perforación, este es capaz de ejercer una tensión poderosa sobre un tercer cable, el de ademado. Este se utiliza para manipular tubería, herramientas y bombas o también para otras pesadas labores de izado. En

estos casos, bien podría necesitarse reforzar estructuralmente la torre. Otro implemento de izar que a menudo se suministra con el equipo de perforación, es un cabrestante pequeño. Para utilizarlo se necesita una cuerda guiada por una polea separada, colocada a su vez en la cumbre de la torre. Esta línea se utiliza para manipular cargas livianas o para levantar o dejar caer herramientas. Para esto se arrollan al cabrestante unas dos o tres vueltas flojas del extremo libre de la cuerda. Cuando aquel está girando, el perforador toma el extremo libre de la cuerda con su mano y da un ligero tirón, haciendo con ello que las vueltas del arrollado se atiranten y traten de frenar el cabrestante.

3.4.1.2 Método Californiano.

Utiliza los mismos principios de operación del método por percusión, con la excepción de tres aspectos.

1. Una pesada cuchara denominada cucharón de lodo se utiliza como barreno y como cuchara.
2. En lugar de tubería estándar de acero se usan como ademe tubos cortos de acero laminado.
3. Se emplean a su vez gatas hidráulicas para introducir el ademe, en vez de emplear las herramientas para producir el impacto necesario.

El procedimiento que se sigue al perforar un pozo, consiste en excavar un foso para acomodar las gatas hidráulicas, los anclajes de estas y la tubería de iniciación. En el centro y fondo de este foso se colocan en posición un tramo de 3m de tuberías, en el fondo se tienden unos travesaños o muertos de madera o acero, a los cuales se fijan las gatas, por lo general se emplean gatas de 20 cm con desplazamiento de 1.20-1.50m.

3.4.1.3 Método de Rotación.

En este sistema se realiza la perforación mediante una barrena o trepano giratorio llamado tricono, desgastadora y trituradora que muele o rompe la formación mientras que el material cortado y el suelo aflojado son retirados de la perforación mediante

una circulación continua de fluido de lavado. La perforación rotatoria es particularmente adecuada en formaciones de terreno suelto y de roca suave. Se puede hacer perforaciones de gran diámetro a profundidad considerable la más grande desventaja es la necesidad de utilizar cantidades considerables de agua lo que puede ser un problema muy grave en zonas donde es muy escasa, el fluido usualmente basado en arcilla es mezclado en una poza o tanque y es bombeado a presión elevada través de una manguera flexible hasta la parte superior de una columna giratoria de herramientas llamada “columna de perforación”.

3.4.1.4 Perforación por tubos Hidráulicos.

En lugares donde existe la necesidad de perforar pozos relativamente poco profundos con diámetros en formaciones sueltas de grava, arena, cantos rodados o formaciones similares de suelo, se puede considerar la aplicación de un dispositivo excavador mediante tubos hidráulicos en conjunción con equipo o grúa. En este método se hunde manualmente un tubo guía corto en el suelo y dentro de él se hace descender la primera de una columna de tubos permanentes. El extremo inferior de la columna es dentado y los tubos son fresados perforados o ranurados según se requiera.

Se coloca una araña hidráulicamente engrapada en el tubo, apoyada en dos cilindros verticales, a una distancia corta sobre el nivel del suelo. Se adhiere dos arietes hidráulicos horizontales e dos orejas diametricamente opuestas en la araña y se les usa para impartir una torsión muy suave pero poderosa a la columna del tubo. Al mismo tiempo, los dos cilindros verticales controlan la alimentación descendente y aplican presión si se requiere. Se puede hacer descender tubos de 450mm-1.2m hasta 30m o más bajo las condiciones correctas, la ventaja de este sistema es que no hay necesidad de tubos temporales ni de grandes lagunas, tampoco hay contaminación del acuífero por fluidos de perforación.

3.4.1.5 Perforación por taladro

La perforación por taladro de diámetro grande apareció hace 75 años. Los pozos más profundos registrados estuvieron entre 100-110m. Se hacía descender los taladros hasta que llegaba a una formación de socavado, después de la cual se usaba una “zapata” de hierro o acero con mampostería en la parte superior, para hacer un espacio libre para añadir más mampostera a nivel del suelo.

Vale la pena considerar la perforación con taladro en caso en que se tiene que hacer un número de perforaciones a través de una sobrecarga de arcilla firme sobre un estrato más aceptable a las técnicas usuales.

En tal caso un taladro puede producir una perforación en 15 minutos, lo que le tomaría a un equipo normal de perforación hasta un día y medio. Esencialmente, se hace rotar una cubeta de taladro en el suelo en el extremo de una larga barra cuadrada rotatoria y se le retira frecuentemente para vaciarla.

Aunque la perforación por taladro discutida en esta sección es mayormente del tipo impulsada por energía mecánica, se debe recordar que la perforación por taladro a poca profundidad y de diámetro inferiores a los 20 mm se ha realizado exitosamente usando únicamente la energía humana.

3.4.2 Diámetro del pozo.

Elegir el diámetro del pozo es de mucha importancia ya que esto afecta significativamente el costo de la obra.

El diámetro debe escogerse de modo que satisfaga los siguientes requisitos.

- ✓ El ademe debe ser lo suficiente mente amplio para que permita poder acomodar la bomba con la tolerancia adecuada para su instalación y correcto funcionamiento.
- ✓ El diámetro del intervalo de captación del pozo debe ser tal que garantice una buena eficiencia del mismo.

- ✓ El diámetro del ademe debe ser de dos números mayor que el diámetro nominal de la bomba. No se debe escoger un diámetro menor de por lo menos un número más grande que los tazones de la bomba. La Tabla 3 muestra los tamaños de ademe que se recomiendan para diversos rangos de rendimiento o caudal de bombeo.

Tabla3.Tamaño de ademe recomendados

Producción Prevista del pozo (m ³ /min)	Diámetro Nominal de los Tazones de la bomba (cm)	Diámetro Optimo del Ademe del Pozo en (cm)	Mínimo Diámetro de Ademe en (cm)
Menos que 0.4	10	15.0 ID	12.5 ID
0.3 – 0.7	12.5	20.0 ID	15.0 ID
0.6 – 1.5	15	25.0 ID	20.0 ID
1.3 – 2.5	20	30.0 ID	25.0 ID
2.3 – 3.4	25	35.0 OD	30.0 ID
3.2 – 5.0	30	40.0 OD	35.0 OD
4.5 – 6.8	35	50.0 OD	40.0 OD
6.0 – 12.0	40	60.0 OD	50.0 OD

ID= Diámetro interior OD= Diámetro Exterior

3.4.2.1 Diámetros Recomendados de Pozos.

Si la elección del tamaño del ademe se escoge de acuerdo a esta tabla, existirá un margen adecuado para la instalación de la turbina vertical, el eje de la misma constituirá la plomada y no se forzara la bomba, aunque el ademe se halle ligeramente fuera de línea y no exactamente a plomo.

3.4.3 Profundidad del pozo

La profundidad que deba ser alcanzada por un pozo vertical viene definida por las características de la formación a explotar. La información para determinar la profundidad a prever, se obtiene de estudios geológicos, datos de sondeos mecánicos de reconocimiento, datos de investigaciones geofísicas, de otros pozos anteriores.

