



Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable
PROAGRO
Programa Nacional de Riego
PRONAR

Galerías

Filtrantes

Serie de Investigación Aplicada N° 5

CRITERIOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE OBRAS DE CAPTACIÓN PARA RIEGO



PROAGRO es
ejecutado por:

giz

Galerías

Filtrantes

PRESENTACIÓN

El Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, ha encargado al Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable PROAGRO, la revisión, actualización y re-edición de documentos técnicos elaborados por el Programa Nacional de Riego.

El documento de “Criterios de Diseño y Construcción de Galerías Filtrantes”, fue publicado por primera vez el año 2004. La presente versión corrige, actualiza y mejora los contenidos del texto con diversos enfoques técnicos para el diseño.

Las Galerías Filtrantes son estructuras subterráneas, que se construyen para captar las aguas de un acuífero, generalmente ubicado en el lecho aluvial de los ríos, cuya estructura permeable permite el flujo del agua en función de las pendientes. Este tipo de obras ha sido concebido para captar el agua y conducirla hacia cámaras y/o canales para su aprovechamiento.

La importancia de las Galerías Filtrantes reside en que son obras que se utilizan para la captación de agua en ríos de montaña; este tipo de infraestructura puede ser de amplia aplicación para las condiciones topográficas de la zona andina de nuestro país, siempre que se cumplan los requisitos de diseño.

El objetivo principal de este documento es poner a disposición de técnicos y especialistas en obras hidráulicas diversos criterios de diseño, así como de operación y mantenimiento de Galerías Filtrantes, además de mostrar mediante estudios de caso las características de estas obras, su desempeño en diversas condiciones y algunas respuestas a los problemas relacionados con ellas, de manera que cuando se adopte este tipo de obras para la captación de agua, sea de una forma apropiada y en concordancia a las condiciones de cada sitio.

El documento describe varias obras construidas en los departamentos de Cochabamba, Oruro y Potosí, que son utilizadas principalmente en sistemas de riego. En cada una de ellas se reportan: el contexto físico ambiental de la cuenca, las características constructivas de las obras y su desempeño.

Finalmente, el documento aparte de presentar criterios relevantes para el diseño, incorporando conceptos y sustentación técnico – teórica, incluye varias alternativas de diseño de acuerdo a las condiciones de la zona.

El Viceministerio pone esta publicación a disposición de los profesionales que trabajan en el sector, con el propósito de que sirva como documento de consulta y contribuya a mejorar los servicios de diseño y construcción de obras de riego para las familias de campesinos regantes del país.



Ing. Carlos Ortuño Yáñez
Viceministro de Recursos Hídricos y Riego

PREAMBULO

El Programa Nacional de Riego PRONAR, a través del subcomponente de Investigación Aplicada, presenta los resultados de la investigación correspondiente al eje temático “diseño de sistemas de riego”:

- Criterios de diseño y construcción de Galerías filtrantes.

La investigación fue estructurada por la oficial de investigación aplicada del PRONAR. La ejecución estuvo a cargo del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón, contratado bajo la modalidad de consultoría. La ejecución estuvo supervisada por la oficial de investigación aplicada en coordinación con los operadores departamentales de Cochabamba, Oruro y Potosí.

El documento fue elaborado bajo la dirección del Ing. Carlos Montaña (Asesor de Infraestructura CAT – PRONAR) y la oficial de investigación aplicada. La revisión del documento estuvo a cargo de los Ing. Augusto Prudencio, Ing. Gastón Miranda, Ing. Víctor Abastoflor y fue aprobado por los miembros del Consejo de Investigación aplicada

Sobre el objetivo de la investigación

El objetivo principal del documento es proponer criterios de diseño, operación, mantenimiento y recomendaciones constructivas para GALERÍAS FILTRANTES, acorde con las condiciones regionales existentes en nuestro país. Se pretende que a través de estudios de casos se aquilate los problemas relacionados con los criterios de diseño, procedimientos constructivos, mantenimiento y operabilidad, destinada hacia la búsqueda de soluciones viables que orienten al diseño y la construcción de infraestructura eficiente, pertinente y adecuada a las condiciones locales.

Sobre la estructuración del documento

El documento está constituido por un capítulo introductorio en el que se presenta la metodología utilizada en la investigación, posteriormente, se presentan los casos estudiados para luego hacer un análisis sobre la interrelación entre gestión del agua y características de diseño y construcción de los casos estudiados.

Antes de abordar el tema en cuestión, se presenta un capítulo con bases conceptuales útiles para abordar el diseño de galerías filtrantes. Asimismo, se hace referencia de manera breve a los aspectos medioambientales en relación a la construcción de galerías filtrantes

En los capítulos siguientes se analizan los criterios técnicos de diseño y construcción tomando en cuenta los casos estudiados. Por último se brindan conceptos de mantenimiento de galerías filtrantes.

Sobre el equipo de investigación

La investigación fue realizada por el siguiente equipo técnico: Ing. Juan Mejía, Ing. Mauricio Villazon, Ing. Sabina Laura, Ing. Víctor Rojas, Ing. Marco Escobar e Ing. Galo Muñoz (Director de equipo)

Los sistemas de riego investigados

Nuestros agradecimientos a quienes posibilitaron esta investigación, los usuarios de los sistemas de riego:

Taquiña, Río Seco, Montecillos, Tajras, Tipa Tipa, Thako Thako y Bañados, Kuru Mayu, Tipajara, Loro Mayu, Tipapampa, Kjaruma, Zamora en el departamento de Cochabamba.

Realenga, Paco Pampa, Huayña Pasto Chico, Condor Chinoca en el departamento de Oruro. Maldonado y Buena Vista en el departamento de Potosí.

Zulema Gutiérrez Pérez
Oficial de investigación aplicada

INDICE

CAPITULO 1 ASPECTOS GENERALES

1.1. ANTECEDENTES.....	13
1.2. ESTRUCTURACIÓN DEL DOCUMENTO.....	15

CAPÍTULO 2 DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS EN ESTUDIO

2.1. INTRODUCCIÓN.....	17
2.2. SISTEMAS DE RIEGO EN COCHABAMBA.....	17
2.2.1. Sistema de riego Taquiña.....	17
2.2.2. Sistema de riego Río Seco (Chaqui Mayu).....	20
2.2.3. Sistema de riego Montecillos.....	22
2.2.4. Sistema de riego Tajras.....	25
2.2.5. Sistema de riego Tipa Tipa.....	28
2.2.6. Sistema de riego Thako Thako y Bañados.....	31
2.2.7. Sistema de riego Kuru Mayu.....	34
2.2.8. Sistema de riego Tipajara.....	36
2.2.9. Sistema de riego Loro Mayu.....	38
2.2.10. Sistema de riego Tipapampa.....	40
2.2.11. Sistema de riego Kjaruma.....	42
2.2.12. Sistema de riego Zamora.....	44
2.3. SISTEMAS DE RIEGO DE ORURO.....	46
2.3.1. Sistema de riego Realenga.....	46
2.3.2. Sistema de riego Paco Pampa.....	48
2.3.3. Sistema de riego Huayña Pasto Chico.....	50
2.3.4. Sistema de riego Condor Chinoca.....	53
2.4. SISTEMAS DE RIEGO DE POTOSI.....	56
2.4.1. Sistema de riego Maldonado.....	56
2.4.2. Sistema de riego Buena Vista.....	58

CAPITULO 3 VALORACIÓN DE LA ADAPTABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA A LA CAPACIDAD DE GESTIÓN

3.1. INTRODUCCION.....	61
3.1.1. Algunos conceptos.....	61
3.1.2. Capacidad de autogestión.....	61
3.1.3. Construcción social de la tecnología.....	62
3.2. INTERRELACION ENTRE GESTION DE AGUA Y DISEÑO.....	63
3.2.1. Interrelación entre diseño - construcción y organización en galerías filtrantes.....	63
3.2.2. Interrelación entre diseño, construcción y mantenimiento en galerías filtrantes.....	64
3.2.3. Interrelación entre diseño, construcción y operación/distribución en galerías filtrantes.....	66
3.2.4. Interrelación entre diseño, construcción y derechos de agua en galerías filtrantes.....	67
3.3. CAPACIDAD DE GESTION SOBRE LAS OBRAS CONSTRUIDAS.....	68

CAPITULO 4 FLUJO DEL AGUA EN EL SUELO

4.1. PRINCIPIOS DEL MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	73
4.1.1. Algunos parámetros que describen el movimiento del agua subterránea.....	75
4.2. ECUACIONES QUE DESCRIBEN EL FLUJO SUBTERRÁNEO.....	79
4.3. APROXIMACIÓN AL FLUJO HACIA UNA GALERÍA FILTRANTE.....	82
4.4. ELEMENTOS DE FLUJO SUBTERRÁNEO REGIONAL.....	83

CAPITULO 5 APROVECHAMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EN GALERÍAS FILTRANTES, EN UN CONTEXTO MEDIO AMBIENTAL

5.1. INTRODUCCIÓN.....	89
5.2. ETAPAS PROPUESTAS PARA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE UNA GALERÍA FILTRANTE	89
5.2.1. Descripción del entorno.....	90
5.2.2. Legislación Ambiental.....	90
5.2.3. Predicción del Impacto	92

CAPÍTULO 6 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE GALERÍAS FILTRANTES

6.1. INFORMACIÓN REQUERIDA.....	95
6.1.1. Aforos de caudales superficiales	96
6.1.2. Análisis Granulométrico.....	96
6.1.3. Sondeos geoelectrónicos	97
6.1.4. Instalación de piezómetros.....	97
6.1.5. Pruebas de bombeo	101
6.2. CRITERIOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE GALERÍAS	111
6.2.1. Criterios para la localización en planta.....	111
6.2.2. Criterios para la ubicación en vertical.....	114
6.3. CRITERIOS PARA LA ORIENTACIÓN DE LAS GALERÍAS	119
6.3.1. Configuraciones particulares de galerías	120
6.4. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE LA CÁMARA DE CAPTACIÓN DE LA GALERÍA FILTRANTE	121
6.4.1. Consideraciones hidráulicas para muros de gaviones	122
6.5. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE FILTROS.....	124
6.6. CRITERIOS PARA DISEÑO DE BARBACANAS	128
6.6.1. Criterios de diseño de barbacanas.....	129
6.7. CRITERIOS PARA EL EMPLEO DE PANTALLAS.....	130
6.8. COLECTORES COMO CÁMARA DE LA GALERÍA FILTRANTE	132
6.8.1. Pendiente del colector	133
6.8.2. Orificios de entrada al colector	133
6.8.3. Forma, tamaño y distribución de las perforaciones.....	134
6.9. CÁMARAS DE INSPECCIÓN	136
6.10. TIPO DE MATERIALES EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE GALERÍAS FILTRANTES	137
6.10.1. El gavión como material de construcción de galerías	139
6.11. ALGUNAS CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL.....	142

CAPÍTULO 7 CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE GALERÍAS FILTRANTES

7.1. INTRODUCCIÓN.....	147
7.2. MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN	147
7.3. EXCAVACIÓN	148
7.4. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	148

CAPÍTULO 8 CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EL MANTENIMIENTO DE GALERÍAS FILTRANTES

8.1. INTRODUCCIÓN.....	151
8.2. MANTENIMIENTO DE GALERÍAS FILTRANTES EN EL MEDIO.....	151

ANEXO 1 EJEMPLO DE APLICACIÓN UTILIZANDO MODELACIÓN MATEMÁTICA

1.1. INTRODUCCIÓN.....	155
1.2. UBICACIÓN.....	155
1.3. TOPOGRAFÍA	158

1.4. PRUEBAS EN CAMPO PARA DETERMINAR PROPIEDADES DEL MATERIAL.....	162
1.5. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL FILTRO.....	166
1.6. NAPA FREÁTICA.....	168
1.7. MODELACIÓN MATEMÁTICA.....	169
1.7.1. Armado del modelo.....	160
1.7.2. Topografía.....	170
1.7.3. Propiedades del lecho.....	171
1.7.4. Nivel Freático.....	173
1.7.5. Condiciones de borde.....	173
1.7.6. Calibración del modelo matemático.....	176
1.8. CONCLUSIONES.....	178
1.9. RESULTADOS.....	178
1.9.1. Nivel Freático.....	178
1.9.2. Dirección y velocidad del flujo subterráneo.....	180
1.9.3. Modelación con una sola conductividad hidráulica.....	182

ANEXO 2 COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD MEDIDOS EN CALICATAS

2.1. INTRODUCCIÓN.....	185
2.2. MÉTODOS INDIRECTOS PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD (HAZEN)....	186
2.3. RECARGA DE ACUÍFERO.....	186
2.4. MÉTODO DE CARGA VARIABLE.....	187
2.5. MÉTODO DE HOOGHOUTD.....	188
2.6. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN POZOS DE OBSERVACIÓN (PIEZÓMETROS).....	189
2.7. POZOS ENTUBADOS EN SUELOS HOMOGÉNEOS.....	190
2.8. POZOS ENTUBADOS CON UNA EXTENSIÓN NO ENTUBADA O FILTRO.....	191
2.9. POZO ENTUBADO CON SUELO INTERIOR.....	192
2.10. PLICACIÓN DEL SOFTWARE AQUIFERTEST PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN CAMPO.....	193
2.10.1. Hvolstev Slug/Bail test.....	193
2.11. RESULTADOS PRUEBAS DE CAMPO.....	195
2.12. OEFICIENTES DE DISPERSIÓN RESPECTO A LAS CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS CALIBRADAS.....	206
2.13. COEFICIENTES DE DISPERSIÓN RESPECTO A LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA ÚNICA.....	208
2.14. SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD.....	210

ANEXO 3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y ECUACIONES EMPÍRICAS

3.1. INTRODUCCIÓN.....	211
3.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	211
3.3. ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	211
3.3.1. Introducción.....	211
3.4. PRINCIPIO DE FOURIER.....	212
3.5. MÉTODO DE RAYLEIGH.....	213
3.6. MÉTODO DE BUCKINGHAM.....	213
3.7. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES DE LA BASE DE DATOS.....	213
3.8. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO.....	215
3.9. RESULTADOS.....	216
3.9.1. Hipótesis 1.....	219
3.9.2. Hipótesis 2.....	222
3.10. CONCLUSIONES.....	225

Figura 2.2.1	Galería Taquiña; Vista general	17
Figura 2.2.2	Galería Río Seco (Tarata); Etapas de la construcción	20
Figura 2.2.3	Galería Montecillos; vista interior (estructura con gaviones).....	22
Figura 2.2.4	Galería Tajras; interior de la galería (muros de H°C°, barbacanas 2" PVC)	25
Figura 2.2.5	Galería Tipa Tipa; vista interior, muros de mampostería seca y encadenado de H°A°	28
Figura 2.2.6	Galería Thako Thako; interior de la galería, vista puntual de ingreso del agua, el muro aguas arriba es de mampostería de piedra y aguas debajo de H° C°	31
Figura 2.2.7	Galería Kuru Mayu; raíces dentro la galería	34
Figura 2.2.8	Galería Tipajara; vista general donde se ubica la galería	36
Figura 2.2.9	Galería Loro Mayu; proceso de construcción.....	38
Figura 2.2.10	Galería Tipapampa; vista interior	40
Figura 2.2.11	Galería Kjaruma; ubicación de la galería	42
Figura 2.2.12	Galería Zamora; vista interior	44
Figura 2.3.1	Galería Realenga; cámara de inspección y tubería de ampliación de la galería	46
Figura 2.3.2	Galería Paco Pampa; lugar de emplazamiento.....	48
Figura 2.3.3	Galería Huayña Pasto Chico; cámaras de ingreso	50
Figura 2.3.4	Galería Condor Chinoca; barbacanas.....	53
Figura 2.4.1	Galería Maldonado; muro de protección	56
Figura 2.4.2	Galería Buena Vista; lugar de emplazamiento.....	58
Figura 4.1	Esquema del tiempo empleado por el agua en moverse en un sistema subterráneo	75
Figura 4.2	Esquemización de flujo unidimensional hacia una galería filtrante	83
Figura 4.3	El nivel de agua en un piezómetros se levantará hasta igualar la carga hidráulica representada por la energía potencial en el extremo abierto del piezómetro.....	84
Figura 4.4	Líneas de flujo en el campo de líneas equipotenciales.....	85
Figura 4.5	Flujo regional de una zona llana. La napa freática es paralela a la superficie	86
Figura 4.6	Flujo regional en una zona llana que es controlado por un río	86
Figura 4.7	Heterogeneidad del medio poroso. Influencia de un lente de grava en el material del lecho del río.	87
Figura 5.1	Recarga desde el río al material aluvial circundante en época de aguas altas	93
Figura 5.2	Recarga desde el material aluvial para formar un caudal subterráneo base, durante aguas bajas.....	93
Figura 6.1	Esquema de la disposición y montaje de piezómetros	98
Figura 6.2	Disposición esquemática de piezómetros para averiguar la dirección de flujo regional.....	99
Figura. 6.3	Disposición de piezómetros cuando las lecturas se deban realizar desde varios estratos	100
Figura 6.4	Medida del coeficiente de permeabilidad mediante pozos con agua (Montemayor, 1979)	101
Figura 6.5	Esquema del método de carga variable para pozos descubiertos (Cedergren).....	102
Figura 6.6	Coeficiente de forma S (Cedergren)	103
Figura 6.7	Esquema del método de Hooghoudt para pozos descubiertos (Kisielov, 1972).....	104
Figura 6.8	Ejemplo de datos de campo graficados	105
Figura 6.9	Esquema del ensayo (Cedergren)	106

Figura 6.10	Esquema del ensayo con filtro (Cedergren).....	107
Figura 6.11	Esquema del ensayo con material dentro (Cedergren).....	108
Figura 6.12	Acuífero en proceso de recarga	109
Figura 6.13	a) Recarga de acuífero, b) Recuperación de acuífero	110
Figura 6.14	Composición del lecho del río en dependencia de la descarga	113
Figura 6.15	Graduación del tamaño del grano esquematizado a lo largo de la corriente	113
Figura 6.16	Variación hipotética del nivel freático en el subálveo de un río. Se muestra la profundidad D a la que se implanta la obra y I la profundidad de la napa para un cierto mes.....	115
Figura 6.17	Relación adimensional entre la profundidad de implante (I/D) de la galería frente al caudal esperado captar.....	116
Figura 6.18	Metodología para hallar la máxima profundidad de una galería filtrante desde el punto de vista del beneficio/costo.	118
Figura 6.19	Orientación de la galería filtrante según las líneas de flujo subterráneo y las orillas del río.....	119
Figura 6.20	Esquematización del flujo en un acuífero conformado por dos materiales diferentes, acuífero en sí, y filtro.	122
Figura 6.21	Influencia en el caudal captado por una galería en función a la variación de permeabilidades y espesores de un filtro.....	124
Figura 6.22	Esquematización de la disposición de filtros en una galería filtrante.....	125
Figura 6.23	Ejemplo de diseño de un filtro que consta de tres capas, según Design of Small Dams (US Bureau Reclamation, 1987).....	127
Figura 6.24	Disposición frecuente de galerías filtrantes con pantallas interpuestas al flujo subterráneo.....	130
Figura 6.25	Líneas de flujo dirigiéndose hacia las galerías con pantalla superior e inferior	131
Figura 6.26	Galería de infiltración conformada por un colector circular	132
Figura 6.27	Distribución típica de las perforaciones circulares en tuberías de hierro fundido.....	135
Figura 6.28	Distribución típica de perforaciones en forma de ranuras.....	135
Figura 6.29	Detalle de una cámara de inspección intermedia	136
Figura 6.30	Mampostería seca empleada para conformar los muros de una galería ...	137
Figura 6.31	Galería filtrantes que utiliza gaviones en sus paredes.....	138
Figura 6.32	Galería construida con hormigón ciclópeo. Se observa las barbacanas practicadas	138
Figura 6.33	Esquema de gavión.....	139
Figura 6.34	Aberturas en una malla del gavión.....	141
Figura 6.35	Esquematización de las fuerzas actuantes contra la galería filtrante (Halcrow, 1990).....	143

INDICE DE PLANOS

Plano 2.2.1	Galería Taquiña; Corte Longitudinal y Transversal	19
Plano 2.2.2	Galería Río Seco (Chaqui Mayu); Sección transversal y longitudinal.....	21
Plano 2.2.3	Galería Montecillos; Sección transversal y longitudinal de la estructura del proyecto a diseño final	24
Plano 2.2.4	Galería Tajras; Secciones transversal y longitudinal construida	27
Plano 2.2.5	Galería Tipa Tipa; Secciones de diseño y construidas.....	30
Plano 2.2.6	Galería Thako Thako; sección transversal y perfil longitudinal	33
Plano 2.2.7	Galería Kuru Mayu; sección transversal y perfil longitudinal.....	35
Plano 2.2.8	Galería Tipajara; Sección transversal de diseño y construida	37
Plano 2.2.9	Galería Loro Mayu; Ubicación y sección transversal	38

Plano 2.2.10	Galería Tipapampa; Sección transversal y perfil longitudinal.....	40
Plano 2.2.11	Galería Kjaruma; sección transversal y perfil longitudinal.....	42
Plano 2.2.12	Galería Zamora; sección transversal y perfil longitudinal	44
Plano 2.3.1	Galería Realenga; sección transversal, cámara de inspección y detalle filtro	46
Plano 2.3.2	Galería Paco Pampa; cámara de inspección	48
Plano 2.3.3	Galería Huayña Pasto Chico. perfil longitudinal y sección transversal	50
Plano 2.3.4	Galería Condor Chinoca; Planta y cortes.....	53
Plano 2.4.1	Galería Maldonado; sección transversal y barbacanas	56
Plano 2.4.2	Galería buena Vista; sección transversal.....	58

INDICE DE TABLA

Tabla 4.1	Valores típicos de la producción específica S_y , y de la retención específica S_r	74
Tabla 4.2	Valores típicos de la producción específica S_y	77
Tabla 4.3	Valores típicos de la porosidad	78
Tabla 4.4	Valores de la permeabilidad intrínseca y la conductividad hidráulica (Fetter, 1978).....	79
Tabla 5.1	Secuencia de etapas en la evaluación del impacto por utilizar galerías filtrantes.....	91
Tabla 6.1	Valores del coeficiente C según Hazen para hallar la conductividad hidráulica	96
Tabla 6.2	Intervalo de lecturas para el registro de niveles piezométricos durante una prueba de recuperación (Kruseman, 1991).....	100
Tabla 6.3	Caudales hipotéticos captados por la galería en función al gradiente hidráulico mensual	117
Tabla 6.4	Relación de galerías filtrantes con pantallas y caudales captados	131
Tabla 6.5	Dimensiones comerciales de gaviones tipo caja.....	140
Tabla 6.6	Pesos específicos de materiales rocosos para uso en gaviones.....	141

1

CAPÍTULO

ASPECTOS GENERALES

1.1. ANTECEDENTES

A Bolivia por su ubicación geográfica próxima a la línea ecuatorial debiera corresponderle tener un clima tropical lluvioso; sin embargo, su climatología y orografía es modificada por la elevación de la cordillera de los Andes definiendo sus regiones en puna, valles y llanos. En general, la zona montañosa puede ser clasificada como región semiárida (la evaporación promedio anual supera a la precipitación) con desigual distribución espacial de recursos hídricos.

A pesar de esta escasez, la población rural aprovecha muy bien los recursos hídricos superficiales, y cuando estos son restringidos, los subterráneos se constituyen en la fuente alternativa de provisión de agua para sus necesidades.

Estos aprovechamientos subterráneos se dan a través de la construcción de galerías o zanjas filtrantes, esperando captar en las épocas de estiaje caudales suplementarios para las siembras. Aunque desde épocas pretéritas ya se efectuaron estos aprovechamientos en el subálveo de ríos o torrentes efímeros, ese conocimiento no fue sistematizado ni difundido, tanto así, que con el desarrollo de teorías en medios porosos incluso no se han alcanzado los rendimientos esperados durante la fase de diseño.

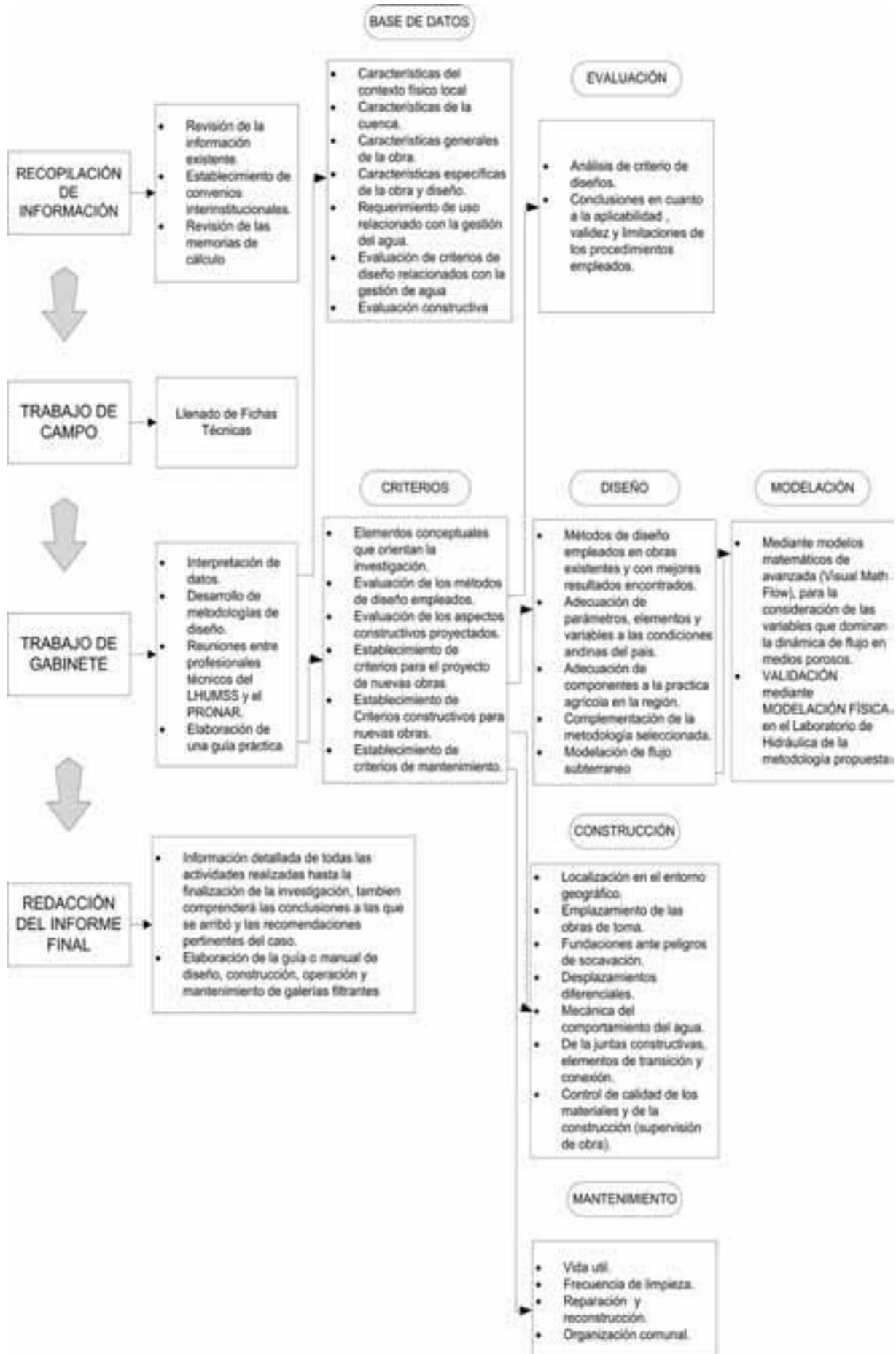
Este documento es un intento de capitalizar las experiencias de galerías filtrantes construidas, de reflexionar sobre aciertos u omisiones, sistematizar lo aprendido y presentarlo a manera de metodologías para el diseño y construcción de este tipo de obras.

Este trabajo no pretende ser exhaustivo ni definitivo pues está sustentado en trabajo de campo realizado solo en un número restringido de galerías filtrantes visitadas de una población numerosa. Las obras construidas y visitadas presentan fallas de diversa índole y además debido a diferentes factores sufren un deterioro progresivo, que a la larga se traduce en la inoperabilidad de las mismas, incluso algunas de ellas ya están fuera de servicio.

El objetivo principal del documento es proponer criterios de diseño, operación, mantenimiento y recomendaciones constructivas para GALERÍAS FILTRANTES, acorde con las condiciones regionales existentes en las zonas de estudio. Se pretende que a través de estudios de casos se aquilate los problemas relacionados con los criterios de diseño, procedimientos constructivos, mantenimiento y operabilidad, destinada hacia la búsqueda de soluciones viables y factibles que permitan mejorar los resultados encontrados hasta ahora.

Para lograr este objetivo, la metodología utilizada es la que se presenta en el siguiente diagrama:

Diagrama de Flujo



1.2. ESTRUCTURACIÓN DEL DOCUMENTO

El documento contiene 8 capítulos y 3 anexos debidamente relacionados. El capítulo 1 presenta los antecedentes y la metodología utilizada en la investigación. El diagnóstico y la evaluación de los casos estudiados, se desarrollan en el capítulo 2. La interrelación entre gestión del agua y diseño de infraestructura está descrita en el capítulo 3.

El capítulo 4 tiene como objeto el difundir las bases conceptuales que describen el origen, movimiento y destino de las aguas subterráneas a nivel regional. Se aborda el problema de la heterogeneidad de la conductividad hidráulica y los parámetros y ecuaciones de la dinámica del agua en medios porosos.

El capítulo 5 enfoca el problema de la cantidad de agua subterránea a explotar y las restricciones ambientales que establece la Ley 1333. En este capítulo también se expone el caso de galerías filtrantes escalonadas en un río, y el compromiso del técnico proyectista para reconocer el impacto de ellas en aguas arriba y aguas abajo.

El capítulo 6 enuncia los criterios técnicos para la implementación de una galería filtrante, que abarca desde su orientación, la profundidad a la que debe estar localizada, el diseño de sus partes componentes como las pantallas orientadoras de flujo, los filtros, barbacana, cámaras de inspección, drenes, etc.

En el capítulo 7 se realizan las consideraciones técnicas para la construcción de galerías filtrantes, en el cual se hace un análisis de los requerimientos técnicos-sociales y de materiales que serán aplicados en la fase de construcción. Por último en el capítulo 8 se brindan conceptos de mantenimiento de galerías, en el cual también se explica la forma de realizar el mantenimiento de las galerías.

2

CAPÍTULO

DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS EN ESTUDIO

2.1. INTRODUCCIÓN

Las galerías filtrantes investigadas se encuentran en los departamentos de Oruro, Potosí y Cochabamba. Durante el trabajo de campo se ha hecho una inspección pormenorizada de cada una de las obras construidas, haciendo un relevamiento de información desde la concepción del estudio, detalles constructivos, tipos de galerías y materiales utilizados, diseños aplicados. Asimismo, se consideró la práctica de gestión de los sistemas de riego en cuanto a la operación y el mantenimiento de las galerías filtrantes. También se han realizado entrevistas con los usuarios para determinar su opinión sobre dichas obras.

Asimismo, se realizaron excavaciones en el material de los acuíferos y los filtros de manera de tener una opinión constructiva y de funcionamiento de estos elementos: Producto de toda esta evaluación, se tiene un levantamiento de fichas de proyecto donde se detalla cada caso.

2.2. SISTEMAS DE RIEGO EN COCHABAMBA

2.2.1. Sistema de riego Taquiña

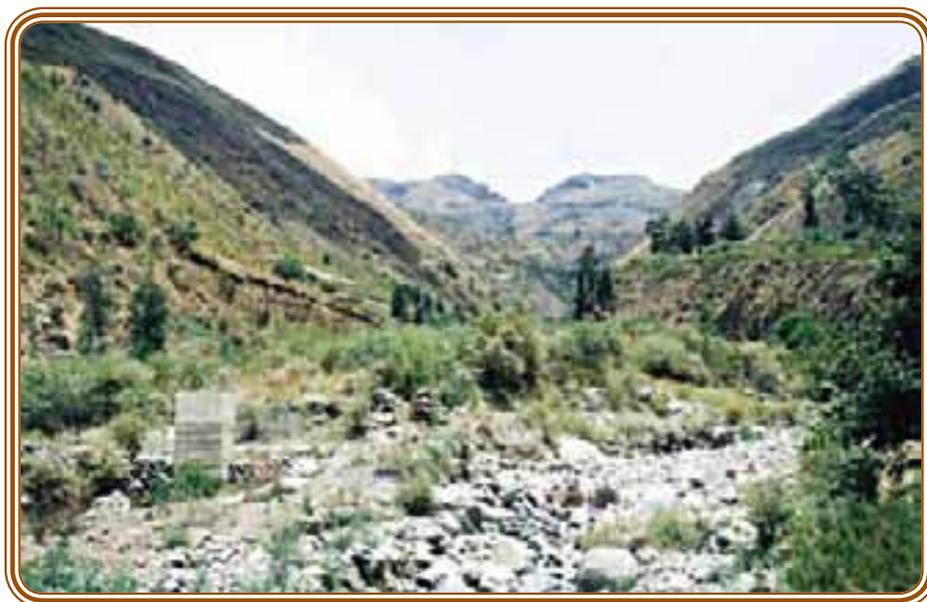


Figura 2.2.1 Galería Taquiña; Vista general

Ubicación:	Departamento:	Tipo de obra:	Galería filtrante - Tajamar
	Cochabamba		
	Provincia:	Cercado	Materiales: Muros de H° C°
	Municipio:	Tiquipaya	Tapa: Losa de H° A°
	Localidad:	Tiquipaya	Caudal de galería: 4.1 l/s
	Altura (m.s.n.m): 2896	Caudal del río:	15.0 l/s

La galería- tajamar se ubica en un río de alta pendiente (15 %) con mucho arrastre de material aluvial con piedras de gran dimensión (1.5 m de diámetro). La obra es pasible a quedar erosionada, sin embargo, para aminorar este efecto se ha dotado de un muro, por encima de la galería. La obra tiene una longitud de 22 m.

La obra sirve como fuente para suplir la demanda de agua para consumo en los barrios de Ciudad del Niño. La ubicación de la obra fue forzada, debido a la presión de otros usuarios que se encuentran aguas abajo y arriba. Geográficamente el emplazamiento de la galería, respecto del área de distribución, es correcto.

Conceptualmente la obra en su conjunto (galería - tajamar) es buena, pese a que este tipo de obra no es muy aconsejable para ríos de alta pendiente, se aplicó este criterio a falta de agua superficial permanente.

La obra se ubica en todo el ancho del río transversalmente y se ha diseñado tomando en cuenta todos los criterios técnicos para los diferentes elementos que componen la galería, para las condiciones locales.

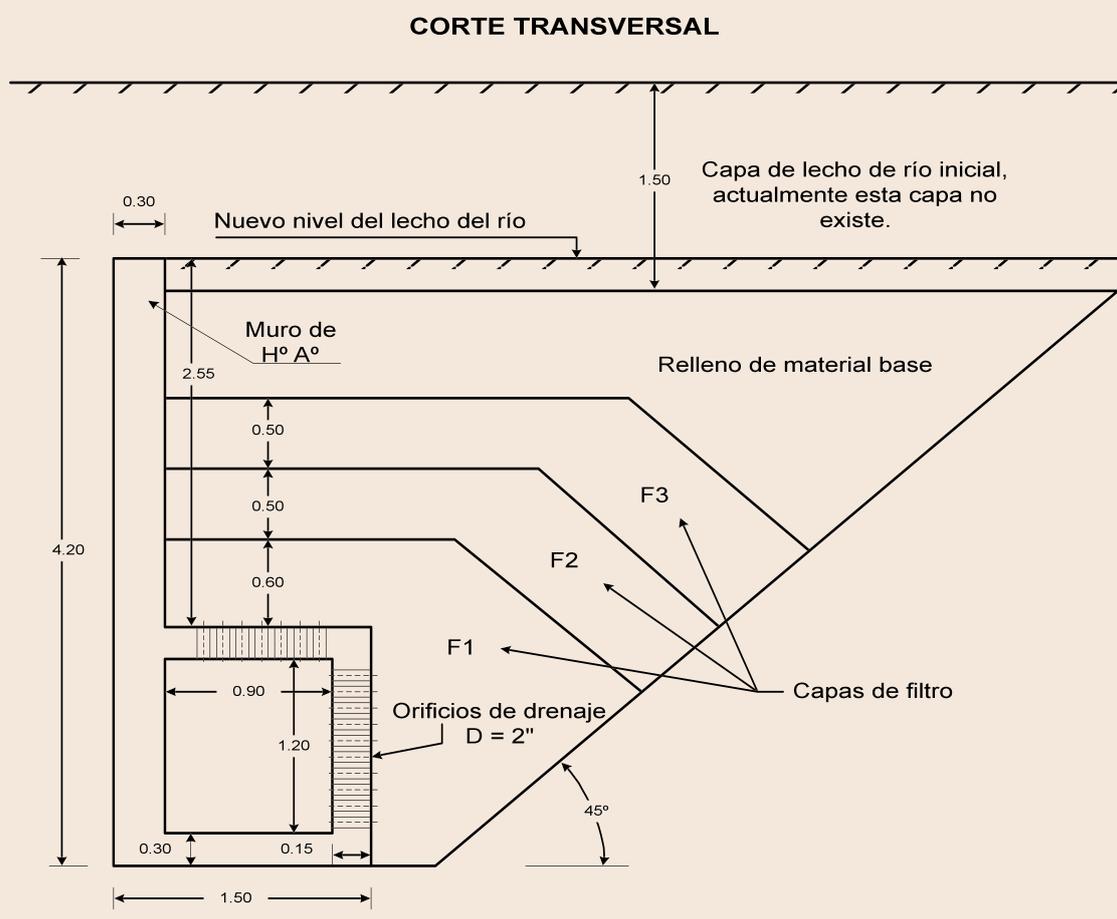
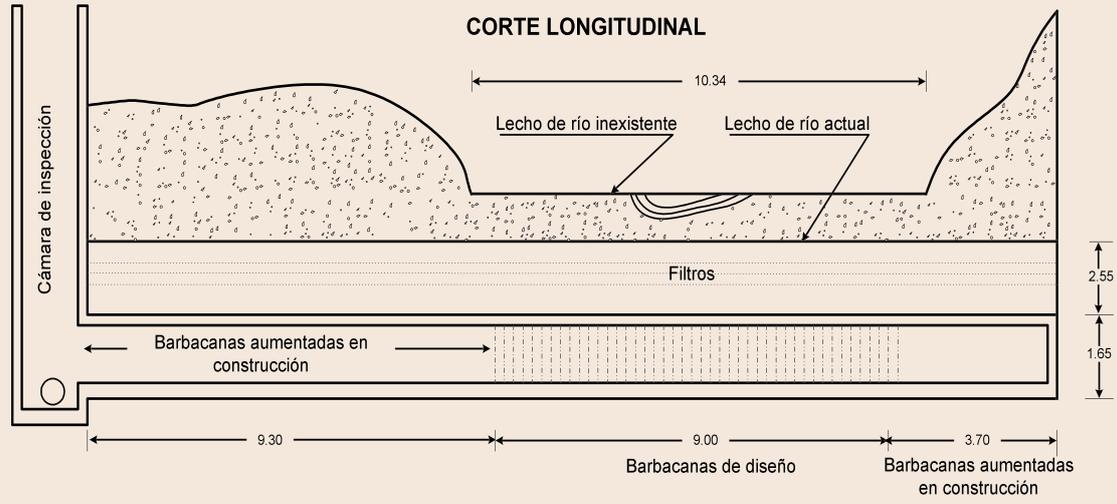
Las barbacanas se han colocado de forma que excede en gran manera la superficie necesaria para la entrada de caudal de diseño, es decir que la pared y el techo se ha cuadrículado con orificios de 2" cada 10 cm, lo que parece innecesario, que además debilita la estructura.

Los filtros que se colocaron no cumplen su función eficientemente porque, no satisfacen la ley de filtros de Terzaghi (no es lo suficientemente libre al paso del agua, según los resultados del laboratorio). La galería capta un caudal de 4.1 l/s mucho menor que el caudal de diseño que era de 19.8 l/s, por tanto, la obra no es funcional para los fines de cubrir la demanda de agua de los usuarios. Por la escasez de agua captada en la galería en época de estiaje, hacen uso del agua superficial (si existe), para ello derivan el agua hacia la salida de la galería, para aumentar el caudal.

Constructivamente es una obra de regular a deficiente en sus formas y acabado. Para fines de limpieza y refacción, la galería tiene dimensiones apropiadas, porque permite la entrada de una persona y trabajar casi de forma cómoda.

El lecho del río en el sector de la galería ha sufrido una fuerte erosión, por lo que la galería ha quedado mucho más superficial respecto al lecho, (erosión de 1 m)

Para la construcción de la obra los usuarios del sistema coordinaron con la fábrica de cerveza Taquiña, estableciéndose derechos al agua para los usuarios agrupados en una organización y para la fábrica Taquiña. La operación de la obra es automática, porque funciona por gravedad, por tanto, no requiere de la presencia de un tomero. Las actividades de mantenimiento están relacionadas con la limpieza de la galería (generalmente después de la época de lluvias), para dichos trabajos de limpieza y mantenimiento los usuarios contratan personal (a sueldo). Los usuarios aportan con cuotas fijas mensuales para todos estos trabajos.



2.2.2. Sistema de riego Río Seco (Chaqui Mayu)



Figura 2.2.2 Galería Río Seco (Tarata); Etapas de la construcción

Ubicación:	Departamento:	Cochabamba		
	Tipo de obra:	Galería filtrante		
	Provincia:	Esteban Arce	Materiales:	Muros de H° C°
	Municipio:	Tarata	Tapa:	Losa de H° A°
	Localidad:	Tarata	Caudal de galería:	0.0 l/s
	Altura (m.s.n.m):	2.740	Caudal del río:	0.0 l/s

La galería se ubica en un río de curso efímero y de baja pendiente (2 %) tiene poco arrastre de sedimento, la obra no corre peligro de ser erosionada. En los planos del diseño original, la obra tenía una longitud de 110 m y se ubica longitudinalmente y paralela al lecho del río junto a la margen izquierda. Pero por problemas sociales con usuarios de otro sistema de riego, se cambió la posición de la obra, colocándola transversal al lecho y en forma de V. La ubicación actual de la obra permitía regar casi en su totalidad los terrenos de cultivo.

El criterio aplicado para el diseño de las cámaras de inspección de la tubería de aducción (que se encuentran en el lecho del río) es incorrecto en cuanto a los materiales (M° P°), debería haber sido de hormigón armado para soportar las avenidas, o en su caso, totalmente enterradas por debajo del lecho del río. A consecuencia de esta decisión, colapsó una cámara y no funciona la galería.

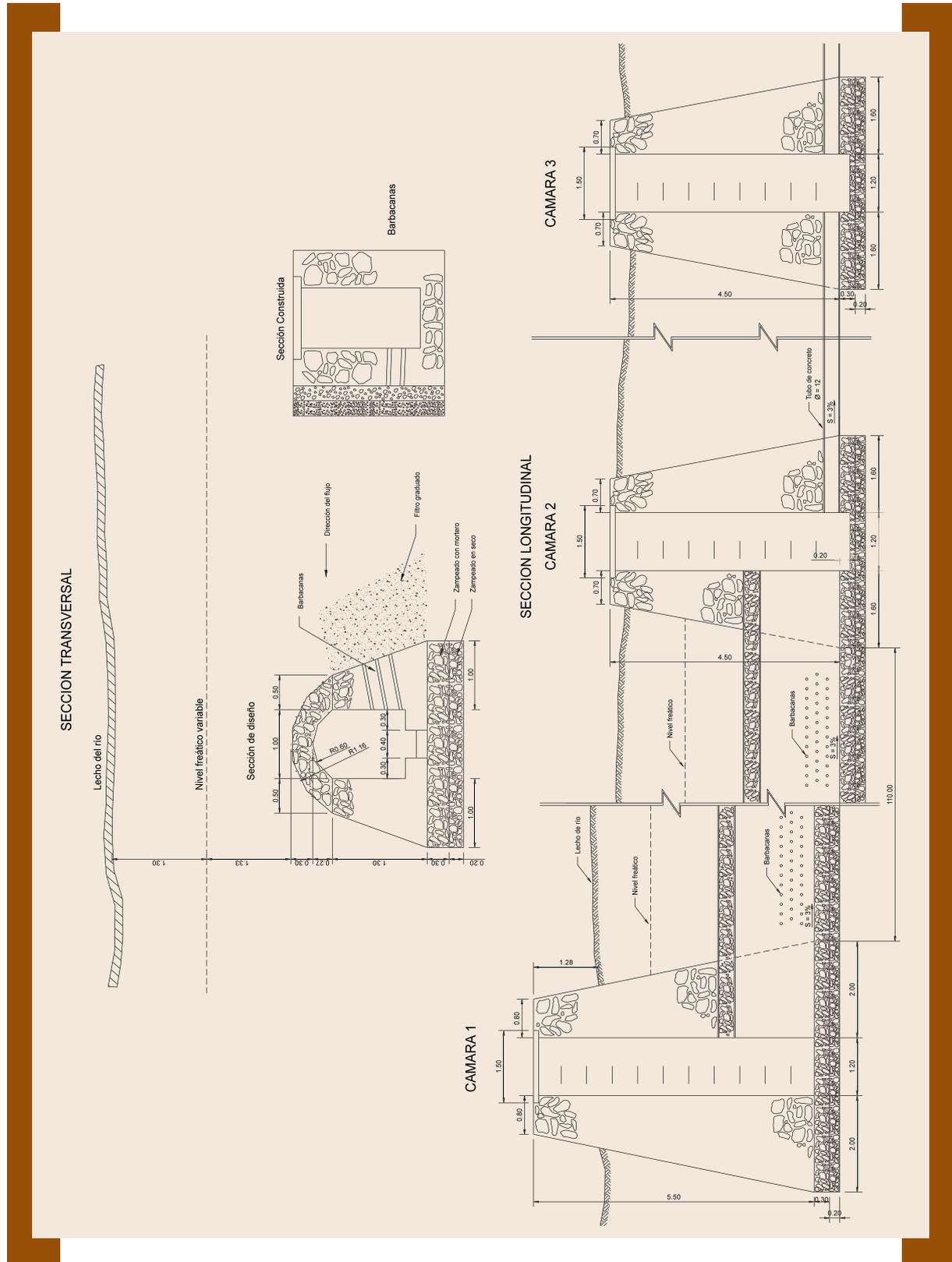
Las barbacanas tienen un diámetro de 2" y están espaciadas cada 15 cm, de forma triangular (a tres bolillos) de acuerdo a diseño.

Los filtros que se colocaron no cumplen su función eficientemente, porque no concuerdan con la ley de filtros de Terzaghi. El material colocado en la etapa de construcción no fue procesado debidamente y tampoco se hicieron pruebas de granulometría para verificar si cumple con la ley de filtros, por consiguiente, se concluye que dicho material colocado como filtros, no cumple las especificaciones técnicas constructivas.

Para fines de limpieza y refacción, la galería tiene dimensiones que permiten entrar y trabajar de forma cómoda.

Cuando la obra de toma funcionaba existía una organización que permitía la gestión del sistema de riego, pero a consecuencia de las últimas sequías (1.997), la obra se secó completamente ocasionando el abandono de los usuarios y la desintegración de la organización.

Plano 2.2.2 Galería Río Seco (Chaqui Mayu); Sección transversal y longitudinal



2.2.3. Sistema de riego Montecillos

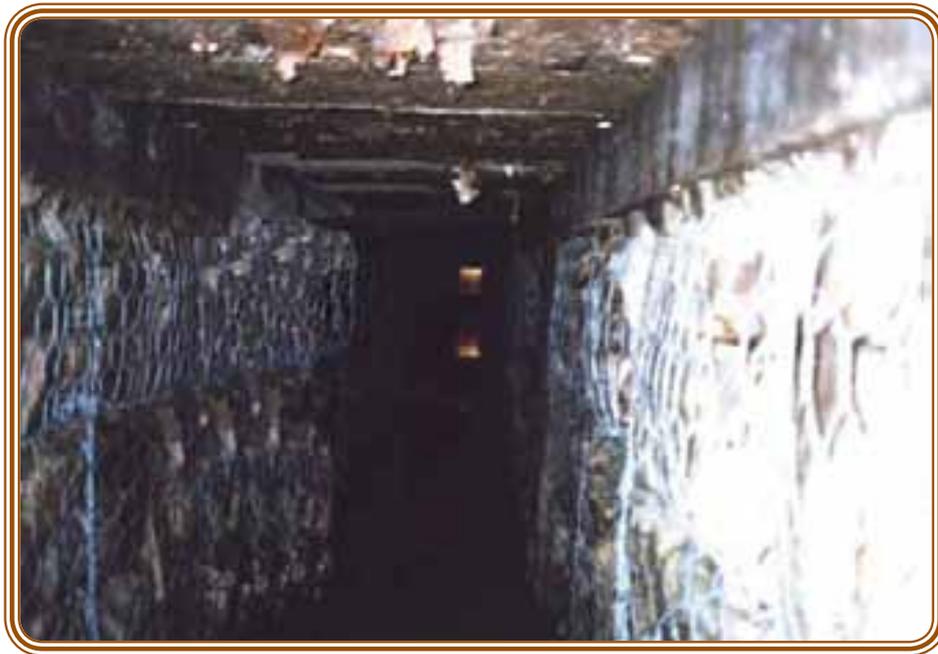


Figura 2.2.3 Galería Montecillos; vista interior (estructura con gaviones)¹

Ubicación:	Departamento:	Tipo de obra:	Galería filtrante
	Cochabamba		
	Provincia:	Mizque	Materiales: Muros de Gaviones
	Municipio:	Mizque	Tapa: Losa y encadenado de H° A°
	Localidad:	Montecillos	Caudal de galería: 133.0 l/s
	Altura (m.s.n.m): 2.040	Caudal del río:	0.0 l/s

La galería se ubica en el río Tipajara de régimen efímero con pendiente 4.2 %, con arrastre de sedimento moderado, está ubicada longitudinalmente paralela al lecho del río, cerca de la margen izquierda, esta ubicación resultó ser excelente por situarse en un acuífero de gran permeabilidad (ver Tabla 4.4). La ubicación fue definida por los primeros usuarios del sistema para construir la primera galería. (de acuerdo a información proporcionada por ellos esta galería se ubica sobre el lecho antiguo del río). Esta galería con estructura gavionada fue reconstruida por la U.I.P. (Unidad de Implementación del Fondo de Desarrollo Campesino) en octubre de 1999. La obra tiene una longitud de 114 m.

El diseño de esta obra contempló todos los criterios técnicos para cada elemento que componen la galería, sin embargo, el diseño fue cambiado (en etapa de construcción) por presión de los usuarios, que exigieron que se construya de acuerdo a su experiencia con mampostería de piedra seca (de lo contrario no querían). Es así que en esa etapa y a sugerencia de los técnicos se construyó la obra con muros de gaviones, encadenado y tapado con hormigón armado. El caudal ingresa a través de los orificios entre las piedras de los gaviones y por la solera que constituye el mismo lecho del río.

Comparadas las características del diseño de la obra con la galería construida, se advierte que existen diferencias en: a) los muros, el diseñado es de hormigón ciclópeo y el construido es de gaviones, b) el diseño tiene piso o solera, el construido no tiene piso, c) el diseño tiene barbacanas de PVC diámetro 2" y el construido no tiene porque hacen de barbacanas los orificios entre las piedras acomodadas del gavión y como consecuencia de ello la galería resultó captando más

¹ Fuente: Fotografía proporcionada por el Ing. Luis Guamán de la UIP (Unidad de Implementación del Fondo de Desarrollo Campesino)

caudal del previsto en el diseño. La galería capta un caudal de 133 l/s mucho mayor que el caudal de diseño (41 l/s), por tanto, la obra es funcional y cubre la demanda de agua de los usuarios.

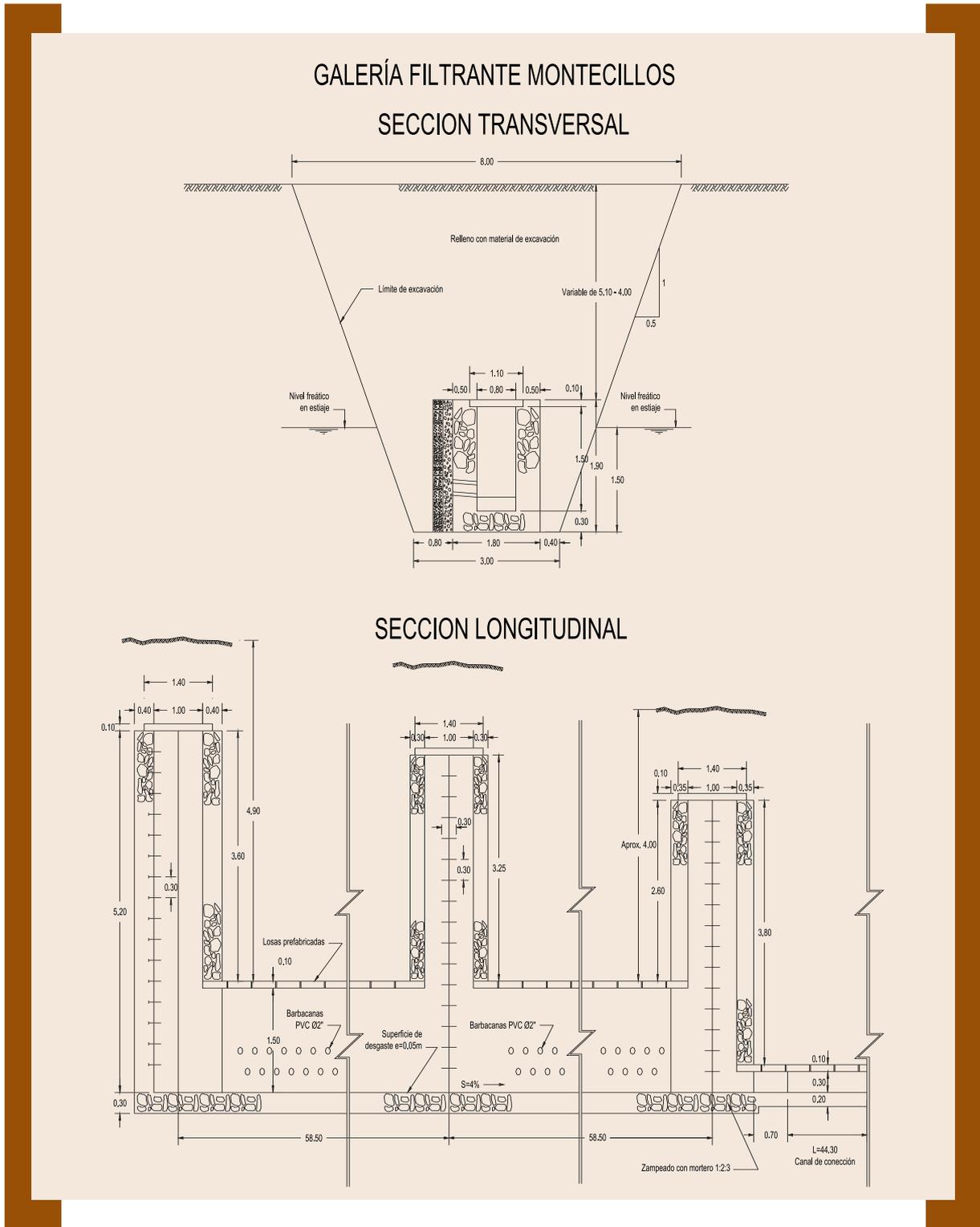
Una razón principal para el cambio de concepto en los muros, es que los usuarios ya tenían experiencia de construir los muros de las galerías solo con piedra acomodada para tener la mayor porosidad en el muro y no colocar solera en el piso por la misma razón.

El filtro colocado para evitar la entrada de finos a la galería no es eficiente, porque permite que se sedimente el interior de la galería, lo que hace necesario un mantenimiento con mayor frecuencia. El filtro colocado está constituido por material del lecho del río, y no fue procesado para este fin, tampoco se hicieron pruebas de granulometría para cumplir con la ley de Terzaghi, por tanto, no es un material que cumpla eficientemente su función, y especialmente en este caso el de evitar que pase el sedimento.

Constructivamente es una obra fácil de realizar, la mano de obra calificada requerida es reducida, sin embargo, por ser nuevo el concepto de utilizarse gaviones en estas obras, resulta incierto el tiempo de vida útil. La obra en sus formas y acabado es buena.

Este sistema de riego antiguamente estaba gestionado por el sindicato campesino de la comunidad, actualmente tienen establecido un comité de riegos con cargo (Juez de agua). Por las inspecciones y entrevistas realizadas, se constató que la galería funciona perfectamente, a efecto de la mejora de la obra, lo que permitió consolidar la organización, con derechos al agua definidos y con el aporte de los usuarios para mantener la obra. El mantenimiento (limpieza de sedimento) se realiza de acuerdo a su experiencia, periódicamente después de las épocas de lluvia, antes del inicio de la época de siembra, en la que participan todos los usuarios. Las características de la obra permiten un trabajo cómodo para realizar el trabajo de limpieza de la galería.

Plano 2.2.3 Galería Montecillos; Sección transversal y longitudinal de la estructura del proyecto a diseño final



NOTA: La estructura construida es de gaviones con encadenado de H^ºA^º, al igual que la galería de Loro Mayu.

2.2.4. Sistema de riego Tajras

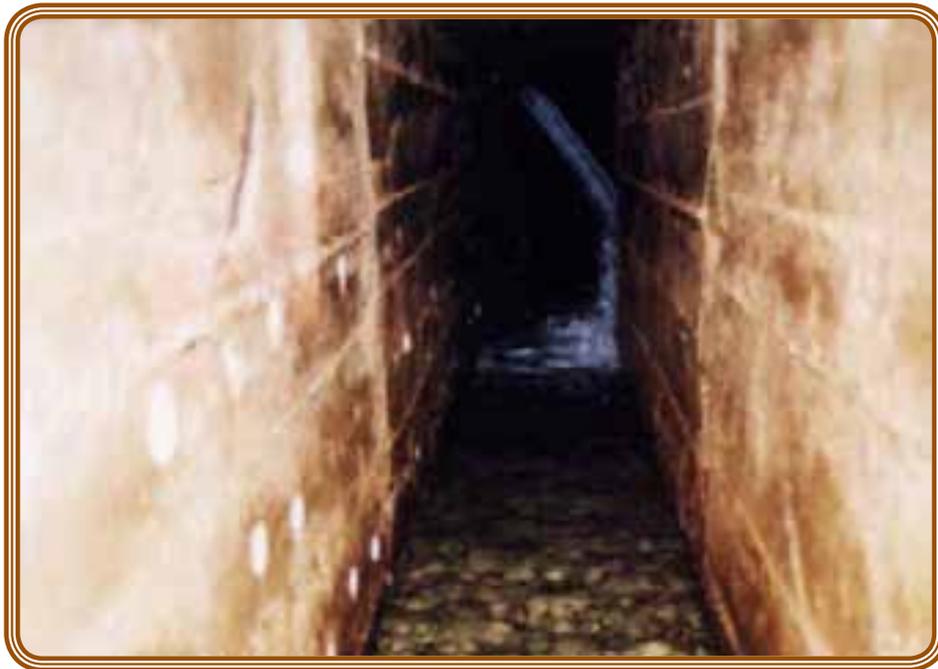


Figura 2.2.4 Galería Tajras; interior de la galería (muros de H°C°, barbacanas 2" PVC)

Ubicación:	Departamento:	Tipo de obra:
	Cochabamba	Galería filtrante
	Provincia: Mizque	Materiales: Muros de H°C°
	Municipio: Mizque	Tapa: Losa de H° A°
	Localidad: Tajras	Caudal de galería: 30.0 l/s
	Altura (m.s.n.m): 2.400	Caudal del río: 0.0 l/s

La galería se ubica en el río Tipajara de régimen efímero con pendiente 4.2 % con arrastre de sedimento moderado, está ubicada diagonalmente al lecho del río, más cerca de la margen derecha. Esta ubicación resultó ser deficiente por el tipo de material en el acuífero, porque se ubica en un acuífero de permeabilidad baja. La ubicación fue definida por los primeros usuarios del sistema cuando construyeron la primera galería. También cabe mencionar que este río proporciona agua a los diferentes sindicatos agrarios que habitan en ambas márgenes del río, lo que limita considerar solamente criterios técnicos para la ubicación de la obra. (la ubicación de esta galería combina lo técnico con lo social). La obra abarca una longitud de 300 m en total.

El diseño de esta obra, contempló todos los criterios técnicos para cada elemento que componen la galería, se ha construido respetando las dimensiones, de la estructura. Sin embargo, existe una falla constructiva de detalle e importante y es que las barbacanas se han colocado sin respetar los espaciamientos entre ellas, lo que es peor, se ha colocado a mucha altura de la base, lo que incide negativamente en la captación de caudal. El caudal ingresa a través de las barbacanas con diámetro de 2", las mismas que están distribuidas a lo largo del muro en forma desordenada.

El filtro colocado para evitar la entrada de finos a la galería no es eficiente, porque permite la deposición de material fino al interior de la galería, repercutiendo en mayor demanda de mantenimiento. Las dimensiones interiores de la galería son buenas para posibilitar la limpieza y el mantenimiento de la obra.

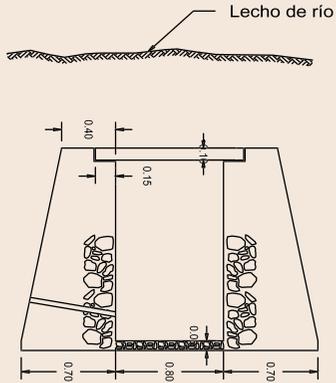
El análisis de los aspectos de diseño y construcción de esta obra permite indicar lo siguiente:

- No se capta el caudal de diseño 50 l/s, en realidad se capta 30 l/s. Conceptualmente la obra en su conjunto es buena, pero debido a que no capta el caudal de diseño no cumple satisfactoriamente con la demanda de los usuarios.
- La dirección de obra no fue eficiente debido a que existen falencias en la ubicación de las barbacanas, no se ha cumplido con el diseño en la ubicación y distribución de las barbacanas (estas fueron colocadas muy por encima de la solera) lo que reduce notablemente la captación de caudal.
- La galería no ha sido alineada correctamente (es decir que no es totalmente recta en el sentido longitudinal) lo que indica que existieron problemas en la excavación del lecho del río.
- El filtro colocado no cumple rigurosamente con las especificaciones técnicas para este fin, debido a que no se realizó el lavado, cernido y las correspondientes pruebas de granulometrías para el material fino y grueso para verificar que cumpla con la ley de Terzaghi para filtros.
- En cuanto a la calidad del hormigón ciclópeo y su acabado es de buena calidad.
- Funcionalmente la galería no cumple correctamente con su cometido de captar mayor caudal debido a la mala ubicación de las barbacanas, (estas deberían estar a 0.17 m por encima del nivel de la solera y no como están actualmente entre 0.40 y 0.50 m.)

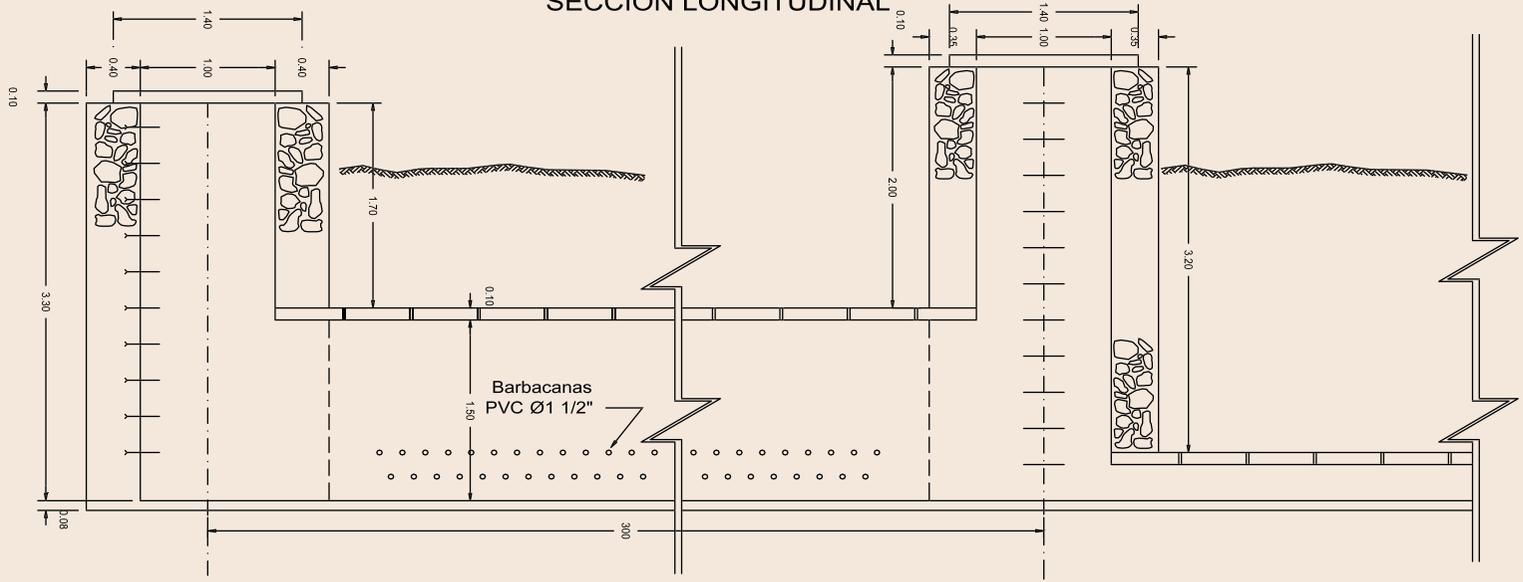
La gestión del sistema de riego de Tajras, tiene las mismas características que la del sistema de Montecillos, debido a que se encuentran ubicada en la misma zona, con la única diferencia de que la limpieza realizan con mayor frecuencia.

GALERÍA FILTRANTE TAJRAS

SECCION TRANSVERSAL



SECCION LONGITUDINAL



2.2.5. Sistema de riego Tipa Tipa



Figura 2.2.5 Galería Tipa Tipa; vista interior, muros de mampostería seca y encadenado de H°A°²

Ubicación:	Departamento:	Tipo de obra:
	Cochabamba	Galería filtrante
	Provincia: Mizque	Materiales: Muros de piedra seca
	Municipio: Mizque	Tapa: Losa de H° A°
	Localidad: Tipa Tipa	Caudal de galería: 57.0 l/s
	Altura (m.s.n.m): 2.316	Caudal del río: 0.0 l/s

La galería se ubica en la unión de los ríos Tipajara y Loro Mayu, ríos que son de régimen efímero con pendiente 1.6 % con poco arrastre de sedimento. La obra se ubica transversal al río Tipajara y paralela al río Loro Mayu, y cerca a la margen izquierda. Esta ubicación resultó ser buena, la misma fue definida por los primeros usuarios del sistema cuando construyeron su primera galería, la cual colapsó con el terremoto de 1998. De acuerdo a información proporcionada por los usuarios, esta galería se ubica en su jurisdicción (mitad izquierda del río Tipajara) no pudiendo ser ampliada ni profundizada por convenios ancestrales con usuarios de la galería Puca Pila ubicada aguas abajo. La longitud de la obra es de 45 m.

El diseño de esta obra contempló todos los criterios técnicos para cada elemento que componen la galería, sin embargo, el diseño fue cambiado en la etapa de construcción. Porque los usuarios exigieron que se construya de acuerdo a su experiencia con mampostería de piedra seca y a sugerencia de los técnicos se aumentó un encadenado y tapado con hormigón armado. Las dimensiones interiores de la galería son excelentes para permitir los trabajos de limpieza para el mantenimiento de la obra.

El caudal ingresa a través de los orificios entre piedras y por la solera que constituye el mismo lecho del río. El caudal que capta está por encima del de diseño, capta un caudal de 57 l/s mayor que el caudal de diseño que era de 30 l/s, por tanto la obra es funcional para los fines de cubrir la demanda actual de agua de los usuarios.

² Fuente: Fotografía proporcionada por el Ing. Luis Guaman de la UIP (Unidad de Implementación del Fonda de Desarrollo Campesino)

Una obra de este tipo con muros de piedra acomodada sin aglomerante (cemento o malla de gavión) es muy frágil. El filtro colocado para evitar la entrada de finos a la galería no es eficiente, fue construido con material del lecho del río y no fue procesado para este fin, tampoco se hicieron pruebas de granulometría para cumplir con la ley de Terzaghi, por tanto, no cumple eficientemente su función, permite que ingresen sedimentos al interior de la galería, lo que hace necesario un mantenimiento con mayor frecuencia.

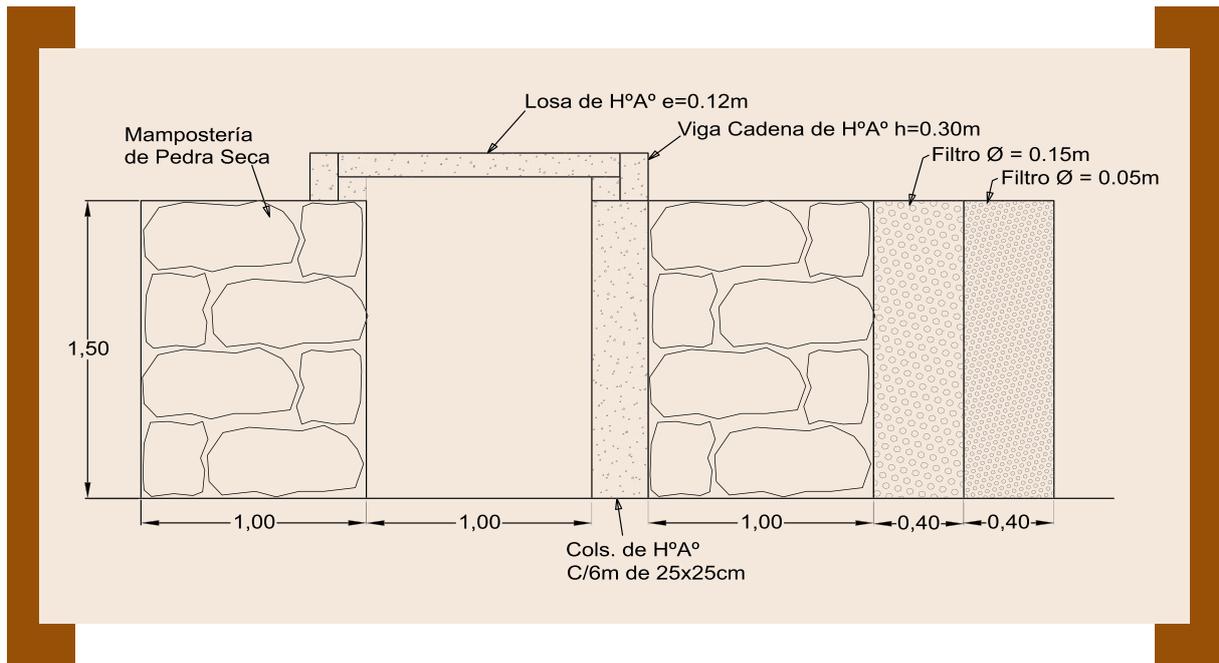
El canal de salida de la galería es una obra rústica que permanentemente se obstruye por derrumbes de la ladera del cerro, lo que perjudica el normal funcionamiento de la galería.

Un detalle constructivo, que en algún momento podría ser perjudicial, es que la cámara de inspección sobresale del nivel del lecho del río y tiene dimensiones grandes, que podría interrumpir el curso de una avenida y provocar erosiones no deseadas.

Esta galería tiene una obra de protección (muro de gaviones) para proteger la salida de la galería y evitar el desborde del río, muro que se encuentra en buenas condiciones y consolidado su posición por varios años.

Al igual que en el caso de Montecillos, si se comparan las características de la obra diseñada y construida se advierte que existen diferencias en: a) los muros, el diseñado es de hormigón ciclópeo y el construido es de mampostería de piedra seca, b) el diseño tiene piso o solera de mortero de hormigón, el construido no tiene piso, c) el diseño tiene barbacanas de PVC diámetro 2" y el construido no tiene porque hacen de barbacanas los orificios

La gestión del sistema de riego de Tipa Tipa, es similar a las de Montecillos y Tajras, debido a que se encuentran ubicadas en la misma zona y sobre el mismo río, con la única diferencia que tienen dos jueces de agua (zona de arriba y abajo), que controlan el reparto de agua y convocan a los trabajos de limpieza. El mantenimiento (limpieza de sedimento) realizan de acuerdo a sus costumbres y tradiciones de la zona, la limpieza se efectúa una o dos veces al año, dependiendo del nivel de sedimentación del colector. El trabajo es realizado en uno o dos días con la participación de los 52 usuarios. La primera limpieza se hace inmediatamente después de la época de lluvias.



Plano 2.2.5 Galería Tipa Tipa; Secciones de diseño y construidas

2.2.6. Sistema de riego Thako Thako y Bañados

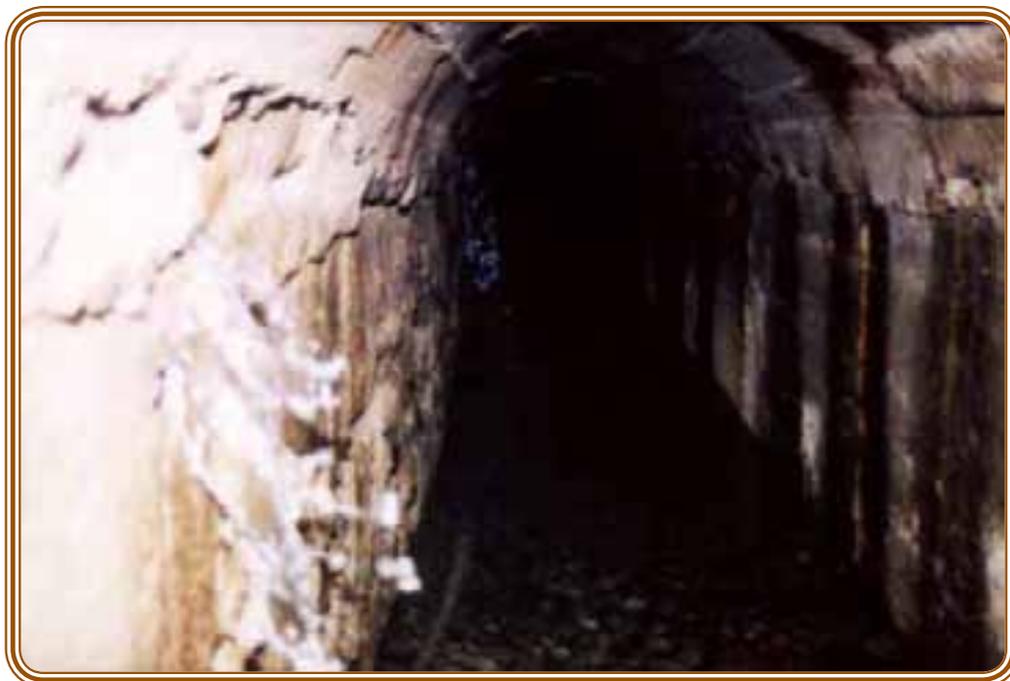


Figura 2.2.6 Galería Thako Thako; interior de la galería, vista puntual de ingreso del agua, el muro aguas arriba es de mampostería de piedra y aguas debajo de H° C°

Ubicación:	Departamento:	Tipo de obra
	Cochabamba	Galería filtrante
	Provincia: Mizque	Materiales: Muros-Mampostería de piedra
	Municipio: Mizque	Tapa: Embovedado de M°P°
	Localidad: hako Thako	Caudal de galería: 45.35 l/s
	Altura (m.s.n.m): 2.094	Caudal del río: 10.0 l/s

La galería se ubica en el río Mogontuyo Mayu de régimen intermitente (presencia de escurrimientos superficial solo durante tormentas) y con grandes variaciones de caudal, con pendiente del 2 % con arrastre de sedimento moderado. Está ubicada transversalmente, con un pequeño ángulo hacia aguas arriba del lecho del río, más cerca de la margen derecha. Esta ubicación resultó ser buena, porque la aducción del canal se encuentra segura frente a las avenidas que ocurren en este río. Esta ubicación fue definida por los primeros usuarios del sistema, debido a que la roca esta aflorando en la margen izquierda, y consideraron esto como una barrera para el agua. La longitud de la obra es de 75 m.

