

NORMA BOLIVIANA

NB 173001

Primera Edición
2020-01

Número de Referencia
NB 173001:2020

Proceso Técnico para la Construcción de Pozos de Agua

ICS 91.140.60 - Sistemas de abastecimiento de agua
CTN No17.3 "Saneamiento Básico"



IBNORCA

©IBNORCA - Derechos Reservados

El Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA) tiene reservados los derechos de reproducción. Salvo prescripción diferente, no podrá reproducirse ni utilizarse ninguna parte de esta publicación bajo ninguna forma y por ningún medio, electrónico o mecánico, incluidos el fotocopiado y la microfilmación, sin la autorización escrita de IBNORCA.

DOCUMENTO PROTEGIDO POR EL
DERECHO PROPIETARIO INTELECTUAL
Para uso exclusivo de ING. SILVIA DELGADO RODRIGUEZ

RESERVADOS

©IBNORCA

IBNORCA

Fecha 2021-02-03 - 10057

INSTITUTO BOLIVIANO DE NORMALIZACIÓN Y CALIDAD (IBNORCA)

IBNORCA creado por Decreto Supremo N° 23489 de fecha 1993-04-29 y ratificado como parte componente del Sistema Boliviano de la Calidad (SNMAC) por Decreto Supremo N°24498 de fecha 1997-02-17, es la Organización Nacional de Normalización responsable del estudio y la elaboración de normas bolivianas.

Representa a Bolivia ante los organismos sub regionales, regionales e internacionales de Normalización, siendo actualmente miembro activo del Comité Andino de Normalización (CAN), del Comité MERCOSUR de Normalización (CMN), miembro pleno de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT), miembro de la International Electrotechnical Commission (IEC) y miembro correspondiente de la International Organization for Standardization (ISO).

Revisión

Esta norma está sujeta a ser revisada permanentemente con el objeto de que responda en todo momento a las necesidades y exigencias actuales.



Derecho de Autor
Resolución
217/94

Depósito Legal
N° 4 - 3 - 493-94



DOCUMENTO PROTEGIDO POR EL DERECHO DE PROPIEDAD

Índice	Nº. pág
0 INTRODUCCIÓN.....	1
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	3
1.1 Objeto.....	3
1.2 Campo de aplicación.....	3
1.3 Referencias.....	3
1.4 Definiciones.....	3
1.4.1 Abatimiento.....	4
1.4.2 Acuífero.....	4
1.4.3 Acuíferos confinados.....	4
1.4.4 Acuíferos libres.....	4
1.4.5 Acuitardos.....	4
1.4.6 Ademe.....	4
1.4.7 Aguas Naturales.....	4
1.4.8 Alineación.....	5
1.4.9 Análisis Integral de Monitoreo.....	5
1.4.10 Área de recarga.....	5
1.4.11 Basamento (bedrock).....	5
1.4.12 Bentonita.....	5
1.4.13 Capacidad Específica.....	5
1.4.14 Caño Conductor.....	5
1.4.15 Caudal.....	5
1.4.16 Caudal Autorizado.....	6
1.4.17 Caudal de Producción.....	6
1.4.18 Caudal máximo de bombeo.....	6
1.4.19 Caudal óptimo de bombeo.....	6
1.4.20 Caudal Seguro.....	6
1.4.21 Cierre de pozos (sellado).....	6
1.4.22 Cobertura.....	6
1.4.23 Coeficiente de uniformidad.....	6
1.4.24 Contratante.....	6
1.4.25 Contratista.....	6
1.4.26 Detritos de perforación.....	6
1.4.27 Demanda de agua.....	7
1.4.28 Ecosistema.....	7
1.4.29 Eficiencia del pozo (E).....	7
1.4.30 Empaque de grava.....	7
1.4.31 Entidad competente.....	7
1.4.32 Espacio anular.....	7
1.4.33 Estratigrafía.....	7
1.4.34 Estudios hidrogeológicos.....	7
1.4.35 Filtro del pozo (ademe ranurado).....	7
1.4.36 Flujo laminar.....	7
1.4.37 Fluviómetro o caudalímetro.....	8
1.4.38 Formación consolidada.....	8
1.4.39 Formación no-consolidada.....	8
1.4.40 Fuentes de Agua.....	8
1.4.41 GeoBolivia.....	8
1.4.42 Geofísico.....	8
1.4.43 Geología.....	8
1.4.44 Geoquímica.....	8

1.4.45	Hidrogeoquímico.	8
1.4.46	Índice de Saturación Langelier (ISL).	9
1.4.47	Lechada.	9
1.4.48	Litología.	9
1.4.49	Nivel Dinámico.	9
1.4.50	Nivel Estático.	9
1.4.51	Nivel Freático.	9
1.4.52	Perfilaje eléctrico de pozo.	9
1.4.53	Perforación exploratoria.	9
1.4.54	Permeabilidad o Conductividad Hidráulica (K).	9
1.4.55	Piezómetro o medidor de nivel de agua en pozo.	10
1.4.56	Portamecha.	10
1.4.57	Potenciometría.	10
1.4.58	Pozo abandonado.	10
1.4.59	Pozo artesiano.	10
1.4.60	Pozo con empaque de grava.	10
1.4.61	Pozo Perforado.	10
1.4.62	Pozo Piloto.	10
1.4.63	Pozo profundo.	10
1.4.64	Pozos de Monitoreo y de Control.	10
1.4.65	Pozo Surgente.	11
1.4.66	Prueba de bombeo.	11
1.4.67	Punto de Extracción.	11
1.4.68	Recarga Efectiva.	11
1.4.69	Recarga.	11
1.4.70	Rehabilitación de pozo.	11
1.4.71	Sello sanitario.	11
1.4.72	Sistema de Flujos del Agua Subterránea.	11
1.4.73	Sobre descarga o sobre bombeo de agua del pozo.	12
1.4.74	Sobreexplotación de fuentes de agua subterránea.	12
1.4.75	Superficie Potenciométrica.	12
1.4.76	Tallos de Perforación (tubería de perforación o barreno).	12
1.4.77	Tipo de Agua.	12
1.4.78	Transmisividad (T).	12
1.4.79	Trépano, Broca, Taladro.	12
1.4.80	Tricono.	12
1.4.81	Tubería de revestimiento (ademe, encamisado o Casing).	13
1.4.82	Verticalidad.	13
2	PROCESO TÉCNICO ANTES DE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS 14	14
2.1	Definiciones 14	14
2.2	Consideraciones Previas 14	14
2.2.1	Verificación de otras fuentes de agua 14	14
2.2.2	Información Socio-económico 14	14
2.2.3	Licencia ambiental 14	14
2.3	Estudios técnicos: 14	14
2.3.1	Geomorfología 14	14
2.3.2	Hidrogeología 15	15
2.3.3	Calidad de agua 15	15
2.3.4	Edafología 15	15
2.3.5	Recopilación de datos y pozos existentes 15	15
2.3.6	Estudio Geofísico (Prospección geofísica) 16	16
2.3.7	Ubicación de nuevos pozos 17	17
2.4	Análisis, evaluación y consideraciones generales 17	17

2.4.1	Evaluación final y determinación de la necesidad de la construcción del pozo ..	17
3	PROCESO TÉCNICO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS	18
3.1	Definición	18
3.2	Clasificación según la tipología de pozos.....	18
3.3	Condiciones previas para la perforación de pozos.....	18
3.4	Método de perforación.....	19
3.5	Proceso de construcción de pozos de agua.....	19
3.5.1	Equipos, herramientas y materiales requeridos:	19
3.5.2	Personal requerido	20
3.5.3	Cronograma de trabajo: plan de trabajo con fechas y contenido.....	20
3.5.4	Instalación de faenas.....	20
3.6	medición de la viscosidad y densidad del Lodo de perforación	21
3.7	Toma de muestras litológicas	23
3.8	Cambio y adición de tallos de perforación.....	23
3.9	Terminación de la perforación	23
3.10	Retiro de herramienta.....	23
3.11	Preparativos de la grava para empaque	23
3.11.1	Selección de la granulometría de la grava y porcentajes	23
3.11.2	Volumen de empaque de grava.....	24
3.11.3	Preparativos y almacenamiento de la grava definida.....	24
3.12	Terminación del pozo piloto y/o pozo definitivo	25
3.13	Perfilaje de pozo.....	25
3.14	Diseño de pozo.....	25
3.15	preparativos de tubería de ademe (Tuberías ciegas y ranuradas).....	27
3.15.1	Tubería ciega, encamisado o ademe	27
3.15.2	Tuberías ranuradas, rejilla o filtros	27
3.16	Entubado del pozo.....	27
3.17	Empaque de grava	28
3.17.1	Uso de tubo engravador	29
3.18	Monitoreo durante el desarrollo de pozos de agua	29
3.19	Limpieza y desarrollo del pozo	29
3.20	Prueba de bombeo escalonado, continuo y recuperación	30
3.20.1	Prueba de bombeo escalonado.....	30
3.20.2	Prueba de bombeo constante o de larga duración.....	33
3.20.3	Prueba de recuperación	35
3.21	Prueba de verticalidad y alineación.....	38
3.22	Protección del pozo	38
3.22.1	Sello sanitario - Protector de tubería y Base soporte de bomba - Losa de Hormigón	38
3.22.2	Protección del pozo, caseta de control de bombeo y cerco perimetral.....	40
3.23	Toma de muestra de agua para el análisis de calidad de agua	48
3.24	Desinfección de pozos	48
3.25	Producción del pozo (vida útil)	49
3.26	presentación de informe final y planillas de reporte Del proceso de construcción del pozo.....	50
3.27	Cierre definitivo del pozo	50
4	PROCESO DESPUÉS DE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS	50
4.1	Definición	50
4.2	Proceso de instalación del sistema de bombeo	51
4.3	Proceso de diagnóstico de pozo mediante video inspección	51
4.3.1	Monitoreo de datos.....	51
4.3.2	Diagnóstico de un Pozo.....	53

4.3.3	Preparativos de los equipos, herramientas e instalaciones requerida incluyendo el personal capacitado	53
4.3.4	Preparativos del pozo (libre de bomba y espacio necesario).....	53
4.3.5	Instalación del equipo.....	54
4.3.6	Proceso de video inspección.....	54
4.3.7	Análisis y evaluación	54
4.4	Rehabilitación del pozo	55
4.4.1	Definición.....	55
4.4.2	Métodos de rehabilitación.....	55
4.4.3	Pasos para elaborar un Plan de rehabilitación.....	56
4.5	SELLADO DEFINITIVO DE POZO.....	57
4.5.1	Requisitos de sellado	57
5	GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	59
5.1	Generalidades	59
5.2	Alcances	59
5.3	Responsabilidades	59
5.4	Entidades competentes.....	59
6	BIBLIOGRAFÍA.....	60
7	ANEXOS.....	62



Proceso Técnico para la Construcción de Pozos de Agua

0 INTRODUCCIÓN

Existe una dependencia biológica de todos los organismos, como de las distintas actividades humanas con los recursos hídricos, de manera que el acceso oportuno en cantidad y calidad suficiente se transforma en una condición necesaria para proyectar el desarrollo de las comunidades. Así uno de los elementos más importantes para el aprovechamiento humano es el agua subterránea, el cual constituye alrededor del 80 por ciento de agua dulce en la tierra.

Los recursos de agua subterránea son naturalmente renovables siempre y cuando su uso y aprovechamiento se realice de manera sostenible, se proteja su calidad y sus áreas de recarga y mientras las condiciones climáticas continúen siendo las favorables para los procesos del ciclo hidrológico (precipitación, temperatura, evaporación, entre otros). No obstante, muchos acuíferos han perdido su cualidad de renovable debido a una explotación no planificada, donde la extracción de agua supera los regímenes de recarga, a lo que se suma la vulnerabilidad del sistema y la falta de protección de las áreas de recarga o la contaminación. Por otro lado, existen los acuíferos estrictamente no renovables que contienen 'paleo-agua subterránea' (o aguas fósiles), cuya recarga proviene de regímenes climáticos más húmedos¹, por tales motivos es válido hablar del agua subterránea como un recurso no renovable.

Para la identificación y entendimiento del agua subterránea se complementa con investigaciones geofísicas e hidrológicas, así como fundamentos químicos, isotópicos, de vegetación y suelo. Es fundamental tener una visión holística sobre el agua subterránea, que va más allá de conocer la cantidad del recurso en una cuenca. Asimismo, es fundamental para las naciones basar su política económica-social en una política hídrica integral, basada en la continua generación de información sobre su agua subterránea, como es su calidad y cantidad. Adicionalmente, se requiere conocer su funcionamiento en el contexto de los sistemas de flujo y de las áreas de recarga y descarga. Es decir, la política pública del agua no se refiere a la extracción sostenible de agua subterránea o superficial de forma separada, sino en conjunto, que es la característica hídrica dentro de un territorio dado.

Para delimitar un acuífero como unidad de gestión de agua subterránea se requiere contar con diferentes estudios técnicos para conformar el modelo conceptual de flujos de agua subterránea establecida por Tóth (1963) llamada flujos tothianos², estos estudios son:

- Estudios geológicos: cartografía a nivel de semi-detalle y detalle;
- Estudios de estratigrafía basados obligatoriamente en columnas litológicas de pozos perforados y registros geofísicos de pozos;
- Estudios geofísicos de gravimetría, magneto-telúrico, transitorios electromagnéticos;
- Estudios hidrogeológicos;
- Distribución de la potenciometría en x, y, z;
- Propiedades petrofísicas del medio, tantas como sean necesarias;
- Estudios de geoquímica e hidrogeoquímica;
- Estudios de isotopía de elementos estables y radiactivos;
- Determinación del modelo de elevación;
- Definición y validación de la profundidad y morfología de la roca basamento;

1 (Grupo Base del Groundwater Management Advisory Team GW-MATE, 2002-2006)

2 Referencia documento del PGSF del MMAyA

- Estudio del significado hidrogeológico sobre el tipo y distribución de vegetación y suelo, y
- Modelo computacional de flujo mediante el método de discretización basado en elementos finitos, volúmenes finitos, simulando tres dimensiones, que incorpore el balance de masa y el balance de energía.

El uso del agua subterránea debe ser regulado en una normatividad técnica y legal, ya que la extracción sin una planeación causa perjuicios a los ecosistemas, al desarrollo económico y social de los países, así como a la salud de la población. En la Constitución Política del Estado de Bolivia, en el capítulo quinto, sobre los recursos hídricos, se manifiesta que el agua constituye un derecho fundamental para la vida y la soberanía del pueblo, por lo que el Estado promoverá el uso y acceso al agua. Asimismo, se fundamenta que los recursos hídricos no podrán ser objeto de apropiaciones privadas y tanto ellos como sus servicios no serán concesionados y están sujetos a un régimen de licencias, registros y autorizaciones conforme a Ley. Los recursos hídricos son prioritarios para el Estado, el cual deberá garantizar su conservación, protección, preservación, restauración, uso sustentable y gestión integral. Sin embargo, en la actualidad, no se cuenta con una normativa que regule y exponga un adecuado procedimiento de perforación, construcción, operación y mantenimiento de los pozos.

La perforación de pozos es la última alternativa que permite el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos para satisfacer diferentes necesidades ya sea de consumo humano, agricultura, ganadería e industria. La presente Normativa, contiene lineamientos técnicos y directrices que contribuirá a los procesos adecuados antes, durante y después para la construcción de pozos, donde deben considerarse las condiciones previas, la identificación del sitio para la perforación, se debe conocer los sistemas de flujo, las características hidrogeológicas, y todos los aspectos técnicos que influyen para la ejecución de la construcción del pozo, y finalmente la operación, mantenimiento, diagnóstico y rehabilitación del pozo, para que se la realice de manera ordenada y controlada, y que los datos generados durante estos procesos se centralicen, con lo cual se evitará situaciones como: el descenso de niveles de pozos próximos a una perforación o la existencia de perforaciones abandonadas que representen una vía de contaminación para el acuífero. La Información técnica de las perforaciones sumada al de la exploración geofísica, contribuirán en gran manera a la identificación de áreas potenciales de aguas subterráneas y al conocimiento de la geometría del acuífero para la construcción de un modelo conceptual hidrogeológico completo y más cercano al medio real; asimismo mejorará en gran manera la calidad de la información que debe quedar registrado en el Sistema de Información de Agua Subterránea de Bolivia (SIASBO). Contar con estas herramientas contribuirá a una gestión sostenible de los Recursos Hídricos Subterráneos del país. Son parte integrante de la Norma los Anexos. (Normativos C, H y J).

La normativa que se presenta, busca que se cumpla el rol del Estado expresado en la Constitución Política del Estado respecto al agua como derecho fundamental y recurso no renovable; propone también, generar información para la soberanía del líquido elemento cuya explotación, uso y preservación debe estar respaldada por una norma jurídica que regule y controle la actividad dentro de la filosofía del Vivir Bien y del respeto a la madre Tierra, tal como corresponde en un Estado de Derecho y al Estado Plurinacional de Bolivia.

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

1.1 OBJETO

Establecer los criterios técnicos y condiciones mínimas, que se deben cumplir antes, durante y después de la construcción de pozos para la extracción de agua, para su uso en actividades antrópicas de forma adecuada, sin modificar las condiciones de los acuíferos y su calidad de agua. La información generada y reportada debe alimentar el Sistema de Información de Agua Subterránea de Bolivia (SIASBO).

1.2 CAMPO DE APLICACIÓN

- 1) La presente normativa será aplicada a pozos perforados para la extracción de agua en todo el territorio del Estado Plurinacional de Bolivia, en los procesos antes, durante y después de su construcción, destinados a todos los usos en actividades antrópicas.
- 2) Es obligatorio el conocimiento de la presente Normativa Técnica de construcción de pozos para la extracción de agua, evitando la contaminación y sobre bombeo de los acuíferos.
- 3) La responsabilidad en la aplicación y cumplimiento de la presente Norma corresponde a la Persona Natural y/o Jurídica, pública o privada que requiere la construcción del pozo (Contratante).
"La Información generada en esta actividad debe ser reportada a la entidad competente a nivel municipal, departamental y/o nacional correspondiente".
- 4) Según los requerimientos a nivel nacional, departamental y municipal, se debe elaborar un reglamento y guías en detalle para la mejor aplicación y coherencia con los acuíferos que cuentan, siempre en el marco de la presente normativa y del Plan de Gestión de Sistemas de Flujos (PGSF) hacia la preservación y aprovechamiento de las aguas subterráneas.

1.3 REFERENCIAS

"Las normas bolivianas contienen disposiciones que al ser citadas en el texto, constituyen requisitos de la norma. Como toda norma está sujeta a revisión, se recomienda, a aquellos que realicen acuerdos en base a ellas, que analicen la conveniencia de usar las ediciones más recientes de las normas bolivianas citadas".

- NB 689, Instalaciones de agua – Diseño para sistemas de agua potable
- NB 689, Reglamento Nacional - "Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable". Volumen 1
- NB 496 Agua Potable – Toma de Muestras.
- NB 512 Agua potable – Requisitos
- NB 512 Reglamento Nacional para el Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.

1.4 DEFINICIONES

Para los propósitos de esta norma se aplican las siguientes definiciones. Las definiciones especializadas aparecen en los capítulos correspondientes.

2 PROCESO TÉCNICO ANTES DE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS

2.1 DEFINICIONES

- 1) El proceso antes de la construcción de pozos profundos de agua, es el conjunto de trabajos previos que determinan si se requiere o no la perforación de un pozo de agua. Además, se deben tener claras las condiciones y potencialidades de los acuíferos, siendo primordial los antecedentes previos, estudios técnicos y finalmente un análisis, evaluación y consideraciones generales, que se deben realizar.
- 2) Pozos profundos para la extracción de agua subterránea: son estructuras, dispositivos o conjuntos de ellos que permiten la explotación racional de un cuerpo o corriente de aguas subterráneas mediante pozos profundos, de forma continua, segura y sin detrimento de las condiciones hidrológicas, geológicas y ecológicas en los alrededores o aguas abajo. (NB689; se dan detalles en el Cap. 2 (2.1).

2.2 CONSIDERACIONES PREVIAS

2.2.1 Verificación de otras fuentes de agua

Verificar todas las posibles fuentes de agua en la comunidad, centro poblado y/o ciudad para un análisis de calidad y volumen disponible para su aprovechamiento. Al mismo tiempo si existiesen pozos perforados; tener un diagnóstico del pozo existente en explotación o abandonado, con un informe técnico.

2.2.2 Información Socio-económico

Realizar una recopilación de datos socioeconómicos del usuario y/o comunidad/centro poblado o Entidades Prestadoras de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (EPSA).

La persona natural y/o jurídica pública o privada debe contar con el derecho propietario o la autorización correspondiente para la ejecución de una obra.

2.2.3 Licencia ambiental

Se debe obtener o cumplir con todos los requerimientos para la obtención de las Licencias Ambientales o permisos requeridos por la Autoridad Ambiental Competente de acuerdo con normativa vigente con el objeto de preservar la integridad ambiental de los sitios, así como ejercer una visión ecológica en la comunidad.

2.3 ESTUDIOS TÉCNICOS:

2.3.1 Geomorfología

Es una de las ciencias de la Tierra que tiene su origen ligado a la Geología, dentro de la que constituye el último eslabón de los estudios estratigráficos, es decir, la fase actual de la evolución de la corteza terrestre (El Cuaternario). Estudia los rasgos del relieve y su clasificación, la proporción de rocosidad, los procesos erosivos, origen y formación de montañas, llanuras, valles, la dinámica de los procesos internos entre otros. Con lo cual se pretende conocer:

- Identificación del curso principal de agua
- Determinación del área de aporte
- Identificación de las zonas de recepción, tránsito y almacenamiento (hipsometría)
- Sinuosidad del sistema de drenaje
- Ubicación del área de la comunidad o población dentro de la cuenca

2.3.2 Hidrogeología

Es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, sus formas de yacimiento, difusión, movimiento, régimen y reservas, interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación.

Los estudios hidrogeológicos permiten determinar las variables hidráulicas del manto de agua, definir su rendimiento y calidad y los caudales óptimos de captación. Por medio de los estudios hidrogeológicos es posible definir la dirección del flujo subterráneo, las áreas de mayor aptitud para la captación, el adecuado distanciamiento entre pozos y se establecen las situaciones anómalas que podrían interferir sobre el recurso hídrico. De ese modo se asegura la sustentabilidad del acuífero, tanto en rendimiento como en calidad. Con lo cual se pretende conocer:

- La precipitación media anual de la microcuenca (lamina, Tasa de Intensidad de Precipitación – "T.I.P.", Periodo de duración- "P.D.")
- Balance Hídrico
- Identificación del tipo de Precipitación Pluvial – "P.P."
- Evaluación del Escurrimiento superficial
- Precipitación efectiva
- Se analiza el periodo de humedad de la cuenca
- Análisis de la geología local
- Referencia del tipo de formación
- Descripción de la orogenia
- Singularidades
- Sedimentología

2.3.3 Calidad de agua

Se debe tener en cuenta la calidad de agua del área antes de la perforación, a fin de verificar que cumpla con los requerimientos para resguardar el acuífero según el uso de agua previsto.

2.3.4 Edafología

La edafología estudia a fondo la composición del suelo y determina aspectos de interés técnico y arquitectónico como por ejemplo la edad de la tierra y sedimentos que lo conforman. El estudio permitirá:

Establecer en la zona de tránsito y almacenamiento la Tasa de Infiltración Básica – "T.I.B." (mm/h) y su relación con Tasa de Intensidad de Precipitación "T.I.P." (mm/h)

2.3.5 Recopilación de datos y pozos existentes

Se debe realizar los análisis en gabinete de los datos y documentos como estudios hidrogeológicos, cartas geológicas, otros estudios de geofísica, estudios socioeconómicos, entre otros. Es necesario tener un inventario, análisis y evaluación de pozos existentes en la zona y cercanos al área de perforación (enmarcados en la sub cuenca, dentro del mismo acuífero en la parte superior); además de encuestas a pobladores.

(véase **Anexo A** (Informativo) Investigación del Agua Subterránea)

2.3.6 Estudio Geofísico (Prospección geofísica)

Los estudios geofísicos son técnicas desarrolladas a partir de métodos físicos que ayudan a revelar la presencia o ausencia de cuerpos y estructuras dentro del subsuelo que no es posible ver a simple vista, pero que por sus propiedades físicas distintas al medio que les rodea logran ser detectados.

Por lo que estos estudios ayudan a:

- Identificar en el área de almacenamiento o tránsito de agua subterránea más favorable
- Realizar los estudios necesarios para garantizar la existencia de acuíferos potenciales en la búsqueda de las características más favorables estimadas en los análisis de Geomorfología, Hidrogeología, Calidad de agua y Edafología.
- Evaluar los datos, hasta la fijación del punto de perforación (véase **Anexo B** (Informativo) Estudio geofísico)

Como exigencias técnicas mínimas para la prospección geofísica se debe aplicar alguno de los siguientes métodos, utilizados en Bolivia:

- Métodos eléctricos: Sondeo Eléctrico Vertical "S.E.V." y Tomografías Eléctricas "T.E." o Sondeo Eléctrico Bidimensional "S.E.B.", aplicadas para investigaciones en sedimentos sueltos y afloramientos rocosos.
- Métodos Electro Magnéticos "E.M.": aplicados principalmente para determinar fracturas en las rocas y zonas con influencia de salinidad; se debe tener un área de medición de una hectárea por lo menos.
- Métodos sísmicos: sísmica de refracción, aplicado en sedimentos sueltos y afloramientos rocosos a través de perfiles tomográficos.

Se debe realizar los estudios en la cantidad necesaria que garantice la existencia de acuíferos potenciales.

- a) En zonas urbanas o limitantes de espacio físico, dependerá de la disponibilidad del área. Se debe complementar con información de estudios de pozos cercanos (enmarcados en la sub cuenca, dentro del mismo acuífero en la parte superior).
- b) La cantidad de ensayos para la prospección de una red de pozos de producción debe depender del área y de la cantidad de pozos a perforar.
- c) El solicitante de la construcción del pozo debe garantizar el acceso libre del tendido de líneas, para ejecutar la prospección geofísica y las mediciones.
- d) La ejecución de la prospección geofísica debe ser realizada por personal técnico titulado en geología, hidrogeología o ingenieros con especialidad en geofísica que acrediten registro en la Sociedad de Ingenieros de Bolivia "S.I.B.", con excepción de profesionales que no formen parte de la S.I.B., los cuales deberán estar inscritos en su colegio respectivo (por ejemplo Ingenieros agrónomos); y cuenten con experiencia específica certificada de tres años en trabajos similares en instituciones públicas o privadas.
- e) En la ejecución de prospección geofísica se debe usar equipos apropiados para los métodos descritos. Se debe tener preferencia por tecnología original de fabricantes reconocidos, con la respectiva certificación de la entidad del rubro.
- f) El informe técnico de prospección geofísica, debe estar firmado por el profesional responsable que ha realizado el estudio y entregar ejemplares impresos y en formato digital editable (incluyendo datos crudos), en ejemplares requeridos a la institución técnica competente (municipal, departamental, nacional); quien en un plazo según los

Términos de Referencia debe aprobar el informe o emitir revisiones y observaciones, tomando en cuenta el formato descrito (véase **Anexo C (Normativo)**; Contenido Mínimo del Informe de Estudio Geofísico), el técnico responsable de la revisión de los informes geofísicos debe certificar su experiencia en el rubro.

2.3.7 Ubicación de nuevos pozos

La ubicación del pozo es definida por las recomendaciones del informe de prospección geofísica complementado con estudios geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos del área a perforar. También se debe considerar el aprovechamiento del recurso hídrico extraído del pozo y el tipo de acuífero.

Entre la información hidrogeológica recopilada para el área de estudio se requieren datos de columnas estratigráficas, profundidad de perforación, espesores, descripciones de las unidades hidrogeológicas referenciado, rocas consolidadas o no consolidadas, variación del nivel de agua, caudal de pozo, y resultado de las pruebas de bombeo de pozos perforados cercanos al sitio de evaluación.¹³ El profesional especializado debe determinar la distancia mínima entre pozos realizando un estudio detallado de las características hidrogeológicas, geológicas y topográficas de la zona además de considerar las características hidráulicas, la localización y uso de los pozos perforados en el lugar.

El profesional especializado debe determinar la distancia mínima entre pozos en función del radio de influencia del pozo, el cual es determinado a partir de la prueba de bombeo en el pozo de producción y su respectivo control de niveles en el pozo de observación conforme a la profundidad de los mismos. Otra opción es usar los datos de pruebas de bombeo de un pozo existente para evaluar la interferencia entre cada uno de los pozos de manera preliminar, lo primordial es cuidar los acuíferos y aclarar la dirección del flujo.

Mientras no se cuente con ninguna información sobre pruebas de bombeo que determine el radio de influencia en la zona de estudio, la distancia mínima a considerar debe ser de al menos 500 m (véase NB689), si el pozo a perforar va en sentido transversal (con respecto al pozo cercano existente) a la dirección de flujo en el acuífero; y de 1000 m si va en el sentido de flujo con respecto al pozo cercano existente. En el área de construcción de un campo de pozos se recomienda la construcción de dos o más pozos piezométricos o de medición para el monitoreo.