Generalmente el pozo se termina en el fondo del acuífero por las dos razones siguientes:

- ✓ Se utiliza mayor espesor del acuífero como intervalo de captación del pozo, lo que mejora su capacidad específica.
- ✓ Puede obtenerse mayor abatimiento disponible, permitiendo al pozo erogar más caudal.

Existen dos excepciones de estas reglas:

1. cuando la ubicación de la rejilla está comprendida entre la parte superior e inferior del acuífero.
2. cuando encontramos agua de mala calidad en la parte inferior del acuífero, en este caso el pozo deberá completarse hasta una profundidad donde no exista este tipo de agua y obtener así la mejor calidad que se encuentre disponible.

Si se perfora en un acuífero libre se deberá considerar el interés de alcanzar su parte impermeable, salvo que los caudales deseados, los condicionamientos económicos del pozo o una profundidad excesiva de dicho estrato hagan aceptable una solución

de pozo parcialmente penetrante. Si se perfora sobre un acuífero confinado, y salvo excepciones, razones de hidráulica subterránea aconsejan la penetración completa de aquel.

3.4.4 Selección de la rejilla.

3.4.4.1 Longitud de la Rejilla

La zona de admisión de agua al pozo constituye la parte esencial del mismo. En ocasiones esta zona no se entuba, aunque lo más frecuente es que sí se disponga un revestimiento en ella. El revestimiento del tramo de entrada del agua al pozo se le denomina rejilla. Una rejilla bien proyectada debe permitir que pase al pozo agua limpia de materiales sólidos y con una pérdida de carga compatible con las demás exigencias de aquel.

Se pueden colocar diversos tipos de rejilla. Las más sencillas consisten en disponer simples ranuras sobre la misma tubería de revestimiento. Las más perfeccionadas son las ranuras continuas. Para definir adecuadamente la rejilla en el proyecto de un pozo, se debe considerar la longitud, el tamaño de la ranura, el diámetro y la resistencia.

La longitud óptima de una rejilla es función de la geometría y parámetros hidrológicos del nivel del acuífero a explotar. Depende del espesor y estratificación de este último y del posible descenso dinámico del agua en el mismo. Inicialmente, la rejilla debe tener la mayor longitud posible, pero sin que llegue a ser un obstáculo para el descenso del nivel dinámico del agua en el pozo.

En acuíferos libres, homogéneos y de espesor importante, la rejilla se situará en la parte inferior de la zona saturada y cubriendo 1/2 a 1/3 de la misma. En acuíferos cautivos, en cambio, es aconsejable colocar la rejilla sobre el 70% u 80% del espesor de la capa, con rejilla única centrada o con varios tramos repartidos de modo uniforme sobre la misma.

Sólo en formaciones coherentes donde exista la posibilidad de que se produzca pérdida de carga en la entrada del agua será necesario definir el tamaño y forma de

las ranuras y a su vez, el diámetro de la rejilla (en función del área abierta que aquellas condicionen, de la longitud de la rejilla ya establecida y del caudal de bombeo que se espere o se desee).

En acuífero de materiales incoherentes habrá que atender, además, a la circunstancia de que el agua que se extraiga no arrastre arenas. Para diseñar adecuadamente una rejilla deben realizarse análisis granulométricos sobre muestras representativas del material acuífero, tomadas al perforar el pozo o en un sondeo de reconocimiento previo al mismo. El tamaño de abertura se elige según los resultados de tales análisis y según se disponga o no de un macizo de grava.

3.4.4.2 Tamaño de las aberturas.

La selección óptima del tamaño adecuado de la ranura sólo podrá efectuarse cuando se obtengan las curvas de los análisis granulométricos de las muestras representativas de la formación en donde para cada muestra se plotea una curva granulométrica. Esta selección es de vital importancia si se quiere obtener la mayor eficiencia posible, ya que la relación entre el tamaño de la ranura y el tamaño de los granos de arena tiene gran influencia sobre el desarrollo de la formación alrededor de la rejilla.

La experiencia ha demostrado que en el caso de los pozos sin relleno de gravas debe seleccionarse un tamaño de ranura que retenga del 30 al 50% de la arena. Si se trata de capas estratificadas, la rejilla necesita aberturas de ranura que se ajusten a la granulometría de las distintas capas o diseñadas en función de la capa de material más fino, si las granulometrías de esas capas son semejantes.

En materiales muy homométricos, la elección de la rejilla deberá ser muy cuidadosa, pues una abertura excesiva puede llevar a una continua penetración de arena. Si fuera necesario colocar un relleno de grava artificial, las aberturas de las ranuras deben estar de acuerdo con el tamaño de la grava que se emplee. Se recomiendan aberturas que retengan al menos el 90% del material de relleno.

El diseñador de pozos deberá siempre diseñar la rejilla para que se ajuste a las condiciones acuíferas del pozo ya que no implica ningún costo adicional el empleo de una rejilla de múltiples tamaños de abertura.

Si utilizamos las aberturas apropiadas para que se ajusten a cada estrato, se obtendrán la máxima capacidad específica posible reducirían grandemente las posibilidades de invasión de arena al bombear el pozo.

Tabla 4. Elección de las Aberturas de las Rejillas.

Profundidad (m)	Espesor (m)	Tamaño Efectivo (mm)	Cuadrado del Tamaño Efectivo (mm ²)	Aberturas Posibles de Rejillas mm 40 % de		
				Mínima	Retención	Máxima
30 – 35	4.6	0.254	0.065	0.71	0.76	0.76
35 – 38	3	0.66	0.436	1.73	2.03	2.41

3.4.4.3 Diámetro de la Rejilla

El rendimiento de un pozo aumenta con el aumento del diámetro de la rejilla, aunque el aumento del rendimiento no es proporcional al aumento del diámetro. El aumento del rendimiento se produce de forma lenta, por lo que el diámetro de la rejilla ha de considerarse de forma cuidadosa.

Como regla general, en los acuíferos de poco espesor es recomendable colocar una rejilla de mayor diámetro. Si la formación acuífera tiene un importante espesor y se puede utilizar una rejilla larga, el pozo funcionará de forma eficiente con un diámetro de rejilla pequeño.

En este caso, el rendimiento del pozo aumentará más al incrementarse la longitud de la rejilla que al ensancharse el diámetro de la misma. La garantía de buen funcionamiento de un pozo se basa en la selección adecuada del diámetro de la rejilla para obtener una velocidad de admisión igual o inferior a 3 cm/seg, ya que velocidades superiores pueden provocar incrustaciones en la rejilla con un agua con alto contenido en sales disueltas, disminuir el caudal y aumentar las pérdidas de carga por fricción en la entrada de agua al pozo. Las pruebas de laboratorio y la experiencia de campo demuestran que si la velocidad de entrada del agua a través de la rejilla es de un valor igual o menor a 3 cm/seg se obtendrán los siguientes resultados.

- ✓ Las pérdidas por fricción en las aberturas de las rejillas serán de un valor despreciable.
- ✓ La velocidad de incrustación será mínima
- ✓ La velocidad de corrosión será mínima.