En el diseño de esta obra no contemplaron todos los criterios técnicos para cada elemento que compone la galería, aunque se ha construido con dimensiones aceptables para facilitar la limpieza y el mantenimiento de la obra. No se realizaron pruebas de campo para obtener parámetros de los materiales del lecho del río (el coeficiente de permeabilidad del acuífero “ $k=0.02$ m/s” fue escogido debido a que el material es un depósito aluvial)

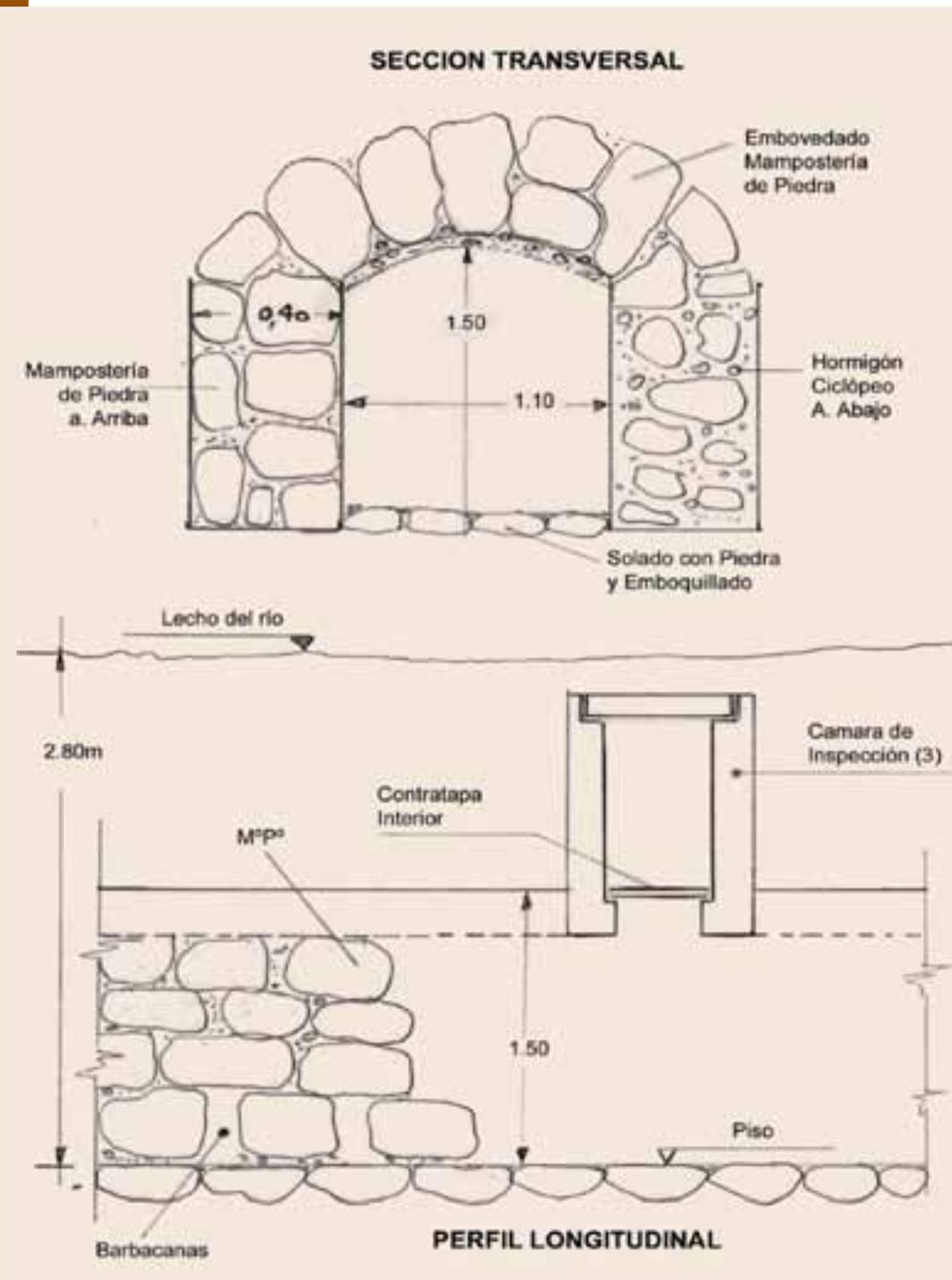
El caudal de diseño (100 l/s) es un dato definido al azar, porque no se realizó pruebas de permeabilidad del suelo para definir este caudal. En la actualidad la obra capta 45 l/s y no cubre la demanda de agua de los usuarios. Constructivamente es una obra poco fácil de construir, demandando mano de obra calificada, especialmente en la construcción del muro con orificios entre las piedras.

Analizando las características del diseño y características constructivas de la obra se puede concluir lo siguiente:

- La dirección de obra no fue eficiente debido a que existen falencias en el trazo y acabados de la obra.
- La galería no ha sido alineada correctamente (es decir que no es totalmente recta en el sentido longitudinal) lo que indica que existieron problemas en la excavación del lecho del río.
- El filtro colocado no cumple rigurosamente con las especificaciones técnicas para este fin, debido a que no se realizó el lavado, cernido y las correspondientes pruebas de granulometría para el material fino y grueso para verificar que cumpla con la ley de Terzaghi para filtros.
- La galería se encuentra bien ubicada respecto del área de riego porque permite riego por gravedad.
- La obra tiene componentes que no se han construido o colocado de acuerdo a diseño, lo que permite la entrada de sedimento a la galería. Los orificios que hacen de barbacanas son huecos entre las piedras y tienen grandes dimensiones (0.15 x 0.15 m) lo que permite la entrada de partículas más grandes del material del lecho del río, además de raíces de plantas de las inmediaciones de la margen derecha del río.
- Para captar mayor caudal existe la posibilidad de prolongar la longitud de la galería ya que el ancho del río lo permite.

- El diseño de la galería dentro de este proyecto tuvo pequeña importancia, porque no existe en el documento del proyecto prácticamente nada sobre el cálculo. Además, se nota que la obra no tuvo una dirección y supervisión de obra permanente y adecuada técnicamente.
- Este sistema cuenta con un comité de riegos con 2 Jueces de agua, que posibilitan la gestión del sistema de riego. Dentro de las actividades de gestión, el mantenimiento demanda mayor participación de los usuarios, quienes aportan con mano de obra en función a los derechos al agua que cada uno dispone. Adicionalmente, requieren mano de obra para captar aguas superficiales del río, para incrementar el caudal extraído de la galería.

Plano 2.2.6 Galería Thako Thako; sección transversal y perfil longitudinal



2.2.7 Sistema de riego Kuru Mayu



Figura 2.2.7 Galería Kuru Mayu; raíces dentro la galería

Ubicación:	Departamento:	Tipo de obra:
	Cochabamba	Galería filtrante
	Provincia: Mizque	Materiales: Muros de H°C° y M°P°
	Municipio: Mizque	Tapa: Losa de H° A°
	Localidad: Kuru Mayu	Caudal de galería: 21.60 l/s
	Altura (m.s.n.m): 2.265	Caudal del río: 0.0 l/s

La galería se ubica en el río Kuru Mayu de régimen efímero (escurrimiento superficial solo durante tormentas), con pendiente de 4.5 % tiene arrastre de material aluvial con piedras de grandes dimensiones. La obra está ubicada transversalmente al lecho del río y sobre la mitad izquierda del lecho del río. La aducción del canal se encuentra segura ante las avenidas del río. Además de estar protegida por un muro de gaviones. Esta ubicación fue definida por los primeros usuarios del sistema, debido a que existían afloramientos de agua hacia la superficie.

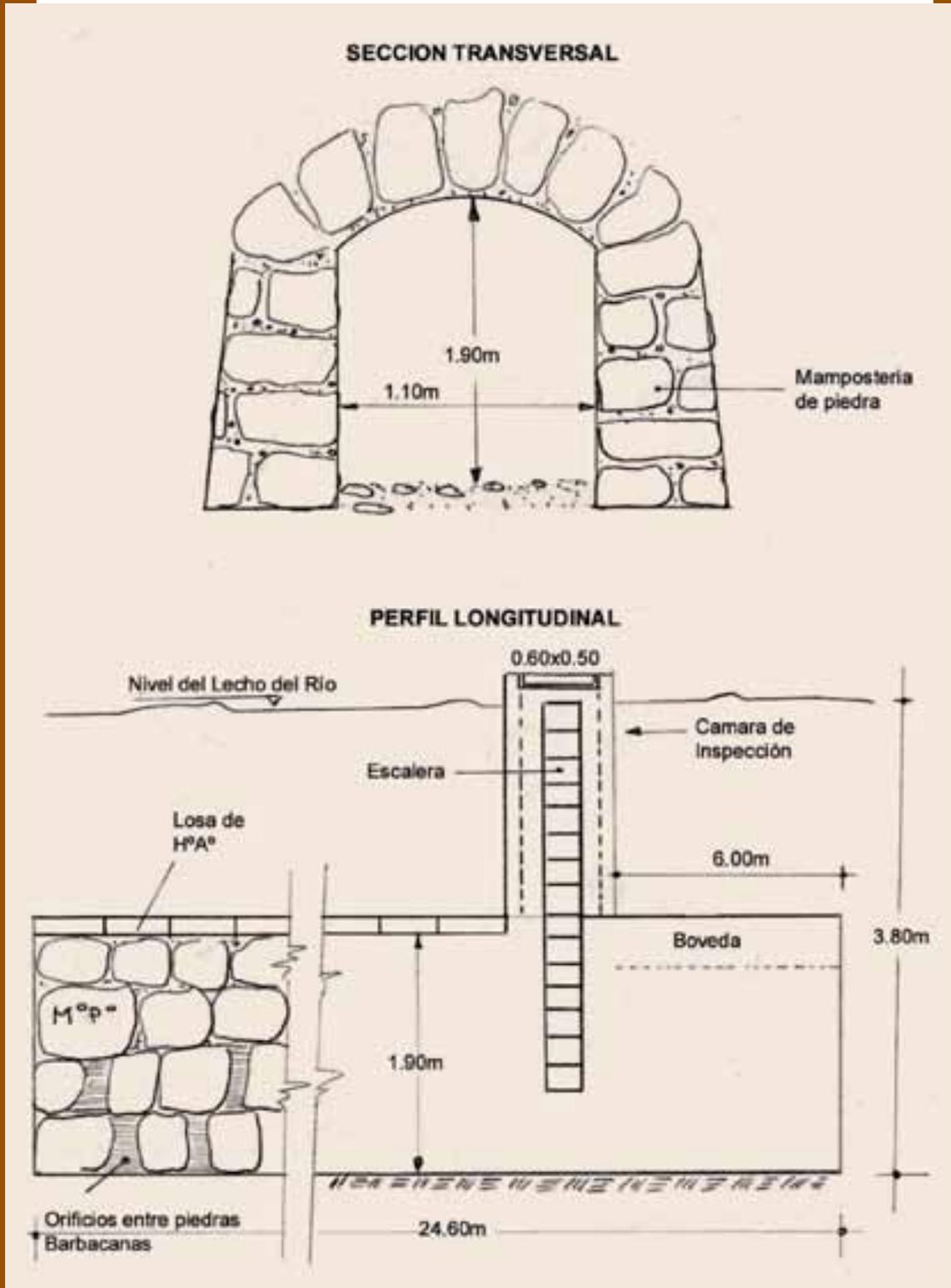
Como obra, pese a las limitaciones con las que ha sido construida (sin diseño y orientación técnica) cumple con las funciones para la que ha sido construida. El acabado es regular en cuanto a su forma pero deficiente en cuanto a la calidad del hormigón. Tiene buena ubicación respecto al área de riego, funciona por gravedad, por tanto, no requiere de ningún control para su operación, sin embargo requiere de permanente limpieza (sacar raíces y sedimento) par evitar la disminución de caudal.

La obra permite la entrada de sedimento a la galería, los orificios que hacen de barbacanas son huecos entre las piedras y tienen grandes dimensiones (0.15 x 0.15 m aproximadamente) lo que resulta un problema porque permite la entrada de partículas grandes del material del lecho del río, además de raíces de plantas de las inmediaciones de la margen izquierda del río. Está construida con dimensiones amplias que permite el mantenimiento.

Al presente la galería tiene problemas de fisuras en la tapa, y esto hace que en cualquier momento pueda sufrir daños la estructura, lo que requiere un inmediato mejoramiento. Esta situación

preocupa a los usuarios que están organizados en un comité. Sus directivos se encuentran buscando atención de las autoridades para conseguir fondos para poder dar solución a este problema, estando dispuestos a participar con mano de obra.

Plano 2.2.7 Galería Kuru Mayu; sección transversal y perfil longitudinal



2.2.8 Sistema de riego Tipajara

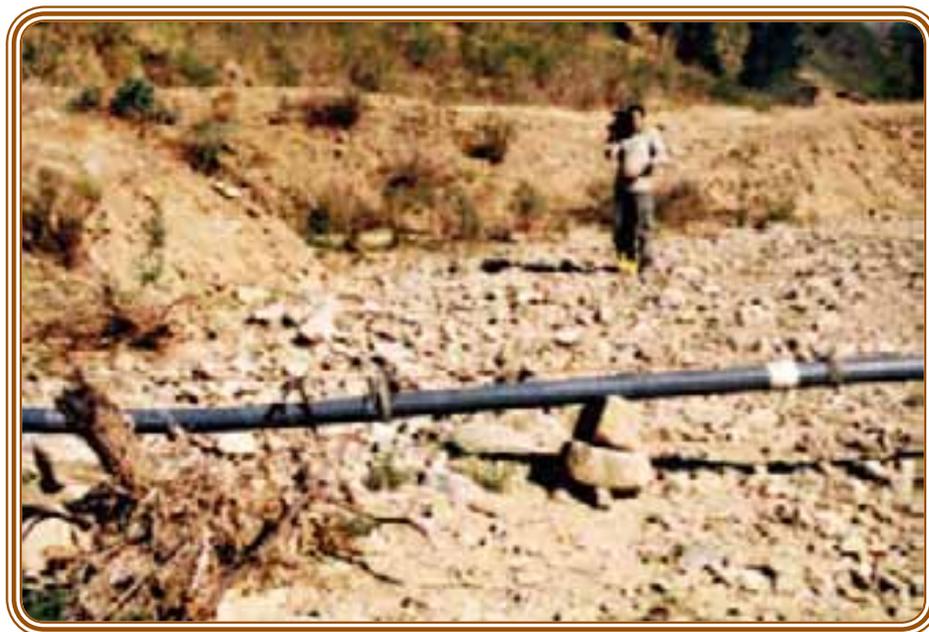


Figura 2.2.8 Galería Tipajara; vista general donde se ubica la galería

Ubicación:	Departamento:	
	Cochabamba	Tipo de obra: Galería filtrante - Tajamar
	Provincia: Campero	Materiales: Muros de M°P°
	Municipio: Aiquile	Tapa: Embovedado M°P°
	Localidad: Tipajara	Caudal de galería: 31.0 l/s
	Altura (m.s.n.m): 2.416	Caudal del río: 0.0 l/s

La galería- tajamar se ubica en un río de alta pendiente (9.69 %) –cuenca de montaña- con mucho arrastre de material aluvial con piedras de gran dimensión (hasta 0.8 m de diámetro). La obra es pasible de quedar erosionada, sin embargo, para controlar este efecto se ha previsto un muro delante de la galería para prevenir en cierta manera la erosión de la obra y cortar la línea de filtraciones y así elevar el nivel freático en este sector. La longitud de la obra es de 44 m.

La ubicación en este punto fue escogida por tener el río un curso uniforme y estable, la ubicación fue definida por los usuarios. Según el diseño, la obra estaba ubicada unos 200 m más aguas abajo. Conceptualmente la obra en su conjunto (galería - tajamar) es buena, pese a que este tipo de obra no es muy aconsejable para ríos de alta pendiente, se aplicó este criterio a falta de agua superficial permanente y por el caudal que capta resultó óptimo. La galería capta un caudal de 31 l/s, mayor que el caudal de diseño (19 l/s) y cubre la demanda de agua de los usuarios.

Los filtros cumplen su función con bastante eficiencia, aunque, el material utilizado para el filtro no ha seguido el proceso de clasificación adecuado y tampoco se hizo un análisis de granulometría.

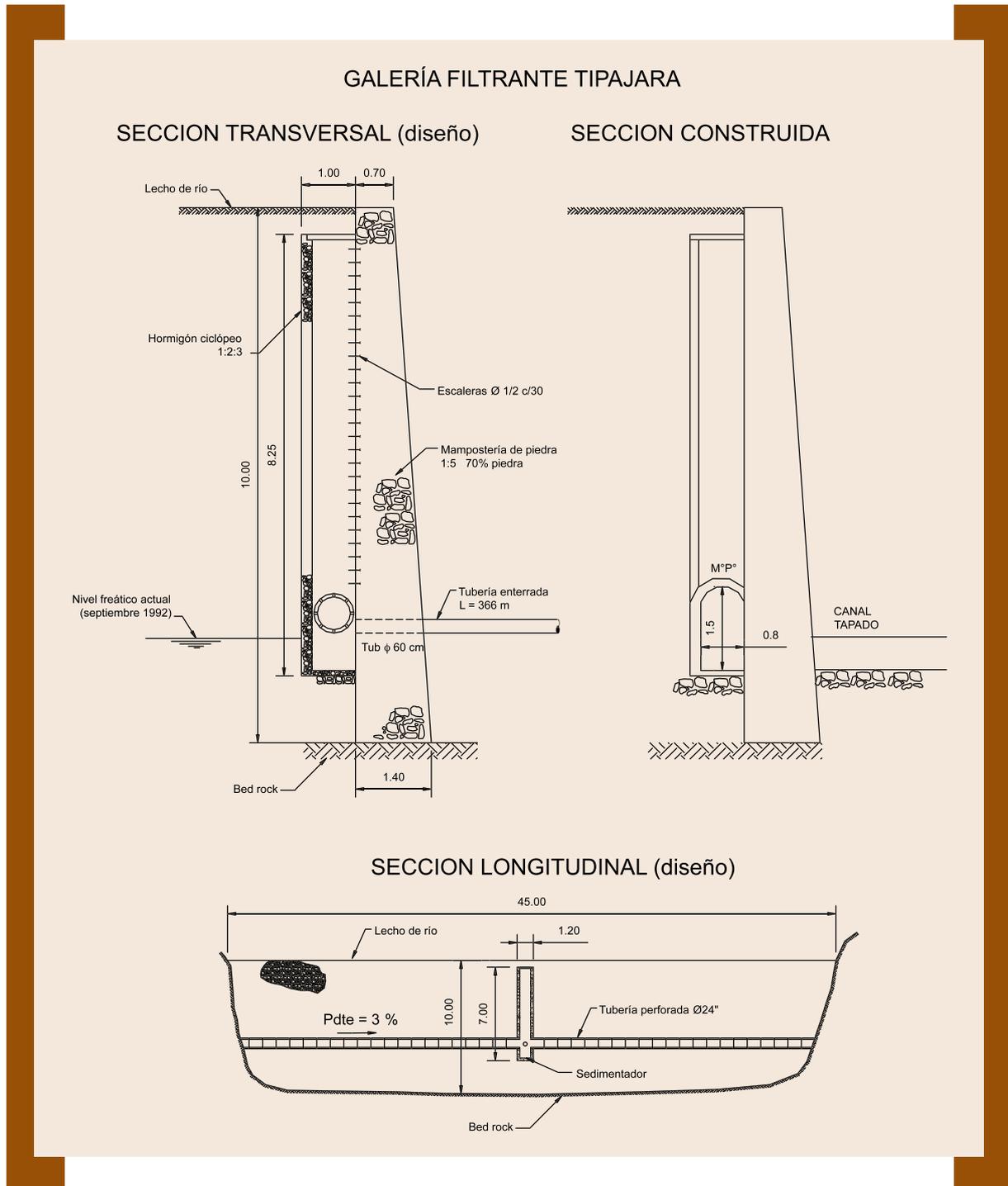
Para fines de limpieza y refacción, la galería presenta dimensiones que posibilitan trabajar de forma cómoda, sin embargo, el acceso a la cámara se encuentra enterrado en el lecho del río por tanto su inspección es muy esporádica.

La diferencia fundamental entre lo diseñado y lo construido es que la galería diseñada es de tubería de concreto de "24" y lo construido es un canal con paredes de mampostería de piedra y tapado con un embovedado también de mampostería de piedra.

La mano de obra utilizada (usuarios) no ha sido lo suficientemente calificada como para realizar un trabajo de acabado fino o adecuado. Asimismo, los usuarios reportan que se afrontaron limitaciones económicas para financiar la construcción, pero que sin embargo, están satisfechos porque el caudal captado es mayor al previsto en el diseño.

El sistema de riego Tipajara, muestra una organización consolidada, con derechos y obligaciones establecidas, principalmente para responder al mantenimiento que realizan de manera anual. El funcionamiento de la obra es perfecto, permite dotar el agua a la zona a demanda libre, por la que la organización se encuentra satisfecha.

Plano 2.2.8 Galería Tipajara; Sección transversal de diseño y construida



2.2.9. Sistema de riego Loro Mayu

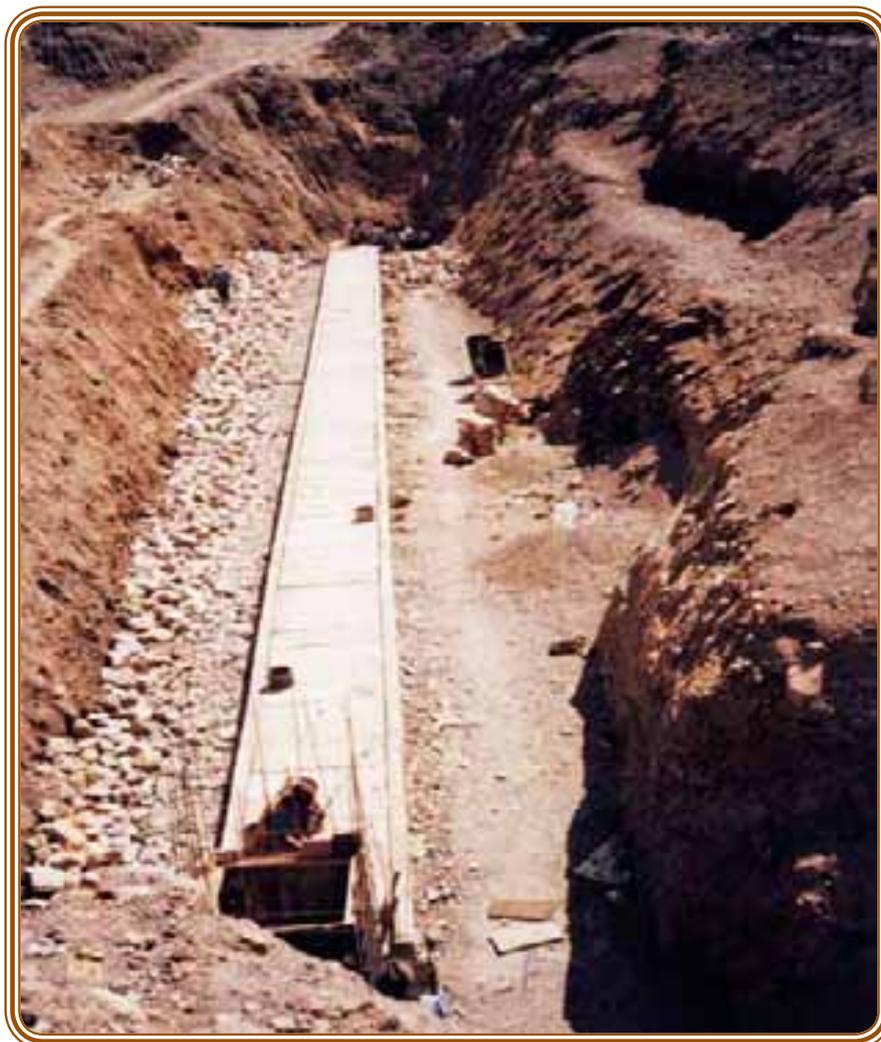


Figura 2.2.9 Galería Loro Mayu; proceso de construcción³

Ubicación:	Departamento:	Cochabamba	Tipo de obra:	Galería filtrante y tajamar
	Provincia:	Campero	Materiales:	Muros de Gaviones y H° C°
	Municipio:	Aiquile	Tapa:	Losa de H° A°
	Localidad:	Loro Mayu	Caudal de galería:	10.77 l/s
	Altura (m.s.n.m):	2100	Caudal del río:	2.0 l/s

La obra consiste en la unión de una galería junto a un tajamar, se ubica en el río Loro Mayu de régimen efímero con pendiente 3 %. La obra está ubicada en la confluencia del río mencionado y la quebrada del mismo nombre, el tajamar se encuentra transversal al río y la galería se sitúa de manera longitudinal a la quebrada. Esta ubicación fue definida por los primeros usuarios del sistema, cuando definieron la ubicación del tajamar, que luego se unió a la galería. La obra tiene una longitud de 50 m.

El caudal ofertado ingresa a través de los orificios entre piedras y por la solera que constituye el mismo lecho del río, el caudal de diseño (11 l/s) es similar al que capta la obra actualmente. Tomando en cuenta que la obra es muy permeable, se puede suponer que el acuífero en esta zona no tiene buen rendimiento de caudal.

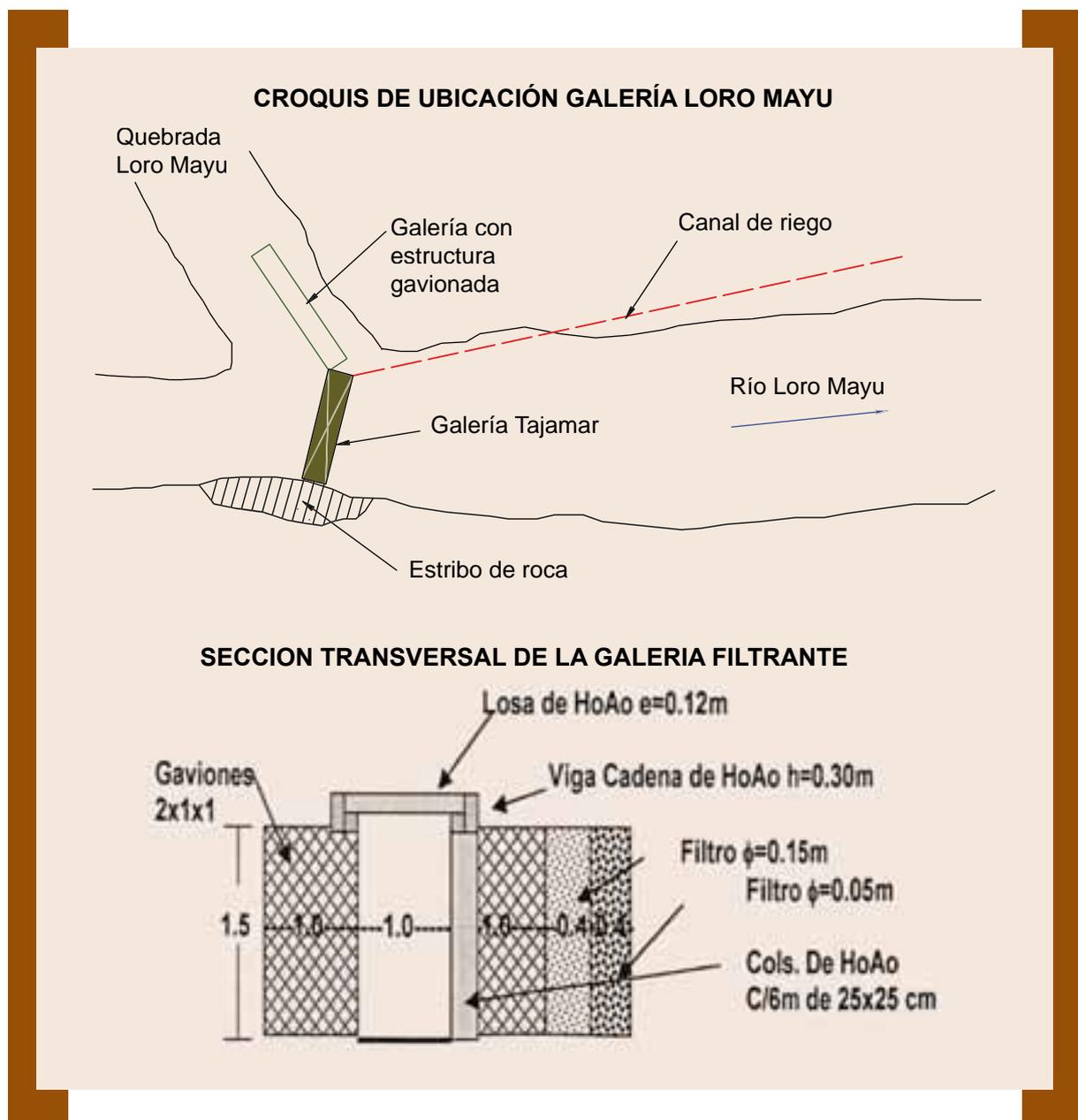
³ Fuente: Fotografía proporcionada por el Ing. Luis Guaman de la UIP (Unidad de Implementación del Fondo de Desarrollo Campesino)

El filtro colocado para evitar la entrada de finos a la galería no es eficiente, porque permite que se sedimente el interior de la galería, lo que hace necesario mantenimientos con mayor frecuencia. El filtro colocado está constituido por material del lecho del río, no fue procesado para este fin y tampoco se hicieron pruebas de granulometría para cumplir con la ley de Terzaghi.

Por otra parte, se ve inconclusa la obra ya que el tajamar construido en la primera etapa no cierra todo el ancho del río, por tanto, dicho muro no cumple correctamente la función para la que ha sido construido, en cambio el tipo de galería (constructivamente) tiene un criterio muy bueno ya que permite una total permeabilidad de los muros para la entrada del caudal hacia la galería.

Los usuarios no están satisfechos con el caudal captado, ya que este hecho hace que exista un control estricto en la distribución del agua, especialmente en épocas de estiaje, por lo que consideran importante los trabajos de limpieza en la obra. Este sistema capta aguas superficiales de la vertiente para aumentar el caudal extraído de la galería.

Plano 2.2.9 Galería Loro Mayu; Ubicación y sección transversal



2.2.10. Sistema de riego Tipapampa

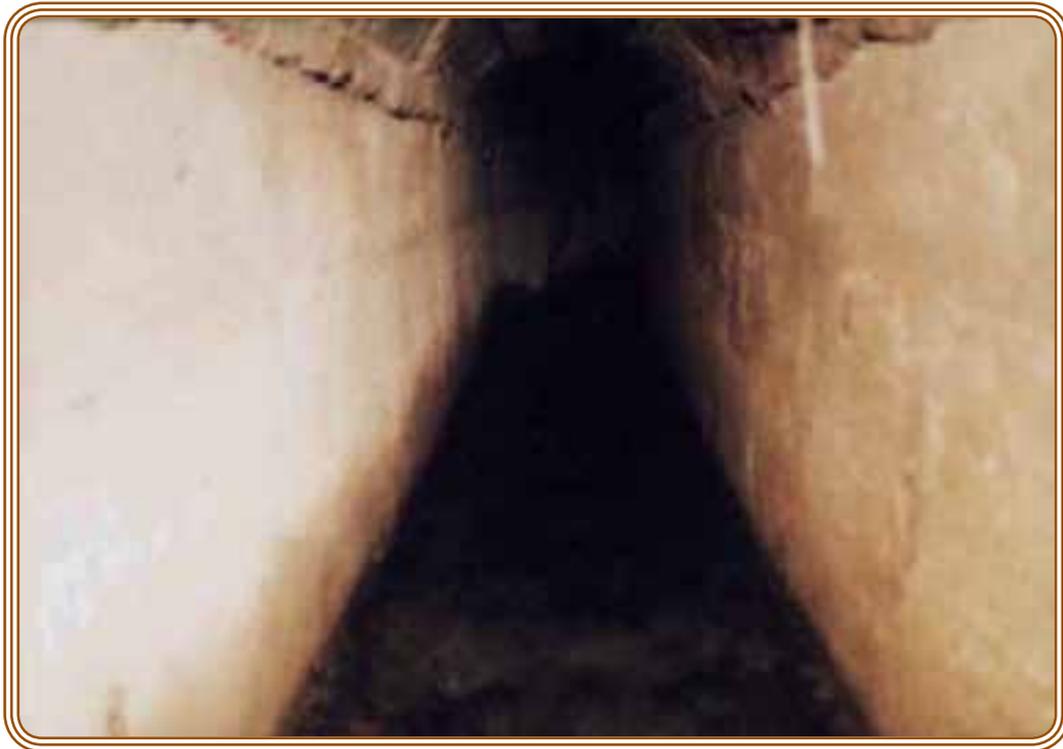


Figura 2.2.10 Galería Tipapampa; vista interior

Ubicación:	Departamento:	Cochabamba
	Tipo de obra:	Galería filtrante
	Provincia:	Campero
	Municipio:	Aiquile
	Localidad:	Tipapampa
	Altura (m.s.n.m):	2.082
	Materiales:	Muros de H°C°
	Tapa:	Embovedado de H°C°
	Caudal de galería:	101.8 l/s
	Caudal del río:	305.0 l/s

La galería (longitud de 100 m.) se ubica en el río Novillero de régimen perenne, con pendiente de 4 %, está ubicada transversalmente (con un pequeño ángulo) al lecho del río y sobre la mitad izquierda del lecho del río. Esta ubicación fue definida por los primeros usuarios del sistema, (existe otra galería al lado que ya no funciona por estar más superficial), para aprovechar el mismo canal.

Analizando las características del diseño y construcción de la obra se puede indicar lo siguiente:

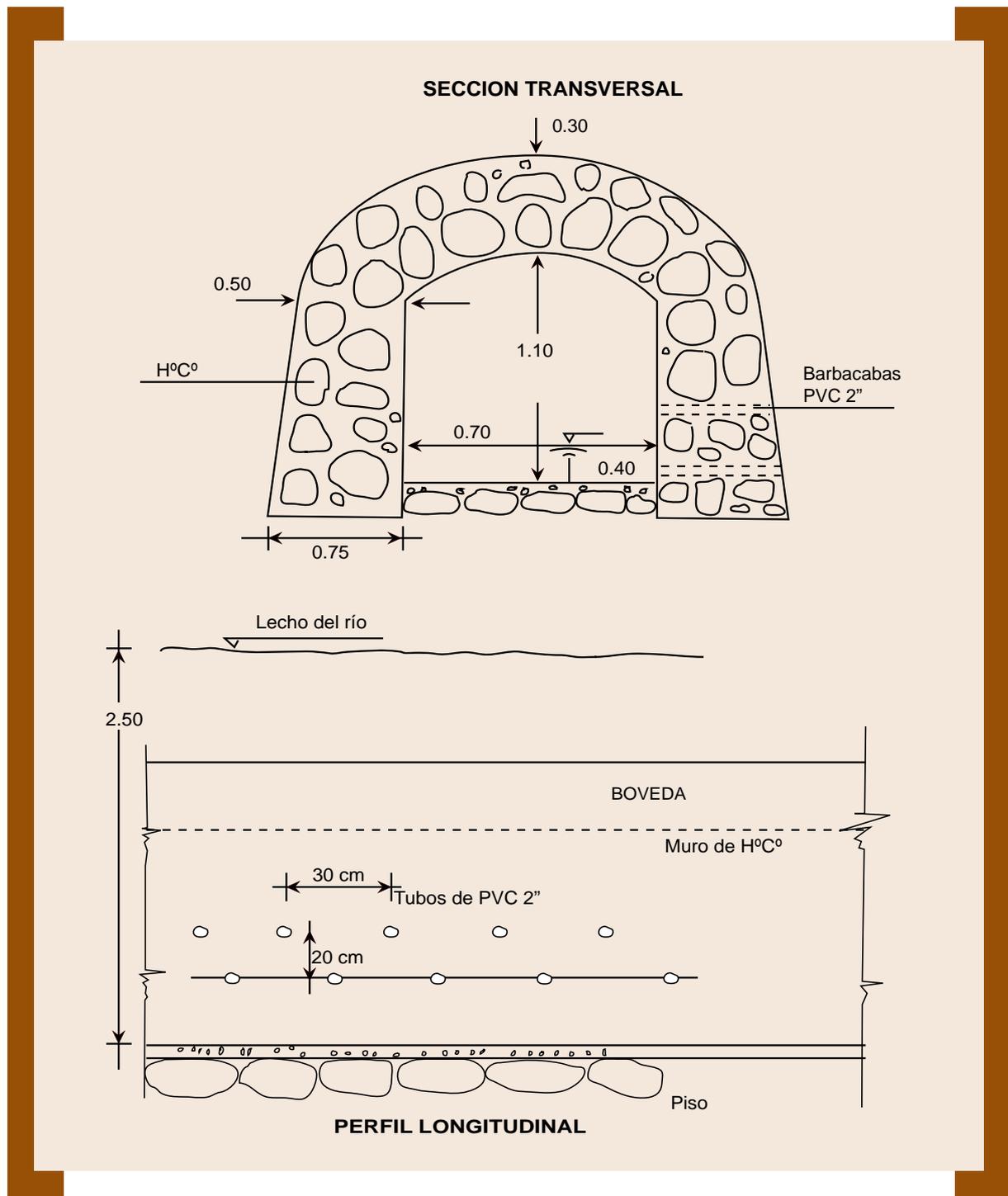
- La obra no tuvo una dirección y supervisión de obra permanente y adecuada técnicamente.
- La construcción de esta nueva galería ha dejado sin funcionamiento a la anterior, debido a que tiene su base a mayor profundidad.
- El caudal (102 l/s) que capta la galería es óptimo y suficiente para todo el área de riego actual. Sin embargo, con la habilitación de nuevos terrenos agrícolas en el futuro puede que se necesite más agua, si esto ocurre la obra presenta condiciones para poder ampliarse en longitud

El diseño de esta galería y de Kjaruma y Zamora han sido elaborados por el mismo consultor, y fueron construidas por una misma institución (PDAR), lo que indica que las tres galerías tienen los mismos criterios de diseño y construcción por encontrarse sobre el mismo río y muy cercanas entre sí.

El filtro construido no ha cumplido con lo propuesto en el diseño, razón por la cual, penetra a la galería sedimento fino (limo y arcilla) que debe ser limpiado periódicamente para evitar la disminución de caudal. El acceso para la inspección está bien ubicado, es de fácil acceso y seguro ante posibles erosiones que podría producir una avenida.

La gestión del sistema de riego Tipapampa de la zona de Aiquile, muestra organización consolidada, con derechos al agua definidos y obligaciones establecida, principalmente en relación a las actividades de mantenimiento, que se efectúan anualmente. La disponibilidad de agua (encima de los 100 l/s), permite una distribución de agua a demanda libre, aunque en época de estiaje el caudal disminuye notoriamente, por lo que los usuarios consideran importante los trabajos de limpieza en la obra.

Plano 2.2.10 Galería Tipapampa; Sección transversal y perfil longitudinal



2.2.11. Sistema de riego Kjaruma



Figura 2.2.11 Galería Kjaruma; ubicación de la galería

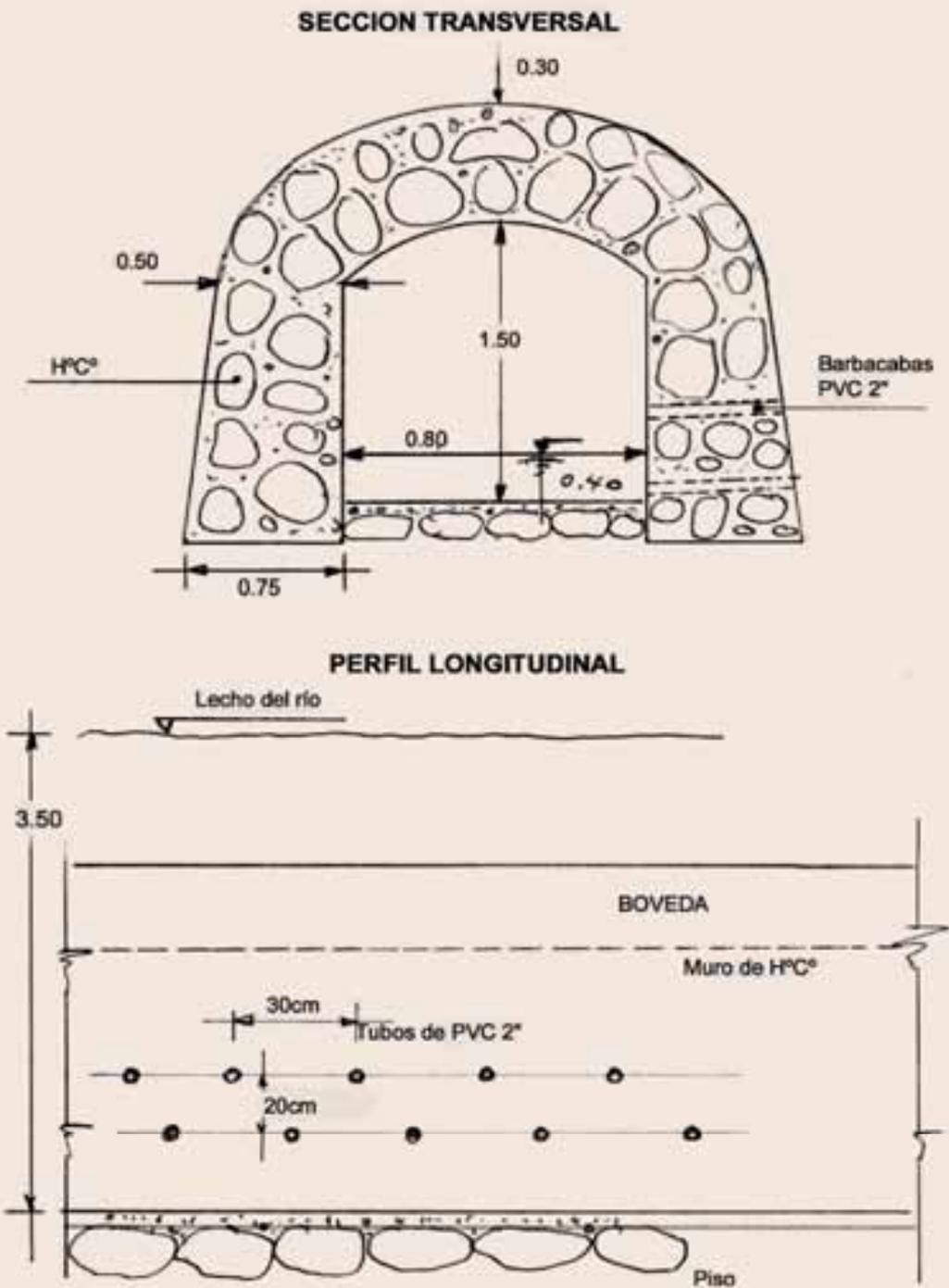
Ubicación:	Departamento:	Tipo de obra:
	Cochabamba	Galería filtrante
	Provincia: Campero	Materiales: Muros de H°C°
	Municipio: Aiquile	Tapa: Embovedado de H°C°
	Localidad: Chinguri	Caudal de galería: 132.5 l/s
	Altura (m.s.n.m): 1.950	Caudal del río: 450.0 l/s

La galería se ubica en el río Novillero de régimen perenne, con pendiente de 4 %, está ubicada transversalmente (con un pequeño ángulo) al lecho del río.. Esta ubicación fue definida por los primeros usuarios del sistema. La galería abarca una longitud de 100 m.

El análisis de las características de diseño y construcción permiten indicar lo siguiente:

- El filtro construido no responde a las especificaciones del diseño, razón por la cual, penetra a la galería sedimento fino (limo y arcilla), que debe ser limpiado periódicamente para evitar la disminución de caudal.
- El acceso para la inspección está bien ubicado, tiene fácil acceso y está seguro ante posibles erosiones que podría producir una avenida, la cámara intermedia en el lecho del río se encuentra enterrada.
- La galería funciona captando un caudal (133 l/s) muy por encima del caudal de diseño (36 l/s), por tanto, las expectativas de los usuarios fueron totalmente satisfechas. La obra ha sido construida tal cual el diseño en cuanto a las dimensiones de la sección, pero, la longitud fue menor debido a que se encontró roca al nivel de la fundación en la margen derecha del río.

La gestión del sistema de riego Kjaruma es similar al sistema de Tipapampa, muestra una organización consolidada.



2.2.12. Sistema de riego Zamora

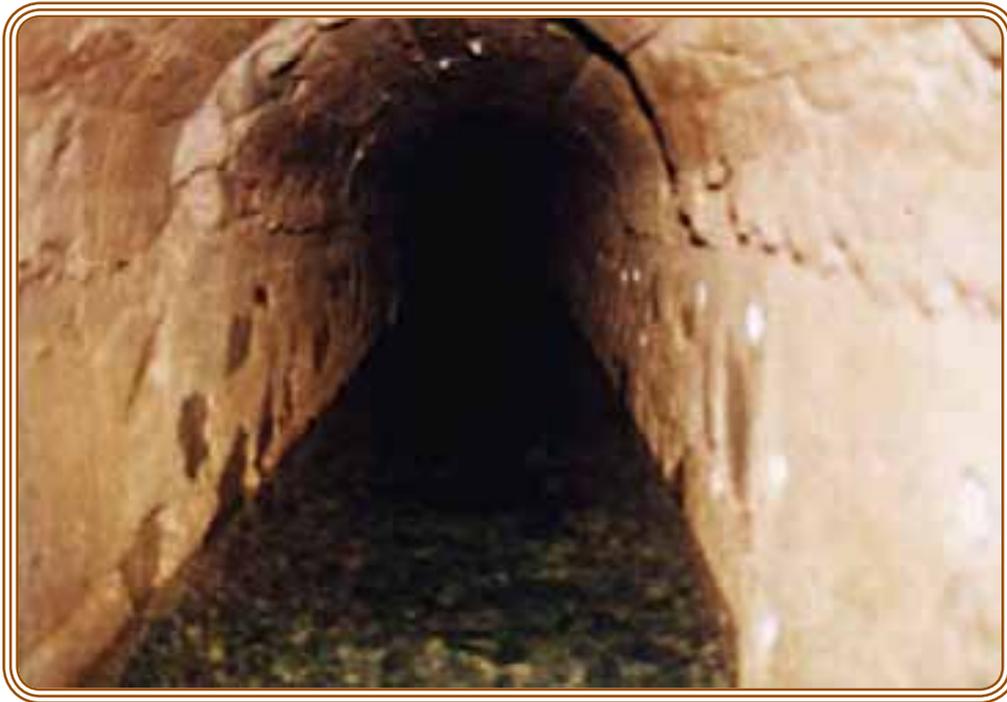


Figura 2.2.12 Galería Zamora; vista interior

Ubicación:	Departamento:	Tipo de obra:
	Cochabamba	Galería filtrante
	Provincia: Campero	Materiales: Muros de H°C°
	Municipio: Aiquile	Tapa: Embovedado de H°C°
	Localidad: Zamora	Caudal de galería: 103.13 l/s
	Altura (m.s.n.m): 1.914	Caudal del río: 500.0 l/s

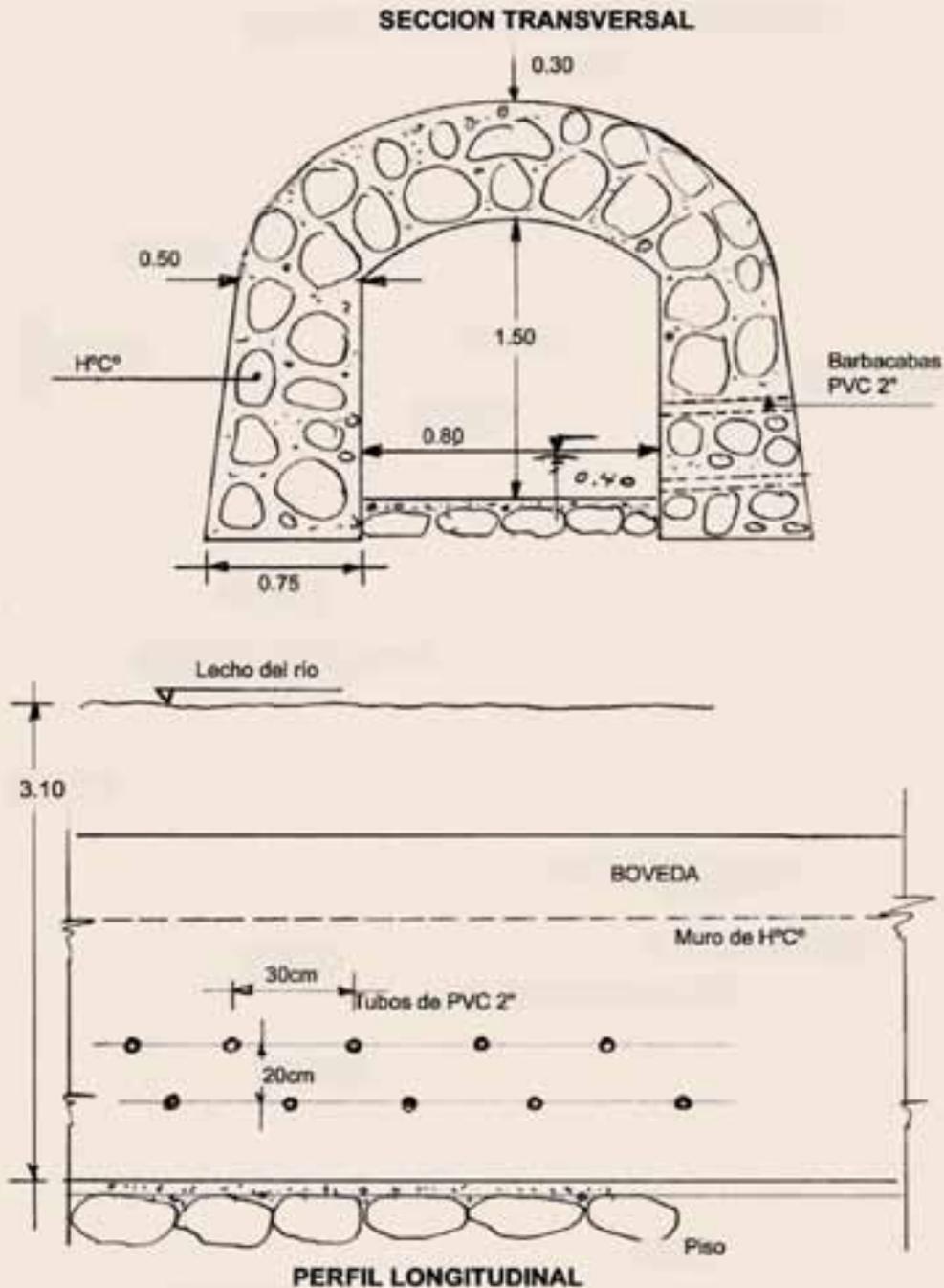
La galería se ubica en el río Novillero de régimen perenne, con pendiente de 3.9 %, está ubicada transversalmente (con un pequeño ángulo) al lecho del río. Al igual que en los casos anteriores la ubicación fue definida por los usuarios del sistema. La obra abarca una longitud de 100 m.

El análisis sobre las características de diseño y construcción de la obra permite indicar lo siguiente:

- Está construida con dimensiones amplias para posibilitar la limpieza y reparación de la obra.
- El caudal (103 l/s) que capta la galería es óptimo y suficiente para todo el área de riego actual, en caso de necesidad puede ser ampliada su longitud, porque el ancho del río lo permite.
- El acceso por la cámara para la inspección está bien ubicado, tiene fácil acceso y está segura de posibles erosiones que podría producir una avenida, además tiene un muro de gaviones en la margen izquierda.
- El filtro no ha sido colocado cumpliendo las especificaciones técnicas del diseño, sin embargo funciona aceptablemente, con la salvedad de que deja pasar material fino al interior de la galería, lo que sedimenta a través del tiempo.

Al igual que los otros sistemas ubicados en el río Novillero, la gestión del sistema de riego Zamora cuenta con una organización sólida, con derechos al agua establecidos y obligaciones definidas, especialmente en lo referente al mantenimiento (limpieza de sedimento) que realizan de acuerdo a las costumbres y tradiciones de la zona, tienen fechas definidas para realizar esta actividad (Agosto y/o septiembre).

Plano 2.2.12 Galería Zamora; sección transversal y perfil longitudinal



2.3. SISTEMAS DE RIEGO DE ORURO

2.3.1. Sistema de riego Realenga



Figura 2.3.1 Galería Realenga; cámara de inspección y tubería de ampliación de la galería

Ubicación:

Departamento: Oruro	Tipo de obra: Galería filtrante
Provincia: Pantaleón Dalence	Materiales: Muros de M°P°
Municipio: Machacamarca	Tapa: Losa de H°A°
Localidad: Realenga	Caudal de galería: 18.0 l/s
Altura (m.s.n.m): 3.750	Caudal del río: 5.0 l/s

La galería se ubica en el río Cebada Mayu, de régimen efímero con pendiente 1.2 %. Está ubicada diagonalmente al lecho del río y cruza todo el ancho con dirección de flujo hacia la margen derecha. Fue construida por etapas, la ubicación se debió a que aguas arriba de la galería existe una vertiente llamada "Ventilla" y el objetivo era captar las aguas de ésta, posteriormente, se realizó la ampliación con tubería de PVC de 4", aguas arriba de la galería. La galería tiene una longitud de 414 m, incluida la tubería alcanza una longitud de 451 m., en conjunto capta 18 l/s.

La galería construida en la primera fase, es una obra que no puede ser inspeccionada en toda su longitud, debido a que no se puede entrar por las dimensiones que tiene. Solo es posible entrar a las cámaras de inspección que se ubican cada 50 m.

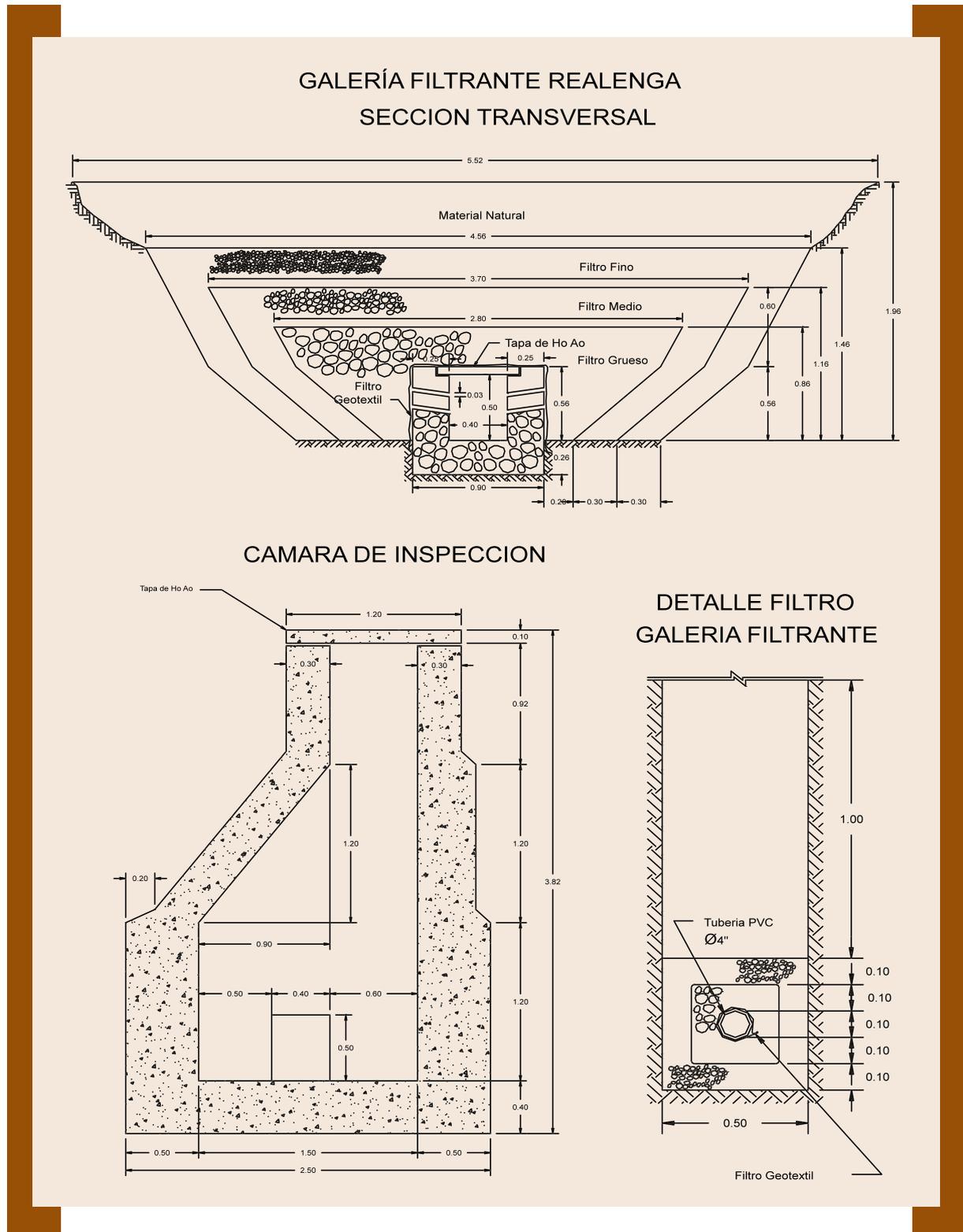
La segunda fase consistente en la ampliación no ha dado resultado, porque, se colmato el geotextil, colocado como filtro para evitar la entrada de sedimento, al presente la tubería fue retirada por los usuarios, ahora funciona como un canal abierto que aporta a la antigua galería (zanja filtrante) Por el caudal que capta consideramos como una obra pequeña, sin embargo la magnitud de la obra física es grande, por tanto, no mantiene una relación directa entre tamaño físico de obra y caudal captado

Por otra parte, la vertiente puede ser un aporte de gran importancia y se debería realizar un análisis mucho más profundo para captar en su totalidad estas aguas

El documento del proyecto de la primera fase no existe, los usuarios indican que fue construido por ellos en base al diseño que elaboró el SNDC.

Con el fin de aumentar el caudal, los usuarios conducen el agua superficial proveniente de la vertiente “Ventilla” hacia la galería, por medio de canales rústicos, aún así el caudal captado no es suficiente para cubrir la demanda de los usuarios.

Plano 2.3.1 Galería Realenga; sección transversal, cámara de inspección y detalle filtro



2.3.2. Sistema de riego Paco Pampa

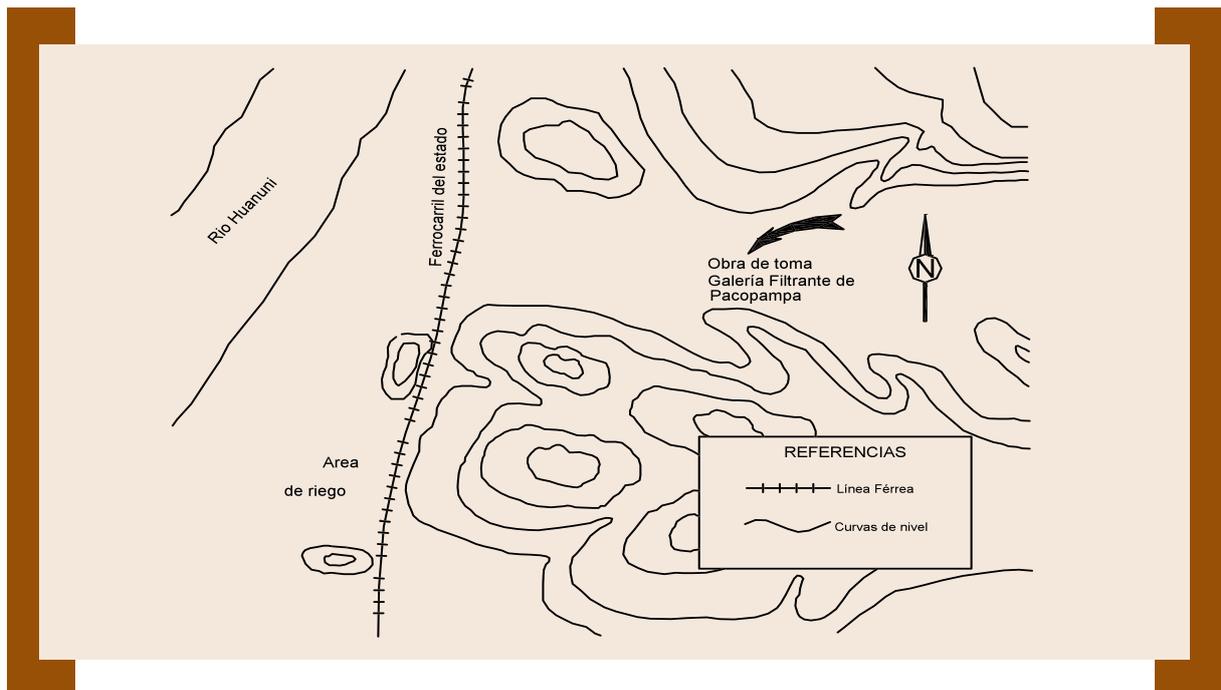


Figura 2.3.2 Galería Paco Pampa; lugar de emplazamiento

Ubicación:

Departamento: Oruro	Tipo de obra: Galería filtrante
Provincia: Pantaleón Dalence	Materiales: Muros de M°P°, tubos 12"
Municipio: Machacamarca	Tapa: Losa de H°A°
Localidad: Paco Pampa	Caudal de galería: 25 l/s
Altura (m.s.n.m): 3.839	Caudal del río: 0.0 l/s

La galería está ubicada en el río Khonchu Mayu, de régimen efímero con una pendiente de 1.2 %, la obra se ha construido por partes o brazos en distintas oportunidades, y últimamente se ha hecho la ampliación de uno de los brazos con tubería de hormigón de 12". Las obras se desarrollan sobre una longitud de 96 m.



2.3.3. Sistema de riego Huayña Pasto Chico

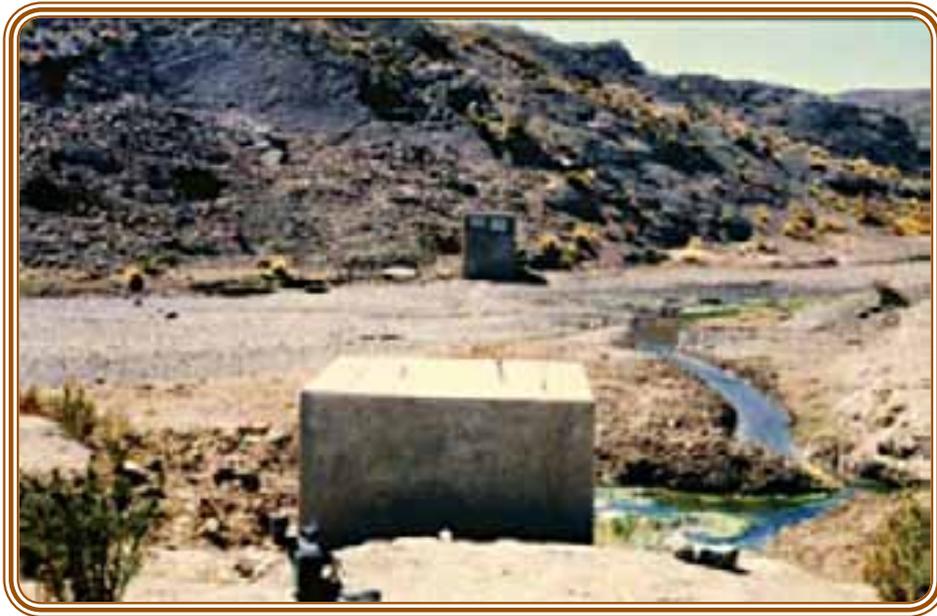


Figura 2.3.3 Galería Huayña Pasto Chico; cámaras de ingreso

Ubicación:

Departamento: Oruro	Tipo de obra: Galería filtrante - Tajamar
Provincia: Cercado	Materiales: Muros de H°C°
Municipio: Cercado	Tapa: Losa de H°A°
Localidad: Huayña Pasto Chico	Caudal de galería: 25.58 l/s
Altura (m.s.n.m): 3.810	Caudal del río: 7.0 l/s

La obra es una combinación de galería y tajamar ubicada en el río Huayña Pasto Chico con una pendiente de 1.75 %, el río es de carácter intermitente, la obra está ubicada transversalmente y en todo el ancho del río. La elección del sitio de la obra se debe principalmente a que en el estribo derecho de la obra existe roca que está aflorando, y por otra parte, aguas abajo está ubicada la anterior galería y se aprovechó el canal de conducción existente para derivar las aguas de la nueva galería, esta ubicación es más adecuada que la anterior.

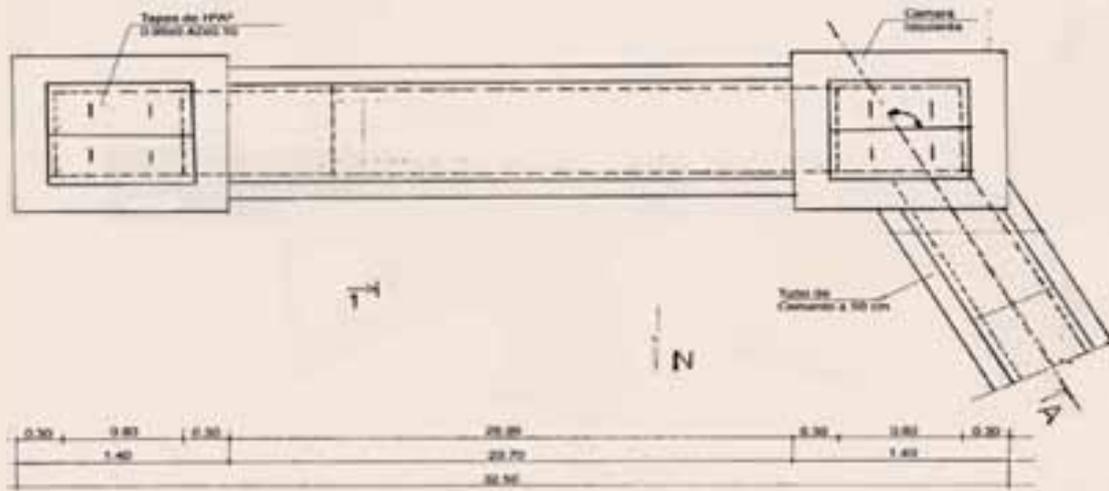
El hecho de no haber llegado a la roca en la base, le quita eficiencia en la captación, debido a que no se intercepta correctamente las líneas de filtración del acuífero, este hecho fue comentado por los usuarios, explicando que hubo problemas en las excavaciones (derrumbes), por tanto, no se ha cumplido satisfactoriamente con el diseño.

La obra se ha construido eficientemente en cuanto a sus formas y dimensiones porque permite una inspección de toda la longitud. El acceso a través de las cámaras es fácil y están debidamente ubicadas en ambos lados de la galería.

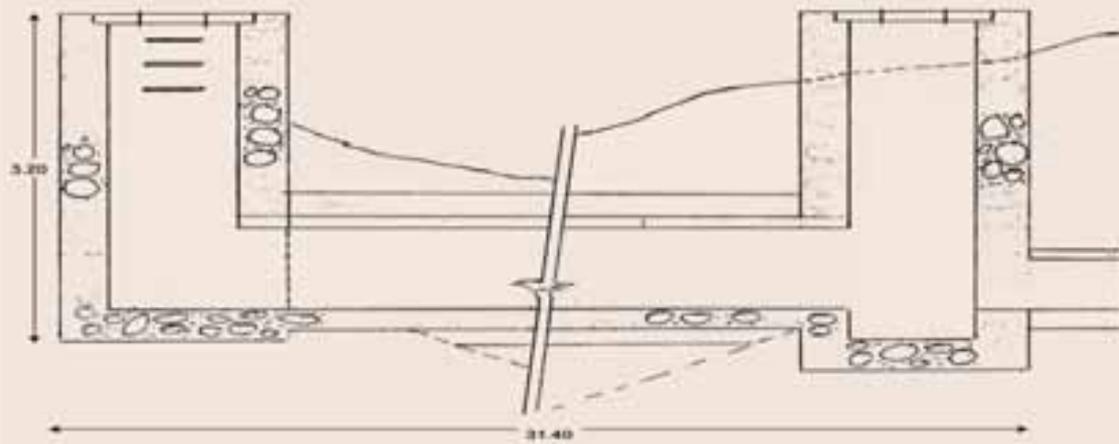
Por otra parte es posible regar todo el área de cultivos por gravedad ya que la ubicación y el nivel que se encuentra la galería lo permite.

La obra no tiene riesgo de erosión porque el lecho en ese punto está cubierto por colchonetas de gaviones.

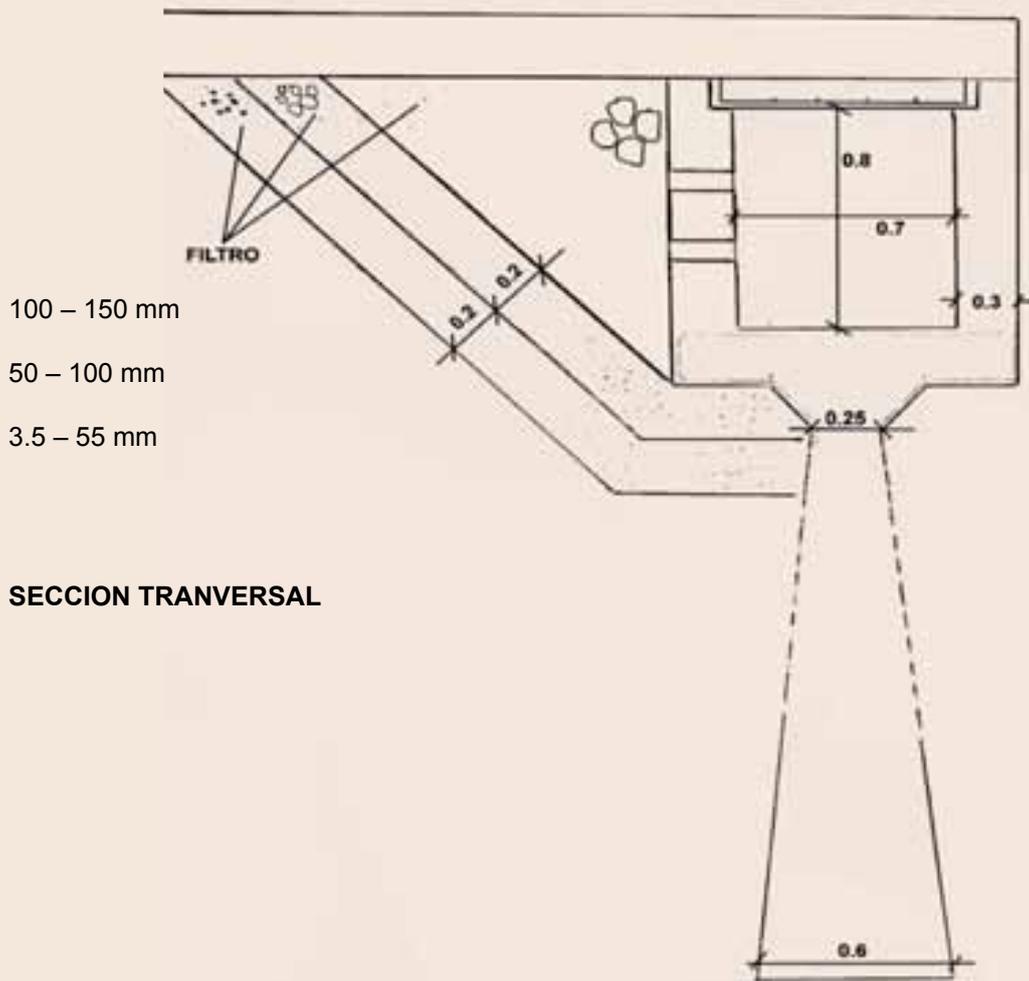
PLANTA DE LA GALERÍA HUAYÑA PASTO CHICO



PERFIL LONGITUDINAL – GALERÍA HUAYÑA PASTO CHICO



SECCION TRANSVERSAL DE LA GALERÍA



SECCION TRANSVERSAL

2.3.4. Sistema de riego Condor Chinoca



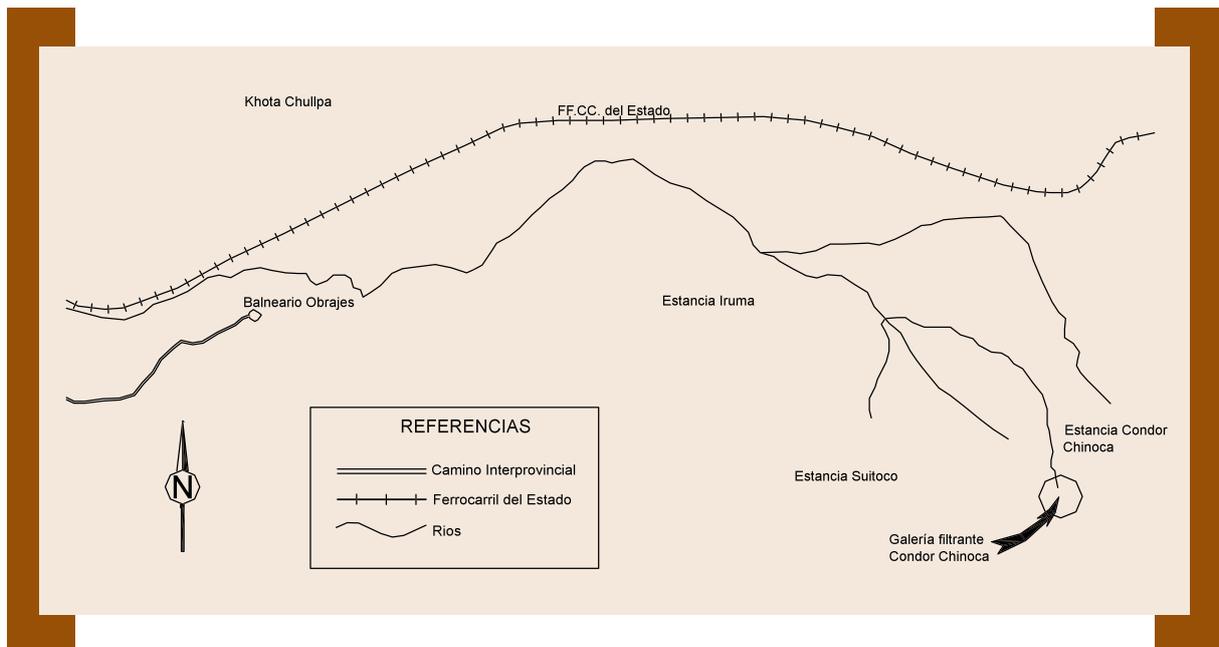
Figura 2.3.4 Galería Condor Chinoca; barbacanas

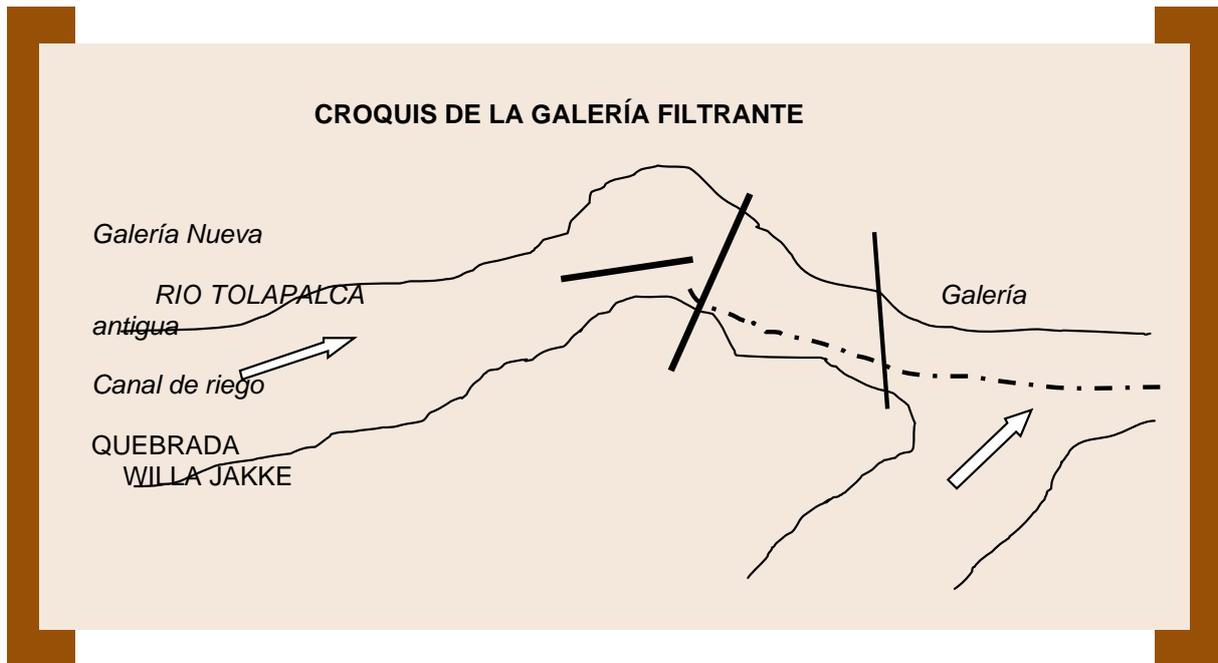
Ubicación:

Departamento: Oruro
 Provincia: Cercado
 Municipio: Cercado
 Localidad: Condor Chinoca
 Altura (m.s.n.m): 3.760

Tipo de obra: Galería filtrante
 Materiales: Muros de H^oC^o
 Tapa: Losa de H^oA^o
 Caudal de galería: 45.0 l/s
 Caudal del río: 250.0 l/s

La galería se ubica en el río Tolapalca con características de régimen intermitente con una pendiente del 1.0 %. La obra tiene la forma de una T, un tramo transversalmente al lecho del río y el otro longitudinal al lecho del río.