2.4 ANÁLISIS, EVALUACIÓN Y CONSIDERACIONES GENERALES

Se debe analizar, evaluar y considerar todos los estudios y criterios vertidos para tener una determinación final de la etapa o proceso previo de la perforación del pozo.

2.4.1 Evaluación final y determinación de la necesidad de la construcción del pozo

En la evaluación final se debe determinar lo siguiente:

- Determinar si es indispensable la perforación de uno o varios pozos
- Si existen pozos perforados, según el resultado del diagnóstico y evaluación, determinar si estos son aptos para rehabilitar o se deben reutilizar como pozos de monitoreo o en definitiva se deben sellar.
- Definir el o los puntos de perforación con todas sus características técnicas e hidráulicas estimadas.

¹³ En el caso de que se requiera se deben realizar estudios adicionales "elaboración de un modelo conceptual del acuífero, a fin de ayudar en estimar las líneas de flujo" (más detalle documento de referencia PGSF del MMAyA)

3 PROCESO TÉCNICO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS

3.1 DEFINICIÓN

El proceso durante la construcción de pozos profundos, es el conjunto de todos los trabajos para la perforación de un pozo; desde los equipos, maquinarias, herramientas y materiales requeridos, personal operativo, supervisión y documentos (cronograma); que coadyuven al buen desarrollo del mismo, que se describen a continuación.

3.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA TIPOLOGÍA DE POZOS

La clasificación del pozo debe ser realizada de acuerdo al método de construcción con la profundidad y diámetro estimado del mismo, (véase tabla 1).

Tabla 1 - Clasificación al método de construcción

Tipo de pozo	Profundidad	Diámetros de encamisado
Pozo Excavado	2 m a 30 m	> a 0,80 m
Pozo Perforado con equipo Manual	3 m a 60 m	2" a 4"
Pozo Perforado con maquinaria	>10 m	>4"

Fuente: (Experiencia Programa de Desarrollo de Aguas Subterráneas en Bolivia (PRODASUB) y PROASVI / JICA)

Pozo excavado: el diámetro mínimo es de 80 cm, con dimensiones y formas diversas. Normalmente se construyen con un diámetro de 1 m. Pero por la manipulación se construyen con anillas de hormigón 0,80 m. Las profundidades comunes están entre los 2 m a 15 m.

Pozo perforado con equipo manual: el diámetro normalmente está entre 2 pulgadas a 4 pulgadas. Las profundidades generalmente oscilan entre los 5 m a 30 m., sin embargo por experiencia, existen datos previos de perforación hasta 60 m de profundidad.

Pozo perforado con maquinaria: depende del caudal requerido, del diámetro y la profundidad. El diámetro de encamisado está entre 4 pulgadas y 24 pulgadas en Bolivia. Las profundidades generalmente oscilan entre los 15 m y 500 m.

3.3 CONDICIONES PREVIAS PARA LA PERFORACIÓN DE POZOS

- El contratante de la construcción del pozo debe garantizar el acceso libre de la maquinaria y personal técnico y de fiscalización para la construcción del mismo.
- Para la perforación de pozos la persona natural y/o jurídica que solicite, debe contar con la Licencia Ambiental otorgada.
- Las actividades de perforación; desde la construcción pasando por la perforación hasta la implementación (seguir informe de geofísica, pozo piloto, registro eléctrico, ensanche de pozo o pozo definitivo, entubado de pozo, desarrollo de pozo, sello sanitario, prueba de bombeo, toma de muestra de agua e informe técnico) deben realizarse según especificaciones técnicas elaboradas en la pre inversión.
- El residente y el supervisor de obras deben ser personas capacitadas en perforación y construcción de pozos y con una experiencia mínima de 3 años en el rubro de la perforación de pozos.

Se considera que durante todo el proceso, la construcción de pozos profundos para la extracción de agua, se deben realizar los estudios, análisis, evaluaciones y consideraciones descritos a continuación.

3.12 TERMINACIÓN DEL POZO PILOTO Y/O POZO DEFINITIVO

- a) Pozo Piloto: el inicio de la construcción de un pozo se realizará con la perforación de un pozo piloto con un trepano mayor a 8 ¼ pulgadas de diámetro en caso de optar por el método de rotación.
El tiempo de perforación de los sedimentos atravesados es controlado por el perforista.
- b) Ensanche de pozo (pozo definitivo): posterior a la perforación del pozo piloto y haber realizado todas las pruebas de perfilaje eléctrico y el diseño del pozo con un resultado positivo de encontrar acuíferos potenciales, se debe proceder al ensanche del pozo según el diámetro de ademe final (encamisado del pozo).

3.13 PERFILAJE DE POZO

Una vez perforado el pozo piloto es indispensable realizar el registro eléctrico del pozo con parámetros básicos: resistividad larga 64 pulgadas, resistividad corta 16 pulgadas, rayos gamma "G.R.", potencial espontáneo "P.S." y viscosidad del fluido. Este estudio permite determinar las características físicas del pozo y diseño de entubado.

Los parámetros básicos a ser considerados en un pozo :

Resistividad corta 16 pulgas y larga 64 pulgadas: el registro de resistividad mide la resistencia eléctrica de un volumen de material bajo la aplicación directa o inducida de una corriente eléctrica. De acuerdo con el dispositivo empleado, los registros son usados para determinar la resistividad de la formación, la resistividad del lodo, la resistividad de la zona invadida, saturación de agua, resistividad de fluido, factor de formación y porosidad de la formación.

Rayos gamma natural: este registro mide la radiación natural de las formaciones, que es proporcional al contenido de arcilla. Esto debido a que los materiales altamente radiactivos tienden a concentrarse en las arcillas, las cuales responden con un alto nivel sobre las herramientas de rayos gamma, a diferencia de formaciones limpias o libres de arcilla, donde la respuesta es muy baja, excepto en los casos donde exista contaminación por agua con sales de potasio disueltas o ceniza volcánica.

Potencial espontáneo: la curva o registro de potencial espontáneo es una medida de las corrientes eléctricas (potenciales espontáneos naturales) que se producen dentro del pozo, debido al contacto entre fluidos de diferente concentración salina, como son el fluido de perforación (lodo), el filtrado de lodo y el agua de la formación, por lo tanto sólo es posible obtenerse en pozos libres (sin ademe) y llenos de un fluido conductor.

Viscosidad del fluido: la medición de la viscosidad del lodo se debe realizar mediante el método de embudo Marsh de 500 cc.

3.14 DISEÑO DE POZO

Teniendo los resultados de perfilaje eléctrico, tiempos de perforación y muestras litológicas se debe proceder al diseño del pozo.

Considerando las muestras litológicas obtenidas en el proceso de perforación y los resultados con las interpretaciones realizadas del perfilaje eléctrico (registro eléctrico del hoyo) se debe realizar una interpretación de la litología considerando las partes más permeables (estratos de arena, grava y otros) para la colocación de filtros (véase figura 4).

Nombre pozo	Ubicación	Coordenadas Geográficas		Altitud	Departamento	Provincia	Municipio	Señal	
4	Jodopampa	S17°13'03"	W6°50'21"	3.031 m	La Paz	Arocas	Potocoroya	Jodopampa	
Uso del pozo	Propósito del pozo	Coordenadas UTM (UNGS-84)		Zona y UTM					
Operativo	Producción de agua			19 m					
Fecha inicio - final	29 oct-04	Perforación:	Tipo de Equipo	Método	Estado	Profundidad	Diámetro	Diámetro de Acabado	
15 oct-04		FSW 7T	Perforación	Lodo	Lodo	Diám : 2,8 m	Perf : 90,8 m	Tub : 88,5 m	10 y 2/2 pulgadas
Tuberia de acero:	Tipo	Diámetro ext.	Diámetro int.	Tipo de junta	Ubicación de instalación				
	185 SIFG50H0	151,8 mm	121,5 mm	Soldadura		+0.5 -56,58	-60.65	-80.09	Total
Tuberia fibrosa:	Material	Diámetro	Espesor paredes	Área abierta	Tipo de junta	Ubicación ext.			
	SUS304	168,3 mm	1,0 mm	20%	Soldadura	-57.60	-65.80		Total
Relevo de grava:	Origen	Tamaño	Ubicación	Volumen usado	Desarrollo del pozo:		Método:	Duración:	Caudal:
	Catamayo	# 2-6 mm	-22.90	2,60 m ³	Nivel Estático	GL -3,36 m	Ar Máng	30 h,00 min	7,70 l/s
Bomba sumergible	Modelo	Profundidad	Consumo	Nivel Dinámico	GL -4,69 m	Bomba Sumergible	1h,00 min		6,68 l/s

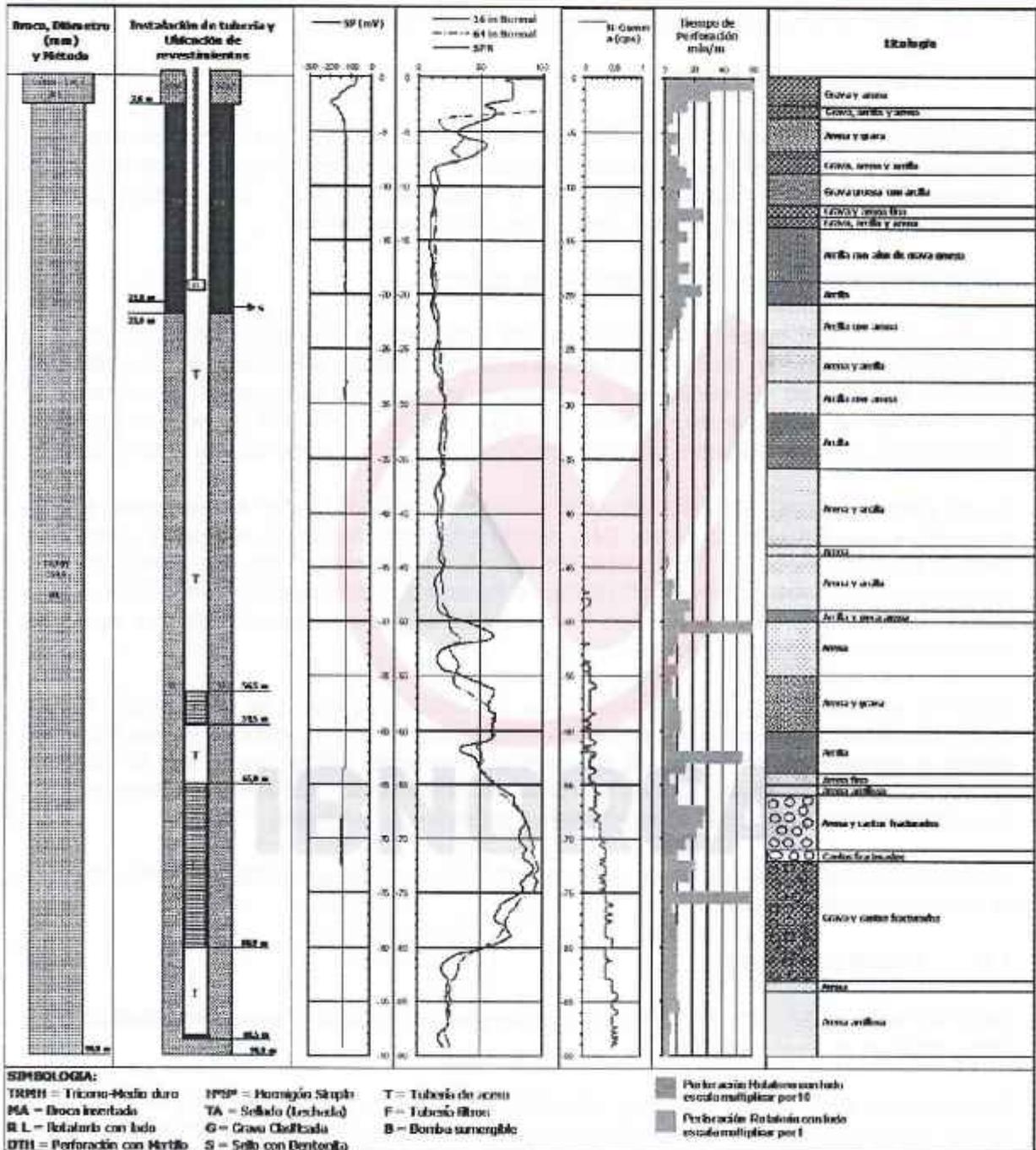


Figura 4 - Diseño de Pozo

3.15 PREPARATIVOS DE TUBERÍA DE ADEME (TUBERÍAS CIEGAS Y RANURADAS)

De acuerdo al diseño del pozo aprobado por el supervisor, se deben colocar las tuberías ciegas y filtros en orden y enumeradas para ser instaladas al hoyo perforado, desde el fondo hasta la boca del pozo.

3.15.1 Tubería ciega, encamisado o ademe

El material de revestimiento del pozo es posible que sea de: plástico, hierro forjado o con aleación, acero puro o en lingote, (véase tabla 5).

Se debe conocer las propiedades de otros materiales de revestimiento para analizar la posibilidad de utilizarlos. Al seleccionar el revestimiento, se debe considerar el factor de tensión durante el proceso de instalación, elemento corrosivo del agua y la formación del subsuelo. Si se utilizan revestimientos, se debe especificar el peso por pie de tubería que quiere utilizarse. Las uniones de los revestimientos permanentes, deben tener enhebrados los acoplamientos, ser soldados o cementados para la impermeabilización del fondo del revestimiento hasta el punto sobre la tierra.

Tabla 5 - Materiales de tubería para pozos

Material	Composición	Factor de Costo	Norma y Uso recomendado
Acero Inoxidable	74 % acero 18 % cromo 8 % níquel	1	Sulfuro de hidrogeno. Oxígeno disuelto. Dioxidito de carbono. Bacterias ferruginosas.
Acero al carbón	99,35/99,72 % hierro 0,08/0,015 % Carbón 0,2/0,5 % Manganeso Doble galvanizado	0,5	No es resistente a la corrosión. Usado mayormente para pozos temporales (pozos de prueba o de drenaje)
Hierro Galvanizado	99,35/99,72 % hierro 0,08/0,015 % Carbón 0,2/0,5 % Manganeso Doble galvanizado	0,5	No es resistente a la corrosión. Usado mayormente para pozos temporales (pozos de prueba o de drenaje)
PVC roscada	Cloruro de polivinilo	Bajo costo	ASTM F 480 Resistencia a la corrosión
CPVC roscada	Cloruro de polivinilclorado	Bajo costo	CPVC, compuesto

Fuente: Adaptado del Reglamento NB689, detalles en Cap. 2 (Tabla 3)

3.15.2 Tuberías ranuradas, rejilla o filtros

Una rejilla de pozo es un tubo ranurado que permite que el agua ingrese al pozo desde el acuífero saturado a través del empaque de grava, evitando el ingreso de sedimentos a los pozos y estructuralmente sirve para sostener el material del acuífero sin consolidar. La importancia de una rejilla de pozo apropiada no es posible sobre estimarla, cuando se considera la eficacia hidráulica de un pozo y el costo a largo plazo.

3.16 ENTUBADO DEL POZO

Es el proceso de instalación de tubos acoplados entre sí. La selección del tipo de material (PVC, galvanizado y geomecánico) del entubado debe ser elegida tomando en cuenta:

- Resistencia al colapso
- Resistencia a la corrosión

- Resistencia a esfuerzos mecánicos
- Facilidad de transporte
- Consideraciones económicas
- Métodos de perforación
- Consistencia con el diseño de filtros

Los filtros a instalarse, deben ser escogidos según las características litológicas del subsuelo y la cantidad de acuíferos encontrados. Existen varios tipos de filtros en el mercado nacional e internacional, entre los más usados están los filtros continuos (tipo Johnson), tipo persiana (Roscoe-Moss), ranurados y otros.

Existen métodos para la selección de la abertura del filtro, de modo que el profesional hidrogeólogo podrá utilizar el método que considere necesario.

Entre sus funciones, la abertura del filtro deberá permitir estabilizar el empaque de grava.

Para pozos que no requieran empaque de grava, la abertura del filtro se debe determinar mediante ensayos granulométricos.

Los pozos de producción deben ser equipados con un tubo PVC de 19,05 mm – 25,4 mm (3/4 pulgada – 1 pulgada) de diámetro interno para las mediciones del nivel de agua. Este tubo se debe instalar conjuntamente con la instalación de la bomba sumergible.

3.17 EMPAQUE DE GRAVA

El empaque de grava se debe introducir en el espacio anular entre la tubería de revestimiento (incluye filtro) y el hoyo perforado, con el propósito de estabilizar la formación.

Se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones al momento del empaque de grava:

- El material que conformará el empaque de grava debe ser estable, tanto física como químicamente en el agua.
- El tamaño de grava se seleccionará considerando los resultados del estudio granulométrico; comprendido entre 1 mm-5 mm y la proporción deberá ser de acuerdo al estudio.
- Se debe considerar la relación entre el tamaño de grava y la abertura del filtro a utilizar, debido a que la selección de la abertura del filtro deberá ser realizada para retener grava y ésta a su vez, retener el material del acuífero.
- El material debe ser introducido cuidadosamente y de manera continua para evitar la presencia de vacíos en el empaque, utilizando tubos engravadores.
- La grava seleccionada a ser utilizada, debe estar limpia y estar constituida por partículas bien redondeadas y lisas; no debe contener arcillas y materias orgánicas. No se aceptará grava seleccionada constituida de partículas no esféricas del tipo prismático o anguloso.
- Cuando el material granular existente en la formación acuífera es lo suficientemente grueso o atraviese roca compacta fracturada, no se debe considerar la colocación de empaque de grava por ser innecesario y antieconómico, salvo alguna justificación.

Detalle diseño de empaque de grava (véase Anexo D (Informativo))

3.17.1 Uso de tubo engravador

La grava se debe introducir utilizando tubos engravadores, que se colocan en el espacio anular hasta que su extremo inferior quede bajo los estratos más erosionables por el paso de la grava. Esta se introducirá en los tubos por medio de un embudo, y se deberá llevar un control de su nivel para levantar gradualmente los tubos alimentadores. Se deberá llenar con agua la tubería de grava para evitar puenteo del material en la tubería. El sistema de engravador es práctico, para poner la grava en pozos relativamente profundos (mayores a 120 m) a profundos (mayores a 300 m).

3.18 MONITOREO DURANTE EL DESARROLLO DE POZOS DE AGUA

Recopilación de datos pertinentes y evaluación de los resultados. Detalle Monitoreo, (véase Anexo E (Informativo)).

3.19 LIMPIEZA Y DESARROLLO DEL POZO

Durante la perforación se debe utilizar la menor cantidad de bentonita para evitar que se dañe el acuífero y de esta manera contribuir a una limpieza y desarrollo más efectivo.

La limpieza del pozo tiene como fin eliminar cualquier residuo de lodo u otros materiales utilizados en el proceso de perforación hasta lograr obtener agua de buena calidad y en cantidad suficiente.

El desarrollo del pozo tiene la finalidad de incrementar la conductividad hidráulica del acuífero y asegurar la eliminación de partículas finas que puedan dañar el equipo de bombeo o interferir el normal funcionamiento del pozo, éste debe desarrollarse cuidadosamente hasta lograr remover y extraer todo el material fino, arena, limo, lodo, y otros que hubiesen quedado alrededor de las rejillas del pozo.

La limpieza del pozo debe realizarse al finalizar el engravado, donde se realizará un lavado prolongado de las paredes del pozo con inyección de agua limpia con el objetivo de eliminar los posibles puentes de arena que quedaron atrapados entre la grava seleccionada y la disminución de la carga del lodo bentonítico en el acuífero. El agua utilizada no debe ser recirculada dentro del pozo profundo durante el lavado de las paredes.

Posterior a la limpieza, se debe realizar el desarrollo del pozo mediante inyección de aire comprimido por el método de retro lavado o de agitación. El objetivo es alcanzar una combinación de vaivén del agua y bombeo, al soltar repentinamente grandes volúmenes de aire se produce una poderosa agitación merced a la resistencia de la carga de agua, la fricción y la inercia, el bombeo se efectúa luego con un equipo ordinario de elevación con aire comprimido. Así mismo, en el curso del desarrollo de estos trabajos se deberán calcular los datos hidrogeológicos del pozo de agua; tales como aforos, para determinar el caudal aproximado del mismo. Después que el pozo se encuentre con agua sin color, turbidez y sin la presencia de arena, se debe seguir bombeando por 2 horas consecutivas.

El desarrollo apropiado, combinado con el mantenimiento rutinario o rehabilitación, son esenciales para asegurar que un pozo produzca a su máxima eficiencia.

Los medios más efectivos de desarrollo de un pozo son el pistoneo mecánico con doble pistón (swabbing) combinado con bombeo y limpieza con aire comprimido (pumping/air lifting).

3.20 PRUEBA DE BOMBEO ESCALONADO, CONTINUO Y RECUPERACIÓN

Una vez construido el pozo se deben realizar las pruebas hidráulicas considerando un bombeo de 24 horas a 72 horas, variación que depende del uso y propósito del pozo (doméstico, riego o industrial). Se debe utilizar el método de bombeo escalonado y caudal constante.

La prueba de bombeo tiene como finalidad determinar los parámetros hidráulicos, la transmisividad (T), permeabilidad o conductividad hidráulica (K) y la eficiencia del pozo.

Además, en la Prueba de bombeo se determina el caudal máximo de bombeo, caudal óptimo de bombeo (caudal de prueba de bombeo constante) y el caudal seguro de bombeo que es el 80 % del caudal óptimo.¹⁴

En las descargas de agua de la prueba de bombeo, deben estar canalizadas desde el punto de perforación hasta una distancia donde el agua depositada no afecte el pozo bombeado o causar algún daño al terreno y evitar crear perjuicio o incomodidad para el propietario de terrenos vecinos o propietario aguas abajo.

3.20.1 Prueba de bombeo escalonado

Iniciar con la prueba de bombeo escalonada con el fin de conocer los descensos máximos de nivel y caudal de bombeo. El rango establecido comprende entre el máximo caudal que tiene la capacidad de proporcionar el pozo y la mitad del mismo; se inicia la etapa de bombeo con el menor caudal hasta el máximo.

Esta prueba debe ser establecida con el previo conocimiento de datos obtenidos en el proceso de desarrollo del pozo, teniendo en cuenta el caudal máximo extraíble.

Además se debe tener preparado todos los equipos (bomba sumergible, piezómetro, caudalímetro o flujómetro, cronómetro, entre otros), herramientas (llaves y otros) y planillas requeridas.

Paso 1: Determinar el máximo y mínimo valor estimado del caudal.

Paso 2: Tener las planillas de la prueba de bombeo escalonada (véase tabla 6 y 7), establecer el caudal inicial – descarga (escalón 1), identificación del pozo (código o # de pozo), nombre de la prueba; nivel estático, fecha, hora, tiempos (min), abatimiento o descenso de nivel de agua en lo posible otros datos como la presión en Mega Pascal (MPa), observaciones como la temperatura del agua, pH, conductividad, salinidad, olor, color y turbiedad, y observar si bombea limo o arena. La tabla del intervalo de tiempo y otros datos:

- De 0 min a 10 min: cada 1 min
- De 10 min a 20 min: cada 2 min
- De 20 min a 60 min: cada 5 min
- De 60 min a 120 min: cada 10 min

Paso 3: Seguir hasta el cuarto o quinto escalón hasta un caudal límite, donde se pueda determinar el caudal máximo de bombeo. Es importante realizar las pruebas hasta que el nivel se estabilice en una profundidad, para luego poder cambiar de escalón o caudal. Para pruebas de bombeo escalonadas dependiendo del periodo de tiempo de bombeo (variable entre 1h y 2 h), estas deben tomar el tiempo necesario para la recuperación del nivel inicial.

14 Según Estudio de Diagnóstico y Rehabilitación de Pozos; MMAyA-JICA; Fuente: ETE, Earth Trust Engineering, 2018

Tabla 6 - Planilla de Prueba de Bombeo escalonado

POZO No 01

Nombre sitio: CAUCHI TITIRI

PRUEBA DE BOMBEO ESCALONADO

1-ESCALON

Nivel Estático del Agua (m):

11,71

Caudal (l/s):

1-Escalón : 1,81 l/s

FECHA	HORA	TIEMPO (min)	CAUDAL (l/s)	NIVEL DE Medida	NIVEL DE BOMBEO	DESCENSO (m)	PRESION (MPa)	OBSERVACIONES		
								T (°C)	PH	ßS/cm
29/9/2004	8:00	0	1,81		11,71	0,00				
	8:01	1	1,81	13,000	12,14	0,43				
	8:02	2	1,81	13,280	12,42	0,71				
	8:03	3	1,81	13,283	12,42	0,71				
	8:04	4	1,81	13,290	12,43	0,72				
	8:05	5	1,81	13,295	12,43	0,72				
	8:06	6	1,81	13,300	12,44	0,73				
	8:07	7	1,81	13,303	12,44	0,73				
	8:08	8	1,81	13,308	12,44	0,73				
	8:09	9	1,81	13,310	12,45	0,74				
	8:10	10	1,81	13,312	12,45	0,74				
	8:12	12	1,81	13,319	12,45	0,74				
	8:14	14	1,81	13,322	12,46	0,75				
	8:16	16	1,81	13,328	12,46	0,75				
	8:18	18	1,81	13,331	12,47	0,76				
	8:20	20	1,81	13,334	12,47	0,76				
	8:25	25	1,81	13,344	12,48	0,77				
	8:30	30	1,81	13,346	12,48	0,77				
	8:35	35	1,81	13,350	12,49	0,78				
	8:40	40	1,81	13,355	12,49	0,78				
	8:45	45	1,81	13,359	12,49	0,78				
	8:50	50	1,81	13,364	12,50	0,79				
	8:55	55	1,81	13,368	12,50	0,79				
	9:00	60	1,81	13,370	12,51	0,80				
	9:10	70	1,81	13,375	12,51	0,80				
	9:20	80	1,81	13,380	12,52	0,81				
	9:30	90	1,81	13,382	12,52	0,81				
	9:40	100	1,81	13,389	12,52	0,81				
	9:50	110	1,81	13,390	12,53	0,82				
	10:00	120	1,81	13,395	12,53	0,82				

Paso 4: Realizar los cálculos correspondiente para graficarlos, (véase figura 5 y 6).

Paso 5: Determinar el caudal para la prueba de bombeo constante o de larga duración.

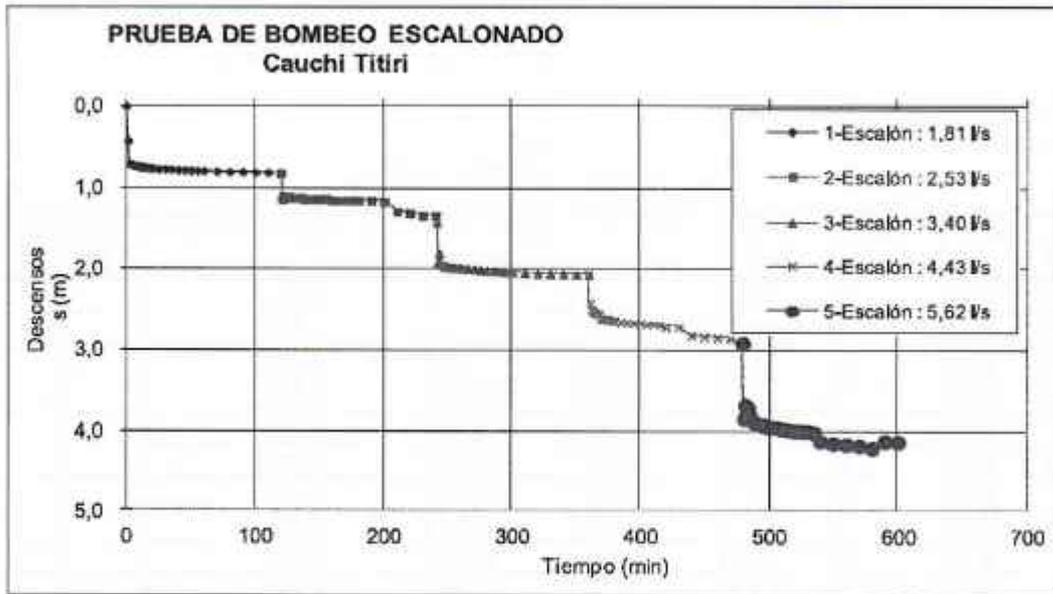


Gráfico de la prueba escalonada Tabla 7 – Resultado de la prueba escalonada

Escalón	Duración (h)	Caudal Q (l/s)	Caudal Q (m ³ /d)	Nivel de bombeo (m)	Descenso s (m)	Capacidad Específica (m ³ /d/m)
1	2,0	1,81	156,38	12,53	0,82	190,71
2	2,0	2,53	218,59	13,06	1,35	162,52
3	2,0	3,40	293,76	13,79	2,08	141,57
4	2,0	4,43	382,75	14,64	2,93	130,77
5	2,0	5,62	485,57	15,85	4,14	117,43

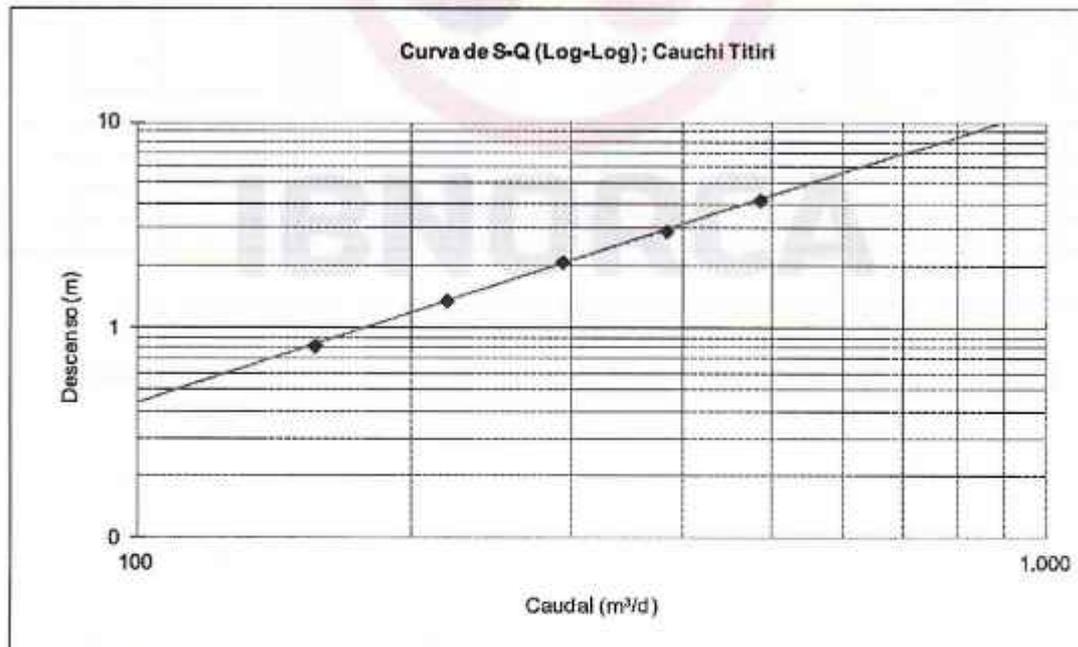


Figura 6 – Curva de la capacidad específica

Donde se determina:

Caudal máximo de bombeo	> 5,62	(l/s)
Caudal óptimo de bombeo	> 4,496	(l/s)

3.20.2 Prueba de bombeo constante o de larga duración

Una vez verificado los diferentes caudales con la prueba escalonada, se debe realizar una prueba a caudal constante de larga duración (véase tabla 8 y 9 y figura 7).