La velocidad de admisión se calcula dividiendo el caudal previsto del pozo por la cantidad total de área abierta de la rejilla. Si el resultado es mayor de 3 cm/seg se debe aumentar el diámetro de la rejilla para proporcionar suficiente área abierta y la velocidad se aproxime al valor indicado. El diámetro de la rejilla deberá ser tan grande como se pueda, para así mantener el valor de la velocidad de entrada definitivamente por debajo del valor del límite de 3 cm/seg. La mayor parte de los fabricantes de rejillas suministran tablas que indican el área abierta por tamaño de esta, para diversos anchos de ranura.

Tabla 4. Áreas Abiertas de Rejillas Johnson del tipo Telescopio.

Diámetro de la Rejilla (pulg)	Área de Captación Por Pie Lineal de Captación (Pulg ²)						
	Abertura No. 10	Abertura No. 20	Abertura No. 40	Abertura No. 60	Abertura No. 80	Abertura No. 100	Abertura No. 150
3	10	19	32	42	43	55	65
4	14	26	44	57	58	74	88
5	18	33	55	72	73	94	112
6	21	39	65	85	87	111	132
8	28	51	87	113	116	131	160
10	36	65	110	143	147	166	203
12	42	77	130	170	174	180	223
14 OD	38	71	123	163	177	198	251
15 OD	39	76	132	175	190	217	268
16 OD	35	69	123	164	171	198	250
18 OD	39	78	139	186	193	224	283
20 OD	47	88	156	209	218	252	318
24 OD	46	87	158	217	266	307	389
26 OD	49	91	166	227	278	321	406
30 OD	57	108	192	268	239	379	480
36 OD	65	124	224	307	376	434	550

3.4.4.4 Selección del material componente de la Rejilla.

Un metal adecuado para la rejilla depende de 3 factores:

1. La composición química del agua:
2. La presencia de limos bacterianos.
3. Las necesidades de resistencia de la Rejilla.

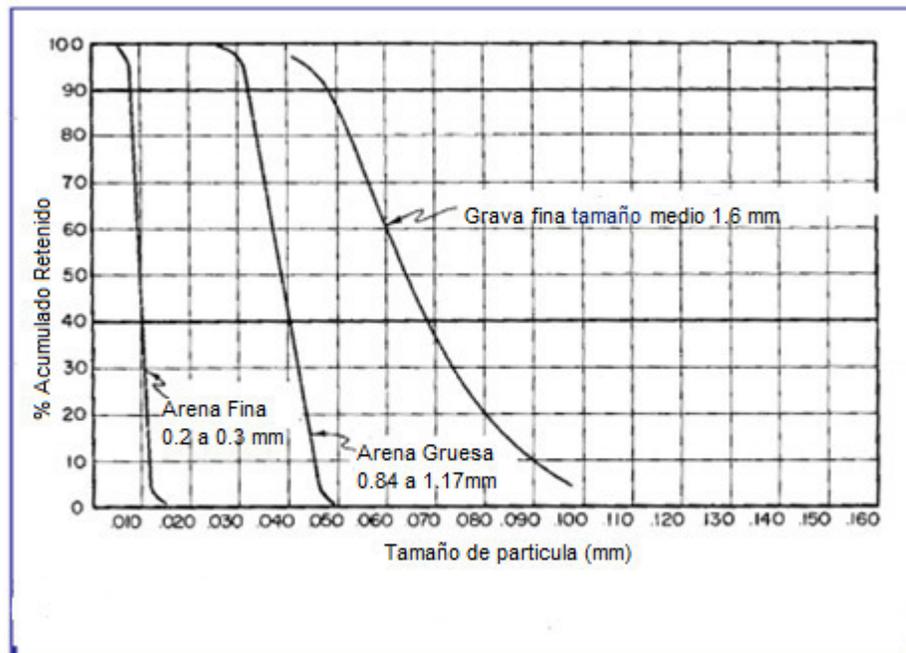
Las aguas subterráneas varían mucho en naturaleza y comportamiento. Algunas son blandas (agua de lluvia), otras duras (contenidos en sales de Ca y Mg en disolución). Las aguas blandas tienden a ser corrosivas atacando los metales y disolviéndolos lentamente.

Las aguas duras tienden a depositar carbonatos de calcio en la superficie de la rejilla y en los poros de la formación de los alrededores de la rejilla (incrustación). Pero además, existen ciertos tipos de aguas que son a la vez corrosivas e incrustantes. Otros contienen ferrobacterias que producen un limo de hierro en el agua que obstruye rápidamente los pozos.

3.4.4.5 Diseño de filtros de grava

El tradicional método de diseñar un empaque en base a muestras de las formaciones es teóricamente correcto y funciona perfectamente bien en un laboratorio donde se trazan curvas granulométricas para su análisis. Ver Fig. 8,

Fig.8 Curvas Granulométrica para el Diseño de Filtros de Grava.



CAPITULO IV: DISEÑO METODOLOGICO.

4.1 Clasificación de la investigación

En el trabajo monográfico el tipo de investigación que se aplicó fue de carácter descriptivo, ya que el desarrollo del tema estuvo enmarcado en la descripción detallada de las etapas de desarrollo del diseño del pozo. Para la realización de este documento se llevó un orden lógico descrito a continuación:

La información recopilada, procesada y analizada, tuvo relación con la geología, hidrología e hidrogeología, la cual sirvió para el diseño del pozo.

Se realizaron visitas de campo para la obtención de datos para complementar la información obtenida de la bibliografía, proyectos y base de datos existentes.

4.2 PERFORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ÁREA DEL POZO.

4.2.1 Perforación.

La elección del método de perforación se basó en antecedentes hidrogeológicos de la zona, tomando en cuenta las perforaciones existentes en los alrededores de las fincas productivas del Ingenio San Antonio.

La perforación se realizó mediante el método de percusión el cual es uno de los métodos más usados por la empresa, se eligió teniendo en cuenta la eficacia de este, así como el hecho de que la obra fue proyectada con el tiempo suficiente por lo largo del método, generando un ahorro económico en la perforación sin sacrificar eficiencia.

4.2.2 Descripción del perfil litológico.

El perfil litológico se obtuvo a través de la perforación, con la cual registramos la estratigrafía de la formación geológica.

El método empleado fue el de simple inspección o de tacto el cual consistió en recolectar muestras obtenidas de la perforación en intervalos de penetración del suelo de 5 a 10 pies, por inspección visual y tacto se definió su textura y color.

Describiendo de esta manera la estratigrafía y composición geológica de la formación de la unidad acuífera.

4.2.3 Porosidad.

La porosidad se determinó en dependencia de las propiedades la formación acuífera, las cuales fueron observadas a través del perfil litológico de la cual obtuvimos la información necesaria para determinar la porosidad existente.

4.2.4 Espesor del acuífero (m).

Se determinó mediante el perfil litológico, que se fue registrando a medida que aumentaba la perforación, conociendo el nivel estático del agua y conociendo la profundidad del fondo del pozo donde encontramos la roca sana, podemos determinar mediante una simple ecuación el espesor de nuestro acuífero. Dicha ecuación es la siguiente:

$$EA = HRS - NE$$

Dónde:

EA= Espesor del acuífero (pie)

HRS= Profundidad hasta la roca sana (pie)

NEA = Nivel estático del agua (pie)

4.2.5 Capacidad Específica.

Este parámetro se determinó empleando el método del ensayo de bombeo o prueba de bombeo.