La ubicación resulta buena porque se aprovecha un estrecho, además de la afloración de roca en la margen izquierda, lo que produce una concentración de las líneas de flujo del acuífero, así como del agua superficial. La longitud de la obra se desdobra en 29.8 y 24 m para cada galería.

Al nivel que se fundó la obra permite el riego de todas las parcelas por gravedad, sin embargo por estar ubicado en una especie de cañadón el canal de aducción se encuentra en pleno lecho del río, siendo esto un problema latente por la erosión que podría producirse.

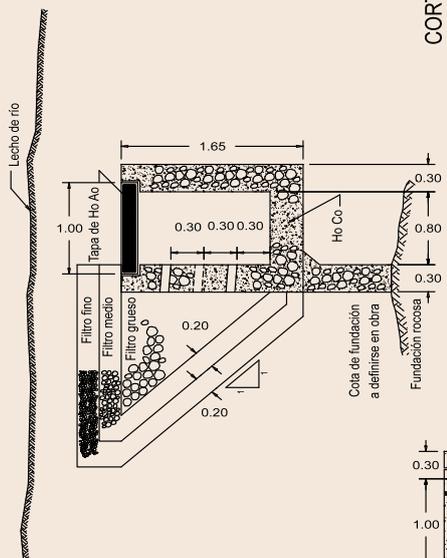
El filtro colocado no cumple eficientemente las funciones de captar mayor caudal en la galería, esto es posible asegurar porque existe caudal superficial considerable que pasa por encima de la galería y una de las causas es la preponderancia de mucho material fino (limo y arcilla) lo que colmata los filtros prematuramente.

La obra dispone de colchonetas de gavión que la protegen de la erosión.

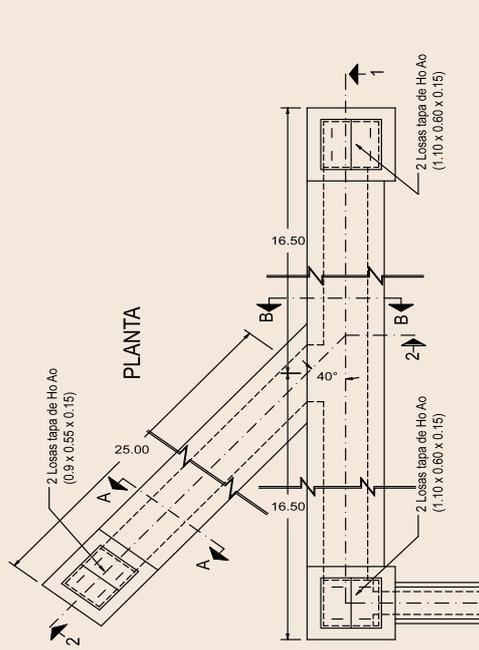
El mantenimiento del sistema de captación y la conducción se realiza una vez al año. El mantenimiento consiste en la limpieza del canal principal, las cámaras de inspección y el interior de la galería. Por la poca practicabilidad, una limitada limpieza de barbacanas se realiza. La organización del mantenimiento queda a cargo del juez de aguas quien dispone de grupos de trabajos con tareas específicas. Los usuarios consolidan su derecho de uso a través de esta práctica.

GALERÍA FILTRANTE CONDOR CHINOKA

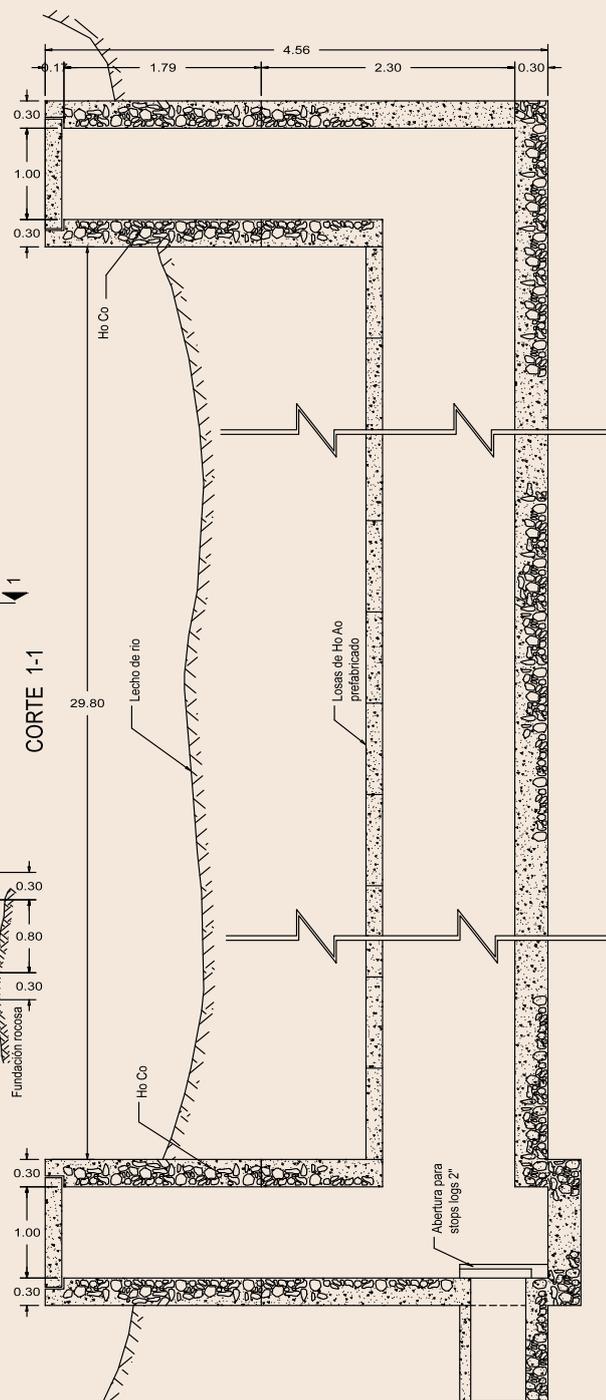
SECCION B-B



PLANTA



CORTE 1-1



Abertura para stops logs 2"

2.4. SISTEMAS DE RIEGO DE POTOSÍ

2.4.1. Sistema de riego Maldonado



Figura 2.4.1 Galería Maldonado; muro de protección

Ubicación:

Departamento: Potosí
 Provincia: Nor Chichas
 Municipio: Vitichi
 Localidad: Maldonado
 Altura (m.s.n.m): 3.032

Tipo de obra: Galería filtrante
 Materiales: Muros de H°C°
 Tapa: Losa de H°A°
 Caudal de galería: 34.8 l/s
 Caudal del río: 0.0 l/s

La galería está en el río Vitichi, con régimen efímero, con una pendiente del 1.2 %, la obra se ubica de forma diagonal y hacia la margen derecha del lecho del río. Esta obra tiene las características de un canal de sección rectangular enterrado muy superficialmente a 0.80 m del nivel del lecho del río. La longitud de la obra es de 58 m.

La profundidad a la que se ha fundado es insuficiente, porque la galería queda descubierta por la acción de la erosión del lecho del río, y esto trae la consecuencia de que puede ser destruida por la acción de las avenidas (choque de piedras).

Por otra parte, las tapas de hormigón armado no son un sello perfecto, por lo que entre ellas existe orificios que dejan pasar sedimento hasta de 2 cm. de diámetro, lo que ocasiona que se cólmate muy seguido, dando mayor trabajo a los usuarios en la limpieza.

La sección (0.4 m x 0.7 m) del canal de la galería es muy pequeña, y no es apta para la limpieza (este trabajo de limpieza lo realizan con total incomodidad).

Sobre el canal de riego, incide el hecho de que la galería se ha fundado muy arriba (superficial), ya que por esto, el primer tramo del canal esta muy expuesto a las avenidas. Para evitar este problema colocaron un muro de contención que de nada sirvió porque colapso por socavación (no resistió una época de lluvias).

El criterio técnico aplicado no resultó satisfactorio, porque la obra de reciente conclusión (1 año) tiene problemas serios de erosión, sedimentación y estabilidad del primer tramo del canal de conducción (salida de la galería).

El diseño contempló el cálculo de erosión del lecho del río, sin embargo la realidad ha mostrado que la obra ha quedado descubierta en algunos lugares, por este efecto.

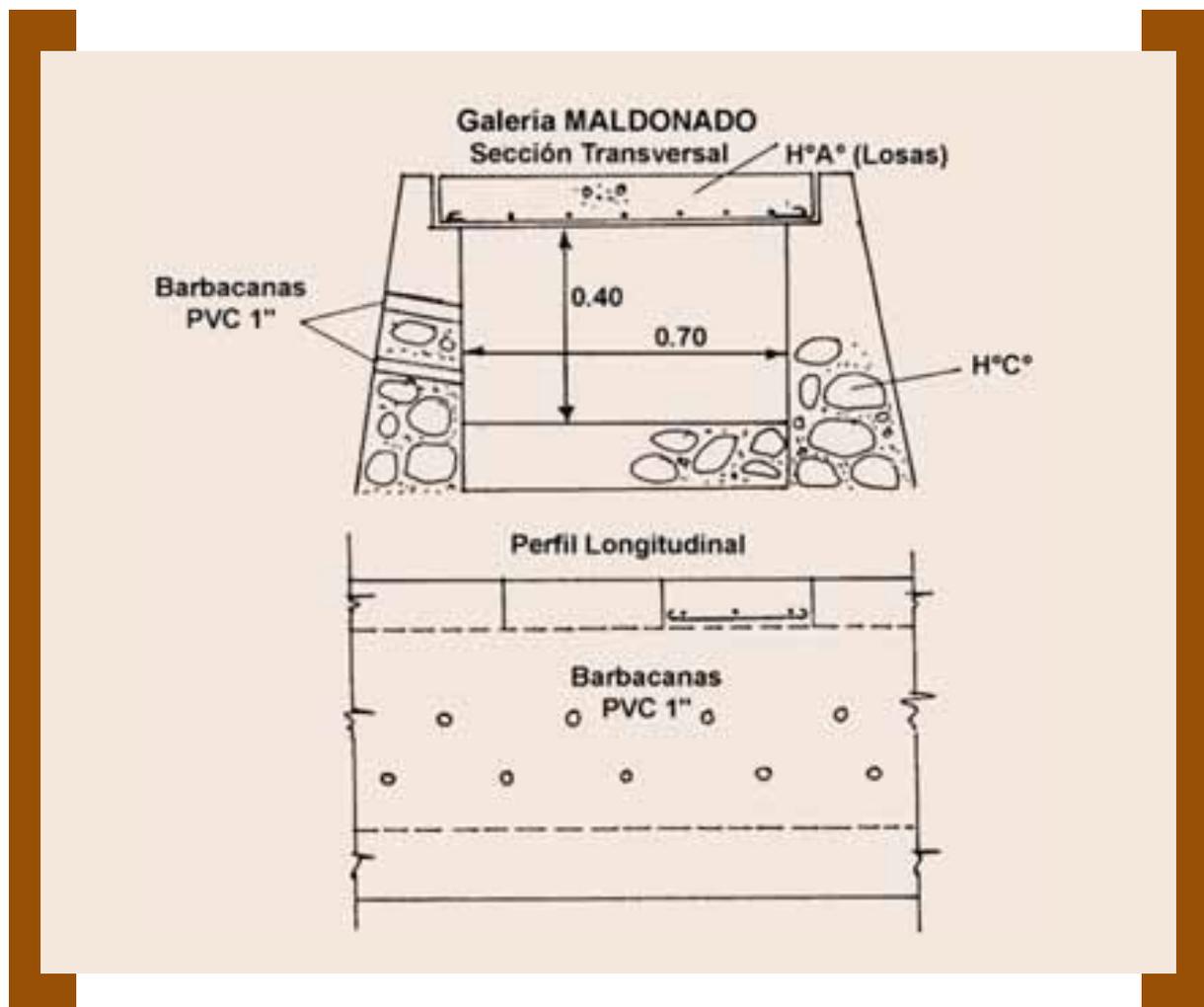
Este sistema de riego necesita una refacción obligatoria, antes de la próxima época de lluvias de lo contrario los daños serán mucho mayores, además de la pérdida de terrenos agrícolas.

El sistema de barbacanas colocadas es de diámetro muy pequeño 1", y según los usuarios, se tapa muy rápidamente. Literatura como el U:S: Bureau recomienda que el diámetro mínimo debe ser 2" para evitar este problema, aunque un buen filtro soslayase este inconveniente.

La gestión del sistema de riego Maldonado del Departamento de Potosí, tiene una organización establecida, con derechos y obligaciones definidas, en forma de comité de riego, cuenta con tres jueces de aguas, quienes controlan y verifican el estado de la obra, además convocan a trabajos de limpieza y en caso de incumplimiento aplican sanciones, las mismas que son definidas en asambleas.

Con el mejoramiento de la galería (profundidad de 0.8 metros), captan un caudal que les permite actualmente el libre uso, sin embargo la obra tiene problemas en épocas de lluvia porque es susceptible a sedimentarse y en épocas de estiaje estas disminuyen notoriamente, considerando que en este sector existe una buena permeabilidad, por el caudal que extrae la galería.

Plano 2.4.1 Galería Maldonado; sección transversal y barbacanas



2.4.2. Sistema de riego Buena Vista



Figura 2.4.2 Galería Buena Vista; lugar de emplazamiento

Ubicación:

Departamento: Potosí	Tipo de obra: Galería filtrante (rústica)
Provincia: Nor Chichas	Materiales: Muros de M°P°
Municipio: Vitichi	Tapa: Embovedado de piedra
Localidad: Buena Vista	Caudal de galería: 2.0 l/s
Altura (m.s.n.m): 3.070	Caudal del río: 0.5 l/s

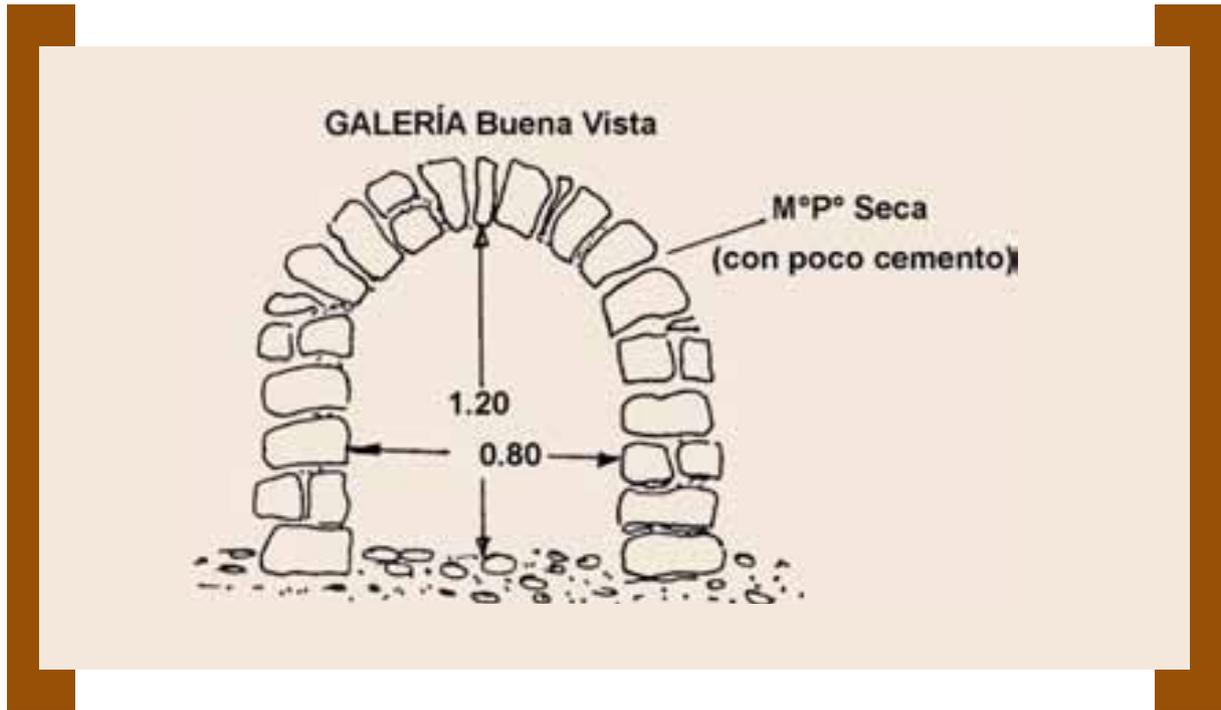
Esta obra está en el río Vitichi, con características de régimen efímero, con una pendiente de 3.1 %, la galería es de construcción rústica y antigua, tiene 2 brazos construidos en 2 etapas, y se ubica en la margen derecha del río. La obra abarca un trayecto de 150 m.

Constructivamente la galería es de mampostería seca con un poco de cemento en algunos sectores, se encuentra bastante superficial.

La galería antigua no se encuentra funcionando por tanto no es posible hacer un análisis técnico de su funcionamiento y construcción, actualmente la obra se encuentra totalmente llena de agua porque el canal de aducción se ha sedimentado, lo que no permite el desfogue de la obra, este hecho se ha confirmado en 2 oportunidades que se visitó la obra

Por otra parte, la ampliación de la galería al presente no se ha realizado, y solo existe un perfil de proyecto con diseño preliminar sin memoria de cálculo.

Con la inspección se verificó que la obra no ha sido mejorada, por la que se encuentra totalmente colmatado de sedimento tanto la galería y el canal rústico, y como consecuencia de esto, el sistema no está en uso, lo que indujo a que la organización no tome acciones al respecto, solo aprovechan las aguas de la vertiente que existe en el extremo izquierdo de la obra y algunos usuarios hacen uso de ella, sin embargo en épocas de estiaje (Octubre a Noviembre) este caudal tiende a secarse.



3

CAPÍTULO

VALORACIÓN DE LA ADAPTABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA A LA CAPACIDAD DE GESTIÓN

3.1. INTRODUCCION

El diseño y la construcción de las galerías filtrantes, en las zonas áridas y semiáridas de los Departamentos de Cochabamba, Oruro y Potosí, son de gran importancia, porque es la única fuente de agua de riego (segura) que permite realizar una actividad agrícola y asegurar la vida de una población.

La falta de agua en estas zonas, ha hecho que las familias campesinas se organicen para construir obras (galerías rústicas), actualmente, muchas de ellas han sido mejoradas. Estas organizaciones se desempeñan como sindicato campesino y en el interior de ellas se han conformado los comités riego y/o asociación de riego, para el manejo exclusivo del agua de riego. Estas organizaciones han establecido mecanismos para gestionar su sistema de riego.

La mayoría de los sistemas de riego se caracterizan por el proceso continuo de mejoramiento y ampliación de infraestructura, con el fin de mantener o aumentar el caudal de captación, independientemente a la antigüedad de los sistemas existentes, estableciéndose acuerdos entre familias (usuarios) y entre comunidades. Juntamente a este proceso se confirma y se define quienes, cuanto y como participaran en los trabajos de construcción y por cuanto tiempo. Durante este proceso continuo, paralelamente a la construcción, las organizaciones campesinas establezcan sus acuerdos y sanciones para el funcionamiento del sistema.

El objetivo de este capítulo es mostrar como el diseño y la construcción de las galerías filtrantes necesitan de un análisis de los requerimientos de uso, para garantizar el funcionamiento de la infraestructura. Lo que significa que hay una estrecha interrelación entre infraestructura y gestión de agua. Para su mejor comprensión primeramente se dará a conocer de manera muy general el marco conceptual que apoya lo indicado, posteriormente se abordará cada uno de los elementos de la gestión con relación a la infraestructura.

3.1.1. Algunos conceptos

Para comprender estos dos elementos: gestión de agua y diseño, es importante presentar algunos conceptos de aclaración, los mismos detallaremos a continuación:

3.1.2. Capacidad de autogestión

El diseño de una galería filtrante, para las condiciones de la zona árida y semiárida es un proceso complejo que involucra parámetros tales como el espesor del acuífero, el coeficiente de permeabilidad y la gradiente hidráulica, principalmente porque la estabilidad de estas obras

no solo depende de los parámetros hidráulicos sino también de las características del río, de las precipitaciones (seco, normal, húmedo), de los movimientos sísmicos (terremoto, temblores) y de la parte económica.

Además, la infraestructura construida en estas condiciones fisiográficas de estas zonas, debe responder a las características sociales de los usuarios de cada sistema de riego, de tal manera que los sistemas mejorados sean sostenibles y autogestionarios.

Para lograr la capacidad de autogestión por parte de los usuarios, es necesario que se cumplan tres condiciones importantes:

- a) Que se hayan establecido derechos y reglas de trabajo claros y que sean socialmente aceptados.
- b) Que los usuarios tengan la capacidad organizativa para asumir las actividades de gestión de la nueva infraestructura, especialmente en lo referente a la operación y mantenimiento de la misma.
- c) Que la infraestructura sea de buena calidad, social y económicamente adecuada a las capacidades de gestión de los usuarios.

3.1.3. Construcción social de la tecnología

La tecnología de riego (infraestructura) no solamente media la relación con procesos biofísicos, sino también moldea la relación gente – gente que es parte importante del riego. La dimensión social puede estar especificada en tres puntos: requerimientos sociales para uso de la infraestructura, construcción social de la infraestructura y efectos sociales de la infraestructura.

A. Requerimientos sociales para uso de la infraestructura

Se entiende como requerimientos de uso a las necesidades sociales para utilizar la infraestructura u obra construida, estas necesidades están enmarcadas dentro de las condiciones del entorno (social, económico y cultural). Los diseñadores fallan frecuentemente en la apreciación de los efectos que tiene el entorno social sobre el uso del sistema de riego. Como resultado, el sistema técnico no facilita el uso deseado por los agricultores, los mismos que no tienen la capacidad de cumplir con la demanda de gestión que requiere la nueva infraestructura del sistema construido.

B. La construcción social de la infraestructura

El resultado de una obra de riego es producto de una construcción social, esto significa que el diseño y la construcción es un proceso social en el que diferentes actores (comunidad, grupos, familias, sectores, ingenieros, dirigentes, otros) interactúan (comunicación, negociación, toman decisiones, condicionan, otros) y la naturaleza de ese proceso y las diferentes percepciones e intereses de los actores moldean o dan forma a las características técnicas de la obra

La experiencia en nuestro medio es que muchas veces los usuarios no son vistos por el equipo técnico como actores que pueden aportar en las decisiones y como consecuencia los resultados son producto solamente de decisiones del equipo técnico.

C. Efectos sociales de la infraestructura

El diseño y construcción de una obra, produce efectos sociales en el lugar de emplazamiento y en su entorno, estos efectos son los siguientes:

- Efectos físicos positivos y negativos
- Efectos sociales positivos y negativos

Los efectos físicos positivos y negativos se refieren a las características físicas de la obra que afectan a la gente. Entre los aspectos positivos se incluye: una mayor captación de agua, mejores eficiencias, entre los aspectos negativos se encuentra la erosión, inundación y otros. En cambio, los efectos sociales positivos están relacionados con la disminución de inversión de mano de obra para el mantenimiento, la disminución del estado de tensión de la gente. Los efectos negativos están dados por los conflictos, descontentos y otros.

3.2. INTERRELACION ENTRE GESTION DE AGUA Y DISEÑO

Los tres conceptos mencionados anteriormente, permitirán analizar los casos estudiados relacionados con el diseño y construcción de galerías filtrantes y los elementos de la gestión: organización, mantenimiento, operación – distribución y derechos al agua.

3.2.1. Interrelación entre diseño - construcción y organización en galerías filtrantes

En los sistemas de riego estudiados, en los Departamentos de Cochabamba (Mizque, Aiquile), Oruro y Potosí, en sus inicios, la construcción, la operación/distribución y el mantenimiento de las galerías rústicas fueron asumidos por el Sindicato Campesino de las comunidades. Posteriormente, en algunos sistemas, los usuarios han visto por conveniente conformar los comités de riego y/o asociación de regantes, para tratar temas referente al riego solamente.

Actualmente, la organización de los usuarios en los sistemas estudiados está bien conformada, pues las obras rústicas y hoy mejoradas, han permitido la consolidación del comité y/o asociación de riego. Además, es importante indicar que las organizaciones en Mizque, como la de Tipa Tipa y Montecillos, tienen una experiencia anterior, tradicional y ancestral para construir galerías desde sus antepasados¹, aspecto que ha prevalecido en la construcción de obras mejoradas.

Si bien el aspecto organizativo aglutina una serie de elementos, para el caso del presente estudio, se hace referencia exclusivamente al cargo para operar la obra y al conocimiento y experiencia de la organización para enfrentar las necesidades de mantenimiento de galerías mejoradas

A. Necesidad de creación de cargo para el control de la galería

En los sistemas de riego estudiados, por la característica de la galería filtrante, estos funcionan por gravedad, es decir que, no requieren de mano de obra para su operación, pero cuando disminuye el caudal de la galería, es necesario realizar trabajos permanentes de limpieza (de sedimento) e inspecciones visuales.

Para cumplir con estas necesidades es que la organización nombra a usuarios en cargos específicos, el número de cargos está en función a la dimensión de la obra. En sistemas de riego con mayor magnitud, para un buen control, el Juez de agua cuenta con el apoyo de 2 ayudantes, caso Tipa Tipa (Mizque), Zamora (Aiquile) y Maldonado (Potosí). En cambio en las galerías pequeñas (Oruro), el cargo se reduce a un Juez o Alcalde de agua.

El Juez de agua, nombramiento y funciones

El nombramiento del Juez de agua, Presidente de obra y/o Alcalde de agua se realiza en asambleas anuales de cada sistema de riego, con la presencia y participación de los usuarios. La función principal es inspeccionar y verificar el estado de la galería, a través de las cámaras de inspección, controla los trabajos, robos y reparte el agua a los usuarios según sus derechos (Mithas) especialmente en épocas de estiaje (en base al caudal básico captado). También deberá informar permanentemente a la directiva de la organización y usuarios las actividades que deberán desarrollarse, los conflictos que surgen y otros. La duración de este cargo generalmente es de un año.

¹ Las galerías rústicas son muy antiguas, cuyos muros están contruidos solo con piedra acomodada, esto permite tener mayor porosidad en el muro, tampoco colocan solera en el piso por la misma razón.

Para la elección del Juez de agua hay ciertos requisitos, tales como:

- a. Debe ser una persona que tenga permanencia en el lugar para que pueda garantizar la continuidad del trabajo. Por lo general, tanto la organización como los usuarios no permiten el reemplazo del Juez de agua salvo en caso de abuso de sus funciones, pero puede gozar de permisos en casos de ausencia apremiada como enfermedades, viajes obligados o muerte de un familiar. Por lo general, la tendencia es mantener en sus funciones al Juez de agua, por la práctica adquirida por los años que va desempeñando la función, pero cuando se reemplaza será por otra persona que tenga bastante conocimiento del sistema.
- b. Deberá ser conocedor de los turnos de riego, gozar de la confianza de los usuarios, estar dispuesto a trabajar de acuerdo a las normas y acuerdos del sistema y algo muy importante tener la capacidad para resolver conflictos.

Sin embargo, en algunos sistemas de riego, este cargo es rotativo, todos los usuarios deben pasar el cargo bajo lista, esto ocurre en Loro Mayu, Tipajara y otros. En cambio en los sistemas de riego de Montecillos y Tajras, eligen a los usuarios más respetados o responsables, debido a que ellos resuelven problemas en caso de conflictos no solo referido al riego, sino de la comunidad.

La intensidad de trabajo del Juez de agua está en función a la disponibilidad de agua, en la época de lluvias no es necesario el desempeño de sus funciones, excepto cuando el caudal captado disminuye y es necesario controlar los turnos. En época de estiaje su labor es permanente, debido a que el caudal captado disminuye drásticamente, por tanto, requiere un buen control en la distribución de los derechos (Mithas).

A. Formación y experiencia

En la mayoría de los casos estudiados, los usuarios no han recibido ninguna capacitación sobre la operación y mantenimiento de la obra, a excepción del sistema de riego Montecillos que recibió un curso – taller de capacitación sobre el manejo de estas obras, el cual se realizó una vez concluida la construcción de la obra.

Sin embargo, la mayoría de los sistemas de riego por contar con obras rústicas, desde la época de sus ancestros, han ido adquiriendo experiencia, por tanto, tienen un conocimiento suficiente sobre la operación de este tipo de obra, especialmente en la zona de Mizque, Aiquile y Oruro. Sin embargo el concepto de mantenimiento no les queda muy claro, debido a que el concepto de mantenimiento confunden con el de limpieza.

Gran parte de las instituciones que intervinieron en los proyectos estudiados, no percibieron la importancia de formar o capacitar a los usuarios sobre el manejo de este tipo de obra. Es más, en la última etapa de construcción, las empresas constructoras hicieron una retirada apresurada y no dieron lugar a cuidar detalles sobre recomendaciones y cuidados respecto a la obra ejecutada. De igual manera, las instituciones promotoras que se ocupan de formular proyectos no expresaron o no contemplaron la necesidad de formación de los usuarios encargados para el mantenimiento de las obras.

3.2.2. Interrelación entre diseño, construcción y mantenimiento en galerías filtrantes

En este acápite, para evidenciar la interrelación entre mantenimiento e infraestructura, primeramente se muestra como las características de la obra demandan tareas adicionales imprevistas de mantenimiento y adecuación por parte de los usuarios. Posteriormente, se muestra los requerimientos propios del mantenimiento, relacionados con la obra.

3.2.2.1. Aspectos no considerados en el diseño y su influencia en el mantenimiento

Los resultados de los casos estudiados, muestran los siguientes aspectos que van a afectar en el mantenimiento:

a) Ancho y alto de la bóveda

El diseño de la bóveda se constituye en un aspecto determinante que posibilitará o impedirá una buena limpieza y mantenimiento, así por ejemplo, en algunos sistemas de riego en Mizque, caso Tipapampa, la bóveda tiene 0.70 m de ancho y 1.10 m de alto, situación que dificulta el ingreso de los usuarios para limpiar la galería. Por esta razón, la limpieza se torna en una tarea muy ardua, ya que los usuarios tienen que sacar material fino (limo y arcilla) especialmente de los sectores de las barbacanas, cámaras de inspección y en la longitud de la galería.

En el sistema de riego Maldonado (Potosí), por las características de diseño y construcción (zanja filtrante) y junto a ello por el mal sellado de las tapas, se puede evidenciar una excesiva colmatación de material fino (limo y arcilla), que demanda mayor trabajo a los usuarios. En este caso no es posible el acceso de una persona por sus dimensiones pequeñas.

b) Tipo de muro

En todos los casos estudiados se observa que se plantea que el muro y/o bóveda de la galería sea construido de hormigón armado y hormigón ciclópeo, pero en los casos de Kurumayu, Tipa Tipa y Montecillos se ha priorizado la experiencia que tienen los usuarios de construir con mampostería de piedra seca, debido a que confían en este tipo de construcción por su experiencia anterior. Sin embargo, existe un mayor arrastre de sedimentos, lo que demanda un mayor trabajo en la limpieza.

c) Obras de protección

Para evitar daños de la infraestructura, específicamente las cámaras de inspección de salida de las galerías, se hace indispensable la construcción de obras de protección, caso contrario pueden ocurrir problemas como en el sistema Tarata, cuya primera cámara ha sido colapsada. Algunas galerías cuentan con obras de protección en la cámara de salida de la galería, por ejemplo en el caso de Tipa Tipa y Tipapampa se evidencia la presencia de muros de H°C°, en cambio las galerías de Thako Thako, Zamora existen muros de gaviones con piedra, y en Oruro las galerías presentan gaviones con piedra sobre la galería, caso de Condor Chinoca, Huayña Pasto Chico. En Potosí la galería Maldonado tiene una obra de protección en la salida de la galería que actualmente está derrumbada por efecto de socavación.

Asimismo, ríos anchos como el Tipajara en Mizque y Novillero en Aiquile requieren de obras que permitan encauzar el flujo de las crecidas del río, para una mejor alimentación del flujo subterráneo. Los márgenes del río en esta zona y en general en todo el curso del río Tipajara presentan problemas de control del curso de agua, ya que la zona no cuenta con obras para controlar el curso del río (muros, gaviones, etc). Lo único existente y de forma muy rudimentaria son los llamados reparos de troncos de molles, como se observó en la galería de Loro Mayu.

También, se pudo evidenciar que no se realizaron trabajos para disminuir la velocidad del agua en el río, en épocas de crecidas. Sería aconsejable contemplar en los proyectos la construcción de dissipadores (aguas arriba) y la construcción de gaviones en el lecho del río (aguas arriba) de alta pendiente.

3.2.2.2. Actividades demandadas para el mantenimiento

Toda obra requiere para las actividades de mantenimiento: equipo, recursos económicos y humanos; conocimientos y habilidad para posibilitar el funcionamiento adecuado de la obra construida.

En el caso de las galerías filtrantes, se ha constatado que las actividades de mantenimiento están relacionadas principalmente con la “limpieza”, consistente en la extracción de material fino (limo y arcilla), constituyéndose en actividades rutinarias en épocas secas (Junio y Julio).

a. Mano de obra

Para efectuar labores de limpieza, la práctica común es utilizar mano de obra propia, por lo general, los sistemas de riego cuentan con bastante mano de obra disponible para esta tarea. En todos los casos estudiados se ha percibido que no requieren de la contratación de mano de obra externa al sistema. Siendo que la participación de los usuarios en estos trabajos es obligatoria para poder mantener sus derechos al agua.

Es importante mencionar, que la limpieza de la galería realizan todos los usuarios, los mismos que son convocados por el Juez de agua, pero también existen sistemas de riego donde la limpieza no siempre realizan las mismas personas, sino que son convocados por grupos que intervienen rotativamente para cada oportunidad. Este hecho posibilita que todos estén capacitados para responder a este requerimiento.

Los sistemas de riego más antiguos cuentan con un cronograma de trabajo, en el cual está definido que las actividades de mantenimiento se inician a partir de la galería, para luego continuar con las otras obras que conforman el sistema de riego (canales, obras de arte, otros).

b. Capacidad y habilidad

Los casos estudiados muestran que gran parte de los sistemas de riego tienen un conocimiento sobre la limpieza de la obra, pero no sobre el mantenimiento, específicamente de los aspectos relacionados con los filtros, aspecto determinante para el buen funcionamiento de la obra

3.2.3. Interrelación entre diseño, construcción y operación/distribución en galerías filtrantes

Previo a la presentación de los resultados encontrados sobre la interrelación entre diseño, construcción y operación, es necesario indicar que la operación se refiere al conjunto de actividades que permite el manejo de la infraestructura física con el objeto de que el agua llegue a los cultivos de manera eficiente.

Por las características de funcionamiento de las galerías filtrantes, éstas operan en forma automática, es decir que su funcionamiento hidráulico es por gravedad, por tanto, no requieren de prácticas adicionales, ni aporte de mano de obra o control para su operación, permitiendo dotar agua en forma permanente durante el año. Sin embargo, existen periodos en que disminuye drásticamente el caudal, debido generalmente al descenso del nivel freático y al material usado en los filtros (no clasificado), razón por la que la galería se ve afectada y susceptible a sedimentarse con limo y arcilla.

En algunos de los casos estudiados, con el fin de captar mayor caudal, los usuarios vieron por conveniente captar agua superficial y conducirla directamente a la cámara de salida de agua, como ocurre en el caso Taquiña (Cochabamba), Realenga en Oruro. También, conducen el agua superficial al sector de los filtros como el caso de Thako Thako (Mizque), Condor Chinoca (Oruro), y Huayña Pasto Chico (Oruro), debido a que la obra no capta el caudal proyectado.

Para la distribución de agua, en el caso particular de río seco en Tarata, los usuarios han incorporado una compuerta en la galería, que permitió controlar la salida del agua (esto debido

a que el nivel freático es de lenta recuperación. En cambio en los sistemas de riego de Mizque, Aiquile (Cochabamba), Oruro y Potosí, tienen definida la distribución de acuerdo a sus derechos (Mitha). El reparto de agua delegan a un Juez de agua (época seca) que entrega el agua en función a los derechos adquiridos, estos aspectos han permitido establecer la frecuencia de riego y los tiempos de riego. En todos los casos la distribución es por rotación y monoflujo, no requiriendo actividades adicionales para el reparto de agua.

Las formas de distribución están relacionadas sobre todo con la disponibilidad de agua de la fuente y los requerimientos de los cultivos, siendo éstas:

- Demanda libre, ocurre en época de lluvias, en este periodo cualquier usuario puede captar y utilizar el agua, incluso personas que no cuentan con derechos de uso de agua (algunas galerías). Lo que significa que la toma para su uso no se circunscribe solamente a usuarios con derechos al agua, sino que se extiende a personas que no cuentan con derechos al agua.
- Por turno, esta modalidad sucede en la época seca cuando disminuye el caudal de la galería, la entrega de agua es por turnos y solamente reciben los que tienen derechos al agua.

Para terminar sobre este aspecto, es importante indicar que en aquellos sistemas que sea posible, la persona encargada de la operación de la infraestructura (Juez de agua) lleve una carpeta, con registros mensuales y diarios del caudal de la galería y anotaciones de las actividades importantes ejecutadas en su respectiva gestión.

3.2.4. Interrelación entre diseño, construcción y derechos de agua en galerías filtrantes

Uno de los elementos centrales de la gestión en los sistemas de riego, son los derechos al agua que constituyen la base para la distribución de agua y las responsabilidades del mantenimiento, lo cual permite garantizar la sostenibilidad de los sistemas de riego, por tanto, los derechos al agua deben estar claramente definidos entre los usuarios.

En los casos estudiados, el origen del derecho al agua de los sistemas se concretiza en gran parte por el aporte de jornales en la construcción de obras rústicas (galerías, tomas), este trabajo ha sido traducido en “turnos”, medida equivalente a horas de turno de agua que varía según la zona. En Loromayu (Aiquile) el turno tiene una duración de 8 horas, pero en Mizque las galerías de Montecillo, Tajras, Tipa Tipa y Maldonado (Potosí) tienen turnos que duran 6 horas, en cambio la galería de Thako Thako el turno es de 2 horas. En Oruro las galerías de Pacopampa y Realenga presentan turnos de 12 horas.

Referente a la adquisición del derecho al agua en los sistemas de riego estudiados, actualmente no permiten el ingreso de nuevos usuarios, únicamente pueden adquirir derechos los hijos de los usuarios antiguos por herencia y en casos particulares cuando estos forman una nueva familia, como ocurre en el sistema de Tipajara.

a. Creación y reafirmación de los derechos al agua

Como se mencionó, la creación de los derechos al agua fue a través de los trabajos realizados en la construcción de obras rústicas, y con las actuales obras (mejoradas y ampliadas) los usuarios reafirmaron sus derechos al agua. Sin embargo, algunos sistemas de riego han permitido el ingreso de nuevos usuarios, debido a que la mano de obra disponible era insuficiente para la construcción de las nuevas galerías, caso de Mizque (Montecillos) y Oruro (Pacopampa, Condor Chinoca).

En el caso Tarata (Cochabamba), los usuarios no han aportado con mano de obra ni dinero, por esta razón después de construido el sistema de riego, recién decidieron organizarse para definir los derechos al agua en base al tamaño de los terrenos y han visto por conveniente aportar económicamente para su mantenimiento respectivo.

Para concluir se puede decir que en general para la construcción y ampliación de las galerías, los usuarios aportaron con el acopio de materiales (piedras, arena) y mano de obra no calificada, según sus derechos de uso de agua (turnos: 4, 6 y 8 horas), existiendo un aporte de mano de obra y no económico.

b. Derechos y obligaciones con la infraestructura

Al contar con una obra mejorada y ampliada, para responder a los requerimientos de la galería, se establecen y se hacen cumplir los acuerdos para el mantenimiento debido a que tienen directa relación con el derecho al agua, por lo que cada usuario tiene la obligación de hacer estos trabajos en función a las horas de riego que tenga. En caso de incumplimiento a los trabajos y reuniones convocados por la organización, los usuarios establecen sanciones económicas, otros duplican los jornales y en otros sistemas de riego se les priva parte de sus turnos, estas sanciones se establecen de acuerdo a la gravedad de la falta.

Las sanciones en las galerías de Kjaruma, Zamora, Loromayu, Thako Thako, Maldonado (Potosí) y otros son del tipo económico. En Oruro, en las galerías de Realenga, Pacopampa, Condor Chinoca sancionan con la pérdida del turno de agua y en ocasiones la sanción es económica. En la galería de Tajras, según el comité de riegos tienen diferentes sanciones: pérdida de turnos de riego, multas económicas, jornales de trabajo y recargo de 20 a 25 Bs, en cambio en la galería de Montecillos en caso de incumplimiento la sanción consiste en duplicar sus jornales por cada falta.

c. Derechos de uso de agua (aguas arriba y abajo)

La construcción de una galería filtrante, tiene la finalidad de captar la máxima cantidad de agua subterránea, para satisfacer las necesidades de los usuarios que se benefician con la obra, pero, paralelamente puede ocasionar conflictos con los usuarios de los sistemas ubicados aguas abajo de la galería.

Al respecto, en Mizque en el río Tipajara, entre las galerías de Tipa Tipa, Pucapila, Montecillos y Tajras existen convenios desde la existencia de las galerías rústicas, en los que se establece respeto entre comunidades vecinas. Está acordado que no se profundice la cota ni el tamaño de la galería, para evitar perjuicios a otros usuarios de las galerías aguas abajo.

3.3. CAPACIDAD DE GESTION SOBRE LAS OBRAS CONSTRUIDAS

Los resultados de investigación sobre la gestión de agua en sistemas de riego campesino nos permiten concluir que cada sistema tiene una gestión de agua particular, sin embargo, existe una serie de principios o criterios comunes de gestión de agua. Principios de gestión entendemos como la base o criterios fundamentales en los cuales se sustentan los acuerdos y actividades que moldean la gestión de agua y se manifiesta en una diversidad de reglas específicas para cada sistema de riego. Los principios de gestión son a la vez principios de diseño en los momentos en los cuales se hace modificaciones en el sistema de riego. Para las instituciones que hacen intervenciones en sistemas de riego campesinos es importante analizar estos principios, puesto que la adaptabilidad a la capacidad de gestión dependerá en gran parte de que estos principios sean claros en el sistema de riego mejorado.

La capacidad de operar y mantener el sistema de riego es posiblemente el factor más importante que regula el diseño de la obra y el sistema de riego en la zona montañosa. La determinación de las habilidades de mantener la infraestructura debe considerarse cuando se selecciona una alternativa de las muchas opciones de diseño. Seleccionar la estructura correcta no es suficiente, el riego no será posible sino se establecen claramente los acuerdos, normas y reglas para la gestión del sistema de riego mejorado.

En las galerías filtrantes, los casos investigados nos muestran que la experiencia adquirida con las obras rústicas, han hecho que las organizaciones de los distintos sistemas de riego tengan

mayor cuidado con las obras mejoradas, por lo que vieron conveniente ajustar y mejorar las reglas y acuerdos para el buen funcionamiento del sistema de riego, lo que implica que la distribución de los derechos (turnos) para el acceso al agua y las obligaciones para con el sistema sean claros.

La capacidad de gestión de las obras mejoradas puede realizarse a través del análisis de los siguientes criterios:

COMPRENSIÓN: Un sistema de riego es comprensible cuando todos los usuarios (hombres, mujeres, niños y ancianos) entienden el funcionamiento de la infraestructura y la gestión del sistema de riego. Todos entienden y asumen las bases para la asignación de agua, todos puedan entender y participar en la operación / distribución del agua y adicionalmente mantener la infraestructura.

En nuestro caso, en el que analizamos las galerías filtrantes, es importante mencionar que este tipo de obra capta agua de una sola fuente. Como ocurre en la mayoría de los sistemas de riego, por la simplicidad de la obra en su funcionamiento, es comprensible para todos los usuarios, aunque el grado de comprensión es variable. Son los dirigentes, jueces de agua y los usuarios que recogen el agua los que comprenden mejor el funcionamiento de la obra, pero esto se debe a su mayor relacionamiento con la obra.

En el caso del mantenimiento, se ha percibido que los usuarios de los sistemas de riego con tradición de uso de galerías (galerías rústicas) comprenden como debe hacerse el mantenimiento de las galerías mejoradas en los aspectos relacionados con la limpieza, pero en los sistemas en los cuales se ha introducido galerías a través de proyectos de riego, hay deficiencia en el conocimiento respecto al mantenimiento. Muchos proyectos una vez concluida la obra han abandonado la zona sin capacitar a los usuarios en el mantenimiento, este es el caso de Tarata y otros.

Es bueno que durante el diseño se establezcan mecanismos de control, además de capacitar a todos los usuarios para de esta manera evitar que el conocimiento se concentre solamente en algunos usuarios, que en su momento podrían ser los jueces de agua.

MINIMIZACION DE CONFLICTOS: Los conflictos en los sistemas de riego, generalmente ocurren en la época de escasez de agua, porque el agua no alcanza para todos, como consecuencia algunos usuarios se ingenian para robar agua (conflicto más común) en el momento de la distribución. Otro tipo de conflictos se suscita por la inasistencia a los trabajos de mantenimiento y por falta en las contribuciones económicas.

En algunos casos estudiados, el conflicto podría deberse a la competencia por el agua de las galerías ubicadas en el mismo río, sin embargo, esto no ocurre porque existen acuerdos que regulan el uso. Así Tipa Tipa no pudo ser ampliada ni profundizada por convenios ancestrales con usuarios de la galería de Puca Pila, situada aguas abajo; lo mismo ocurrió con la galería de Montecillos y la de Tajras (aguas abajo).

Para la resolución de conflictos, los campesinos tratan de abordar el tema de la manera más directa entre los involucrados, según el grado de importancia y de la manera más descentralizada posible, en el lugar del conflicto y con todos los presentes en ese momento (a veces llevan el asunto a reuniones). La mayoría de las veces los conflictos se solucionan según acuerdos, tomando en cuenta las costumbres y no tanto la ley, los campesinos prefieren resolver internamente y en consenso de toda la comunidad.

EQUIDAD: Entendemos por equidad con relación a la infraestructura, si ésta permite hacer uso de los derechos al agua en condiciones equitativa para todos los usuarios. Al ser la galería una obra de beneficio común, con la construcción no se altera este principio, excepto cuando no se haya tomado en cuenta a determinados grupos de usuarios, que no sucedió en las obras mejoradas estudiadas.

Sin embargo, existe un caso particular en el sistema Kurumayu, donde algunos usuarios no participaron en la construcción de la galería rústica, debido a la desconfianza en encontrar agua

subterránea en el río, por lo que actualmente no son socios. Esta galería tiene bajo rendimiento, lo cual no permite el ingreso de nuevos usuarios.

En los sistemas de riego estudiados todas las familias tuvieron oportunidad de tener derecho al uso de agua, pero para adquirir estos derechos, la organización consideró justo o equitativo que los usuarios contribuyan con jornales en la construcción y el mantenimiento de la obra (rústica y/o mejorada), esta contribución está relacionada con la extensión de su tierra que necesita regar, pero no necesariamente.

Por las características de las galerías filtrantes, y su funcionamiento automático, es posible captar y dotar permanentemente agua al área de riego, con fluctuaciones de caudal durante el año. Cuando disminuye el caudal, realizan el mantenimiento (limpieza), de acuerdo a los derechos adquiridos, los usuarios aportan sus jornales en forma equitativa para conservar funcionando la obra.

CAPACIDAD DE USO Y CONTROL: Se entiende como la aptitud de la gente para responsabilizarse de la obra construida (introducida) para lo cual se requiere: organización, conocimiento y dinero.

Los sistemas de riego investigados, muestran organizaciones bien consolidadas y reconocidas por instituciones privadas y públicas. Estas organizaciones vienen gestionando su sistema hace 30 a 40 años atrás con obras rústicas y han ido adquiriendo experiencia sobre el manejo (operación y mantenimiento) de las galerías filtrantes.

Se percibió que son pocos los sistemas de riego en los cuales los usuarios dan aporte económico para el mantenimiento, en algunos sistemas de Oruro aportan anualmente un monto. En Mizque, el aporte económico realizan cuando la obra necesita refacción o cuando los dirigentes tienen que movilizarse a otros sitios.

En la mayoría de las galerías investigadas, la forma en que han sido construidas las obras ocasiona una limitante para su control y su capacidad de uso, como ocurre con el material usado en los filtros, que no cumplen con la ley de filtros de Terzaghi. Por otra parte, también se encuentran problemas en la colocación de las barbacanas, que no respetan el espaciamiento entre ellas. Además se han colocado a mucha altura de la base.

La profundización de la galería es un aspecto que limita la capacidad de uso, como se verificó en la galería Tajras (Mizque), pues actualmente el caudal existente no es suficiente para abastecer las necesidades de todos los usuarios. En el caso de la Taquiña (Cochabamba) ocurre lo mismo, pero debido a la alta pendiente que ocasiona que los filtros sufran taponamientos debido al arrastre de sedimento formando una capa impermeable.

Todas estas limitaciones hacen que la obra se vaya deteriorando paulatinamente, por lo que es importante realizar los trabajos de mantenimiento, caso contrario, se disminuirá el caudal y reducirá la vida útil de la obra. En el caso de las galerías de Oruro (Huayña Pasto Chico, Realenga, Condor Chinoca), para contar con un mayor caudal, los usuarios conducen el agua superficial al sector de la galería (cámara de inspección y gaviones sobre el filtro).

Lo indicado muestra la necesidad de contar con una obra bien construida, porque aumentaría las posibilidades de control y disminuiría las inversiones de mano de obra y dinero destinados a las actividades paliativas. Asimismo, es importante considerar los conocimientos y conceptos de los usuarios, como se observó en las obras de Tipa Tipa y Montecillos, donde los usuarios, han exigido a que las galerías se construyan de acuerdo a su experiencia, con muros de mampostería de piedra seca, por lo que no han demandado mayores requerimientos, más allá de sus capacidades. En cambio una obra rústica como el sistema Kurumayu (Mizque), exige en forma permanente los trabajos de limpieza para mantener y a veces aumentar el caudal.

También, es una limitante la falta de una organización sólida y estable, tal es el caso de la galería Buena Vista (Potosí), que actualmente no funciona debido a la migración y dejadez de los usuarios,

a pesar de que es la única fuente de agua en la zona, la obra no ha recibido ningún trabajo de mantenimiento, por lo que se encuentra totalmente sedimentada.

FUNCIONALIDAD: La funcionalidad de una obra está relacionada con el cumplimiento del objetivo de diseño (Caudal) que demandan los usuarios. Para que una obra sea funcional es importante considerar la ubicación, la pendiente, la permeabilidad y la experiencia constructiva de los usuarios de la zona. Para nuestro caso, una galería filtrante tiene como objetivo principal captar la mayor cantidad de agua subterránea y asegurar la disponibilidad de agua durante todo el año, especialmente en época seca.

En las galerías filtrantes investigadas, se verificó que la mayoría son funcionales porque permiten captar agua del flujo subterráneo. El 95 % de las galerías de Aiquile cumplen con el caudal de diseño, el 50 % de las galerías de Mizque y Oruro cumplen con el caudal de diseño. En cambio, las galerías de Cochabamba (Taquiña y Tarata) y Potosí (Buena Vista) no cumplen, porque no funcionan adecuadamente;. Sin embargo, los usuarios de estos sistemas de riego aceptan la obra porque es la única fuente de agua (agua subterránea) existente en la zona.

SOSTENIBILIDAD: Se refiere a la habilidad de los usuarios para responder a la necesidad permanente de mantener el sistema funcionando, lo que significa que la organización tenga capacidad de movilizar recursos propios (conocimiento, dinero, mano de obra, material) para este fin.

El aporte económico por usuario es menor cuando mayor es el número de usuarios de un sistema, lo que permite contar con recursos inmediatos. En cambio, cuando el número de usuarios es menor, los aportes económicos son mayores, lo que dificulta atender los requerimientos de la obra, debilitando las posibilidades de sostenibilidad.

En los casos analizados, galerías de Mizque (Montecillos, Tajras, Tipa Tipa, Thako Thako), Aiquile (Tipapampa, Kjaruma, Zamora) y Oruro (Pacopampa, Realenga, Condor Chinoca, Huayña Pasto Chico), tienen mayores posibilidades de ser sostenibles, porque cuentan con una organización consolidada. Este tipo de organizaciones tiene mayores posibilidades de relacionarse con instituciones como el Municipio. ONGs y entidades financieras, para obtener recursos y asistencia técnica que responda a cualquier requerimiento de la obra. Además, estas organizaciones cuentan con mayor aceptación o reconocimiento en la zona debido a la importancia del riego y por el número de usuarios que aglutina.

En cambio en el caso de la galería Maldonado y Buena Vista (Potosí), a pesar de contar con un gran número de usuarios, la organización de riego se halla débil debido a que los usuarios permanentemente migran a otros lugares, aspecto que impide que se cuente con mano de obra de manera inmediata, por lo general, los jóvenes y personas de mediana edad tienden a migrar, quedando los niños, mujeres y ancianos, lo que repercute en las posibilidades de sostenibilidad.

La participación de los usuarios durante todo el proceso de diseño contribuye en la sostenibilidad de la obra. El usuario puede contribuir con conocimiento basado en experiencias locales y conocimiento de su medio (por ejemplo información sobre comportamiento del río en diferentes épocas del año). Por otra parte, en la etapa de ejecución, la intervención de los usuarios con mano de obra permite que estos tengan conocimiento del proceso constructivo y adquieren prácticas constructivas que luego facilitan los trabajos de mantenimiento y reparaciones. Asimismo, la participación de los usuarios en la supervisión o seguimiento a las actividades de construcción posibilita asegurar la calidad de la obra, efectuar ajustes o cambios oportunos y adquirir conocimientos técnicos para poder mantener la obra.

También en la etapa de ejecución se debería explicar y efectuar prácticas con los usuarios de las actividades inherentes a la operación y mantenimiento de la obra, especialmente en lo referente al sector de los filtros, denotando los peligros o riesgos que podría tener la obra en ausencia de la calidad de los mismos, además la limpieza permanente, porque ocasionaría el bajo rendimiento de la obra.

4

CAPÍTULO

FLUJO DEL AGUA EN EL SUELO

Este capítulo tiene el objeto de presentar un resumen de los fundamentos que describen el flujo subterráneo con su aplicación directa a galerías filtrantes como medio para el aprovechamiento del caudal subálveo de un río. El resumen no es exhaustivo, pero sí establece la terminología y argumentos que serán usados en los próximos capítulos.

4.1. PRINCIPIOS DEL MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Desde el punto de vista de un aprovechamiento hídrico por medio de galerías filtrantes, a un sistema subterráneo se le pueden reconocer dos funciones:

- El almacenamiento del agua
- La conducción del agua

El almacenamiento es debido al alojamiento del agua en los poros del suelo. La cantidad de agua almacenada depende de dos factores: el primero referido a la compresibilidad del medio (reacomodo de partículas sólidas) y a la compresibilidad del propio fluido. Aunque en flujo hacia galerías filtrantes puede prescindir de este factor de almacenamiento –prima la conducción– métodos para determinación de la permeabilidad del lecho de un río como pruebas de bombeo requerirán de la inclusión de esta descripción.

Otro concepto que debe tenerse presente es que no toda el agua contenida en un medio poroso saturado puede ser extraída libremente, si no que parte del agua es retenida en forma de fina película formada alrededor de los pequeños granos del suelo. En este caso, otras fuerzas adquieren relevancia (adhesión, tensión superficial, capilaridad, etc.) frente a la gravitatoria. Únicamente sometiendo una muestra de suelo al secado en horno se puede eliminar tal agua.

De lo anterior se concluye que de todo el volumen de agua existente en el suelo, solo una parte de él será el que se pueda aprovechar para la extracción del agua subterránea. Matemáticamente, se traduce en:

$$n = S_y + S_r = \frac{V_d}{V} + \frac{V_r}{V}$$

donde:

- n: porosidad del material
- S_y : producción específica, cantidad de agua extraíble por drenaje
- S_r : retención específica, cantidad de agua que permanece aún en el suelo después del drenaje por gravedad.
- V_d : volumen de agua drenada
- V_r : volumen de agua retenida
- V: volumen total del medio
- S_y : representa la fracción del agua almacenada en el suelo y que puede ser aprovechada

directamente por medios mecánicos; su complemento a la porosidad, S_r , es la retención específica que es el agua almacenada y retenida por fuerzas intersticiales. La Tabla 4.1 consigna datos para lechos granulares típicos

Tabla 4.1 Valores típicos de la producción específica S_y , y de la retención específica S_r

MATERIAL	Porosidad n	S_y	S_r
Suelo en general	0.55	0.40	0.15
Arcilla	0.40 – 0.7	0.02	0.48
Arena	0.25 – 0.50	0.22	0.03
Grava	0.25 – 0.40	0.19	0.01
Limonita	0.20	0.18	0.02
Arenisca	0.05 – 0.30	0.06	0.05
Granito	0.01 – 0.10	0.009	0.001
Basalto	0.11	0.08	0.03

Fuente: Freezy and Cherry (1979)

La segunda función que cumple un medio poroso es la conducción. Esta función puede asemejársela a la misma de transmisión de líquido que efectúa una tubería: transportar agua desde la zona de recarga hacia la de descarga.

La capacidad de transmisión o conducción, dependerá de la geometría del ducto (espacio intergranular del suelo para el paso del agua, frente al diámetro de una tubería), de la oposición que encuentra el agua a fluir (rugosidad de la tubería, oposición por la forma y distribución de los granos de suelo y las fuerzas viscosas adversas al fluir del agua, frente a la rugosidad de la pared de la tubería y turbulencia del flujo), y de las condiciones del propio líquido (temperatura del fluido, minerales presentes).

Se notará que esa capacidad transmisora no es requisito *sine qua non* para la conducción de caudales expectables, si no que se requerirá de energía para **establecer** el flujo.

En función a la capacidad de transmisión de fluido, un medio poroso es clasificado como:

- Acuífero: formación que contiene agua con importante capacidad para transmitirla.
- Acuicludo: formación que contiene agua en almacenamiento, pero con capacidad de transmisión muy limitada.
- Acuifugo: formación que puede contener agua pero es incapaz de transmitirla. Es el caso de la arcilla, por ejemplo, que puede contener agua en gran cantidad pero sin la disposición para cederla o transmitirla.

Otro aspecto a considerar es que en el suelo (o rocas), no todos los poros (fracturas) estarán interconectados formando vías expeditas, si no que algunas vías terminarán en extremos cerrados; consiguientemente, podrá no existir flujo. La interconectividad y el camino que seguirá una partícula de agua moviéndose en un medio poroso es conocida como tortuosidad, que es dependiente de la naturaleza de las partículas (mineralogía, formas) y de los procesos geológicos que la dieron origen (v.g. consolidación).

Del mismo modo, un líquido como el agua podrá tener mayor facilidad de viajar a través de un medio poroso si se compara con la dificultad que encuentra un líquido espeso como por ejemplo el petróleo o agua con alta carga orgánica. Por ello, la aptitud de un medio para transmitir – conducir un líquido es no solamente dependiente del propio medio poroso (porosidad, grado de

consolidación, fracturamiento, permeabilidad intrínseca) si no también de la naturaleza del fluido (agua a diversas temperaturas, agua con concentraciones de minerales o contaminantes). Lo anterior es traducido en un solo concepto: **conductividad hidráulica**.

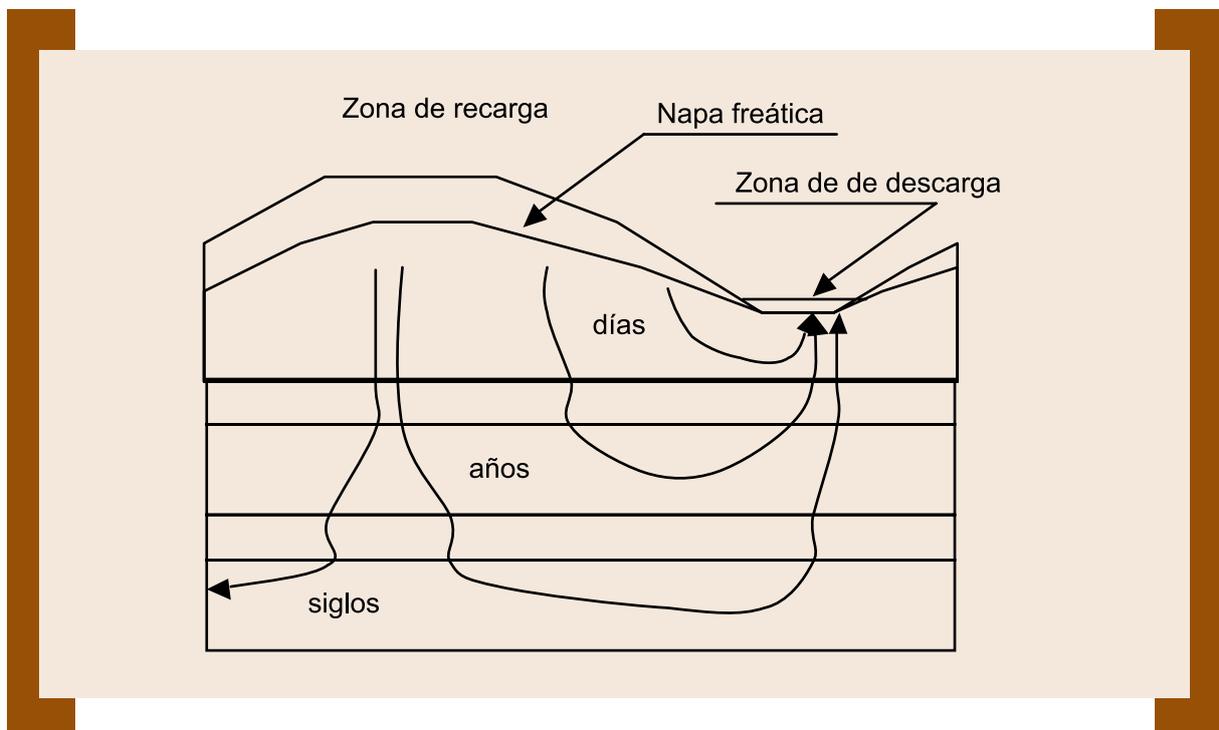
Por lo descrito en los párrafos precedentes, la conductividad hidráulica es un factor que engloba toda:

- La insuficiencia de conocimiento de la naturaleza del suelo (composición mineralógica, granulometría) y su distribución espacial sobre un área dada.
- La heterogeneidad y anisotropía que pueda tener el movimiento del agua en el suelo causada por esa variabilidad

Por esas razones, no es recomendable la determinación de la conductividad hidráulica por pruebas en laboratorio porque en ellos tratan con muestras disturbadas del lecho del río (cambio en el índice de vacíos, reacomodo de partículas, influencia en el entorno, etc.) y más bien debería recurrirse a ensayos en campo como pruebas de bombeo desde las más complejas (interpretación de pruebas de bombeo para una conductividad hidráulica regionalizada) hasta las más fáciles de realizar (pequeñas áreas) con resultados satisfactorios.

La conductividad hidráulica tiene unidades similares a la velocidad [L/T], y según ello, es una pauta para inferir con cuanta rapidez existe renovación del agua subterránea que llega desde la zona de recarga hasta la zona de descarga. La Figura 4.1 muestra un esquema del tiempo que le toma al agua aflorar en un río.

Figura. 4.1 Esquema del tiempo empleado por el agua en moverse en un sistema subterráneo



4.1.1. Algunos parámetros que describen el movimiento del agua subterránea

Desde la primera aproximación de Henry Darcy hacia la comprensión de la dinámica del movimiento del agua en arenas, la mecánica de fluidos en medio poroso ha avanzado conceptualmente y ha adicionado descriptores que caracterizan el flujo subterráneo. Por ejemplo, incorpora la contribución de capas muy poco permeables (flujo vertical desde acuicludos), la capacidad de almacenamiento

de agua que tienen los acuíferos confinados y no confinados e incluso, la heterogeneidad de los materiales (anisotropía en lugar de isotropía).

En este acápite se hace referencia a aquellos parámetros que habrán de influenciar a la cantidad de caudal que se pueda captar en una galería filtrante. Sin embargo, el proyectista deberá tener en mente, que la aproximación física que se hace a ellos no debiera tener un carácter determinístico (unicidad de un valor para describir toda la variabilidad), si no más bien en uno probabilístico.

Compresibilidad del medio poroso y del agua

Aunque en las aproximaciones de cálculo de galerías filtrantes la compresibilidad no suele ser tomada en consideración, sin embargo para pruebas de bombeo constituye un aspecto importante (Kreusemann, 1998) únicamente durante los primeros instantes en que comienza la extracción de líquido por bombeo (se recibirá agua en el pozo por la descompresión del fluido y del medio poroso) y que luego este fenómeno se disipa rápidamente y el agua comienza a fluir desde el almacenamiento proveniente de las zonas inmediatas al pozo practicado. De esta manera el lecho del río actúa, básicamente, como si fuera una tubería transmisora de caudal.

La descompresión del medio poroso del acuífero es cuantificada en términos de un cambio de volumen inducido por un cambio en la presión:

$$\alpha = \frac{-\frac{dV_T}{V_T}}{d\sigma_e}$$

Donde:

V_T : Volumen total de una muestra

$d\sigma_e$: Cambio en esfuerzo efectivo

α : Coeficiente de compresibilidad del medio poroso

La compresibilidad suele ser expresada en m^2/N ó Pa^{-1} . De una forma similar, la compresibilidad del agua es definida como:

$$\beta = \frac{-\frac{dV_w}{V_w}}{dp}$$

en que,

V_w : Volumen del agua

dp : Cambio en la presión de poros

β : Coeficiente de compresibilidad del agua

Un cambio en la presión del agua dp induce un cambio en el volumen V_w para una masa de agua dada. La compresibilidad β del agua subterránea, en el rango de temperaturas que son usualmente encontradas, puede ser considerada como $4.4 \cdot 10^{-10} m^2/N$ (Kreusemann, 1998)

Transmisividad (KD ó T)

La transmisividad es la multiplicación de la conductividad hidráulica (promedio) K por el espesor de la capa saturada del acuífero D . Consecuentemente, transmisividad es la relación de flujo por unidad de gradiente hidráulico, a través de una sección de unidad de espesor sobre la capa saturada del acuífero. Con frecuencia, la transmisividad es usada como parámetro para describir a un acuífero libre antes que a un confinado, en tal caso la transmisividad llega a ser,

$T = \frac{1}{2}(h_1 + h_0) \cdot K$ donde h_1 y h_0 son las alturas de presión en los extremos de un acuífero no confinado.

La transmisividad efectiva, para medios fracturados, es definida como:

$$T = \sqrt{T_{f(x)}T_{f(y)}}$$

en que, f se refiere a las fracturas en dirección x ó y.

Producción específica (S_y)

La producción específica es el volumen de agua que un acuífero no confinado descarga del almacenamiento por unidad de área del acuífero por unidad de caída de carga hidráulica. Los valores de la producción específica tienen un rango de 0.01 a 0.3 y son mucho mayores que el almacenamiento para acuíferos confinados. En el diseño de galerías filtrantes, el efecto de la elasticidad del acuífero y del agua son generalmente muy pequeños, y por ello es que el subálveo actúa como simple conductor del agua.

La producción específica es algunas veces llamada porosidad efectiva, almacenamiento no confinado, o espacio de poros drenables. Los pequeños intersticios no contribuyen a la porosidad efectiva porque las fuerzas de retención en ellos son mayores que el peso del agua. Algo que debe tenerse también en cuenta es que el agua solo puede moverse a través de poros que están interconectados. Rocas duras pueden contener numerosos poros no conectados en los cuales el agua queda estancada. La Tabla 4.2 muestra valores de la producción específica:

Tabla 4.2 Valores típicos de la producción específica S_y

MATERIAL	S_y
Arcilla	0.02
Arcilla arenosa	0.07
Limo	0.18
Arena fina	0.21
Arena mediana	0.26
Arena gruesa	0.27
Arena gravoas	0.25
Grava fina	0.25
Grava mediana	0.23
Grava gruesa	0.22

Fuente: Fetter C. W (1988)

Porosidad (n)

Es el cociente entre el volumen de vacíos frente al volumen total de una muestra de suelo o roca. Se suele expresar en fracción decimal o porcentaje. En rocas se suele distinguir una porosidad secundaria debida al fracturamiento que ellas pudieran tener. La Tabla 4. 3 muestra valores típicos de porosidad.

Tabla 4. 3 Valores típicos de la porosidad

MATERIAL	POROSIDAD PRIMARIA	POROSIDAD SECUNDARIA
Grava	0.2 – 0.4	-
Arena	0.25 – 0.55	-
Limo	0.35 – 0.6	-
Arcilla	0.35 – 0.65	-
Limolita	0.1	0.1
Arenisca	0.1	0.01
Granito	-	0.001
Basalto	0.1	0.01

Fuente : Charbeneau R. (2000)

Conductividad Hidráulica (K)

Es definido como el parámetro de proporcionalidad entre el caudal subterráneo obtenido por unidad de área transversal al flujo, y por unidad de diferencia de potencial en dirección al sentido de flujo.

$$K = \frac{Q/A}{dh/ds}$$

en que,

Q/A : es el caudal subterráneo por unidad de área

dh/ds : el gradiente hidráulico que ocasiona el movimiento de agua

Las unidades de la conductividad hidráulica son las mismas que la velocidad [L/T]. La conductividad hidráulica depende de las características del medio poroso y de las del propio fluido K se expresa de esa forma en:

$$K = \frac{k g}{\nu}$$

siendo,

k : la permeabilidad intrínseca que tiene el medio poroso

g : la gravedad

u : la viscosidad cinemática del fluido (por ejemplo, $1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ a $10 \text{ }^\circ\text{C}$)

La conductividad hidráulica es uno de los parámetros más importantes que describen la dinámica de flujo subterráneo; una buena determinación de su valor conduce a correctas apreciaciones del caudal aprovechable. Sin embargo, esa determinación es una de las labores más difíciles de realizar.

Por ejemplo, Fetter (1978) identifica una variación de trece órdenes de magnitud para la conductividad hidráulica tal como muestra la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Valores de la permeabilidad intrínseca y la conductividad hidráulica (Fetter, 1978)

MATERIAL	Permeabilidad Intrínseca (darcy)	Conductividad Hidráulica (cm/s)
Arcilla	$10^{-6} - 10^{-3}$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Limo, limo arenoso	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Arena limosa, arena fina	$10^{-2} - 1$	$10^{-5} - 10^{-3}$
Arenas bien gradadas	$1 - 10^2$	$10^{-3} - 10^{-1}$
Gravas bien gradadas	$10 - 10^3$	$10^{-2} - 1$

Esta variación es atribuida a la propia heterogeneidad que tiene la naturaleza. Por ejemplo, la conductividad hidráulica no es solo diferente para diversos tipos de suelo, si no que puede ser diferente de un lugar a otro en el mismo suelo o roca, o puede variar según la dirección: existir usualmente una K en dirección horizontal diez veces mayor en magnitud a una K en vertical. Esta reconocida anisotropía induce a calcular direcciones principales de la conductividad hidráulica regionalizada, y la mejor manera para ello es recurrir a pruebas de bombeo

4.2. ECUACIONES QUE DESCRIBEN EL FLUJO SUBTERRÁNEO

Este epígrafe presenta un enfoque para describir el flujo subterráneo efectuando una analogía con el que ocurre a lo largo de una tubería a presión, pues en ambos casos ya sea el subálveo de un río como la tubería tiene misión de conducir el agua. También se acompaña una sucinta presentación de la representación matemática del flujo.

El movimiento del agua en un medio poroso saturado es descrito con una similar estructura de ecuaciones, que si el agua estuviera moviéndose a lo largo de una tubería. Esta semejanza resulta en una ventaja porque permite deducir, comparar y explicar la dinámica del agua subterránea dirigiéndose hacia una galería filtrante.

ECUACIÓN DE MOVIMIENTO

Cuando un líquido está en movimiento, parte de su energía es invertida en mantener el flujo. Este aserto resalta el hecho de que durante ese movimiento (ya sea a lo largo de una tubería, un medio poroso, un río, etc.), una fracción de la energía del fluido es disipada por efecto de la fricción (contra las paredes del conducto, fricción interna: turbulencia, estrechamiento de las líneas de corriente, tortuosidad de los espacios capilares, etc.).

Cuanta mayor energía se invierta en vencer la resistencia a fluir, menor quedará para movilizar un determinado caudal. Esta descripción halla similitud con el concepto de *Stream Power* en la teoría de transporte de sedimentos, que cuando la velocidad de una corriente disminuye, los sedimentos en suspensión comienzan a ser depositados en el lecho del río.

Desde la hidráulica básica -fundada en la Segunda Ley de Newton- se deriva la ecuación de movimiento de los fluidos (Roberson et al, 1990):

$$\Delta F = \frac{f L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

en que:

ΔF : es la pérdida de energía debida al movimiento del fluido

L : longitud del tramo en consideración

D : una longitud característica como el diámetro de la tubería

$\frac{v^2}{2g}$: altura de velocidad

f : coeficiente de Darcy – Weisbach que caracteriza al fluido, flujo y que describe la geometría de la conducción y su rugosidad

Si la velocidad se expresa en términos del caudal y los términos f , A , D , y la gravedad se condensan en un nuevo término R , la ecuación será,

$$R = \frac{8f}{\pi^2 g D^5}$$

y generalizando la ecuación original queda,

$$\frac{\Delta F}{L} = R Q^a$$

siendo a un exponente típico de la zona de flujo: a es igual a 2 para flujo turbulento, e igual a 1 en flujo laminar, movimiento que corresponde al que ocurren en el subsuelo.