- Paso 1: medir el nivel estático inicial del pozo de donde se controlará el descenso del nivel para pruebas de bombeo escalonado y continuo.
- Paso 2: encender la bomba y comenzar a tomar los datos de descenso del nivel de agua con la sonda de nivel de acuerdo con periodos de tiempo definidos. En los primeros minutos de bombeo el abatimiento es más rápido por lo que las lecturas se deben realizar en intervalos más cortos.
- Paso 3: medir los caudales de extracción por lo menos cada hora.
- Paso 4: el tiempo de bombeo para pruebas de caudal constante es posible que varíe entre 24 h y 72 h.
- Paso 5: si existieran pozos piezométricos o de medición cercanos al área de pozo, también deben ser medidos los descensos de niveles.

Tabla 8 - Prueba de Bombeo Continuo

Pozo No 01

Nombre sitio:

CAUCHI TITIRI

PRUEBA DE BOMBEO CONTINUO

Nivel Estático del Agua (m): 11,71

Nivel Dinámico del Agua (m):

14,90

Caudal (l/s): 3,40

FECHA	HORA	TIEMPO (min)	CAUDAL (l/s)	NIVEL DE Medida	NIVEL DE BOMBEO	DESCENSO (m)	PRESION (MPa)	OBSERVACIONES		
								T (°C)	PH	SS/cm
30/9/2004	9:26	0	3,40		11,725	0,015				
	9:27	1	3,40	14,000	13,135	1,425				
	9:28	2	3,40	14,507	13,642	1,932				
	9:29	3	3,40	14,301	13,436	1,726				
	9:30	4	3,40	14,251	13,386	1,676				
	9:31	5	3,40	14,261	13,396	1,686				
	9:32	6	3,40	14,271	13,406	1,696				
	9:33	7	3,40	14,291	13,426	1,716				
	9:34	8	3,40	14,310	13,445	1,735				
	9:35	9	3,40	14,321	13,456	1,746				
	9:36	10	3,40	14,331	13,466	1,756				
	9:38	12	3,40	14,341	13,476	1,766				
	9:40	14	3,40	14,361	13,496	1,786				
	9:42	16	3,40	14,467	13,602	1,892				
	9:44	18	3,40	14,486	13,621	1,911				
	9:46	20	3,40	14,491	13,626	1,916				
	9:51	25	3,40	14,501	13,636	1,926				
	9:56	30	3,40	14,513	13,648	1,938				
	10:01	35	3,40	14,531	13,666	1,956				
	10:06	40	3,40	14,551	13,686	1,976				
	10:11	45	3,40	14,561	13,696	1,986				
	10:16	50	3,40	14,551	13,686	1,976				
	10:21	55	3,40	14,565	13,700	1,990				
	10:26	60	3,40	14,574	13,709	1,999				
	10:36	70	3,40	14,589	13,724	2,014				
	10:46	80	3,40	14,601	13,736	2,026				
	10:56	90	3,40	14,613	13,748	2,038				
	11:06	100	3,40	14,621	13,756	2,046				
	11:16	110	3,40	14,636	13,771	2,061				
	11:26	120	3,40	14,669	13,804	2,094				
	11:56	150	3,40	14,623	13,758	2,048				
	7:26	1320	3,40	14,891	14,026	2,316				
	8:26	1380	3,40	14,889	14,024	2,314				
	9:26	1440	3,40	14,896	14,031	2,321				

©IBNORCA - DERECHOS RESERVADOS

DOCUMENTO PROTEGIDO POR EL DERECHO DE PROPIEDAD INTELECTUAL
Para uso exclusivo de ING. SILVIA BEGONIA GONZALEZ

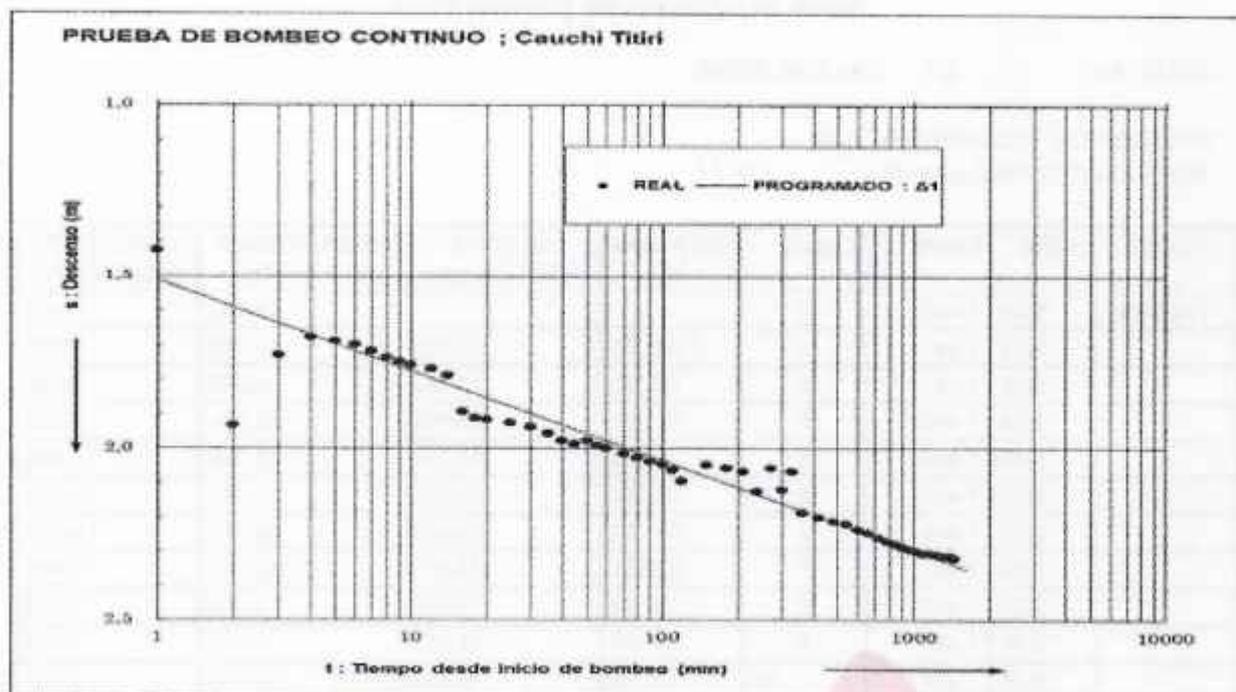


Figura 7 – Gráfico de la prueba de bombeo continuo

Tabla 9 - Cálculos de datos hidráulicos

RESULTADOS DE PRUEBA DE BOMBEO CONTINUO				
$T = 0,183Q / \Delta s$		$K = T/b$		$Q = 293,8 \text{ (m}^3/\text{día)}$
T : Transmisividad (m ² /d)		K : Permeabilidad o Conductividad hidráulica (m/d)		
Q : Caudal de descarga		Δs : Pendiente de gráfico programado		
b : Espesor de acuífero (Longitud total de filtros)				
$T = (0,183 \times 293,8) / 0,2625$		$K = 204,825740 / 21,00$		
$= 2,048E+02 \text{ (m}^2/\text{d)}$		$= 9,754E+00 \text{ (m/d)}$		
$= 2,371E+01 \text{ (cm}^2/\text{s)}$		$= 1,129E-02 \text{ (cm/s)}$		
t (min)	Δs (m)	b (m)	T (cm ² /s)	K (cm/s)
360 - 960	0,2625	21,0	2,371E+01	1,129E-02

Ver más detalles sobre prueba de bombeo en Anexo F (Informativo)

3.20.3 Prueba de recuperación

Se debe medir los niveles dinámicos de recuperación con la tabla diseñada para el efecto (véase tabla 10 y 11 y figura 8).

Una vez culminada la prueba de bombeo en el tiempo programado se procede a la medición de niveles de recuperación del pozo hasta alcanzar el nivel inicial.

Tabla 10 – Prueba de Recuperación

POZO No 01 CAUCHI TITIRI

PRUEBA DE RECUPERACION

Nivel Estático del Agua (m): 11,71

FECHA	HORA	t (min)	t' (min)	RELACION t/t'	NIVEL DE AGUA (Medida)	PROFUNDIDAD DEL AGUA (m)	ABATIMIENTO RESIDUAL (m)
1/10/2004	9:26	1.440	0	-		14,031	2,321
	9:27	1.441	1	1.441,00	13,251	12,386	0,676
	9:28	1.442	2	721,00	13,143	12,278	0,568
	9:29	1.443	3	481,00	13,096	12,231	0,521
	9:30	1.444	4	361,00	13,064	12,199	0,489
	9:31	1.445	5	289,00	13,042	12,177	0,467
	9:32	1.446	6	241,00	13,026	12,161	0,451
	9:33	1.447	7	206,71	13,011	12,146	0,436
	9:34	1.448	8	181,00	13,001	12,136	0,426
	9:35	1.449	9	161,00	12,987	12,122	0,412
	9:36	1.450	10	145,00	12,979	12,114	0,404
	9:38	1.452	12	121,00	12,963	12,098	0,388
	9:40	1.454	14	103,86	12,951	12,086	0,376
	9:42	1.456	16	91,00	12,941	12,076	0,366
	9:44	1.458	18	81,00	12,931	12,066	0,356
	9:46	1.460	20	73,00	12,923	12,058	0,348
	9:51	1.465	25	58,60	12,902	12,037	0,327
	9:56	1.470	30	49,00	12,886	12,021	0,311
	10:01	1.475	35	42,14	12,876	12,011	0,301
	10:06	1.480	40	37,00	12,863	11,998	0,288
	10:11	1.485	45	33,00	12,854	11,989	0,279
	10:16	1.490	50	29,80	12,846	11,981	0,271
	10:21	1.495	55	27,18	12,840	11,975	0,265
	10:26	1.500	60	25,00	12,832	11,967	0,267
	10:36	1.510	70	21,57	12,821	11,956	0,246
	10:46	1.520	80	19,00	12,811	11,946	0,236
	10:56	1.530	90	17,00	12,801	11,936	0,226
	11:06	1.540	100	15,40	12,783	11,918	0,208
	11:16	1.550	110	14,09	12,780	11,915	0,205
	11:26	1.560	120	13,00	12,776	11,911	0,201
	11:56	1.590	150	10,60	12,761	11,896	0,186

Una vez finalizada la prueba de bombeo y apagada la bomba, el nivel de agua comenzará a subir nuevamente. El aumento del nivel de agua es posible medirlo con una prueba de recuperación.

Si el caudal extraído no fue constante durante la prueba de bombeo, la prueba de recuperación puede ser considerada información más congruente, dado que el nivel se recupera a una tasa constante.

©IBNORCA - DERECHOS RESERVADOS

DOCUMENTO PROTEGIDO POR EL DERECHO DE PROPIEDAD INTELECTUAL
Para uso exclusivo de ING. SILVIA BARRERA BARRERA

Fecha 2021-02-03 - 10057

Las mediciones deberán ser continuas hasta que el acuífero haya recuperado el 95% de su nivel original antes de la prueba de bombeo.



Figura 8 – Gráfico del resultado de la prueba de recuperación

Tabla 11 – Cálculos de datos hidráulicos

RESULTADOS DE RECUPERACION					
Calculo de Transmisividad y Permeabilidad o Conductividad hidraulica					
$T = 0.183Q / \Delta s'$		$K = T/b$			
T : Transmisividad (m ² /d)		K : Permeabilidad o Conductividad hidráulica(m/día)			
Q : Caudal de descarga		$\Delta s'$: Pendiente de gráfico programado			
b : Espesor de acuífero (Longitud total de filtros)					
$Q = 293,8 \text{ (m}^3/\text{d)}$		$b = 21,0 \text{ (m)}$			
$T = (0.183 \times 293,8) / 0,1977$		$K = 271,951671 / 21,00$			
$= 2,720E+02 \text{ (m}^2/\text{d)}$		$= 1,295E+01 \text{ (m/d)}$			
$= 3,148E+01 \text{ (cm}^2/\text{s)}$		$= 1,499E-02 \text{ (cm/s)}$			
t' (min)		t/t''	Δ's (m)	T (cm ² /s)	K (cm/s)
6 - 40		241,00 - 37,00	0,198	3,148E+01	1,499E-02

3.21 PRUEBA DE VERTICALIDAD Y ALINEACIÓN

Esta prueba se realiza empleando una plomada de tipo cilíndrica con un diámetro de 10 mm o menor que el diámetro del revestimiento y se sujeta con un cable que debe pasar por el centro y a nivel de boca de pozo. Para lograr la centralización se emplea una guía ajustable que se coloca a 3 m por encima del extremo superior de la camisa. La desviación se toma haciendo descender la plomada hasta el fondo del pozo y midiendo el desplazamiento del cable cada 3 m, respecto a la pared interior del encamisado. La desviación puede obtenerse mediante el producto del desplazamiento del cable por la longitud total del mismo, dividiendo la distancia fija entre la guía ajustable y la boca del pozo, (véase **Anexo G** (Informativo), Procedimiento para Realizar las Pruebas de verticalidad y alineación).

3.22 PROTECCIÓN DEL POZO

3.22.1 Sello sanitario - Protector de tubería y Base soporte de bomba - Losa de Hormigón

Sello sanitario, es la inyección de material impermeable en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y el hueco de perforación hasta una profundidad que por lo menos llegue al primer horizonte de capa arcillosa; normalmente en Bolivia es mayor a 10 m (para el área rural y en zonas donde no existe contaminación de los acuíferos superficiales).

Para la ejecución del sello sanitario en el espacio anular entre tubería de revestimiento y la perforación, se debe llenar con hormigón con una dosificación de cemento, arena y grava de 1:2:2, hasta la profundidad mínima de 10 m por debajo de la superficie del terreno, donde no existe peligro de contaminación por aguas superficiales e infiltraciones, con el fin de garantizar una completa impermeabilidad.

En caso de las ciudades donde se denota la contaminación de los acuíferos superficiales y en los siguientes horizontes (hasta el tercer horizonte: aprox. 80 m), deben ser sellados hasta dicha profundidad, ya que existen zonas comprometidas con la contaminación de sus acuíferos, por la falta de saneamiento básico donde la pluma de contaminación ha llegado a una profundidad de más de 80 m. En estas zonas, se debe realizar el sello sanitario por debajo de estos niveles de contaminación para garantizar la calidad del recurso agua.

En el caso que exista peligro de contaminación por aguas superficiales e infiltradas, el sello debe prolongarse en forma tal que elimine cualquier riesgo de contaminación.

Como material para el sello sanitario: "es posible también utilizar una mezcla de bentonita, cal y arcilla, empleando 1/2 bolsa de bentonita, 1 bolsa de cal, 1 m³ de arcilla y agua en cantidad tal que permita obtener una elasticidad y fluidez para que pueda ser introducido por una tubería hasta la profundidad del sello, en el espacio anular comprendido entre las paredes y el ademe del pozo" (extracción Cap.2 (se dan detalles en 2.3.16 (3)) Reglamento Nacional de la norma NB-689).

Para mejor entendimiento (véase figura 9) del esquema del pozo terminado.

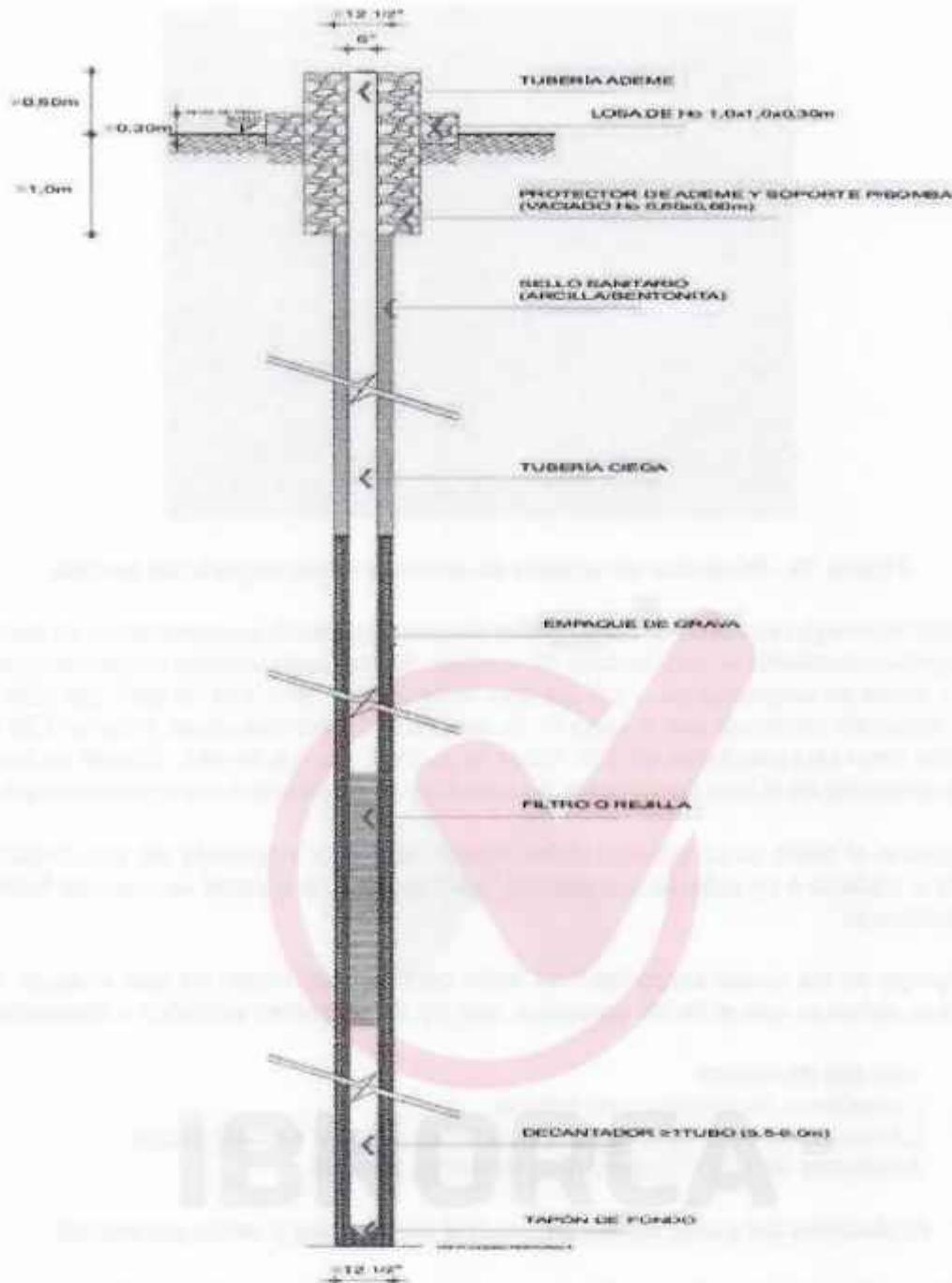


Figura 9 – Esquema de Pozo terminado

El protector de tubería de ademe y base soporte de bomba (véase figura 10), sirve para proteger el extremo superior del ademe y evitar daños directos a la tubería, cumple también la función de ser base para la instalación de las bombas sumergibles, sus dimensiones deben ser de 0,60 m x 0,60 m x 1 m por debajo del nivel del suelo y 0,60 m x 0,60 m x 0,60 m por arriba del nivel del suelo o hasta el nivel de boca de pozo, exceptuando los lugares de inundaciones que deben ser considerados mayor a ese nivel por encima del record del nivel de inundación en los últimos 100 años, cualquiera que sea mayor.

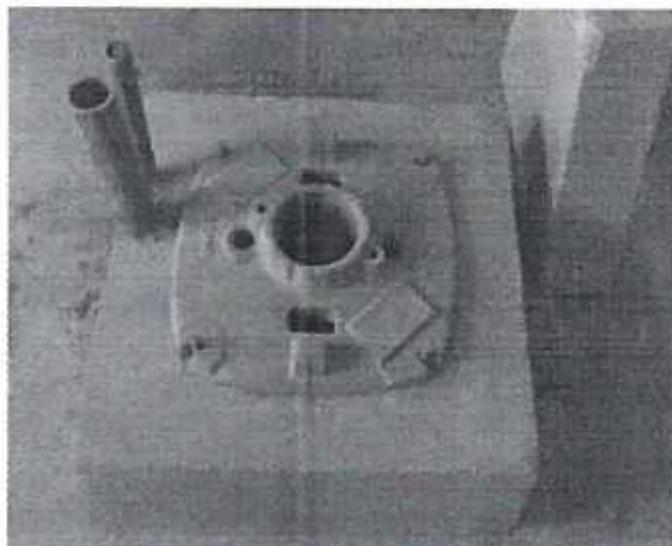


Figura 10 - Protector de tubería de ademe y Base soporte de bomba

La losa de Hormigón es para que no se infiltre el agua superficial. La terminación en superficie se completará mediante la construcción de una losa de hormigón con una mezcla de cemento, arena y grava en proporciones 1:2:3. La losa debe tener 1 m x 1 m de lado por 0,30 m de altura, debiendo sobresalir por encima de la superficie del terreno como mínimo 0,20 m. La losa debe tener una pendiente de 3 % desde el centro hacia los bordes, colocar un canal de drenaje alrededor de la losa de concreto, su descarga se extenderá a cierta distancia del pozo.

Al completar el pozo, el constructor debe instalar una tapa adecuada ya sea roscada, de pestaña o soldada o un sello de compresión, para prevenir la entrada de material foráneo al pozo terminado.

La descarga de los pozos surgentes¹⁵ se debe controlar por medio de uno o varios de los siguientes sistemas con el fin de garantizar que no se presenten pérdidas o desperdicio de agua:

- Válvulas de control
- Conexiones herméticas o de sellado
- Cementación para evitar la descarga de agua por el espacio anular
- Adaptador de flujo o regulador de descarga de agua

3.22.2 Protección del pozo, caseta de control de bombeo y cerco perimetral.

Protección del pozo (véase figura 11), en caso de que el pozo no esté ubicado dentro de una caseta, se debe construir una caja de ladrillo y/o cualquier material sólido de 1,50 m x 1 m, provisto por una tapa desmontable.

¹⁵ La descarga de agua desde pozos surgentes puede ser suprimida o reducida de manera significativa, si se toman las medidas apropiadas durante la construcción del pozo. Si una vez revestido el pozo, no ha cesado el flujo, se recomienda que este sea reducido a un 10 % del caudal. La descarga de flujo no se debe enviar al alcantarillado o a alguna fuente de contaminación.



Figura 11 - Protector del pozo

Todos los pozos deben tener tapas protectoras en boca de pozo para evitar el ingreso de objetos, líquidos, polvos y otros, externos al interior del pozo (material metálico o plástico resistente), mayor a 60 cm sobre el nivel del piso y los que tengan problemas de inundaciones deben tener más del nivel límite establecido principalmente en zonas inundables.

La construcción de la caseta de control de bombeo (véase figura 12), debe ser edificada con sobre cimientos de hormigón con dimensiones mínimas de 2,5 m x 3,0 m, con cubierta (calamina No. 28 o losa de hormigón armado) y debe estar cercada con malla olímpica, donde estará instalado el panel de control de bombeo, juegos de llaves, generador eléctrico (si no cuentan con energía eléctrica), espacio para cajas de herramientas, accesorios y libro de registro de operación, mantenimiento y reparaciones realizadas.



Figura 12 – Caseta de control de bombeo y Cerco perimetral

Cerco perimetral, se refiere a un cerco de malla olímpica que abarque el pozo y la caseta de bombeo, debiendo existir la señalización necesaria.

Para prevenir daños y accidentes en el pozo es necesaria la protección del mismo; al interior del área están prohibidas las actividades ajenas a las relacionadas a la perforación, instalaciones o depósitos de materiales u objetos que puedan contaminar el agua subterránea.

NOTA

Adicionalmente se deben considerar los siguientes criterios que **No están permitidos**, por estar totalmente fuera de la Normativa presente, mismas se muestran de manera gráfica para ejemplificar para mayor comprensión, con la finalidad de no incurrir en las mismas, en el proceso durante la construcción de pozos, y consecuentemente preservar el recurso hídrico subterráneo.

- En ningún caso la boca del pozo debe estar dentro de una cámara o por debajo del nivel del piso terminado, debe estar 0,60 m por encima del nivel del piso, (véase figura 13, figura 14, figura 15, figura 19, figura 20, figura 22, figura 23, figura 24).



Figura 13 - Pozo dentro de una cámara de Inspección (Tarlja)



Figura 14 - Pozo inaccesible dentro de una cámara con tapa sellada (Santa Cruz).

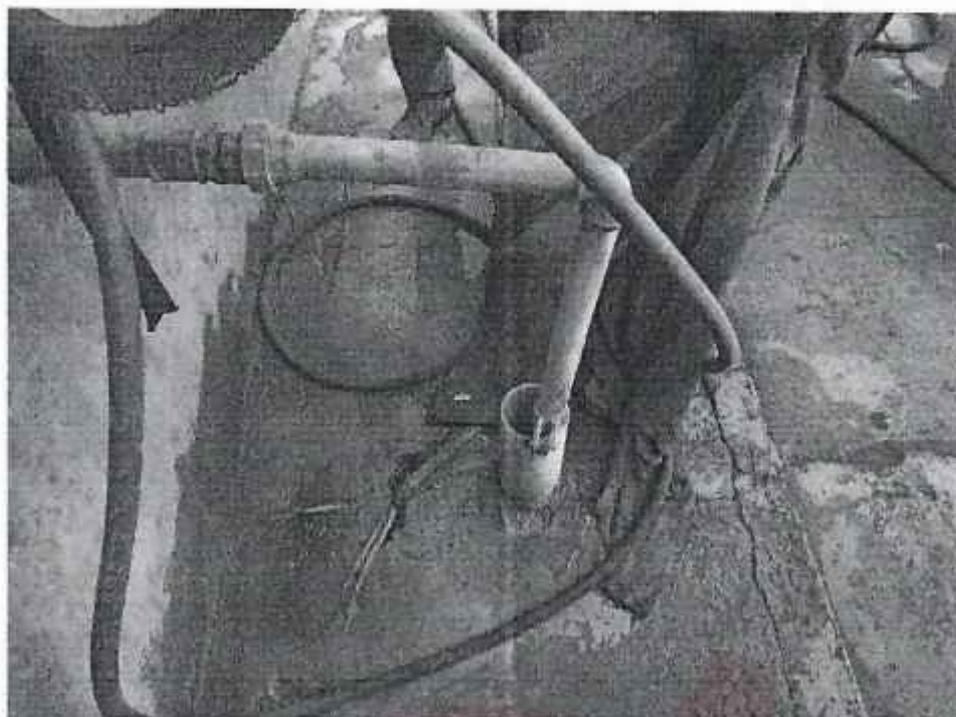


Figura 15 - Pozo sin protección de Ademe a 0,60 m sobre el piso y sin tapa (Santa Cruz)

- En caso de que se efectúen remodelaciones de la infraestructura existente en el predio, en ningún caso el pozo podrá quedar dentro de un inmueble, ya sean habitaciones de un domicilio, oficinas, ambientes con actividad productiva de industrias, depósitos, talleres, entre otros. (véase figura 14, figura 15, figura 16, figura 17, figura 18, figura 20, figura 21, figura 22, figura 23).