Consistió en someter el pozo a una extracción variable de caudal conocido, obteniendo de esta manera el registro de abatimientos en el pozo de bombeo, conociendo el valor de (s) y (Q) procedimos a utilizar la siguiente expresión para su determinación.

$$CE = \frac{Q}{s}$$

CE = Capacidad Especifica (GPM/ft)

Q = Caudal GPM

s = Abatimiento (ft)

4.2.6 Permeabilidad.

Para la determinación de la permeabilidad se usaron las siguientes ecuaciones, en dependencia de los tipos de acuífero.

Acuíferos freáticos:

$$P = \frac{Q * \log r_2 / r_1}{1.36((h_2)^2 - (h_1)^2)}$$

P: Permeabilidad, en (m/hr).

Q: Caudal de bombeo, en (m³/hr).

r₁: Radio del pozo de bombeo, en (m).

r₂: Distancia del pozo de observación, en (m).

h₂: Espesor saturado, en (m), en el sitio del pozo de observación.

h₁: Espesor saturado, en (m), en el sitio del pozo de bombeo.

Acuíferos confinados:

$$P = \frac{Q * \log r_2 / r_1}{2.72 * m (h_2 - h_1)}$$

Dónde:

m: espesor del acuífero en m.

h_2 : carga en m, en el sitio del pozo de observación, medida desde el fondo del acuífero.]

h_1 : carga en m, en el sitio del pozo de bombeo, medida desde el fondo del acuífero.

4.2.7 Transmisividad (T)

Se determinó mediante el método gráfico.

Con los datos de abatimiento y tiempo obtenidos mediante la prueba de bombeo se ploteo una gráfica en escala semilogarítmica encantarando en esta la pendiente de la misma.

Formula modificada de no equilibrio (Jacob)

$$T = \frac{0.183 * Q}{\Delta s}$$

Dónde:

Q: Descarga del pozo de bombeo, en (m³/hr).

T: Coeficiente de Transmisividad, en (m³/hr/m).

Δs : Pendiente de la recta, que se expresa como la diferencia de abatimiento entre dos valores del tiempo cuya relación sea de 10 en la escala logarítmica (un ciclo logarítmico).

4.2.8 coeficiente de almacenamiento.

Método de Jacob.

$$S = \frac{2.25 * T * t_0}{r^2}$$

Donde:

S: Coeficiente de almacenamiento. (Adimensional)

T: Coeficiente Transmisividad (m³/hr/m)

r: distancia entre el pozo de bombeo y el pozo de observación (m)

t₀: Tiempo correspondiente a la intersección de la prolongación de la recta del gráfico, con el eje de abatimiento, en hrs.

4.3 Determinar y caracterizar los parámetros para el diseño del pozo.

4.3.1 El ademe.

El ademe o encamisado de protección del pozo lo determinamos de manera que se evitara los derrumbes de los estratos geológicos. La selección del ademe estuvo en dependencia del diámetro del pozo y del equipo de bombeo tomando en cuenta la condición de que el diámetro debe ser mayor al menos 2 pulg que los tazonos de la bomba a usar. Considerando a su vez la estratigrafía que el pozo presenta a determinados estratos, y analizando los puntos críticos de estos.

4.3.2 El filtro de grava.

La selección del filtro de grava estuvo en dependencia del tipo de material de la formación acuífera, de las ranuras de las rejillas; manteniendo una velocidad adecuada para evitar la entrada de material al pozo y así evitar la sedimentación del mismo. Para esto se usaron datos de valores comparativos con pozos construidos cercanos a la vecindad del pozo.

4.3.3 Selección de la rejilla

La selección de la rejilla estuvo en dependencia del tipo de material de la formación acuífera y manteniendo una velocidad máxima de entrada del flujo al pozo, para evitar la entrada de material y así evitar la sedimentación del mismo dado que este traería problemas futuros a nuestra bomba generando mantenimientos y reparaciones que vendrían a generar pérdidas económicas. Para esto también se usaron datos de valores comparativos.

4.4 Diseñar y seleccionar el equipo de bombeo según la demanda y el rendimiento del pozo.

4.4.1 Prueba de bombeo

Se realizó de manera escalonada en intervalos de 6 horas, monitoreando los niveles de abatimiento a través de un tubo piezométrico mediante una sonda eléctrica, a su vez se aforaba mediante el método de la escuadra, usamos el siguiente cálculo de carga total dinámica siendo esta la suma de la carga estática (CE) y la carga dinámica (CD): $CDT = CE + CD = \text{Nivel estático} + \text{abatimiento} + \text{altura de la descarga} + \text{perdidas por fricción}$.

Se determinará el caudal de bombeo, para lo cual se utilizará el método volumétrico, que consiste en llenar un recipiente en un determinado tiempo. Se utiliza la expresión siguiente para el cálculo de aforo: $Q = V/T$

Donde

Q: es el caudal del aforo.

V: es el volumen del recipiente.

T: tiempo de llenado del volumen

4.4.2 Selección del equipo de bombeo.

Para la selección del equipo de bombeo se necesitó información básica como es el caudal a explotar de la fuente, y la carga total dinámica para la cual también necesitamos información del cliente el cual nos proporcionó las pérdidas en su sistema y mediante esta información calculamos la CTD, potencia de la bomba y elegimos la mejor marca y modelo de bomba así como su respectivo motor. Mediante la prueba de bombeo obtuvimos: Caudal, capacidad específica, abatimiento, nivel estático y el nivel dinámico de bombeo. Con la utilización de estos datos y una curva característica de bomba realizamos la selección más adecuada del equipo de bombeo.

CAPITULO V: CÁLCULO Y ANALISIS DE RESULTADOS.

5.1 CARACTERIZACION DE LA HIDROGEOLOGIA DEL AREA DEL POZO.

5.1.1 TIPO DE ACUIFERO.

Dicha caracterización se realiza mediante el análisis e interpretación, del perfil litológico obtenido mediante la perforación ejecutada.

A continuación la siguiente tabla nos describe el perfil de la formación acuífera en la cual se realizó la perforación.

PERFIL LITOLOGICO		
DESDE	HASTA	FORMACIONES
0'	5'	Limo Arenoso, color café claro.
5'	10'	Limo Arcilloso, color gris.
10'	15'	Limo con arena fina, color café claro.
15'	25'	Limo con arena media a gruesa, color café.
25'	45'	Limo con arena gruesa y pómez, color café.
45'	55'	Arena gruesa poca arena fina y pómez, color café claro.
55'	75'	Limo con arena fina con poca pómez, color café claro.
75'	90'	Arena gruesa con pómez, color café claro.
90'	100'	Limo arcilloso con arena fina y poca pómez, color café claro.
100'	135'	Limo con arena fina y pómez granulada hasta de 3/16", color café.
135'	160'	Limo arcilloso con arena gruesa, color gris.
160'	200'	Arena gruesa y pómez, color café.

La geología predominante del pozo corresponde a limos y gravas, por tal razón la estructura se encuentra en una formación no consolidada, permeable totalmente, clasificando la formación como un Acuífero Libre.