Cuando a sea igual a 1, eventualmente se podría despejar el caudal,

$$Q = \frac{1}{R} \frac{\Delta F}{L} \equiv k \frac{\Delta h}{L}$$

Una similar expresión a la anterior fue encontrada por Henry Darcy a mediados del siglo dieciocho (Sinniger, 1989) cuando abordaba el problema de suministro de agua a la ciudad de Dijon estudiando el paso de agua a través de filtros de arena:

$$Q = k A \frac{\Delta h}{L}$$

k es la permeabilidad del material, A el área de filtro de arena que resulta perpendicular al flujo, Dh la diferencia de energía entre extremos que ocasiona que el caudal Q se mueva a través del espesor L de filtro.

La similitud entre esta última ecuación y la que describe el movimiento en tuberías remarca el concepto de que un medio poroso es un conducto transmisor de agua desde el punto de recarga hasta el punto de descarga.

Esa propiedad de facilidad de transmisión (conductividad hidráulica K) resulta ser el recíproco de la resistencia (R) que ofrecen las tuberías al paso del agua.

El trabajo de Darcy fue posteriormente formalizado matemáticamente introduciendo el concepto de flux (Fetter, 1989):

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial s}$$

en que, q es el flux del movimiento del agua subterránea, K la indicada conductividad hidráulica y $\frac{\partial h}{\partial s}$ el gradiente hidráulico o pendiente de la línea de energía en un punto dado. El signo negativo indica que el gradiente disminuye según el sentido del flujo.

Dos elementos amplían el alcance de la ecuación anterior:

- *Homogeneidad y heterogeneidad*: que es el reconocimiento a la historia geológica de la zona y la actividad desarrollada (tectonismo, erosión hídrica y eólica) para la formación de las rocas y suelos (suelos transportados y residuales, bolones, gravas, arenas, limos, arcillas) sin que exista un patrón de distribución espacial particular. Ello redundaría en que se tenga una conductividad hidráulica diferente para cada punto del terreno bajo análisis (heterogeneidad)
- *Isotropía y anisotropía*: por la naturaleza de los materiales (formas redondeadas, angulosas, laminadas) y su disposición en que se presentan (estratificación, formando horizontes, lentes, etc.), es frecuente que el agua tenga mayor facilidad para desplazarse horizontalmente (acuíferos) antes que verticalmente (acuicludos): anisotropía. Incluso, en un lecho aluvial pueden reconocerse claramente capas de material fino (limos con arenas) y gravas originadas por los procesos morfológicos que se desarrollan en el río (anisotropía)

Ambos aspectos son incorporados para el análisis por medio de la conductividad hidráulica. Ya no se la considera como un solo valor que describe a toda una región, si no como un tensor con diferentes valores en cada dirección posible de flujo (Zijl, 1993). Con ello, la ecuación de movimiento queda:

$$[q] = - \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial h / \partial x \\ \partial h / \partial y \\ \partial h / \partial z \end{bmatrix}$$

Si el sistema de referencia del problema se orientase convenientemente (direcciones principales de anisotropía de la conductividad hidráulica), la ecuación se reduce a:

$$\bar{q} = - [K] \bar{\nabla} h$$

ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

Si la aproximación de *continuum* (Hirsch, 1988) y el Principio de Conservación de la Masa son aplicables a un elemento diferencial en el medio poroso por el que fluye un líquido, se dirá que un cambio neto en masa de fluido, es igual al volumen de líquido almacenado durante un cierto intervalo de tiempo, en el acuífero:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$$

en que q_x , q_y , q_z son las componentes del flux en cada dirección; θ el contenido volumétrico de humedad en la muestra de suelo.

Combinando las ecuaciones de Movimiento y Continuidad,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla (K \nabla h)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right)$$

que es conocida como la ecuación de Richards; y es la altura de presión $\frac{p}{\gamma}$ en que se nota la dependencia de la conductividad hidráulica según se halle en medio saturado o no-saturado. Esta ecuación describe el flujo subterráneo tridimensional más general, pero a la vez, más exigente en información.

Si el flujo es permanente y el medio poroso está saturado, la ecuación de Richards se reduce a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

siendo K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} las direcciones principales de anisotropía de la conductividad hidráulica. Y si el medio es homogéneo e isotrópico,

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

conocida como la ecuación de Laplace, que se transforma según el caso a:

$$\text{bi-dimensional : } \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

aplicable frecuentemente al flujo de agua a través de presas, flujo hacia pozos e intrusión salina.

$$\text{unidimensional : } \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0$$

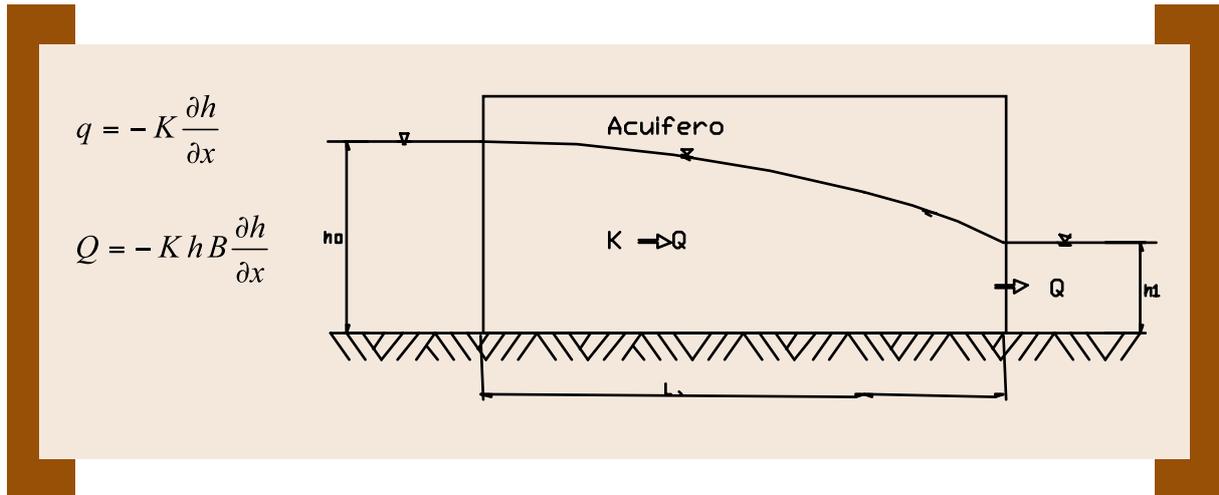
Simplificación aceptable para los casos más sencillos, en que el flujo acontece en una única dirección o muy próximo a ello.

La solución de estas ecuaciones diferenciales proporciona la variación de h en todo el dominio del problema. Las ecuaciones anteriores pueden ser abordadas desde la perspectiva de una solución analítica que existe para los casos más simples, desde un método gráfico que resuelve el problema trazando una intuitiva red de flujo (curvas equipotenciales y de líneas flujo), o desde una simulación numérica apelando a técnicas de discretización como son las diferencias o elementos finitos. Esta temática es abordada en forma preliminar en el Anexo 2.

4.3. APROXIMACIÓN AL FLUJO HACIA UNA GALERÍA FILTRANTE

Para los casos en que flujo unidimensional hacia una galería es admisible, la resolución analítica puede utilizarse al menos a nivel de prefactibilidad de un proyecto. Si el flujo en el subálveo de un río dirigiéndose hacia una galería filtrante, puede aceptarse como si fuera unidimensional (hipótesis de Dupuit y Forchheimer) y que el caudal cedido por él –en la franja correspondiente– es igual al captado por la galería (Continuidad), en conjunción con la Ecuación de Movimiento se tendrá:

Fig. 4.2 Esquematización de flujo unidimensional hacia una galería filtrante



Siendo, B el ancho transversal al dibujo (ver Fig. 4.7). El caudal resulta de la simple cuadratura:

$$\int_{x=0}^{x=L} Q dx = -K B \int_{h=h_0}^{h=h_1} h dh$$

resolviendo para el caudal,

$$Q = K \bar{h} B \left(\frac{h_0 - h_1}{L} \right) = T B \left(\frac{h_0 - h_1}{L} \right)$$

con \bar{h} como el espesor promedio del acuífero $\bar{h} = \frac{1}{2}(h_1 + h_0)$, y T la transmisividad como el producto de h y K .

La ecuación que describe la evolución de la napa freática será

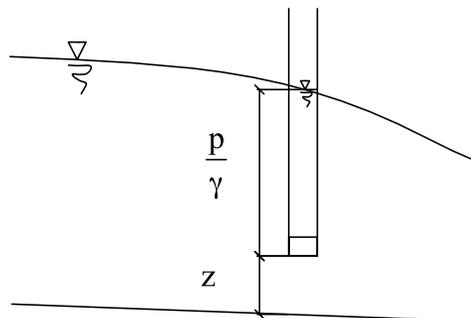
$$h = \sqrt{h_0^2 - \frac{2Q}{KB} x}$$

4.4. ELEMENTOS DE FLUJO SUBTERRÁNEO REGIONAL

Un fluido se mueve en un medio poroso debido a la existencia de una diferencia de potencial (energía) entre extremos. Aunque este movimiento es tridimensional, la mayoría de las veces -como se ha señalado previamente- puede ser reducido su estudio a bi o unidimensional.

En un acuífero no confinado (presencia de la napa freática) la energía del flujo está compuesta por:

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$



En donde:

z : la cota altimétrica.

$\frac{p}{\gamma}$: la altura de presión.

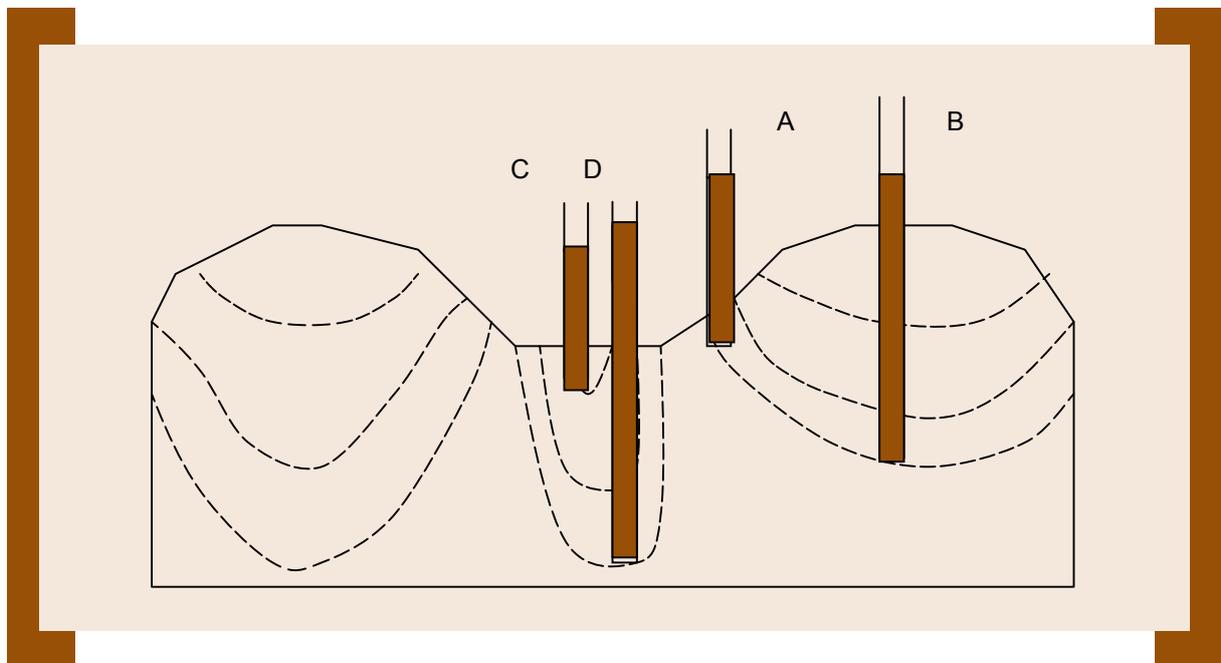
$\frac{v^2}{2g}$: altura de velocidad que en flujo subterráneo es despreciable (flujo laminar con Número de Reynolds inferior a la unidad).

La combinación de z y $\frac{p}{\gamma}$ conforman una potencial.

Cuando una línea equipotencial (igual energía) intercepta a la napa freática, el nivel de agua en un piezómetro coincidirá con la napa freática.

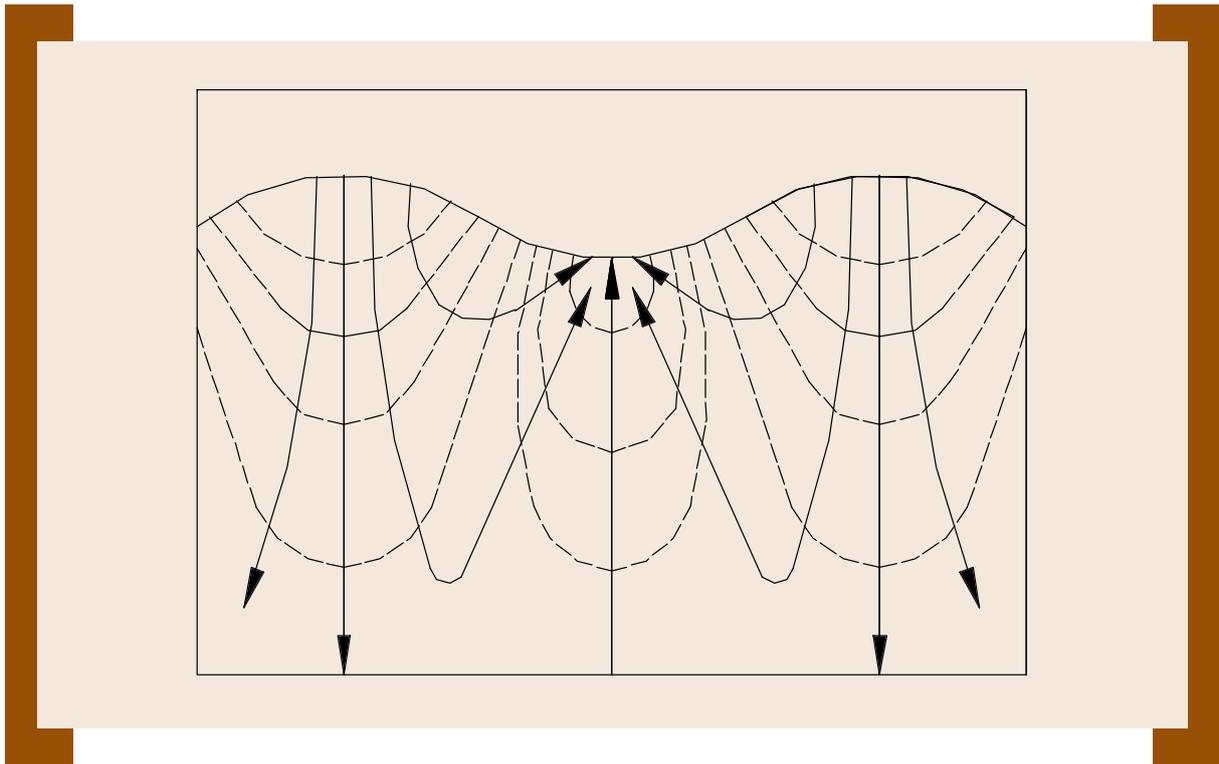
En la Figura 4.3. se han colocado cuatro piezómetros. Los piezómetros A y B están localizados sobre una misma equipotencial, por ello el agua se elevará, dentro ellos hasta la misma horizontal.

Fig. 4.3 El nivel de agua en un piezómetros se levantará hasta igualar la carga hidráulica representada por la energía potencial en el extremo abierto del piezómetro



Si dos piezómetros adyacentes, pero a distintas profundidades, registran niveles de agua diferentes, los piezómetros yacerán sobre distintas equipotenciales. En el caso de la Figura 4.3 el piezómetro D registra el nivel de agua por debajo del piezómetro en B y por ello indica el sentido de flujo: flujo vertical, zona de descarga.

Fig 4.4 Líneas de flujo en el campo de líneas equipotenciales (escala distorsionada)

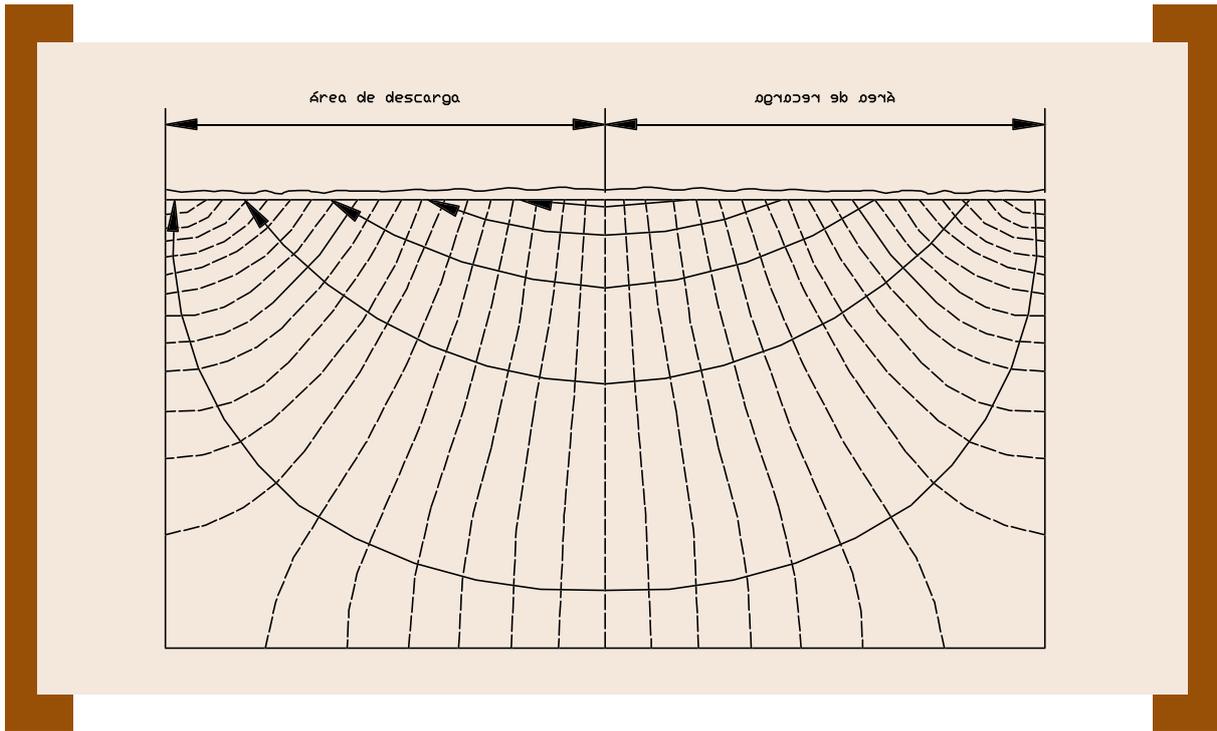


Habiéndose identificado la dirección del flujo en varios puntos en el campo potencial, se pueden dibujar las líneas de corriente que son indicativas de la trayectoria que siguen las partículas de agua al fluir. Si la escala vertical y horizontal en el dibujo son una misma (sin distorsión) y al medio se lo puede considerar como homogéneo e isotrópico, las líneas de corriente se interceptarán perpendicularmente con las equipotenciales como procura mostrar la Fig. 4.4.

En la Fig 4.4, las áreas de mayor prominencia de las napas freáticas representan las divisorias de aguas subterráneas (no flujo), mientras que los valles zonas donde el agua subterránea se concentra (descarga) y forma una corriente superficial como se observó en la formación del flujo subterráneo en los valles de los ríos Tipajara, Mizque, Loro Mayu, etc.

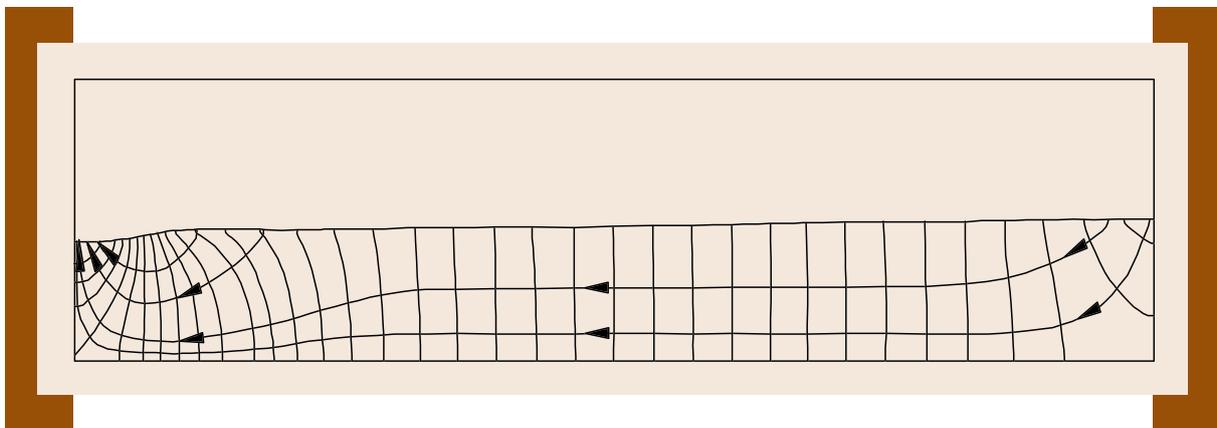
El flujo regional subterráneo puede también provenir no solo de las partes altas, sino también de humedales en un terreno con poco declive. Esta situación es más proclive de presentarse en la zona altiplánica en inmediaciones del sistema hidrográfico endorreico. Unas hipotéticas líneas equipotenciales y las de flujo se observan en la Figura 4.5.

Fig. 4.5 Flujo regional de una zona llana. La napa freática es paralela a la superficie



Sin embargo, la presencia de un pequeño valle, Figura 4.6, llega a controlar el flujo regional como se ha observado en las galerías filtrantes del altiplano orureño.

Fig. 4.6 Flujo regional en una zona llana que es controlado por un río



La determinación formal de las líneas de corriente y equipotenciales se la realiza resolviendo un sistema de ecuaciones diferenciales cuyas variables constituirán las velocidades o fluxes y las energías potenciales. Textos como *Design of Small Dams* del U. S. Bureau of Reclamation, académicos como *Mecánica de Fluidos* de Juárez Badillo o *Geotechnical Engineering* de B. Dass presentan la metodología de cómo trazar las redes de flujo y resolver las ecuaciones mencionadas.

Otro aspecto del flujo regional es que además de la elevación topográfica que caracteriza a las zonas de recarga y descarga, se tiene que:

- En la zona de recarga puede existir una diferencia notable entre la superficie del terreno y la napa freática: zona no saturada.

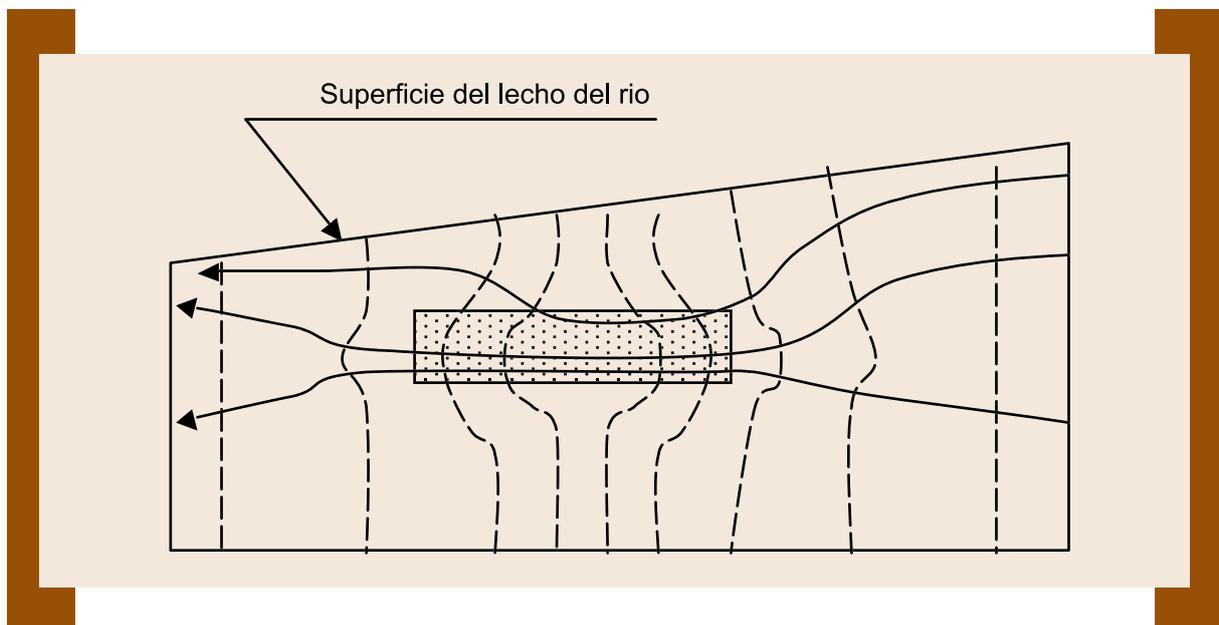
- Inversamente, la zona de descarga tiene cerca -sino aflora- la napa freática y se la puede reconocer por la proliferación de vegetación en el entorno (vertientes, bofedales, pantanales).
- Eventualmente en zonas áridas la descarga puede diluirse en forma de evaporación y transpiración, quedando como testigos de aquellos afloramientos salinos en la superficie.
- En regiones húmedas se puede considerar que la napa freática se mantiene más o menos paralela al relieve topográfico de la superficie. Esta afirmación no es siempre cierta en zonas áridas.

Otros aspectos que permiten correlacionarse son observaciones anómalas en los registros piezométricos con la heterogeneidad de la conductividad hidráulica. La Fig. 4.7 muestra una anomalía producida por la diferencia de conductividades hidráulicas de dos materiales constituyentes del medio poroso.

Se observa una sección transversal en que un lente de grava es rodeado de material fino. La grava actúa como un conducto para el flujo atrayendo un mayor grado de líneas de corriente, aumentando la curvatura de las líneas equipotenciales adyacentes del material fino. De esa forma, el flujo convergerá hacia la zona de alta conductividad en la parte de aguas arriba, y divergirá al salir del lente gravoso.

Esta descripción ilustra la influencia de la presencia de lentes de material grueso en el lecho del río, y del por qué solamente algunas barbacanas cumplirán la función de captación del agua dirigido a la galería filtrante.

Fig. 4.7 Heterogeneidad del medio poroso. Influencia de un lente de grava en el material del lecho del río.



5

CAPÍTULO

APROVECHAMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EN GALERÍAS FILTRANTES, EN UN CONTEXTO MEDIO AMBIENTAL

Este capítulo tiene propósito de efectuar algunas consideraciones relativas a la interacción de una galería filtrante con su entorno: lo que a ella le afecta en términos de calidad de agua captada, y lo que ella induce en las comunidades aguas abajo en términos de extracción del recurso hídrico. No debe entenderse este documento como un procedimiento para realizar una evaluación de impacto ambiental.

5.1. INTRODUCCIÓN

Aunque los aprovechamientos de aguas subterráneas se realizan desde la más remota antigüedad (Mesopotamia, China), la presión sobre ellos se ha ido incrementado en el último siglo por el crecimiento de la población y la mala distribución espacial de esos recursos en el mundo. Esta presión en términos de demanda también se refleja en la degradación de la calidad por el uso múltiple y sucesivo que se le da. Lo adverso es que el impacto sobre la calidad no es detectado inmediatamente como ocurre en las aguas superficiales; si no que cuando uno se percató, la contaminación a los reservorios ya avanzó implicando costosos procedimientos de recuperación y que requieren varios años de tratamiento. Por ello, previo a un aprovechamiento se debe conocer la disponibilidad y las amenazas a él.

En el caso de las galerías filtrantes destinadas a la captación de agua subterráneas, se identifican dos maneras a través de las cuales el aprovechamiento interactúa con su entorno: **calidad** y **cantidad**.

La conceptualización de este capítulo en términos de *calidad*, refleja la posibilidad de que las aguas al ser captadas por la galería puedan estar contaminadas por poluyentes provenientes de las zonas de recarga; mientras que la cantidad esta referida al volumen de agua que es conveniente extraer del subálveo, sin que ello vaya en desmedro de las condiciones ambientales de aguas abajo.

5.2. ETAPAS PROPUESTAS PARA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE UNA GALERÍA FILTRANTE

El proyectista debe formar, objetivamente, una estimación de los elementos que afectan a la existencia y calidad del agua subterránea y el agua superficial en el entorno de la construcción de la obra. A este objeto, se propone realizar la secuencia de etapas que se detallan en la Tabla 5.1.

5.2.1. Descripción del entorno

Como primera etapa en el estudio, se debe conocer las condiciones hidrogeológicas de la zona: geología y estratificación, piezometría regional y conductividad hidráulica global. Esta información figura en mapas hidrogeológicos elaborados por SERGEOMIN para diversas zonas del país.

Asimismo, la identificación de las zonas que son fuente para el río (vertientes, una red de drenaje en la cuenca, etc.) y las distancia a la que ellas están. También la relación que existe entre las aguas superficiales (río) y la del subálveo: régimen de precipitación, variación mensual de caudales y tirantes; procesos morfológicos que ocurren, etc.(ver numeral 4.2 y 4.3).

Estos tres aspectos deberán ser expresados en términos de calidad de agua como fuentes de polución a las aguas del río, actividades antropogénicas que se desarrollan, prácticas culturales, etc. En términos de extracciones por otros aprovechamientos tanto superficiales como subterráneas que se llevan a cabo antes y después del futuro emplazamiento de la obra.

5.2.2. Legislación Ambiental

La Ley de Medio Ambiente y sus Reglamentos establecen para el país consideraciones sobre el aprovechamiento y conservación de las aguas en general, sobre las entidades que son encargadas y responsables por el monitoreo y control de la calidad. Específicamente debe tenerse en cuenta,

- **Art. 20**, sobre las actividades que alteran la diversidad biológica y ecológica
- **Art. 24 y 26** sobre la necesidad de una evaluación de impacto ambiental para el proyecto
- **Art. 37 y 38** sobre el uso planificado de los recursos hídricos que el Estado realiza
- **Art. 39**, sobre la responsabilidad de no degradación de la calidad del agua
- **Art. 76**, referido a la compatibilidad del Proyecto con los planes municipales de la región
- **Art. 99 al 104**, la descripción de los que son calificados como delitos ambientales
- **Art. 105 al 108**, la penalización por deterioro de la calidad del agua, interrupción del servicio para consumo humano o riego. Lo señalado por el Reglamento de Contaminación Hídrica
- **Art. 4 al 6**, sobre clasificación de los cuerpos de agua con relación a su aptitud para el uso y los parámetros máximos permitidos en ellos.
- **Art. 35 al 50**, sobre los procedimientos a realizar en caso de contaminación difusa o puntual (fertilizantes, drenaje, riego, derrame de hidrocarburos, etc.)
- **Art. 48**, referida a los volúmenes de agua permitidos de captación de un río
- **Art. 63**, sobre la necesidad de elaborar una Declaratoria de Impacto Ambiental para casos en que el aprovechamiento afecte a los niveles freáticos que produzcan empantanamiento o salinización. Lo establecido por el Reglamento de Gestión Ambiental
- **Art. 22**, sobre el deber de todo ciudadano de informar a la autoridad ambiental competente sobre actividades que afecten al medio ambiente
- **Art. 53 al 58**, de los instrumentos de regulación ambiental necesarios de elaborar (ficha ambiental, declaratoria de impactos, manifiestos, auditorías ambientales, etc.)
- **Art. 78 al 78**, de la participación ciudadana en los procesos de decisión particular

Tabla 5.1 SECUENCIA DE ETAPAS EN LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO POR UTILIZAR GALERÍAS FILTRANTES

1.- DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO EN LA GALERIA:	
* Características hidrogeológicas	
* Zonas de recarga	
* Relación aguas superficiales - aguas subterráneas	
EN TÉRMINOS DE CALIDAD	EN TÉRMINOS DE CANTIDAD
* Calidad de las aguas subterráneas	* Usos del agua subterránea por otros sistemas de riego
* Fuentes de contaminación	* Extracciones en la zona para otros usos
* Cargas contaminantes	
2.- LEGISLACIÓN AMBIENTAL	
Considerar, sin ser limitativo, lo establecido por la Ley de Medio Ambiente	
* Ley 1333 (Art. 20°, 24°, 26°, 37°, 38°, 39°, 76°, 78°, 99° al 112°)	
* Reglamento Contaminación Hídrica (Art. 4°, 5°, 6°, 14°, 16°; 34°-50°; 63°-66°)	
* Reglamento de Gestión Ambiental (Art. 22°, 53°-58°, 77°-78°)	
3.- PREDICCIÓN DEL IMPACTO	
Requisito necesario:	Conocer los procesos fundamentales que se desarrollan en el medio subterráneo (hidrodinámicos, abióticos, bióticos)
Objetivo:	para deducir: * Donde se pueden producir impactos que afecten a la calidad y cantidad de agua subterránea captada por la galería * Alcance de esos impactos (en tiempo y espacio)
Utilización de herramientas de predicción:	* Cualitativas por comparación con sistemas de riego similares en el área o por experiencia de expertos en la temática * Herramientas cuantitativas de simulación de causa-efecto
EN TÉRMINOS DE CALIDAD	EN TÉRMINOS DE CANTIDAD
- Registros de calidad de agua y sus tendencias en el tiempo	- Balance Hídrico
- Aplicación de métodos paramétricos para evaluar la vulnerabilidad del subálveo del río y acuífero	- Simulación matemática y software especializado

5.2.3. Predicción del Impacto

Esta etapa tiene el propósito de identificar e inferir el alcance de los impactos que afecten a la calidad y cantidad de agua en el subálveo.

Una de las maneras para evaluar el impacto sobre las aguas subterráneas puede realizarse a través de un estudio de vulnerabilidad del subálveo del río (Environmental Protection Agency EPA, 1987) que considera:

- Profundidad de la napa freática
- Permeabilidad de la zona no saturada
- Transmisividad del subálveo
- Cargas contaminantes.

El impacto en términos de cantidad de agua en el subálveo, ya no disponible aguas abajo, puede estimarse aplicando métodos analíticos (unidimensionales Dupit-Forchhaimer, bidimensionales gráficos como ecuación de Laplace, o numéricos tridimensionales ejemplo de MODFLOW, disponible de acceso irrestricto en paginas web del US Geological Survey)

Con lo expuesto, surgen dos preguntas que deberá estudiarse en el Proyecto:

¿ Cuanta agua subterránea se **puede** extraer?

¿ Cuanta agua subterránea se **debe** extraer?

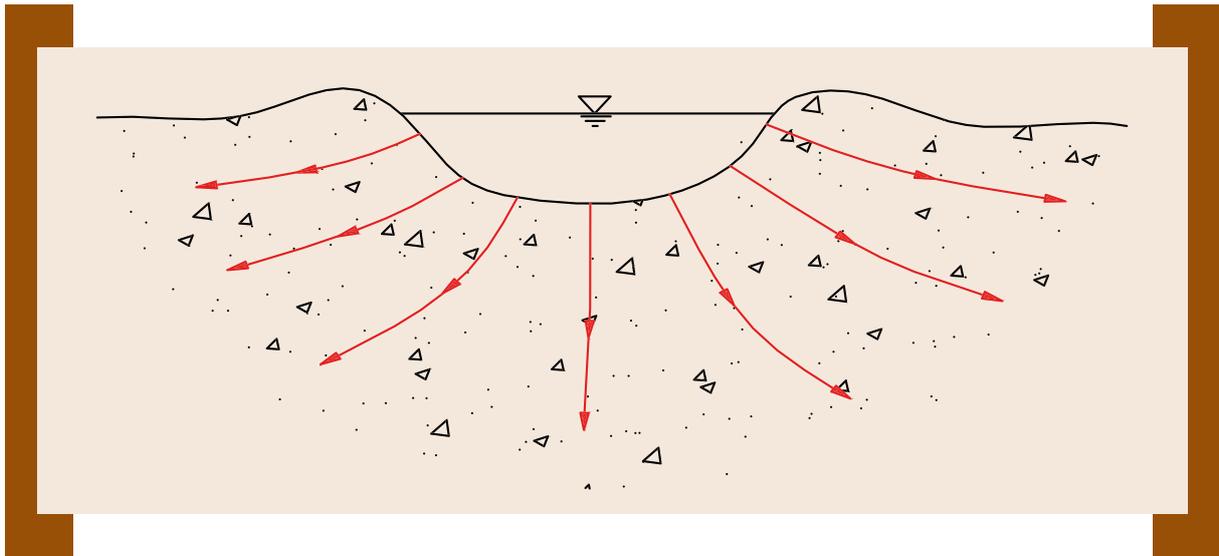
En todo caso, la respuesta estará orientada por un compromiso que debe asumir el técnico proyectista sustentado en una gestión ambiental en materia de contaminación hídrica y una gestión campesina que limita o restringe los volúmenes extraíbles del subálveo.

ELEMENTOS PARA CONSIDERAR CUANTA AGUA EXTRAER

Un elemento que puede dar pauta en la toma de decisión de la profundidad a la que debe implantarse una galería, es el estudio de la dinámica del subálveo cuando existe escalonamiento de galerías en el río:

- Cuando un río discurre encajonado por los flancos rocosos de sus orillas, el subálveo se comportará como una tubería transportando el agua subterránea. Este encajonamiento da la oportunidad a que incluso toda el agua sea captada.
- Pero si el río desarrolla su curso sobre una amplia llanura aluvial, formada por él durante el tiempo geológico, el flujo en el subálveo puede asemejarse a la dinámica que tienen las aguas superficiales en un río de llano: efecto de almacenamiento.

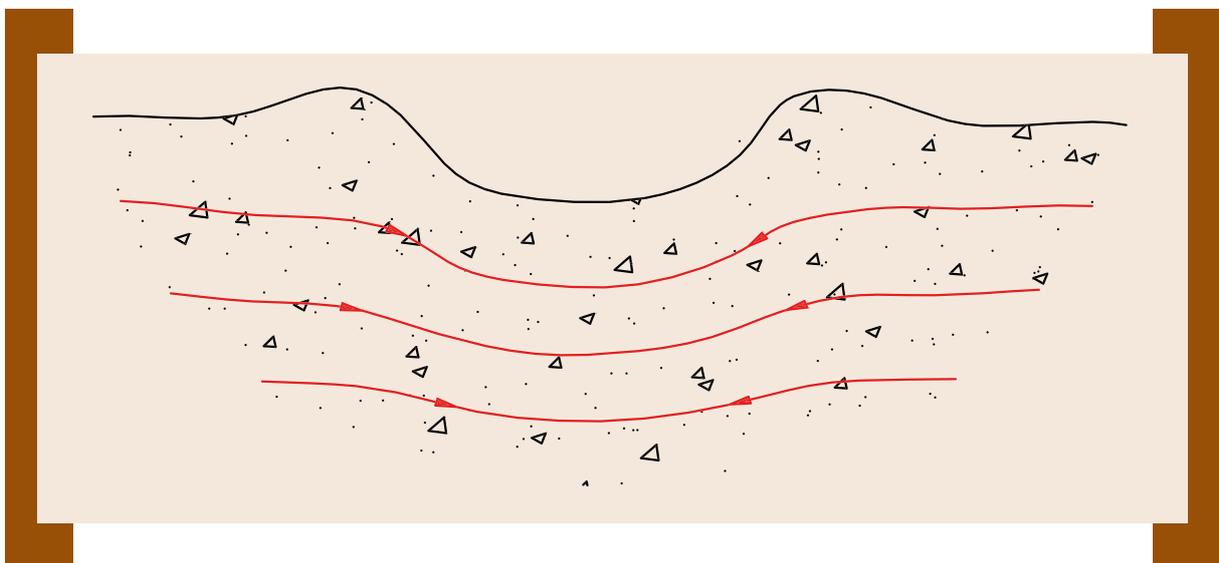
Fig. 5.1 Recarga desde el río al material aluvial circundante en época de aguas altas



- Durante época de aguas bajas, el curso del río se restringe al canal central y profundo, o puede estar absolutamente seco; pero sin embargo aún existe la napa freática formada por la contribución lateral de las zonas inmediatas Fig. 5.2.

Este mismo efecto parece existir después de que una galería filtrante ha extraído parte del caudal del subálveo, aguas abajo de la obra se recibirá una contribución lateral debido al flujo regional que forma un nuevo flujo “base” subterráneo mucho más aguas abajo.

Fig. 5.2 Recarga desde el material aluvial para formar un caudal subterráneo base, durante aguas bajas



Este vaivén del agua subterránea (flujo y refluo lateral) es principio de explicación -también- del caudal de captación que se tiene en galerías filtrantes escalonadas en un río. Una aproximación cuantitativa al estudio de este efecto puede realizarse utilizando modelos matemáticos tridimensionales.

6

CAPÍTULO

CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE GALERÍAS FILTRANTES

Este capítulo tiene el propósito de mostrar los resultados del trabajo de campo y de gabinete realizados durante la investigación. El capítulo está organizado presentando inicialmente la información necesaria a ser recolectada para el diseño, seguidamente se presentan los criterios de ubicación en vertical como en planta de una galería, posteriormente se hace referencia a las configuraciones particulares y criterios para el diseño de los elementos componentes de la obra.

6.1. INFORMACIÓN REQUERIDA

Este acápite se constituye en una recomendación sobre el recojo de información de campo y generación en gabinete, que permitirá disponer de elementos y criterios para un buen diseño de galerías filtrantes. Lo detallado inmediatamente no es exhaustivo, y siempre el proyectista añadirá mayor información según las necesidades particulares de cada zona y requerimiento asociado.

A través de información recogida **en visitas de campo y de otras fuentes** debe conocerse:

- La geomorfología de la cuenca originadora del flujo subterráneo: localización de la divisoria de aguas superficiales y subterráneas, área de la cuenca y su pendiente, la red de drenaje y su clasificación; uso de suelo y cobertura vegetal; información climática especialmente registros mensuales de precipitación, evaporación, radiación solar, dirección de viento, etc; geología e hidrogeología de la cuenca y del sitio donde se efectuará la captación subterránea. Acopio de mapas del Instituto Geográfico Militar a escala conveniente y en lo posible fotos satelitales. La razón de cada elemento detallado, es explicado y justificado en los capítulos 5 y 6.
- Morfología del río: Identificación de los procesos de erosión y sedimentación, formas del lecho del río, posibilidad de que el río esté en régimen (equilibrio de procesos de degradación y agradación – Chang 1988); naturaleza de los flancos del curso del río (ej.): llanura aluvial, orillas con presencia de afloramientos rocosos, etc.), clasificación granulométrica visual del material conformante del lecho, presencia de gaviones u otras estructuras de control en horizontal y vertical, registros de caudales superficiales en el río, etc.
- Otros aprovechamientos superficiales y subterráneos en el área de interés. Recopilación, mediante entrevistas, del desempeño-eficiencia de otros proyectos ejecutados.

También es necesario que el proyecto genere su propia información sobre los aspectos que se detallan en los puntos posteriores.

6.1.1. Aforos de caudales superficiales

El conocer la hidráulica del río es muy importante. A partir de él se podrá deducir:

- permanencia de niveles freáticos en el subálveo
- realizar balance hídricos superficiales y subterráneos

Si existieran registros históricos de caudales y precipitaciones mensuales y anuales, luego de un análisis de consistencia, se podrán investigar tendencias en el tiempo (decrecimientos o crecimientos por efectos climáticos regionales o cambios del uso de suelo en la cuenca y cobertura vegetal) que darán pauta para el futuro aprovechamiento por la galería.

En caso de no existir esos registros, es importante que se los realice definiendo una sección en el río para aforos. Aunque por limitaciones de recursos económicos al inicio de la idea-proyecto quizá no sea permitido constituir una estación formal, pero al menos efectuar un levantamiento topográfico de una sección del río y montar una regla limnimétrica para lecturas diarias que quede a cargo de los futuros usuarios.

Reconociendo marcas dejadas por el río durante avenidas, se puede controlar los resultados de modelos hidrológicos que generen caudales a partir de la precipitación caída en la cuenca. Esta información de caudales generados será aplicable a balances hídricos para cuantificar el potencial brindado por el río en términos de flujo a través del subálveo.

6.1.2. Análisis Granulométrico

En el marco del diseño de galerías filtrantes, dos propósitos inducen a que se realicen ensayos de granulometría:

- Determinación de la porosidad del subálveo
- Curva granulométrica del lecho.

La primera está vinculada con requerimientos de modelación matemática (ver Anexo 2, Boonstra - 1981) e inferencia de la permeabilidad del material granular.

La segunda vinculada a inferir la conductividad hidráulica a partir de la forma de la curva granulometría (d_{10} , d_{15} , d_{50}). Sin embargo, estas relaciones empíricas tienen limitado uso y no son recomendadas sino es para estudios muy preliminares. Bajo ese entendido acá figuran.

Fórmula de Allen Hazen (Fetter, 1988):

$$K = C D_{10}^2$$

en que el coeficiente C es dependiente del material como lo muestra la Tabla 6.1

Tabla 6.1 Valores del coeficiente C según Hazen para hallar la conductividad hidráulica

Material del subálveo	Coficiente C
Arena fina mal gradada	40 – 80
Arena fina con muchos finos	40 – 80
Arena mediana, bien gradada	80 – 120
Arena gruesa, pobremente gradada	80 – 120
Arena gruesa, bien grada y limpia	120 – 150

ó la de experiencias de Zamarin (Kisielov, 1972):

$$K = 8.07 \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot c_p \cdot \tau \cdot d^2$$

c_p	0.757	0.703	0.656	0.608	0.562	0.518	0.476	0.435	0.397	0.36	0.342
N	0.27	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37	0.39	0.41	0.43	0.45	0.46

T_i	0	5	8	10	12	15	17	20	23	25	29
τ	0.585	0.698	0.866	0.807	0.854	0.926	0.975	1.052	1.131	1.180	2.231

Siendo:

- n: porosidad.
- c_p, τ : dos parámetros de la fórmula.
- T_i : la temperatura del agua en grados centígrados.
- d : diámetro efectivo de la muestra de suelo en [mm].
- K : la conductividad hidráulica en [cm/s].

6.1.3. Sondeos geoeléctricos

Tienen la misión de determinar la composición litológica del subálveo del río. Este ensayo reportará:

- Profundidad de la roca en el subálveo
- Identificación, naturaleza y profundidad de las capas constituyentes del subálveo.

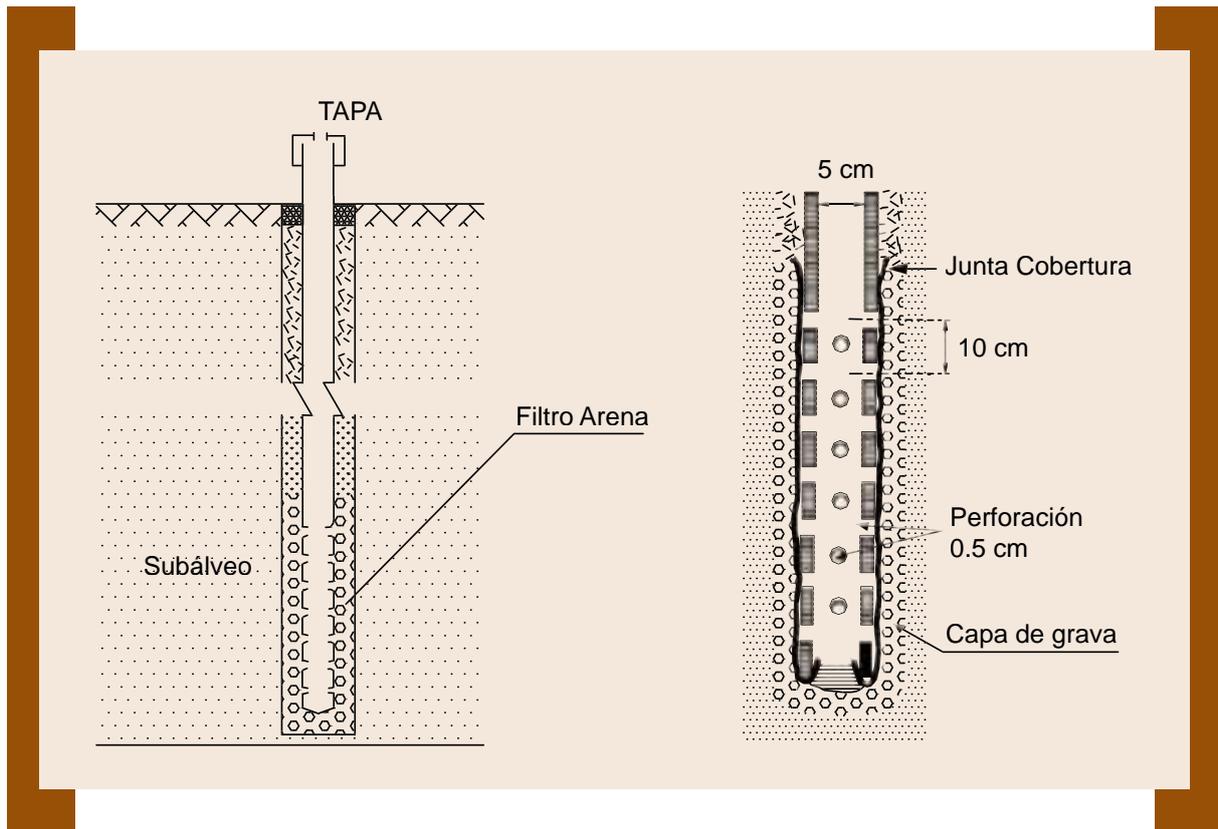
Con esta información se conocerá un límite para el emplazamiento en vertical de la galería (ver numeral); así como si la hipótesis de estrato homogéneo e isotrópico es válido. A partir de estos ensayos de sondeos geoeléctricos se puede inferir un valor para la conductividad hidráulica del subálveo.

Se debe procurar que los sondeos se realicen de manera que se obtenga información bajo el eje del futuro emplazamiento de la galería, así como el transcurso de la roca madre en dirección del eje longitudinal. También será útil para inferir la profundidad del nivel freático e incluso si el agua es dulce o salina.

6.1.4. Instalación de piezómetros

Esta es una de las actividades de campo más importante a ser realizada cuando se va a explotar las aguas subterráneas. Consiste en introducir en el subálveo del río conductos perforados y se pueda registrar la profundidad de la napa freática yacente bajo el lecho del río. Las tuberías utilizadas como piezómetro son las de PVC generalmente de 2" ranuradas o caladas para permitir el ingreso de agua; una envoltura de yute prevendrá del ingreso de material fino a su interior. El espacio anular adyacente debe ser rellenado con grava o arena gruesa, tal como muestra la figura 6.1.

Figura 6.1 Esquema de la disposición y montaje de piezómetros



La instalación de piezómetro debe preceder a cualquier otra actividad, incluso en el instante de la concepción idea – proyecto. Las razones que justifican esta recomendación son:

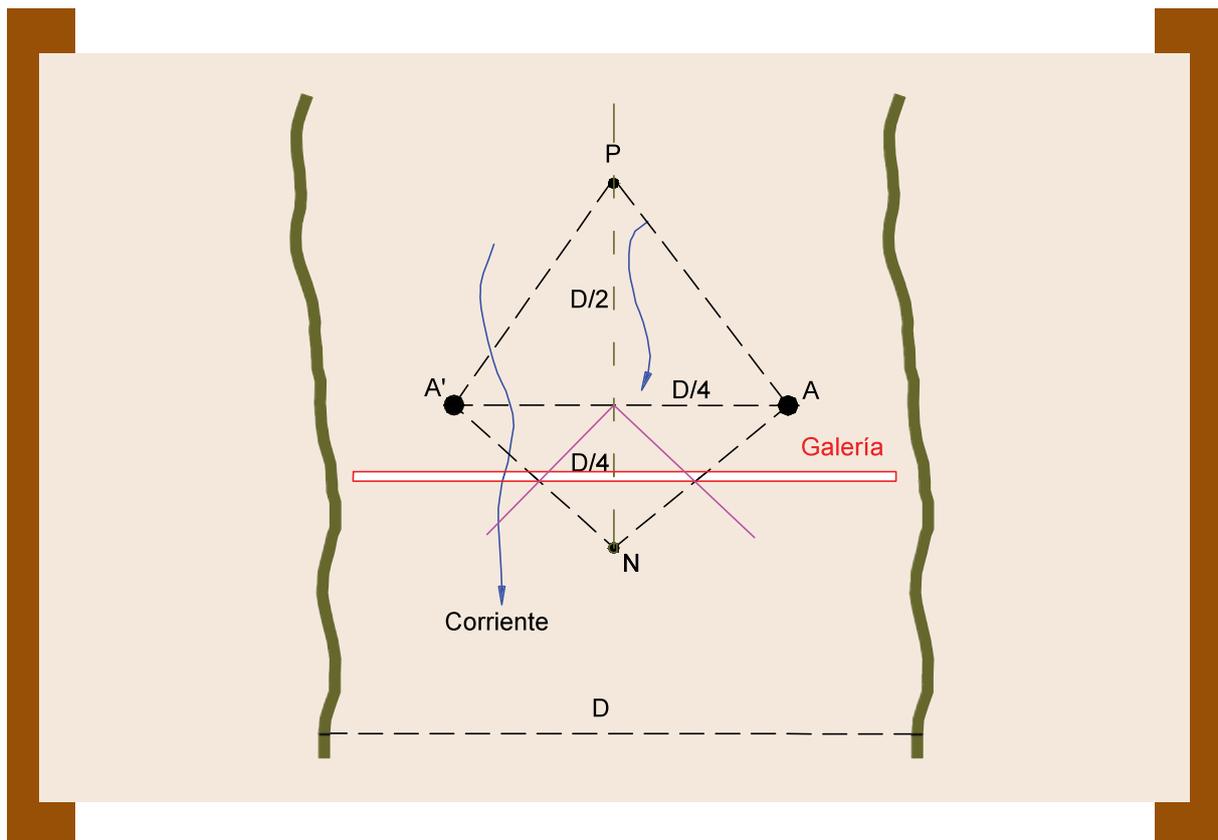
- Determinación de la dirección del flujo subterráneo regional.
- Determinación de la conductividad hidráulica mediante pruebas de bombeo.
- Registro de la fluctuación temporal y espacial de la napa freática.
- Aprovechar la excavación para la extracción de muestras de suelo – calicatas y análisis granulométrico

PIEZÓMETROS Y LA DIRECCIÓN DEL FLUJO

Es importante conocer la dirección regional del flujo subterráneo, especialmente en caso de ríos anchos, para orientar la galería en planta al menor costo y con el mayor rendimiento del subálveo. Este aspecto es analizado ampliamente en los incisos 6.2 y 6.3

La Fig. 6.2 muestra una disposición de piezómetros que permitirá deducir la orientación del flujo regional según la inclinación de la napa freática. Dibujando curvas de igual nivel (curvas equipotenciales) y las perpendiculares trazadas a ellas (líneas de flujo), brindarán la dirección de las líneas de corriente

Figura 6.2 Disposición esquemática de piezómetros para averiguar la dirección de flujo regional



PIEZÓMETROS Y PRUEBAS DE BOMBEO

Para efectuar una prueba de bombeo que permita conocer la conductividad hidráulica, se requiere del apoyo de piezómetros en los que se irá reflejando el cono de abatimiento debido al bombeo. Con los registros de nivel se pueden construir los diagramas.

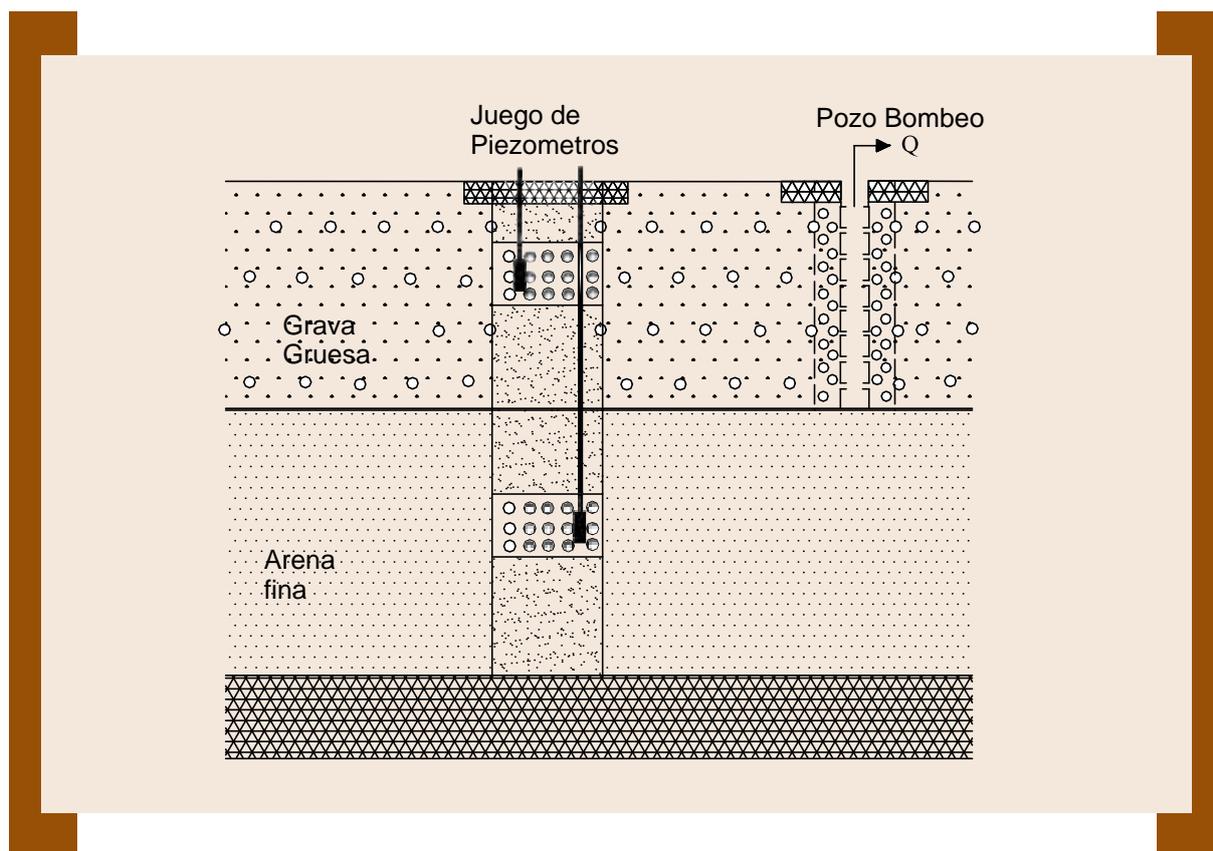
- Tiempo – abatimiento
- Distancia – abatimiento

El número mínimo de piezómetros a instalarse es un compromiso que tiene relación con la precisión (para prueba de bombeo y la dirección del flujo) y el costo. Se recomienda instalar 4 en el lecho y 2 fuera de las orillas del río. Si se disponen de más piezómetros hacia aguas arriba, la distancia a la que se deben emplazar los piezómetros debe seguir un escalamiento logarítmico (Krusemann, 1991) en atención a la forma del cono de abatimiento que se forma por la extracción. Debe recordarse que en el subálveo del río, el flujo hacia el pozo de extracción provendrá del agotamiento de la napa freática antes que de la descompresión por almacenamiento.

Una vez emplazados los piezómetros, debe procederse a georeferenciar uno de ellos y a partir de él, efectuar una nivelación topográfica del resto. También debe tenerse presente que el nivel freático regional puede tener una declinación muy pequeña (tierras llanas, nivel freático casi paralelo), por lo cual las lecturas de nivel deben ser lo más cuidadosamente obtenidas.

Cuando por calicatas, sondeos geoléctricos o geología a detalle se evidencien capas diferentes en el subálveo, puede instalarse en una locación un manojito de piezómetros, como muestra la figura 6.3, llegando cada uno a una capa acuífera diferente.

Figura. 6.3 Disposición de piezómetros cuando las lecturas se deban realizar desde varios estratos



Por lo expuesto, se comprende el rol trascendental que juegan los piezómetros y la ventaja de un costo reducido de adquisición y montaje. En términos generales, demandan: la adquisición de tubería de PVC de 2" a 3", practicar las ranuras a lo largo de 20% de su longitud, la excavación del sitio (6 a 8 jornales de mano de obra no calificada) conformación del empaque de grava y relleno del material excavado. Si la instalación de piezómetros se la realiza durante la época de aguas bajas, puede prescindirse de bombeo, entibado y achicamiento durante la excavación. Una vez instalados los piezómetros se recomienda bombear agua desde el piezómetro para remover partículas finas retenidas en el filtro.

Durante una prueba de bombeo es muy importante el registrar convenientemente los niveles de agua conforme transcurre el tiempo. Sin querer ser definitiva la Tabla 6.2 muestra una sugerencia de intervalos de lectura en una prueba de bombeo de recuperación.

Tabla 6.2 Intervalo de lecturas para el registro de niveles piezométricos durante una prueba de recuperación (Kruseman, 1991)

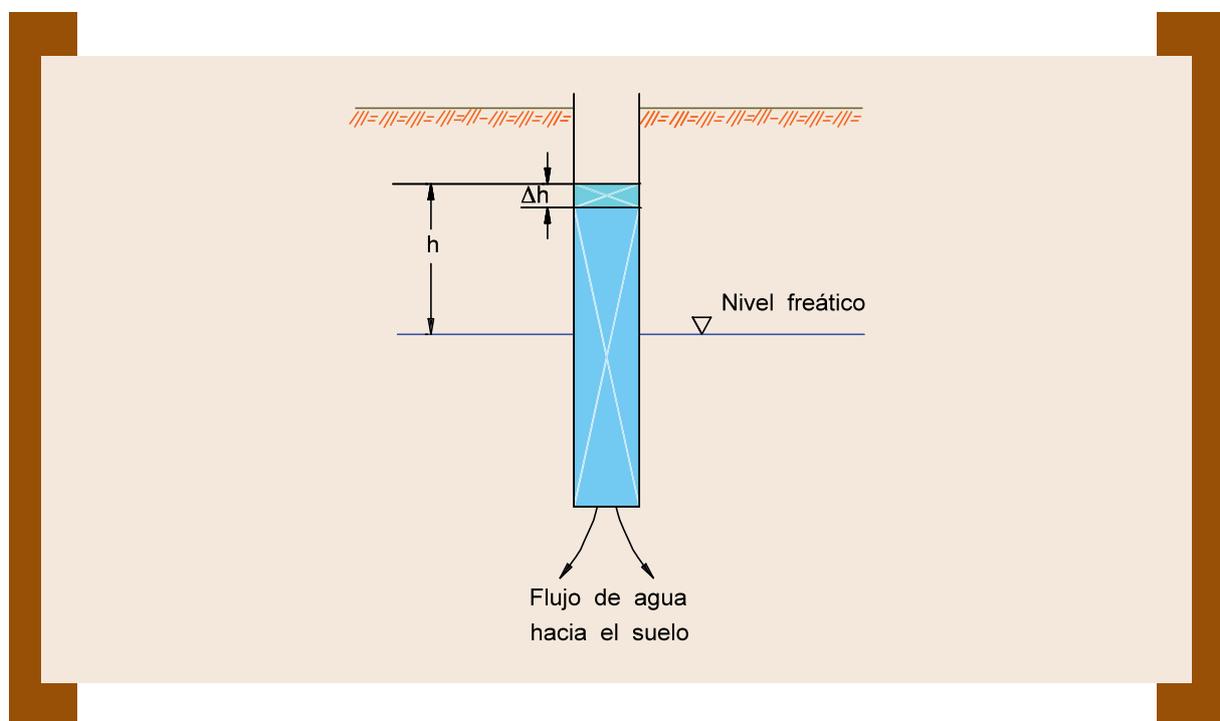
Tiempo desde el encendido de labomba	Intervalo de tiempo
0 – 2 min	10 s
2 – 5	30 s
15 – 100	1 min
100 – 5 hrs	30
5 – 48 hrs	60
48 – 3 días	3 a 1 vez al día

6.1.5. Pruebas de bombeo

La obtención de la conductividad hidráulica se basa en la aplicación de métodos empíricos en función a la granulometría hasta diferentes pruebas de campo en que se mide el ritmo al cual asciende o desciende el nivel de agua en un pozo practicado. A continuación se detallan los métodos más utilizados tomando en consideración el costo, practicabilidad y limitaciones de equipos. En casos de aprovechamientos subterráneos muy importantes, podrá recurrirse a realizar pruebas de bombeo formales (Kruseman, 1991). Una evaluación de resultados de cada método se realizó en base a las pruebas desarrolladas en la galería Río Seco en Tarata. Los resultados bajo los distintos métodos, fueron comparados con los que proporciona una modelación matemática; esta evaluación figura en el Anexo 2.

RECARGA DE ACUÍFERO

Figura 6.4 Medida del coeficiente de permeabilidad mediante pozos con agua (Montemayor, 1979)



La aplicación de este método requiere (ver Fig. 6.4) que la prueba deba iniciarse solamente cuando el flujo quede establecido, es decir, que la masa de suelo alrededor del orificio practicado haya quedado saturada. Esto implica aplicar una buena cantidad de agua, lo que no es siempre fácil de conseguir. También debe tenerse presente que lecturas de nivel de agua resultan particularmente deficientes, especialmente las primeras lecturas en materiales muy permeables (gravas y arenas muy limpias), como consecuencia de la rápida depresión de la napa que ocurre durante los primeros segundos que siguen al cargar el agujero con agua.

La metodología consiste en efectuar una perforación llenándola de agua y midiendo el ritmo o velocidad de infiltración del agua al terreno. La excavación debe realizársela de la mejor manera y que responda a una geometría conocida.

Una variante de este método, consiste en extraer agua de la perforación mediante bombeo observando la velocidad de recuperación de agua desde el subálveo.

La diferencia entre niveles h dentro y fuera de un tubo lleno de agua es objeto de registro, y se determina su merma Dh en un pequeño intervalo de tiempo Dt , por ejemplo, 1, 10 o 30 minutos, dicho intervalo de tiempo depende de la capacidad de recuperación del subálveo.

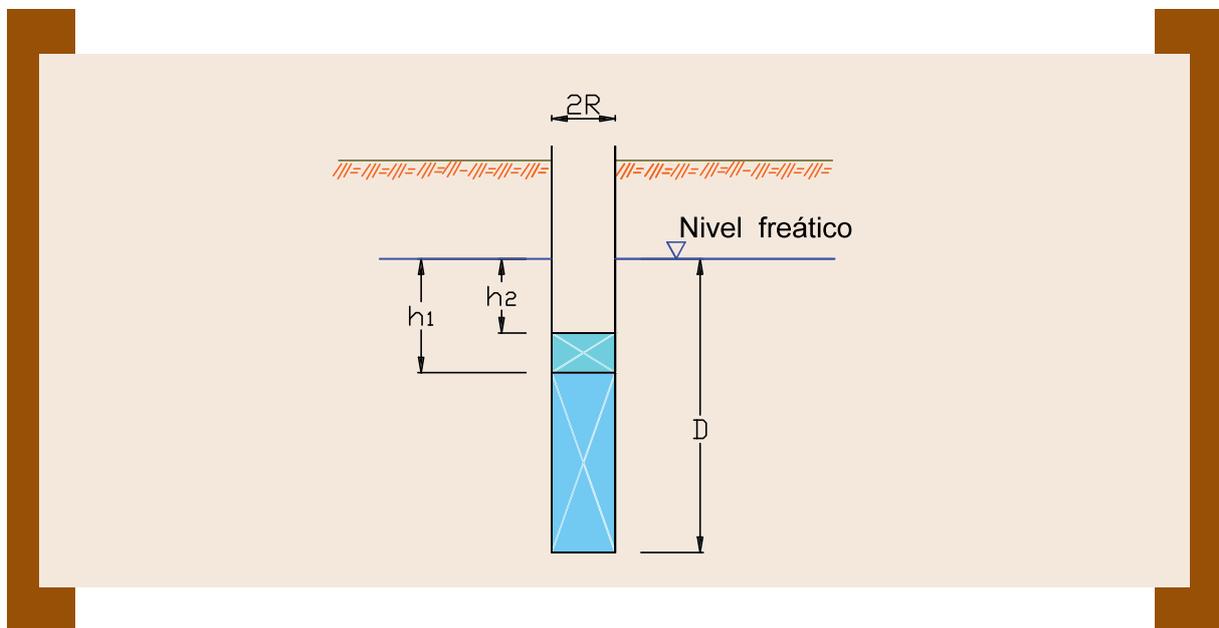
Si el diámetro del tubo es r y la elevación del nivel de las aguas dentro del tubo ha sido de h , durante el tiempo de la medida, el valor del coeficiente de permeabilidad es:

$$k = \frac{r\Delta h}{2h\Delta t}$$

Este método de determinación del coeficiente de permeabilidad, conocido con el nombre de ensayo de "Tubo Abierto", está sujeto a errores a menos que h y t sean muy pequeños y que la relación Dh/Dt se aproxime a la derivada dh/dt .

MÉTODO DE CARGA VARIABLE

Figura 6.5 Esquema del método de carga variable para pozos descubiertos (Cedergren)



Este método es simple y fue desarrollado para perforaciones superficiales (ver Fig. 6.5), y suelos no estratificados, su principal restricción es que la relación.

$$\frac{D}{R} < 50$$

En general la forma de la ecuación es:

$$k = \frac{A (h_2 - h_1)}{F (t_2 - t_1)}$$

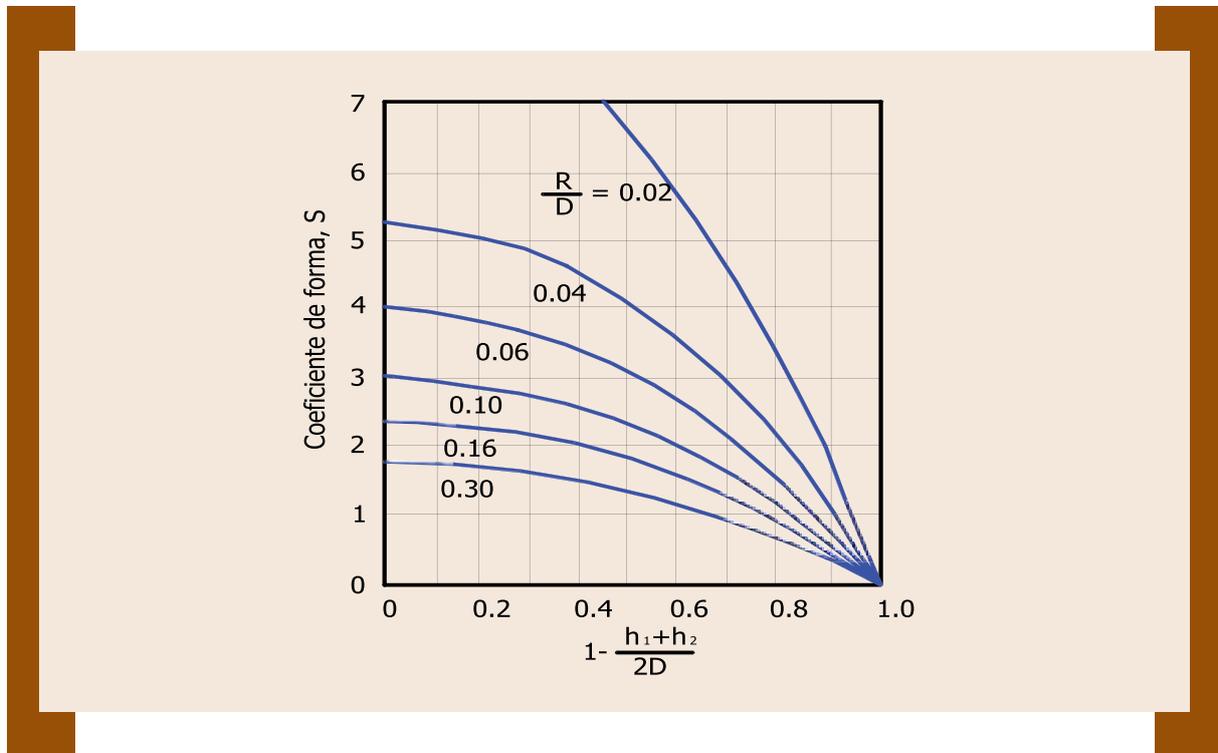
siendo, $A = \pi R^2$ y $F = 16\pi DSR$

donde:

- A = Área de la calicata en metros
- F = Factor de forma

- R = Radio de la calicata en metros
 h_1 = Profundidad medida desde el nivel freático hasta el pelo del agua en tiempo inicial (t_1)
 S = Coeficiente de forma, se obtiene de la figura 6.6

Figura 6.6 Coeficiente de forma S (Cedergren)



La conductividad hidráulica se halla a partir de las anteriores:

$$k = \frac{R}{16DS} \frac{(h_2 - h_1)}{(t_2 - t_1)}$$

DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN POZOS DE OBSERVACIÓN (PIEZÓMETROS)

La ecuación general para estas condiciones es la siguiente:

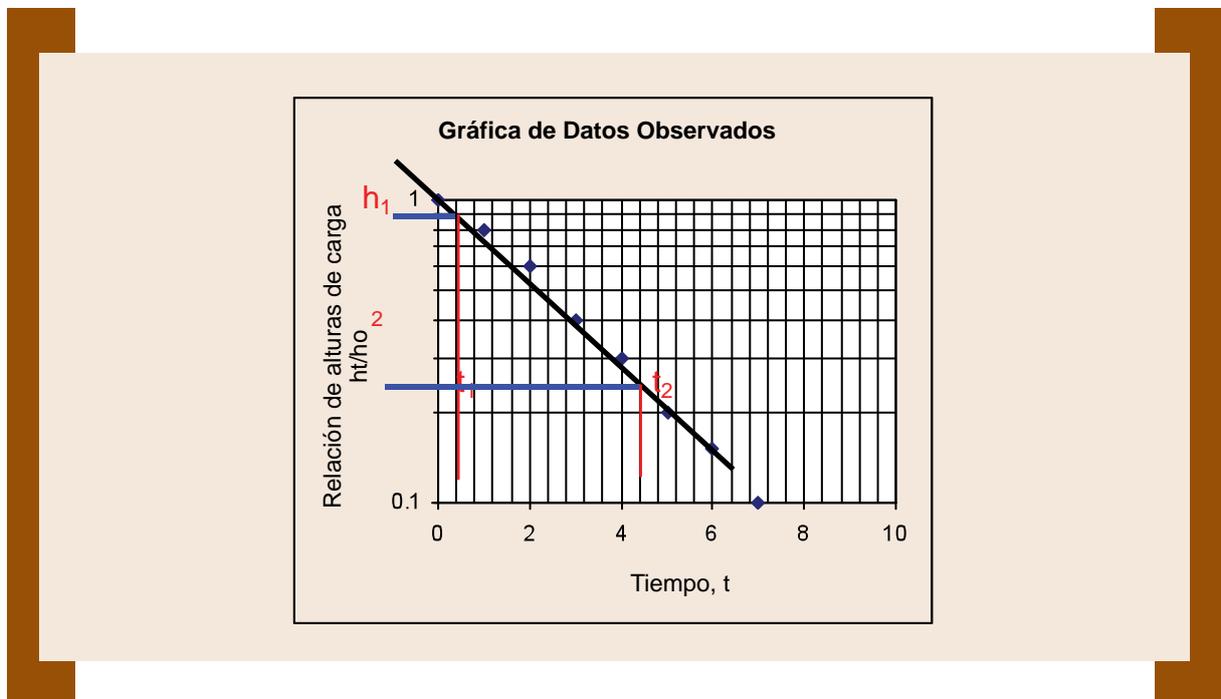
$$k = \frac{A}{F(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Donde:

- A = Área de la tubería
- F = Factor de forma
- h_n = Profundidad medida desde el nivel freático hasta el pelo del agua en (t_n)
- t_n = Tiempo transcurrido desde t_0
- h_0 = Profundidad inicial después del bombeo o la recarga.