Figura 16 - Pozo dentro de un ambiente estéril. (Beni)

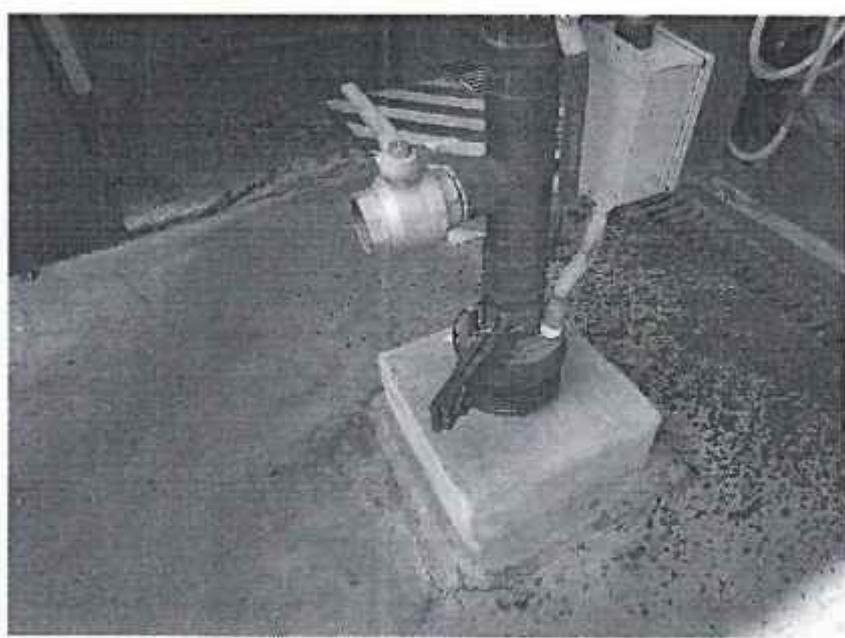


Figura 17 - Pozo dentro de un ambiente de industria (Santa Cruz)

- El pozo deberá estar ubicado en un área descubierta, de preferencia con acceso vehicular, (véase figura 14, figura 16, figura 18, figura 19, figura 20, figura 22, figura 23)



Figura 18 - Pozo sin acceso vehicular, sin tapa ni protector de Ademe. (La Paz).

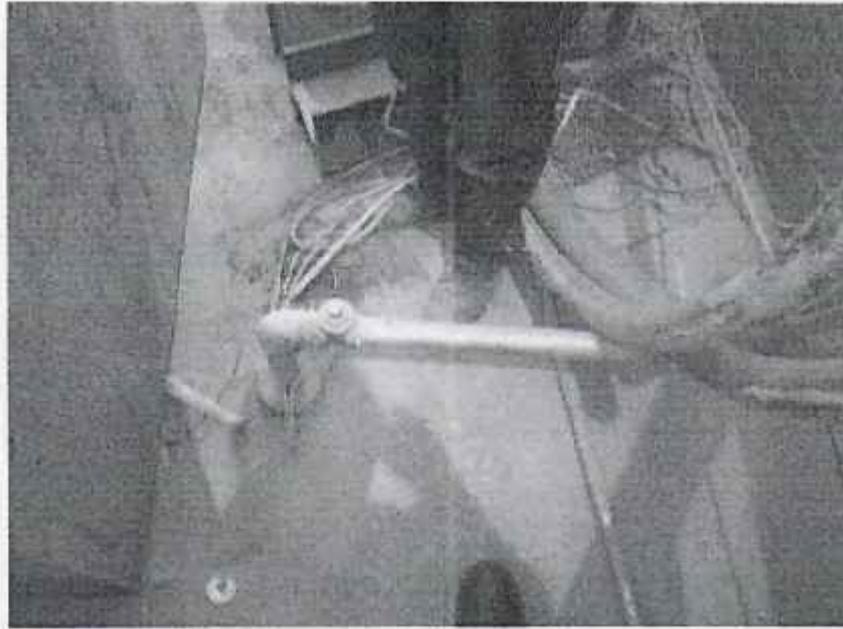


Figura 19 - Pozo dentro de ambiente cerrado, sin acceso vehicular, sin protector de Ademe. (Cochabamba)



Figura 20 - Pozo dentro de ambiente sin acceso vehicular, sin elevación, sin protector (Santa Cruz)

- Debe existir una distancia mínima de 10 m de instalaciones que conduzcan aguas residuales y/o sustancias peligrosas. Se debe guardar la misma distancia de áreas de acopio de residuos sólidos (basura), (véase figura 21, figura 22, figura 23, figura 24).



Figura 21 - Pozo rodeado de basura, sin protector de Ademe (Tarija)



Figura 22 - Pozo dentro cámara inundada con lixiviados (La Paz)



Figura 23 - Pozo rodeado de agua residual de industria metalúrgica, por debajo del nivel del piso (Oruro)



Figura 24 - Pozo en desuso, dentro de cámara de inspección inundada con agua contaminada con aceites y grasas. (Cochabamba)

3.23 TOMA DE MUESTRA DE AGUA PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA

Las muestras tomadas¹⁶ deben ser obtenidas durante la última etapa de la prueba de bombeo para realizar los análisis físicos, químicos y bacteriológicos.

El análisis del agua subterránea debe contemplar mínimamente un análisis físico-químico y bacteriológico para determinar la calidad del agua¹⁷, y deben ser realizadas por un laboratorio certificado; tal información debe adjuntarse al informe final donde indicarán el uso. Los parámetros recomendados a ser determinados son, sin ser limitativo: Oxígeno Disuelto, Temperatura, Conductividad y pH, mismos que deben ser medidos en campo. Adicionalmente se deberá determinar en laboratorio Hierro, Manganeso y el Índice de Saturación de Langelier "I.S.L.", para el cálculo del ISL se requiere los siguientes datos: pH, Temperatura del agua, Conductividad, Sólidos Disueltos Totales, Alcalinidad y Dureza (en forma de CaCO₃). Sirve para determinar si el agua es corrosiva o incrustante.

De acuerdo a los resultados del análisis de la calidad de agua del pozo, posteriormente se debe realizar un monitoreo, debido a que existe la posibilidad que los parámetros varíen según la ubicación del pozo.

Los parámetros para el monitoreo deben incluir, sin ser limitativos: sólidos disueltos totales "T.D.S.", temperatura, conductividad eléctrica "E.C", pH y oxígeno disuelto. Los resultados de la calidad del agua, evaluados a intervalos regulares (por ejemplo: semestral y/o anualmente), podrán posiblemente sugerir una condición diferente por debajo del suelo; por ejemplo, existe la posibilidad que la cubierta del pozo se haya corroído lo que hace que el agua degradada pueda ingresar al pozo; o, es posible que los cambios se deban a un problema de fuente puntual.

3.24 DESINFECCIÓN DE POZOS

La desinfección es el paso final en la terminación de un pozo. El objetivo fundamental es la destrucción total de los organismos productores de enfermedades que pudieron ser introducidos durante la perforación (introducción de tuberías, gravas, bomba sumergible, herramientas, entre otros) y el desarrollo del pozo.

Para la desinfección se debe emplear una solución de cloro. El compuesto de cloro que más se usa para la desinfección de agua, es el hipoclorito de calcio, en su presentación de HTH-Hipoclorito para Pruebas de Precisión (High Test Hypochlorite, "H.T.H.") en polvo o granulado, el cual normalmente contiene de 50 % a 70 % de cloro.

También se debe usar el hipoclorito de sodio en forma de blanqueador líquido o en polvo. Cada compuesto de cloro tiene una cantidad diferente de cloro activo.

La cantidad de cloro requerida dependerá del volumen de agua en el pozo. Se debe añadir 1 l de solución de cloro al 0,2 % por cada 100 l de agua que encuentren en el pozo. Una vez preparada la solución se debe dejar que el agua repose por 30 min como mínimo. El proceso de desinfección debe seguir los siguientes pasos:

Para introducir la solución de cloro en el pozo, es necesario retirar la bomba y algunas de sus partes.

16 Para mayor información véase la norma NB496

17 Para mayor información véase la norma NB512

Para calcular la dosis apropiada de cloro para la desinfección de un pozo se debe proceder de la siguiente manera:

Cálculo de la dosis de cloro para desinfectar un pozo usando hipoclorito de calcio (HTH)
Equipo:

- Balde de 20 l
- Cloro HTH granulado o en polvo Método:
- Calcular el volumen del agua en el pozo con la fórmula:

Donde:

$$V = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

V = volumen de agua en el pozo (m³)

D = diámetro del pozo (m)

h = profundidad del agua (m) $\pi = 3,1416$

- Llenar el balde con agua clara del pozo
- Añadir 50 g de HTH y remover hasta que se disuelva
- Por cada metro cúbico (m³) de agua en el pozo, se añadirán 10 l (medio balde) de la solución de cloro

Luego de agregar el cloro al pozo, éste deberá permanecer durante un periodo de 12 horas a 24 horas; se debe hacer funcionar la bomba hasta que toda el agua haya sido removida. Repetir el proceso hasta que la concentración medida, mediante un equipo comparador de cloro, sea menor a 0,5 mg/l de cloro residual, si la concentración llegara a ser mayor que 0,5 mg/l, extraiga nuevamente toda el agua del pozo y repita el proceso.

3.25 PRODUCCIÓN DEL POZO (VIDA ÚTIL)

La persona natural y/o jurídica, pública o privada debe tomar las acciones necesarias para garantizar el correcto funcionamiento del pozo realizando el mantenimiento que dependerá de la capacidad y calidad del pozo (calidad de agua y otros)

Se debe informar a la entidad competente (municipal, departamental y/o nacional,) sobre cualquier acontecimiento relevante que suceda con el pozo y el agua.

Los pozos que disminuyan el caudal de bombeo podrán ser usados para monitoreo por parte de la entidad competente, por lo que la persona natural y/o jurídica, pública o privada, deberá informar de cualquier pozo que ya no esté en uso (municipal, departamental y/o nacional,), asimismo permitir el ingreso de técnicos para evaluación y determinación del uso.

Si existe influencia salina o contaminación se debe sellar el pozo definitivamente, para no afectar a otros acuíferos, previo al diagnóstico.

La información recopilada debe alimentar la base de datos a nivel municipal, departamental y a su vez centralizados en una base de datos mayor a nivel nacional, a través de la entidad competente y cuyo propósito sea la gestión de recursos hídricos y la investigación.

Se debe crear un ente regulador con presencia descentralizada en cada departamento.

Se deben proteger las fuentes de agua: no solo descargas naturales de agua, sino las áreas de recargas.

3.26 PRESENTACIÓN DE INFORME FINAL Y PLANILLAS DE REPORTE DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL POZO

Una vez concluida la construcción del pozo, se debe entregar un informe final de perforación de pozo y el llenado de las planillas de reporte de acuerdo a formato (véase **Anexo H** (Normativo) y **Anexo J** (Normativo)) - Contenido mínimo del Informe de perforación de pozos).

Este informe debe ser entregado en original y digital a las entidades competentes (a nivel municipal, departamental y/o nacional), y contener un detalle de todos los ítems ejecutados, así como las recomendaciones y conclusiones sobre el trabajo.

3.27 CIERRE DEFINITIVO DEL POZO

Los pozos que dejen de ser explotados por término de su vida útil, fallas técnicas, contaminación, salinidad, entre otros, deben ser reportados a la entidad competente (municipal, departamental y/o nacional), la misma que enviará técnicos con experiencia en el rubro que verificarán el estado del pozo y determinarán el uso que se le dará en adelante.

En tanto el pozo inutilizado, debe mantener su caseta y cerco perimetral respectivo; o en su defecto que no cuente con tales protecciones, se debe construir la protección necesaria en tanto la entidad competente verifique el estado y decida el uso al cual será destinado el pozo. Los pozos que sean abandonados sin ser protegidos de manera adecuada representan un posible riesgo al acuífero y/o medio ambiente. Por tanto, se debe proceder al cerco del pozo. Los pozos que dejan de ser explotados, mientras contengan agua (bajo caudal), son muy útiles para el monitoreo de cantidad (niveles estáticos), calidad (hidroquímica), u otros fines de investigación. Por tanto, la entidad competente (municipal, departamental y/o nacional) debe analizar y determinar la utilidad que se le dará al pozo, y como último recurso se debe considerar el cierre definitivo del pozo.

Una vez que la entidad competente autorice que es necesario el cierre definitivo de un pozo (término de la vida útil, fallas técnicas y/o contaminación); se debe realizar el relleno del pozo con material impermeable compactado (por ejemplo arcilla) o bien con mortero de mezcla homogénea. En todos los casos, es recomendable la extracción de la parte superior del entubado de forma que el sello quede en contacto directo con la formación geológica.

4 PROCESO DESPUÉS DE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS

4.1 DEFINICIÓN

El proceso después de la construcción del pozo se refiere a:

- 1) Proceso de implementación del sistema de bombeo y del mismo sistema de agua y
- 2) Proceso de diagnóstico y evaluación del pozo.

Se considera que después (sistema de bombeo, operación, mantenimiento y rehabilitación del pozo) de la construcción de pozos profundos para la extracción de agua; se deben realizar los siguientes trabajos para la operación y mantenimiento:

4.2 PROCESO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

(Referirse al Reglamento de la norma NB689, Volumen 1):

- Determinación de la capacidad de la bomba sumergible/solar y/u otros requeridos.
- Construcción del sistema de agua
- Control de bombeo y registro de funcionamiento
- Mantenimiento del sistema de agua

Todos los pozos perforados por personas naturales y/o jurídicas que suministran el trabajo de instalación del pozo deberán prever la instalación de un tubo adicional (para piezómetro) de diámetro de $\frac{3}{4}$ " o 1" para en el futuro realizar mediciones de variaciones de nivel de agua cuando el pozo esté en producción.

4.3 PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE POZO MEDIANTE VIDEO INSPECCIÓN

El proceso de diagnóstico de pozo (véase **Anexo K** (Informativo)); comienza con la recopilación de datos, normalmente se requiere cuando se observa una disminución del nivel de agua del pozo, una reducción del caudal de bombeo, bombeo de limo y arena, entre otros; considerar que no sólo afecta al aumento del costo de energía, sino que conduce a una profundización de la ubicación de la bomba, ocasionando en el pozo profundo una variedad de anomalías tales como:

- a) Aumento de la velocidad de captación de agua
- b) Generación de flujo turbulento en la parte del filtro
- c) Obstrucción de la pantalla con partículas de arena fina y limo
- d) Obstrucción por incrustaciones e ingreso de limo alrededor de los filtros
- e) Hundimiento debido al bombeo excesivo por la presión de deshidratación de la capa de arcilla
- f) Incremento en el costo de energía
- g) Obstrucciones por incrustaciones por sobre bombeo dejando vacío los filtros.

Por lo tanto, el bombeo excesivo (sobre bombeo) de pozos profundos no solo induce a la caída del nivel dinámico del agua, sino varios perjuicios, por lo que es indispensable desde el punto de vista de conservación de pozos profundos operar por debajo del caudal óptimo de bombeo diseñado.

4.3.1 Monitoreo de datos

Para una buena gestión de un pozo, se deben tener registrados todos los datos del pozo como:

- a) Elaborar un registro de gestión de pozos o libro mayor de control de pozos (véase tabla 12)
- b) Nivel estático
- c) Nivel dinámico
- d) Caudal de bombeo
- e) Tipos de bombas sumergibles
- f) Ubicación de filtros
- g) Resultados de las pruebas de bombeo
- h) Resultados de calidad del agua
- i) Trabajos de reparación

j) Método de trabajo de reparación

Tabla 12 - Libro Mayor de Control de Pozos (Ejemplo)

Ej. REGISTRO DE POZOS

Sitio		Fecha Perforación			Fecha							Otros					
		Día	Mes	Año	Nombre	Caudal l/s	Nivel ND-m	Caudal m ³ /m	Tiempo min	Temperatura °C							
Tubaría	Diámetro	pulgadas			Resultado Fueba de Bombeo	N. Estático											
	Profundidad	m				1° Escalón											
	Materiales					2° Escalón											
				3° Escalón													
				4° Escalón													
				5° Escalón													
Filtros	Tipo					Nota											
	Materiales																
	Ubicación																
Bomba Sumergible	Tipo				Gráfico P. Bombeo												
	# Fabricación																
	Diámetro	pulgadas															
	Ubicación	m															
	Caudal	l/s															
	Ubicación	m															
	Potencia	kW															
Voltaje	V			*C. Totales							**C. Fecales	Nitrógeno nítrito	Nitrato, Nitrógeno nítrito	Fo y otros	Ion sodio		
Frecuencia	Hz			Bacterias							pH	Sabor	Olor	Color	Turbiedad		
Amporaje	A																
Otros																	

* Cultivos Totales

** Cultivos Fecales

Fuente: Texto Rehabilitación de pozos 2018, MMAyA-JICA

Para mantener un bombeo estable de los pozos, es importante medir periódicamente los niveles de agua tanto estáticos como dinámicos, y bombear sin causar turbulencias para que la arena fina no fluya dentro del rango del caudal determinado.

1) Nivel Estático del agua de pozo

El nivel estático o hidrostático es el nivel en que se encuentra el agua cuando no se ha iniciado la extracción del agua.

La medición del Nivel Estático se debe realizarse mensualmente y en cada cambio de estación (lluviosa y seca).

2) Nivel Dinámico del agua de pozo

Cota del agua en un pozo a ser bombeado a un caudal dado.

La medición del nivel dinámico se debe realizar mensualmente y en cada cambio de estación (lluviosa y seca).

3) Caudal de Bombeo

El caudal de bombeo se refiere al volumen de descarga o extracción de agua, medido en (l/s) o (m³/d).

Se debe medir todos los días o cuando se opera la bomba.

4) Volumen de descarga específica (Capacidad Específica)

La capacidad específica es un indicador para el diagnóstico simple de la productividad del pozo. Es la relación entre el caudal extraído de un pozo y el descenso del nivel dinámico. Se expresa en unidades (l/s/m).

Si este indicador baja un 20 % es apto para realizar el diagnóstico, mantenimiento y/o rehabilitación del pozo; si baja al 50 % normalmente no existe posibilidad para su recuperación.

4.3.2 Diagnóstico de un Pozo

El diagnóstico del pozo profundo (véase en **Anexo K (Informativo)**; figura K.1), Flujograma del Diagnóstico.

El diagnóstico del pozo se realiza si presenta anomalías en el volumen de bombeo, niveles de agua, entre otros; comparados con datos de la etapa inicial (del momento de la construcción o rehabilitación del pozo).

4.3.2.1 Diagnóstico del Volumen de bombeo y el descenso de Niveles de agua

Con el diagnóstico del pozo se verifica si existe una reducción de la capacidad específica mayor (al 80 %) al nivel estándar.

- 1) Cuando la capacidad específica no haya disminuido y el volumen de bombeo haya bajado: son problemas en el sistema de bombeo, se debe revisar la bomba, tubería de impulsión y si existe falla en el medidor, debe haber una previa verificación del voltímetro, amperímetro y resistencia de aislamiento en el panel de control.
- 2) Cuando la capacidad específica va disminuyendo es debido a problemas en el pozo, incrustaciones, corrosión, roturas en el ademe entre otros; para un mejor entendimiento del problema se debe aplicar el flujograma de diagnóstico de pozo profundo (véase figura K.1).

4.3.2.2 Diagnóstico de escorrentía de arena fina

Cuando existe el ingreso de arena fina y/o limo, los pozos se colapsan, debido al desgaste de la bomba sumergible se reduce la capacidad de bombeo; produciendo la obstrucción del acuífero y de los filtros, entre otros.

4.3.3 Preparativos de los equipos, herramientas e instalaciones requerida incluyendo el personal capacitado

Antes de iniciar el trabajo se deben confirmar los equipos necesarios bajo un check list (cámara, trípode, guinche, video reproductor, cables, piezómetros, caudalímetros, hojas de registro y toma de lecturas, parasol y otros necesarios).

NOTA

Lavar la herramienta de perforación, así como el equipo que se introduzca en el pozo en las distintas operaciones de mantenimiento con permanganato de potasio o de cloro

4.3.4 Preparativos del pozo (libre de bomba y espacio necesario)

Para la inspección con cámara, el pozo debe estar libre de cualquier objeto, bomba sumergible u objetos caídos. En el sitio, se deberá tener el espacio para bajar la cámara de video inspección y área para la instalación de la cámara con su guinche y control.

4.3.5 Instalación del equipo

El Guinche y tablero de control deben ser debidamente nivelados y el cable debe estar centrado y ajustado para que la sonda con las cámaras (frontal y lateral) ingrese al centro del pozo, (véase en **Anexo K (Informativo)**; figura K.2).

4.3.6 Proceso de video inspección

Para iniciar la grabación se debe configurar el Tablero de Control, con la fecha, hora, sitio y otros datos, (véase en **Anexo K (Informativo)**; figura K.3 y K.4 y **Anexo L (Informativo)**),

4.3.6.1 Grabación

Una vez verificada la profundidad inicial (0,0 m.); se debe proceder con el bajado de la cámara, observando los puntos críticos o factibles de deterioro, como juntas, filtros (véase **Anexo K (Informativo)**; figura K.5).

4.3.6.2 Toma de imágenes

Cuando existen algunas anomalías se recomienda tomar también las fotografías para guardarlas como imagen que servirán para el informe del diagnóstico.

4.3.6.3 Verificación de puntos

Una vez terminada la toma de video inspección, y cuando la cámara esté en lo más profundo del pozo inspeccionado, se deben verificar los siguientes datos y archivos:

- 1) Que los datos tomados estén guardados
- 2) Que no existan errores de profundidades
- 3) Que las imágenes de cada unión o soldadura estén debidamente almacenadas.
- 4) Donde no sea posible observar las uniones, se deben tomar intervalos iguales
- 5) Tomar en cuenta todas las irregularidades de los ademes y filtros

4.3.7 Análisis y evaluación

Concluidos los trabajos de campo, se debe proceder en realizar el ordenamiento de las imágenes y videos, la edición se debe realizar en gabinete (véase **Anexo K (Informativo)**; figura K.6).

4.3.7.1 Análisis del estado de los filtros y tubería ciega, uniones y puntos críticos

En general se observa el estado inicial del ademe (filtros y tubería ciega), con las profundidades y la descripción del estado y forma del material instalado, posibles incrustaciones y bacterias presentes en los filtros especialmente.

4.3.7.2 Evaluación del estado del pozo

Con las observaciones realizadas anteriormente, se debe evaluar el estado del pozo en cada punto y profundidades; para tener un diagnóstico general del pozo. Además se debe tomar en cuenta la calidad del agua del pozo.

4.3.7.3 Determinación de la factibilidad de rehabilitación del pozo

Finalmente, de acuerdo a la evaluación se determinará la factibilidad de la rehabilitación o no del pozo.

Es importante en este punto el análisis económico para verificar si el costo beneficio es positivo. Se debe determinar qué método de rehabilitación es recomendable, cuánto tiempo y quiénes tienen la capacidad de realizarlo.

En caso de que la rehabilitación no sea posible, por razones de deterioro excesivo de los filtros y ademe, se debe realizar el sellado definitivo del pozo (véase detalle de sellado definitivo del pozo en el punto 4.5).

4.4 REHABILITACIÓN DEL POZO

4.4.1 Definición

Para fines de la presente normativa se entiende como rehabilitación del pozo al proceso de mejorar las funciones y el rendimiento del pozo, es decir mejorar la capacidad específica de bombeo, o mejorar el caudal de bombeo a una tendencia hacia al caudal inicial del momento de la construcción del pozo.

Como regla general, si la capacidad específica se ha reducido en un 50 %, las posibilidades de restaurar completamente el pozo a su capacidad específica original son escasas. Normalmente una rehabilitación se debe realizar cuando la capacidad específica ha reducido un 20 %.

4.4.2 Métodos de rehabilitación

Se requieren trabajos de rehabilitación: si el caudal de bombeo ha disminuido, si el nivel dinámico del agua se reduce o si la calidad del agua cambia y se considera que los filtros del pozo están bloqueados. En tal caso, se debe investigar el interior del pozo con una cámara sumergible, si se confirma la obstrucción de los filtros, se deberá realizar el trabajo de rehabilitación con los métodos comunes descritos a continuación.

- 1) Método de cepillado
- 2) Método de pistoneado
- 3) Método de limpieza de tipo inverso
- 4) Método con tratamiento químico
- 5) Método de inyección de agua con alta presión (Jetting) y compresorado

En muchos casos, estos métodos se combinan (véase en **Anexo K** (Informativo); figura K.7, K.8, K.9, K.10, K.11 y K.12).

4.4.2.1 Método de cepillado

Un método que consiste en mover axialmente un cepillo de alambre (u otro material) un poco más grande que el diámetro interno de la tubería, raspando y eliminando las incrustaciones en los filtros y la superficie de la tubería.

4.4.2.2 Método de pistoneado

Considerando la tubería como un cilindro, es un método para descender una herramienta similar a un pistón, colgada con un cable o cañería, aumentando la fluctuación del agua

mediante el movimiento axial para eliminar las incrustaciones y los granos de arena alrededor de los filtros. Existe peligro de rotura si los filtros y tubería ciega están corroídos o deteriorados considerablemente.

4.4.2.3 Método de lavado inverso

Este método consiste en la inyección de agua a las formaciones acuíferas, a través de un cilindro metálico con perforaciones laterales, de una longitud de 1 m y acoplado al tallo de perforación. La presión del agua es generada por la misma bomba de lodo que en la etapa de perforación. Este proceso se inicia desde el fondo del pozo hacia arriba y en los ademes ranurados.

4.4.2.4 Método con tratamiento químico

Es un método para el tratamiento del pozo, con productos químicos a base de ácido clorhídrico o ácido sulfámico, o algún producto que disuelva el hierro (Fe) y manganeso (Mn), precipitados, solucionando la obstrucción e incrustaciones en el ademe ranurado. Estos tratamientos proporcionan una solución, generalmente de carácter temporal, pues después de un lapso de tiempo variable, el fenómeno se repite y el pozo requerirá de un nuevo tratamiento.

Otros productos utilizados son los polifosfatos como dispersantes de arcilla y bacterias ferruginosas. También el cloro se deposita activo al agua del pozo, con objeto de que mate las bacterias y elimine el limo orgánico asociado. La acidificación también mata las bacterias, pero no elimina el limo orgánico.

4.4.2.5 Método de inyección de agua con alta presión (Jetting) y compresorado

Es un método que se inyecta agua con alta presión y compresorado simultáneo desde el interior hacia el exterior de los filtros para eliminar las incrustaciones, eliminando las obstrucciones, para ejecutar este método se requiere adicionalmente una bomba de agua a presión (capacidad de 30 MPa).

Este método es el más efectivo que fue desarrollado y patentado por Earth Trust Engineering (ETE-Japan) y es utilizado para la rehabilitación de pozos de agua.

4.4.3 Pasos para elaborar un Plan de rehabilitación

Con los datos de monitoreo y una vez realizado los trabajos de diagnóstico y rehabilitación de los pozos, se obtiene los resultados de la prueba de bombeo antes y después de la rehabilitación, teniendo una frecuencia de obstrucciones e incrustaciones de los filtros donde están los aportes de agua en el pozo; con los cuales se determina la frecuencia de rehabilitación de pozo. Cada pozo es diferente por lo que su plan de rehabilitación debe ser particular para cada pozo (véase en Anexo K (Informativo); figura K.13, K.14 y K.15).

Es de suma importancia tener lo siguiente:

- 1) Datos hidráulicos del momento de la construcción del pozo.
- 2) Datos de monitoreo por lo menos 2 veces al año.
- 3) Datos de rehabilitación del pozo, fechas, métodos utilizados y sus resultados

4.5 SELLADO DEFINITIVO DE POZO

Una vez que la entidad competente autorice que es necesario el cierre definitivo de un pozo (término de la vida útil, fallas técnicas y/o contaminación), se debe realizar el sellado del pozo con material impermeable (p.e. arcilla) compactado o bien con mortero de mezcla homogénea. En todos los casos es recomendable la extracción de la parte superior del ademe de forma que el sello quede en contacto directo con la formación geológica.

Las perforaciones exploratorias, pozos de prueba, pozos parcialmente terminados y pozos abandonados deben ser selladas.

El principio guía a seguir en el sellado de pozos abandonados es la restauración, hasta el punto que sea factible, de las condiciones geológicas que existían antes de realizar la perforación exploratoria o el pozo.

Se deberán sellar los pozos por las siguientes razones:

- 1) Para eliminar riesgos físicos.
- 2) Para evitar la contaminación del agua subterránea.
- 3) Para conservar el rendimiento y la cabeza hidrostática de los acuíferos.
- 4) Para evitar la mezcla de aguas.