5.1.2. ESPESOR DEL ACUIFERO.

El espesor del acuífero lo determinamos con la siguiente expresión:

$$m = Pp - NEA$$

Donde:

DESCRIPCION	VALOR	U/M
Pp = Profundida de la perforacion.	60.98	m
NEA = Nivel estatico de Agua.	5.34	m

Sustituyendo en la ecuación tendremos como resultado:

$$m = 60.98 \text{ m} - 5.34 \text{ m}$$

$$m = 55.64 \text{ m}$$

5.1.3. PERMEABILIDAD.

La permeabilidad la determinaremos mediante la ecuación del régimen de equilibrio para acuíferos libres.

$$Q = \frac{1.36 * P * (H^2 - h^2)}{\log \frac{R}{r}}$$

Ya que nuestra incógnita corresponde a la permeabilidad, procedemos a realizar el despeje de la ecuación, quedando la expresión de la siguiente manera:

$$P = \frac{Q * \log \frac{R}{r}}{1.36 * (H^2 - h^2)}$$

Donde:

DESCRIPCION	VALOR	U/M
H = Espesor saturado del acuífero, antes del bombeo.	55.64	m
h = Profundidad del agua en el pozo, durante el bombeo.	33.84	m
R = Radio del cono de depresión.	188.50	m
r = Radio del pozo.	0.36	m
Q = Rendimiento del pozo o caudal del bombeo.	272.60	m ³ /h
Factor	1.36	AD

Nota: R: La afectación de los niveles piezómetros se pudo detectar a los 188.50 m.

Sustituyendo en la ecuación tendremos:

$$P = \frac{272.60 \text{ m}^3/\text{hr} * \log \frac{(188.50 \text{ m})}{(0.36 \text{ m})}}{1.36 * (55.64 \text{ m}^2 - 33.84^2)}$$

$$P = 0.28 \text{ m/hr} = 6.72 \text{ m/día}$$

5.1.4 POROSIDAD.

La porosidad la podemos determinar usando la siguiente tabla de rangos de porosidad.

Material	Porosidad (%)
Grava	25-40
Arenas y gravas	36
Arenas	25-50
<i>Limos</i>	<i>35-50</i>
Arcillas	40-70
Mármoles	0.1-0.2
Esquistos	1--10
Dolomitas	2.9
Granitos	1.5-0.02
Basaltos	0.1-2.9

Como podemos observar en el perfil litológico la mayor concentración de estratos hace referencia a limos, de esta manera clasificamos su porosidad en el rango de 35-50.

5.1.5 CAPACIDAD ESPECÍFICA.

Dicho parámetro está calculado en base a la siguiente expresión:

$$CE = \frac{Q}{s}$$

Donde:

DESCRIPCION	VALOR	U/M
Q= Rendimiento del pozo o caudal del bombeo.	272.60	m ³ /h
s= Abatimiento.	21.80	m

Sustituyendo en la ecuación tendremos:

$$CE = \frac{272.60 \text{ m}^3/\text{h}}{21.80 \text{ m}}$$

$$CE = \frac{12.51 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{\text{m}}$$

5.1.6 TRANSMISIVIDAD.

La transmisividad está dada por la siguiente expresión:

$$T = P * m$$

Donde:

DESCRIPCION	VALOR	U/M
P= Permeabilidad de la formación.	0.28	m/h
m= Espesor del Acuífero.	55.64	m

Sustituyendo en la ecuación tendremos:

$$T = 0.28 \text{ m/h} * 55.64$$

$$T = 15.58 \text{ m}^2/\text{h}$$

A continuación en el siguiente capítulo presentamos los datos obtenidos durante y después de la perforación, los cuales usamos en nuestros respectivos cálculos para determinar el óptimo diseño y funcionamiento del pozo.

Entre algunos datos de relevancia podemos mencionar que la perforación se realizó, con una máquina de percusión, utilizando una broca de 18", obteniendo una profundidad total del pozo de 200' como resultado un nivel estático de 17'. Contamos también con datos del cliente como fueron el desnivel del terreno, el cual fue una elevación de 1.2 m que ellos obtuvieron mediante un levantamiento topográfico además para vencer unas pérdidas de 45 psi en su sistema de riego el cual es un riego por goteo

5.2 Determinación y caracterización de los parámetros para el diseño del pozo.

El diseño del pozo en dicho estudio, consistió en determinar los elementos dimensionales apropiados para la estructura de este y de los materiales que se utilizaron en su construcción. Este diseño estuvo enfocado a obtener una combinación óptima de comportamiento, larga vida de servicio y un costo razonable.

El correcto diseño de este pozo producirá sin duda la máxima economía a cierto plazo.

El pozo consta de dos elementos principales:

1. La parte que sirve de alojamiento del equipo de bombeo y como conducto vertical por el cual fluye el agua en su movimiento ascendente desde el acuífero.
2. La toma del pozo (el lugar de entrada del agua desde el acuífero).

Su diseño fue delicado e importante. Requirió de consideración muy cuidadosa de los factores hidráulicos que influyen en el comportamiento del pozo. La selección del diámetro del pozo se utilizó en cuenta dos requisitos:

1. La tubería debe ser de diámetro amplio para acomodar la bomba en la tolerancia adecuada.
2. El diámetro del tramo de captación del pozo debe ser tal que garantice una buena eficiencia hidráulica del mismo.

Coordenadas de Ubicación		
Coordenadas (X)	Coordenadas (Y)	Elevación (m.s.n.m)
601,755.221	1298,783.67	48.9

5.3 Determinación del método de perforación.

El método de perforación que se uso fue el de percusión, este se eligió por encima de los otros métodos, por el costo económico en el que este incurre siendo más económico con respecto a los otros métodos, pudo elegirse sin ninguna limitante porque la estratigrafía perforada era adecuada y lo permitía y dicha obra fue planeada con el anticipado tiempo por lo lento del método usado.

5.4 Perfil Estratigráfico.

A continuación mostramos el perfil estratigráfico de la perforación realizada que determinamos mediante el método del tacto e inspección visual.

5.5 DETERMINACION DE LA POROSIDAD.

5.5.1 ESPESOR DEL ACUIFERO.

EA= HRS- NE

Dónde:

EA= Espesor del acuífero (FT)

HRS= Profundidad hasta la roca sana (FT)

NEA = Nivel estático del agua (FT)

EA= 200 FT – 17.5 FT = 182.5 FT

5.5.2 CAPACIDAD ESPECÍFICA.

$$CE = \frac{Q}{S}$$

DONDE:

CE: Capacidad especifica (gpm/ft)

Q: Caudal del pozo (gpm)

S: abatimiento (ft)

$$CE = \frac{1200 \text{ gpm}}{54.89 \text{ ft}} = 21.86 \text{ gpm/ft}$$

5.6 Determinación del diámetro del pozo.

El diámetro óptimo del pozo se determinó utilizando la siguiente tabla, partiendo de la producción prevista por el pozo en diseño. Ya que los pozos perforados en las zonas de los alrededores del ingenio san Antonio, la producción que se espera para dicho pozo corresponde a los 1200 GPM.