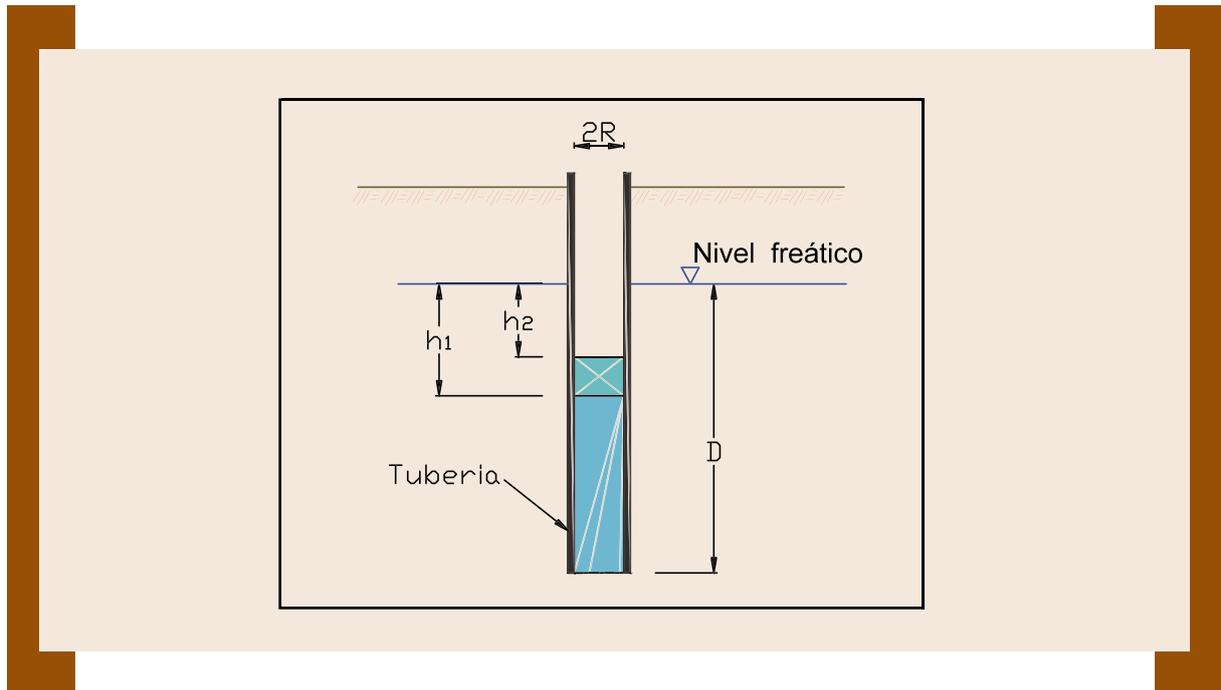
Se representan los datos obtenidos en campo en escala semilogarítmica, tiempo versus ht/h_0 .

Figura 6.8 Ejemplo de datos de campo graficados



Con el gráfico de la Fig. 6.8, y para t_1 y t_2 hallando h_1 y h_2 se halla la conductividad hidráulica

Figura 6.9 Esquema del ensayo (Cedergren)



Para la presente prueba (ver Fig. 6.9) el factor de forma y el área se consideran como:

$$F = \frac{11R}{2} \qquad A = 2\pi R^2$$

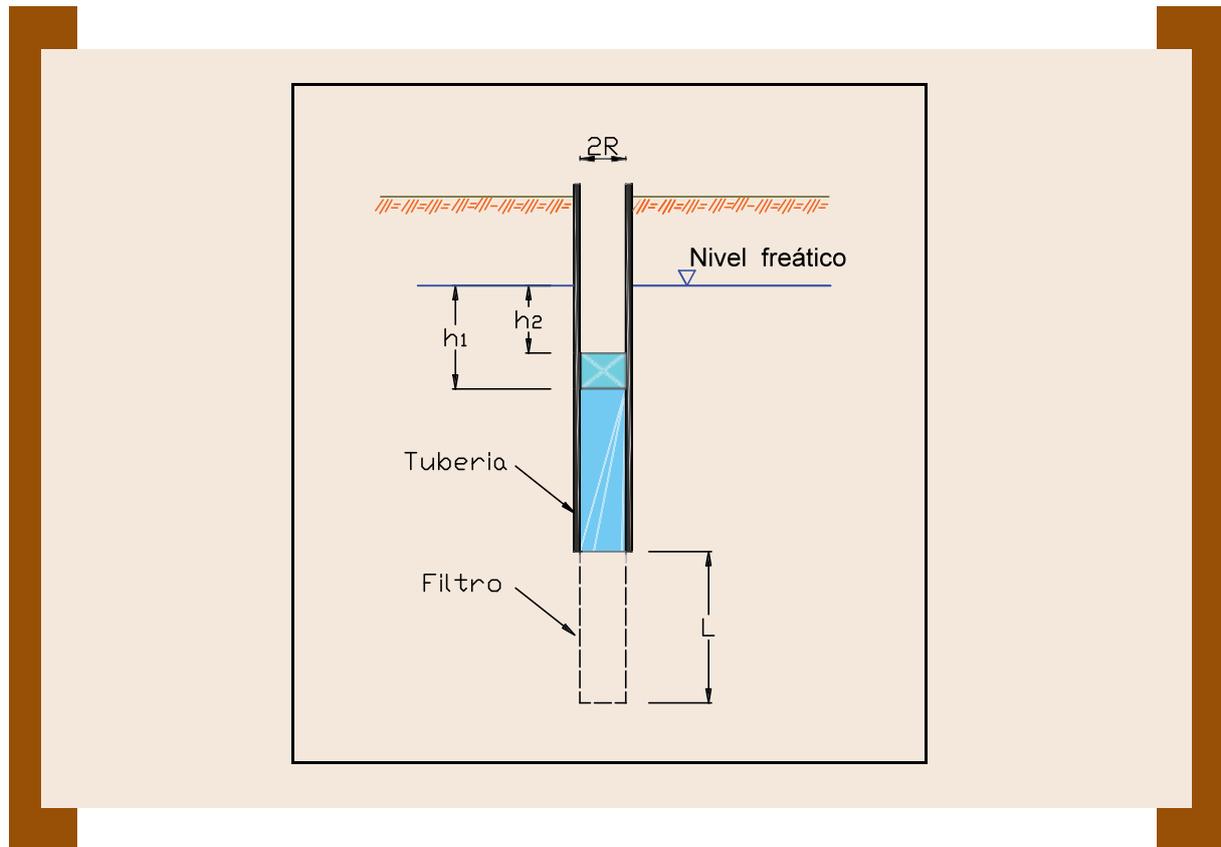
Reemplazando en la ecuación general la conductividad sería:

$$k = \frac{2\pi R}{11(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

La única restricción es: $6in \leq D \leq 60in$

Se utiliza para determinar la permeabilidad para pequeñas profundidades por debajo del nivel freático.

Figura 6.10 Esquema del ensayo con filtro (Cedergren)



El factor de forma (ver Fig. 6.11) y el área serán:

$$F = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{L}{R}\right)} \quad A = 2\pi R^2$$

Entonces la conductividad hidráulica es:

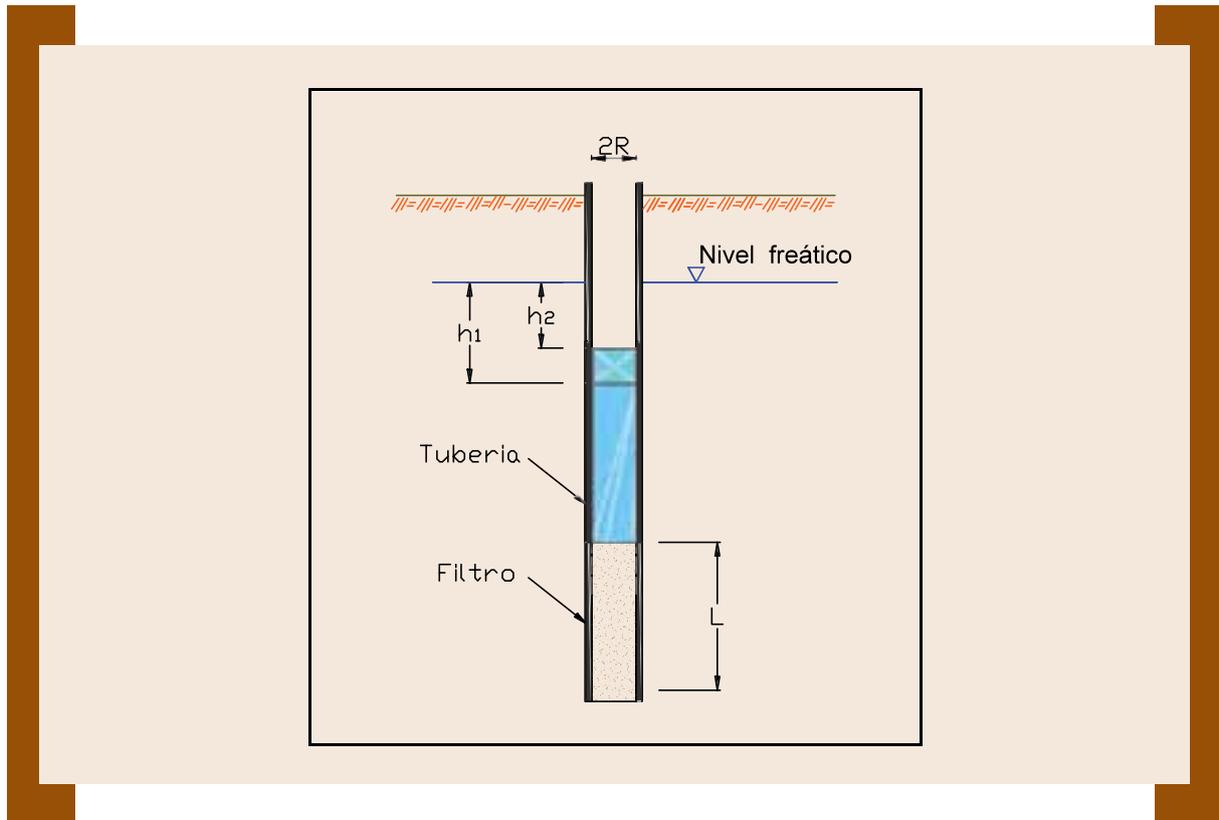
$$k = \frac{R^2}{2L(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{L}{R}\right) \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Para poder aplicar este método se debe cumplir con lo siguiente: $\frac{L}{R} > 8$

Este método se utiliza para grandes profundidades debajo el nivel freático.

POZO ENTUBADO CON SUELO EN SU INTERIOR

Figura 6.11 Esquema del ensayo con material dentro (Cedergren)



El factor de forma y el área (ver Fig. 6.11) serán:

$$F = \frac{11\pi R^2}{2\pi R + 11L} \quad A = 2\pi R^2$$

Entonces la conductividad hidráulica es:

$$k = \frac{2\pi R + 11L}{11(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Su principal uso es para determinar la permeabilidad hidráulica en la dirección vertical en suelos no homogéneos.

APLICACIÓN DEL SOFTWARE PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN CAMPO

La utilización de software especializado da la oportunidad de interpretar los datos de campo. En la investigación se aplicó el Aquifer Test (Waterloo Inc.) para interpretar las pruebas en calicatas según los métodos de Bower Rice y Hvorslev.

HVORSLEV SLUG/BAIL TEST

Esta prueba está diseñada para acuíferos no confinados y confinados, con penetración parcial o total de filtros. Determina la conductividad hidráulica en los alrededores de un piezómetro. Los rangos de descarga y recarga, q , en el piezómetro para cualquier tiempo t son proporcionales a K del suelo y a la recuperación del nivel freático.

$$q(t) = \pi r^2 \frac{dh}{dt} = FK(H - h)$$

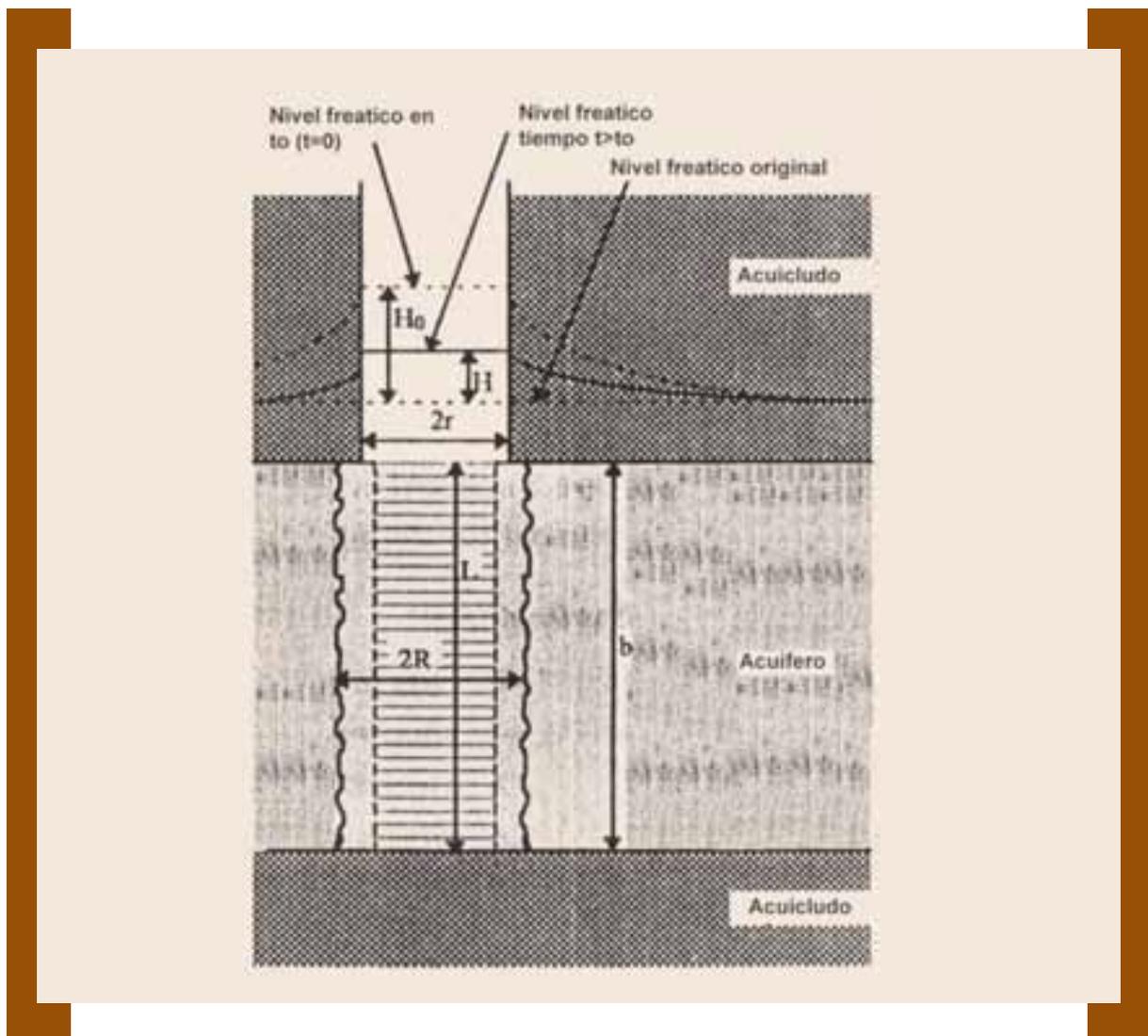
Hvorslev define el tiempo, T_L (el tiempo requerido para que la inyección o extracción inicial desaparezca, asumiendo un caudal constante)

$$T_L = \frac{\pi r^2}{FK}$$

Donde (ver Fig 6.12):

- r = Radio efectivo del piezómetro.
- F = Factor de forma que depende de las dimensiones de las tomas del piezómetro.
- K = Conductividad hidráulica en el radio de influencia.

Figura 6.12 Acuífero en proceso de recarga



Sustituyendo el tiempo en la ecuación inicial resulta lo siguiente:

$$K = \frac{\pi r^2 \left(\ln \frac{H}{H_0} \right)}{Ft}$$

Donde:

- H = Es la diferencia de alturas en función del tiempo
 H_0 = Es la diferencia de alturas inicial

Los datos son dibujados en papel semilogarítmico el eje y de coordenadas $\log H/H_0$, y en el eje x de coordenadas el tiempo. El valor T_L es tomado como el tiempo al cual corresponde a $H/H_0=0.37$ y K es determinada mediante la ecuación anterior.

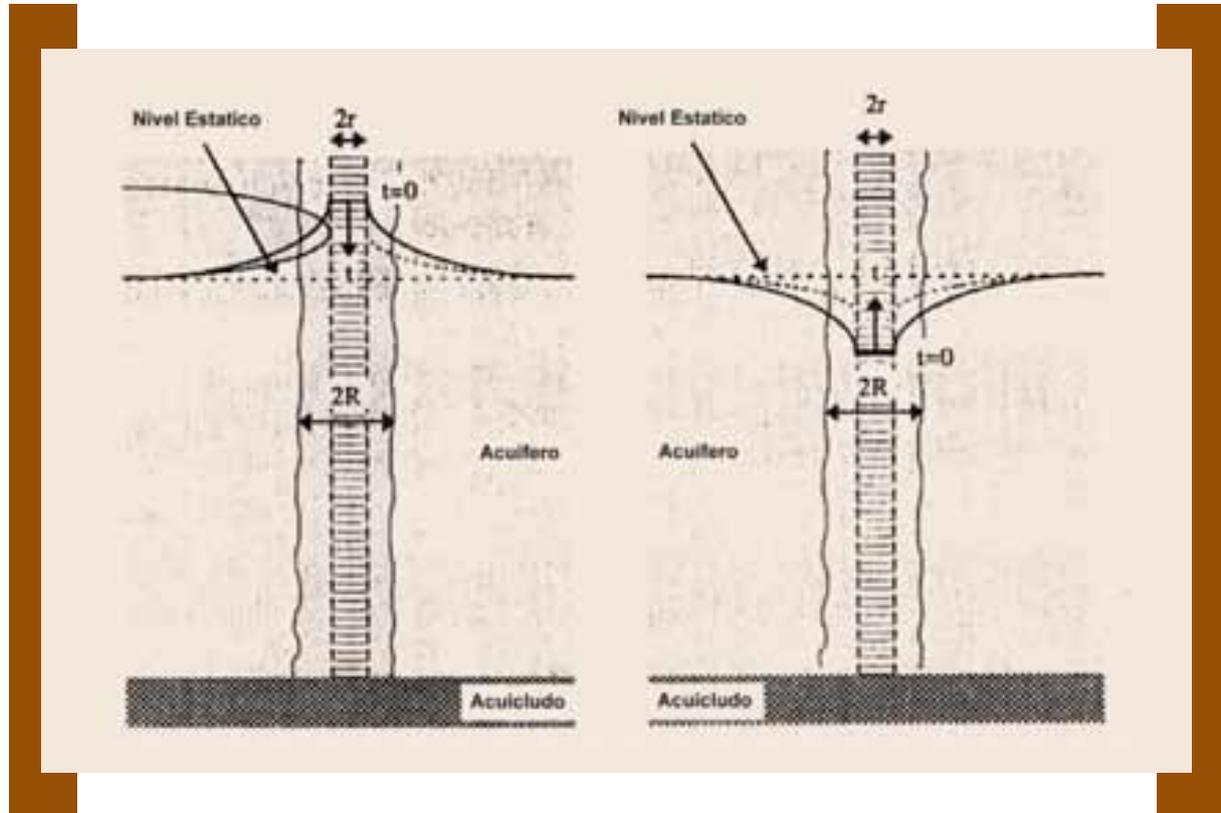


Figura 6.13 a) Recarga de acuífero

b) Recuperación de acuífero

Los datos requeridos son:

- Abatimiento o recarga versus tiempo en el pozo de bombeo
- Nivel freático inicial
- Desplazamiento inicial H_0

SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Si bien los métodos actuales para medir la conductividad hidráulica en ríos, solo abarcan una limitada zona (lecho permeable), son la mejor alternativa para obtener una aproximación realista en lugar de los ensayos aislados de laboratorio o estimaciones por literatura.

Por la experiencia de esta Investigación, se observó que los métodos que dan mejor resultado son los de campo. Entre ellos y en ese orden,

- Carga Variable
- Hooghoudt
- Hvorslev
- Bower Rice

Para la realización de una prueba de bombeo, debe previamente estimarse el equipo en función de la potencialidad que se estime que brinde el acuífero.

6.2. CRITERIOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE GALERÍAS

El emplazamiento de una galería puede desglosarse en:

- Ubicación en planta: condicionada por factores técnicos y de gestión campesina
- Ubicación en vertical: sobre todo por aspectos técnicos, con menor participación del componente social.

Ambos factores son descritos a continuación. El orden en que ellos son presentados quiere mostrarla importancia relativa que ellos tienen, pero que no en todos los casos es perentoria.

6.2.1. Criterios para la localización en planta

a) GESTIÓN

Aunque la geología puede localizar a una galería en términos generales, la cota geográfica y los derechos de agua la localizan en detalle.

Es conocido que existen derechos de agua de una comunidad y grupos de comunidad ganados ancestralmente sobre una fuente superficial; pero también este derecho se ha extrapolado a las aguas subterráneas. Si los derechos sobre aguas superficiales pueden ser adquiridos por jornales de trabajo en construcción o mejoras de infraestructura, los derechos subterráneos parecen ser innatos a las comunidades asentadas a la vera de un río.

Este aspecto ha sido observado en el caso de la galería Taquiña, cuyo emplazamiento fue el resultado del consenso entre usuarios de riego y agua potable con intereses en la misma zona de beneficio.

Pero también se observó que una galería filtrante no puede extenderse de orilla a orilla del río, a menos que haya acuerdo entre las comunidades asentadas a la vera. Los derechos de usufructo del agua del subálveo se vió que alcanza solamente a la mitad del río (Ej. Caso de Buena Vista, Maldonado, Zamora).

b) ASPECTOS TÉCNICOS

COTA GEOGRÁFICA DOMINANTE

Es la cota altimétrica de implante del canal de la galería filtrante, a partir de la cual se extiende el área cultivable a ser regada

En términos generales.

- cuanto más aguas arriba en el río se implante la obra, mayor área regable se abarcará.
- cuanto más profunda se localice en el lecho del río, mayor caudal subterráneo se obtendrá.

Ambas afirmaciones están naturalmente restringidas por la practicabilidad específica de cada sitio y sistema de riego. Por ejemplo en el caso de Tajras, por insuficiente cota, los primeros 300m de canal requieren de bombeo para acceder con riego al área cultivable.

GEOLOGÍA LOCAL

En términos muy amplios, el emplazamiento de una galería podría ser localizada en:

- una quebrada del sistema de drenaje de la cuenca.
- una zona llana, a cierta distancia de las estribaciones cordilleranas.

El primer caso sugeriría que el flujo subterráneo está confinado por las fronteras que imponen los flancos con presencia de material rocoso y la roca madre en el fondo del cauce. Estas fronteras de flujo deben entenderse como encauzadores del caudal subterráneo.

En términos de modelación matemática y suponiendo una estratificación homogénea, se puede asumir como si el flujo fuera unidimensional y el análisis circunscribirse a un ancho unitario.

Este caso reporta ventajas en términos de certidumbre en cuanto a la dirección en que el flujo acontece, siendo por ello menos exigente –presunción– en el número de piezómetros que deben implantarse y con ello orientar la galería, para que con la menor inversión se obtenga el máximo rendimiento. Ejemplo de estos casos son las galerías de Taquiña, Loro Mayu, Huayña Pasto Chico, Cónдор Chinoca.

El segundo caso es menos favorable. Cuando un río está discurriendo en una planicie y se desea efectuar un aprovechamiento subterráneo, existe la incertidumbre de un buen emplazamiento. Téngase presente que los ríos son entes dinámicos divagantes sobre un amplio margen y que no siempre el cauce actual será indicativo de la dirección regional de aguas subterráneas. Por ello, se recomienda el estudio de cartas IGM y fotos satelitales de la zona para tener una perspectiva general de la evolución del río y el proceso de infiltración. En esta situación la instalación de piezómetros es un recurso muy valioso para determinar la dirección del flujo (v.gr. Galería de Pacopampa, con ancho del río de más de 700 m).

Se recomienda también efectuar en lo posible sondeos geoeléctricos bajo el futuro eje de la galería y transversalmente a ella. Con ello se conocerá la profundidad de la roca madre o información de la conformación del material del lecho a grosso modo por lo menos.

MORFOLOGÍA DEL RÍO

Es necesario que en toda etapa de diseño de obras fluviales, resaltar el hecho de que un río es una entidad animada de permanente dinámica (erosión, socavación, deposición, meanderismo, corte de meandros, bancos de sedimentos, etc., - Chang, 1988) que puede afectar a la estabilidad de las obras hidráulicas construidas en él.

Desde el punto de vista del riesgo de que una galería filtrante se vea afectada por la acción de la corriente, es comparativamente similar que el caso de tomas superficiales. El cuidado particular que se debe tenerse es la eventual socavación en torno a las cámaras de inspección. En caso de que se prevea severa acción socavatoria, puede recurrirse a protección de colchones de piedra acomodada a manera de rip-rap.

Se realza que en caso de que se vaya a localizar la obra en la proximidad del cono de deyección de una cuenca, surge la incertidumbre sobre la dirección de flujo subterráneo, pues no siempre el flujo superficial será indicativo de esa dirección.

Si la galería tiene propósito de captar también aguas superficiales durante la época de estío, deberá tener presente la dinámica de la formación del lecho del río y el proceso de relleno y acorazamiento de la distribución granulométrica del lecho del río.

Este fenómeno es descrito más detalladamente:

Si caudales reducidos se presentan en la corriente, el agua será solo capaz de remover sedimentos finos dejando sin movimiento el material grueso. Si el flujo va decreciendo o cesa, los finos levantados comenzaran a depositarse por encima del material grueso ya asentado (Ver Fig. 6.14). El resultado de este proceso es que sectores del lecho del río estarán conformados por material fino y otros por material grueso: heterogeneidad.

Durante caudales de crecida, todo el material será removido a excepción de grandes pedrones. Cuando la crecida va pasando, primero se depositan las gravas y arena gruesa, y posteriormente el material fino.

En nuestras zonas montañosas de clima semiárido es también posible observar tormentas de corta duración y de alta intensidad. En tales casos, es probable encontrar material grueso por encima de material fino tal como muestra la Figura 6.15.

Fig. 6.14 Composición del lecho del río en dependencia de la descarga

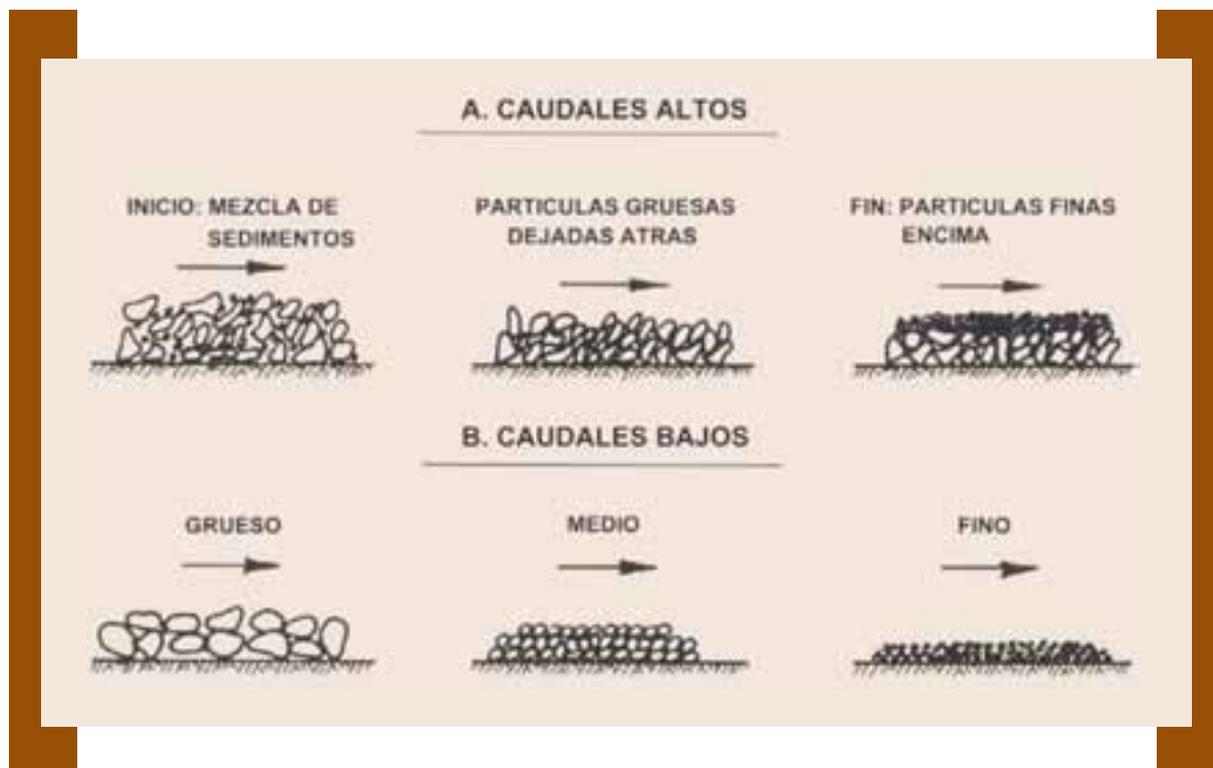
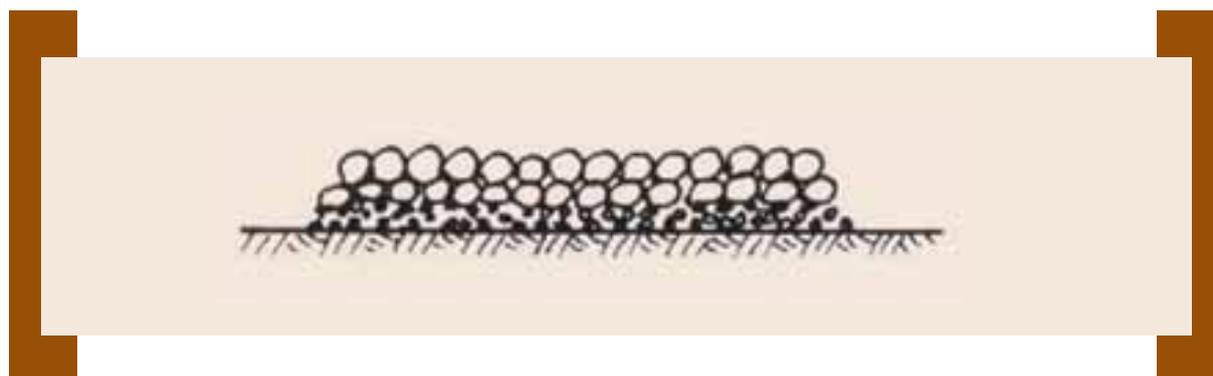


Fig. 6.15 Graduación del tamaño del grano esquematizado a lo largo de la corriente



Los aspectos antes descritos explican claramente la constitución heterogénea del lecho de un río, y puede ser pauta para entender el por qué solo algunas barbacanas tributan agua a una galería.

Otro aspecto morfológico en ríos juveniles a considerar es que, si se piensa captar aguas superficiales también, debe considerarse el construir una obra derivadora (azud) de carácter temporal (apilamiento de piedras). Las aguas así captadas pueden introducirse a la galería filtrante o verterlas directamente al sistema de riego.

FUENTES DE CONTAMINACIÓN

Un aspecto relacionado con la calidad del agua es el estudio que debe efectuarse cuando en la vecindad del sitio de aprovechamiento haya granjas avícolas, uso intensivo de fertilizantes, disposición de excretas a cielo abierto o cámaras sépticas, vertido de desechos industriales o mineros.

Un análisis de calidad de agua de muestras tomadas en las posibles fuentes de contaminación y del subálveo del río permitirá conocer el tipo de contaminación –si existe- y el riesgo de que el río sea afectado.

Si las fuentes de contaminación son puntuales (industrias, plantas de tratamiento) aplicando métodos analíticos simplificados (Liu, 2000; Fetter, 1988) pueden trazarse líneas de flujo y considerando solo el término advectivo del movimiento de agua subterránea determinar el tiempo de arribo –si llega- al río. Si el problema es serio, los modelos numéricos están siempre disponibles para un estudio más detallado (Wang, 1982; Boonstra 1990). Software de libre acceso para el estudio puede conseguirse del U. S. Geological Service, de la Environmental Protection Agency u otro organismo reconocido. Otros aspectos relacionados con legislación ambiental son detallados en el capítulo V.

6.2.2. Criterios para la ubicación en vertical

La localización en vertical de una galería filtrante dependerá de:

- Necesidades de captación del caudal demandado
- Oferta de agua del subálveo
- Estratigrafía del lecho
- Costos de implantación de la obra

Los dos primeros aspectos están relacionados íntimamente con un balance hídrico en términos de la cantidad de agua que se requiere en la zona de riego, frente a la cantidad potencial que puede ofrecer el subálveo del río. El último referido a la introducción de un parámetro beneficio-costos que restringe la profundidad de implantación de la obra. Inmediatamente se detalla cada aspecto.

a) OFERTA Y DEMANDA DE AGUA

La oferta de aguas hacia la galería filtrante es función del potencial hídrico que tiene la cuenca y de los aprovechamientos que pudieran haberse realizado a lo largo de su trayecto (extracciones). Esta oferta de caudal está traducida en la permanencia de los niveles freáticos (medio poroso saturado correspondiente a aguas altas, y napa freática profunda a época de estiaje) conforme los meses del año.

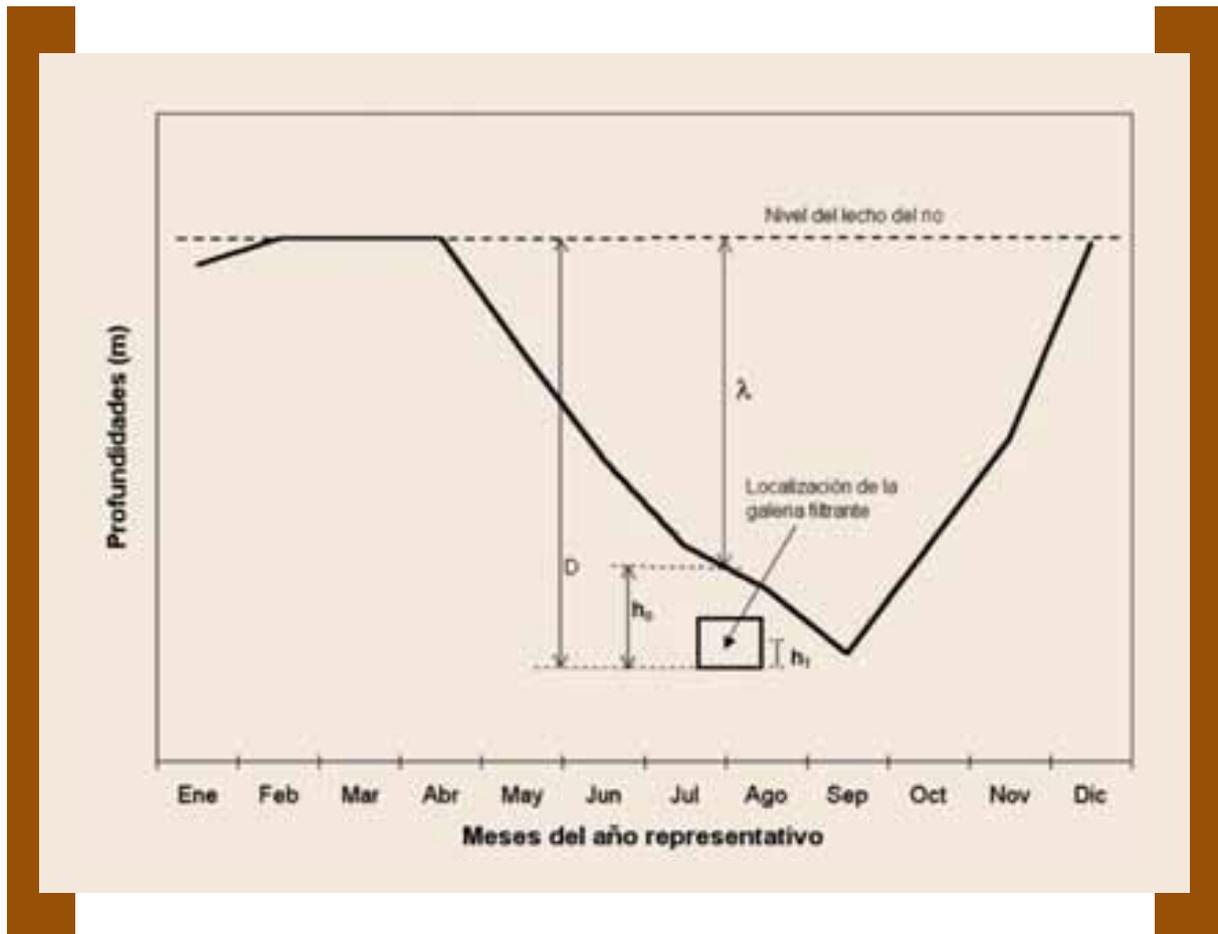
La Fig. 6.16 muestra una hipotética evolución de niveles de agua en el subálveo del río, registrada con piezómetros. Se observa que para meses de lluvia el medio poroso se halla saturado, mientras que para fines de año el suelo está parcialmente saturado. Con un gráfico similar al mostrado se puede situar en vertical la galería de manera de captar un caudal determinado en la época más desfavorable.

En la figura, l es la profundidad medida desde el lecho del río hasta el nivel freático, y sea h_0 la altura desde el piso de la galería hasta justo ese nivel de aguas. De ese modo se cumple,

$$D \geq \lambda + h_0$$

y D la profundidad de implantación de la galería, medida desde la superficie hasta el piso de la obra, tal como lo describe la figura siguiente.

Figura. 6.16 Variación hipotética del nivel freático en el subálveo de un río. Se muestra la profundidad D a la que se implanta la obra y l la profundidad de la napa para un cierto mes



El caudal captado puede calcularse con la relación deducida en el numeral 4.3 basada en las hipótesis de flujo unidimensional y horizontal (Dupuit – Forchheimer):

$$\int_{x=0}^{x=L} Q dx = -K B \int_{h=h_0}^{h=h_1} h dh$$

$$Q_o = \frac{K \cdot B}{2L} (h_o^2 - h_1^2)$$

En que (ver Fig. 4.7):

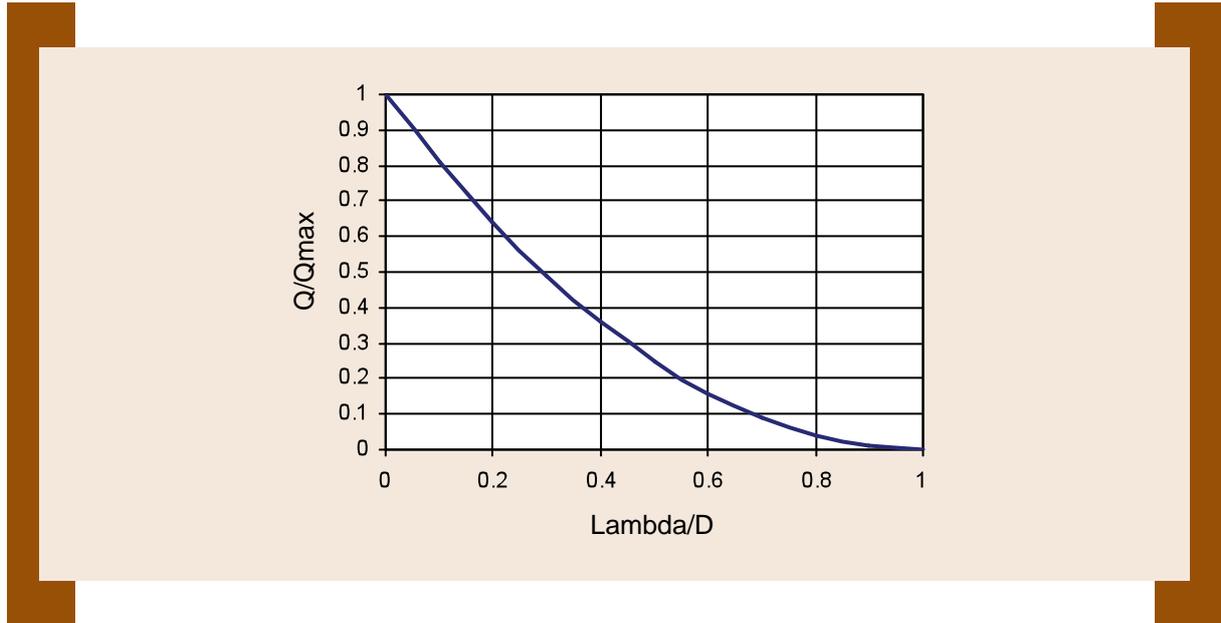
- Q_o : Caudal posible de obtener del subálveo del río, caudal ofertado
- K : La conductividad hidráulica
- B : Ancho del río, o longitud de la galería
- h_o : Altura medida desde el piso de la galería hasta el nivel freático al que no se observa abatimiento
- h_1 : Altura desde el piso de la galería hasta la mitad de la altura de la pared de la obra
- L : Distancia entre la galería y el punto en que no se observa abatimiento

A partir de esa relación, se observa que a cuanto mayor profundidad se implante la obra y el nivel freático esté más elevado, mayor también será el caudal captado.

En la fórmula anterior, h_1 la condición de borde aguas abajo en el proceso de integración de la ecuación diferencial, físicamente representa a la presión atmosférica a la que sale nuevamente el agua dentro de la galería; sin embargo, bajo un criterio conservador, puede tomarse su valor como una fracción de la altura al techo de la galería, o la altura a la cual se extienden, en vertical y por encima del piso, las barbacanas en el muro de la obra.

La Fig. 6.17 muestra la variación de caudales aprovechables en la obra si se la compara con el máximo obtenido durante la época de lluvias. Para una profundidad de implantación D de la galería, el nivel freático l oscila según el mes.

Figura. 6.17 Relación adimensional entre la profundidad de implante (l/D) de la galería frente al caudal esperado captar



En que:

- λD : Es la fracción de la profundidad del nivel freático en el subálveo del río frente a la profundidad a la que se implanta la galería filtrante
- Q/Q_{\max} Rendimiento de la galería en términos de caudal captado. El caudal es máximo cuando el medio está saturado (agua superficial escurriendo en el río)

El gráfico se obtiene con la relación:

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \left(1 - \left(\frac{\lambda}{D} \right) \right)^2$$

Claramente se observa la variación cuadrática que tienen los niveles frente al caudal.

Si con un balance hídrico subterráneo en la cuenca del río se conociese la fluctuación de niveles del freático y suponiendo dato de la conductividad hidráulica, se dedujese la oferta mensual de caudales ha ser captados por la obra tal como lo muestra la Tabla 6.3

Tabla 6.3 Caudales hipotéticos captados por la galería en función al gradiente hidráulico mensual

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
λD	3.8	3.9	4.1	3.9	3.4	2.9	2.5	2.3	2.0	2.5	3.0	3.6
$Q_{\text{mensual}} [\text{m}^3/\text{día}]$	108	114	126	114	87	63	47	39	30	47	68	97

Este caudal mínimo ofertado por el subálveo del río debe ser comparado con el requerido por los cultivos ($Q_{\text{min}} = Q_{\text{riego}}$). Reemplazando en la expresión y despejando para h_1 , pauta de la profundidad.

$$h_0 = \sqrt{h_1^2 + \frac{2Q_{\text{min}}L}{KB}}$$

Expresando en términos de la profundidad D del piso de la galería,

$$D = \lambda + C * h_g \sqrt{1 + \frac{2C^2 L Q_{\text{riego}}}{K B h_g^2}}$$

El término λ representa la profundidad de la napa freática para el mes en que Q_{riego} es considerado como el caudal crítico para riego. El término h_g es la altura de la pared de la galería, puede tomarse valores entre 1.6 a 1.8 m. C es un coeficiente que puede fluctuar en el rango de 0.25 a 0.75 y representa la fracción del muro al que alcanzarán las barbacanas (presión atmosférica); conservadoramente puede tomarse como 0.5.

b) ESTRATIGRAFÍA DEL LECHO

La profundidad necesaria para suplir el caudal demandado, puede estar supeditada a la presencia de roca o estratos impermeables cerca a la superficie (v.gr. caso de Huayña Pasto Chico y Condor Chinoca), por ello para tomar una decisión acertada es conveniente disponer de información de la estratigrafía apoyada en sondeos eléctricos, excavaciones a cielo abierto ú otros métodos.

COSTOS DE EXCAVACIÓN

Generalmente, la profundidad de la galería estará restringida por la practicabilidad y costos de excavación. El profundizar más allá de los 5 o 6 [m] significa ingresar excavando mediante terraplenes si es con maquinaria, o por escalones si es manualmente. También implica entibado y muchas veces el achique por presencia de agua. En otras palabras, cuanto mayor sea la profundidad, mayores serán los costos de excavación, y esta relación profundidad – costo de excavación no necesariamente es lineal si no más bien, exponencial.

Es posible aceptar mayor profundidad de implantación de la obra si en términos económicos se justifica el esfuerzo e inversión de recursos destinados, frente al beneficio de captar mayor caudal para regar mayor área.

Para orientar la decisión el proyectista puede adoptar herramientas de Ingeniería Económica para la evaluación. Se plantea acá una metodología basada en la relación Beneficio/Costo incremental.

$$\frac{\Delta B}{\Delta C} = \frac{B(A2) - B(A1)}{C(A2) - C(A1)} \geq 1$$

Si el cociente entre beneficios y costos incrementales fuera mayor a la unidad, la opción por mayor profundización de la obra fuera aceptable. Los términos de la fórmula son:

A1 es la alternativa a la que se construyese la galería filtrante a una profundidad practicable por métodos convencionales.

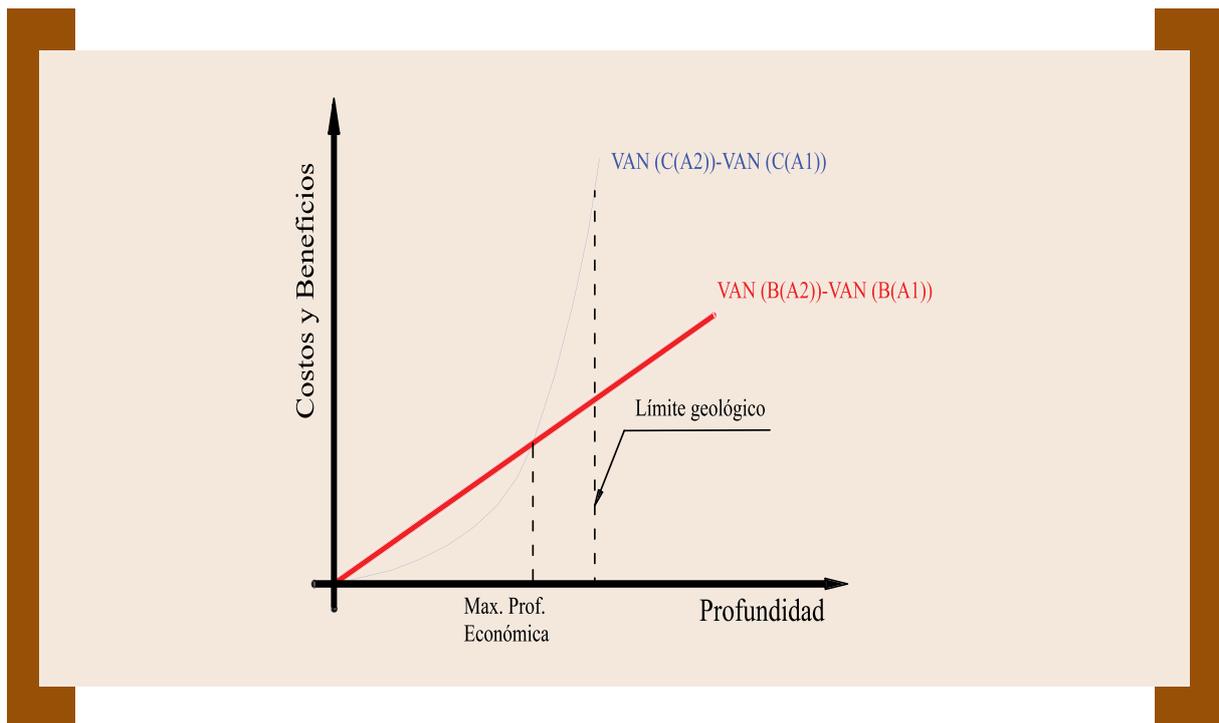
A2, la alternativa en que se excavase más profundamente incluso recurriendo a maquinaria pesada, entibado y achique.

B(A1) y C(A1) son respectivamente los valores presentes de los beneficios anuales y costos de inversión y operación de la Alternativa A1.

B(A2) y C(A2) el valor presente de los beneficios anuales, y los costos tanto de inversión como de operación y mantenimiento que demandase el proyectos si la alternativa A2 es elegida.

El profundizar en un lecho aluvial tiene restricciones. La primera relacionada con la existencia de la roca madre, y la segunda con el compromiso técnico-social sobre derechos de agua subterránea de poblaciones asentadas aguas abajo de la galería. Ambos aspectos se exponen en los capítulos III y V.

Figura. 6.18 Metodología para hallar la máxima profundidad de una galería filtrante desde el punto de vista del beneficio/costo.



Si este proceder es repetido para varias profundidades, se podrá construir un gráfico como el de la Fig. 6.18 en que es perceptible el *punto de equilibrio* entre beneficios y costos incrementales que delimita las zonas de factibilidad y rechazo por más excavación.

En la figura pueden añadirse visiblemente los límites prácticos para la profundización impuestas por la estratigrafía, o los derechos de agua en caso de galerías escalonadas (v.gr. caso de Tajras que tuvo que restringirse por acuerdos con usuarios de otras galerías aguas abajo del río Tipajara).

6.3. CRITERIOS PARA LA ORIENTACIÓN DE LAS GALERÍAS

La orientación de una galería filtrante es definida por el principio de que la obra quede ortogonal a las líneas de corriente subterráneas.

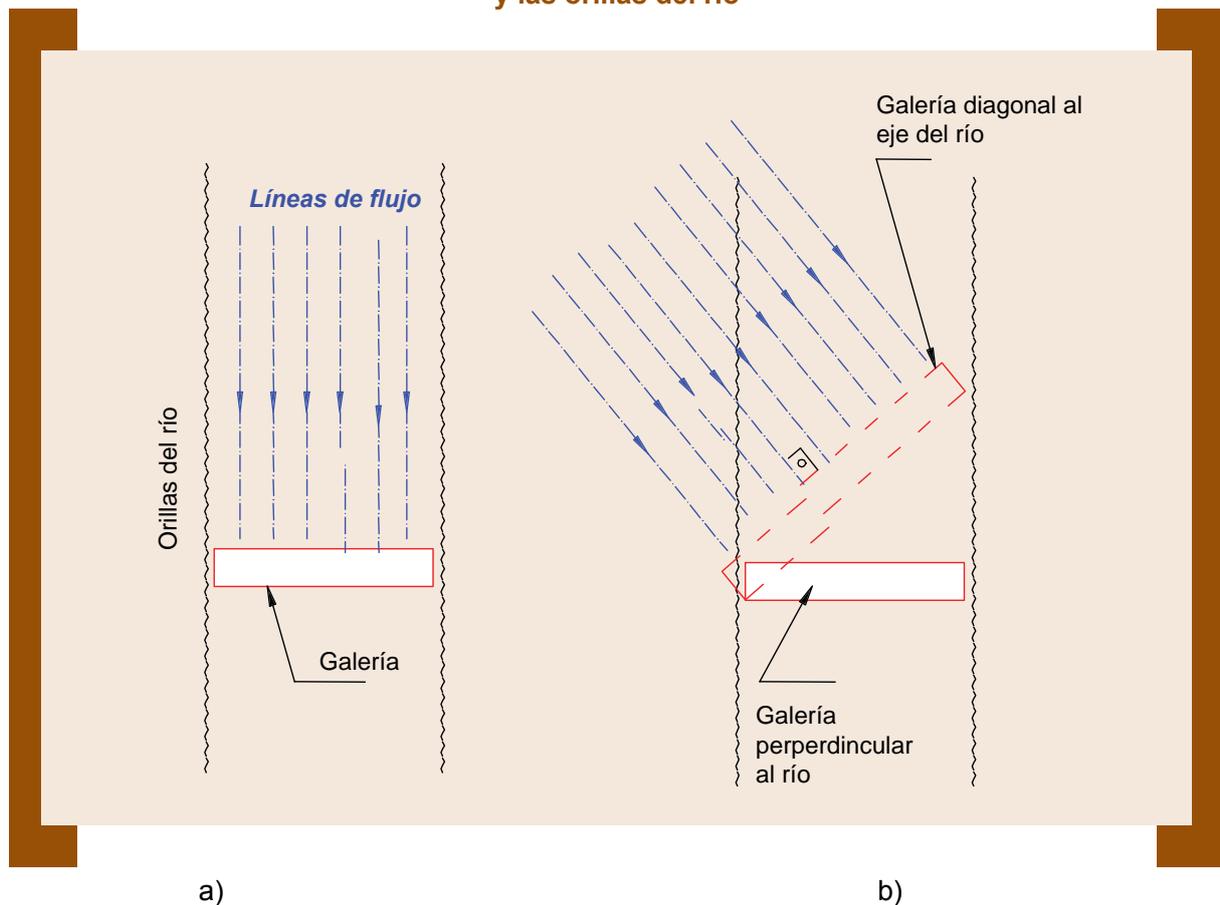
Si el flujo en el subálveo tiene la misma dirección que el eje del río (ríos de montaña), una galería filtrante, abarcando de orilla a orilla, captará la oferta de caudal subterráneo al máximo.

Por el contrario, si el flujo en el subálveo tiene diferente dirección, una galería perpendicular al eje del río solamente captará una porción de las líneas de corriente de las posibles. Para modificar esta situación la galería podrá disponerse perpendicular a las líneas de flujo quedando diagonal al curso de la corriente superficial.

Una innecesaria inversión de recursos económicos fuera si es que estando las líneas de corriente paralelas al eje del río, se construyese diagonal: mayor longitud de galería para el mismo caudal captado.

La Fig.6.19 muestra dos casos de orientación de una galería. La figura a) las líneas de corrientes paralelas al eje del río y una galería dispuesta perpendicularmente.

Figura 6.19. Orientación de la galería filtrante según las líneas de flujo subterráneo y las orillas del río



La figura b) exhibe el caso en que el flujo subterráneo no coincide con la dirección del flujo superficial. Se evidencia que una galería diagonal al eje del río, ofrece mayor área de captación.

Se puede concluir fácilmente, que el obtener la dirección del flujo subterráneo mediante la implantación de piezómetros en la vecindad del sitio elegido, permitirá orientar la galería y justificar la longitud de la obra en términos de mayor caudal captado.

En los sistemas estudiados durante esta investigación, muchos de ellos han apelado a un balance

entre el caudal demandado frente al ofertado por el subálveo del río:

$$Q_{demandado} = Q_{ofertado}$$

El caudal ofertado se deduce según como se detalla en 6.1.2 a), y que puede ser expresado en términos de longitud de galería:

$$Q_{ofertado} = B * q_{ofertado}$$

siendo B el ancho requerido, y bajo la suposición de que el subálveo es un medio homogéneo. De ese modo,

$$B = \frac{Q_{riego}}{q_{ofertado}}$$

B debe ser entendida como la longitud perpendicular al flujo subterráneo y no necesariamente como el ancho del río.

6.3.1. Configuraciones particulares de galerías

Fruto del trabajo de campo realizado en los departamentos de Cochabamba, Oruro y Potosí, se han podido observar configuraciones peculiares en cada galería filtrante.

Por ejemplo en Thako Thako la galería está orientada paralela al río; la causa de la orientación es atribuida a problemas de gestión; a pesar de ello capta casi el 50% del caudal de diseño previsto.

Otro caso interesante es el de Realenga en Oruro, en que se construyó una galería oblicua al río pero con un brazo a partir de un quiebre, cambia de dirección y se hace paralela al río. Las dos galerías en Potosí también exhiben tramos paralelos al curso del río.

Se presume que estas configuraciones son debidas a:

- Se ha encontrado una vena de agua durante la excavación de la obra y ha pensado seguirla, y la segunda más probable,
- Seguir el curso de la corriente superficial en el río y que el agua ingrese a la galería a través de sus filtros en la superficie

Por lo observado en el caso de la galería filtrante de Realenga en Oruro, se conectaron tuberías de PVC ranuradas a la obra a manera de drenes, dispuestas bajo la corriente más o menos estable del curso del río. Este proceder parece razonable en términos de costo y caudal superficial captado. Sin embargo, en esta galería –según informan los beneficiarios- se dispusieron geotextiles a manera de filtros para las tuberías de PVC, pero que fueron rápidamente colmatados por el sedimento. Ante esta eventualidad, los beneficiarios condujeron de manera rústica el agua superficial hasta la cámara de la galería.

En base a esta experiencia, se considera que la mejor manera de captar flujo superficial es construyendo pequeñas zanjas en el lecho del río y derivarlas a la obra. En ríos torrentosos estas pequeñas obras deben ser reconstruidas periódicamente (después de la época de lluvias), pero la ventaja es que solo demanda de mano de obra local no calificada para esta labor.

6.4. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE LA CÁMARA DE CAPTACIÓN DE LA GALERÍA FILTRANTE

Se refiere a la construcción subterránea que permite la transición del flujo subsuperficial del río hacia la galería. Al interior de esta cámara reina la presión atmosférica. Las dimensiones de la cámara varían desde 4" en el caso de un dren colector hasta la talla de una persona.

Las dimensiones internas que debe proporcionársele a la cámara deben estar acordes con la funcionalidad durante la fase de mantenimiento que se haga a la obra antes que una razón técnica específica.

La funcionalidad está referida a que la altura (gálibo vertical) no deba ser inferior a 1.6m, ni el ancho tan pequeño que no permita girar a una persona dentro de la cámara, ni tampoco se constituya en limitante para que no pueda operar con sus herramientas de limpieza. Una dimensión razonable es de 1 a 1.5m.

La única consideración en la construcción de la cámara desde el punto de la hidráulico es el papel que juega alojando a las barbacanas por las cuales ingresará el flujo subterráneo a la galería. Este aspecto es ampliamente desarrollado en el numeral 6.5

En este texto, la cámara es la obra conformada por una techumbre apoyada en dos paredes laterales y un piso. El techo de la galería puede ser una losa de hormigón armado apoyada en paredes laterales o columnas, o una bóveda que transmite esfuerzos únicamente de compresión a las paredes; esta última opción es observada con frecuencia en las galerías de mayor data. El techo de la cámara suele alojar barbacanas, aunque no es el caso general, (v.gr.) galería Taquiña) con el afán de captar el flujo por escurrimiento en el cauce del río. No se ha podido evaluar la efectividad de esta medida.

Durante el trabajo de campo, se ha evidenciado que el techo de la galería de Maldonado en Potosí, está constituida por pequeñas losas prefabricadas y montadas sobre las paredes. El inconveniente observado de ello es que la unión entre tapas fue deficiente, tal que el material del lecho del río ingresa al interior de la galería. Durante la época de lluvias la gran cantidad de sedimento obliga a los usuarios a realizar un sostenido trabajo de mantenimiento para habilitar la galería.

Las paredes laterales suelen ser de:

- Mampostería de piedra y piedra acomodada, las más antiguas (v. gr. Thako Thako, Novillero en el río Tipajara)
- Hormigón ciclópeo (v. gr. Maldonado, Zamora, Tipapampa)
- Hormigón armado (v.gr.) caso Taquiña), generalmente son las que cuentan con buena supervisión
- Gaviones (caso de Montecillo)

Estructuralmente, el diseño de las paredes de la cámara de la galería filtrante debiera considerar, al menos,

- Empuje hidrostático más adverso
- Empuje de tierras
- Efecto de subpresiones
- Sobrecarga del relleno y la techumbre
- Acciones dinámicas como sismos

Las paredes pueden diseñarse bajo los principios de muros de contención, muros cantilever, estructura aporticada según el caso, y siempre refiriéndose a la Norma Boliviana del Hormigón u otra internacionalmente reconocida (estados de carga, parámetros de resistencia de los materiales, niveles de supervisión y control, etc.)

El piso de la galería, unas veces se halla conformado por soladura y contrapiso de cemento, únicamente soladura y otras veces por el terreno natural. En el primer caso, se desprecia el aporte de flujo que pudiera recibirse desde el piso; mientras que los dos últimos aprovechan para ampliar más la sección expuesta al flujo subterráneo. El cuidado que debiera tenerse es que el piso natural debiera protegerse con material gradado a manera de rip rap para eliminar el efecto de pérdida de suelo, problemas de piping o incluso la erosión por causa del agua captada por las barbacanas y que es conducida al exterior.

Si al piso de la galería se le dota de pendientes muy pequeñas, velocidades reducidas, podrá hacer trabajar a la galería como un pre sedimentador exigiendo mayor frecuencia de mantenimiento. Este aspecto debe ser evaluado convenientemente por el proyectista.

6.4.1. Consideraciones hidráulicas para muros de gaviones

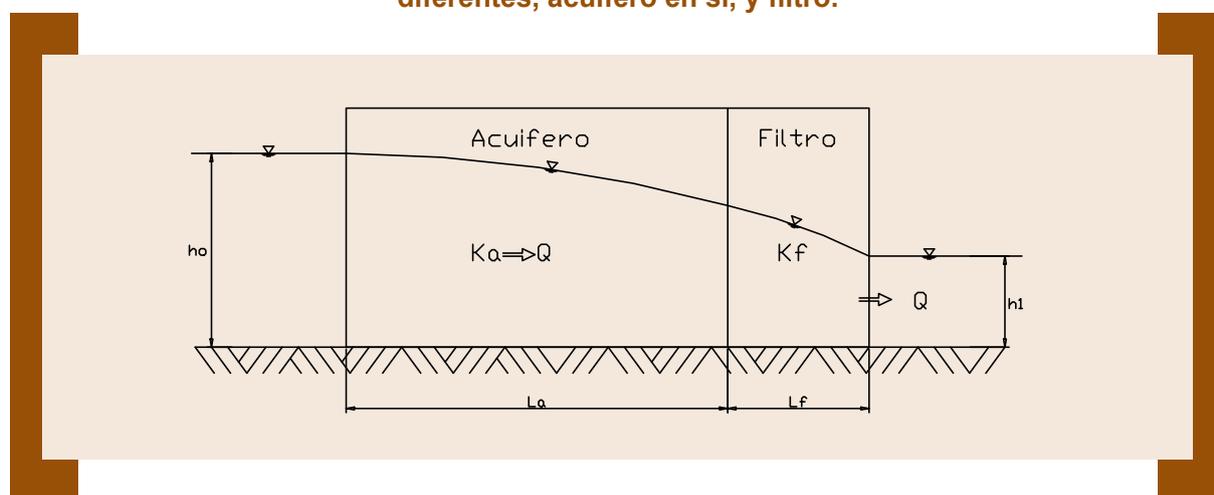
El siguiente análisis es motivado por la observación de una nueva práctica en la construcción de las cámaras de las galerías filtrantes: inclusión de gaviones.

Es ilustrativo el caso presentado en el sistema de riego Montecillos. Ante la necesidad de captación de agua subálvea, originalmente fue diseñada una galería de hormigón ciclópeo, pero al momento de la construcción halló la oposición de los campesinos porque ellos argüían la utilización de mampostería de piedra en seco, en atención a su experiencia ancestral en las ventajas de este material. La dirección del Proyecto optó por la implementación de gaviones como muros percolantes. El resultado plausible y que ha entusiasmado a los beneficiarios es que el caudal de diseño original con hormigón ciclópeo estimaba captar 41 l/s; una vez construido utilizando gaviones, el captado y aforado en el mes de julio fue de 133 l/s.

Este resultado debe tomárselo con cautela; se debe recordar que el caudal recibido en la galería, no es función de la permeabilidad de los filtros o de la pared del muro, si no que depende de las propiedades hidrogeológicas (conductividad hidráulica, almacenamiento, estratigrafía, niveles freáticos) del subálveo del río.

Esta afirmación se comprueba con el análisis del caudal obtenido desde un acuífero cuando se dispone de filtros y cuando no. Este análisis se restringe a flujo unidimensional en un acuífero libre como el de la Fig. 6.20

Figura. 6.20 Esquematación del flujo en un acuífero conformado por dos materiales diferentes, acuífero en sí, y filtro.



donde:

L_a, K_a : Longitud y Conductividad hidráulica del acuífero

L_f, K_f : Longitud y Conductividad hidráulica del filtro

El caudal unitario $Q_{con-filtro}$ cuando se dispone de filtros será:

$$Q_{con-filtro} = K_a \bar{h} \frac{h_0 - h_1}{L_a} \left(\frac{1}{1 + \frac{K_a L_f}{K_f L_a}} \right)$$

El caudal por unidad de ancho cuando el filtro es reemplazado por material del subálveo del río

$Q_{sin-filtro}$:

$$Q_{sin-filtro} = K_a \bar{h} \left(\frac{h_0 - h_1}{L_a + L_f} \right)$$

En que $\bar{h} = \frac{1}{2}(h_0 + h_1)$ o espesor promedio de la napa freática una vez que el flujo se ha establecido.

El porcentaje de caudal que se tuviese cuando se dispone de filtros frente a cuando no, será:

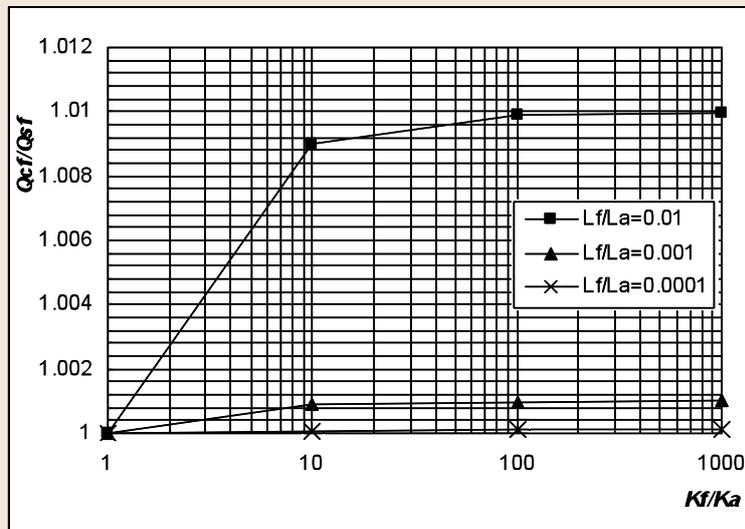
$$\frac{Q_{con-filtro}}{Q_{sin-filtro}} = \frac{1 + \frac{L_f}{L_a}}{1 + \frac{K_a L_f}{K_f L_a}}$$

Por ejemplo, se suele aceptar que K_f sea al menos cien veces mayor que K_a , y la longitud de filtros puede ser una centésima de L_a ; para tal caso

$$\frac{Q_{con-filtro}}{Q_{sin-filtro}} \cong 1.01$$

Es decir, para una longitud dada ($L_a + L_f$), y si parte de ella es ocupada por filtros L_f se reducen las pérdidas de energía cuando el agua se mueve a través del medio poroso; consecuentemente se espera un incremento, generalmente muy pequeño, en el caudal captado. La Fig. 6.21 muestra el incremento de caudal captado en función a la relación de longitudes de acuífero y filtro, y la relación de permeabilidades.

Figura. 6.21 Influencia en el caudal captado por una galería en función a la variación de permeabilidades y espesores de un filtro



Este mismo razonamiento puede aplicarse al caso de la pared filtrante (barbacanas) de la cámara de la galería: debe ésta tener suficiente permeabilidad (no constituirse en obstáculo a las líneas de corriente), para permitir que el caudal aprovechado sea máximo. Este tópico es discutido más ampliamente en *criterios de diseño de barbacanas*. (ver numeral 6.5)

Otro elemento que gobierna definitivamente en el caudal captado por la cámara, es la profundidad a la que ésta se implanta, se cita por ejemplo el caso de Montecillo en que localizada a 7 m de profundidad capta 133 l/s frente al caso de Maldonado a 0.8 m de profundidad, capta 35 l/s. Naturalmente otros factores hidrogeológicos determinan el aprovechamiento de esos volúmenes.

CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA MUROS DE GAVIONES

Una ventaja que ofrece la utilización de gaviones es la baja demanda de mano de obra especializada, pudiendo los usuarios participar en el acopio y acomodo de los bolones en los gaviones.

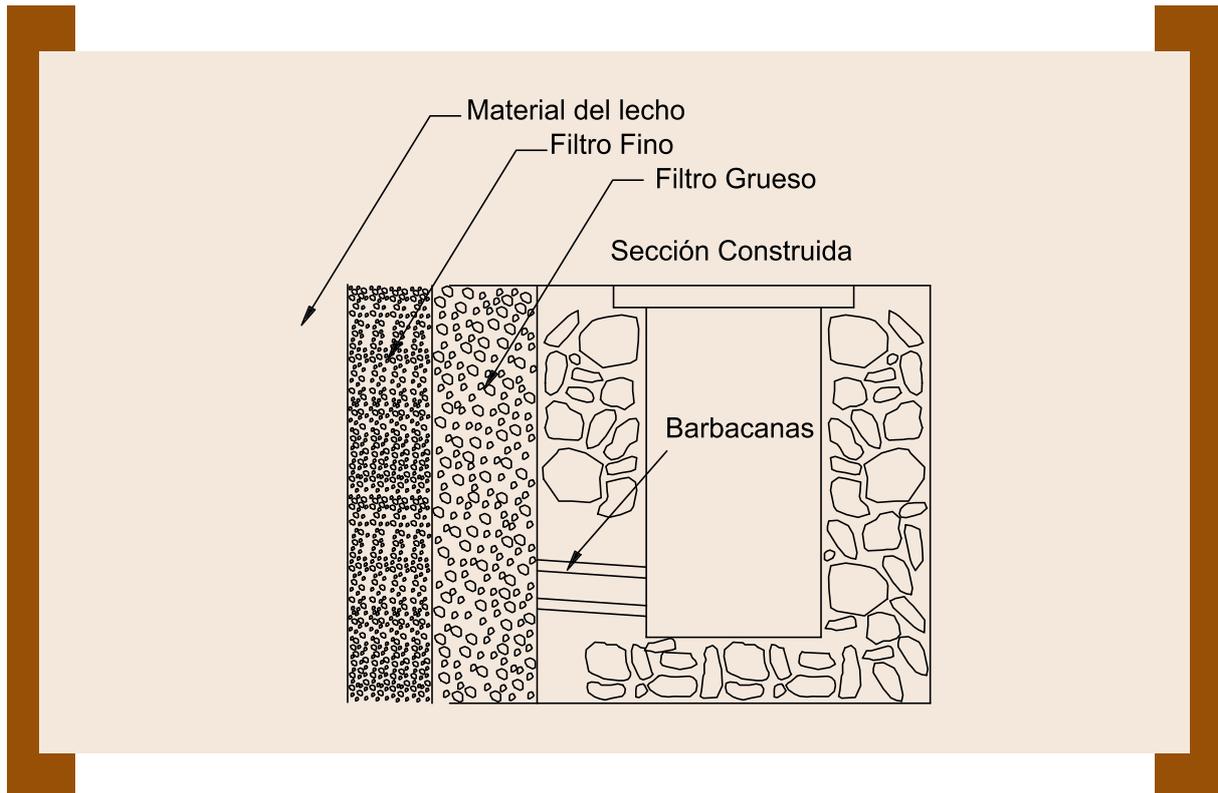
Un óbice para la extensión de su uso, es la limitada experiencia existente al momento sobre la vida útil de los gaviones; en todo caso se presume estar acondicionada al buen desempeño de los filtros.

Siempre debe considerarse la profundidad de implantación de la obra, de modo que ella la proteja contra los procesos morfológicos que desarrolla el río en su superficie (erosión, socavación y sedimentación). En el caso de la galería Taquiña, por ejemplo, ubicada a la salida de la cuenca de alta pendiente, sus filtros están en proceso de agradación, habiendo socavado el lecho del río en 5 años una profundidad de 1.5 m.

6.5. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE FILTROS

El filtro es un componente muy importante en el diseño de las galerías filtrantes, puesto que de él depende la eficiencia del funcionamiento de la obra. El filtro es un conjunto de material clasificado en capas de diferente granulometría, y colocado aguas arriba de los orificios o barbacanas por donde entra el agua a la galería. Esa disposición muestra la Fig. 6.22

Figura 6.22 Esquematación de la disposición de filtros en una galería filtrante.



En la evaluación realizada a los casos que componen el estudio, se ha visto que ninguna de las galerías tiene el filtro construido de acuerdo con las condiciones para un buen filtro, pese a que en la mayoría de los documentos de los proyectos incorporan especificaciones técnicas que detallan el proceso de selección del material y de verificación de granulometrías.

Los filtros colocados en todas las galerías, sin excepción, son el producto del material de excavación previo, y que ha sufrido un proceso de clasificación manual sin cumplir las especificaciones. Por ello es muy limitado lo que se puede mencionar como experiencia propia en la eficiencia y buen desempeño logrado por los filtros existentes.

Aparentemente, la escasa dedicación en tiempo y recursos otorgada a la construcción de los filtros, parece ser atribuible a la subestimación de las funciones que ellos cumplen. Una reflexión sobre las causas para ello permite enunciar:

- La ausencia de conocimiento de la importancia del filtro
- La falta de un buen asesoramiento técnico para la clasificación del material para filtro
- El elevado costo para este proceso de clasificación y realización de pruebas de laboratorio del material para filtro

Por ello, una recomendación importante es cuantificar apropiadamente los costos de implementar un buen filtro y sobre todo, la supervisión del Proyecto, hacer cumplir lo diseñado.

RELACIONES PARA EL DISEÑO DE FILTROS

Específicamente, los filtros y drenes deben, durante la vida útil de la galería y al menor costo de mantenimiento,

- Permitir el libre movimiento del agua al interior del filtro (requerimiento de permeabilidad)
- Retener el material del subálveo (requerimiento contra tubificación)
- Tener suficiente capacidad de transporte de agua (requerimiento de descarga)

Las dos primeras funciones presentan tendencias contrarias en cuanto a la granulometría del filtro, pues la primera requiere que el diámetro de los poros del filtro sea suficientemente grande, mientras que la segunda obliga a que dichos poros sean reducidos.

Puesto que el tamaño de los poros es función del tamaño de las partículas y de su distribución granulométrica, las especificaciones siguientes están dadas en función de las granulometrías de los materiales.