4.5.1 Requisitos de sellado

En los casos en que el pozo extraiga agua de varias capas acuíferas, y se disponga de información sobre la situación de estas capas, la clausura definitiva del pozo debe realizarse en base a la columna litológica del pozo o disposición vertical de las capas acuíferas. Antes de iniciar las operaciones de sellado, se debe medir la profundidad y revisar si hay obstrucciones en el pozo.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- 1) Retirar la tubería de revestimiento
Retirar la tubería de revestimiento de algunos pozos es necesario para asegurar la colocación de un sello efectivo.
- 2) Excepción al retiro de la tubería de revestimiento
Si la tubería de revestimiento no es posible retirarla, es necesario realizar la perforación de la tubería para asegurar el sellado apropiado requerido.
- 3) Materiales de sellado y colocación
Entre los materiales de sellado de pozo se consideran: concreto, lechada de cemento, bentonita o arcilla entre otros; deben ser colocados de abajo hacia arriba con métodos que eviten la segregación o dilución del material.

Llenar el pozo con materiales sólidos inertes (agregados), desde el fondo hasta 1 m por debajo del primer estrato del acuífero, para lograr una reconstitución del terreno hasta un estado similar a las condiciones geológicas originales. Esta acción sólo se podrá llevar a cabo cuando el diámetro sea superior a 2 pulgadas. El tamaño de las partículas siempre deberá ser inferior a $\frac{1}{4}$ del diámetro del pozo. El material no tiene que estar contaminado y debe ser geoquímicamente inerte en contacto con el agua subterránea o con los materiales geológicos presentes. Es necesario hacer un seguimiento de la operación de llenado para controlar que no se produzcan puentes.

- 4) Registro de los procedimientos del sellado
Se deben mantener registros completos y precisos del procedimiento del sellado en su totalidad.
- 5) Profundidades selladas
La profundidad de cada capa de todos los materiales del sellado y de relleno debe ser registrada.
- 6) Cantidad de material de sellado utilizado
La cantidad de materiales de sellado que se utilizan, debe ser registrada.



6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABRAMSON L. W. Engineering geology Principles. *Slope stability and stabilization methods*. Wileyinterscience, 1996, pp. 60-106
- [2] ALLEY, W.M., Flow and Storage in Groundwater Systems, 2002. Science pp. 296, 1985–1990. Disponible en <https://doi.org/10.1126/science.1067123>
- [3] CARRILLO-RIVERA, J.J., CARDONA, A., HUIZAR-ALVAREZ, R., GRANIEL, E. *Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico*, 2007. Environ. Geol., pp. 55, 303–319. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1005-2>
- [4] JICA, ETC. SUMIKO JAPAN. *Estudio de Desarrollo de Aguas Subterráneas en Áreas rurales de la República de Bolivia; Informe Final*, Junio de 1996
- [5] JICA, KYOWA.- JAPAN. *Estudio sobre el Proyecto de Suministro de Agua Potable en Aéreas rurales de los Departamentos de Beni y Pando en la República de Bolivia; Informe Final*, Febrero de 2009.
- [6] FAGUNDO SIERRA, R., SÁNCHEZ SAÍNZ, A., PÉREZ JÁUREGUI, J. *Resistencia in vitro de aislamientos clínicos de Mycoplasma hominis y Ureaplasma urealyticum en México*. 2006. Bioquímica pp. 31.
- [7] FAGUNDO, J.R., GONZÁLEZ, P., PEÑA, B., FAGUNDO-SIERRA, J., SUÁREZ, M., MELIÁN, C., N.D. *Origen y composición química de las aguas minerales sulfuradas de Cuba. Su relación con el medio ambiente geológico*, pp. 19.
- [8] ROSCOE MOSS COMPANY. *Handbook of Ground Water Development*, [Manual de Desarrollo de Aguas Subterráneas], 1990, JOHN WILEY AND SONS, New York, NY. *Memorándum técnicos varios*.
- [9] PRODASUB – JICA. *Informe de Estudio de Diseño Básico Fase III (La Paz-Potosí)*, 2003.
- [10] JICA, MMAYÁ, 9 PREFECTURAS. *Informe de Evaluación Final e Inicio del Proyecto Agua es Salud y Vida, Fase 2*, Marzo de 2008.
- [11] JICA, MMAYÁ y 9 GOBERNACIONES. *Informe de Evaluación Final, Proyecto Agua es Salud y Vida, Fase 2*, Septiembre de 2011.
- [12] KNUEPPE, K., PAHL-WOSTL, C., VINKE-DE KRUIJF, J. *Sustainable Groundwater Management: A Comparative Study of Local Policy Changes and Ecosystem Services in South Africa and Germany*. *Environ. Policy Gov.*, pp. 26, 59–72. Disponible en <https://doi.org/10.1002/eet.1693>, 2016.
- [13] MACKENZIE, F.T., GARRELS, R.M., BRICKER, O.P., BICKLEY, F., *Silica in Sea Water: Control by Silica Minerals*. Science pp.155, 1404–1405. 1967. Disponible en <https://doi.org/10.1126/science.155.3768.1404>
- [14] MANTUA, N.J., HARE, S.R., ZHANG, Y., WALLACE, J.M., FRANCIS, R.C., 1997. *A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production*. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78, 1069–1079. Disponible en [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:APICOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2)
- [15] SERGEOMIN Servicio de Geología y Minería, *Mapa Geológico de Bolivia* 2000.
- [16] IBNORCA. Norma Boliviana NB 689, Instalaciones de agua – Diseño para sistemas de agua potable. Segunda revisión, ICS 91.140.60. Diciembre 2004
- [17] IBNORCA. Norma Boliviana NB 689 “Reglamento Técnico de Diseño de Pozos profundos para Sistemas de Agua potable, 2da revisión. Diciembre 2004, pp. 99-122
- [18] IBNORCA. Norma Boliviana NB 689, Reglamento Nacional - “Reglamentos Técnicos de Diseño de Estaciones de Bombeo para Sistemas de Agua Potable”. Volumen 1, pp. 211-248
- [19] IBNORCA. Norma Boliviana NB 496 Agua Potable – Toma de Muestras. Primera revisión, 2005
- [20] IBNORCA. Norma Boliviana NB 512 Agua potable – Requisitos
- [21] IBNORCA. Norma Boliviana NB 512 Reglamento Nacional para el Control de la Calidad

- del Agua para Consumo Humano
- [22] ICONTEC. Norma Técnica Colombiana; Pozos Profundos de Agua- NTC 5539, 2007- 11-16, pp. 37-46
- [23] PARKS, K.P., TÓTH, J. *Field Evidence for Erosion - Induced Underpressuring in Upper Cretaceous and Tertiary Strata, West Central Alberta, Canada. Bull. Can. Pet.* 1995. Geol. pp. 43, 281–292
- [24] PEÑUELA-ARÉVALO, L.A., CARRILLO-RIVERA, J.J. *Discharge areas as a useful tool for understanding recharge areas, study case: Mexico Catchment. Environ. Earth Sci.*, 2012, pp. 68, 999–1013. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1803-z>
- [25] JICA - ETC - Japan. *Plan Maestro de Desarrollo de Aguas Subterráneas en Áreas Rurales de Bolivia*; 1996
- [26] POSTEL, S. *Pillar of sand: can the irrigation miracle last*, 1st ed. *Environmental alert series*. W.W. Norton & Co, New York, 1999
- [27] W.W. Norton & Co, New York, 1999
- [28] MMAYA-JICA-KEC- JAPAN. *Proyecto de Suministro de Agua Potable en Áreas Rurales de Los Departamentos de BENI y PANDO*, Vol. 2, Estudios Geofísicos, 2015
- [29] MMAYA-JICA-KEC-ESS- JAPAN *Proyecto de Suministro de Agua Potable en Áreas Rurales de los Departamentos de Chuquisaca y Santa Cruz*, 1998
- [30] RAMIRO SUAREZ S. "Compendio de Geología de Bolivia", YPFB Vol. 1, N° 1-2, 2000 UMSA *Revista de Geociencias* Vol. 1, N° 1, 1977
- [31] ROSCOE MOSS COMPANY: *Memorándum técnico 006-3. Monitoreo durante el desarrollo de pozos de agua: Recopilación de datos pertinentes y evaluación de los resultados*
- [32] ROSCOE MOSS: *Company Memorándum Técnico 005-7 Monitoreo del contenido de arena El contador de arena Rossum*
- [33] SAHAGIAN, D.L., JACOBS, D.K., SCHWARTZ, F.W. *Sea - level rise. Nature* pp. 369, 616– 616. , 1994. Disponible en <https://doi.org/10.1038/369616a0> STANLEY. DAVIS & ROGER J. M. DE WIEST. *Hydrogeology*, 1971
- [34] JICA. *Texto de Desarrollo de Aguas Subterráneas en Bolivia; Informe Agua Subterráneas ASVI 2*, Diciembre 201
- [35] JICA - MMAYA Y 9 GOBERNACIONES. *Textos de Capacitación del Programa "ASVI-2, Agua es Salud y Vida, Fase 2" en Bolivia*, 2006-2011
- [36] JICA. *Textos de Capacitación del Programa de Desarrollo de Aguas Subterráneas en Áreas Rurales de Bolivia; Hidrogeología- Geofísica*, 1998
- [37] TÓTH, J. A. *Theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Canada. J. Geophys.* 1962, pp 67, 4375–4388. Disponible en <https://doi.org/10.1029/JZ067i011p04375>
- [38] TÓTH, J. A. *Theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins*, 1963. *J. Geophys.* pp 68, 4795–4812. Disponible en <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>
- [39] TÓTH, J. *Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. Hydrogeol. J.* 1999, pp. 7, 1–14. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s100400050176>
- [40] TÓTH, J. *Hydraulic Continuity In Large Sedimentary Basins. Hydrogeol. J.* , 2012, pp. 3, 4–16. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s100400050250>
- [41] ZONISIG – DHV Consultores-ITC, *Zonificación Agroecológica y Socioeconómica de la Cuenca del Altiplano del Departamento de La Paz. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación-Prefectura del Departamento de La Paz*, 1998.

7 ANEXOS

Anexo A (Informativo)

Investigación del Agua Subterránea

A.1 INVESTIGACIÓN DEL SUELO Y DEL AGUA SUBTERRÁNEA

(1) Generalidades

Para la investigación del suelo y del agua subterránea, existen muchos métodos que nos proveen información en diferentes casos; utilizando conjuntamente conceptos y técnicas de hidrología superficial y subterránea.

En la actualidad las investigaciones en aguas subterráneas son exitosas, especialmente en resultados con estudios hidrogeológicos completos. Sin embargo los métodos geológicos, involucran interpretación de datos y de reconocimiento de campo, estos representan un primer paso primordial en cualquier estudio de agua subterránea.

Los estudios geológicos permiten estimar rápida y económicamente grandes áreas sobre una base preliminar; acerca de su potencialidad para el desarrollo del agua subterránea.

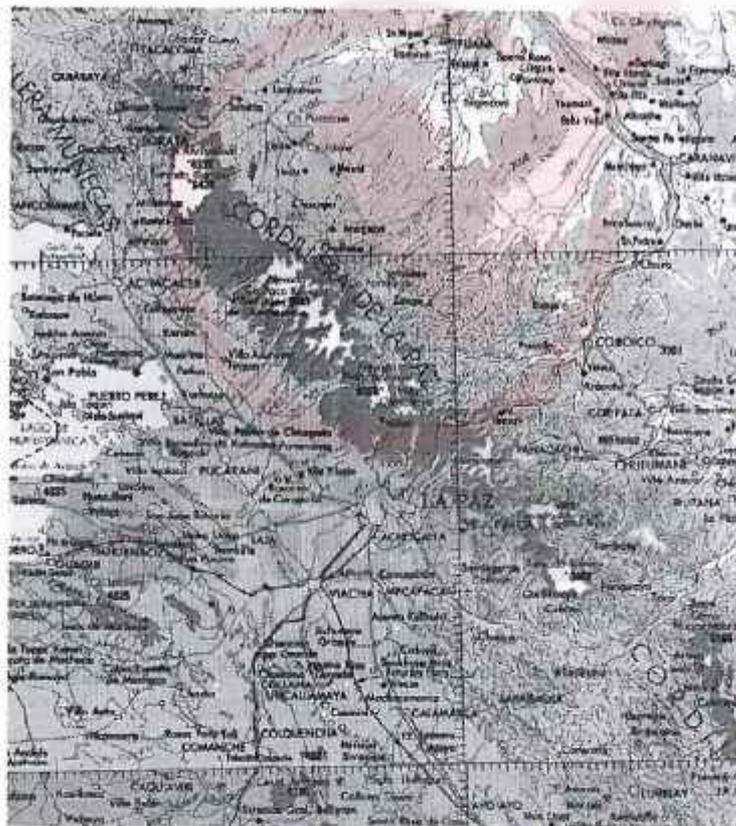


Figura A.1 - Mapa topográfico (GEOBOL)

Una investigación geológica comienza con la recolección, análisis, e interpretación hidrogeológica de mapas topográficos, geológicos existentes, fotografías aéreas y registros, así como otras investigaciones relacionados. Esto sería complementado, por reconocimiento

geológico de campo y por la evaluación de datos hidrológicos disponibles sobre; flujos de ríos y manantiales; rendimientos de pozo; recarga, descarga y calidad del agua subterránea.

(2) Análisis de mapas

Es el tipo de materiales geológicos y la topografía de la superficie de la Tierra en un área de influencia de la localización de agua subterránea. Los mapas topográficos proveen información sobre el tamaño, forma y distribución de las características sobre la superficie de la tierra, la localización de lagos, pantanos y ríos, así como información cultural considerable; la localización de construcciones, vías férreas y carreteras, (véase la figura A.1). Las elevaciones en los mapas son aptas para ser usadas para construir una sección de perfil (curvas de nivel) que indiquen áreas elevadas y bajas en la región de interés. La vegetación también es mostrada y es capaz de indicar dónde existe agua subterránea cerca de la superficie, especialmente en climas áridos.

La densidad (estrechez) de los ríos y el patrón del drenaje de superficie generalmente sugiere dónde ocurre la infiltración y también es posible revelar ciertas características estructurales como fallas, pliegues o sistemas de uniones.

Los mapas topográficos son usados por la persona natural y/o jurídica que suministra el trabajo y materiales para la perforación e instalación del pozo, porque ellos indican la naturaleza del terreno, la presencia de ríos, manantiales, y lagos, además de la localización de carreteras, construcciones, y vías férreas.

Los mapas geológicos indican la naturaleza de los materiales consolidados que componen el área que está siendo investigada, estos muestran el tipo de roca y distribución de las estructuras geológicas. También están disponibles tipos específicos de mapas geológicos, que muestran la localización de las formaciones y los contornos estructurales de los materiales geológicos subterráneos. La distribución de los diferentes tipos de rocas sobre el mapa geológico está mostrada por colores o patrones, líneas de fallas, contactos entre tipos de rocas, y otras fracturas en la roca son indicadas por líneas. Muchos mapas geológicos tienen secciones en columna que muestran; varias formaciones de roca, su anchura, y su relación estratigráfica con otras formaciones. Los hidrogeólogos evalúan estas columnas estratigráficas según su potencial de rendimiento de pozos de agua. Todas las formaciones saturadas son clasificadas como acuíferos o acuitardos (acuíferos no aprovechables).

Los mapas hidrogeológicos son similares a los mapas geológicos; en ambos se muestran los tipos de rocas, (véase la figura A.2). En terrenos glaciados (nevados), por ejemplo, se indica la localización de lechos de roca enterrados. Estos son particularmente buenos sitios para la ubicación de pozos de alta-capacidad, pues capas gruesas de arena y grava están a menudo presentes. En otros casos, se presentan las características hidrológicas de fallas (geológicas). Normalmente la superficie potenciométrica de superficie determina cada acuífero. El corte transversal también proporciona y establece una vista excelente en profundidad de los acuíferos.

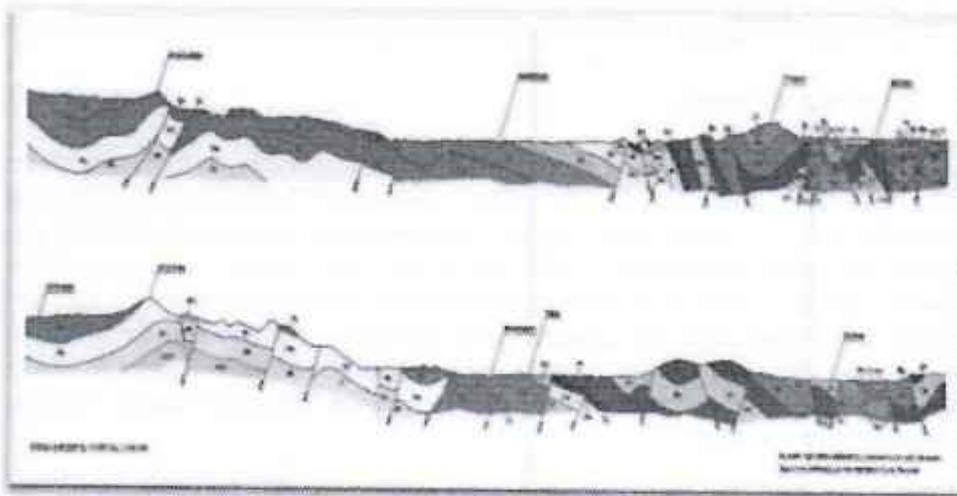


Figura A.2 - Los mapas Hidrogeológicos: proveen información sobre la estructura de la Tierra y la presencia de agua subterránea (Fuente: Parte de la Hoja Geológica Tarija 6629 escala 1:100.000, GEOBOL ,1991)

Otros tipos de mapas geológicos especializados son usados por los expertos en pozos de agua. Un tipo de mapa subterráneo, llamado un mapa de contorno de estructura, muestra las elevaciones de la superficie superior o base de una formación específica (véase figura A.3). Los mapas Isopáquicos muestran el espesor de la formación. Estos mapas son particularmente valiosos en la selección del sitio y estimación de la profundidad de los pozos en áreas que son poco familiares para los expertos perforadores.

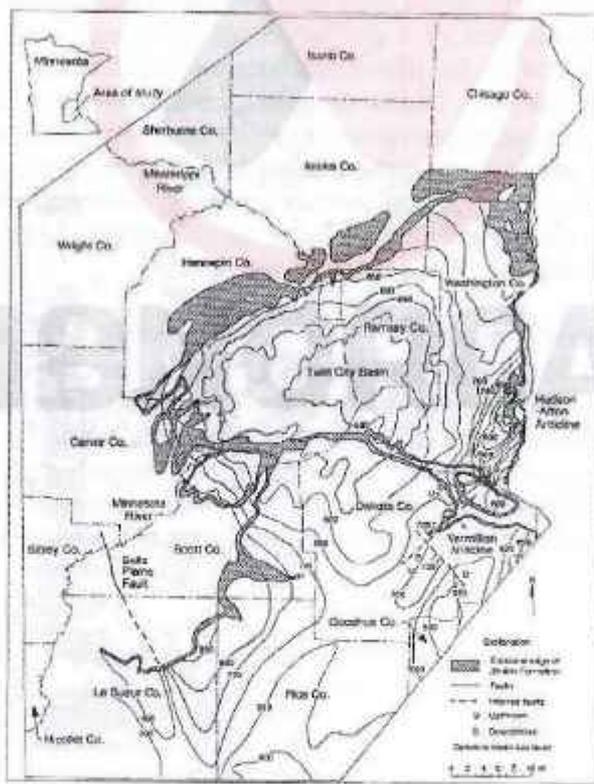


Figura A.3 - El mapa de contorno de estructura de arriba del campo de piedra arenisca Jordán, muestra la configuración de Cuenca de Ciudad Gemela, Minnesota (Mossler 1972)

(3) Interpretación de fotografías aéreas

Las fotografías aéreas son de dos tipos principales – Aquellas que son tomadas desde una cercanía relativa a la Tierra, y aquellas que son tomadas desde satélites, los cuales generalmente orbitan la Tierra. Éstas a menudo revelan información hidrológica valiosa, que no es posible ver claramente cerca de la superficie de la tierra. Fallas, sistemas de uniones, cursos de ríos antiguos, y contactos entre planos Morrena (acumulación de piedras y otros escombros transportados por un glaciar) y sedimentos aflorados (sedimento depositado por corrientes de ríos glaciados) son algunos ejemplos.

Las fotografías aéreas han sido especialmente útiles en el análisis de rastro de fractura. Un rastro de fractura; se define como una característica lineal natural que es posible identificarla por fotografías aéreas. Una característica topográfica lineal de gran envergadura refleja una estructura subyacente que es llamada lineamiento.

Usando fotografías aéreas y después imágenes satelitales; los hidrogeólogos saben que la producción de pozos como terrenos de carbonatos depende de la presencia de uniones, fracturas, cavidades y en qué pozo estas características están interconectadas (véase figura A.4).



Figura A.4 - Imagen de composición a color mejorada por computadora del Landsat (satélite) del Área Bobo-Dioulasso Alto Volta, Oeste de África, Tomada el 31 de Marzo de 1976. Escala 1:500.000. (Earth Satellite Corporation)

(4) Estudio Geológico de campo

El estudio geológico de campo, es uno de los trabajos de campo más comunes; relacionados con las características geológicas y topográficas. En cuanto a su dirección, éste es dirigido por geólogos e hidrogeólogos experimentados, quienes proporcionan mucha información útil sobre aguas subterráneas, incluyendo la distribución de acuíferos, estructura geológica de pliegues y fallas, y sistemas de ríos, manantiales, entre otros.

Para el estudio se requieren básicamente mapas topográficos a escalas que van desde 1/5.000 a 1/100.000, herramientas manuales pequeñas para romper roca y clinómetros. Los resultados del estudio son mapas de rutas, mapas geológicos (véase figura A.5) y/o hidrogeológicos con cortes transversales geológicos presentando condiciones acuíferas.



Figura A.5- Mapa Geológico (GEOBOL)

Fuente: Cuenca del Valle Central del Mapa Geológico Hoja Tarija 6629 escala 1:100.000, GEOBOL 1991

(5) Estudio de calidad de agua subterránea

El agua es llamada el solvente universal, pues tiene la capacidad de disolver pequeñas cantidades de casi todas las sustancias con las que entra en contacto. La calidad del agua subterránea depende de dos de las sustancias disueltas en el agua, y de ciertas propiedades y características que estas transmiten al agua.

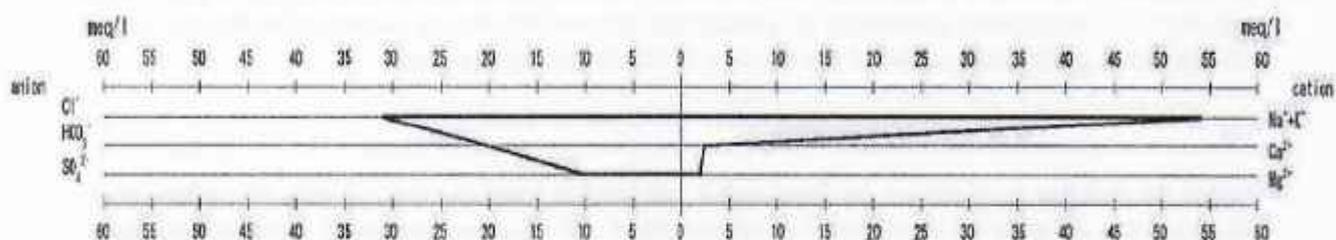


Figura A.6 - Ejemplo de hexa-diagrama de calidad de agua.

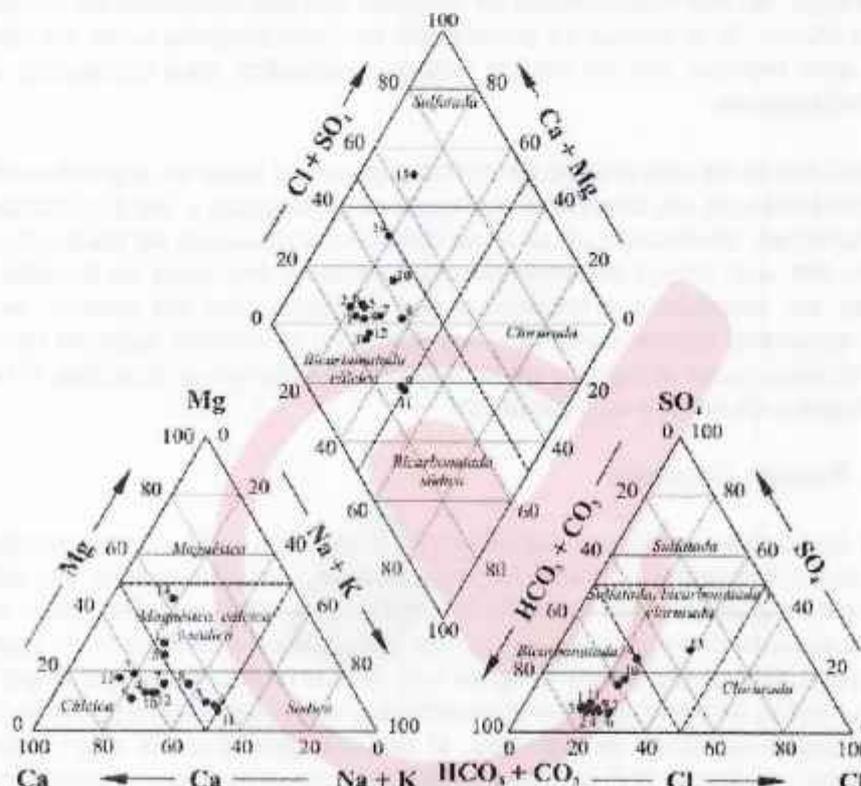


Figura A.7 - Ejemplo de diagrama de Piper o Trilineal de calidad de agua

(véase las figuras A.6 y A.7) Muestran la cantidad y promedio de sustancias dominantes disueltas de agua subterránea. La calidad del agua subterránea está reflejada en las propiedades del acuífero.

A.2 Investigaciones subterráneas

(1) Generalidades

Un estudio detallado y comprensivo del agua subterránea y sus condiciones bajo las cuales éstas surgen, es posible realizarlo con investigaciones subterráneas. Si la información necesaria concerniente con un acuífero (su localización, espesor, composición, permeabilidad o conductividad hidráulica y producción) o el agua subterránea (su localización, movimiento y calidad) son datos cuantitativos, es posible obtenerlos a través de una inspección subterránea.

Debe darse énfasis en que todo trabajo clasificado como investigación subterránea es conducido enteramente por personal que opera equipo que se desplaza bajo tierra. La prueba

de taladrado suministra la información sobre los substratos en una línea vertical a la superficie. Las técnicas de registro geofísicas proporcionan información de las propiedades físicas de las formaciones geológicas, calidad del agua, y la construcción del pozo.

(2) Prueba de Perforación

Antes de perforar un pozo en un área nueva, es común practicar una prueba de perforación. El propósito de ésta es determinar la profundidad del agua subterránea, calidad del agua, y características físicas y volumen del acuífero sin invertir en el costo de un pozo regular, que podría resultar ser un fracaso. Los diámetros van desde 5 cm, hasta más de 20 cm. Las pruebas de perforación es posible realizarlas por cualquier método de construcción de pozo; sin embargo, las que comúnmente se emplean son con herramientas de cable, rotario, y métodos de chorro. Si la prueba de perforación es recomendable como un sitio final para un pozo, es apto rearmar con un equipo rotatorio hidráulico para convertirlo en un pozo permanente más grande.

Durante la perforación de una prueba de orificio o pozo, se hace un registro cuidadoso y se guardan las muestras de las diferentes formaciones geológicas y las profundidades en las cuales se encuentran. Un método útil es la de coleccionar muestras de cortes en recipientes, rotulados, uno por uno, con la profundidad establecida al momento de su obtención; para posteriormente ser estudiadas y analizadas por la distribución del tamaño de grano. Se requiere una apropiada identificación de los estratos en el método rotatorio hidráulico para ayudar en el análisis, pues el lodo de perforación se mezcla con la muestra. Al respecto, es útil llevar un registro de la hora de perforación.

(3) Registro Geológico

Se construye un registro geológico del muestreo y examen de los cortes recolectados del pozo en intervalos frecuentes, durante la perforación del pozo o prueba del orificio. Estos registros proveen una descripción de las características geológicas y dimensión de cada uno de los estratos encontrados como una función de profundidad, permitiendo de este modo que los acuíferos sean delineados (véase la figura A.8), la cual muestra un registro geológico para un pozo en un aluvión (material detrítico transportado y depositado por una corriente de agua). Considerando todos los tipos de registros, el registro geológico es muy importante. Sin embargo se debe considerar que los detritos del pozo son pequeños y mezclados con lodo. Particularmente con la perforación a rotación, el lodo de la perforación enmascara la presencia del material en el sedimento y los rangos de arcilla. Por lo que esta actividad debe ser realizada por personal con experiencia en la materia.