Producción Prevista del pozo (m ³ /min)	Diámetro Nominal de los Tazones de la bomba (cm)	Diámetro Optimo del Ademe del Pozo en (cm)	Mínimo Diámetro de Ademe en (cm)
Menos que 0.4	10	15.0 ID	12.5 ID
0.3 – 0.7	12.5	20.0 ID	15.0 ID
0.6 – 1.5	15	25.0 ID	20.0 ID
1.3 – 2.5	20	30.0 ID	25.0 ID
2.3 – 3.4	25	35.0 OD	30.0 ID
3.2 – 5.0	30	40.0 OD	35.0 OD
4.5 – 6.8	35	50.0 OD	40.0 OD
6.0 – 12.0	40	60.0 OD	50.0 OD

ID= Diámetro interior OD= Diámetro Exterior

5.6.1 Diámetros recomendados para pozos.

Q Previsto = 1200 GPM = 4.54 m³/min

1. Con el caudal provisto podemos determinar el diámetro nominal de los tazones que corresponde a 30 cm = 11.8 pulg.
2. El diámetro óptimo del pozo corresponde a 40 cm = 15.75 pulg.

3. El mínimo diámetro que podemos utilizar es de 35 cm= 13.78 pulg.
4. Por motivos de seguridad utilizaremos 18 pulg en nuestro pozo.

5.7 Profundidad del pozo

Se determinó mediante los registros de otros pozos cercanos perforados en el mismo acuífero y durante la perforación del mismo, nos dimos cuenta que la profundidad que se le dio era suficiente para que nos aportara el caudal que necesitábamos, además tomando en cuenta las formaciones componentes del acuífero. Se perforó lo más profundo posible por dos razones.

1. Utilizar mayor sección de captación del pozo para mejorar la capacidad específica del mismo.
2. Obtener mayor abatimiento disponible para permitir al pozo rendir el caudal previsto.

Según registros de perforaciones en los lugares vecinos del punto de perforación nuestro, las profundidades oscilan entre 175- 200 ft de profundidad. De tal manera definimos que la profundidad de nuestro pozo correspondió a los 200 ft, ya que mediante los registros anteriores de las vecindades aledañas rinde caudales aproximados al caudal esperado, y conforme avanzo la perforación no fue necesario aumentar dicha perforación.

$$P_{\text{Pozo}} = 200 \text{ ft} = 61 \text{ m}$$

5.8 Longitud de la Rejilla

Se calculó tomando en cuenta el abatimiento disponible, estratigrafía y el espesor de acuífero perforado.

$$S = \text{NB} - \text{NEA}$$

Donde:

NB= Nivel de bombeo del pozo.

NEA= Nivel estático del agua.

S= 89 ft-17.5 ft

S= 71.5 ft

Teniendo un espesor de acuífero perforado de:

EAP= 182.5 ft= 55.6 m

Ya que contamos con un espesor de 182.5 Ft se calculó enrejillar un 75% de este para captar alrededor del 90% o más de la máxima capacidad específica que se podría obtener con la longitud igual al espesor total del acuífero.

LR= EA*75%

LR= 182.5 ft* 75%

LR= 136.86 ft= 41.7 m.

Para obtener el número de tubo ranurado a utilizar aprovechando la máxima capacidad específica que podría aportar el pozo, se obtuvo dividiendo los pies totales a enrejillar entre la longitud comercial de los tubos esto se expresa de la siguiente manera:

$$N_{tb} = \frac{L_{tr}}{L_{tbc}}$$

Donde:

Ntb: Número de tubos ranurados a utilizar en el pozo

Ltr: Longitud total de la rejilla.

Ltbc: Longitud de tubo comercial.

Sustituyendo:

$$N_{tb} = \frac{136 \text{ pies}}{20 \text{ pies}} = 6.8 \text{ tubos} \approx 7.00 \text{ tubos}$$

5.8.1 Calculo de la Rejilla.

Área Neta de Rejilla: $Q = V * ANr$

Donde:

Q: Caudal.

V: Velocidad.

ANr: Área Neta de la rejilla.

Para dicho cálculos se tomó en cuenta una velocidad permisible menor a 0.03 m/seg.

DESCRIPCION	VALOR	UM
CAUDAL	0.08	m³/seg
VELOCIDAD DE INGRESO AL POZO	0.03	m/seg

Despejando Obtuvimos.

$$A = \frac{Q}{V}$$

Sustituyendo

$$A = \frac{0.08 \text{ m}^3/\text{seg}}{0.03 \text{ m/seg}}$$

DESCRIPCION	VALOR	UM
AREA DE REJILLA	2.48	m²

Área de la Ranura de la rejilla.

$$ARr = Lr * Ar$$

Donde:

DESCRIPCION	VALOR	UM
LONGITUD DE RANURA	0.15000	m
ANCHO DE RANURA	0.00152	m

Sustituyendo:

$$ARr = 0.15000 \text{ m} * 0.00152 \text{ m}$$

DESCRIPCION	VALOR	UM
AREA DE RANURA	0.00023	m ²

Número de Ranuras de la rejilla.

$$NRr = ANr/ARr$$

Donde:

DESCRIPCION	VALOR	UM
AREA DE REJILLA	2.48	m ²
AREA DE RANURA	0.00023	m ²

Sustituyendo:

$$NRr = \frac{2.48 \text{ m}^2}{0.00023 \text{ m}^2}$$

DESCRIPCION	VALOR	UM
NUMERO DE RANURA DE LA REJILLA	10865	UN

Número de ranuras por metro de tubo Ranurado.

$$NRm = \left(\frac{1}{\left(Ar + \left(\frac{Er}{1000} \right) \right)} \right) * 6$$

Donde:

DESCRIPCION	VALOR	UM
ESPACIAMIENTO ENTRE RANURA	6.3500000	mm
ANCHO DE RANURA	0.0015240	m

Sustituyendo:

$$NRm = \left(\frac{1}{\left((0.0015240 \text{ mm} + \left(\frac{6.35}{1000} \right)) \right)} \right) * 6$$

DESCRIPCION	VALOR	UM
NUMERO DE RANURAS POR METRO DE TUBO RANURADO	762	UN

Metros ranurados de rejilla

$$m = NRr/NRm$$

Donde:

DESCRIPCION	VALOR	UM
NUMERO DE RANURA DE LA REJILLA	10865	UN
NUMERO DE RANURAS POR METRO DE TUBO RANURADO	762	UN

Sustituyendo

$$m = 10865/762$$

$$m = 14.25 \text{ mts}$$

Numero de tubos

$$Ntb = mts/5.85$$

Sustituyendo:

$$Ntb = \frac{14.25}{5.85}$$

$$Ntb = 2.43 \text{ tbs}$$

• Cálculo de volumen de grava:

$$D_p = 18'' = 0.4572\text{m}$$

$$D_A = 14'' = 0.3556\text{m}$$

$$V_g = (A_{dp} - A_{da}) * \text{prof. pozo}$$

$$A_{dp} = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * (0.4572\text{m})^2}{4} = 0.1641 \text{ m}^2$$

$$A_{da} = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * (0.3556\text{m})^2}{4} = 0.0993\text{m}^2$$

$$V_g = (0.1641 \text{ m}^2 * 0.0993 \text{ m}^2) * 60.98 \text{ m} = 4.47 \text{ m}^3 \approx 14.6 \text{ pie}^3.$$