Se detallan las recomendaciones basadas en investigaciones experimentales realizadas por Terzaghi, por laboratorios del Waterways Experiment Station y por el U. S. Bureau of Reclamation que indican se deben cumplir las siguientes condiciones para un buen filtro:

$$5 \leq \frac{D_{15} \text{ del filtro}}{D_{15} \text{ del acuífero}}$$

- a.- Esta especificación garantiza que la permeabilidad del filtro sea por lo menos 20 veces mayor que la del acuífero, lo cual permite un libre escurrimiento a través del filtro. Se expresa:

$$\frac{D_{15} \text{ del filtro}}{D_{85} \text{ del acuífero}} \leq 5$$

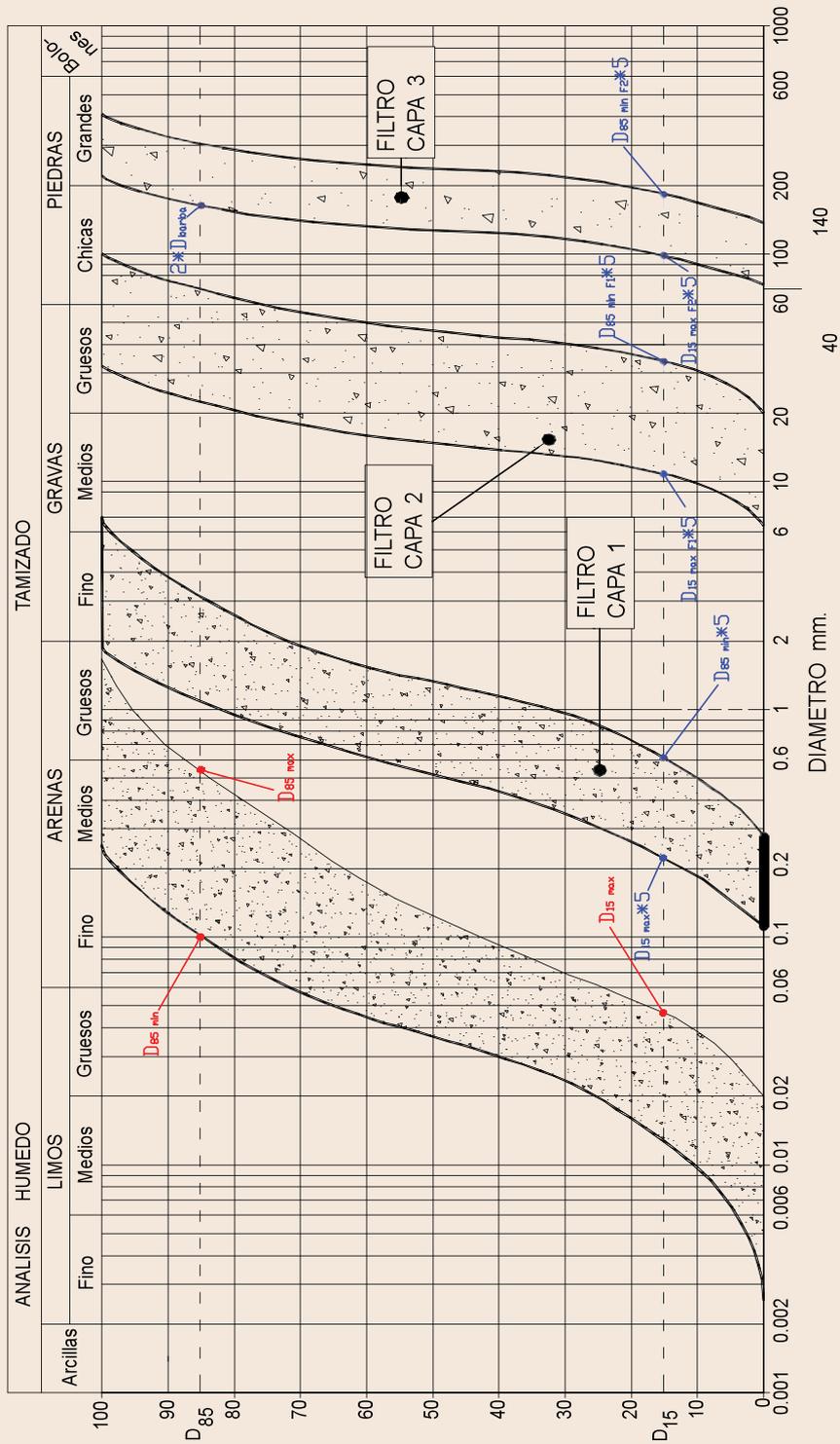
- b.- Esta especificación asegura que las partículas del material del acuífero serán retenidas por el filtro y se evitará su taponamiento.

$$\frac{D_{85} \text{ del filtro}}{\text{Máximo diámetro de las barbacanas}} \geq 2$$

- c.- Esta especificación impide que el material del filtro ingrese en la galería.
- d.- El material que constituye el filtro debe ser de buena gradación y contener menos del 5 % de finos que pasan la malla No. 200. Esta especificación permite asegurar que las partículas finas del propio filtro serán retenidas por sus partículas de mayor diámetro.

En las ecuaciones (a) y (b) la expresión D_{15} es el diámetro para el cual 15 % de las partículas son de menor tamaño, y la malla No. 200 se refiere a que el material que se utiliza como filtro debe ser limpio y no debe contener partículas finas por más del 5 % que pasa la malla No. 200. La Fig. 6. 23 muestra esta metodología en forma gráfica.

Figura 6.23 Ejemplo de diseño de un filtro que consta de tres capas, según Design of Small Dams (US Bureau Reclamation, 1987)



Como se observa en la figura 6.23, si el material del acuífero es muy fino, es necesario emplear más de una capa de filtro. El diseño de las próximas capas seguirá el mismo procedimiento, considerando a la capa anterior más fina como el material que se va a proteger. El diámetro máximo para el material de filtro debe ser de 3" según experiencia del PRONAR.

Aunque alguna literatura menciona que el espesor de cada una de las capas de filtro no es necesario que exceda 6 pulgadas (15 cm) para lograr una filtración eficiente, sin embargo, para evitar que durante la construcción queden tramos sin el recubrimiento necesario se pueden emplear espesores mayores, quizá de 25 a 35 cm (Halcrow, 1990) o de 1 m (U.S. Bureau) a fin de disminuir el riesgo de que material fino del subálveo ingrese a la obra.

6.6. CRITERIOS PARA DISEÑO DE BARBACANAS

El agua subterránea moviéndose en el medio poroso del acuífero debe emerger a la presión atmosférica cuando sea recibida por el canal colector de la cámara de la galería filtrante.

La transición entre el flujo en medio poroso y la superficie libre se efectúa por intermedio de las barbacanas o mediante drenes en el caso de que la galería disponga de tuberías perforadas para captar el agua.

Las barbacanas pueden ser de cualquier material que brinde suficiente resistencia y durabilidad. Según el trabajo de campo efectuado, se prefiere el PVC por su ligero peso y portabilidad; en otros casos se prefiere desalojar pedrones convenientemente de la mezcla de concreto del muro obteniéndose el mismo efecto.

Las barbacanas suelen ser dispuestas también en el techo de la cámara de la galería (v. gr. Caso galería Taquiña) e incluso se permite que la solera sea permeable para tener una superficie mayor expuesta al flujo subterráneo

EXPERIENCIA DEL TRABAJO DE CAMPO

Se presenta una condensación de lo observado en campo en lo referido al desempeño de las barbacanas:

- En todos los casos las barbacanas se extienden de extremo a extremo de la galería, en vertical cubren casi toda la altura, sin llegar al ras de techo.
- El diámetro de las barbacanas oscilan desde 1 pulgada (caso de Maldonado en Potosí), a 1½" (Río Seco y Tajras) y las restantes con 2"
- El espaciamiento entre barbacanas es variable. Desordenado como en Tajras, con separaciones de 10 cm (Taquiña) hasta 30 cm como en Zamora y Tipapampa.
- La galería Taquiña es la única que tiene dispuestas barbacanas en el techo; en otras galerías si hay contribución desde el techo es por la mala unión de las losas que la conforman.
- Se ha observado en el mes de julio que las barbacanas dispuestas en las filas superiores no aportan caudal pero esto puede cambiar acorde con las fluctuaciones del nivel en el subálveo del río.
- Horizontalmente, no todas las barbacanas de una fila se hallan en funcionamiento
- Se ha comprobado el crecimiento de vegetales que parecen tener sus raíces en el filtro y su parte aérea aflora en el muro a través de la barbacana.

En general, se estima que solo un 30 a 40% de las barbacanas del total funcionarían efectivamente.

6.6.1. Criterios de diseño de barbacanas

Aunque las barbacanas solo sirven en la transición de flujos, sin embargo afectan de dos diferentes maneras al éxito en el rendimiento de la obra en su conjunto. Estos dos elementos son el análisis estructural que debe efectuarse para seguridad de las paredes de la galería, y el hidráulico referido a la capacidad de transporte de caudal que ellas deben tener y no ser insuficientes ante la oferta del subálveo.

CRITERIOS ESTRUCTURALES

El practicar orificios en el muro de la galería, en principio, la debilita estructuralmente. Consideraciones sobre el diseño para muros con orificios pueden hallarse en “Diseño de Estructuras de Concreto” de A. Nilson si la obra habrá de ser de hormigón ciclópeo, o en la “Norma Boliviana del Hormigón Armado CBH-87” si habrá de ser estructura con refuerzo de acero.

Por ejemplo la galería filtrante Taquiña dispone barbacanas cada diez centímetros sin que se detecten indicios que muestren debilitamiento estructural del muro de hormigón.

CRITERIOS HIDRÁULICOS

Dos principios deben guiar las consideraciones para el diseño hidráulico de las barbacanas:

- a) Que brinden suficiente capacidad para transferir el agua del subálveo hacia la galería, incluso bajo condiciones desfavorables de mantenimiento o construcción.
- b) Que el conjunto barbacanas – muro de la galería, no se constituya en un obstáculo al flujo del agua.

La capacidad del orificio puede ser expresada en términos de *velocidad permisible* de aproximación y continuidad de la masa de fluido entrante desde el subálveo, y el evacuado por las barbacanas.

$$Q_a = C \cdot A_{tb} \cdot v$$

En que A_{tb} es el área total de barbacanas, C un coeficiente que refleja las pérdidas de energía debido al estrechamiento de las líneas de flujo al ingresar a la barbacana, y v es la velocidad permisible de aproximación.

Para la adopción de un valor para la velocidad de aproximación se dispone de:

- Halcrow (1990), que esté limitado a 0.1 pie/segundo
- Montaña (1999), que no sobrepase a 0.03 m/s
- Roscoe Moss Inc. (1992) apoyó una investigación sobre velocidades en filtros de bombas tanto en campo como en laboratorio. Se pueden tolerar velocidades hasta de 0.07 m/s.

Debe dotarse, (Halcrow, 1990), un área de barbacanas suficiente de manera que, aún cuando el 50% de ellas queden bloqueadas después de cierto tiempo de operación, trasieguen caudal a la velocidad de 0.03 m/s.

El diámetro de las barbacanas no debe ser superior a 1.5” (Montaña, 1999) y debe ser compatible su diámetro con los requerimientos de diseño de filtros

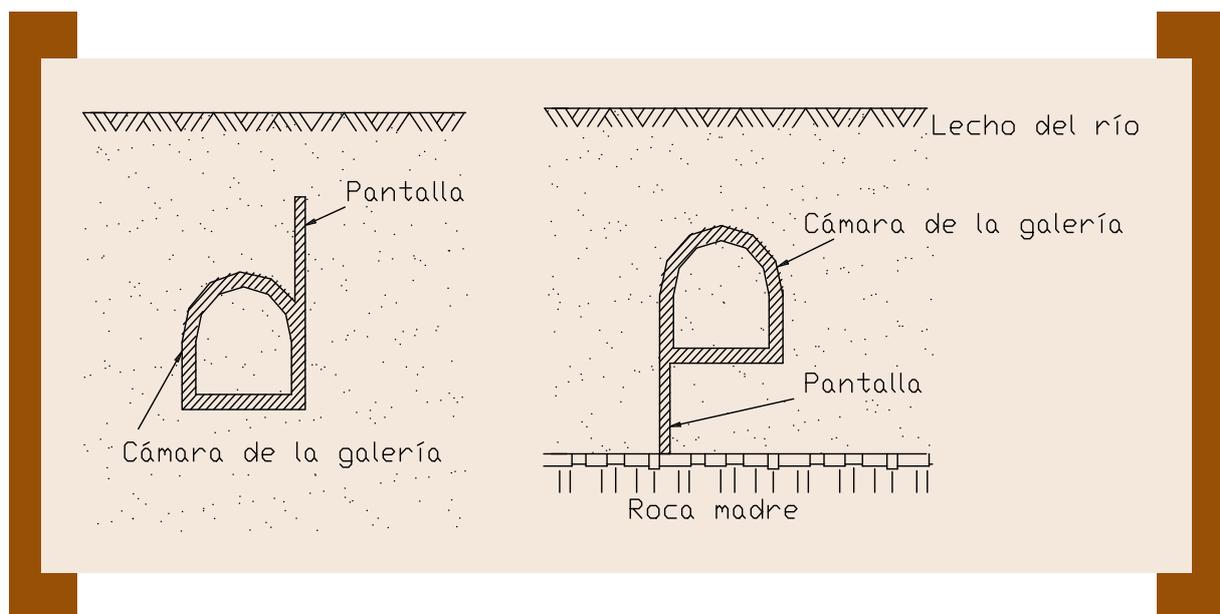
El segundo elemento, de no obstaculizar el flujo se traduce a través de:

- las pérdidas de energía por el estrechamiento de las líneas de corriente al ingresar el agua a las barbacanas no sea excesiva. Una forma de considerar ello es por medio del coeficiente C . Cuanto más próximo esté a la unidad, menos pérdidas existirán. Este valor se halla tabulado en literatura de mecánica de fluidos. Por ejemplo, el caso que se aproxima el flujo de aguas subterráneas a través de una barbacana tuviera un C igual a 0.8 (Berlamont, 1992). Otra consideración importante es que el valor de la velocidad de aproximación de 0.03 m/s confiere pérdidas de energía despreciables (Roscoe Moss, 1992).
- La proporción entre el espacio de barbacana y el muro no debe ser superior al 6%. Esta aseveración está respaldada por la experiencia de Halcrow (1990), Montañó (1999) e investigaciones en filtros de bombas (Jackson- Roscoe Moss, 1990)

6.7. CRITERIOS PARA EL EMPLEO DE PANTALLAS

Se denomina pantalla al muro dispuesto por sobre la galería filtrante o por debajo de ella, y que se extiende o todo lo largo de la galería, como se puede apreciar en la Fig. 6.24.

Figura. 6.24 Disposición frecuente de galerías filtrantes con pantallas interpuestas al flujo subterráneo



La principal función que cumple una pantalla es la de impedir el flujo del agua, aguas abajo de la galería. Por ejemplo, en las galerías situadas en ríos con alta pendiente (caso de galerías Taquiña y Tipajara) se han encontrado pantallas superiores para mejor captación del caudal subáqueo.

La Fig. 6.25 muestra el cambio en el patrón de las líneas de corriente cuando se ha interpuesto una pantalla; se observa tanto en a) como en b) el efecto de forzar el flujo a la galería; también se identifica zona de agua subterránea detenida contigua a las pantallas y que actúa como encauzador de líneas de corriente.

Del trabajo de campo realizado, se ha encontrado que las pantallas han sido construidas de hormigón ciclópeo (caso Tipajara, Huayña Pasto Chico, Condor Chinoca) y de hormigón armado (caso Taquiña). En todos los casos las pantallas se han extendido sobre todo el ancho del río.

Una somera evaluación de las ventajas de adicionar una pantalla interpuesta al flujo se realiza en términos de caudal captado frente al de diseño como muestra la Tabla 6.4.

Se observa que a pesar de que la pantalla es efectiva para encauzar las líneas de corriente, sin embargo, no permite ser definitivo para juzgar la efectividad en términos de rendimiento de caudal (caudal captado frente al esperado captar).

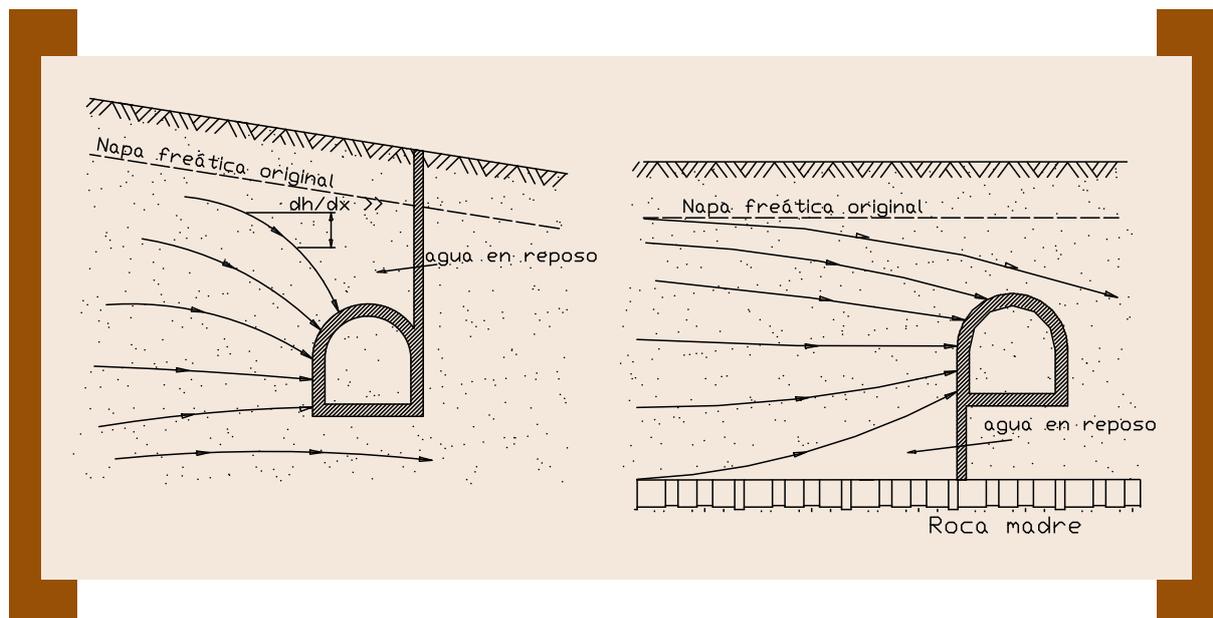
Tabla 6.4 Relación de galerías filtrantes con pantallas y caudales captados

Galería	Dpto.	Pend. Río %	Q Galería aforado (l/s)	Q Galería diseño (l/s)	Descripción pantalla
Huayña Pasto Chico	Oruro	1.8	19	21	H°C° en la parte inferior
Condor Chinocha	Oruro	1	45	50	H°C° en la parte inferior
Taquiña	Cbba.	15	4	19	H°A° en la parte superior
Tipajara	Cbba.	9.7	31	19	H°A° en la parte superior

No obstante, la apreciación anterior debe tomarse con cuidado porque los caudales aforados fueron registrados durante meses de julio y agosto y pueden no ser el mejor parámetro para caracterizar el desempeño global de las galerías.

Otro hecho interesante de observar es que las galerías construidas en el altiplano (ríos con pendiente pequeña) han dispuesto las pantallas en la parte inferior de la galería y con misión de llegar a la roca madre. Por el contrario, las galerías en quebradas de pronunciada pendiente en el Valle de Cochabamba, son las que disponen la pantalla en la parte superior.

Figura. 6.25 Líneas de flujo dirigiéndose hacia las galerías con pantalla superior e inferior



Bajo la premisa de que las líneas de flujo corren casi paralelas al relieve topográfico del lecho del río, en el Altiplano las líneas de corriente tendrán muy poca pendiente, caso que se contrapone con el de la Taquiña (15% de pendiente) que da pauta a pensar que parte del flujo subterráneo superior no se captase si no se interpone una pantalla (ver Fig. 6.25). Este razonamiento puede ser rebatido si en la etapa constructiva se dedica suficiente énfasis y cuidado a la construcción de los filtros de la galería, que se transformarán en *succionadores* de líquido hacia la obra.

Otro aspecto a analizar es que el incluir una pantalla a la galería, implica elevar el costo del proyecto. En su caso podrían utilizarse otros materiales alternativos al hormigón como por ejemplo, una trinchera de arcilla especialmente seleccionada y compactada, o geomembrana. Este último

elemento adicional la ventaja de su flexibilidad ante el eventual movimiento sísmico que afectara a los elementos frágiles.

LAS PANTALLAS Y SU REPERCUSIÓN EN LA GESTIÓN

La decisión de incluir una pantalla impermeable en una galería debe ser muy bien sopesada, especialmente si se va a disponerse una en la parte inferior de la galería. En ese caso, los efectos de la pantalla podrán ser:

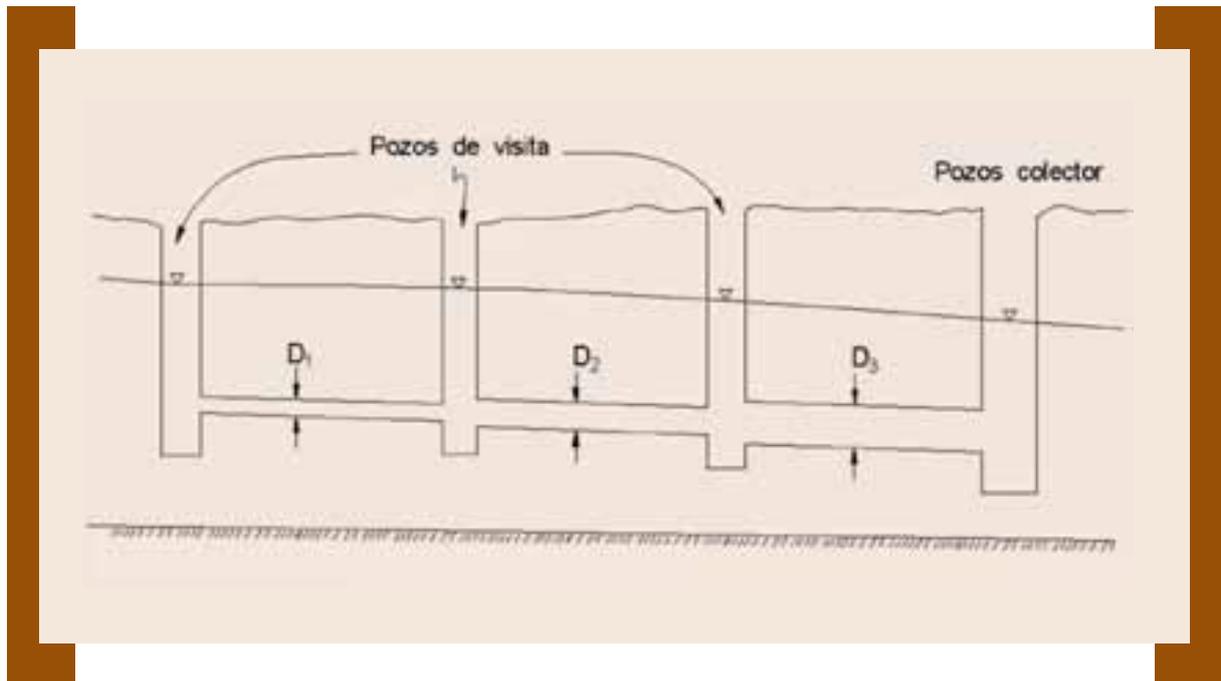
- Muy buena parte del caudal subterráneo será captado, al menos durante estiaje.
- Si existen poblaciones aguas abajo con galerías emplazadas en el mismo río, ellas posiblemente verán mermadas fuertemente sus captaciones

Habrà de tomarse en cuenta que si la galería no está extendida de orilla a orilla del cauce, es posible que no todo el caudal sea derivado a la obra, sino que un volumen **base** subterráneo siga viajando hacia otras galerías escalonadas como se explica en el capítulo 5.

Por todos los antecedentes presentados, la decisión por utilización de pantallas debe quedar bajo responsabilidad de una entidad técnico-social que involucre a todos los actores aguas arriba y abajo (sistemas de riego, financiadores, proyectistas y unidades de seguimiento).

6.8. COLECTORES COMO CÁMARA DE LA GALERÍA FILTRANTE

Figura 6.26 Galería de infiltración conformada por un colector circular



Durante el trabajo de campo, se vió que se añadieron tuberías ranuradas como prolongaciones a galerías filtrantes existentes. En este documento, se denomina colector a estas tuberías que se encargan de recoger y encauzar todo el caudal captado por los orificios practicados hacia la cámara de la galería. Este conducto puede ser de diferentes formas en cuanto a su sección transversal, aunque se prefiere circular. El colector puede ser de hormigón si la obra de captación debe extenderse sobre una gran longitud. Su comparativo bajo costo de implementación la torna atractiva, pero está supeditada a la practicabilidad de su mantenimiento. La Fig. 6.26 muestra una esquematización de colector y pozos de visita.

El diseño de este colector de la galería, se realiza tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- La sección transversal debe tener la capacidad suficiente para transportar el caudal máximo de diseño.
- Se debe prever un máximo de área abierta para la entrada del agua del acuífero al colector, esta área debe cumplir con las recomendaciones para el diseño de barbacanas y de drenes.
- Dependiendo de la importancia de la galería, será necesario prever que el colector sea accesible para la inspección, refacción y limpieza. Por esta razón, a veces la sección transversal esta determinada por esta recomendación, pese a que el cálculo hidráulico reporte una menor sección para el caudal máximo a captarse.

Si bien en muchas ocasiones diámetros o secciones pequeñas (menores a 15 cm) tienen la capacidad para conducir el caudal de diseño, es preferible usar diámetros o secciones mucho mayores para facilitar la limpieza y el mantenimiento. Sin embargo, esta decisión esta sujeta a un análisis particular de costos, facilidad de mantenimiento, importancia de la obra y disponibilidad del material. Por ultimo y muy importante la tradición y experiencia en este tipo de obras en la zona por parte de los usuarios, de tal manera que no se imponga estructuras ajenas a sus costumbres (flexibilidad de la obra).

Además, es necesario considerar, que la sección permita un área abierta (perforaciones) adecuada para la entrada del agua.

En casos de galerías muy largas, es conveniente usar tuberías telescópicas a fin de reducir costos, pero teniendo siempre presente la posibilidad de limpieza eventual. Un apropiado espaciamiento (de 50 m a 100 m) entre cámaras de inspección permitirá identificar, aislar y reparar tramos en que el colector pueda sufrir taponamientos o roturas. Una forma de identificación es de efectuar un control de caudales en cada cámara. Una diferencia notable debe llevar a reflexionar sobre posibles inconvenientes.

Uno de los aspectos al cual debe dedicarse mucho énfasis es el diseño apropiado de los filtros que rodearán a los colectores. Este diseño debe referirse a lo detallado en el numeral 6.5.

6.8.1. Pendiente del colector

El colector a lo largo de la galería, para evacuar las aguas debe tener una pendiente tal que garantice su funcionalidad (Halcrow, 1990):

- Como los colectores tendrán una sección mucho menor que la cámara de la galería, el problema de acumulación de material fino en su base debe considerarse especialmente. Para ello es beneficioso dotarle al colector de una pendiente tal, que produzca una velocidad de auto limpieza. De esta manera, el material fino se depositará en las cámaras de inspección, a partir de las cuales, su extracción al río es menos problemática.
- La pendiente que se le dé al colector debe producir una velocidad mayor a 0.60 m/s. Capaz de producir el arrastre del material fino que haya ingresado por barbacanas o por el viento. Una pendiente pronunciada, induciría, en casos de galerías de gran longitud, una profundidad excesiva de excavación con repercusión en los costos de construcción. Este aspecto debe ser sopesado apropiadamente.

6.8.2. Orificios de entrada al colector

La localización y el área de los orificios practicados sobre el colector dependen principalmente de la cantidad de flujo, orientación de la obra, de la forma de entrada del flujo y de la cantidad de caudal a captarse.

Para el diseño de las perforaciones debe tenerse en cuenta los mismo principios que para el de barbacanas:

- Que brinden suficiente capacidad para transferir el agua del subálveo hacia la galería
- Que los orificios no se constituyan en obstáculo al flujo del agua.

Velocidades altas o bajas dependen de las características del acuífero. En acuíferos de alta permeabilidad, que presentan un alto porcentaje de grava gruesa, se pueden usar los valores más altos de velocidad de entrada por el menor riesgo de penetración de finos.

El área abierta por unidad de longitud del conducto estará dada por la siguiente expresión:

$$A = \frac{Q_u}{V_e C_c}$$

Donde:

A = Área abierta por unidad de longitud del colector o conducto.

Q_u = Caudal que se espera rinda la galería por unidad de longitud.

V_e = Velocidad de entrada por el orificio.

C_c = Coeficiente de contracción del orificio.

Es recomendable usar la mayor cantidad de área abierta para tener, siempre que sea posible, velocidades de entrada bajas y que éstas nunca sean perjudiciales, como sí pueden serlo las velocidades de entrada altas.

Consideraciones adicionales y un procedimiento de diseño de orificios para el ingreso de agua a la captación subterránea se presentan en el numeral 6.5

6.8.3. Forma, tamaño y distribución de las perforaciones

El tipo de material de que está fabricado el conducto, determina la forma de las perforaciones. Cuando el conducto es de PVC, las perforación circulares o ranuras son las más indicadas, pues, se las puede realizar con taladros manuales o eléctricos o sierra mecánica incluso al pie de obra. En tuberías de hormigón, las ranuras pueden realizarse durante la fragua del concreto o taladrando, pero no por impacto.

Las dimensiones de las perforaciones dependen de las características: forro que sirve como filtro. Según el *Design of Small Dams* del *Bureau of Reclamation* la relación que debe existir entre el ancho de perforación y el tamaño de los granos del filtro es,

$$\frac{D_{85\text{grava}}}{A_p} \geq 2$$

En que el D_{85} de la grava, es el tamaño de la abertura de un tamiz, por donde puede pasar el 85 por ciento, (porcentaje por peso), del material. Es decir, que el 85 por ciento de los granos del filtro son de menor tamaño que la abertura del tamiz, y A_p es el ancho de las perforaciones en el colector o conducto

La distribución de las perforaciones debe hacerse de una forma tal que no reduzca sustancialmente la resistencia original de la pared del colector a las cargas externas.

En colectores de forma circular, tanto las perforaciones en forma circular como las de forma de ranura, se acostumbra distribuirlas uniformemente en el área perimetral, puesto que las perforaciones uniformemente distribuidas evitan crear zonas más débiles por las cuales la tubería pueda colapsar. Las Fig. 6.27 y 6.28 muestran la disposición típica de orificios y ranuras en el colector.

Figura 6.27 Distribución típica de las perforaciones circulares en tuberías de hierro fundido

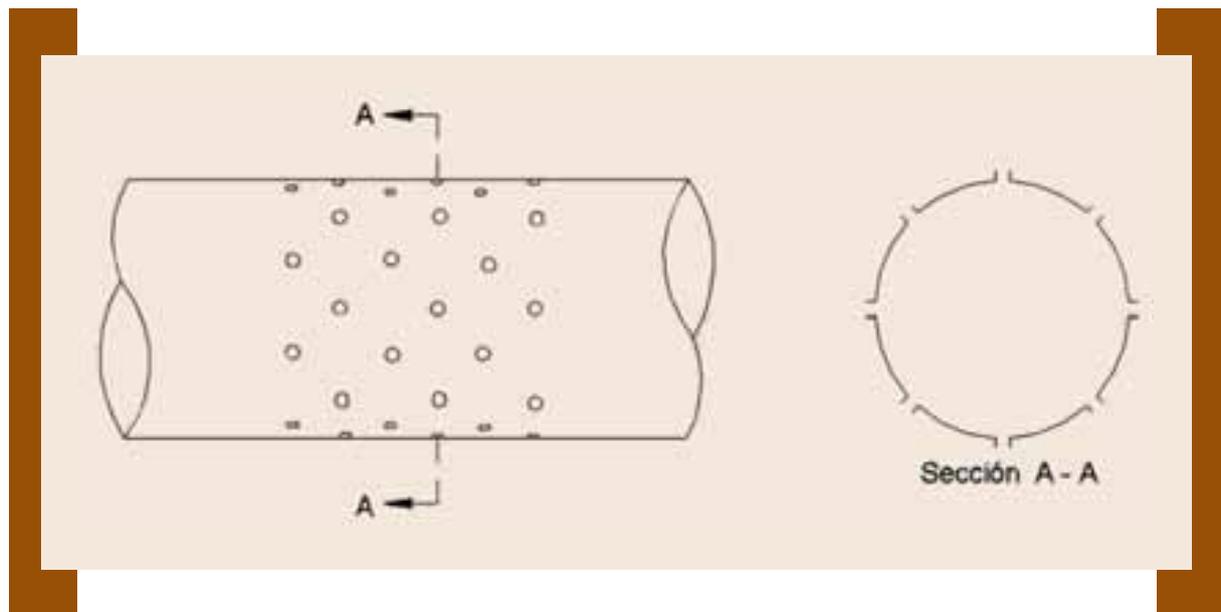
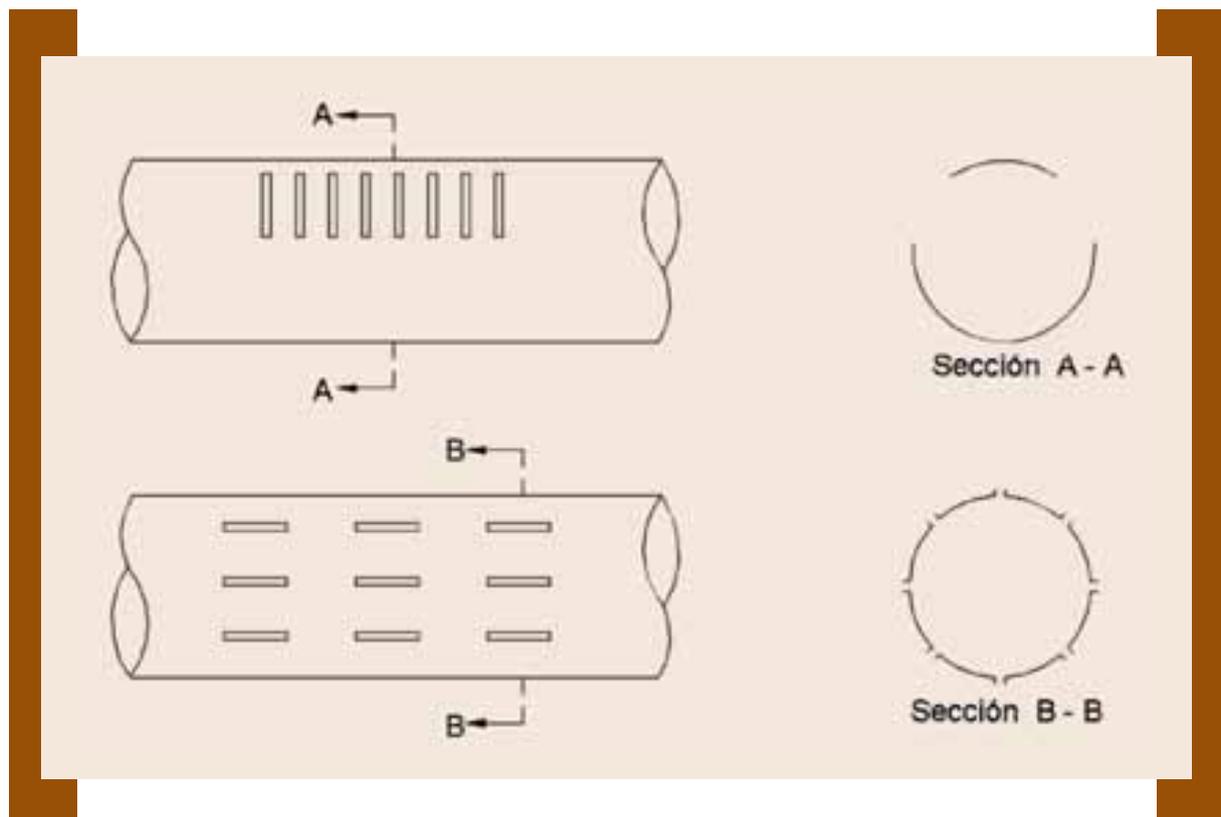
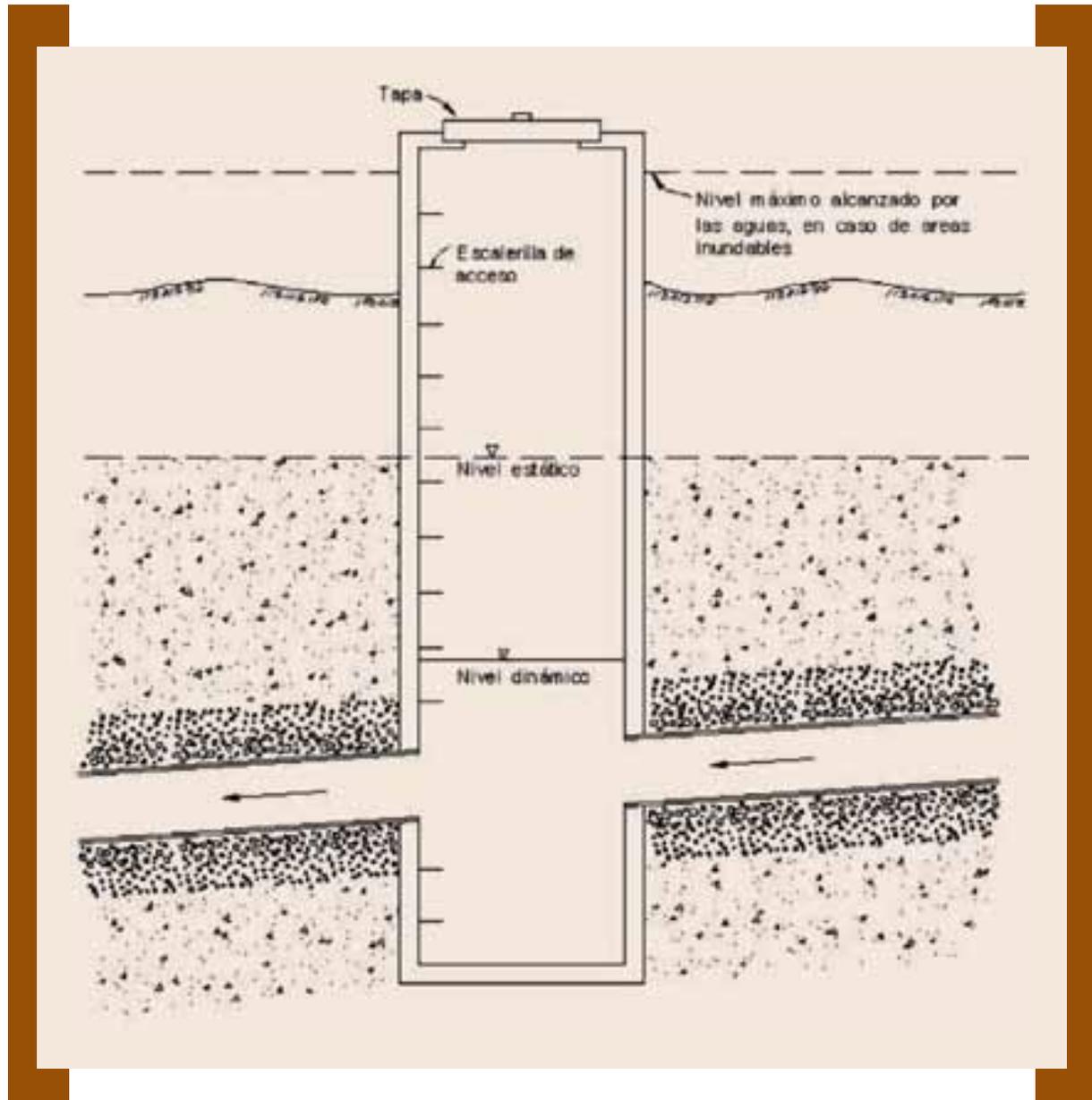


Figura 6.28 Distribución típica de perforaciones en forma de ranuras



6.9. CÁMARAS DE INSPECCIÓN

Figura 6.29 Detalle de una cámara de inspección intermedia



Las cámaras de inspección (ver Fig. 6.29), además de servir como tal, también sirven para el mantenimiento, ingreso para la refacción y bombeo del caudal en caso necesario. Es conveniente colocar cámaras de inspección en el extremo inicial y a intervalos regulares (entre 50 y 80 m), en caso de que la galería sea de gran longitud.

Las cámaras de inspección son similares a las usadas en los alcantarillados sanitarios. El espacio entre una cámara y otra debe ser de unos 50 metros para diámetros menores de 24 pulgadas (600 mm), y hasta de 100 metros para diámetros mayores de 24 pulgadas.

La sección interior de una cámara de inspección se recomienda que sea mínimo de 0.60 X 0.60 m. con el fin de ser cómoda para el acceso de una persona y herramientas de trabajo.

Estas cámaras al igual que el pozo colector, deben tener el fondo y las paredes impermeables.

Además, la elevación de la cámara debe estar por encima del nivel máximo que alcanzan las aguas, en caso de que la galería deba estar localizada en un área inundable.

Si la cámara debe estar ubicada en el lecho de un río con mucho arrastre de material grueso (piedras y bolones), será mejor diseñar las cámaras de inspección hasta un nivel que quede enterrado bajo del lecho del río, hasta una profundidad que la erosión no la descubra, y además colocar dentro de la cámara una tapa interior por seguridad de cualquier accidente por erosión.

6.10. TIPO DE MATERIALES EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE GALERÍAS FILTRANTES

Las galerías filtrantes en nuestro medio por lo general se construyen aprovechando los materiales locales (piedra, cascajo y arena) y con la participación de mano de obra no calificada local, y con co-financiamiento de alguna entidad pública o privada. En algunos casos se ha visto que las galerías se han construido en ausencia de cemento y hierro, utilizando la piedra acomodada y mortero de cal como ligante, sobre todo en aquellas obras de antigua data. Aunque algunas de ellas acusan el paso del tiempo a través de su deterioro, en general el material empleado no es un elemento importante que determine el éxito de la obra. Lo que sí tiene repercusión es el conocimiento de cómo usarlo apropiadamente para captar todo el potencial que brinda el subálveo del río. Las Figs. 6.30, 6.31 y 6.32 muestran fotos de galerías empleando los materiales típicos.



Figura 6.30 Mampostería seca empleada para conformar los muros de una galería



Figura 6.31 Galería filtrantes que utiliza gaviones en sus paredes

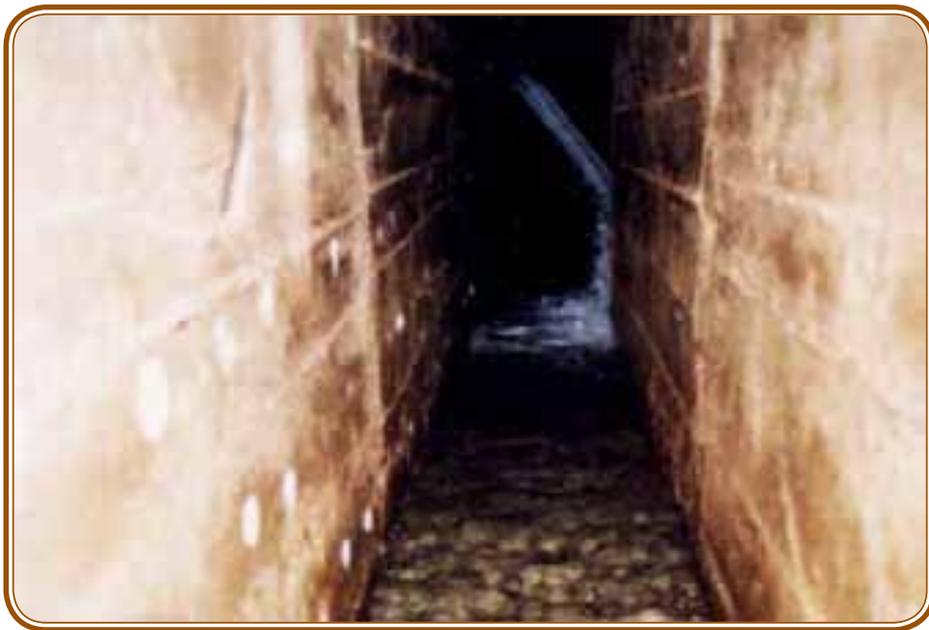


Figura 6.32 Galería construida con hormigón ciclópeo. Se observa las barbacanas practicadas

Del trabajo de campo realizado, se ha observado que los materiales empleados frecuentemente son:

- Hormigón ciclópeo
- Mampostería de piedra
- Hormigón armado
- Mampostería seca (muro de piedra acomodada)
- Gaviones

De la evaluación de campo de las galerías visitadas, ninguna muestra fallas estructurales que comprometan su seguridad. Lo único que se reporta es que el caudal no es el esperado o que ha sufrido la obra colmatación (galería de Maldonado). Sin embargo de ello, se citan algunos criterios estructurales de referencia para el diseño de sus partes.

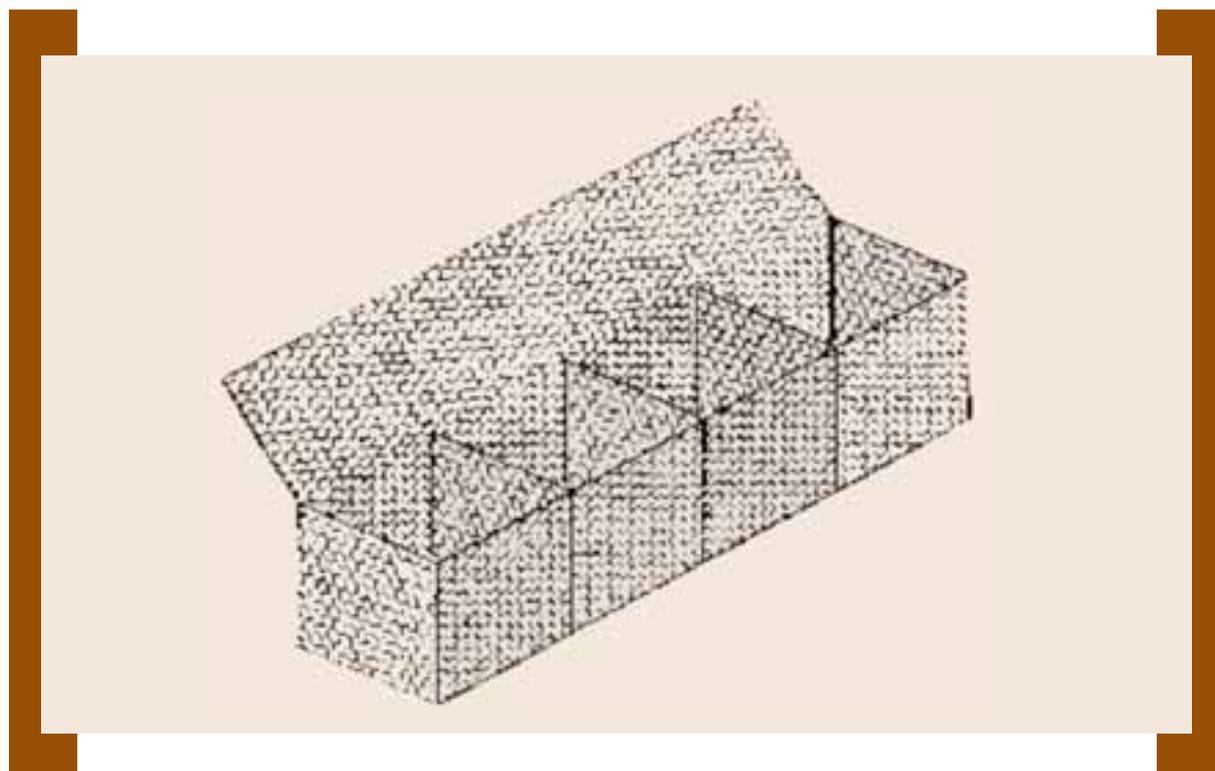
6.10.1. El gavión como material de construcción de galerías

En el trabajo de campo realizado en la zona de Mizque - Aiquile, se ha relevado información sobre la construcción de galerías filtrantes cuyas paredes laterales están constituidas por gaviones. La evaluación de ellas ha reportado su gran ventaja en términos de superficie abierta al flujo (porosidad) y bajo costo de implementación. Sin embargo, por ser obras de reciente construcción (3-4 años de vida) no se tiene experiencia completa sobre su desempeño a lo largo de su vida útil.

Adicionalmente, se puede añadir a favor de este material su facilidad de construcción, no requerir de mano de obra especializada y utilización de material (piedra) del mismo sitio de la obra. El diseño estructural requiere de rigidización, por lo cual se observó diseños que incluyen una estructura de hormigón armado como esqueleto de todo el conjunto. Con esto se consigue que la sobrecarga del terreno por encima de la galería no descansa sobre los gaviones.

Información amplia sobre la construcción y disposición de gaviones se puede encontrar en la literatura especializada; en este documento se acompaña apenas lo suficiente para dar información al lector. Para las obras de contención, y actualmente en galerías filtrantes generalmente son utilizados gaviones tipo caja. En casos donde la estructura esté parcial o totalmente sumergida, o también donde esté apoyada sobre suelos de baja capacidad de soporte, son asimismo utilizados los gaviones tipo saco en las camadas inferiores.

Figura 6.33 Esquema de gavión¹



Los gaviones caja son elementos en forma de prisma rectangular (ver Fig. 6.33), subdivididos internamente en células mediante la inserción de diafragmas durante el proceso de fabricación.

Las dimensiones estándar de los gaviones caja se detallan en la Tabla 6.5.

¹ Fuente: Softwear GAWAC, diseño de gaviones

Tabla 6.5 Dimensiones comerciales de gaviones tipo caja²

Gaviones Caja con Diafragma				
Diafragma			Volumen (m3)	Diafragma (cant.)
Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)		
1.50	1.00	0.50	0.75	-
2.00	1.00	0.50	1.00	1
3.00	1.00	0.50	1.50	2
4.00	1.00	0.50	2.00	3
5.00	1.50	0.50	3.75	4
1.50	1.00	1.00	1.50	-
2.00	1.00	1.00	2.00	1
3.00	1.00	1.00	3.00	2
4.00	1.00	1.00	4.00	3
5.00	1.50	1.00	7.50	4

Los gaviones de caja y saco son fabricados con paneles de red metálica en malla hexagonal de doble torsión , 8 x 10 (ABNT 10.514), confeccionados a partir de alambres de acero de bajo tenor de carbono (ABNT 8964).

Los alambres utilizados para la fabricación de los gaviones caja son revestidos con la aleación GALMAC(*) = zinc / 5% aluminio - (ASTM 856 e ABNT 8964), con masa mínima de 240 g/m² de superficie de alambre. Los alambres también podrán recibir un revestimiento suplemental en PVC (ABNT 10.514), obtenido por extrusión y con espesor mínimo de 0,4mm.

Para la fabricación de gaviones saco solamente son utilizados alambres revestidos con GALMAC + PVC, pues estos elementos son siempre utilizados en contacto con ambientes químicamente agresivos.

Peso propio de la estructura en gaviones

El peso propio de la estructura gavionada es calculada en base a la sección del muro y en el peso específico del material de relleno.

$$\gamma_g = \gamma_p (1-n)$$

Donde: γ_g es el peso específico de los gaviones, γ_p es el peso específico de las piedras que llenan los gaviones, y n es la porosidad.

El peso propio de la estructura en gaviones puede variar dependiendo del tipo de material de relleno y/o de la situación de trabajo. Cuando la estructura está parcialmente sumergida, se utiliza el peso específico sumergido en el cálculo del peso propio de la estructura. Este peso específico es utilizado para la parte del muro que se encuentra abajo del nivel del agua y vale:

$$\gamma_g = (\gamma_{sat} - \gamma_a) = \gamma_p \cdot (1-n) + \gamma_a \cdot n$$

$$\gamma_{sat} = (\gamma_p - \gamma_a) (1-n)$$

² Fuente: Consulta a expertos del Programa de Manejo Integral de Cuencas

Donde: g_g es el peso específico de los gaviones, g_{gsat} es el peso específico saturado de los gaviones, g_a es el peso específico del agua, g_p es el peso específico de las piedras que rellenan los gaviones.

Material de relleno

Para el relleno de los gaviones pueden ser utilizados materiales pétreos o no, desde que su peso y características satisfagan las exigencias estáticas, funcionales y de durabilidad de la estructura. Los materiales más usados son aquellos provenientes de cantera (piedra, piedra machacada) o de cauces de ríos (canto rodado). Por obvias razones se debe preferir materiales de mayor peso específico además de formas redondeadas (permeabilidad) antes que materiales friables.

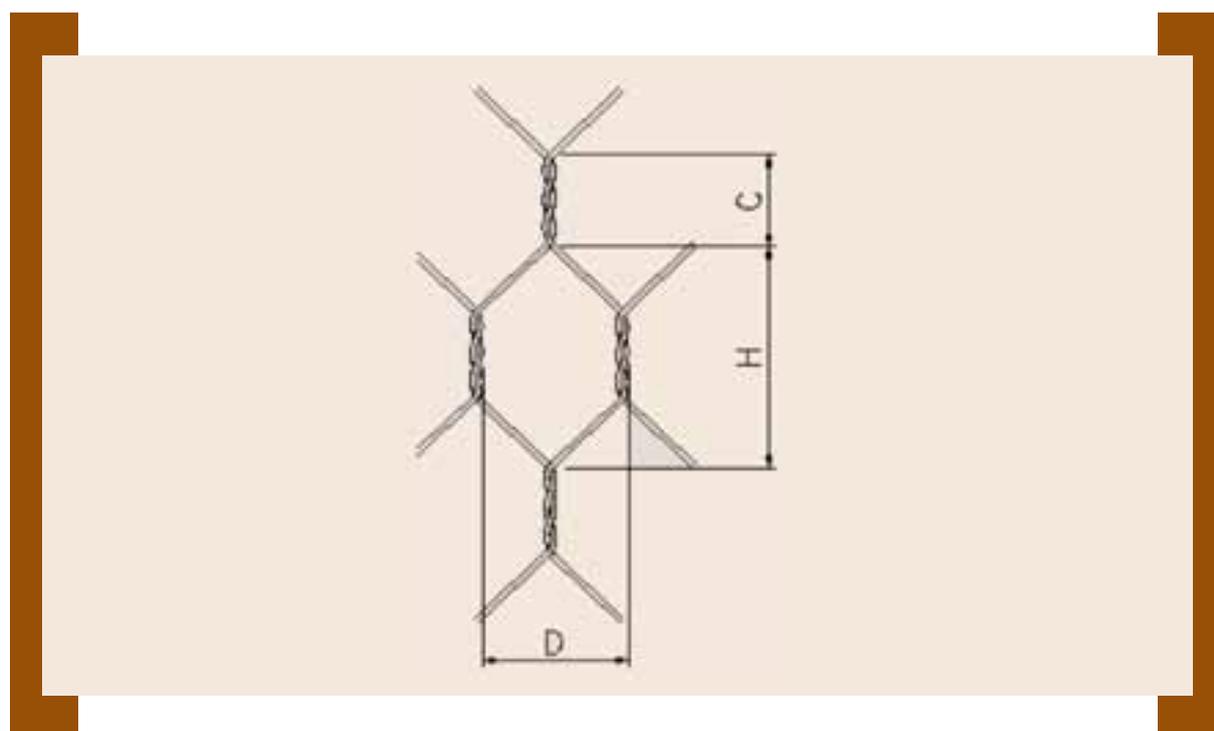
La Tabla 6.6 presenta algunos pesos específicos indicativos para diversos tipos de rocas.

Tabla 6.6 Pesos específicos de materiales rocosos para uso en gaviones

TIPO DE ROCA	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)
Basalto	2.9
Granito	2.6
Caliza Compacta	2.6
Traquita	2.6
Arenisca	2.3
Caliza Tierna	2.2
Taba	1.7

La dimensión del material debe estar entre una y dos veces la apertura de la malla de la red (ver Fig. 6.34), a fin de evitar la fuga del material y garantizar el mayor peso específico posible de la estructura. La porosidad de un gavión se halla entre 30 y 35% ³

Figura 6.34 Aberturas en una malla del gavión



³ Fuente: Consulta a expertos del Programa de Manejo Integral de Cuencas

6.11. ALGUNAS CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL

Se citan en este acápite algunas consideraciones generales para el diseño estructural de galerías filtrantes conformadas de mampostería con piso y losa de cubierta de H°A°. El diseño de otro tipo de galerías podrá realizarse de similar manera. Estas consideraciones son extractadas del Curso de *Obras de Toma y Galerías Filtrantes* de Carlos Montaña (1999), pero siempre podrá consultarse literatura sobre mecánica de suelos, diseño de estructuras e hidráulica.

LOSA DE CUBIERTA

Se ha encontrado que el caso crítico de cargas ocurre (Montaña, 1999) cuando se presenta la máxima crecida en el río, que se aconseja sea la correspondiente a un período de retorno mínimo de 50 años (probabilidad del 2%); en tal caso las cargas sobre la losa se deberán a (ver Fig.6.35),

$$1) \text{ Presión del agua } P_w = \gamma \cdot h_2$$

γ = Peso específico del agua (10kN/m³)

h_2 : Altura de agua desde el nivel máximo de la crecida hasta el techo

$$2) \text{ Al peso sumergido del suelo.- } P_s = \gamma_s \cdot h_1$$

γ_s : peso unitario del suelo seco menos peso unitario del agua

h_1 : altura del lecho del río hasta el techo de la galería.

$$3) \text{ Al peso propio de la losa } = P_r = \gamma_c \cdot t$$

γ_c : peso unitario del concreto, aproximadamente (24 kN/m³)

t : espesor de la losa de techo, en m.

La carga total sobre la losa será la suma de las tres cargas por el área de la unidad de longitud de la losa de techo. Usualmente esta presión se multiplica por un factor de seguridad de 1.4.

La losa se asume como simplemente apoyada en las paredes laterales. La carga vertical que actúa sobre el techo, se distribuye equitativamente a cada pared de la galería. El diseño estructural de la losa de hormigón procede según los métodos convencionales del concreto reforzado.

ARCO BÓVEDA

En caso de obras de data antigua o en situaciones de limitación de presupuesto, es común en el país encontrar obras de hormigón ciclópeo con bóveda en arco para soportar las cargas por encima de la galería.

Wild, citado por Belmonte (1984), da la siguiente expresión para calcular el espesor en la clave:

$$t_c = \sqrt{0.00021 \cdot L} + \frac{L}{12} + \frac{P}{120} + \frac{g_c}{230}$$

Donde:

t_c = espesor en la clave, en m

L = luz del arco, en m

P = sobrecarga en kN/m²

g_c = carga muerta en la clave, en kN/m²

Para el espesor de los arranques, se recomienda tomar valores comprendidos entre 10.5 a 3 veces el espesor en la clave, siendo frecuente $2 \cdot t_c$.

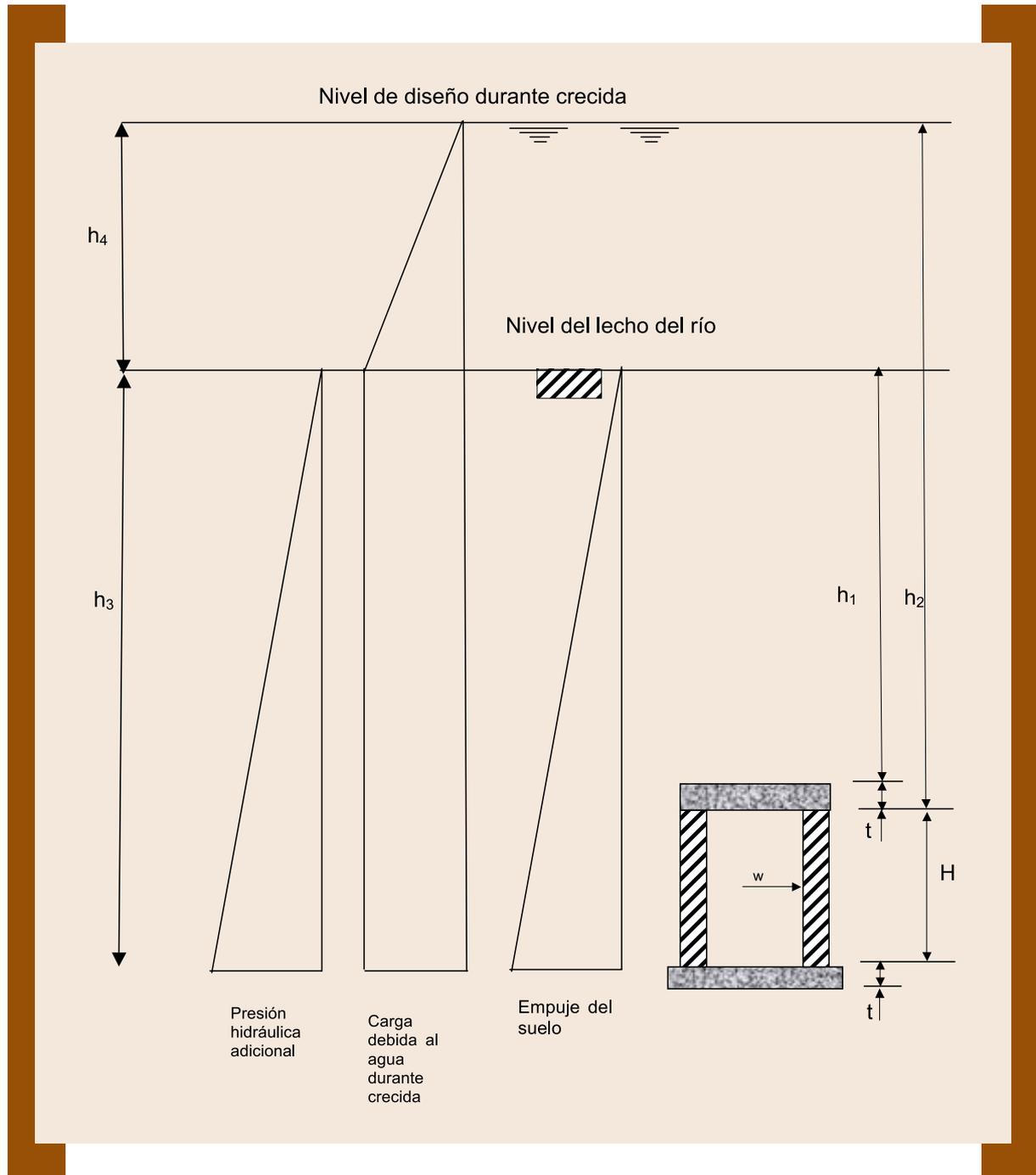
Las fuerzas laterales que actúan sobre las paredes se muestran en la Fig. 35 y comprenden tres partes:

1) Presión hidráulica al nivel del lecho = $\gamma \cdot h_4$

γ = peso unitario del agua.

h_4 = altura de agua encima del lecho del río durante una crecida.

Figura. 6.35 Esquemmatización de las fuerzas actuantes contra la galería filtrante (Halcrow, 1990)



$$2) \text{ Presión efectiva de la tierra} = K_o \cdot \gamma_s \cdot h_3$$

Donde:

K_o = Coeficiente de presión estática = $1 - \text{sen } M$

ϕ = ángulo de fricción interna del suelo. Para suelos no cohesivos se puede tomar:

Arena gravosa y arena compacta	35 - 40
Arena suelta y pizarras	30 - 35
Relleno de roca	35 - 45

h_3 = profundidad del suelo al tope de la galería.

$$3) \text{ Presión hidráulica adicional} = \gamma^* h_3$$

h_3 = profundidad desde el lecho del río a la galería.

La fuerza lateral total actuante en la base de las paredes, es la suma de las tres fuerzas, amplificadas por el factor de carga 1.4.

Las paredes están también sujetas a cargas verticales en la parte superior y fondo de la losa de cubierta y de la losa de piso respectivamente. Estas cargas tienden a comprimir las paredes.

La forma de falla estructural de las paredes es más en corte, como resultado de la acción de las fuerzas laterales. Por tanto se debe calcular el esfuerzo cortante característico admisible y compararlo con el esfuerzo cortante resultante de las condiciones de diseño. A partir de ello se halla las dimensiones del bloque.

Según la norma BS5626 del British Standard Institute, Structural Use of Unreinforced Masonry, las características permitidas de esfuerzo de corte f_v de la mampostería, son:

$$F_v = 51 + 0.6 \cdot G_a \quad (\text{lb/inch}^2)$$

G_a : carga de diseño vertical por unidad de área de la sección transversal = p/w

P : reacción vertical de la pared contra la losa de piso.

w : espesor de la pared.

Por lo tanto, el esfuerzo cortante característico es = $\frac{f_v \cdot w}{2.5}$

Donde: w = ancho del bloque de trabajo.

2.5 = factor de seguridad parcial para esfuerzos de corte en mampostería. Cuando se consideran efectos de mal uso o accidente, se puede reducir a 1.25.

El esfuerzo cortante para las condiciones de diseño se calcula a través de:

$$F = \frac{L \times H}{2}$$

Donde: F = esfuerzo cortante necesario para resistir cargas laterales.

L = carga lateral en la base de la pared.

H = altura de la pared.

Si F excede el esfuerzo cortante admisible, entonces se debe usar un valor mayor de w . Inversamente, si el esfuerzo cortante excede a F , se debe tratar con valores más pequeños de w .

En el diseño de considerarse el corte en la unión entre las paredes y la losa del techo y el piso es también resistido por la pestaña de la losa de techo y el canal de concreto "in situ" insertado en la losa de base.

PISO

Las fuerzas verticales sobre el piso tienen 2 componentes:

- 1) la subpresión del agua en la losa $p_w = \gamma \cdot h$
h = altura del nivel de agua desde el tope de la crecida máxima a la base del piso.
- 2) Las fuerzas verticales superiores $F = N + W$
N = carga vertical sobre las paredes desde el techo.
W = peso de una pared.

A continuación se necesita calcular la presión de apoyo, para ver si excede la capacidad permitida de carga de la fundación de la galería.

La siguiente ecuación asume que la fuerza F se extiende cubriendo el conjunto de la base.

$$\text{Presión de apoyo} = \frac{2 \cdot F - p \cdot w}{w'}$$

Donde: F = fuerza vertical sobre la base, desde una pared.
Pw = subpresión del agua sobre el piso.
w' = ancho de la losa

Capacidades de carga permisibles (ton/ft²)

Arena suelta y grava	= 2 (=1.95 kgf/cm ²).
Arena medio densa y grava	= 4 a 5
Arena fina suelta	= 0.9
Arena con arcilla	= 2
(factor de conversión	= 0.9765 kg/cm ²)

7

CAPÍTULO

CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE GALERÍAS FILTRANTES

7.1. INTRODUCCIÓN

La construcción de una galería filtrante es una operación comparativamente sencilla con relación a otras porque no demanda mano de obra especialmente calificada, métodos constructivos especiales, pero sí exige completas y claras especificaciones técnicas aunada a una buena supervisión de obra.

El cronograma de ejecución debe en lo posible planificar las actividades de excavación, vaciado de losa, paredes y techo para la época de estío a fin de evitar el bombeo y achique cuando los niveles de agua freática comiencen a ascender. En otro caso, y si el cronograma de obras es perentorio, puede encararse obras complementarias de la captación subsuperficial o de los canales del sistema de conducción.

7.2. MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN

Para iniciar la construcción de una galería se debe partir de dos referencias muy importantes sobre las cuales se debe basar la metodología y programación de los trabajos y son los siguientes:

1. Se debe tomar muy en cuenta el periodo y tiempo disponible de construcción.
2. Magnitud de las obras en tiempo y costo

Período y tiempo disponible de construcción

Este es un punto, que debe ser tomado con toda la seriedad, ya que **no permite prórrogas**, porque está limitado por la época de lluvias, por tanto, es necesario tomar en cuenta lo siguiente:

- El periodo donde se debe realizar la construcción, es al finalizar la época de estiaje, esto debido a que en ese momento los niveles freáticos estarán a mayor profundidad, por lo que se tendrán más facilidades constructivas, sin embargo este periodo no debe prorrogarse por ningún motivo, en razón a posibles avenidas tempranas en los ríos con las consecuencias previsibles.

Magnitud de las obras en tiempo y costo

En este punto, es importante tener una clara programación de los trabajos a realizarse, y en su caso acordar actividades paralelas, que permitan tener por adelantado algunas partes (prefabricadas) de la galería, todo esto en función de la magnitud de la obra, además debe estar reconfirmado todo el financiamiento, para evitar contratiempos por esta causa.

Las experiencias recogidas de varias obras, indican que las galerías quedan inconclusas, o se terminan distorsionando los diseños debido a esta causa, y lo que es peor, existen obras que han quedado enterradas por las avenidas a causa de estos inconvenientes financieros, lo que redundará en una pérdida de materiales, horas máquina y mano de obra.

7.3. EXCAVACIÓN

La construcción de la galería se inicia, realizando el **desmonte o limpieza** de: el área que ocupará la galería filtrante, las áreas de bancos de préstamo de agregados y de áreas que temporalmente serán utilizadas para campamento, talleres etc.

La excavación se debe iniciar tomando en cuenta lo siguiente:

- Se debe realizar el replanteo de las obras que componen la galería, de acuerdo a planos de diseño.
- Ver si la extracción del caudal de la galería a construirse es por gravedad o por bombeo.

Si la extracción es por bombeo, se inicia la excavación a cielo abierto sin mayor problema y deben efectuarse de acuerdo a las líneas y rasantes del replanteo, esto hasta encontrar el nivel freático del acuífero. Al llegar a este nivel, será necesario instalar un equipo de bombeo de forma permanente que permita extraer el agua a medida que se continúa con la excavación (el punto donde es recomendable hacer el pozo de absorción de la bomba, será el que está determinado para la extracción del caudal en el diseño).

Si la extracción es por gravedad, lo primero que se debe excavar es el canal de salida de la galería, con el fin de bajar el nivel freático del acuífero, esto evitará el uso de equipo de bombeo, lo que incide grandemente en el costo de excavación y facilidad de trabajo.

De las experiencias recogidas en el desarrollo de este estudio, se ha llegado a la conclusión de que se utilizan como obras de captación las galerías filtrantes (muy especialmente para sistemas de riego) en áreas secas o semiáridas, donde por lo general los ríos que circundan el área no tienen agua permanente durante todo el año, o si tienen es un caudal muy pequeño.

Si las obras que contempla la galería son de pequeña magnitud, solo será necesario realizar la excavación manualmente. Si la galería será de dimensiones considerables, y siempre que sea accesible, será conveniente el empleo de maquinaria pesada para el movimiento de grandes volúmenes de material del río.

Cuando la galería se constituye de tubería de pequeño diámetro, se recomienda utilizar entibado (de madera o metálico), debido a que la zanja como está constituida por material no consolidado, tiende a desmoronarse hasta alcanzar los taludes de su posición original, el trabajo de excavación se puede realizar utilizando mano de obra (manualmente).

Cuando la galería está emplazada a buena profundidad, la excavación de la zanja tendrá grandes dimensiones, y debe realizarse la excavación con equipo pesado dando los ángulos adecuados de corte y cuidando el desmoronamiento de los taludes.

Por último, es primordial indicar que la importancia que se da a la excavación, será en beneficio directo del éxito de la construcción de la galería, por lo que no debe escatimarse ningún esfuerzo tanto de mano de obra, maquinaria y herramientas para este fin.

7.4. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Los materiales a utilizarse en la construcción de la galería estarán acordes con su disponibilidad en el sitio de obra, la mano de obra local y las condiciones del financiamiento. Estos aspectos serán definidos durante la fase de diseño.

Tomando en cuenta los aspectos constructivos, es posible construir galerías de diferentes tipos y dimensiones, de los cuales se citan los más comunes.

Colector

Este colector de sección circular se utiliza generalmente en dimensiones de pequeño diámetro (4 a 10") y están construidas de hormigón simple, hormigón armado, hierro fundido, asbesto cemento y PVC. Estas tuberías se construyen en fábrica y son trasladadas al lugar de la obra para su instalación. Tienen el inconveniente de que las barbacanas u orificios de entrada de caudal deben ser realizados con mucho cuidado, por la dificultad que representa este trabajo, además del alto costo que significa el mismo, a excepción del PVC el cual es perforado fácilmente.

Los colectores con este tipo de secciones tienen la dificultad de que por lo reducido de su dimensiones, no es posible ser inspeccionados entrando en ellos, por lo que, al construirse con este tipo de sección, se debe suponer que una refacción significa la construcción de una nueva galería. En nuestro medio este tipo de sección es solo utilizada en galerías para pequeño caudal y de corta longitud, en especial para captaciones de agua potable.

La forma de construir la galería con esta sección es como sigue: luego que se ha logrado la profundidad estipulada en el diseño, se coloca la mitad inferior del filtro. Para realizar esta operación, es siempre conveniente bajar el nivel del agua en la zanja por bombeo. Después de que esté lista la parte inferior del filtro, puede colocarse la tubería perforada.

Para asegurarse de que la pendiente que se le dará al tubo, es la indicada en el diseño, para producir una velocidad auto limpiante, se debe usar un procedimiento similar al que se usa en la instalación de alcantarillado sanitario.

Una vez colocado el tubo en la zanja, se puede confeccionar la parte superior del filtro. Como es muy difícil construir un filtro con capas circulares, éstas se pueden conformar más o menos cuadradas. El resto de la zanja se puede rellenar con el material excavado.

Este tipo de galerías es de muy poca longitud, y no se justifica construir una cámara de inspección, solo es necesario colocarle al conducto colector un tapón en su extremo inicial.

Cámara

Este colector de sección rectangular se utiliza, en dimensiones mayores a 0.60 m de ancho y de 0.60 de alto. Las paredes pueden ser construidas de hormigón ciclópeo, mampostería de piedra, mampostería seca de piedra y estructura gavionada, estos tipos de construcción se realizan in situ, de acuerdo al diseño.

Al tomar la decisión, de escoger el tipo de material en la etapa del diseño, es importante tomar en cuenta la experiencia, tradición y opinión de los usuarios de la zona, pues ellos tienen una opinión y experiencia tradicional anterior, lo que en lo posible no se debe cambiar. La disponibilidad de materiales del lugar son la base para definir el tipo de sección a construirse.

Este tipo de secciones tienen la facilidad de que permiten hacer la inspección y mantenimiento de la galería entrando en ella.

Cuando las barbacanas u orificios de entrada del caudal se construyen en las paredes de **hormigón ciclópeo**, se debe utilizar conductos (generalmente de sección circular de PVC) los cuales se acomodan dentro del encofrado de acuerdo a diseño. La particularidad de este tipo de paredes, es que se construyen utilizando encofrado de madera o metal en ambas caras.

Cuando las barbacanas u orificios, de entrada del caudal se construyen en las paredes de **mampostería de piedra**, estos se realizan entre las piedras que forman parte de la pared, es decir que se dejan orificios entre las piedras, sin rellenar mezcla de hormigón a distancias aproximadas

de diseño. Al construir este tipo de paredes no se utiliza encofrado, solamente muestras de línea y nivel. En este tipo de pared entra menor cantidad de mezcla de hormigón, que en el de hormigón ciclópeo.

En las paredes de **mampostería de piedra seca** observadas en el trabajo de campo, las barbacanas u orificios de entrada del caudal, quedan realizadas entre las piedras que forman parte de la pared. Al construir este tipo de paredes no se utiliza encofrado, solamente maestras de línea y nivel. Para este tipo de pared, en la etapa de diseño no se realiza ningún cálculo de diseño de las barbacanas, ya que quedan orificios entre piedras con gran área libre.

Para fines de estabilidad, las paredes de mampostería de piedra seca y estructura gavionada, deben llevar arriba un encadenado de hormigón armado y columnas cada 2 o 3 metros de distancia, lo que en conjunto este encadenado y las columnas forman un armazón de hormigón armado: estructura mixta.

La forma de construir la galería con esta sección es como sigue:, luego que se ha logrado la profundidad estipulada en el diseño, se construyen las paredes del colector, de acuerdo al tipo de material escogido. Para realizar esta operación, es necesario bajar el nivel del agua en la zanja por bombeo. Después de que estén listas las paredes, se construye el piso, ya sea de hormigón simple o de material de filtro.

Una vez construidas las paredes y el piso, se procede a tapar el colector, con losas de hormigón armado (puede ser prefabricado o in situ), o bóveda de hormigón ciclópeo o mampostería de piedra.

Se aconseja construir el pozo colector y las cámaras de inspección de hormigón ciclópeo o armado, esto dependiendo del tipo de material de arrastre que tenga el lecho del río y de la ubicación de los mismos. En caso de estar ubicado en un río con material de arrastre de gran tamaño (piedras), se recomienda construir de hormigón armado y por debajo del nivel del lecho del río, considerando la posible altura de socavación.