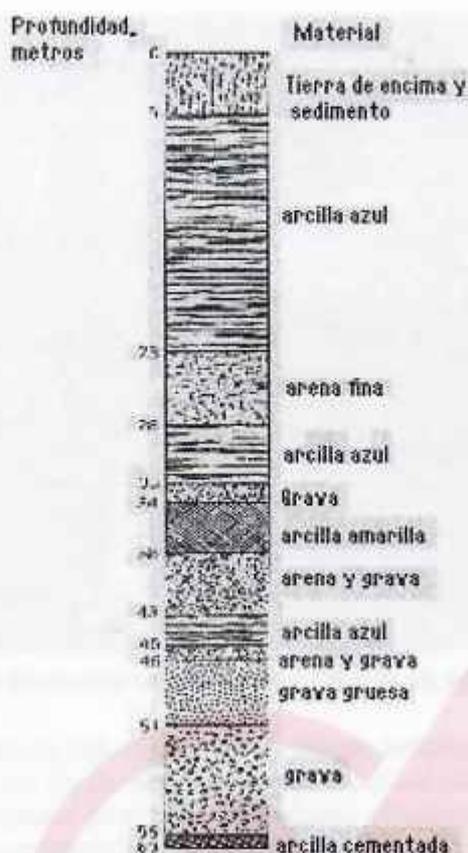


Figura A.8 - Registro Geológico de un pozo preparado desde los cortes del pozo

(4) Medición del nivel de agua

Una de las mediciones más comunes en las investigaciones de aguas subterráneas, es la determinación de la profundidad de los niveles del agua subterránea. Para esta medición deben emplearse dispositivos que permitan medir los niveles con error menor a 1 cm, estos deben ser precisos y rápidos. Entre los dispositivos manuales, los más cómodos son las sondas (medidores de nivel o piezómetros) eléctricas, tanto de un hilo como de dos.

Si se cuenta con una red de pozos de monitoreo, con datos de direcciones de flujo del agua subterránea, cambios en los niveles de agua con el tiempo, y efectos de las pruebas de bombeo, existe la posibilidad de obtener datos exactos de forma simple con el método descrito anteriormente.

Para mediciones periódicas y profundidades que exceden los 50 m, es preferible usar un medidor eléctrico de nivel de agua. Un medidor consiste en una batería, un voltímetro, un cable calibrado de dos hilos en un carrete y un electrodo. Cuando el electrodo llega al agua, el circuito se cierra y el voltímetro muestra una desviación. La profundidad se lee directamente de las graduaciones a lo largo del cable (véase figura A.9), se muestran instrumentos de medición de nivel de agua automáticos (piezómetro), que son instalados en los pozos de observación o de monitoreo donde las fluctuaciones a corto plazo son de mucho interés, como pozos cercanos que operan intermitentemente. Un registro típico consiste en un flotador y un contrapeso, un enlace largo el cual rote en un tambor de registro, y una pluma de registro que es operado a través del registro por un mecanismo de reloj.

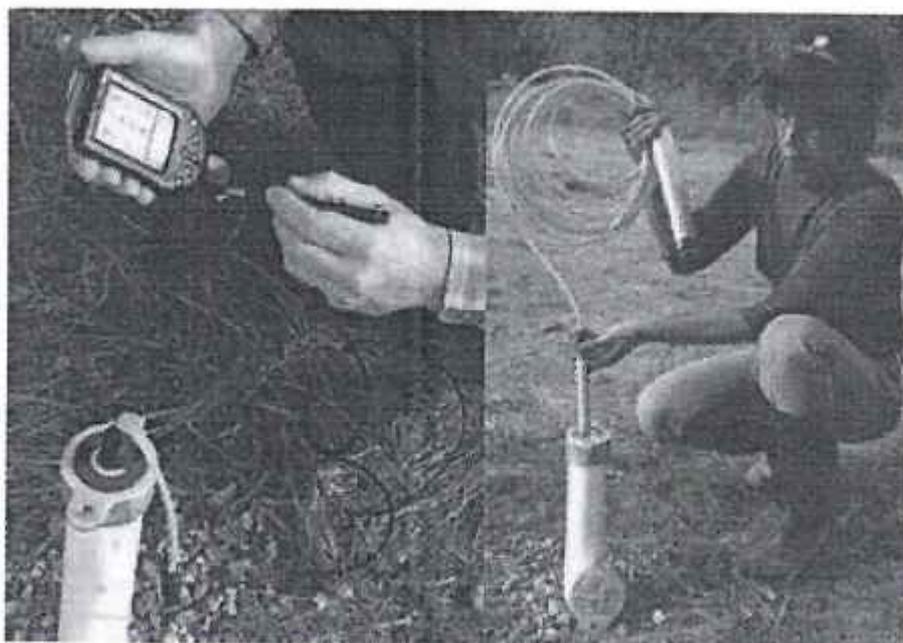


Figura A.9 - Instrumento de registro automático del nivel de agua (piezómetro)

En lugares donde existen múltiples acuíferos con diferentes niveles de agua, generalmente se perforan pozos de observación individuales, solamente en un acuífero. Por otro lado, se extienden los tubos de un pequeño piezómetro individual debajo de los niveles de varios acuíferos que están colocados en una única perforación grande recubierta. Este recubrimiento está relleno con arena y sellado con lechada de cemento entre los acuíferos colindantes.

(5) Registros Geofísicos (sondeos geofísicos)

El registro geofísico de pozo es la obtención analógica o digital de parámetros físicos de las rocas en función de la profundidad, que es apto para ser interpretados como características de las rocas, de los fluidos contenidos y de la construcción del pozo. Los registros son analizados para determinar la litología, resistividad real de la roca, geometría, densidad volumétrica, porosidad y permeabilidad de las capas o mantos productores.

Los registros geofísicos proveen información de las condiciones subterráneas que es posible correlacionar de un pozo a otro. Estos coadyuvan en forma complementaria valiosa en los registros geológicos. La información de los registros geofísicos es posible digitalizarla y almacenarla en computadora, o ser transmitidos para su interpretación.

Los gráficos de los datos registrados permiten una rápida interpretación y comparación visual en el campo, para que se puedan tomar decisiones inmediatas respecto a la ejecución y análisis de los pozos.

Por las grandes demandas de agua subterránea, las técnicas de registro/sondeos son investigadas con adelantos importantes, los datos que originan son cada vez más complejos. En general, los mejores resultados son obtenidos con profesionales con experiencia y con la mayor información hidrogeológica adicional.

(6) Registro de Resistividad Eléctrica

En un hoyo perforado (pozo sin ademe), se desciende la sonda con electrodos de corriente y potencial para medir las resistividades eléctricas del medio circundante y así obtener una

señal de sus variaciones con la profundidad. El resultado es un registro de resistividad (eléctrico). Este registro es afectado por el fluido contenido en el hoyo, el diámetro del hoyo, las características del estrato circundante y por el agua subterránea.

Existen varios métodos posibles para medir la resistividad eléctrica en el subsuelo, el método multi-electrodo es generalmente el más utilizado, porque minimiza los efectos del fluido de la perforación y el diámetro del hoyo, y posibilita una comparación directa de algunas curvas de resistividad registrada. Los electrodos que componen el sistema son cuatro, dos para emitir corriente y dos para medir el potencial. Las curvas registradas son denominadas normales o laterales, dependiendo de la disposición de los electrodos, (véase figura A.10). Con una disposición normal, la distancia AM se considera como el espacio más eficaz y la curva registrada es designada AM. Algunas veces una curva normal larga (AM') es registrada, basada en la misma disposición de electrodos como normal, pero con una distancia AM más larga. El espaciado para las curvas laterales (AO) es tomada como la distancia AO, medida entre el punto A y un punto medio entre los electrodos M y N. Los límites de las formaciones que tienen diferentes resistividades son localizados más rápidamente con un espacio corto entre electrodos, mientras que la información de los fluidos en formaciones permeables gruesas es posible obtener mejor con un espacio largo entre electrodos (véase tabla A.1).

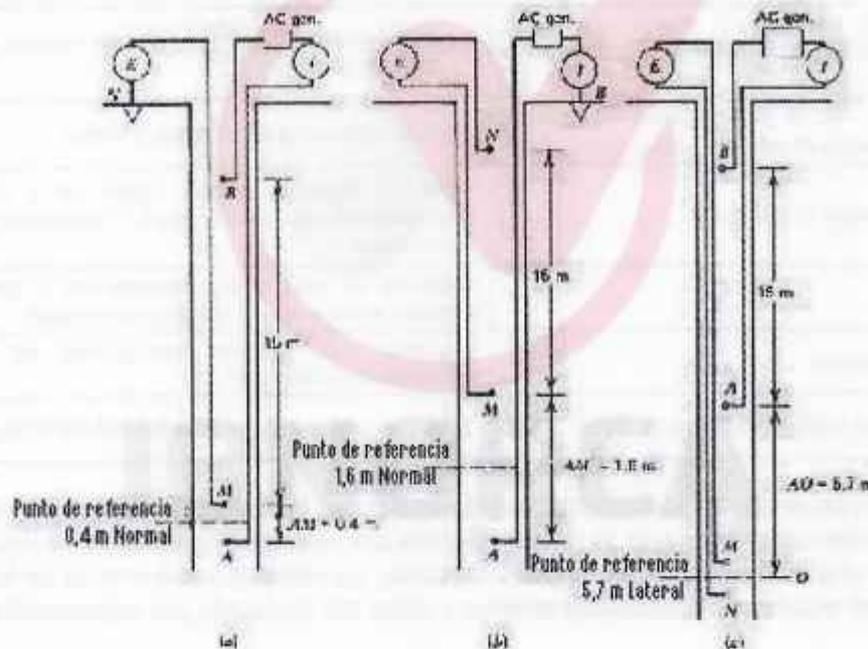


Figura A.10 - disposición típica de electrodos y distancias estandarizadas para los registros de resistividad. (a) Corto normal, (b) Largo normal, (c) Lateral (Después de Keys y MacCrary)

Tabla A.1 - Resumen de aplicaciones de los registros para la hidrología del agua subterránea

Información requerida	Técnicas posibles de registro
Litología y correlación estratigráfica de los acuíferos y rocas asociadas.	Registros de resistividad, sónicos o calibración, realizados en perforaciones abiertas; registros de radiación ejecutados en perforaciones abiertas
Porosidad total o densidad volumétrica	Registros sónicos calibrados en perforaciones abiertas; registros calibrados neutrón o gama-gama en perforaciones abiertas.
Porosidad efectiva o resistividad real	Registros de resistividad larga normal calibrada, inducción resistividad lateral
Permeabilidad – fracturas secundarias, aperturas de la solución	Caliper, sónicos, densidad, video
Rendimiento específico de acuíferos libres	Neutrón calibrados
Tamaño de grano	Relación posible de factor de formación derivado de los registros de resistividad
Localización de nivel de agua a zonas saturadas	Eléctrico, temperatura o conductividad del fluido en pozo libre. Neutrón, Densidad (gama-gama) en perforaciones abiertas
Contenido de humedad	Neutrón calibrados
Infiltración	Neutrón a intervalos de tiempo bajo circunstancias especiales
Dispersión, dilución y movimiento de residuos	Flujo (Flujómetro)
Fuente y movimiento de agua en el pozo	Perfil de inyectividad, flujo, temperatura del fluido
Características químicas y físicas del agua, incluyendo salinidad, temperatura, densidad y viscosidad	Conductividad de fluido, temperatura, neutrón, resistividad y densidad (gama-gama)
Determinación de la construcción de pozos, diámetro y posición de ademe, perforación y rejillas	Densidad (gama-gama), Caliper y Video
Guía para proteger el escenario	Todos los registros proveen datos en la Litología, las características, suministrar agua, y correlación y volumen de acuíferos
Cementación	Registros de calibración, temperatura o gama-gama; registros acústicos para fijar la consolidación.
Corrosión de ademe	Registros bajo algunas condiciones de calibración, embalado o de televisión
Empacar fugas y/o sellado de rejilla	Registros de la velocidad del fluido

Un registro eléctrico de un pozo normalmente consiste en corridas verticales que registran las curvas normales cortas y largas, la lateral además del potencial espontáneo, (véase la figura A.11) que da una ilustración de un registro eléctrico. La interpretación exacta de los registros de resistividad requiere un cuidadoso análisis y debe ser realizado por especialistas.

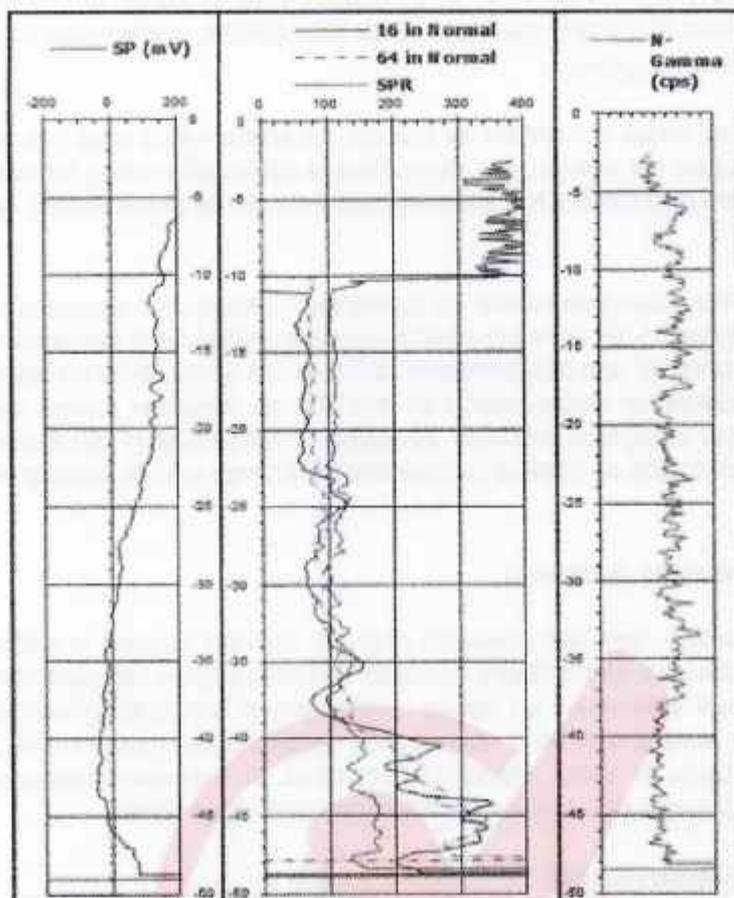


Figura A.11 - Registros de Potencial espontáneo, resistividad y Gamma de un pozo (Estudio PRODASUB - JICA Fase 3, La Paz; 2005)

Las curvas de resistividad indican la litología del estrato rocoso penetrado por el pozo y producen agua fresca o salada, a ser diferenciadas dentro del material circundante. En pozos antiguos existe la posibilidad de determinar las localizaciones exactas de los estratos. Los registros de resistividad es posible usarlos, para determinar las resistividades específicas del estrato o son aptos para indicar cambios cualitativos de importancia. La resistividad de un acuífero no consolidado es controlada primariamente por porosidad, empaque, resistividad al agua, grado de saturación y temperatura. Aunque los valores específicos de resistividad no son capaces de estar establecidos para diferentes acuíferos, sobre una base relativa de piedra pizarra, la arcilla y arena de agua salada, es posible que den valores bajos, la arena de agua dulce modera hacia valores altos, y la piedra arenisca consolidada y la piedra caliza no porosa proporcionan valores altos.

Uno de los usos más comunes del registro eléctrico es para determinar el lugar adecuado para ubicar los filtros del pozo. Un registro da una base para seleccionar longitudes apropiadas de los filtros y poder colocarlos en las mejores formaciones.

(7) Registro potencial espontáneo "SP"

Los registros potenciales espontáneos son usualmente procesados conjuntamente con los registros de resistividad. Producen naturalmente potenciales eléctricos (voltajes) que resultan de cambios químicos y físicos en los contactos entre diferentes tipos de materiales geológicos subterráneos.

Los potenciales eléctricos se generan espontáneamente al contacto con la superficie entre una capa de piedra caliza y una capa de arena subyacente, o entre una formación de arena y una formación de roca ígnea.

Cuando el electrodo abajo del orificio es movido de arriba hacia abajo en la perforación, los registros en metros de los potenciales espontáneos de las diferentes formaciones varían. La curva muestra estos potenciales trazados en contraste con la profundidad, llamado el registro SP.

Aunque la curva SP es capaz de indicar las zonas permeables, no hay relación definida entre la magnitud de la desviación SP de la permeabilidad o porosidad de la formación. Las variaciones mostradas por la curva SP son interpretadas junto con las variaciones en aparente resistividad mostradas por la curva de resistividad. Las dos curvas, tomadas juntas, constituyen lo que usualmente se llama el registro eléctrico. El registro SP es trazado sobre el lado izquierdo de la hoja de curva, en donde es posible compararlo fácilmente con el registro de resistividad del lado derecho.

(8) Registro de Radiación

El registro de radiación, también conocido como el registro nuclear o radioactivo, involucra la medición de partículas elementales emitidas desde isótopos radioactivos inestables. Los registros que tienen aplicación en aguas subterráneas son gama-natural, gama-gama y neutrón; éstos son ventajosos, pero no son muy utilizados en instrumentos hidrogeológicos. Una ventaja importante de estos registros sobre otros, es que son aptos para registrar tanto en orificios abiertos o sellados que están saturados con algún fluido.

a) Registro Gama-natural

La curva de rayos gamma naturales en principio mide la radiación natural de las formaciones, que generalmente es proporcional al contenido de arcilla o lutita en las rocas sedimentarias, denotándose un alto nivel de radiactividad a diferencia de formaciones limpias (libres de arcilla), donde el nivel de radiactividad es bajo, salvo en casos de que exista contaminación por agua con sales de potasio disueltas, o por ceniza volcánica. Las radiaciones gamma emitidas espontáneamente son generalmente resultado de la desintegración natural de elementos radiactivos de la serie uranio-torio, y del isótopo radiactivo del potasio de peso atómico 40.

En su trayectoria a través de la formación, los rayos gamma naturales son gradualmente absorbidos y su energía degradada; el grado de absorción cambia de acuerdo con la densidad de la formación, cuyas variaciones son el producto de cambios en la porosidad o en la litología. En formaciones del tipo sedimentario, la penetración promedio de los rayos gamma es de aproximadamente 0,30 m.

(véase la figura A.12) Muestra el registro gama-natural de una prueba en la perforación en los sedimentos no consolidados junto con su interpretación geológica.

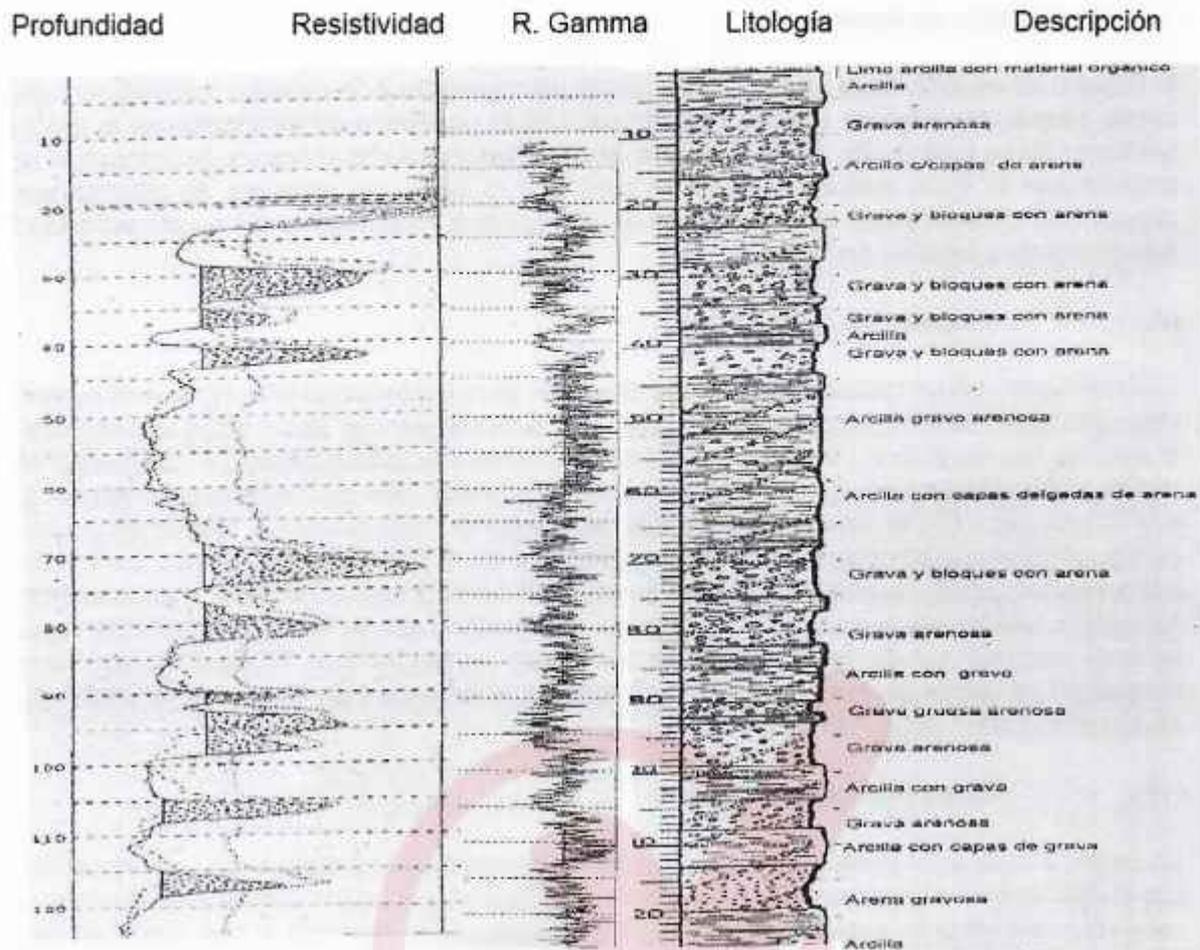


Figura A.12 - Registro resistividad, gama-natural de una prueba en la perforación en el Altiplano de La Paz, junto con su interpretación geológica (después del trabajo de perforación, 2001).

b) Registro Gama-gama

La radiación gama se origina de una fuente de la sonda y registrada, después es dispersada hacia abajo y atenuada en la perforación y las formaciones circundantes que constituyen el registro gama-gama. La fuente de la sonda generalmente contiene cobalto -60 o cesio-137, el cual protege un detector de yoduro de sodio dispuesta dentro de la sonda. Las aplicaciones primarias de los registros gama-gama son para la identificación de Litología y medición de la densidad de volumen y porosidad de las rocas.

La porosidad α es posible determinarla con

$$\alpha = \frac{\rho_G - \rho_B}{\rho_G - \rho_F}$$

En donde:

- ρ_G : densidad de los granos (obtenidos desde los cortes o núcleos),
- ρ_B : densidad de volumen (medido a partir de los registros calibrados), y
- ρ_F : densidad del fluido.

c) Registro de Neutrón

El registro de neutrón es logrado por una fuente de neutrones y un detector colocado en una sonda simple, produce un registro relacionado con el contenido de hidrógeno en el medio ambiente de la perforación. En la mayoría de las formaciones el volumen de hidrógeno es proporcional al agua contenida en intersticios; por lo tanto, los registros de neutrón son capaces de medir el grado de humedad contenido sobre el nivel freático del agua y porosidad debajo del nivel freático del agua.

(9) Registro de Temperatura

Una medición vertical cruzada de la temperatura del agua subterránea en un pozo, es posible obtenerla fácilmente, registrando con un termómetro de resistencia. Estos datos son valiosos, al analizar las condiciones subterráneas. Habitualmente, las temperaturas se incrementarán con la profundidad de acuerdo con la gradiente geotérmica, que equivale aproximadamente a 3 °C por cada 100 m. de profundidad. La desviación de esta gradiente normal es posible que proporcione información sobre la circulación o las condiciones geológicas dentro del pozo. Las temperaturas bajas anormales pueden indicar la presencia de gas, o en los pozos profundos, es posible sugerir una recarga de la superficie de la tierra. Asimismo, el agua caliente anormal, puede tener origen en las aguas profundamente arraigadas (*acuíferos termales*) Las temperaturas posiblemente indican que las aguas de diferentes acuíferos se intersepan con un pozo.

(10) Registro calibrador (Caliper)

Un registro calibrador proporciona un registro del promedio del diámetro de la perforación. Los instrumentos calibradores están diseñados con brazos unidos por bisagras en el extremo superior y presionado contra la pared de la perforación por resortes o con arcos resorte sujetos a ambos extremos. Estos registros ayudan en la identificación de la Litología y la correlación estratigráfica; en la localización de fracturas y otros boquetes en la roca; además de la corrección de otros registros por efectos del diámetro de la perforación. Durante el levantamiento de los registros calibradores en la construcción del pozo, éstos indican el tamaño del embalado que es apto para ensamblarlo en la perforación y habilitar el volumen anular para calcular los empaques de grava. Otras aplicaciones incluyen la medición de los diámetros de embalaje en los pozos antiguos y zonas de localización, infiltración y excavación. El calibrador de perforación y el registro de resultados (véase figura A.13).

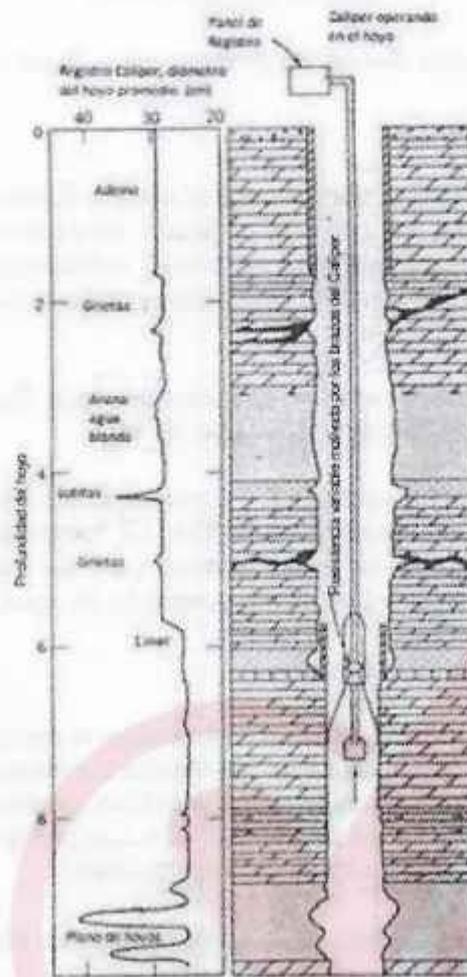


Figura A.13 - Calibrador de perforación (Caliper)

(11) Registros por video inspección

Son registros de video con cámaras y videograbador incorporado, equipado con luces y proveen inspección visual continua del pozo.

Es posible conocer la profundidad del pozo, la ubicación de las rejillas, ademe, el estado y condición actual de éstas; si existen incrustaciones, corrosión o algunas anomalías o aberturas; por donde ingresa arena y limo; y la ubicación de objetos o herramienta caídos para su pesca.

(12) Otros métodos subterráneos

Otros métodos subterráneos son capaces de suministrar información significativa, acerca de las condiciones hidrogeológicas como son:

- Pruebas de rastreo para los flujos de aguas subterráneas
- Mediciones del nivel de aguas subterráneas para direcciones de flujo.
- Mediciones en la fluctuación en el nivel del agua subterránea para las características acuíferas.

ANEXO B (Informativo)

Estudio Geofísico (Prospección Geofísica)

(1) Generalidades

A medida que el grado de dificultad para encontrar el agua subterránea aumenta y los costos de perforación se incrementan, los métodos indirectos de exploración que permiten detectar la presencia del agua desde la superficie se hacen indispensables. Desde hace algunos años, en las campañas de prospección geohidrológica se han utilizado métodos indirectos de prospección geofísica.

También se utilizan los sensores remotos, capaces de medir alguna propiedad física de un objetivo determinado a una distancia considerable de este.

Los métodos geofísicos detectan densidad, magnetismo, elasticidad y resistividad eléctrica que son propiedades comúnmente más medidas. La experiencia y la investigación han posibilitado marcadas diferencias en estos factores para ser interpretadas en términos de estructura geológica, tipo de roca y porosidad, contenido de agua, y calidad de la misma.

(2) Método de resistividad eléctrica

Es el principal instrumento geofísico usado para investigar la resistividad de la exploración del agua subterránea; conductividad longitudinal y la resistencia transversal que caracterizan a las rocas y a las capas geológicas. La conductividad eléctrica (propiedad de conducir la corriente eléctrica) varía considerablemente de una roca a otra. Los parámetros que representan esta propiedad son: la conductividad o su inversa, la resistividad.

Es la resistencia del medio geológico al flujo corriente cuando es aplicada una diferencia de potencial (voltaje) o:

$$R = \frac{V}{I}$$

R: resistencia,
V: voltaje,
I: corriente.

Para un material dado con una característica de resistividad, la resistencia es proporcional a la longitud del material que es medido, e inversamente proporcional a su área transversal:

Donde:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad \text{o} \quad \rho = \frac{RA}{L}$$

ρ : Resistividad característica del medio geológico
A: unidad de área transversal
L: longitud.

Las unidades de resistividad son usualmente dadas en ohm-pies o ohm-metros.

Las resistividades de las formaciones rocosas varían en un rango extenso, dependiendo del material, densidad, porosidad, tamaño y forma del poro, temperatura, contenido y calidad del agua.

(véase la tabla B.1) Provee una guía representativa de los rangos de resistividad eléctrica de varios sedimentos y rocas. En formaciones relativamente porosas, la resistividad es controlada más por el contenido del agua y la calidad dentro de la formación, antes que la resistividad de la roca. Para acuíferos compuestos de materiales no consolidados, la resistividad baja con el grado de saturación y la salinidad de las aguas subterráneas. Los minerales arcillosos conducen corriente eléctrica a través de sí, sin embargo las formaciones arcillosas tienden a desplegar resistividades menores que los acuíferos aluviales permeables. Las resistividades reales son determinadas desde resistividades aparentes, las cuales son calculadas de las mediciones de corriente y diferencias potenciales entre pares de electrodos en la superficie de la tierra.