5.10 Prueba de bombeo.

Diámetro de Revestimiento	14"	Columna de Bomba	120'	Altura Piezométrica	14"
Profundidad del pozo	200'	Numero de Impulsores	3	Caudal G.P.M	1200
Nivel Estático	17.5'	Diámetro de Descarga	8"	Hora Inicial	10:10 a.m.
Diámetro de Bomba	Modelo 12	Diámetro de Orificio	6"	Hora Final	04:10 p.m.
Tiempo (Minutos)	N.B. Pies	Abat. Pies	OBSERVACIONES		
10:10 a.m.	0		Inicia Prueba de Bombeo		
	1	47.75	30.25		
	2	48.33	30.83		
	3	48.33	30.83		
	4	48.33	30.83		
	5	48.33	30.83		
	6	48.33	30.83		
	7	49.00	31.50		
	8	49.33	31.83	L: 14" Q= 805 G.P.M.	
	9	49.33	31.83		
	10	49.33	31.83		
	12	49.33	31.83		
	14	49.33	31.83		
	16	50.00	32.50		

	18	50.08	32.58	
	20	50.17	32.67	
	25	50.50	33.00	
	30	50.33	32.83	Agua Limpia y Cristalina
	35	50.33	32.83	
	40	50.50	33.00	
	45	51.00	33.50	
	50	51.00	33.50	
	55	51.00	33.50	
11:10	60	51.00	33.50	Continua Prueba de Bombeo

Diámetro de Revestimiento	14"	Columna de Bomba	120'	Altura Piezométrica	14"
Profundidad del pozo	200'	Numero de Impulsores	3	Caudal G.P.M	805
Nivel Estático	17.5'	Diámetro de descarga	8"	Hora Inicial	10:10 a.m.
Diámetro de Bomba	Modelo 12	Diámetro de Orificio	6"	Hora Final	04:10 p.m.
Tiempo (Minutos)	N.B.	Abat. Pies	OBSERVACIONES		
11:10 a.m.	0		Continua Prueba de		
	1	64.33	46.83		
	2	64.33	46.83		
	3	64.67	47.17		
	4	65.33	47.83		

	5	65.42	47.92	
	6	64.50	47.00	Agua sale limpia y cristalina.
	7	65.75	78.25	L= 26" Q=
	8	65.50	49.00	
	9	66.08	48.58	
	10	66.17	48.67	
	12	66.17	48.67	
	14	66.17	48.67	
	16	66.17	48.67	
	18	66.17	48.67	
	20	66.17	48.67	
	25	66.17	48.67	
	30	66.50	49.00	
	35	66.58	49.08	
	40	66.75	49.25	
	45	67.00	49.25	
	50	67.00	49.25	
	55	67.00	49.25	
	60	67.00	49.25	
	70	67.00	49.25	Continua Prueba de
	80	67.00	49.25	
	90	67.00	49.25	
	100	67.00	49.25	
	110	67.00	49.25	
01:10 p.m.	120	67.00	49.25	

Diámetro de Revestimiento	de	14"	Columna Bomba	de	120'	Altura Piezométrica	14"
Profundidad del pozo	del	200'	Numero Impulsores	de	3	Caudal G.P.M	750
Nivel Estático		17.5'	Diámetro Descarga	de	8"	Hora Inicial	10:10 a.m.
Diámetro de Bomba		Modelo 12	Diámetro Orificio	de	6"	Hora Final	04:10 p.m.
Tiempo (Minutos)		N.B. Pies	Abat. Pies		OBSERVACIONES		
01:10 a.m.	0				Se aumenta caudal		
	1	76.75	59.25				
	2	77.00	59.50				
	3	77.17	59.67		L=26" Q= 1250 G.P.M.		
	4	77.17	59.67				
	5	77.17	59.67				
	6	77.17	59.67				
	7	77.17	59.67				
	8	78.08	60.58				
	9	78.08	60.58				
	10	78.08	60.58				
	12	78.08	60.58				
	14	78.25	60.75				
	16	78.33	60.83		Agua sale limpia y cristalina		
	18	78.33	60.92				

	20	78.42	60.75	
	25	78.25	60.75	
	30	78.25	60.75	
	35	78.25	60.75	
	40	78.25	60.75	Continua Prueba de Bombeo
	45	78.00	60.50	
	50	78.33	60.83	
	55	78.42	60.92	
	60	78.58	60.08	
	70	78.67	61.17	
	80	78.75	61.25	
	90	78.75	61.25	
	100	78.75	61.25	
	110	78.75	61.25	
	120	78.75	61.25	
	150	78.75	61.25	
4:10 p.m.	180	89.00	61.25	Finaliza prueba de Bombeo

5.11 Calculo de HP de la bomba:

Para calcular la HP de la bomba se utilizó la siguiente ecuación:

$$HP = \frac{CTD \times Q}{3660 \times E(70\%)}$$

Donde:

HP: Potencia de motor en hp

CTD: Carga total dinámica en pie.

Q: Caudal del pozo en gpm.

E: Eficiencia de la bomba en porcentaje.

Calculando la carga dinámica, la ecuación sería:

$$CTD = ND + Hf + Pd \pm \Delta Z$$

Donde:

ND: Nivel dinámico de la bomba en pie.

Hf: perdida por fricción en la tubería de succión en pie.

Pd: Presión en la descarga en pies (éste dato lo proporciona el Cliente)

ΔZ : Desnivel del punto de descarga al punto final del sistema en pies.

Pd= 45 PSI = 9.6 Pies

ΔZ = 1.5 mts = 4.92 Pies

$$hfm = 10.67 * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} \times \frac{L}{(D)^{4.87}}$$

Q= Caudal del pozo en gpm.

C= Coeficiente de rugosidad depende del material.

L= Longitud de tubería en metro.

D= Diámetro de Tubería

El coeficiente de rugosidad de Hazen-William en acero al Carbón es 100.

Datos:

Caudal del pozo= 0.0757 m³/s

Longitud de tubería= 27.13 m

Diámetro de tubería de columna de bomba= 0.2032 m

Sustituyendo:

$$h_{fm} = 10.67 * \left(\frac{0.0757 \frac{m^3}{seg}}{100} \right)^{1.852} * \frac{27.13m}{(0.2032m)^{4.87}} = 1.1274 m \approx 3.69 pies$$

Sustituyendo en la ecuación de la carga total dinámica.