Luego delante de la pared aguas arriba se coloca el filtro; la construcción de este filtro debe ser realizado de acuerdo a diseño, de lo contrario, el funcionamiento y la vida útil será más reducida, teniendo que realizarse un mantenimiento de este filtro a más corto plazo. El resto de la zanja se puede rellenar con el material excavado.

Este tipo de galerías tienen bastante longitud, y se justifica construir varias cámaras de inspección espaciadas entre 50 y 100m.

8

CAPÍTULO

CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EL MANTENIMIENTO DE GALERÍAS FILTRANTES

8.1. INTRODUCCIÓN

A través del análisis realizado en el desarrollo de la investigación en el tema de mantenimiento de galerías filtrantes, se vio que el mantenimiento de estas obras no es practicado o es virtualmente desconocido, o, más bien, no se practica tal como se debería entender este concepto. En su lugar, lo que se acostumbra de forma general, es que cuando empieza a disminuir el caudal de extracción de la galería, lo que se suele hacer es ampliar la misma en longitud. También se ha evidenciado que los usuarios entienden por mantenimiento a la limpieza de sedimento del colector, sin embargo, el concepto de mantenimiento es mucho más amplio, el cual se detalla a continuación.

Se reconocen tres tipos de mantenimiento: preventivo, rutinario y de emergencia.

- Mantenimiento preventivo, es el mantenimiento que se realiza en la obra después de cierto tiempo de funcionamiento y sin que ocurra falla que obligue a ello. De los sistemas de riego visitados, ninguna de las organizaciones de regantes practican este tipo de mantenimiento.
- Mantenimiento rutinario a las partes componentes de la obra, incluye: limpieza de los sedimentos depositados, limpieza de barbancas y control de su colmatación, refacción de las cámaras de inspección si durante la época de lluvias han sufrido el impacto de bolones. En esta categoría podría incluirse el lavado o cambio de los filtros de la obra; actividad que se comprobó que no se realiza en ninguno de los casos estudiados .
- Mantenimiento de emergencia, necesario ante un evento hidrológico extraordinario que inhabilite parcial o completamente a la galería: socavación en las cámaras, ingreso de grandes volúmenes de sedimentos hacia la galería, falla en alguna de las obras de conducción del caudal ya captado al sistema de riego, etc.

8.2. MANTENIMIENTO DE GALERÍAS FILTRANTES EN EL MEDIO

Con lo detallado anteriormente, se pasa a describir la práctica común hallada durante el trabajo de campo de la investigación. De forma general y por costumbre los usuarios de los sistemas de riego entienden como “mantenimiento”, al hecho de realizar la limpieza de sedimento del colector, los pozos colectores, extracción de raíces, además de refaccionar las cámaras de inspección y otros problemas que pudieran haber sido producidos por las avenidas y derrumbes. Este trabajo realizan de forma periódica y de acuerdo a sus costumbres y tradiciones.

Un aspecto generalizado es que en galerías que ya no funcionan a causa del descenso del nivel freático (otras captaciones superficiales y subterráneas aguas arriba) por debajo de la solera de la obra, los usuarios suelen abandonar la galería y buscar financiamiento para construir una nueva galería.

En otros casos, cuando ocurre que el caudal de extracción disminuye con el tiempo, o que el caudal que extraen no es suficiente para su uso agrícola, los usuarios para encarar el problema plantean:

- Ampliar la longitud de la galería, buscando obtener mayor caudal.
- Construir una nueva galería en el sitio de la anterior, y si el entorno lo permite técnica y socialmente, además profundizar y aumentar la longitud.
- Construir una nueva galería en otro sitio, más profunda y larga, si el entorno lo permite técnica y socialmente.

En el entendido de que no se realizan extracciones subterráneas aguas arriba que afecten la permanencia de niveles freáticos en el subálveo, y que se registran sucesivas mermas anuales del caudal captado por la obra, una intervención en los filtros tendrá un impacto positivo para la recuperación de los aporte iniciales que tenía el sistema de riego. Para ello debe considerarse,

- Limpieza de barbacanas u orificios de entrada a la obra (rutinario).
- Limpieza del filtro (rutinario, pero esporádico).
- Cambio de filtro, cuando se evidencie barbacanas taponadas y reducción notable del caudal captado durante sucesivos años.

Por no existir practica y experiencia en el tema del mantenimiento a filtros de galerías, se citan recomendaciones de Truman W. Bennett a partir de las experiencias en agua potable.

Según Bennett, cuando una galería se diseña y se construye adecuadamente debe operar sin problemas y libre de mantenimiento, si se siguen las siguientes recomendaciones:

- La falla más común en las galerías de infiltración, es la que ocurre en el filtro. Esta falla que consiste en la penetración de finos en el filtro de grava y arena y en el conducto, se debe quizás, a una selección inadecuada de la granulometría del filtro, o a una colocación equivocada durante la construcción. Cuando ésta condición se presenta, es difícil realizar un mantenimiento efectivo. La solución es remover el filtro obstruido y reemplazarlo por otro adecuado.
- Una dificultad que se presenta con frecuencia, es la acumulación de precipitados inorgánicos y de limos orgánicos en el filtro, en los orificios del conducto y en la parte circundante del subálveo. Estas acumulaciones orgánicas e inorgánicas tienden a unir las partículas de cieno y arena alrededor del filtro y también se incrustan en las perforaciones del conducto. Estos dos factores incrementan las velocidades en las barbacanas y orificios de los colectores. Las acumulaciones, tanto orgánicas como inorgánicas, pueden ser controladas por tratamiento químico. La selección de tratamiento químico, depende del tipo de depósito. Los tipos de depósitos más comunes son los de calcio, magnesio, carbonatos y los limos orgánicos.

Los depósitos de carbonato pueden ser removidos, inyectando una solución al 15 por ciento de ácido clorhídrico. Antes de lavar es necesario suspender la extracción de agua de la galería.

El ácido se distribuye a través de la galería por medio de una tubería plástica perforada de ½ pulgadas de diámetro, insertándose por una cámara de inspección, de tal manera que atraviese todo el conducto. Después de que se ha vaciado el ácido, se debe inyectar aire lentamente por

medio de la misma tubería de plástico, con el fin de causar agitación en el medio y lograr una mejor distribución del ácido. El aire puede ser inyectado por medio de un compresor. La acción del ácido debe ser de unas 8 horas. Al final de este período, el agua de la galería debe ser bombeada a un caudal moderado hasta que el pH retorne al valor original.

Las acumulaciones orgánicas pueden ser tratadas por medio de un germicida. El más común y más efectivo para los sistemas de abastecimiento de agua es el cloro. Las soluciones de cloro pueden ser inyectadas a la galería practicando una zanja aguas arriba de la obra, sobre la que se vierte el ácido, o también inyectadas en el por medio de pozos existentes. Cuando el cloro se distribuye por toda la galería, disuelve la materia orgánica que está actuando como cementante entre las partículas de arena y lodo. Esto permite que las partículas finas pasen del filtro al interior del conducto y que sean arrastradas hasta las cámaras de inspección. El tratamiento con cloro puede ejecutarse en forma esporádica, dependiendo de los requerimientos del sistema.

ANEXO 1

EJEMPLO DE APLICACIÓN UTILIZANDO MODELACIÓN MATEMÁTICA

1.1. INTRODUCCIÓN

Durante la investigación realizada se ha observado que los elementos utilizados por los proyectistas en el diseño de galerías filtrantes, ha descansado sobre las asunciones siguientes:

- Flujo unidimensional.
- Material del subálveo como homogéneo.
- Conductividad hidráulica constante.

Estas hipótesis no siempre son aceptables, pues el material del subálveo está conformado por una diversidad de materiales (heterogeneidad) y tiene un comportamiento anisotrópico con preferencias en la dirección de flujo. Esta aseveración fue posible de confirmar por simple inspección a las barbacana de las galerías visitadas. Se pudo ver que el ingreso de agua a las galerías es puntual, es decir, que en algunos tramos hay aporte de agua y en otros no. Esta observación rebate el tradicional diseño unidimensional (por metro de longitud de galería) y confirma que esta aproximación no siempre es realista.

Una mejor aproximación al flujo tridimensional y a resultados confiables podría ser el empleo de modelación matemática con zonificación espacial de la conductividad hidráulica (estratos y planta), oscilaciones temporales del nivel freático. La ventaja del empleo de estos modelos se ve limitada por la propia disponibilidad del modelo, de la exigencia de datos y de la metodología para su operación. En este objetivo, el Laboratorio de Hidráulica UMSS extiende la investigación a un caso de aplicación que implementa metodologías para generación de información de campo (topografía, geología, morfología del lecho, pruebas de bombeo, registro de datos en piezómetros, etc) el análisis de la conductividad hidráulica por diferentes métodos (Anexo 2) y los posibles escenarios de análisis para conseguir el mejor aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo. Sin embargo, este trabajo debe entenderse como demostrativo pero no impositivo.

1.2. UBICACIÓN

La Galería Filtrante Piloto está ubicada en la ciudad de Cochabamba, provincia Esteban Arce, primera sección Tarata, pertenece al Proyecto "Micro Riegos, sección de riego Río Seco". Este proyecto está ubicado al este de la población de Tarata, a 2740 m.s.n.m., con temperatura media mensual de 16,80°C, una precipitación media de 441 mm/año, y una evapotranspiración de 37.8 mm.; los suelos en un 95.6% corresponden a la clase II – para la agricultura bajo riego.



Figura 1 Ubicación del área de estudio



Figura 2 Fotografía Satelital



Figura 3 Ubicación de Tarata

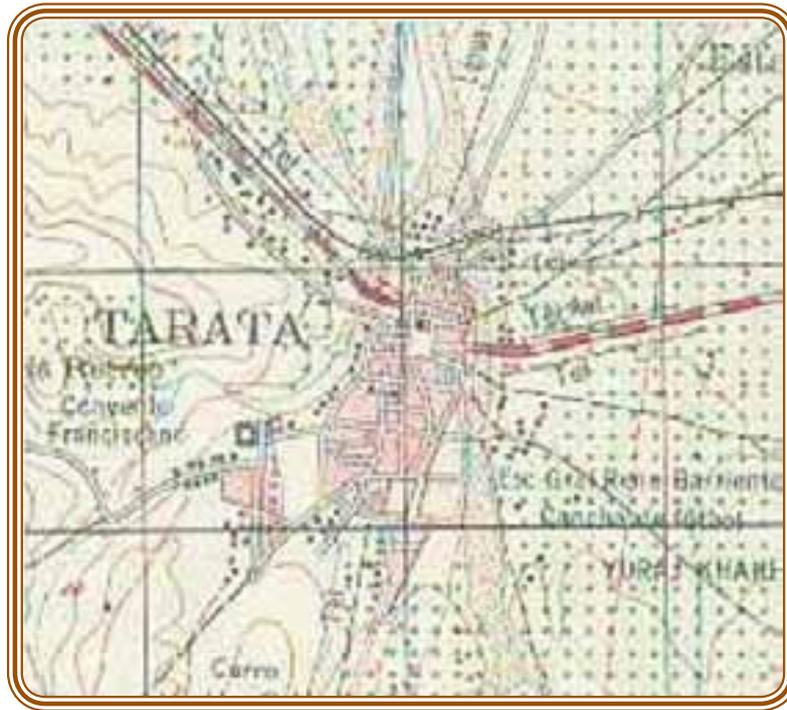


Figura 4 Ubicación de la galería en una carta IGM

1.3. TOPOGRAFÍA

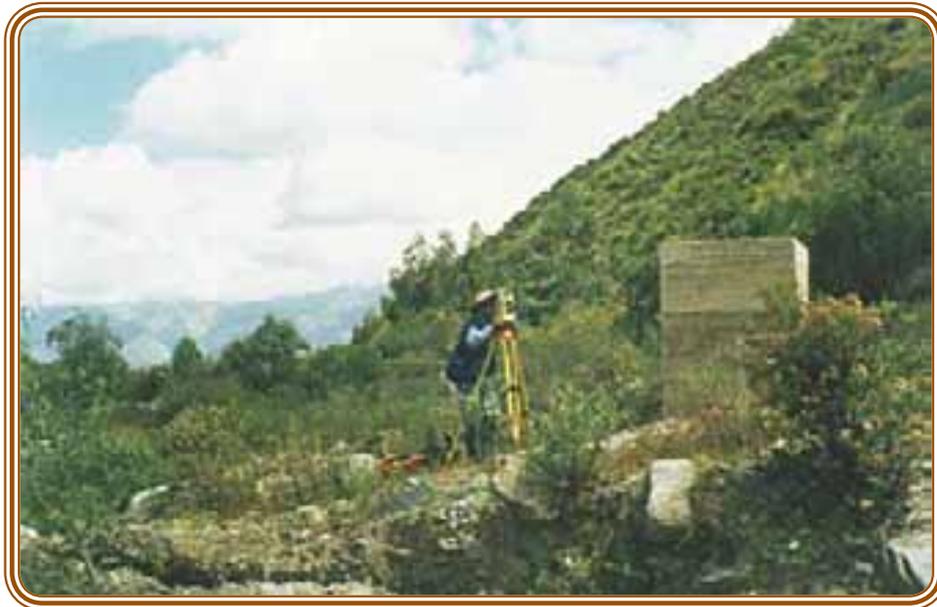


Figura 5 Levantamiento topográfico con ayuda de una Estación Total

Se realizó la topografía respectiva en Río Seco y se procedió a generar las superficies en planta, en la figura 6 se puede apreciar la distribución de las estaciones utilizadas en el levantamiento topográfico. Se referenciaron los pozos ya existentes figura 7 B), y las calicatas que después se convirtieron en pozos de observación. La figura 7 A) muestra los pozos de observación. Todos los planos se elaboraron con ayuda del paquete computacional Surfer7.

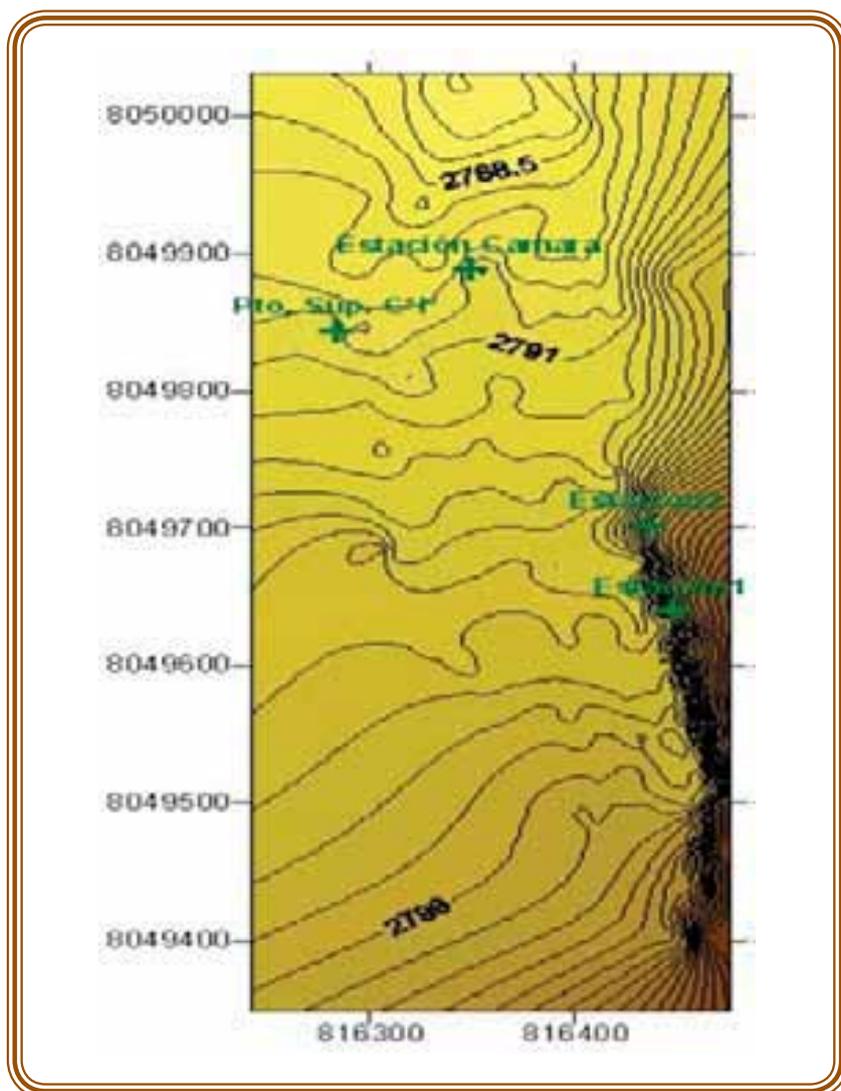


Figura 6 Estaciones utilizadas en el levantamiento topográfico

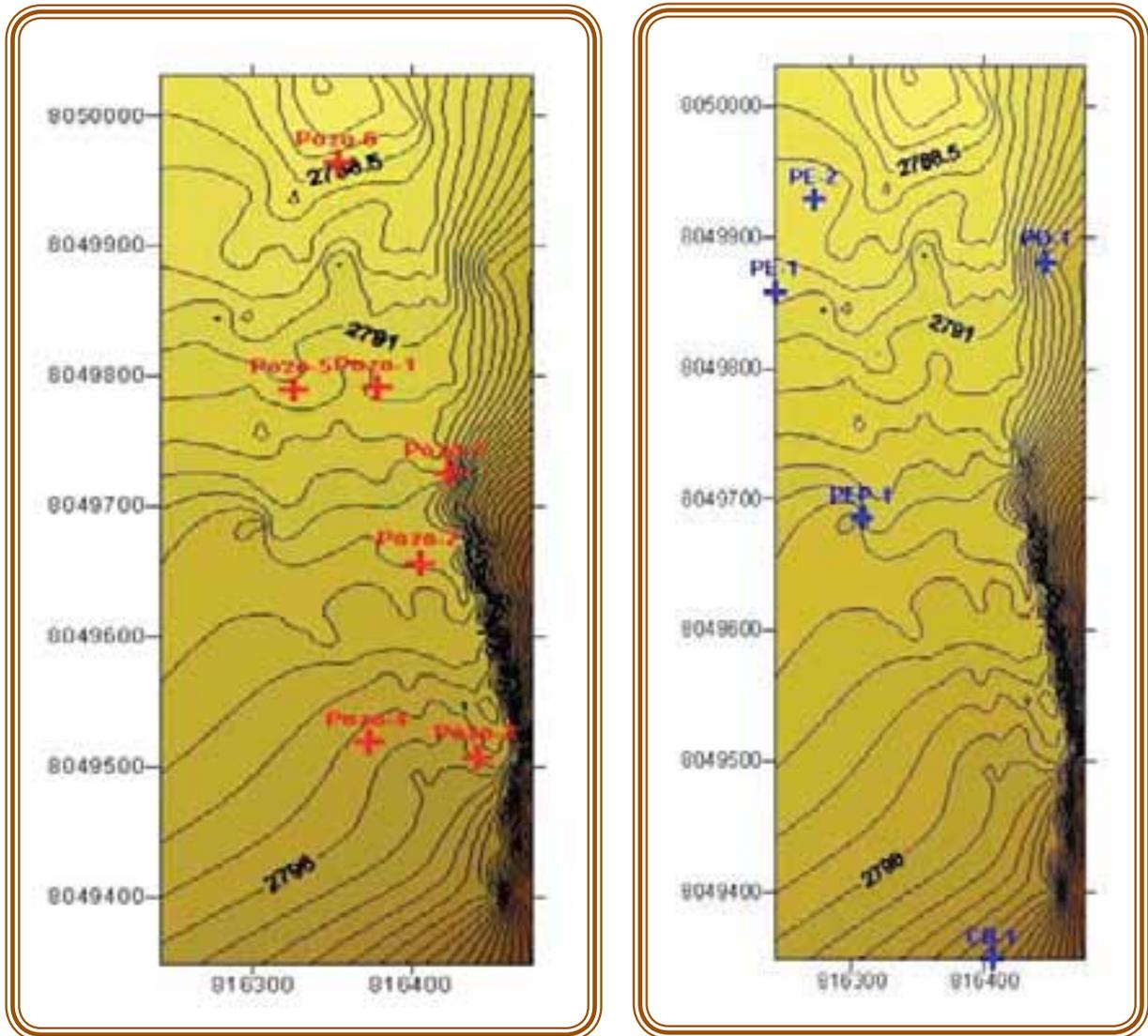


Figura 7 A) Pozos de observación

B) Pozos ya existentes, condiciones de borde

Para la elaboración del modelo matemático es necesario que todos estos planos estén sobrepuestos, también se debe generar la superficie tridimensional, todos estos pasos están ilustrados en la figura 8

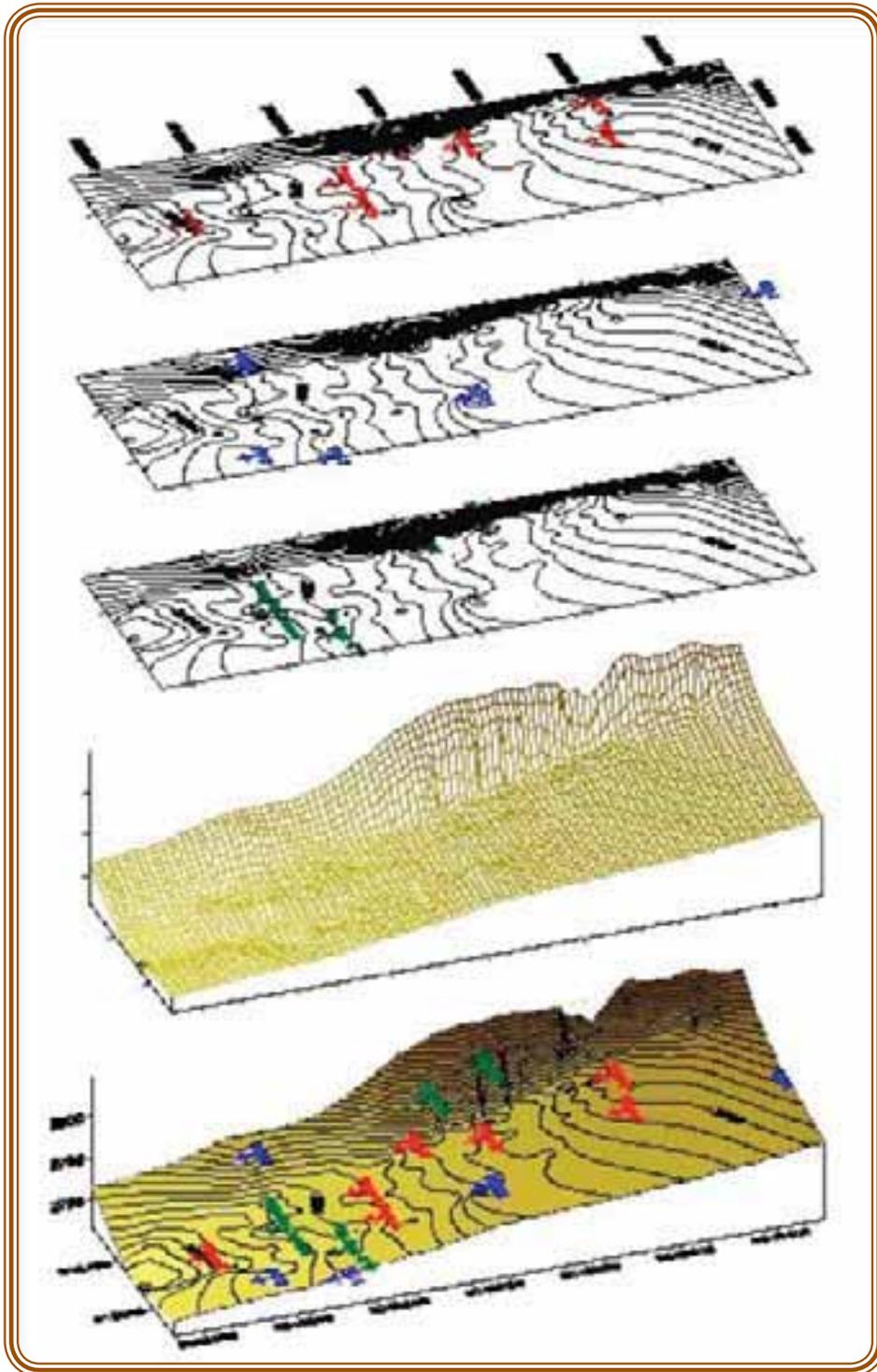


Figura 8 Sobre posición de mapas para generar superficie tridimensional

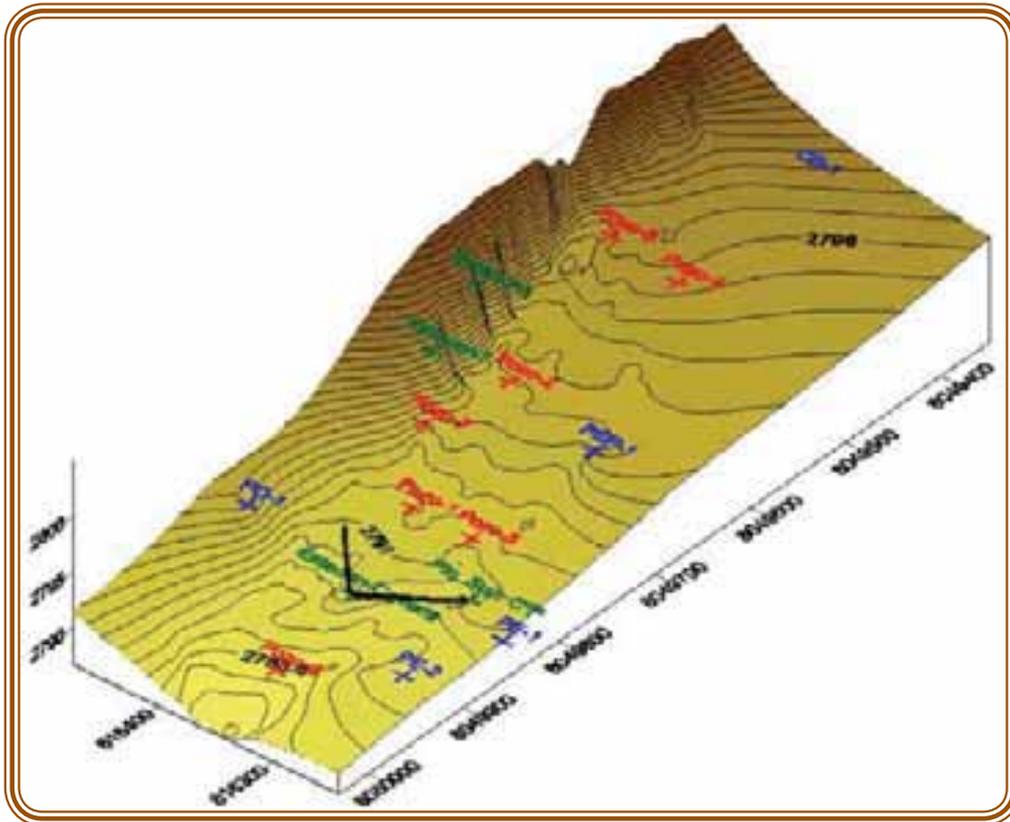


Figura 9 Perspectiva Río Seco Tarata

1.4. PRUEBAS EN CAMPO PARA DETERMINAR PROPIEDADES DEL MATERIAL

Se procedió a excavar calicatas en los entornos de la galería filtrante (figura 10) con el propósito de encontrar el nivel freático y realizar las pruebas de recuperación de acuífero, que permitirán determinar la conductividad hidráulica del suelo.



Figura 10 Excavación de calicatas Río Seco Tarata

Posteriormente, se realizaron las pruebas de bombeo y recuperación de acuífero; se midieron las alturas en función del tiempo con ayuda de una sonda de precisión figura 11.

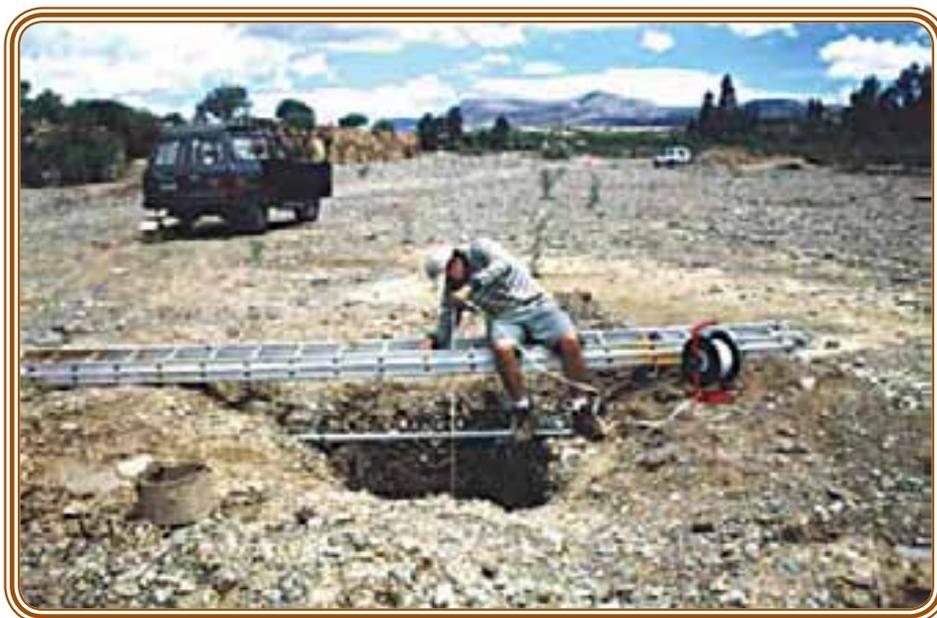


Figura 11 Medición de profundidades, prueba de recuperación de acuífero.

Seguidamente se dejaron pozos de observación sobre las calicatas figura 12, para realizar mediciones del nivel freático a futuro.



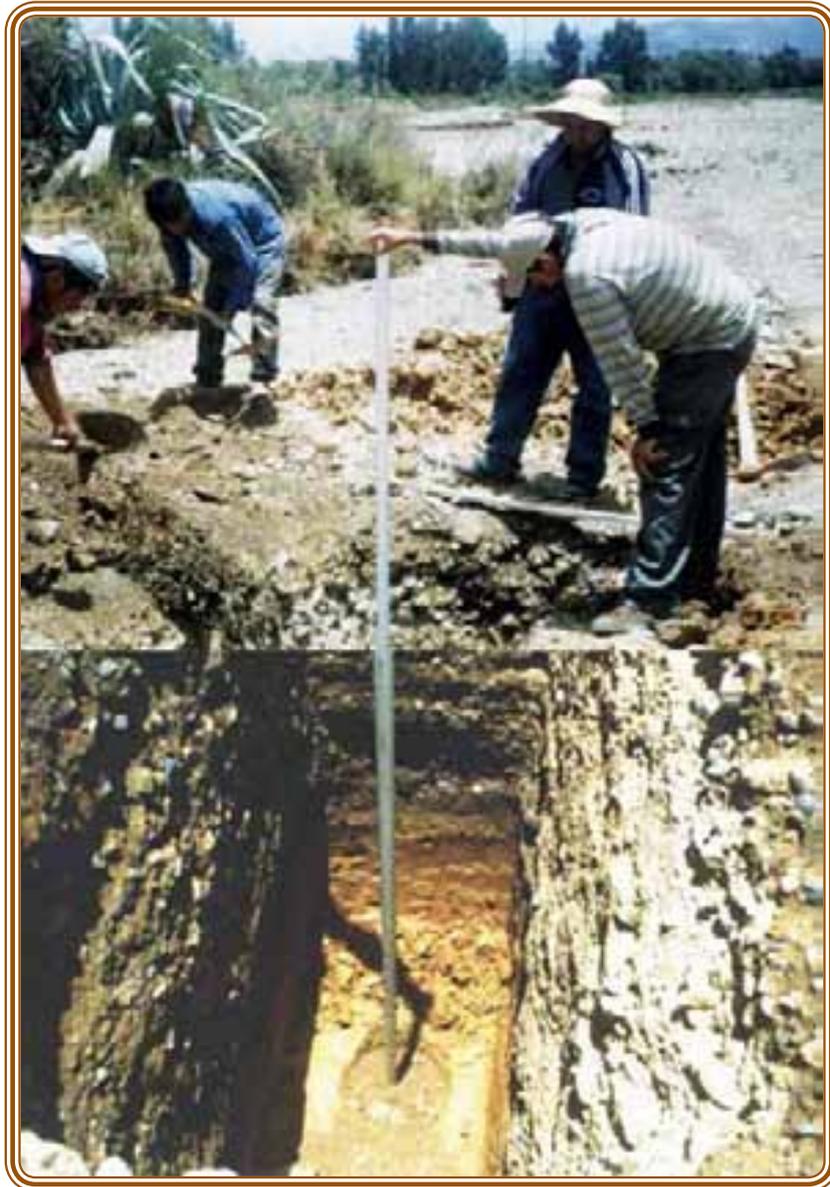


Figura 12 Instalación de piezómetros (pozos de observación)



Figura 13 Cámaras de protección de los piezómetros, para mediciones futuras

Se midieron los niveles freáticos de pozos excavados y del pozo perforado aledaño a la galería filtrante como muestran las siguientes figuras, con la finalidad de obtener condiciones de borde para la modelación.

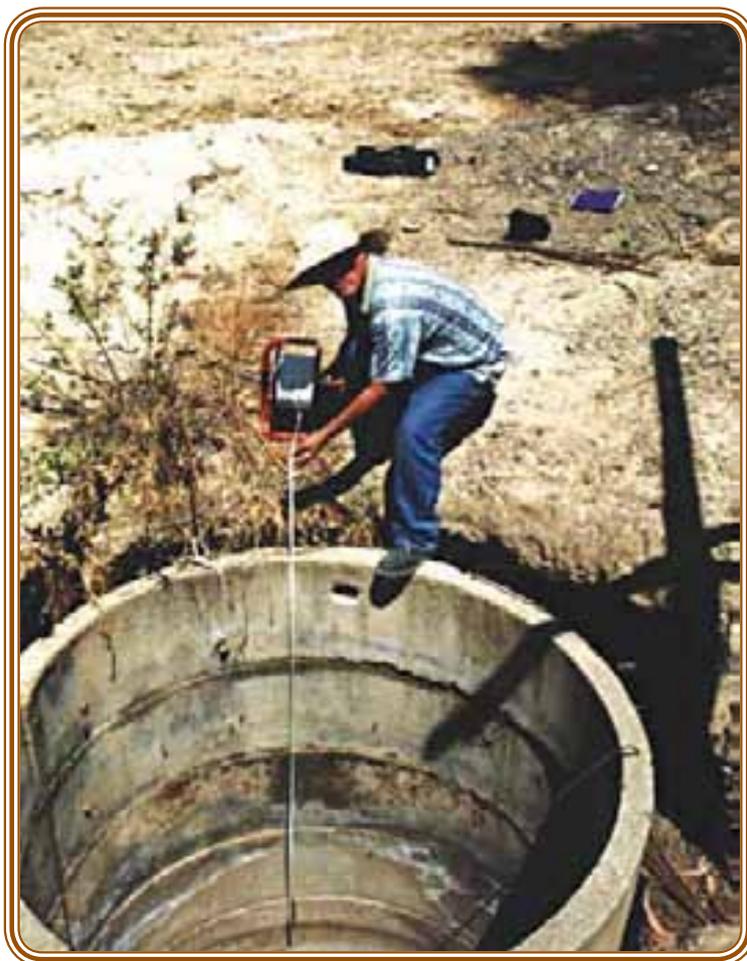


Figura 14 Pozo Excavado 1, "PE-1"



Figura 15 Pozo Excavado 2, "PE-2"

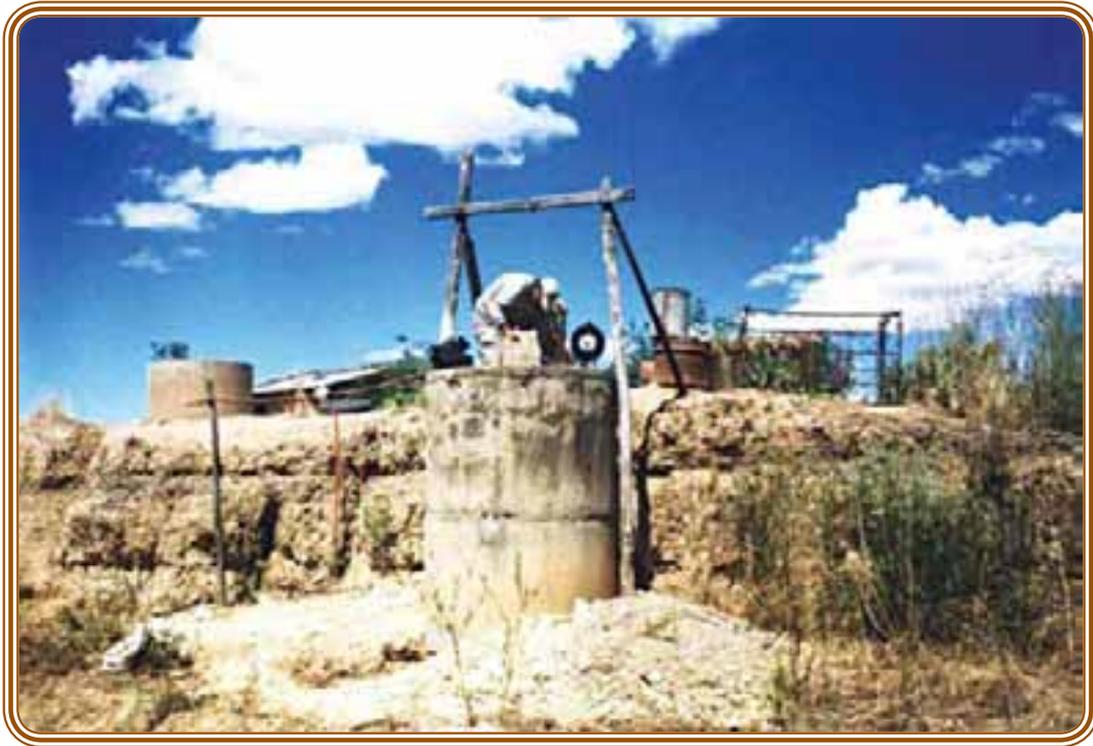


Figura 16 Pozo Excavado 3, "PO-1"



Figura 17 Pozo Perforado 1, "PEP-1"

1.5. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL FILTRO

Se hizo una calicata a la altura de la galería filtrante, para poder acceder al filtro y ver su configuración y obtener una muestra de este (figura 18) para su posterior análisis granulométrico.

Se pudo apreciar la existencia de dos tipos de filtro, grueso y medio, y no se advirtió exceso de material fino limo o arcilla.

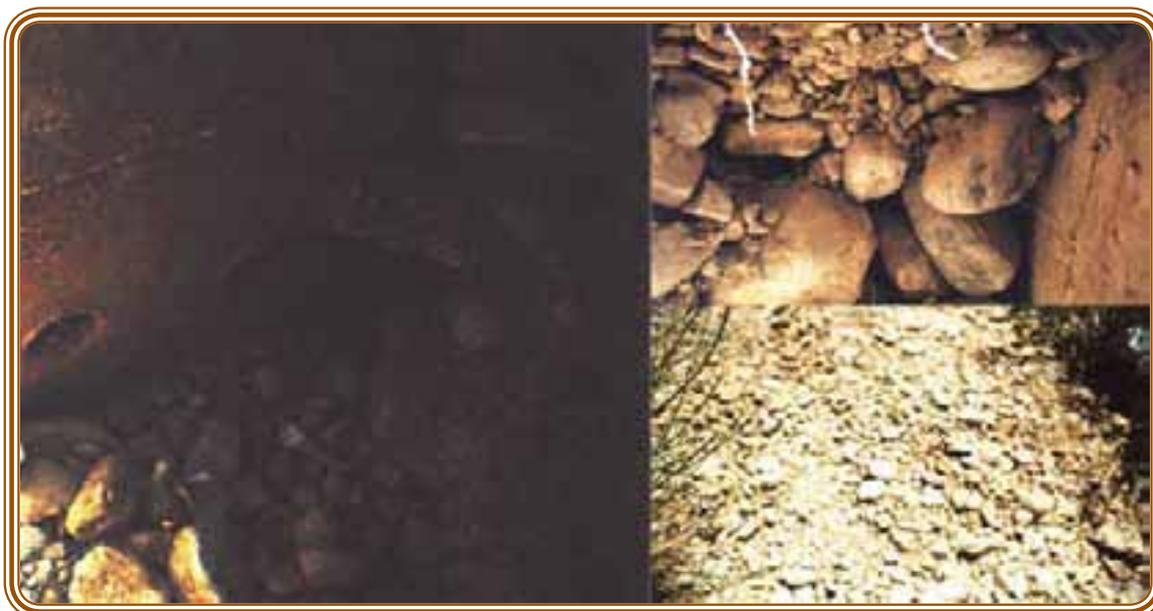


Figura 18 Disposición de los filtros en la galería.

Se procedió a realizar un análisis granulométrico de la muestra del filtro, para determinar la influencia del material fino en dicho filtro.

La permeabilidad de los suelos varía significativamente de acuerdo al tamaño de las partículas y es extremadamente sensible a la cantidad, forma, y distribución de los finos.

Según la fórmula de Hazen, en la cual se utiliza el d_{10} se encontró que la conductividad del filtro era de 1.29 cm/seg.

En la figura 19 se observa la distribución de las diferentes conductividades hidráulicas en los entornos a la galería filtrante.



Figura 19 Conductividad hidráulica del filtro

1.6. NAPA FREÁTICA

Para generar la superficie del nivel freático se procedió a registrar la profundidad de la napa freática en todos los pozos de observación y pozos existentes, estos datos fueron obtenidos durante el bombeo de la galería filtrante. Esta información está presentada en la tabla 6.1 del surfer.

La figura 20 muestra la dirección del flujo subterráneo en 3 dimensiones y la figura 21 en el plano, en base a estos datos se realizó el proceso de calibración.

Surfer - [Piezométrico]						
File Edit Format Data Window Help						
[Toolbar]						
UTM						
	A	B	C	D	E	
1	Pta.	X	Y	Z		Identf
2	1415	816307.6049207	8049605.3734364	2788.419		PEP-1
3	RS-3	816348.00579886	8049888.5100949	2787.48		Estación-Cámara
4		816370.22	8049860.82	2787.48		Pta. inf.
5	1504	816203.38150541	8049843.1224117	2787.48		Pta. Sup. C/P
6	W010	816406.02907181	8049666.6327351	2792.02		Pozo-2
7	W011	816441.2656695	8049507.9816492	2794.11		Pozo-3
8	W012	816406.08266151	8049349.026664	2795.936		CB-1
9	W014	816373.03609446	8049519.1994737	2792.898		Pozo-4
10	W015	816378.41337819	8049790.6032483	2788.98		Pozo-1
11	W016	816326.87331459	8049789.971878	2788.152		Pozo-5
12	W020	816241.86420151	8049858.4447624	2787.29		PE-1
13	W022	816270.78867341	8049928.5086829	2787.21		PE-2
14	W023	816353.38713081	8049903.8876524	2786.701		Pozo-6
15	W024	816446.8662527	8049881.5687432	2787.988		PO-1
16	W025	816422.42467642	8049725.211773	2791.31		Pozo-7
17						
18						
19						

Tabla 6.1 Nivel freático en todos los pozos

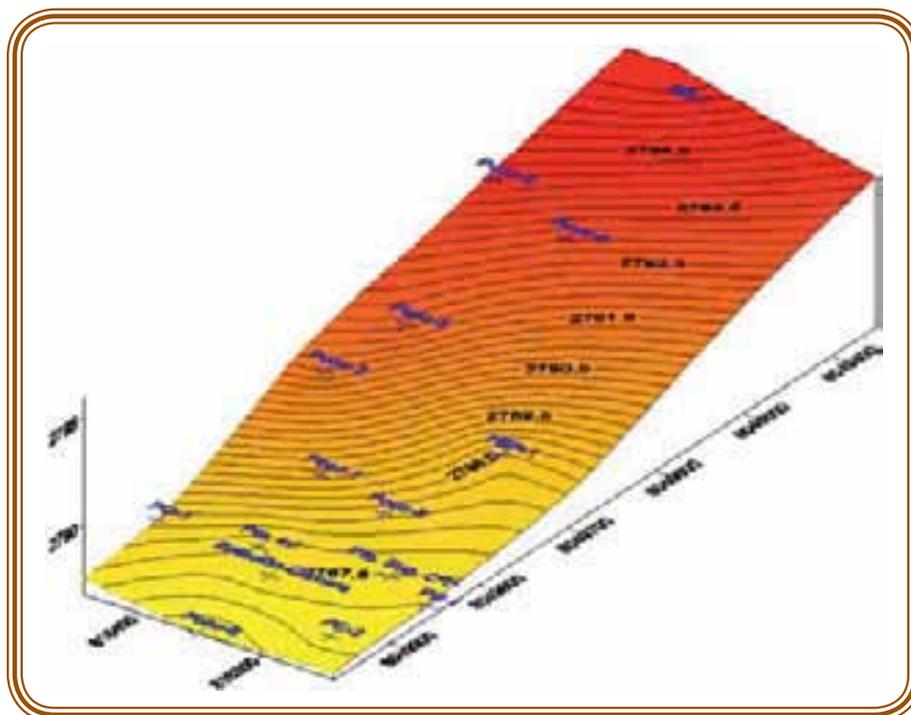


Figura 20 Superficie del nivel freático

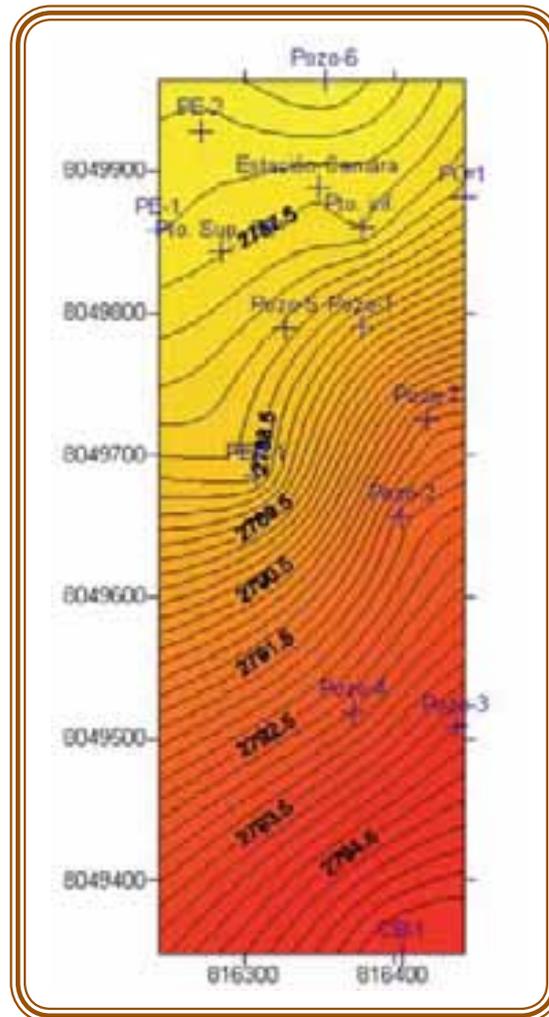


Figura 21 Nivel freático en el área de estudio

1.7. MODELACIÓN MATEMÁTICA

Para la modelación se realizó el aforo del caudal que la galería podía proporcionar, mientras se media la profundidad del nivel freático en todos los piezómetros y pozos de observación; que junto con la información que se tiene de las propiedades del lecho fueron lo esencial para la modelación matemática.

1.7.1. Armado del modelo

Para armar el modelo es preciso tener información de:

- Topografía (precisa)
- Propiedades del lecho
 - Conductividad hidráulica
 - Porosidad
 - Estratificación
- Nivel freático
 - Alturas piezométricas, para el proceso de calibración (pozos de observación)
 - Caudal que capta la galería filtrante.

- Condiciones de borde
 - Altura de carga constante
 - Propiedades del filtro
 - Muros impermeables (de la galería)

1.7.2. Topografía

Todo el proceso para contar con la topografía está explicado anteriormente, los datos se ingresan al modelo de dos maneras:

- El mapa base que es un archivo con extensión DXF

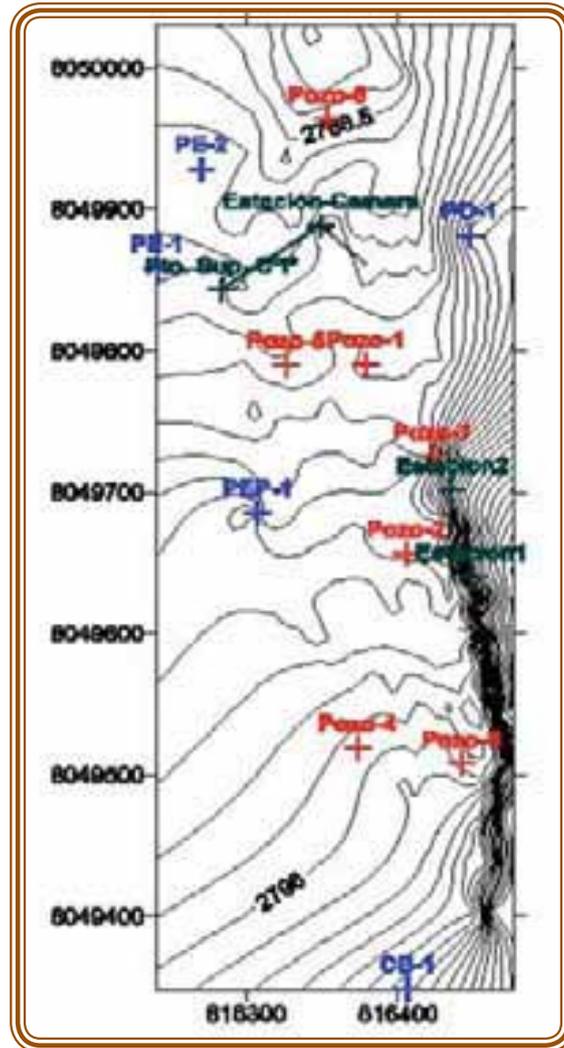


Figura 22 Mapa base

- Un archivo ASCII para importar la elevación del terreno.

1.7.3. Propiedades del lecho

Las pruebas de recuperación de acuífero explicadas anteriormente dan la conductividad hidráulica de las calicatas, los datos considerados para el primer modelo fueron los de la prueba de recuperación de acuífero, la distribución de conductividades se la realizó con polígonos de THIESSEN figura 22 Para la conductividad del subsuelo se consideró los datos proporcionados por "Geobol drill service" que facilito la estratigrafía del pozo perforado de la granja Pio lindo (PEP-1). El modelo le da una coloración diferente a materiales con conductividad distinta; en la figura 23 se observa la base de datos de las conductividades hidráulicas.

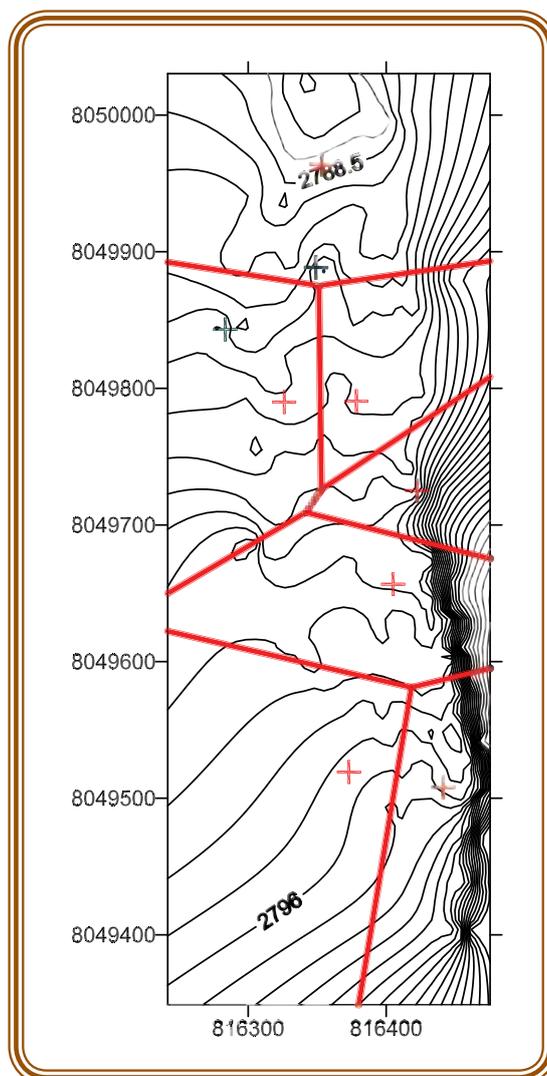


Figura 22 Polígono de Thiessen

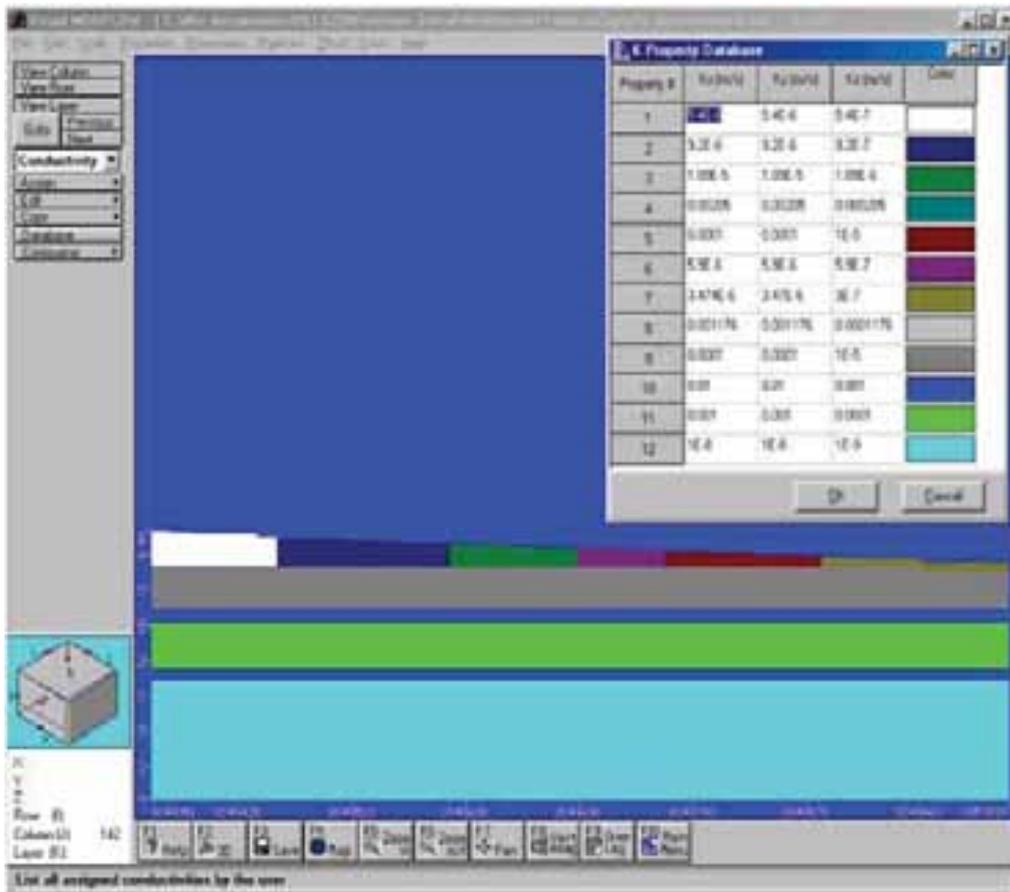
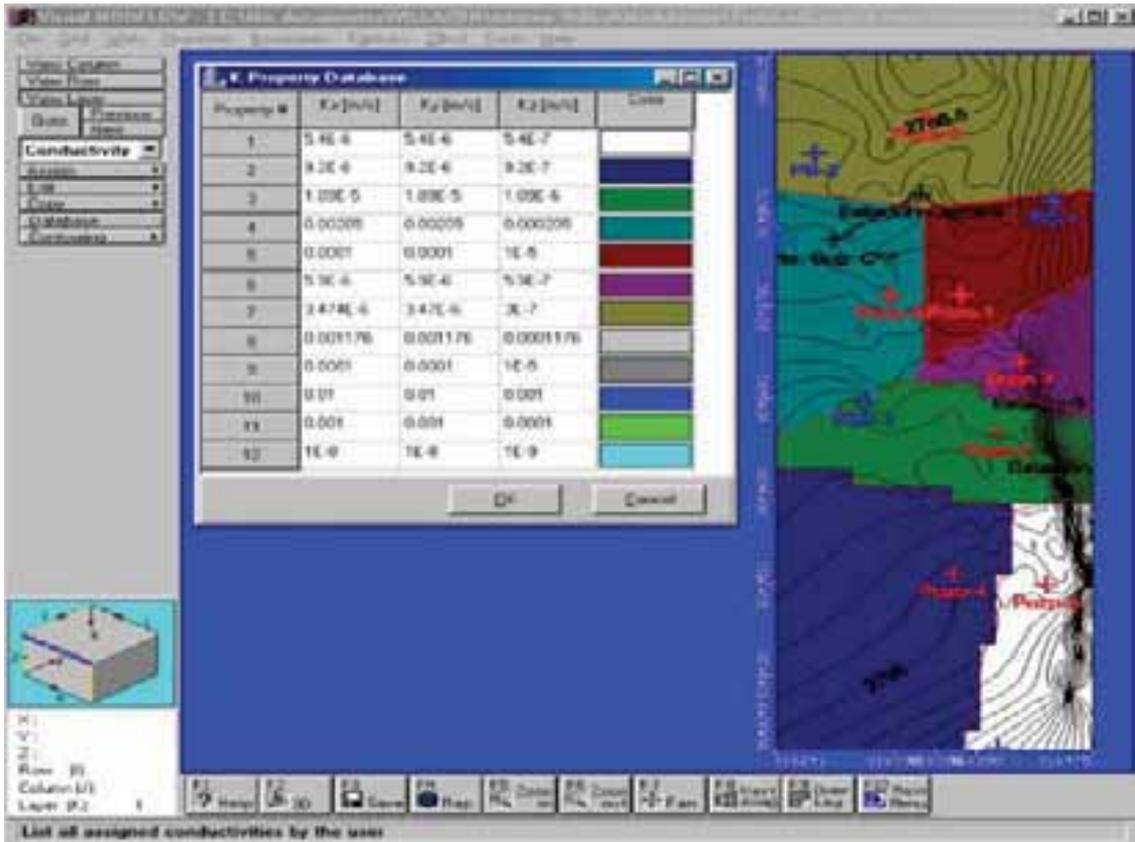


Figura 23 Base de datos conductividades hidráulicas

1.7.4. Nivel Freático

Para tener los niveles se procedió a perforar varias calicatas, esto con el fin de obtener tanto los niveles freáticos como la dirección del flujo subterráneo. Se insertó al modelo las alturas piezométricas de los pozos de observación. En la figura 24 se puede observar la interfase de ingreso de datos de los pozos de observación, aquí se ingresa la profundidad a la que se encontró el agua y se los geoposiciona. También se ingresó el dato del pozo perforado de Pio Lindo (PEP-1) figura 25.

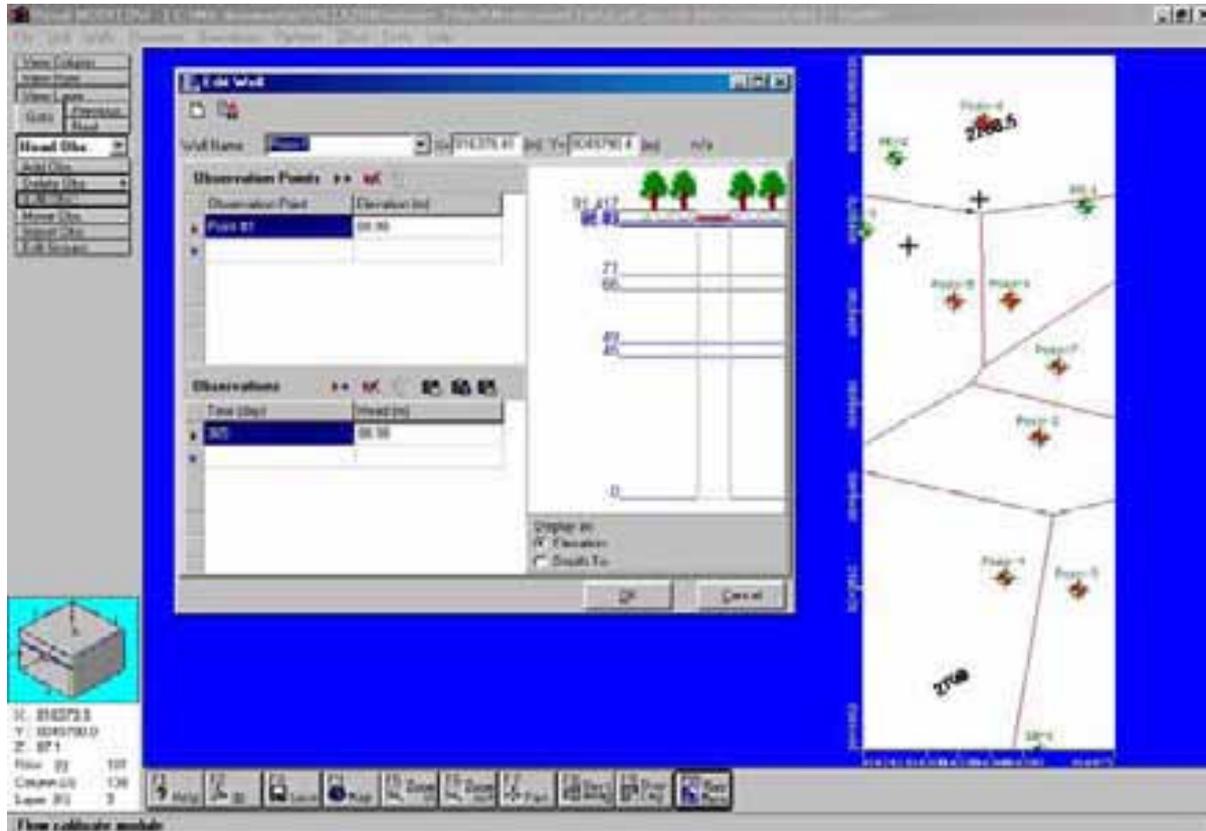


Figura 24 Ingreso de datos, pozos de observación

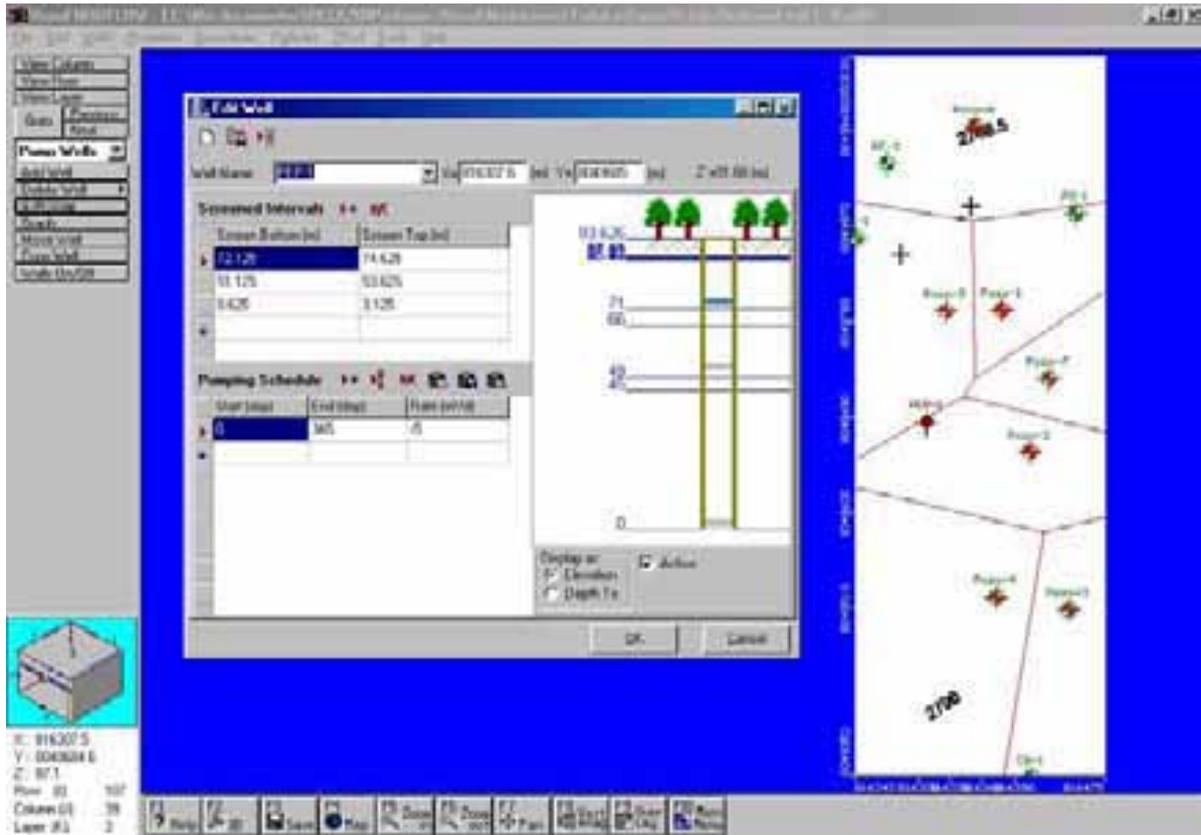


Figura 25 Ingreso de datos, Pozos de explotación

El caudal que capta la galería filtrante es utilizado como factor de calibración.

1.7.5. Condiciones de borde

Se debe cargar muros y filtros al modelo matemático, ya que es la única manera de idealizar una galería filtrante, en la figura 27 se puede apreciar la distribución de filtros y muros en el modelo. Para los filtros se debe insertar al modelo la conductancia, que está en unidades de $[m^2/día]$

$$C_d = k \frac{\text{Área}}{\text{Espesor}}$$

Donde:

C_d = Conductancia

k = Conductividad hidráulica en la dirección del flujo $[m/día]$

Área = Área de la apertura por donde ingresa el agua al drenaje $[m^2]$

Espesor = Distancia medida del nodo dren al nodo de la celda adyacente $[m]$

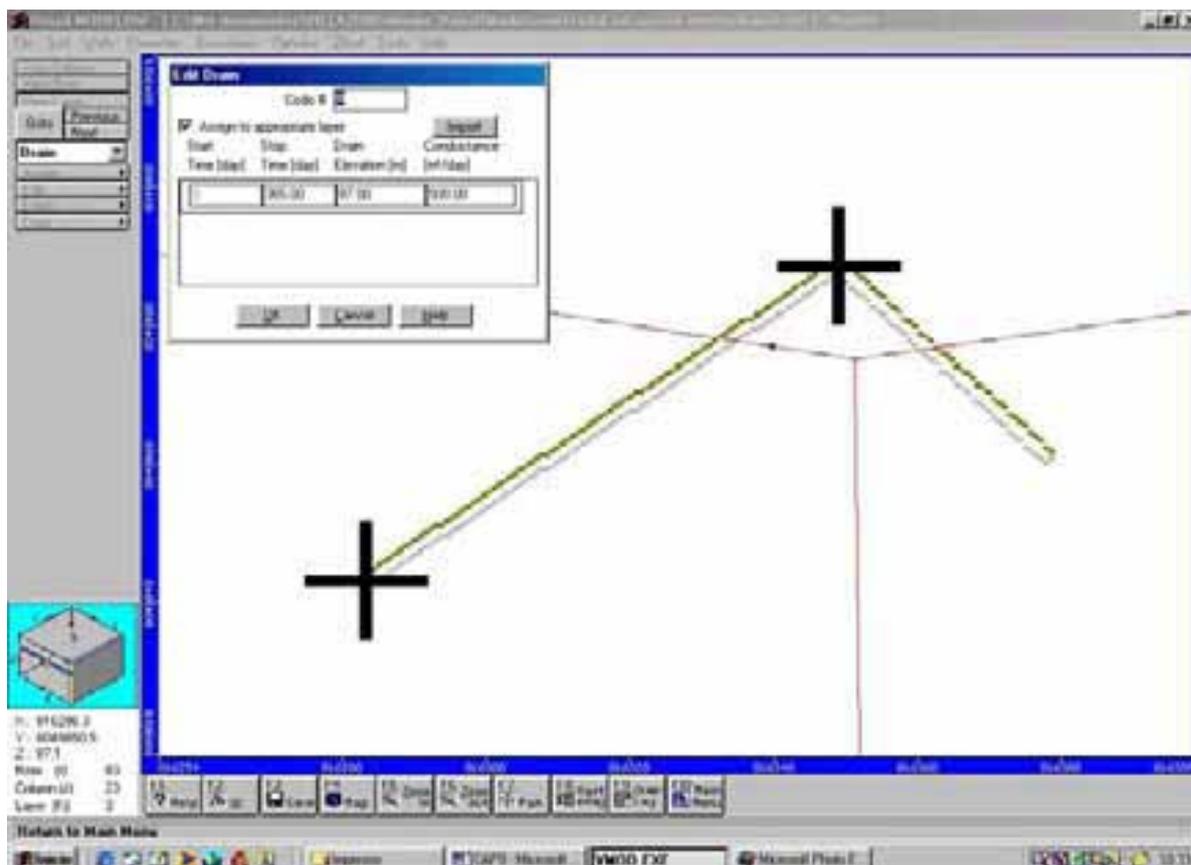


Figura 26 Distribución de filtros y muros en el modelo

1.7.6. Calibración del modelo matemático

El proceso de ajustar los valores de entrada al modelo con el fin de disminuir las diferencias entre datos observados y calculados es conocido como la calibración del modelo.

Para calibrar el modelo se utilizaron los datos obtenidos en campo sobre niveles freáticos en los pozos de observación. El paquete presenta una gráfica de alturas piezométricas calculadas versus observadas y para que el modelo esté calibrado todos estos puntos deben entrar en una franja de confiabilidad del 95% y tener un error absoluto bajo.

En la figura 27 se observa que todos los puntos están dentro de la franja de confianza y que el error absoluto es menor a cero.

El modelo se calibró con los datos obtenidos en la época de estiaje del año 2001 y es de esa forma que se explica que en el balance hídrico figura 28 el caudal captado por la galería filtrante es de 7.5 l/s.

El método de ajuste de los parámetros que gobiernan el flujo en el modelo es el de “ensayo y error”, el cual consiste en asignar valores de partida a los mismos, donde, estos serán ajustados de manera secuencial, de tal forma que los valores de niveles de agua observados en campo en los pozos de observación (variables de control) sean muy aproximados a los calculados por el programa, según una precisión requerida.

Si bien es cierto que el resultado ideal de la calibración es que dichos valores de niveles observados sean iguales a los calculados, en la realidad, esto no es muy fácil de conseguir. Por lo general, existe una diferencia entre los niveles observados y los calculados llamada “error residual”. Por lo tanto, el objetivo principal de la calibración es lograr que los errores residuales sean los más pequeños posibles.

A continuación, se presentan las ecuaciones de los diversos errores considerados por el programa [1]:

- **Error Medio (ME):**

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{calc} - X_{obs})_i$$

Donde:

X_{obs} = Valor observado

X_{calc} = Valor calculado para una serie n de datos

n = Número total de la serie de datos (para cada pozo, $\{X_{obs}, X_{calc}\}$)

- **Error medio absoluto:** es el valor absoluto de la diferencia entre los valores observados y los calculados.

$$Error\ medio\ absoluto = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{calc} - X_{obs}|_i$$

El error medio absoluto cuantifica la magnitud de la calibración residual y por lo tanto, es un mejor indicador que el error medio.

- **Error estándar de estimación o calibración residual (S.E.E.):**

$$S.E.E. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{calc} - X_{obs})_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n (X_{calc} - X_{obs})\right)^2}{n-1}}$$

El error estándar de estimación o calibración residual es la desviación estándar de la diferencia de los valores calculados menos los observados.

- **Raíz cuadrada del error medio (RMS):**

$$RMS = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{calc} - X_{obs})_i^2}$$

Este parámetro es igual a la raíz cuadrada del error medio absoluto.

- **RMS Normalizado:** Es igual al valor de RMS, dividido por la máxima diferencia entre los valores de alturas observadas.

$$RMS\ Normalizado = \frac{RMS}{(X_{obs})_{max} - (X_{calc})_{min}}$$

El valor de la raíz cuadrada del error medio normalizado se obtiene de dividir el RMS entre la máxima diferencia del valor observado máximo menos el valor calculado mínimo. Si hay un solo dato, entonces este denominador será 100.

1 Fuente: G. Mercado; Simulación del Flujo Subterráneo y Balance Hídrico en la Zona de El Paso; Agosto 2001

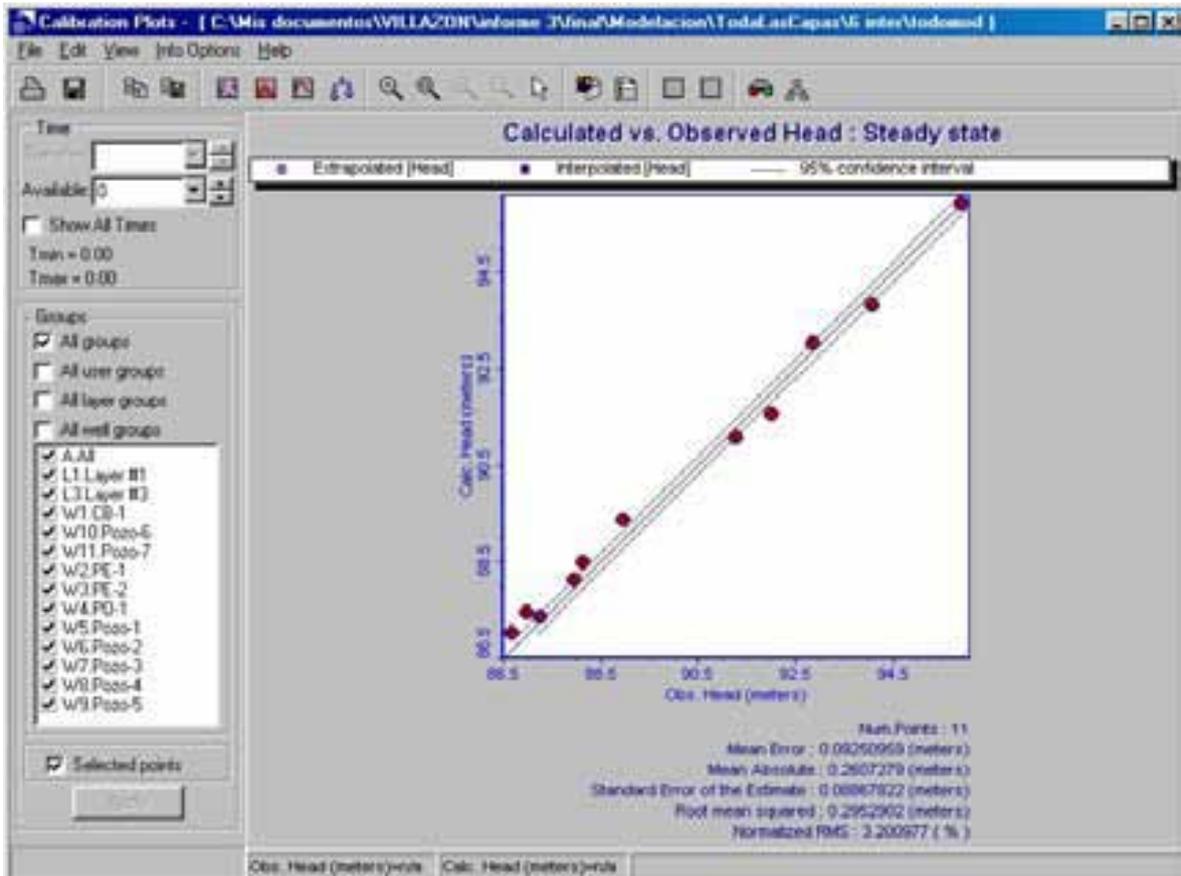


Figura 27 Pantalla de niveles piezométricos calculados versus observados

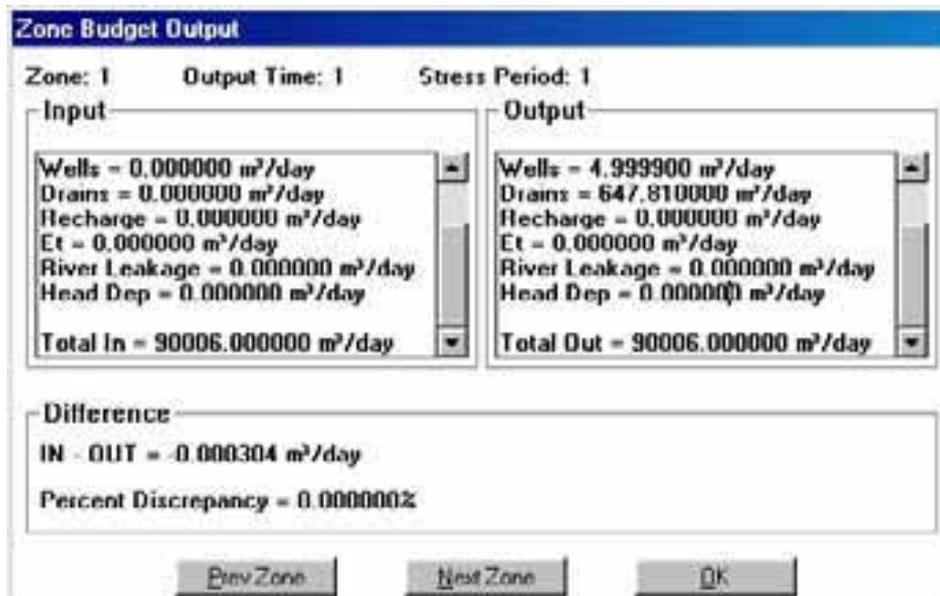


Figura 28 Balance hídrico

Del balance hídrico se tiene que el caudal captado por la galería es de 647.81 m³/s que es igual a 7.49 l/s; por lo tanto, el modelo matemático está calibrado.