Tabla B.1 - Resistividad de la Tierra basado en los tipos de roca

Litología	Resistividad de tierra		Resistividad Experimental (W·m)
	Estratos secos (W·m)	Estratos húmedos(W·m)	
Grava Arena-grava Arena Conglomerado Piedra arenisca Marga	1.000-15.000 1.000-7.000 300-7.000 300-1.800 200-2.500 500-5.000	200-10.000 200-5.000 100-700 100-500 100-500 100-1.000	30-150
Toba (<i>Tuff</i>)	100-1.000		200-500
Cieno Arcilla Marga Piedra Pizarra		Menos de 100 Menos de 100 Menos de 100 Aprox. menos de 100	5-20
Granito Andesina Basalto Esquisto cristalino Gneis Lava Piedra caliza	1.000-10.000 200-10.000 20.000 200-20.000 200-20.000 1.000-20.000 60-500.000		200-20.000
Agua Salada			0-5

El procedimiento involucra la medición de la diferencia de potencial entre dos electrodos (P en véase figura B.1) como resultado de la aplicación de corriente entre otros dos electrodos externos (C véase en la figura B.1), pero en línea con los electrodos potenciales. Si la resistividad es uniforme en todas partes debajo del subsuelo de la zona de los electrodos, se formará una red ortogonal de arcos circulares según las líneas de corriente y equipotencial, (véase figura B.1). La diferencia potencial medida es un valor ponderado sobre la región superficial controlado por la figura de la red.

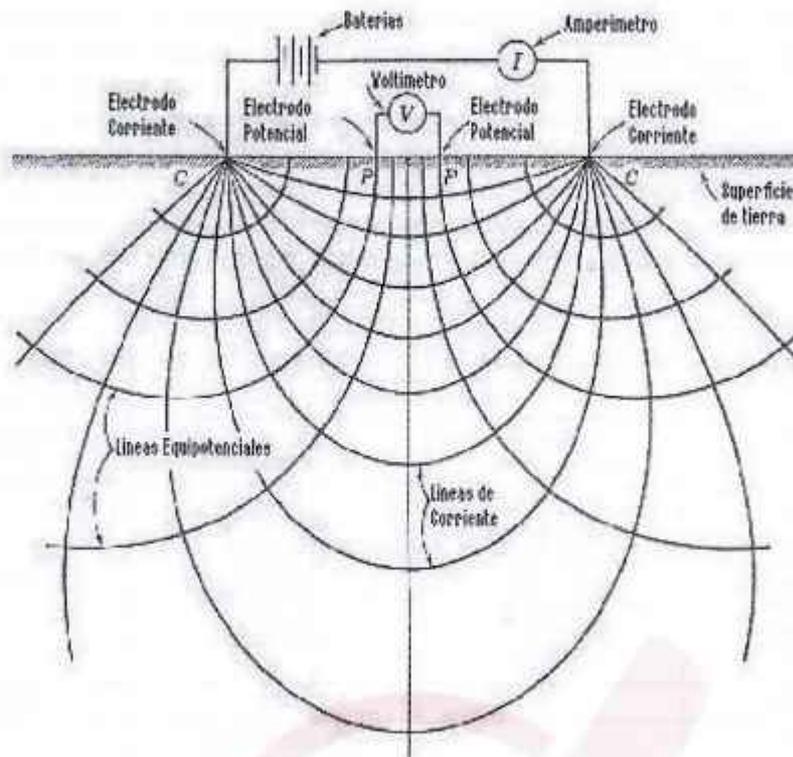


Figura B.1 - Circuito eléctrico para la determinación de la resistividad y campo eléctrico para un estrato subterráneo homogéneo

De este modo, la diferencia potencial y corriente medidas; producen una resistividad aparente sobre una profundidad no especificada. Si el espaciado entre electrodos es incrementado, se produce una penetración más profunda del campo eléctrico y se obtiene una resistividad aparente distinta.

Los electrodos se componen de estacas metálicas dispuestas dentro de la tierra. En la práctica, se han adoptado varias disposiciones estándar de espaciado de electrodos.

Las disposiciones más comunes son la Wenner y la Schlumberger tal como está ilustrado (véase figura B.2)

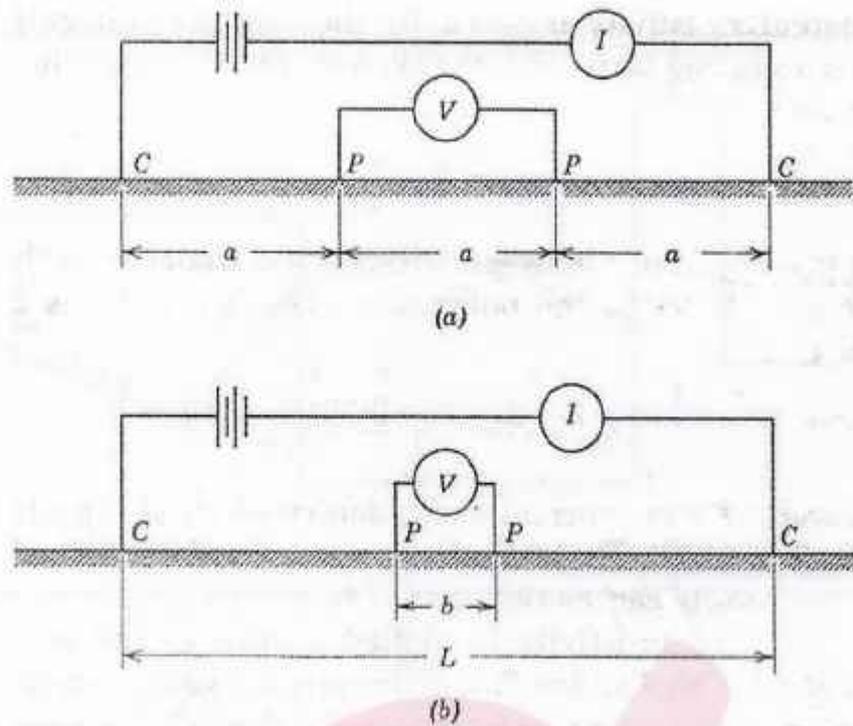


Figura B.2 - Disposiciones de electrodos más comunes para la determinación de la resistividad

(a) Wenner (b) Schlumberger

La disposición Wenner, (véase figura B.2(a)), tiene los electrodos potenciales localizados en los terceros puntos entre los electrodos corrientes. La resistividad aparente es dada por el radio de voltaje de corriente en tiempo como un factor de espaciado. Para la disposición Wenner, la resistividad aparente es

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V}{I}$$

Donde

- a: distancia entre los electrodos adyacentes
- V: diferencia de voltaje entre los electrodos potenciales,
- I: corriente aplicada.

La disposición Schlumberger, (véase la figura B.2 (b)), tiene los electrodos potenciales estrechamente juntos. La resistividad aparente es dada por

$$\rho_a = \pi \frac{(L/2)^2 - (b/2)^2}{b} \frac{V}{I}$$

Donde: L y b son la corriente y el espacio del electrodo potencial respectivamente, (véase las figuras B.3), muestra un resultado de la medición de la curva de resistividad aparente, la cual es obtenida por el uso de los datos disponibles.

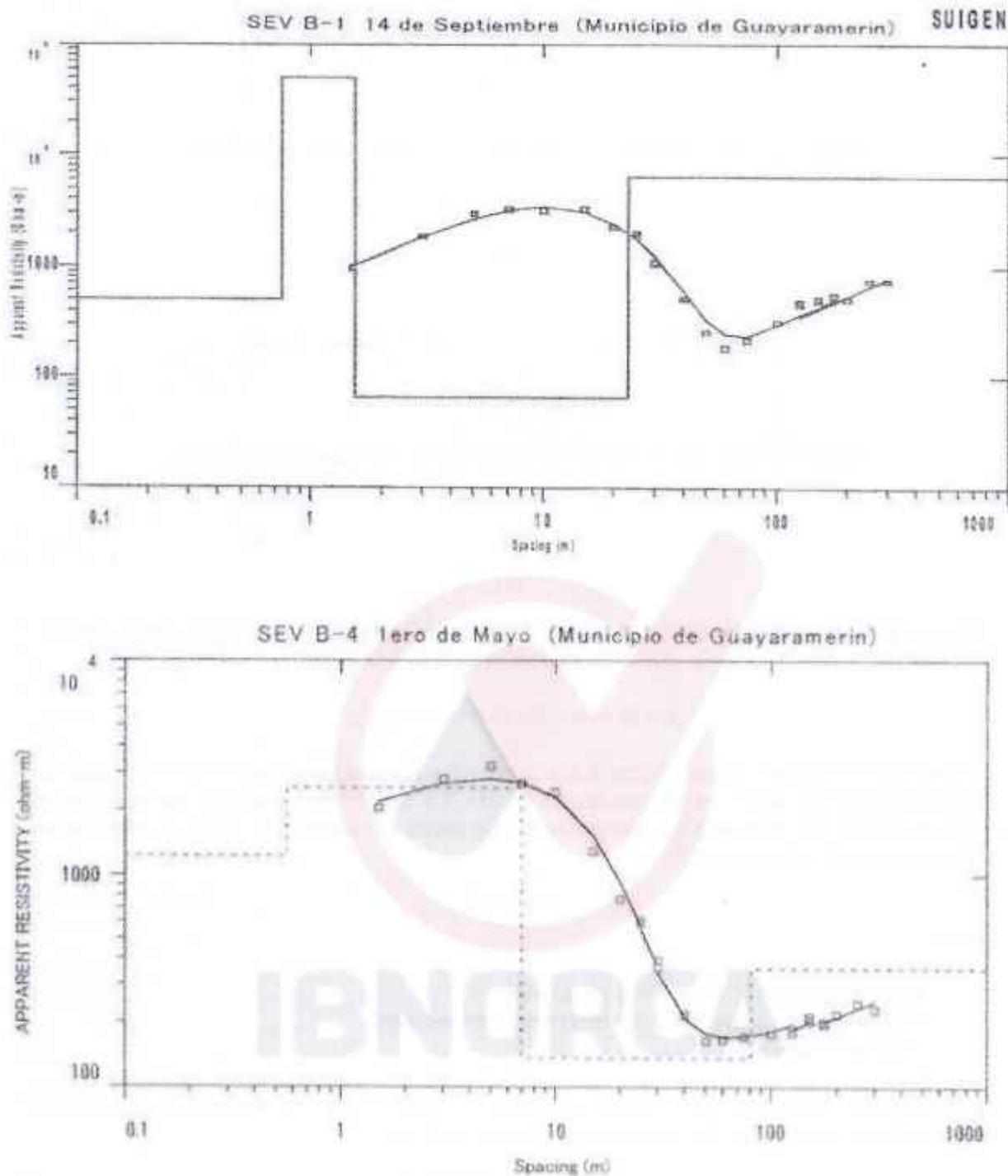


Figura B.3 - Curva p - a (en el Departamento de Beni - Bolivia 2014)

El método para analizar la curva de resistividad aparente es posible dividirla en dos categorías enumeradas (véase tabla B.2) en: el método teórico y el método empírico. El método teórico además es apto para ser clasificado en el método de la curva estándar y el método de la curva maestra.

Tabla B.2 - Métodos de Análisis de la Curva de resistividad aparente

Clasificación de Métodos			Disposición aplicable de electrodos
Método Teórico	Método de la Curva Estándar	Método de la Curva Estándar de Schlumberger	Arreglo Wenner
Método Empírico	Método de Lectura Directa		Arreglo Wenner

Para el análisis de la curva de resistividad específica; obtenida usando el arreglo Wenner, el método de la curva estándar de Schlumberger y el método de lectura directa, son en la actualidad los métodos más usados.

(3) Método Electromagnético

Está logrando ser mucho más popular que antes en años recientes, debido a los adelantos tecnológicos relacionada con los microprocesadores. Para la exploración de aguas subterráneas, las técnicas electromagnéticas más populares están entre el VLF, Slingram y TEM.

a) Métodos VLF (Ondas de radio de Frecuencia)

Las ondas de radio de frecuencias VLF (15-25 kHz) es posible utilizarlas para prospectar la conductividad eléctrica de fallas y fracturas. Los instrumentos básicamente miden el ángulo de inclinación de cualquier campo magnético o la energía vertical u horizontal del campo magnético, para detectar la presencia de objetivos localizados. Las frecuencias de comunicación de VLF son usadas con preferencia por la mayoría de las principales flotas marinas del mundo, y las razones estriban en que éstas frecuencias: (1) hacen posible las comunicaciones globales, y (2) su efectiva penetración de profundidad en el agua de mar es bastante grande como para permitir que los submarinos puedan recibir las señales de VLF mientras están sumergidos.

b) Métodos Slingram

Los métodos Slingram, (véase figura B.4), usan unos pequeños rollos; transmisor y receptor con centros de aire o de ferrita (solución sólida del carbono dentro de la estructura cristalina del hierro puro) de varias orientaciones. Si se tiene un rollo transmisor y uno receptor, y la separación es "s", operando la frecuencia radial de ω y la permeabilidad magnética del espacio libre es μ_0 , la conductividad aparente de la tierra es posible escribirla como una función del radio de los campos secundarios y primarios H_s/H_p :

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \frac{H_s}{H_p}$$

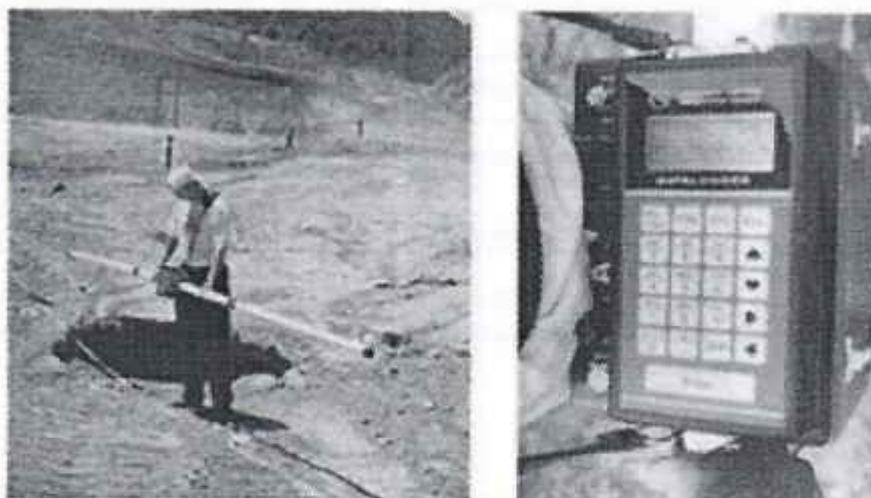


Figura B.4 - Sistema Slingram EM31

a) Métodos TDE

El método "T.D.E." (Tiempo-Dominio Electromagnético) es una técnica relativamente nueva y está consiguiendo ser popular para la exploración de agua subterránea. Este es un método electromagnético en el cual la tierra es alterada por un campo magnético artificial, y su respuesta es medida como una función de tiempo, para determinar la resistividad de un punto de observación del subsuelo, como una función de profundidad. La corriente DC (continua) estable sostenida por el transmisor de superficie, crea bucles de campos magnética constante alrededor del bucle, y una detención súbita de la corriente, induce a que se arremoline corriente cercana a la superficie de la tierra de manera que intenten mantener el mismo campo magnético como antes.

La inducción de corriente ilustrada (véase figura B.5), penetra en la tierra con tiempo. El decaimiento de estos arremolinamientos de corriente es la función de resistividad a lo largo de la trayectoria de la corriente, por lo que midiendo el decaimiento del campo magnético con el rollo de inducción mostrado (véase la figura B.6) sobre la superficie, podemos determinar las resistividades de las capas de la tierra.

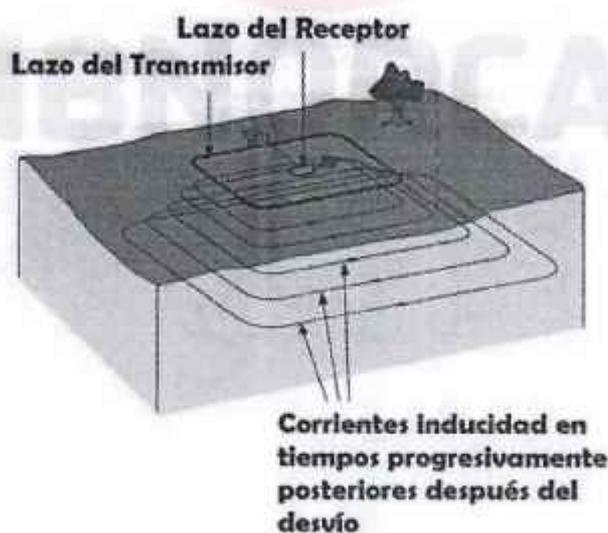


Figura B.5 - Arremolinamientos de Corriente

Fuente: (FCIHS, 1991)

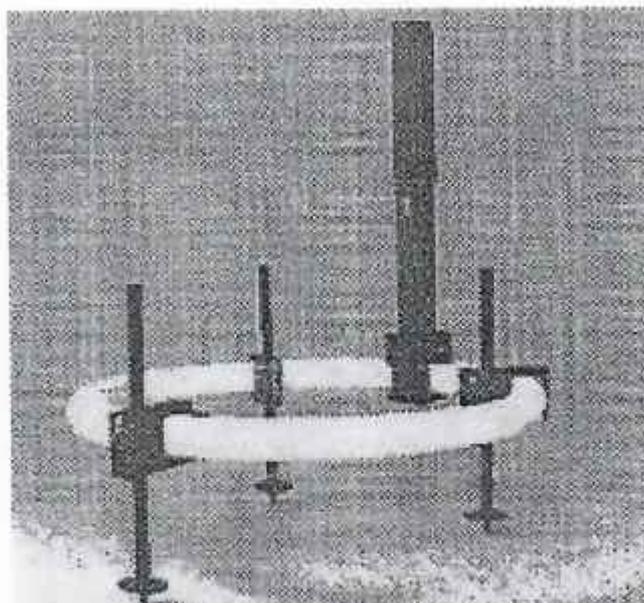


Figura B.6 - Rollo de inducción TEM

(4) Método de la Gravedad

La atracción gravitacional de la Tierra en un sitio en particular; está en función de la densidad de los sedimentos superficiales y las unidades de rocas subyacentes. El Gravímetro es capaz de medir diferencias extremadamente pequeñas en el campo gravitacional de la tierra, causadas por la variación de la densidad del subsuelo. Estas variaciones de densidad son usualmente producidas por cambios en el tipo de roca (esto es, cambios en la porosidad o densidad granular), grado de saturación, zonas de fallas que no es posible percibir las en la superficie, y variaciones en el espesor de los sedimentos no consolidados del lecho rocoso inferior. Los métodos de gravedad son probablemente más utilizados para localizar valles sepultados en áreas glaciares.

Los métodos de gravedad son útiles para investigar grandes áreas de manera rápida y económica, porque el gravímetro es fácilmente portable. El tiempo total transcurrido desde la llegada del operador a la estación de gravedad para el registro de las lecturas es generalmente menor a 5 min. El número de lecturas posibles tomadas por día, está limitado solamente por la distancia entre estaciones, la velocidad a la cual el terreno puede ser atravesado, y la precisión requerida. La exactitud depende de determinar las elevaciones exactas de las estaciones.

Los datos del instrumento de gravedad es posible usarlos de varias maneras. Las travesías simples de los valles enterrados revelan el contorno rugoso del perfil del lecho de roca como es mostrado (véase la figura B.7).

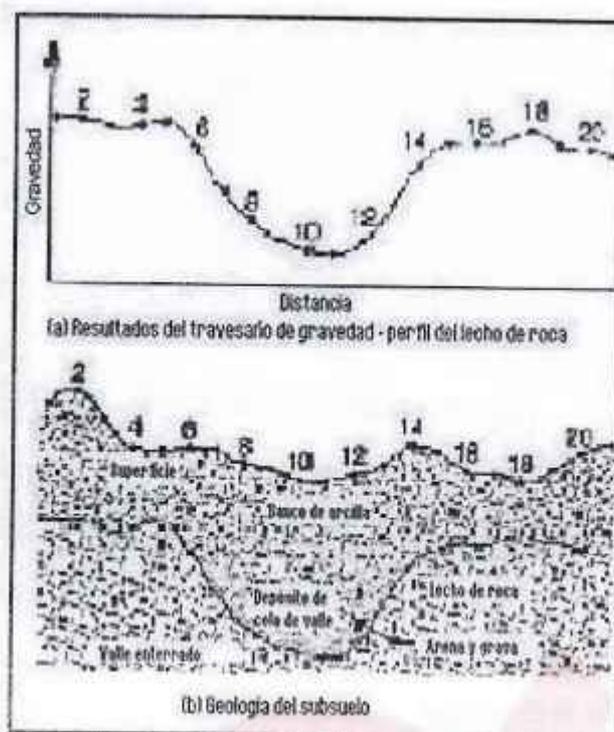


Figura B.7 - Valles enterrados que quedan debajo de gruesos depósitos no consolidados (Anderson 1979)

- (5) Método por resistividad eléctrica bidimensional o tomografía
- (1) Principio físico y procedimientos de medición

a) Generalidades

El método de resistividad eléctrica Bi-dimensional (2-D) o tomografías es un método prometedor en la investigación del subsuelo; para medir la capacidad de los materiales de la tierra al paso de corriente eléctrica. Esta técnica es efectiva en detectar los límites entre los materiales que tienen resistividades eléctricas contrastantes. Las arcillas y aguas saturadas de materiales son usualmente eléctricamente conductivas y contrastan nitidamente con más materiales eléctricamente resistivos como las gravas, depósitos glaciales, lechos rocosos, suelos congelados. El método es controlado por una interacción compleja de un número de factores, incluyendo porosidad, contenido de agua libre, composición mineral, salinidad de agua en poro y distribución de tamaño de granos.

La exploración de la resistividad es posible llevarla a cabo a profundidades que van desde algunos metros a varios centenares de metros, bajo condiciones favorables. Históricamente, el registro de información de resistividad fue llevado a cabo usando solamente cuatro electrodos y series geométricas estándar. La ventaja del sondeo de resistividad es capaz de aprovechar la capacidad de probar reiteradamente muchos números de combinaciones de electrodos. Desarrollándose una imagen detallada de la resistividad del subsuelo. En lugar de la información de los estratos simples, el trazado de la resistividad es apto para resolver pequeñas e irregulares anomalías aún en áreas de geometría compleja del subsuelo.

b) El Principio físico

El método está basado en la generación de un campo eléctrico artificial en la superficie de la tierra, para la introducción de corriente a través de electrodos metálicos. Utilizando uno, de una gran variedad de configuraciones de arreglos estándar, se mide un voltaje a través de dos electrodos (véase figura B.8).

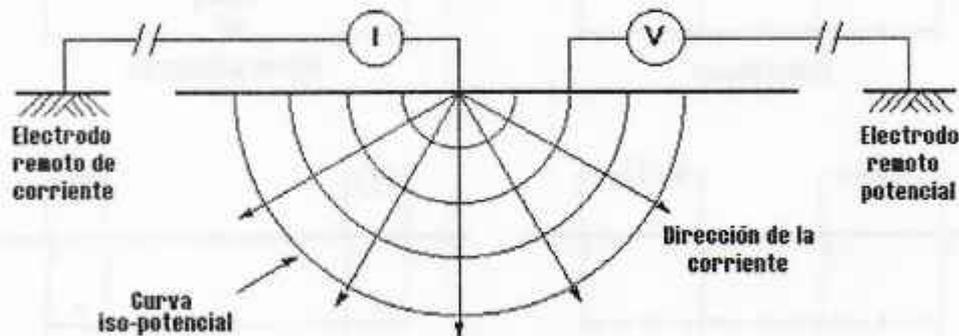


Figura B.8 - Principios del perfilado de la resistividad eléctrica

Este voltaje, junto con el valor de la corriente y una constante basada en la geometría de arreglo, produce una lectura de resistividad aparente de la estratificación geológica subyacente.

c) Procedimientos de medición

En las operaciones de campo, algunas distribuciones de arreglos de electrodos son tomadas de acuerdo a las condiciones del lugar (véase figura B.9). Primero, los electrodos metálicos son insertados en la tierra a la separación requerida a lo largo de la sección a ser perfilada. El espaciado de electrodos más ancho, produce una penetración más profunda. Entonces se conectan nodos inteligentes a los electrodos que habilitan a cada uno estar en cualquier estado de espera, modos de medición corriente o potencial. Estos nodos son controlados por un sistema automático de interrupción multielectrodo, que marcha a través de la combinación programada de electrodos.

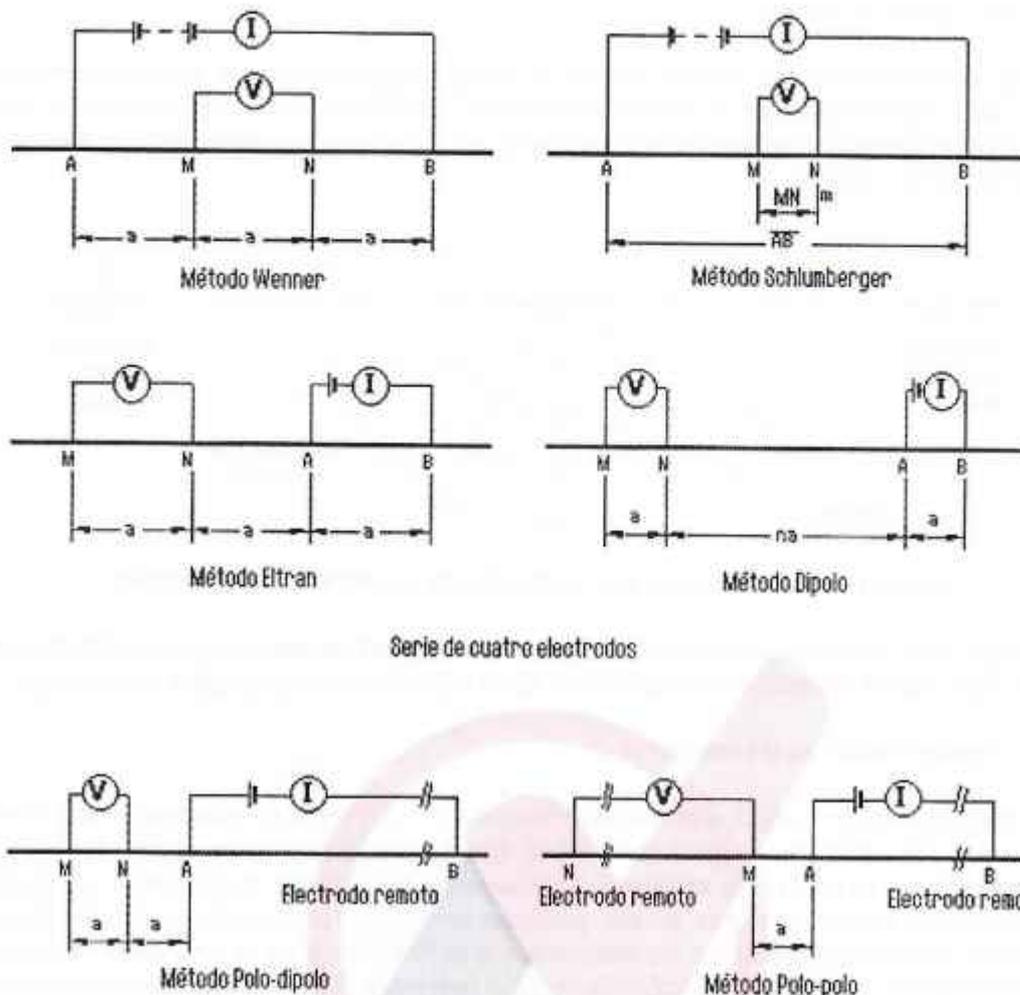


Figura B.9 - Distribución de arreglos de electrodos

Los procedimientos de medición, (véase en la figura B.10), son ejecutados de los siguientes modos:

- 1) Instalar un electrodo corriente y un electrodo potencial en el 1^{er} y 2^{do} punto respectivamente, y comenzar la medición.
- 2) Fijar un electrodo corriente, mover un electrodo potencial al siguiente punto, uno a uno, y continúe la medición y hágalo ascender al último punto.
- 3) Mover un electrodo corriente al siguiente punto y medir instalando un electrodo potencial en el siguiente punto.
- 4) Desplazar una repetición de la medición anterior de arriba al último punto, uno a uno, después complete la medición.