$$CTD = 89 pie + 3.69 pie + 9.6 pie + 4.92 pie = 107.2 pies$$

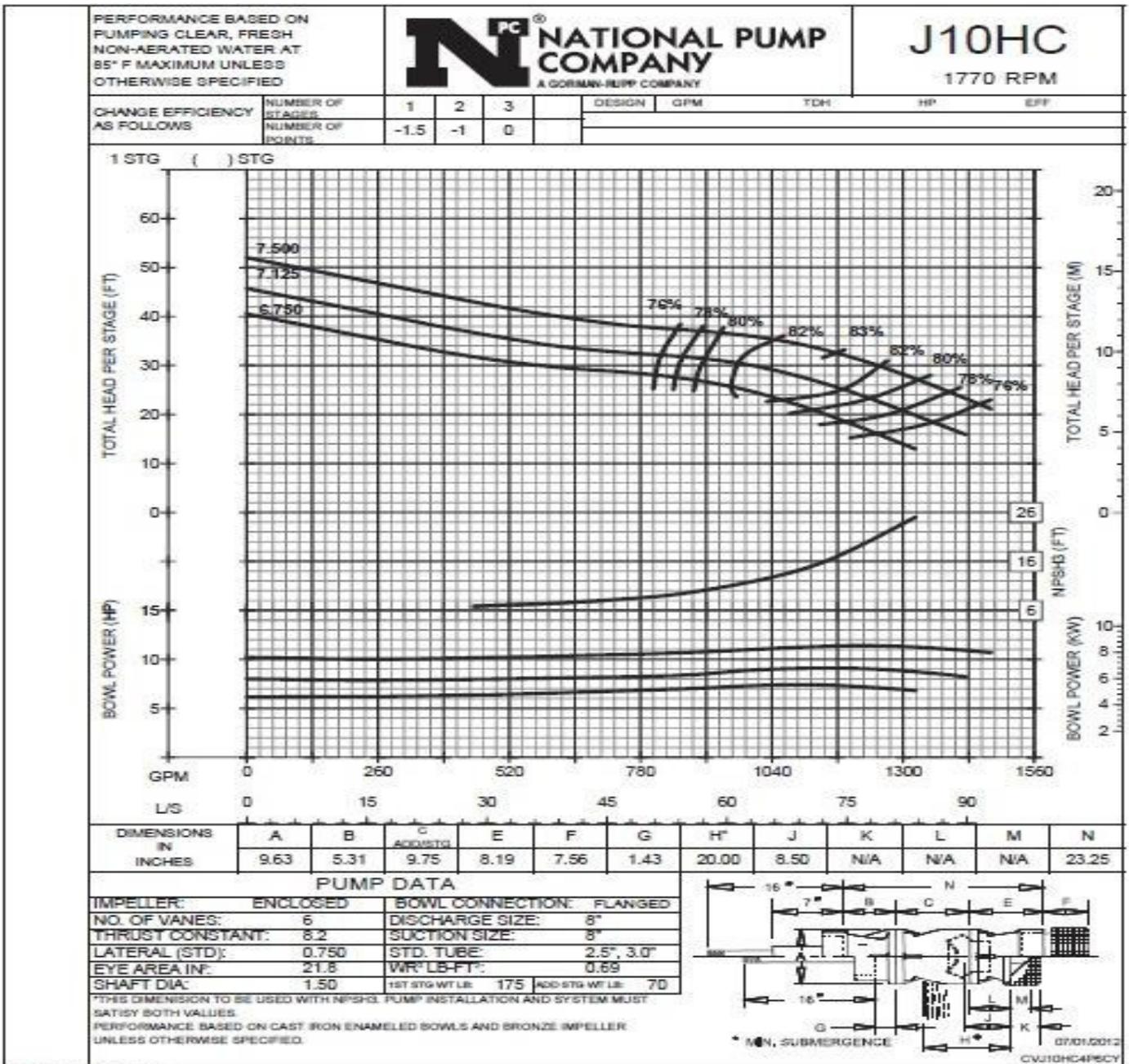
Sustituyendo.

$$HP = \frac{107.2 pie * 1200 gpm}{3960 * 0.7} = 46.40 HP$$

El motor que se solicitara es de 50 hp tomando en cuenta las categorías comerciales que nos ofrecen las casas comerciales.

5.11 Selección de bomba.

La bomba seleccionada es una National Pump Company. Modelo j10hc de 1560 galones, de 8 pulgadas, ya que su curva característica nos muestra que a los 1170galones encontramos su máxima eficiencia, venciendo una carga total dinámica de 32 pies de carga por etapa, por lo cual se requiere cuatro etapas para vencer la acarga que es de 108 pies.



6.1 CONCLUSIONES

- El diseño del pozo cumple satisfactoriamente la demanda del cliente de erogar un caudal de 1200 gpm que pueda abastecer un sistema de riego por goteo de sus zonas en expansión.
- Su estructuración fue proyectada para que en tiempos críticos marzo y abril este no disminuya su comportamiento a un nivel que dificulte la operación de irrigación ya que se enrejillo un 75 % del área total de la porción del acuífero utilizado en la perforación cuando con solo con un 25% de rejilla captaba lo solicitado, esto para dar mayor capacidad específica.
- El diseño de las aberturas de la rejilla se hizo considerando la velocidad permisible de 0.1 pie/seg logrando no permitir el acceso de cantidades excesivas de arenas al interior de la bomba que puedan dañar el equipo y más tarde incurrir en costos correctivos.
- Se calculó el equipo de bombeo de manera que el sistema goce de la presión idónea para su eficiencia.
- El estudio del acuífero como las propiedades hidrogeológicas, la selección de los métodos usados, materiales empleados es enfocado a lograr la mejor vida útil de servicio al menor costo económico posible.

6.2 RECOMENDACIONES

- Operar el equipo por primera vez después de haber bombeado al menos una seis horas a descarga libre para garantizar la mejor calidad de agua inicial que ingresara al sistema de riego.
- Realizar un chequeo diario del motor. Esto consta de revisar los niveles de aceites adecuados, engrases de balineras, condición de prensa stop etc.
- No encender el equipo antes de cebar la bomba para su debida lubricación.
- Revisar por lo menos una vez al mes los niveles estáticos y dinámicos con el fin de saber el comportamiento del nivel freático.
- Realizar aforos al menos antes de iniciar las temporadas de riegos.
- Se recomienda realizar labores de mantenimientos preventivos a la bomba y motor terminado cada época de riego y antes de iniciar esta.
- Se recomienda realizar aplicación de pintura anticorrosiva al menos una vez cada cinco años, debiendo previamente remover el óxido y haciendo preparación de superficie.

BIBLIOGRAFIA

- Alcaldía Municipal de Chichigalpa. (2012) “Plan Estratégico de Desarrollo Municipal 2010-2013” Chichigalpa, Chinandega, Nicaragua.
- Arguello O., (2008). Revisión y Actualización de la estrategia del sector de agua potable y saneamiento, 2008-2015, Nicaragua/Informe final. Managua, Julio 2008.
- BATU, vedat Aquifer hydraulics. John Wiley y & sons, Inc. USA. 1998.
- Dr. Geol. Miguel Auge. (Noviembre 2005). Perforaciones Hidrogeológicas. Argentina. <http://es.scribd.com/doc/68295999/19/EXTENSION-Y-ESPESOR-DEL-ACUIFERO-PUELCHE>
- Hidrogeólogo Raúl Campillo Urbano. (Octubre, 2010). Parámetro criterios en el diseño y construcción de pozos. Chile. <http://www.aprchile.cl/pdfs/ParametrosParte3.pdf>
- Ing. Manuel Silvac. (Noviembre, 2002). Capital hídrico y usos del agua. Nicaragua
- J.M de Acevedo Netto y Acosta. (1975). Manual de Hidráulica. Ed. HARLA. Sao Pablo, Brasil.
- Máximo Villon Béjar. (2002). Hidrología. Ed. Villon. Lima, Perú.
- Jhonson Screens. (1975). Agua Subterránea y los pozos. Ed. Jhonson Screens company. Estados Unidos.
- Ministerio de planificación y cooperación (MIDEPLAN). Metodología de proyectos de agua potable. <http://www.ongvinvulos.cl/biblio/nuevaruralidad/Metodologias%20de%20Agua%20Potable%20Rural.pdf>