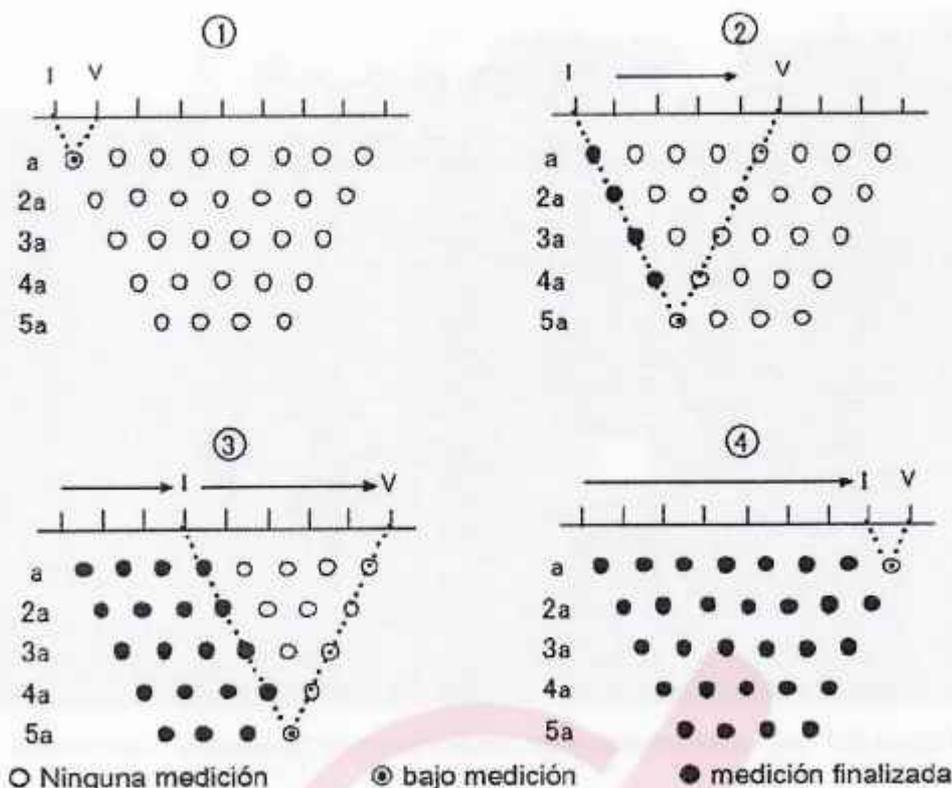


Figura B.10 - Procedimientos de medición

d) Instrumentos de Medición

Los principales instrumentos de medición usados para perfilar la resistividad eléctrica (véase tabla B.3) y la distribución de la medición de campo (véase en la figura B.11 (a) y (b)).

Tabla B.3 - Instrumentos de medición

Nombre	Modelo	Especificación	Cantidad
Instrumentos de Medición eléctrica (equipo principal)	McOHM-21 MODELO-2116	Voltaje máximo: DC200V cambio directo Corriente máxima: 200 mA	1 juego
Máquina de cambio de electrodo	Scanner Geo-eléctrico MODELO-2107 A	32 canales	2 juegos
Barras o electrodos	Acero inoxidable	$\phi = 2$ mm, L=40 cm	48 pzas.
Cable eléctrico	Cable exclusivo	Cable Take-out, 8 canales, espaciamiento de 10 m con conectores calmán)	320 m x 2
Cable eléctrico largo	Clothing single track	Poder eléctrico: 600V	500 m
Batería	La Bateria para carro	12 V y 24 AH	2 juegos

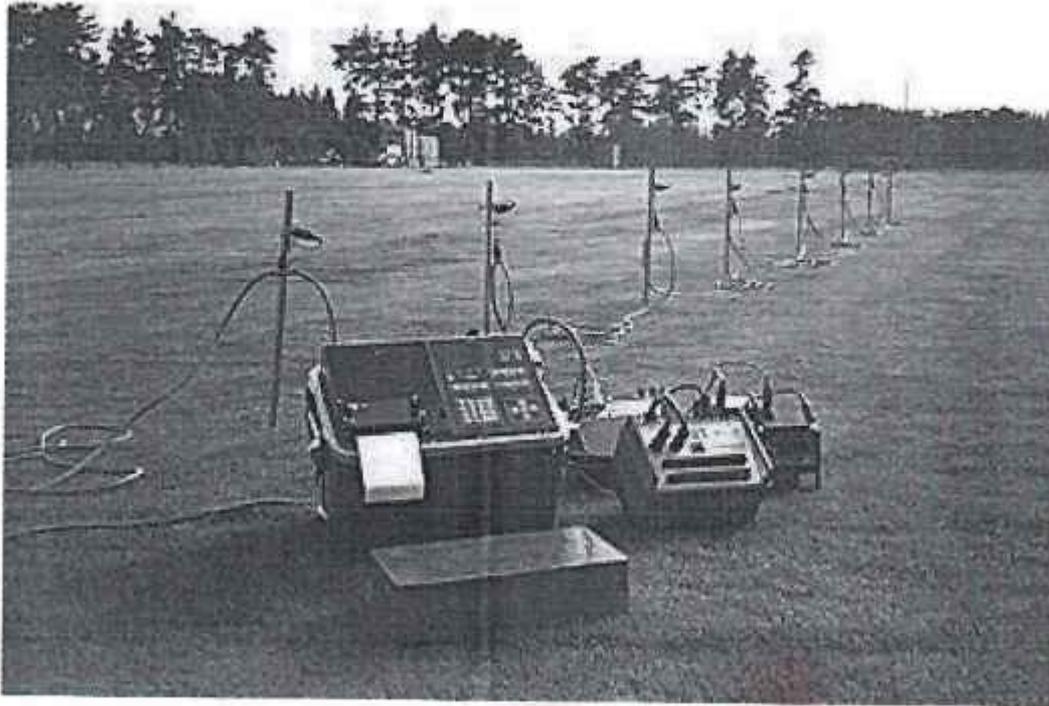


Figura B.11(a) - Instrumentos de medición y distribución de electrodos



Figura B.11 (b) - Equipo y Distribución de electrodos

e) Análisis e interpretación

El procesamiento de datos es realizado usando un Software de Aplicación como el RES2DINV y/o el EARTH IMAGER 2D. Este Software usa diferencias finitas de aproximación para calcular los valores de resistividad que se ajustan mejor a los datos observados. El método iterativo de mínimos-cuadrados, incrementa progresivamente el ajuste para cada una de las ejecuciones del código hacia delante.

El perfil resultante es la mejor estimación de la sección de resistividad real y es desplegada en un formato de contorno coloreado en ohm-metros para su interpretación. Utilizando electrodos de superficie múltiple y un sistema de interrupción multi-electrodo que selecciona automáticamente la distribución de electrodos, los estudios es posible llevarlos a cabo rápidamente y con precisión.

Ejemplo: Salida de imágenes de tres (3) diferentes arreglos de electrodos en la misma línea del lugar; resultado de análisis del método Dipolo-dipolo, (véase figuras B.12; B.13 y B.14).

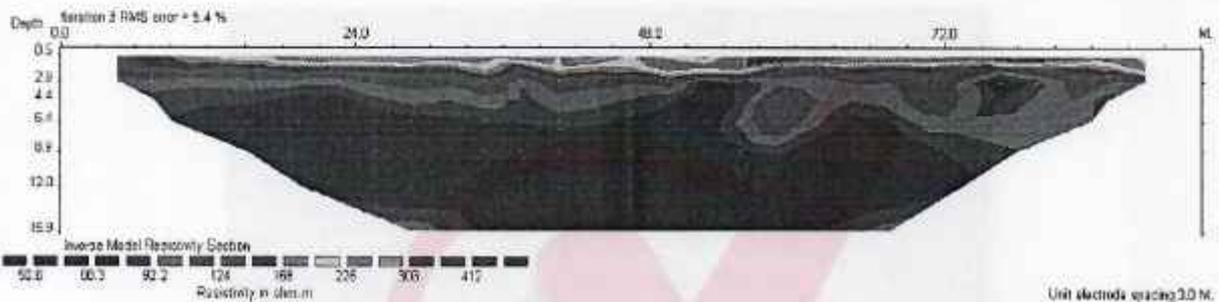


Figura B.12 - Resultado de análisis del método Dipolo-dipolo

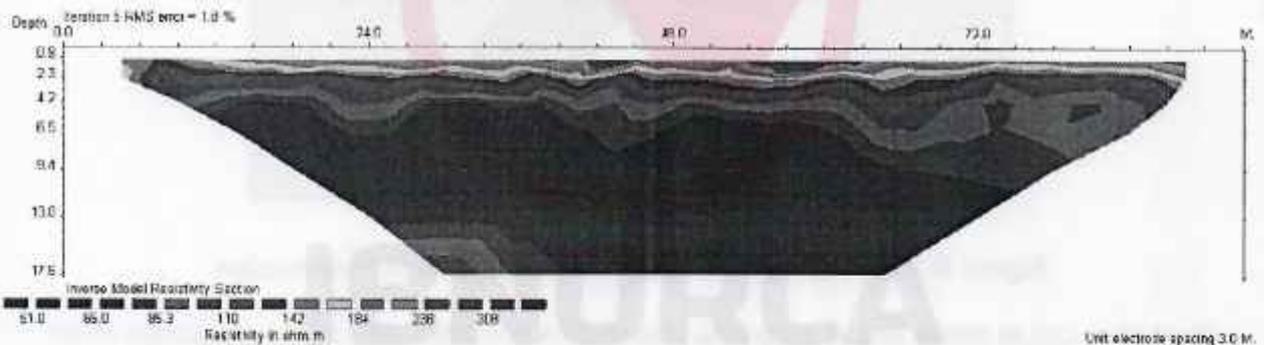


Figura B.13 - Resultado del análisis del método Schlumberger

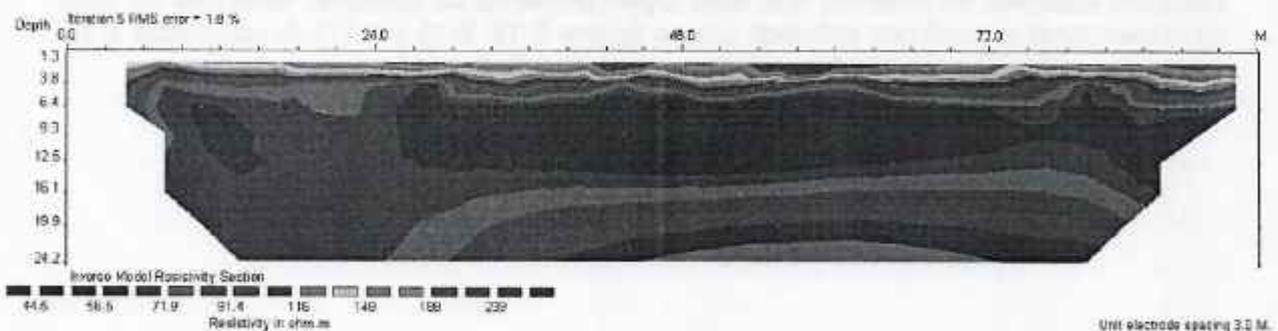


Figura B.14 - Resultado del análisis del método Polo-polo

f) Aplicaciones

- Exploración de aguas subterráneas
- Monitoreo de cúmulos lixiviados (separación química) en depósitos de desecho
- Intrusión salina
- Prospección de minerales
- Exploración industrial de minerales
- Detección de fallas del subsuelo
- Investigaciones del Permafrost (suelo helado de forma permanente en glaciares)
- Cartografía geológica

(2) Trabajos en de campo

La ventaja del equipo de McOHM Profiler-4 de OYO, es la visualización de la medición en tiempo real en el monitor, en caso de haber algunas mediciones no registradas o errores en la medición por cables no conectados o sueltos (por accidentes en campo, como animales o hurto de cables) se posible remediar en ese momento.

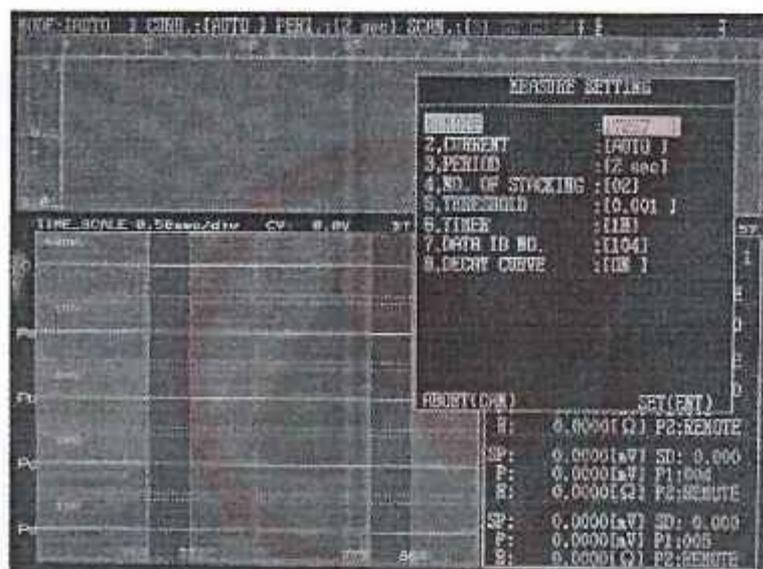


Figura B.15 - Verificación de las conexiones de los electrodos

Se cuenta con el modo Test el programa que verifica que cada uno de los electrodos estén bien conectados y con buena circulación de corriente. También detecta por número de electrodo (aparece en amarillo) que tiene algún problema de conexión, entonces se debe de inspeccionar el electrodo señalado (véase figuras B.15; B.16 y B.17). Al comprobar si los electrodos están bien conectados, está listo para iniciar la medición.

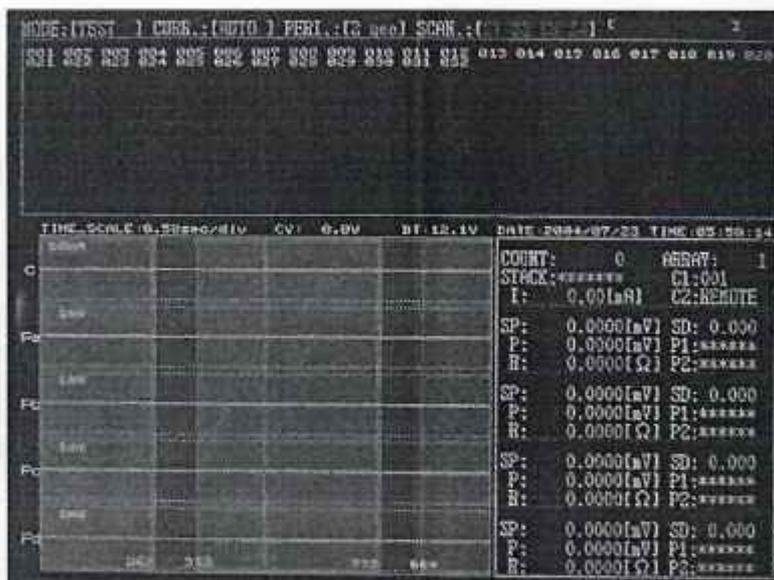


Figura B.16 - Verificación de conexiones finalizada

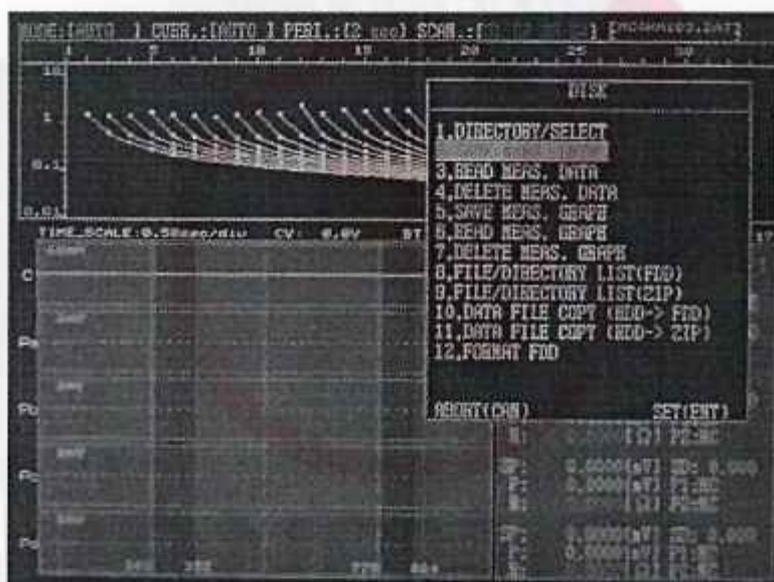


Figura B.17 - Resultado final de las mediciones en campo

Con los datos correctos verificados en campo se debe guardar. En ese momento se inicia la interpretación de los resultados obtenidos en campo. En el caso de que no se obtenga resultados positivos de la interpretación (acuíferos potenciales), se prosigue con las prospecciones de campo hasta obtener alguna línea con resultados positivos para la ubicación del punto de perforación, (véase figuras B.18; B.19; B.20 y B.21).

©IBNORCA - DERECHOS RESERVADOS

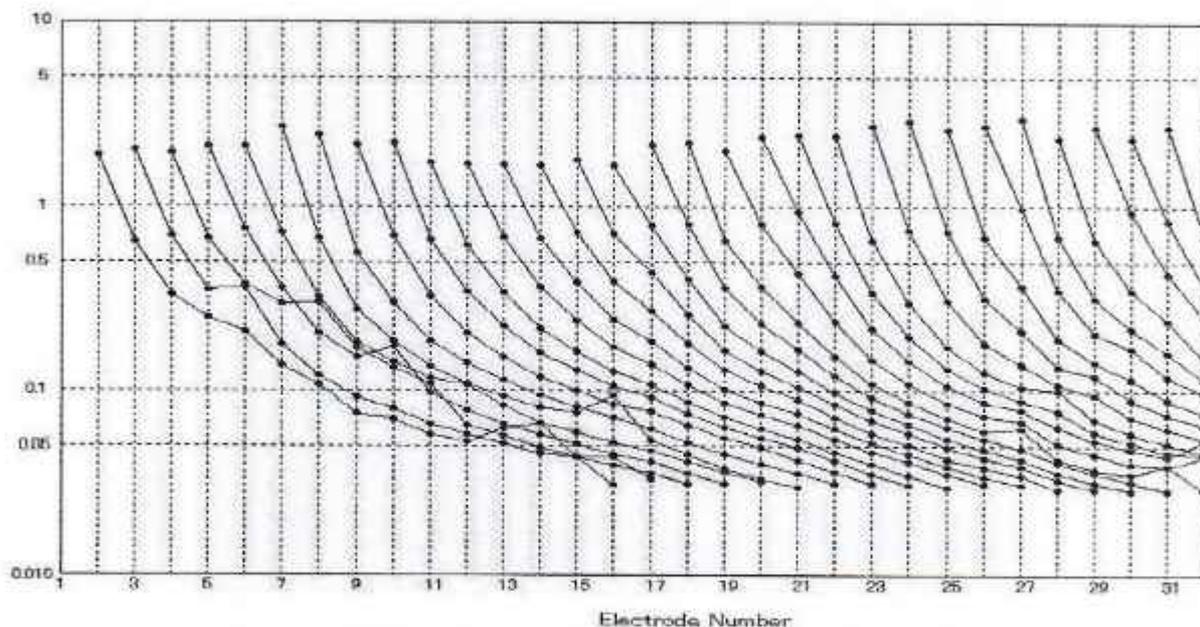


Figura B.18 - Curva de atenuación

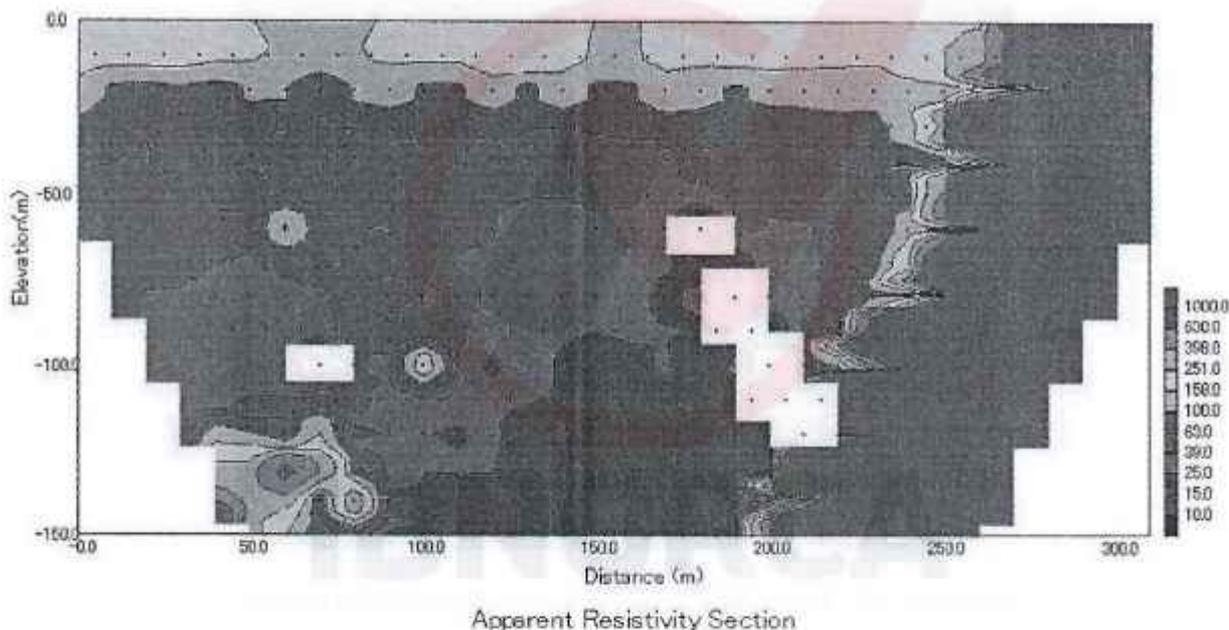


Figura B.19 - Sección de la resistividad aparente (con datos de campo)

Fecha 2021-02-03 - 10057

DOCUMENTO PROTEGIDO POR EL DERECHO DE PROPIEDAD INTELECTUAL
Para uso exclusivo de ING. SILVIA BELCOUR GONZALEZ

©IBNORCA - DERECHOS RESERVADOS

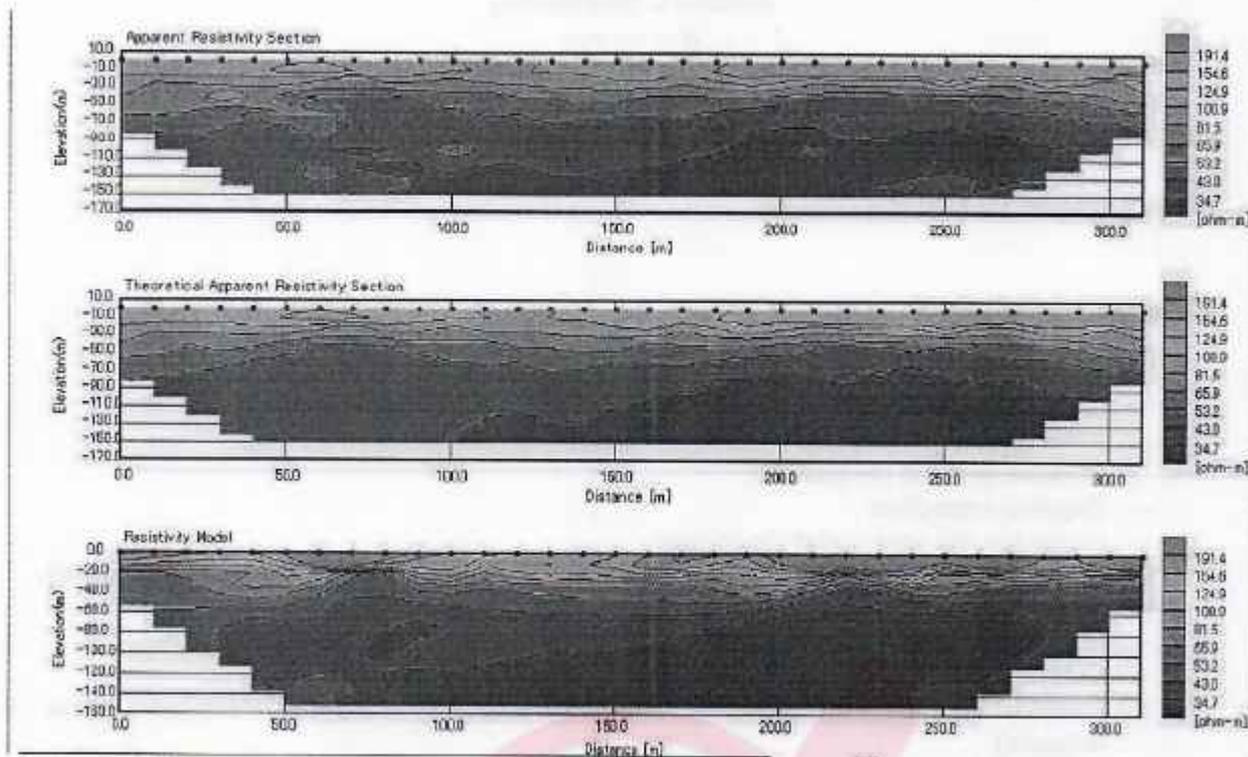


Figura B.20 - Fin del análisis (con 40 interacciones)

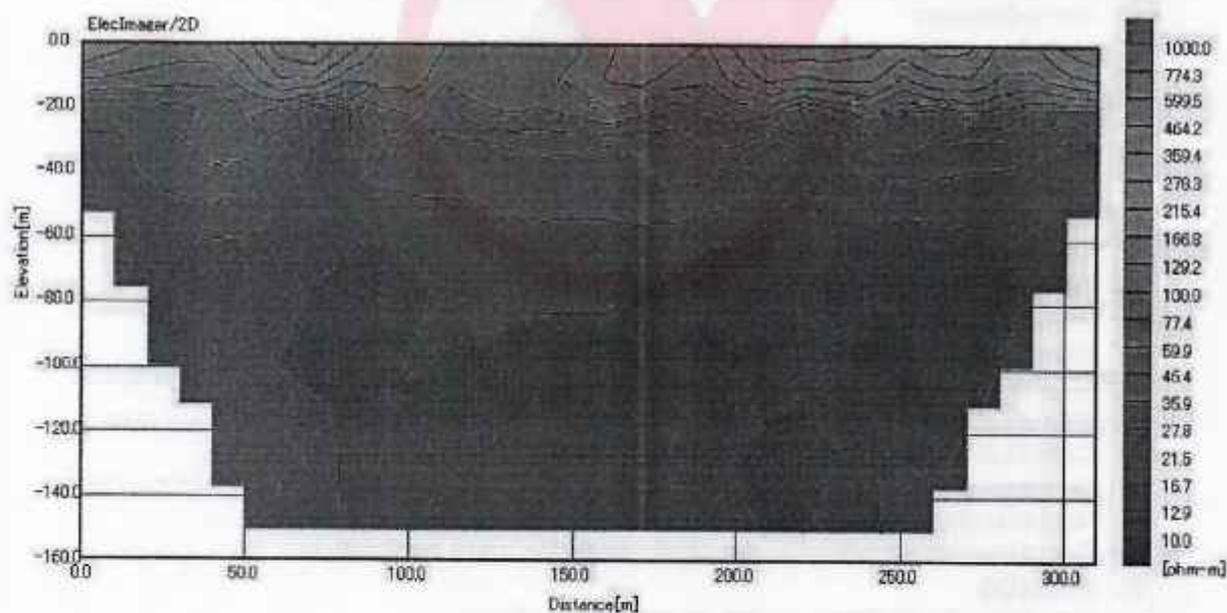


Figura B.21 - Resultado del análisis (Resultado final)

Con estos resultados de la interpretación de los estudios geofísicos, el profesional hidrogeólogo conjuntamente con el geofísico, definen el punto con mayor posibilidad de encontrar agua.

Fecha 2021-02-03 - 10057

DOCUMENTO PROTEGIDO POR EL DERECHO PROPIETARIO INTELECTUAL
Para uso exclusivo de ING. SILVIA DELGADO RODRIGUEZ

ANEXO C (Normativo)

Contenido Mínimo del Informe de Estudio Geofísico

CARATULA CON NOMBRE DE LA EMPRESA RESPONSABLE

Firma y sello de técnico responsable

RESUMEN EJECUTIVO

- 1) **GENERALIDADES**
 - Antecedentes
 - Objetivo general del Estudio
 - Objetivo específico
 - Ubicación del área y vías de acceso
- 2) **CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO (con mapa adjunto)**
 - Fisiografía
 - Geomorfología
 - Estratigrafía
- 3) **CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO (con mapa adjunto)**
 - Unidades Hidrogeológicas
 - Acuíferos del Área de estudio
- 4) **EXPLORACIÓN GEOFÍSICA (con mapa ubicación de sondeos adjunto)**
 - Generalidades
 - Método geofísico utilizado (SEV, TE o SEB, EM, Método Sísmico)
 - Características del equipo empleado
 - Metodología de trabajo
- 5) **FASES DE TRABAJO**
 - Trabajo preliminar de gabinete
 - Trabajo de campo
 - Trabajo final de gabinete
- 6) **INTEGRACIÓN Y CORRELACIÓN DE RESULTADOS**
 - Perfiles geofísicos
 - Características y descripción de los perfiles
 - Mapas de resistividad de diferentes niveles con su descripción
 - Interpretación de la prospección
- 7) **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
 - Conclusiones
 - Recomendaciones
 - Coordenadas y profundidades recomendadas, para perforación
- 8) **ANEXOS**
 - Presentación de datos crudos de estudio geofísico
 - Coordenadas de inicio y final del perfil
 - Levantamiento topográfico de la línea de perfil (necesario para lugares accidentados)
 - Planos e imágenes satelitales con ubicación de perfiles
 - Interpretación de pseudo perfiles
 - Fotografías