1.8. CONCLUSIONES

El programa resuelve las ecuaciones de flujo subterráneo en el acuífero. La solución consiste en verificar los niveles del agua subterránea o cargas en cada celda del sistema. Estos niveles de agua de las capas del modelo, son utilizados comúnmente para construir mapas de piezometría para compararlos con mapas similares de datos observados en campo.

El programa también compara los niveles de agua obtenidos en celdas individuales con mediciones de niveles en pozos en dichas celdas, determinándose así las desviaciones entre los datos observados y los calculados.

Una vez terminada la calibración se puede apreciar que los resultados que presenta el modelo son elocuentes, y el nivel freático es semejante al medido en campo figura 21.

1.9. RESULTADOS

1.9.1 Nivel Freático

En la tabla 1.9 se ve la diferencia entre los niveles freáticos calculados por el modelo y los observados o medidos en campo.

Tabla 1.9 Resultados modelación

Well/Point Name	X-Model	Y-Model	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.
Pozo-6/Point #1	816353.4	8049964	86.70099	87.04449	0.3434924
PE-2/Point #1	816270.8	8049929	87.01	87.45946	0.4494606
PE-1/Point #1	816241.7	8049859	87.29	87.384	0.09400333
PO-1/Point #1	816446.9	8049882	87.988	88.14145	0.1534503
Pozo-5/Point #1	816326.1	8049790	88.152	88.49396	0.3419575
Pozo-1/Point #1	816378.4	8049790	88.98	89.37785	0.3978547
Pozo-7/Point #1	816422.4	8049725	91.31	91.07768	-0.2323175
Pozo-2/Point #1	816405	8049657	92.02	91.58975	-0.4302465
Pozo-4/Point #1	816373	8049519	92.898	93.05103	0.1530362
Pozo-3/Point #1	816441.3	8049508	94.11	93.84742	-0.2625835
CB-1/Point #1	816406.1	8049349	95.926	95.9356	0.009604761

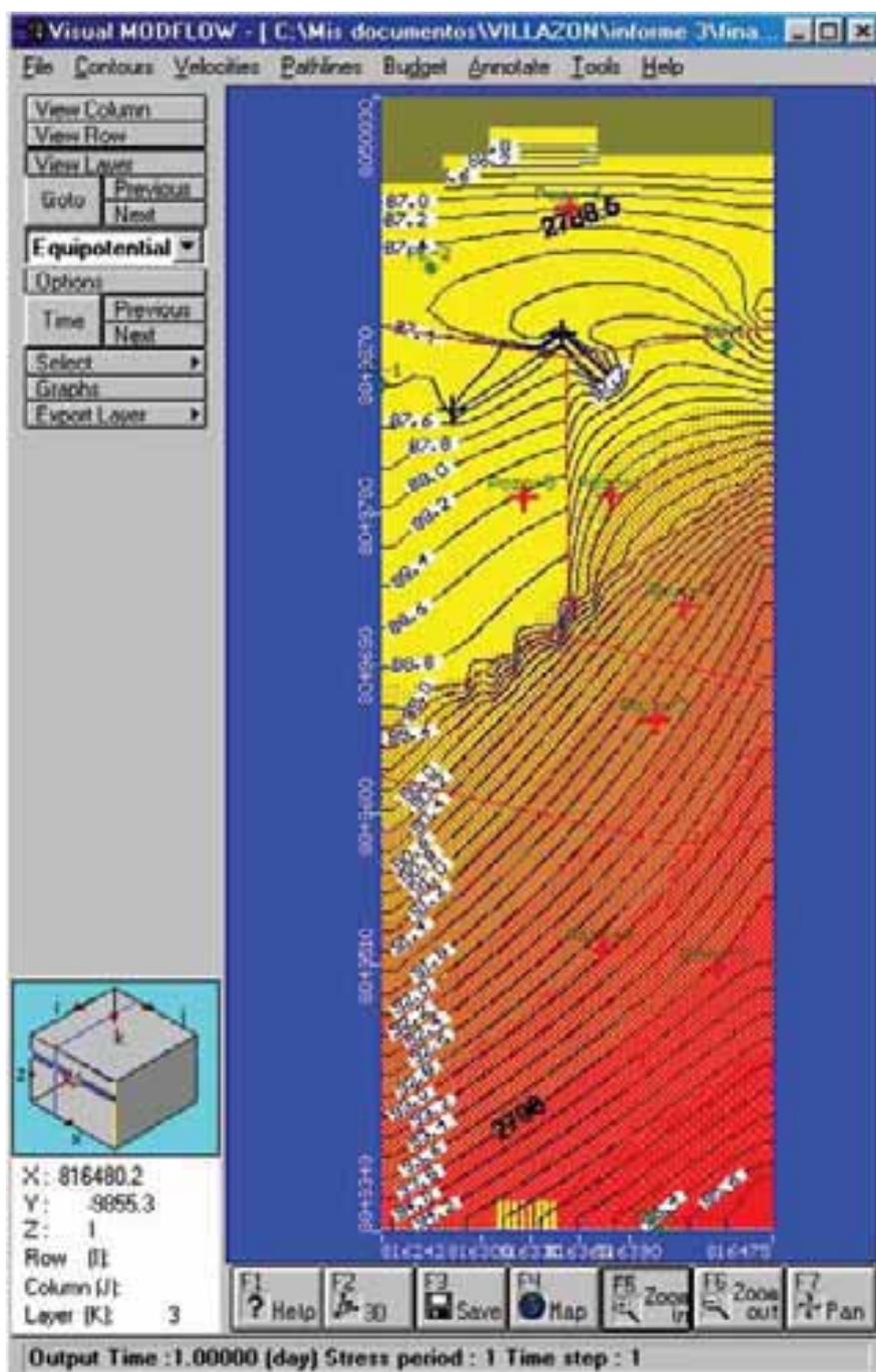


Figura 29 Mapa piezométrico área de estudio

La figura 29 muestra la grafica de niveles piezométricos en el área de estudio, esta gráfica es parte de los resultados que muestra el programa de simulación.

1.9.2 Dirección y velocidad del flujo subterráneo



Figura 30 Vectores direccionales de velocidad en planta

La distribución de velocidades es exactamente lo que se esperaba, ya que de esta manera se justifica la posición de la galería, que de acuerdo a los constructores fue implantada con el brazo más largo transversal al flujo subterráneo, esto se puede observar de mejor manera en la figura 32

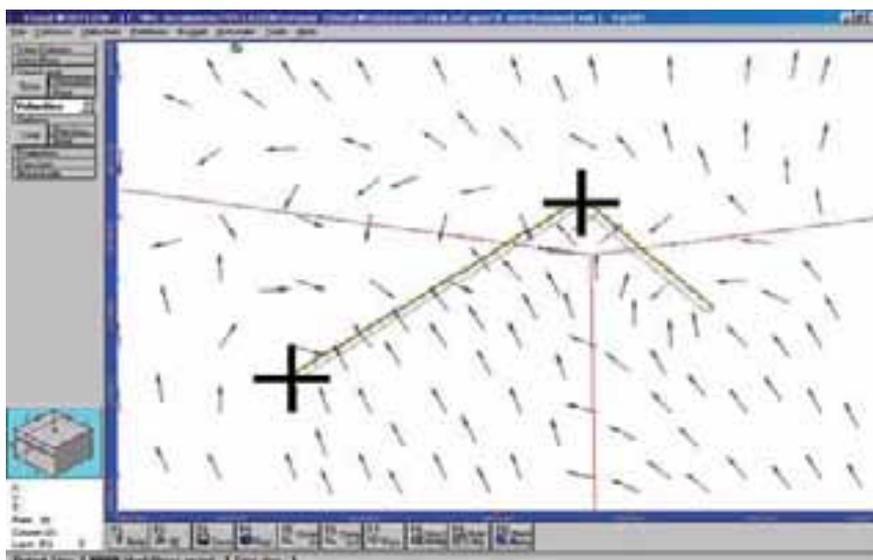


Figura 32 Vectores velocidades en planta cerca de la galería filtrante

El perfil longitudinal figura 33 muestra el aporte de los estratos interiores hacia la galería

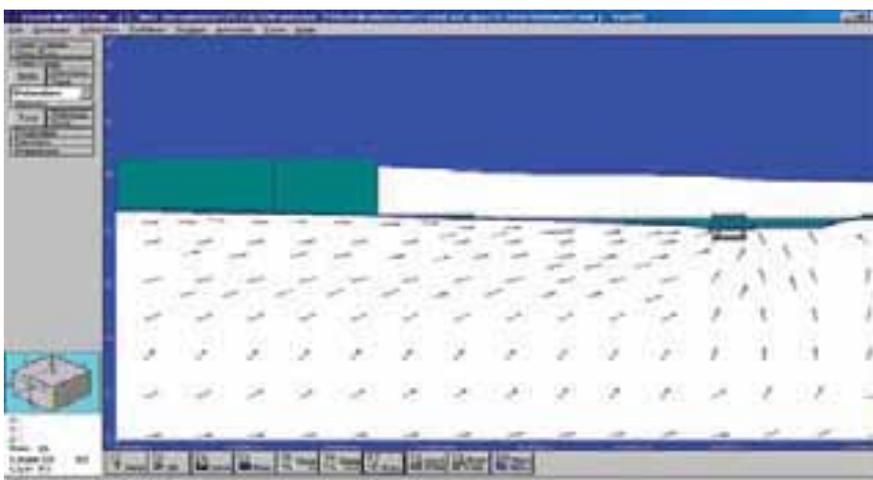


Figura 33 Vectores velocidad perfil longitudinal

En el perfil transversal se puede ver como en la galería el brazo más largo (en la figura 33 la galería de la izquierda) es el que tiene mayor aporte.

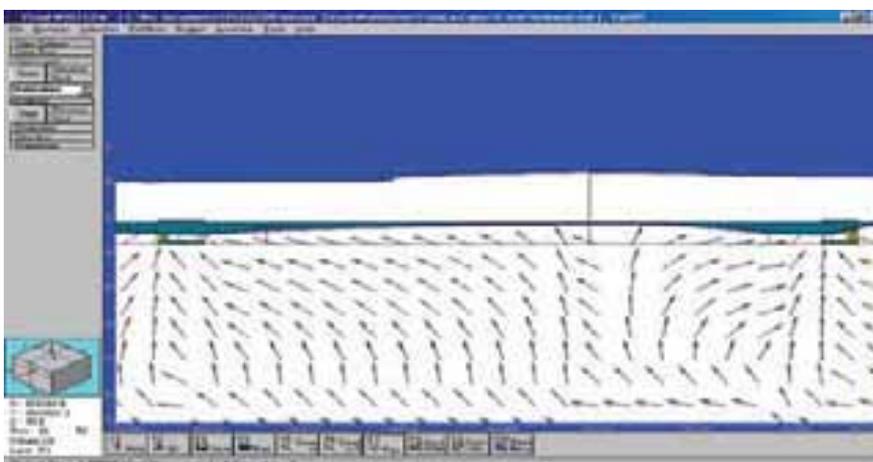


Figura 34 Vectores velocidad, perfil transversal

1.9.3. Modelación con una sola conductividad hidráulica (conductividad hidráulica única)

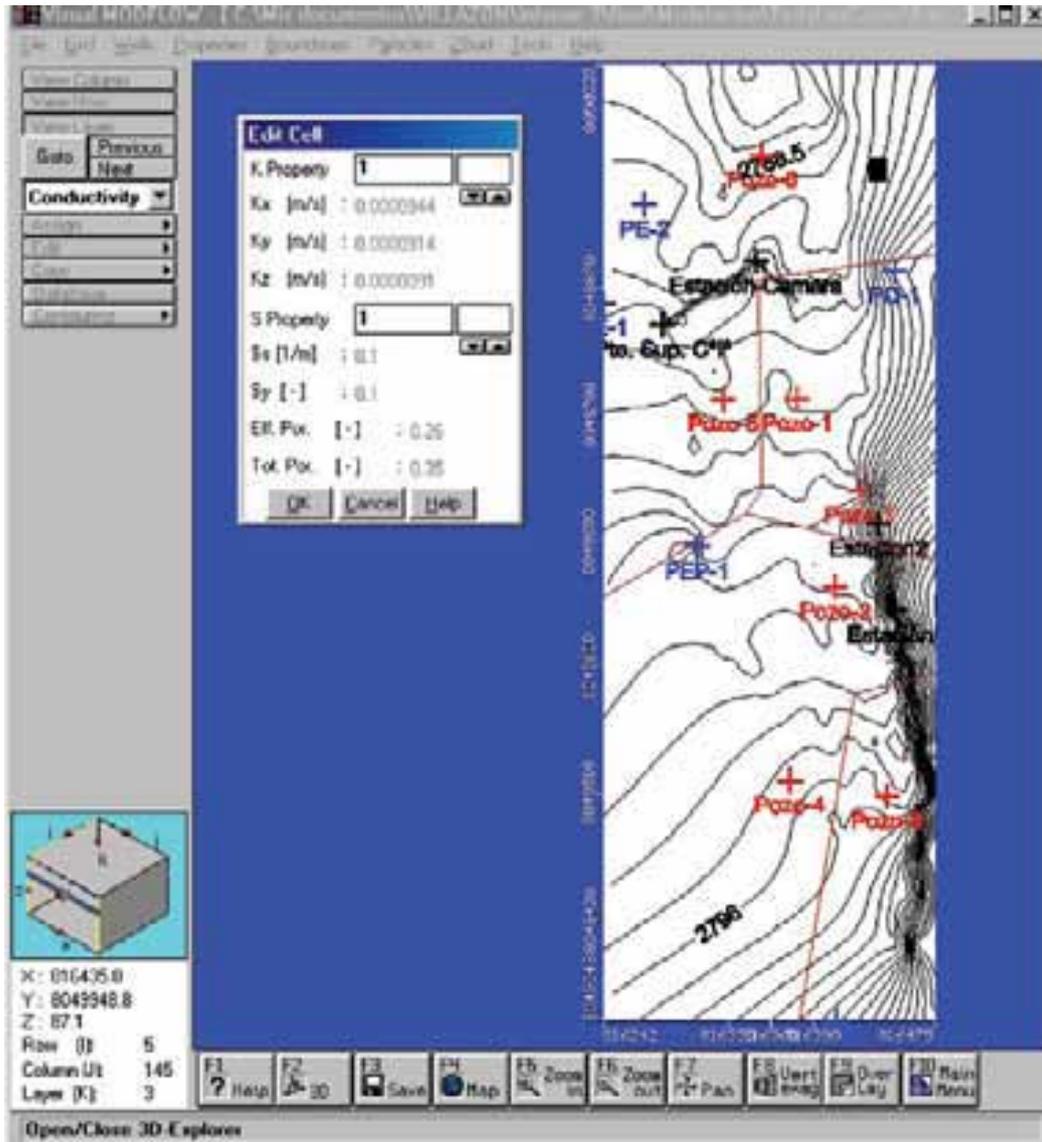


Figura 35 Modelo con una sola conductividad hidráulica

Se utilizó el mismo modelo que ya se tenía calibrado; sin embargo, se cambiaron todas las conductividades en el área de estudio por una sola equivalente.

Esta conductividad hidráulica fue modificada hasta que en el balance hídrico (figura 36) el caudal captado por la galería se aproxime al medido en campo.

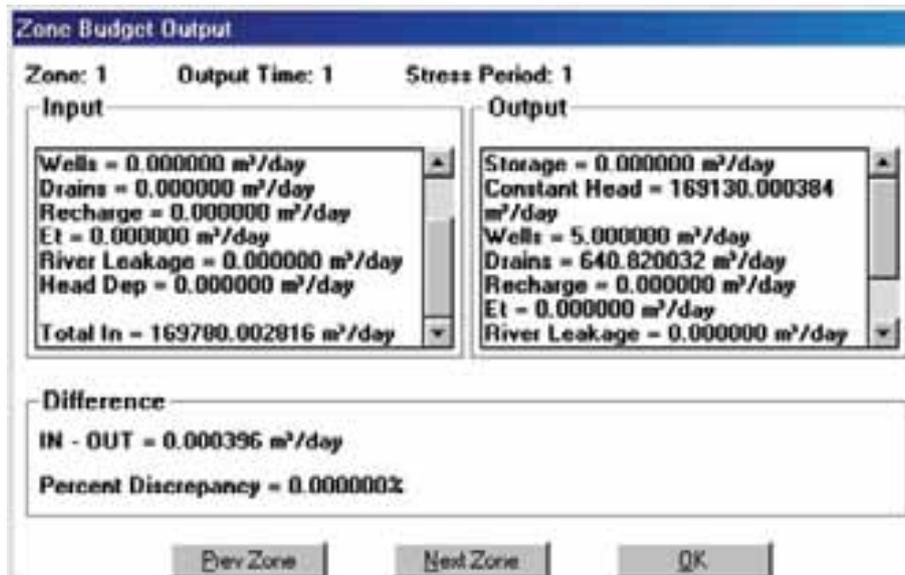


Figura 36 Balance hídrico

Se puede observar que el modelo matemático es de gran ayuda para la interpretación real del flujo subterráneo en tres dimensiones, ya que uno de los problemas detectados en el diseño de las galerías es que se asume una conductividad hidráulica uniforme en el lecho, cosa que no es correcta, ya que la conductividad hidráulica tiene un rango de variación demasiado extenso y afecta de gran manera al caudal calculado.

En las visitas a diferentes galerías se pudo apreciar que el ingreso de flujo subterráneo es localizado, y no un caudal constante por unidad de área como se asume en los métodos convencionales de diseño; debido a que la conformación litológica en los ríos varía horizontal y verticalmente, esto por la formación de meandros, islotes, dunas y antidunas en los cuales hay deposición de material fino, que disminuye la conductividad hidráulica.

ANEXO 2

COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD MEDIDOS EN CALICATAS

2.1. INTRODUCCIÓN

En el presente estudio y para la modelación matemática se practicaron distintos métodos para la obtención de la conductividad hidráulica, desde métodos empíricos en función a la granulometría hasta diferentes metodologías en la recuperación y recarga de acuíferos. Este trabajo se lo realizó en la galería piloto de Río Seco Tarata. Los resultados bajo los distintos métodos, fueron comparados con los resultados del modelo calibrado y con los resultados del escenario hipotético.

2.2. MÉTODOS INDIRECTOS PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD (HAZEN)

La permeabilidad de filtros de arena limpios pueden ser calculada por diferentes formulas como la que sigue a continuación, esta fue desarrollada por HAZEN (1911):

$$k_{(cm/sec)} = CD_{10}^2$$

Donde:

- D_{10} = Tamaño efectivo en centímetros
- C = Coeficiente que varia de 40 a 150

El coeficiente C varía de acuerdo con Hazen, en un rango de 40 a 150 y los valores tomados son los siguientes:

Tabla. 2.1 Coeficiente adimensional C para ecuación de Hazen ¹

C	Arenas y gravas (para cualquiera o todas las siguientes aplicaciones)
40 - 80	Muy fina, bien gradada o con una apresiabile cantidad de finos menores al tamiz N° 200
80-120	Medianamente grueso, pobremente gradado; limpio, grueso pero bien gradado
120-150	Bastante grueso, muy pobremente gradado, limpio

El valor más utilizado para el coeficiente C_1 es de 100. La formula de Hazen fue desarrollada para pruebas en filtros de arena limpia. Aun diminutas cantidades de arcilla y limo pueden disminuir la permeabilidad de la arena.

El método para determinar la permeabilidad desarrollado por Hazen solo puede ser considerado como una aproximación.

Como una regla, la permeabilidad de la mayoría de los suelos debería ser determinada por los métodos directos o métodos en campo.

¹ Fuente; Joseph E. Bowles; Physical and Geotechnical Properties of Soil.

2.3. RECARGA DE ACUÍFERO

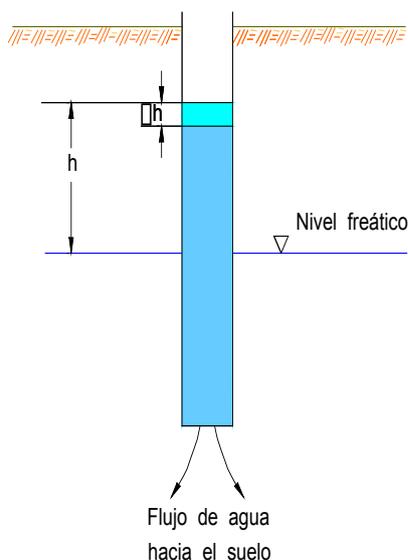


Figura 1 Medida del coeficiente de permeabilidad mediante pozos con agua [2]

Para aplicar este método, es importante indicar, que debe iniciarse la prueba solamente cuando el flujo quede establecido, es decir que la masa de suelo alrededor del agujero o perforación haya quedado saturada, lo que indica que es necesario aplicar una buena cantidad de agua para lograr este objetivo, lo cual no es muy fácil de lograr. Además que resultan particularmente deficientes las lecturas prematuras en materiales muy permeables (gravas y arenas muy limpias), como consecuencia de la rápida depresión de la napa que ocurre durante los primeros segundos que siguen al cargar el agujero con agua.

Tomando en cuenta las recomendaciones arriba indicadas, se puede determinar el coeficiente de permeabilidad bajo el nivel freático, sobre el terreno, practicando una perforación, llenándola de agua y midiendo el ritmo o velocidad de escape del agua del agujero al terreno, dicha perforación en lo posible debe tener un área geometría conocida.

Una variante de este método, consiste en extraer agua de la perforación mediante bombeo, y observar la velocidad de su relleno por las aguas del acuífero.

La diferencia entre niveles h dentro y fuera de un tubo lleno de agua es objeto de observación y registro, y se determina su merma h en un pequeño intervalo de tiempo t , por ejemplo, 1, 10 o 30 minutos, dicho intervalo de tiempo depende de la capacidad de recarga del agujero, lo cual debe ser determinado a criterio del técnico que realiza la prueba.

Si el diámetro del tubo es r y la elevación del nivel de las aguas dentro del tubo ha sido de h , durante el tiempo de la medida, el valor del coeficiente de permeabilidad es:

$$k = \frac{r\Delta h}{2h\Delta t}$$

Este método de determinación del coeficiente de permeabilidad, conocido con el nombre de ensayo de "**Tubo Abierto**", está sujeto a errores a menos que h y t sean muy pequeños y que la relación h/t se aproxime a la derivada dh/dt .

2 Fuente: Hector M. Montemayor A. Manual de diseño y construcción de galerías de infiltración; Marzo 1979 ; Pág. 70.

2.4. MÉTODO DE CARGA VARIABLE

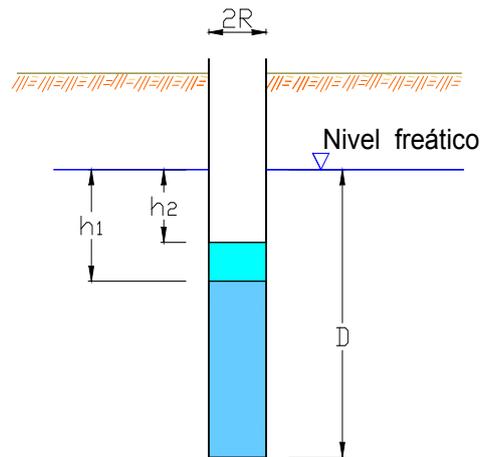


Figura 2 Esquema del método de carga variable para pozos descubiertos [3]

Este método es simple y fue desarrollado para perforaciones superficiales, y suelos no estratificados, su principal restricción es la siguiente:

$$\frac{D}{R} < 50$$

En general la forma de la ecuación es:

$$k = \frac{A (h_2 - h_1)}{F (t_2 - t_1)}$$

$$A = \pi R^2 \quad F = 16\pi D S R$$

donde:

A = Área de la calicata

F = Factor de forma

R = Radio de la calicata

h_1 = Profundidad medida desde el nivel freático hasta el pelo del agua en tiempo 1 (t_1)

S = Coeficiente de forma, se obtiene de la figura 3

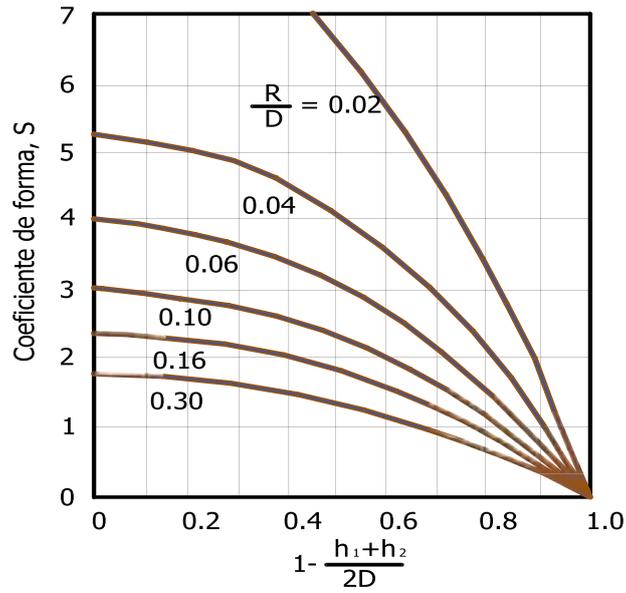


Figura 3 Coeficiente de forma "S" [4]

La siguiente ecuación se deduce de las anteriores:

$$k = \frac{R}{16DS} \frac{(h_2 - h_1)}{(t_2 - t_1)}$$

2.5. MÉTODO DE HOOGHOUTD

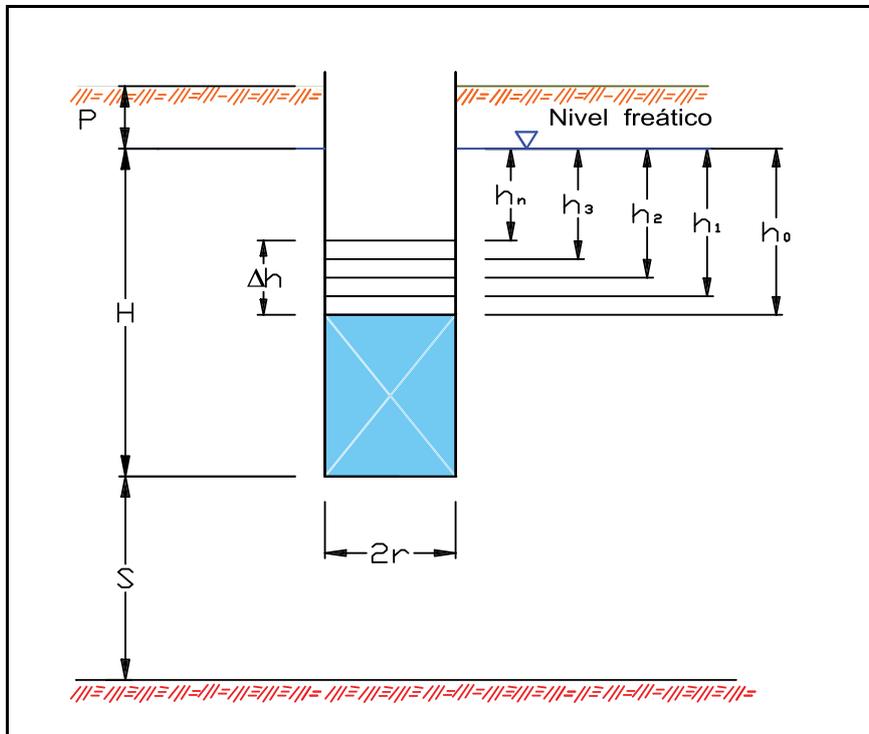


Figura 4 Esquema del método de Hooghoudt para pozos descubiertos [5]

4 Fuente: Harry R. Cedergren, Third Edition; Seepage, Drainage, and Flow Nets; Pág 57.

5 Fuente: Keisiliov; Manual de Hidráulica

Este es un método muy empleado, su restricción es que la distancia desde el fondo del pozo al estrato impermeable debe ser mayor que la mitad de la profundidad desde el nivel freático hasta el fondo de la calicata, si se cumple esta condición el método es aplicable:

$$S \geq \frac{1}{2} H$$

La ecuación sobre la cual se rige este método es muy similar a las anteriores:

$$K = C \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Donde:

C = Coeficiente de proporcionalidad

$$C = \frac{4000}{\left(\frac{H}{r} + 20\right) \left(2 - \frac{h}{H}\right)} \frac{r}{h}$$

h = Viene dada por la siguiente formula:

$$h = \frac{h_0 + h_n}{2}$$

2.6. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN POZOS DE OBSERVACIÓN (PIEZÓMETROS)

La ecuación general para estas condiciones es la siguiente:

$$k = \frac{A}{F(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Donde:

A = Área de la tubería

F = Factor de forma

h_n = Profundidad medida desde el nivel freático hasta el pelo del agua en (t_n)

t_n = Tiempo transcurrido desde t_0

h_0 = Profundidad inicial después de el bombeo o la recarga.

a. Graficamos todos los datos obtenidos en campo en escala semilogarítmica, tiempo versus ht/h_0

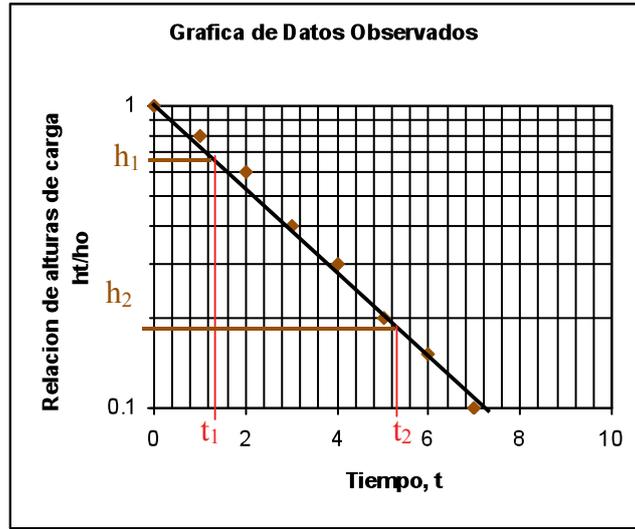


Figura 5 Datos de campo graficados

De la gráfica para un t_1 y t_2 encontramos h_1 y h_2

- b. “F” y “A” varían para las diferentes condiciones.

2.7. POZOS ENTUBADOS EN SUELOS HOMOGÉNEOS

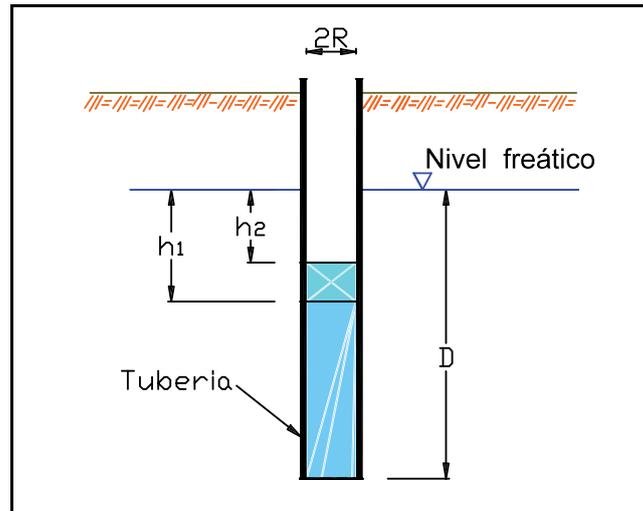


Figura 6 Esquema del ensayo [6]

Para la presente prueba el factor de forma y el área se consideran como:

$$F = \frac{11R}{2} \qquad A = 2\pi R^2$$

Remplazando en la ecuación general la conductividad sería:

$$k = \frac{2\pi R}{11(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

6 Fuente: Harry R. Cedergren, Third Edition; **Seepage, Drainage, and Flow Nets**; Tabla 2.6 Pág 54.

La única restricción es: $6in \leq D \leq 60in$

Se utiliza para determinar la permeabilidad para pequeñas profundidades por debajo el nivel freático.

2.8. POZOS ENTUBADOS CON UNA EXTENSIÓN NO ENTUBADA O FILTRO

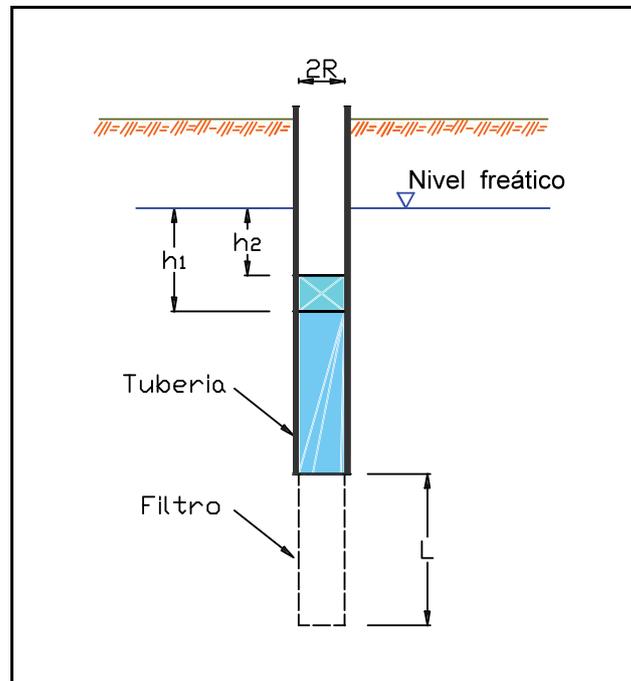


Figura 7 Esquema del ensayo con filtro []

El factor de forma y el área serán:

$$F = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{L}{R}\right)} \quad A = 2\pi R^2$$

Entonces la conductividad hidráulica es:

$$k = \frac{R^2}{2L(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{L}{R}\right) \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Para poder aplicar este método se debe cumplir con lo siguiente: $\frac{L}{R} > 8$

Este método se utiliza para grandes profundidades debajo el nivel freático.

2.9. POZO ENTUBADO CON SUELO INTERIOR

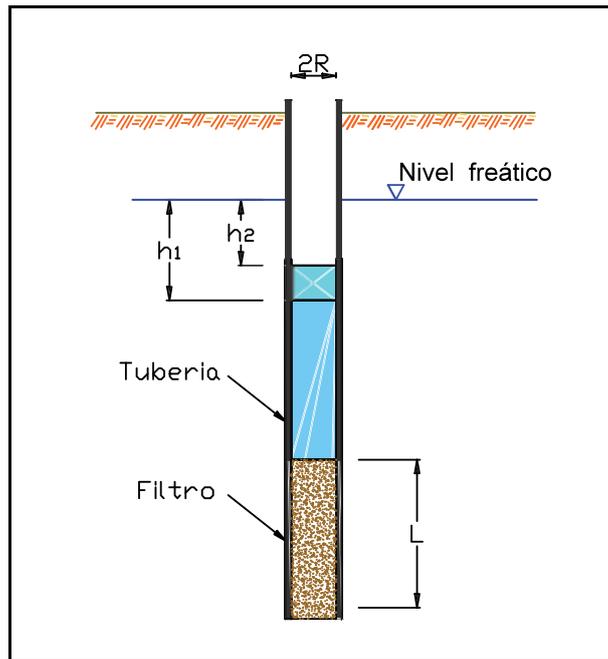


Figura 8 Esquema del ensayo con material dentro []

El factor de forma y el área serán:

$$F = \frac{11\pi R^2}{2\pi R + 11L} \quad A = 2\pi R^2$$

Entonces la conductividad hidráulica es:

$$k = \frac{2\pi R + 11L}{11(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Su principal uso es para determinar la permeabilidad hidráulica en la dirección vertical en suelos anisotropicos.

2.10. PLICACIÓN DEL SOFTWARE AQUIFERTEST PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN CAMPO

El paquete aquifertest realiza pruebas de recarga y recuperación de acuíferos, los métodos que son aplicables a calcatas son los de Bower Rice y Hvorslev.

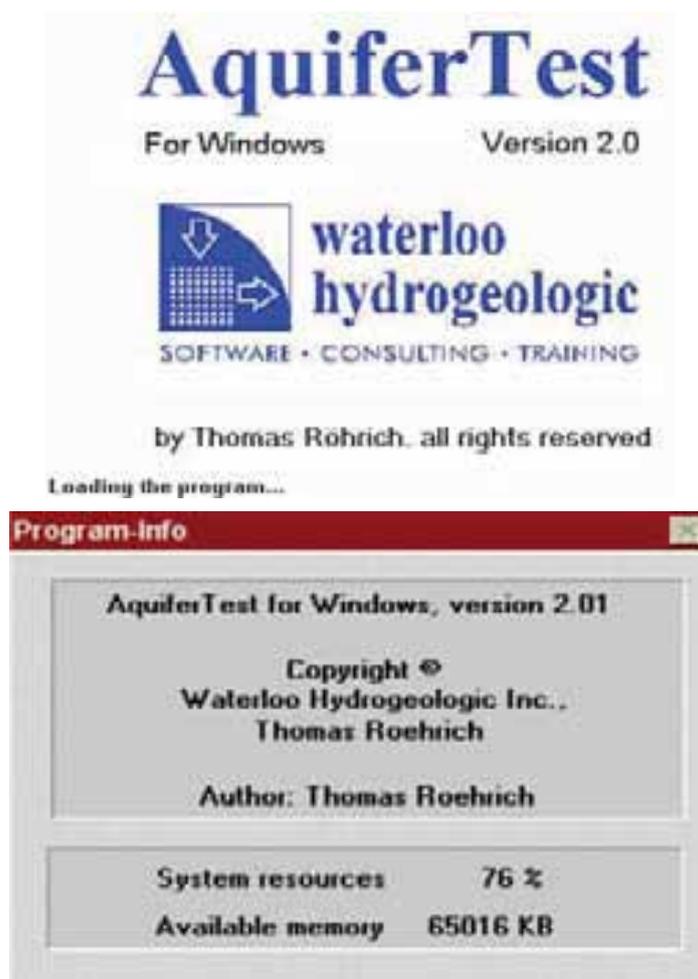


Figura. 9 Pantallas de información, paquete computacional AquiferTest [7]

2.10.1. Hvorslev Slug/Bail test (para acuíferos no confinados con penetración parcial o total)

Esta prueba está diseñada para determinar la conductividad hidráulica en los alrededores de un piezómetro. Los rangos de descarga y recarga, q , en el piezómetro para cualquier tiempo t son proporcionales a K del suelo y a la recuperación del nivel freático.

$$q(t) = \pi r^2 \frac{dh}{dt} = FK(H - h)$$

Hvorslev define el tiempo, T_L (el tiempo requerido para que la inyección o extracción inicial desaparezca, asumiendo un caudal constante)

$$T_L = \frac{\pi r^2}{FK}$$

Donde:

r = Radio efectivo del piezómetro.

F = Factor de forma que depende de las dimensiones de las tomas del piezómetro.

K = Conductividad hidráulica en el radio de influencia.

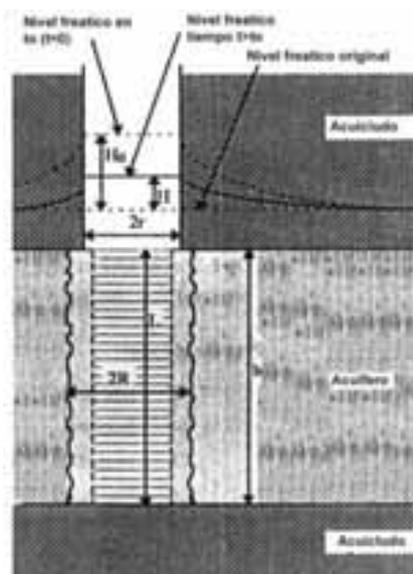


Figura 10 Acuífero en proceso de recarga [8]

Sustituyendo el tiempo en la ecuación inicial resulta lo siguiente:

$$K = \frac{\pi r^2 \left(\ln \frac{H}{H_0} \right)}{Ft}$$

Donde:

H = Es la diferencia de alturas en función del tiempo

H₀ = Es la diferencia de alturas inicial

Los datos son dibujados en papel semilogarítmico el eje y de coordenadas $\log H/H_0$, y en el eje x de coordenadas el tiempo. El valor T_L es tomado como el tiempo al cual corresponde a $H/H_0=0.37$ y K es determinada mediante la ecuación anterior.

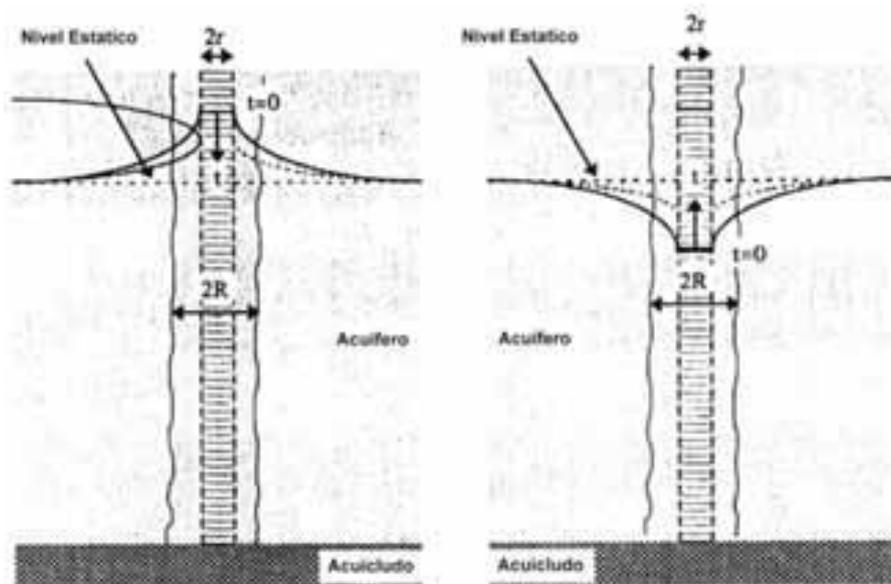


Figura 11 a) Recarga de acuífero

b) Recuperación de acuífero [9]

8 AciferTest User's Manual Pág. 20.

9 AquiferTest User's Manual Pág 22.

Los datos requeridos son:

- Abatimiento o recarga versus tiempo en el pozo de bombeo
- Nivel freático inicial
- Desplazamiento inicial H_0

2.11. RESULTADOS PRUEBAS DE CAMPO

Para la aplicación de los diferentes métodos fue necesario el bombeo del agua de las calicatas y hacer mediciones de la recuperación del acuífero en función del tiempo.





Figura 12 Bombeo de calcatas y recuperación de acuífero

Se evaluaron todos los datos obtenidos en campo con distintos métodos. Los resultados son presentados en la tabla 2.

Tabla 2 Resultados de las pruebas de conductividad hidráulica

RESULTADOS					
Nº Cali	METODO	K (m/min)	K (m/s)	K (m/dia)	K (cm/seg)
1	Calibrado		0.0001	8.64	0.01
1	Hazen			48.6000	0.056250
1	HazenMod			45.1634	0.052273
1	Recuperación Acuífero			3.2815	0.003798
1	Carga Variable			0.2564	0.000297
1	Hooghoudt			0.9674	0.001120
1	Bower Rice's	0.0002660		0.3830	0.0004433
1	Hvorslev's	0.0002580		0.3715	0.0004300
	1 Sola Conductividad		0.0000944	8.15616	0.00944
2	Calibrado		0.0000109	0.94176	0.00109
2	Hazen			0.0017	0.000002
2	HazenMod			0.0016	0.000002
2	Recuperación Acuífero			0.9412	0.001089
2	Carga Variable			0.0735	0.000085
2	Hooghoudt			0.2227	0.000258
2	Bower Rice's	0.0000454		0.0654	0.0000757
2	Hvorslev's	0.0000438		0.0631	0.0000730
	1 Sola Conductividad		0.0000944	8.15616	0.00944
3	Calibrado		0.0000054	0.46656	0.00054
3	Hazen			0.3110	0.000360
3	HazenMod			0.2890	0.000335
3	Recuperación Acuífero			0.4642	0.000537
3	Carga Variable			0.0363	0.000042
3	Hooghoudt			0.2043	0.000236
3	Bower Rice's	0.0000599		0.0863	0.0000998
3	Hvorslev's	0.0000580		0.0835	0.0000967
	1 Sola Conductividad		0.0000944	8.15616	0.00944
4	Calibrado		0.0000092	0.79488	0.00092
4	Hazen			0.0031	0.000004
4	HazenMod			0.0029	0.000003
4	Recuperación Acuífero			0.7946	0.000920
4	Carga Variable			0.0621	0.000072
4	Hooghoudt			0.1837	0.000213
4	Bower Rice's	0.0000438		0.0631	0.0000730
4	Hvorslev's	0.0000424		0.0611	0.0000707
	1 Sola Conductividad		0.0000944	8.15616	0.00944

5	Calibrado		0.0020500	177.12	0.205
5	Hazen			137.1686	0.158760
5	HazenMod			127.4693	0.147534
5	Recuperación Acuífero			1.7735	0.002053
5	Carga Variable			0.1386	0.000160
5	Hooghoudt			0.7399	0.000856
5	Bower Rice's	0.0002540		0.3658	0.0004233
5	Hvorslev's	0.0002450		0.3528	0.0004083
	1 Sola Conductividad		0.0000944	8.15616	0.00944
6	Calibrado		0.0000035	0.3001536	0.0003474
6	Hazen			561.8160	0.650250
6	HazenMod			522.0894	0.604270
6	Recuperación Acuífero			38.4000	0.044444
6	Carga Variable			3.0000	0.003472
6	Hooghoudt			20.0172	0.023168
6	Bower Rice's	0.0079000		11.3760	0.0131667
6	Hvorslev's	0.0076400		11.0016	0.0127333
	1 Sola Conductividad		0.0000944	8.15616	0.00944
7	Calibrado		0.0000059	0.50976	0.00059
7	Hazen			0.0034	0.000004
7	HazenMod			0.0032	0.000004
7	Recuperación Acuífero			0.5083	0.000588
7	Carga Variable			0.0397	0.000046
7	Hooghoudt			0.1873	0.000217
7	Bower Rice's	0.0000735		0.1058	0.0001225
7	Hvorslev's	0.0000711		0.1024	0.0001185
	1 Sola Conductividad		0.0000944	8.15616	0.00944

Para apreciar de mejor manera estos resultados se elaboraron gráficos de todos los métodos aplicados para la determinación de la conductividad hidráulica en calicatas más la conductividad hidráulica calibrada del modelo (Anexo1) y la conductividad hidráulica equivalente del escenario hipotético de la modelación matemática.

Calicata 1

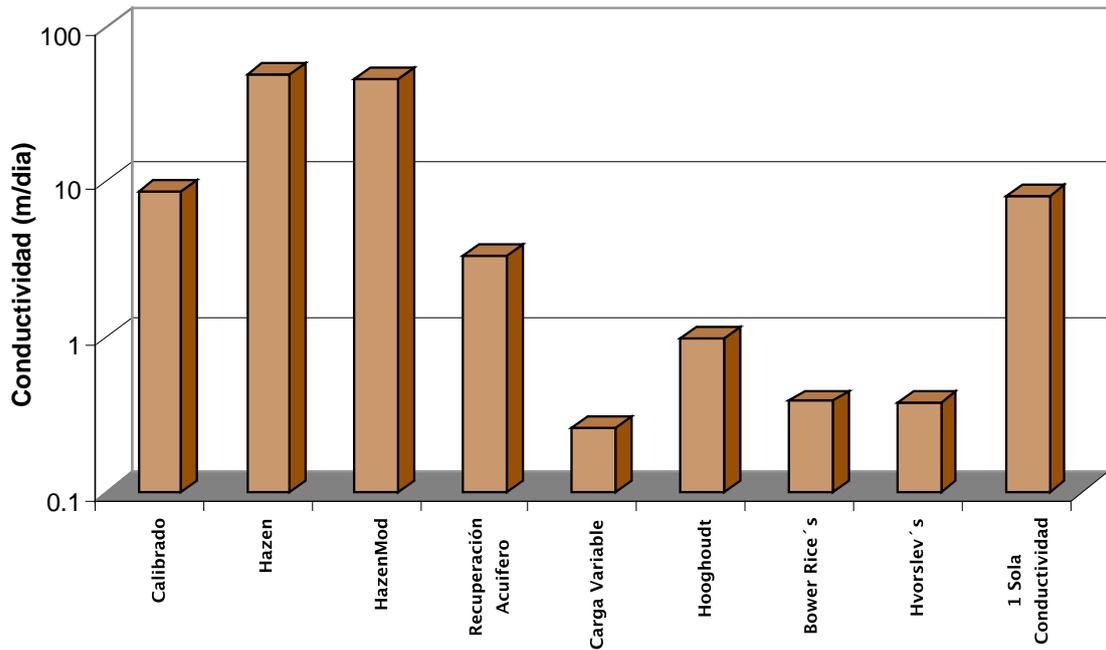


Figura 13 Resultados calicata 1

Calicata 2

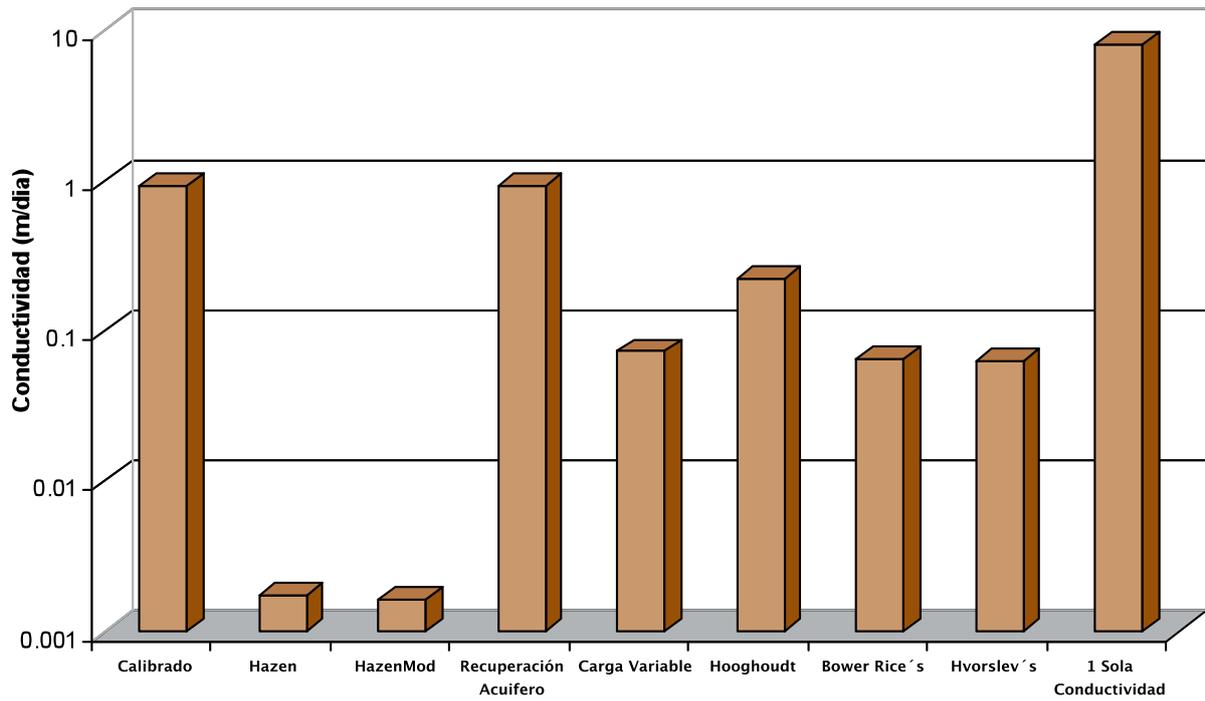


Figura 14 Resultados calicata 2

Calicata 3

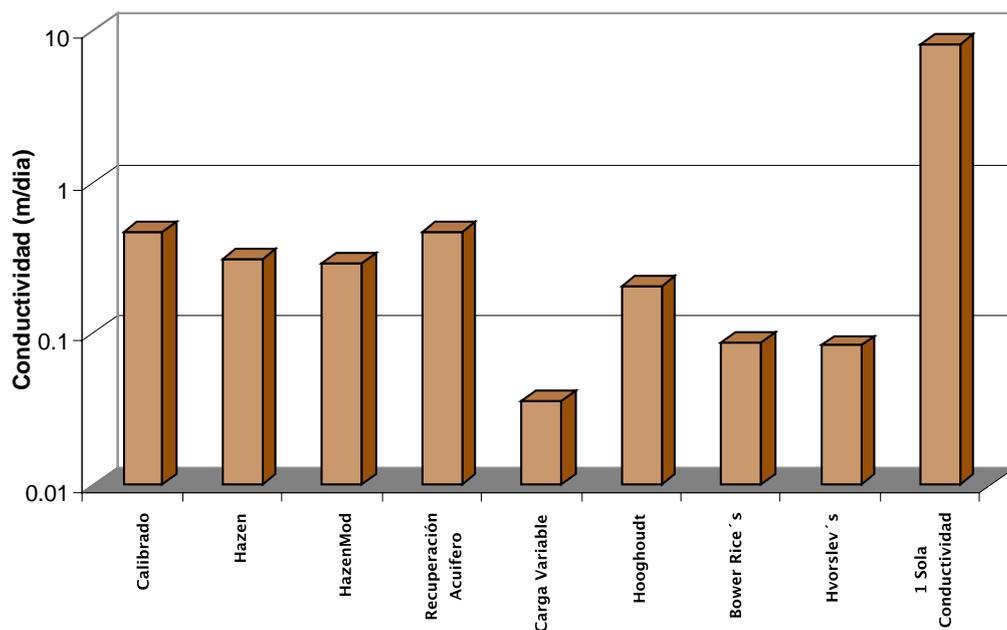


Figura 15 Resultados calicata 3

Calicata 4

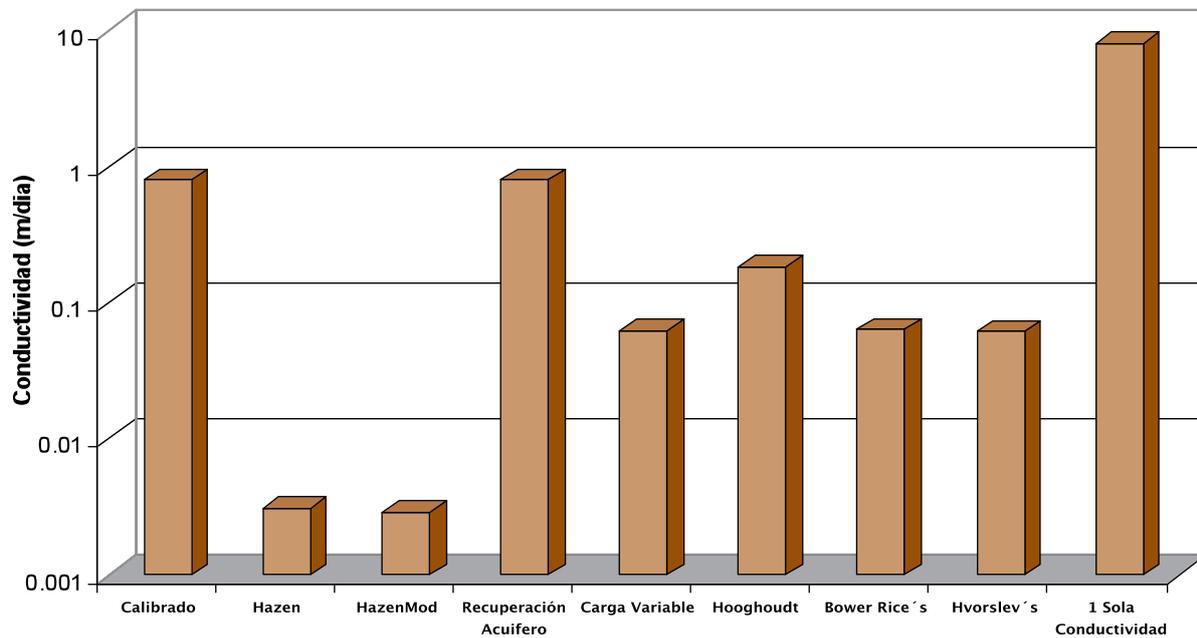


Figura 16 Resultados calicata 4

Calicata 5

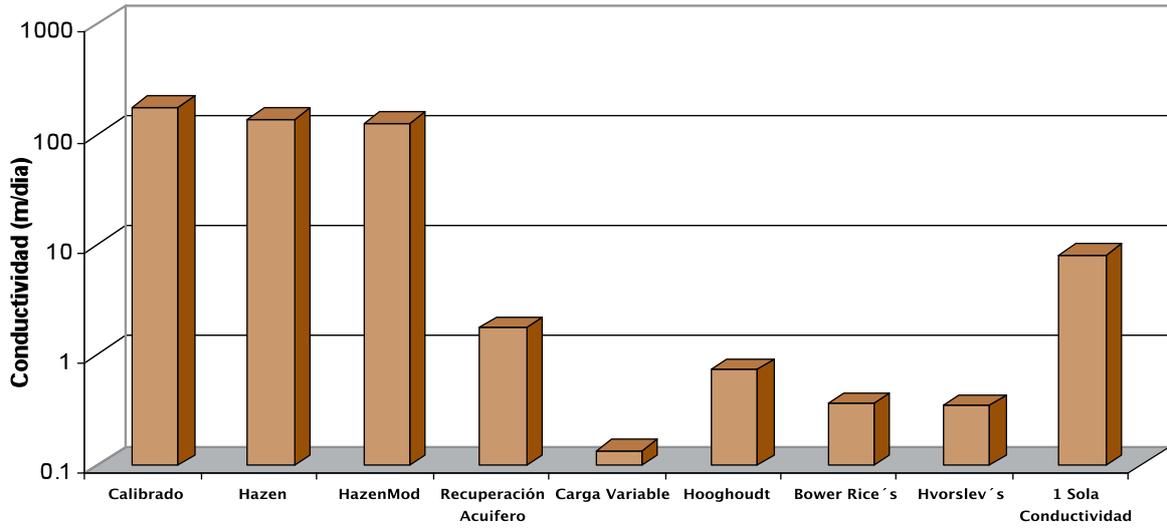


Figura 17 Resultados calicata 5

Calicata 6

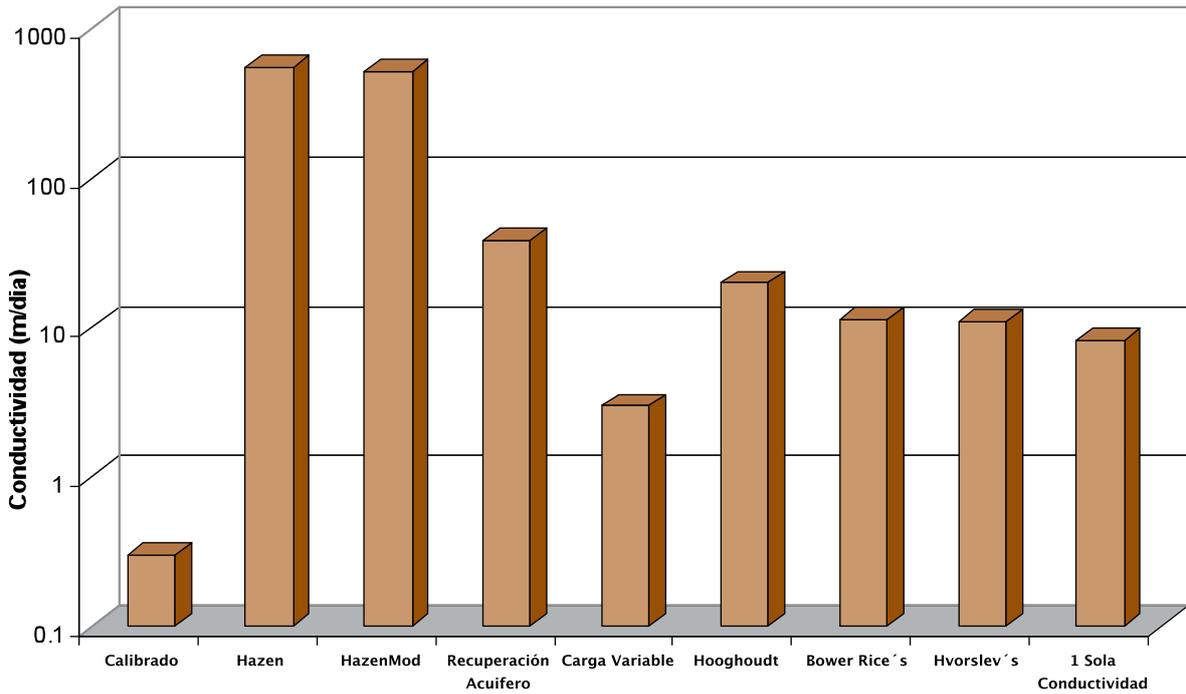


Figura 18 Resultados calicata 6

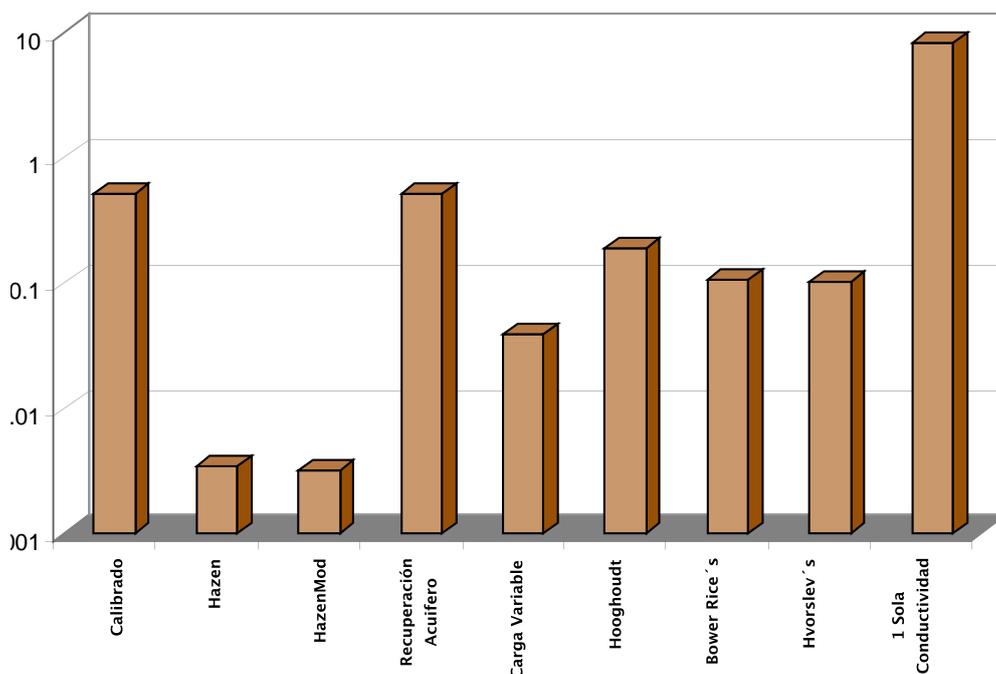


Figura 19 Resultados calicata 7

Seguidamente se ven los resultados para cada método aplicado en las diferentes calicatas.

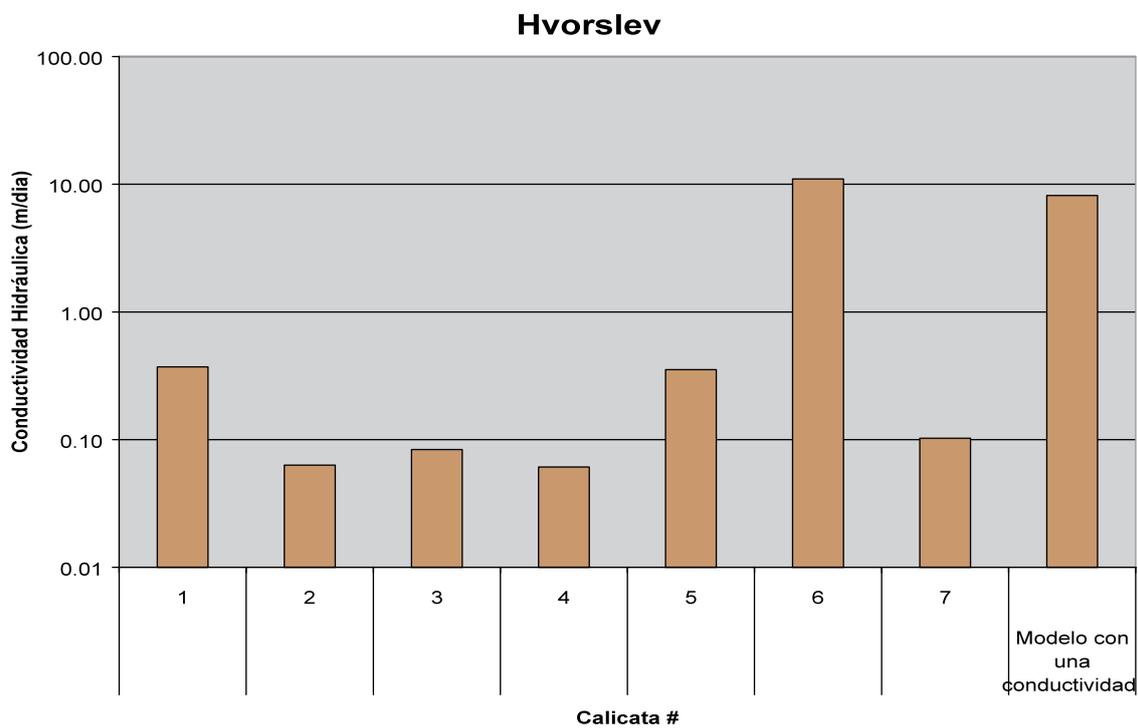


Figura 20 Resultados método de Hvorslev

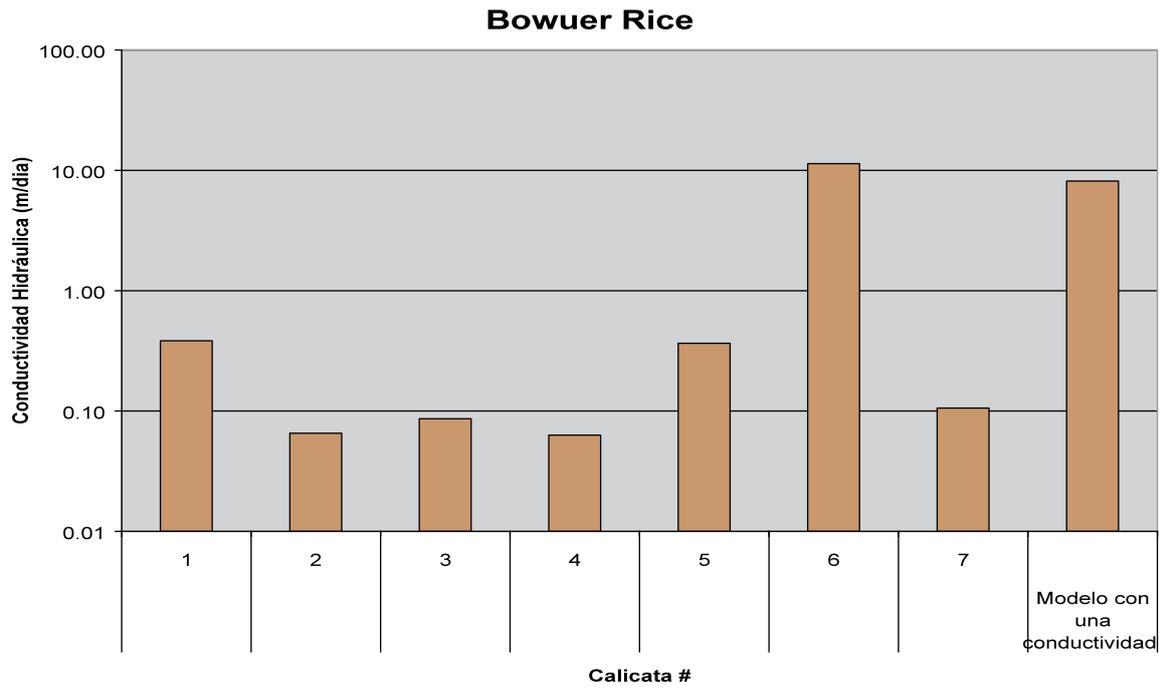


Figura 21 Resultados método de Bowuer Rice

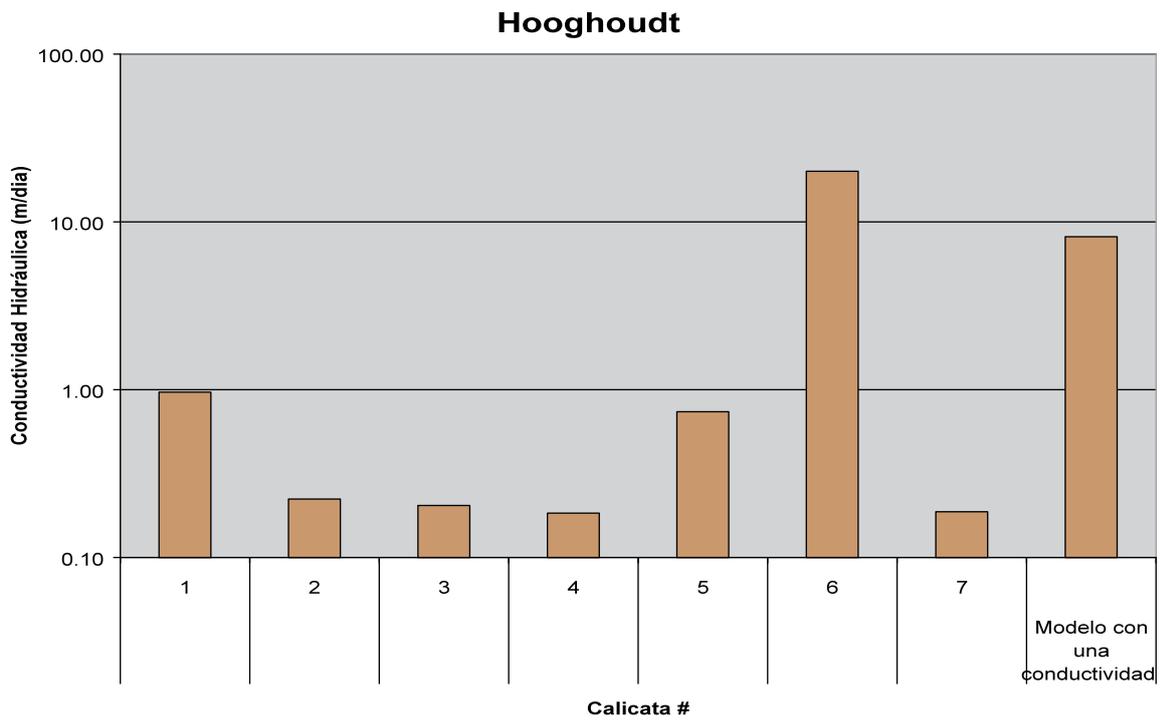


Figura 22 Resultados método de Hooghoudt

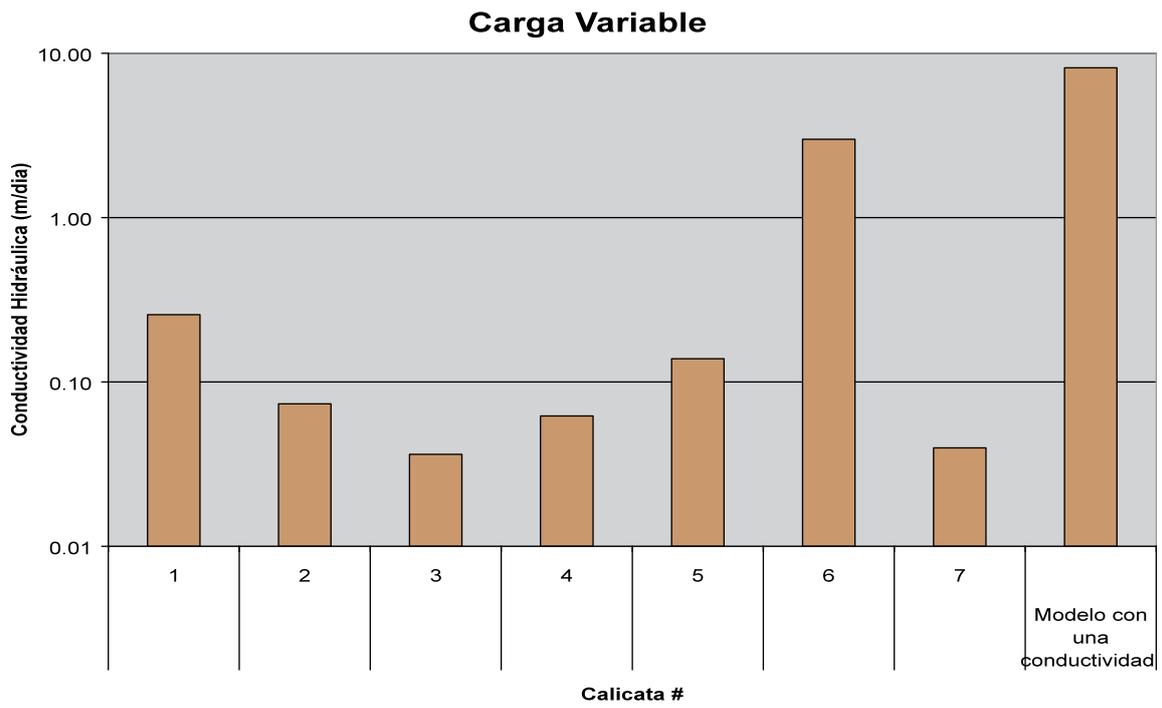


Figura 23 Resultados método de Carga Variable

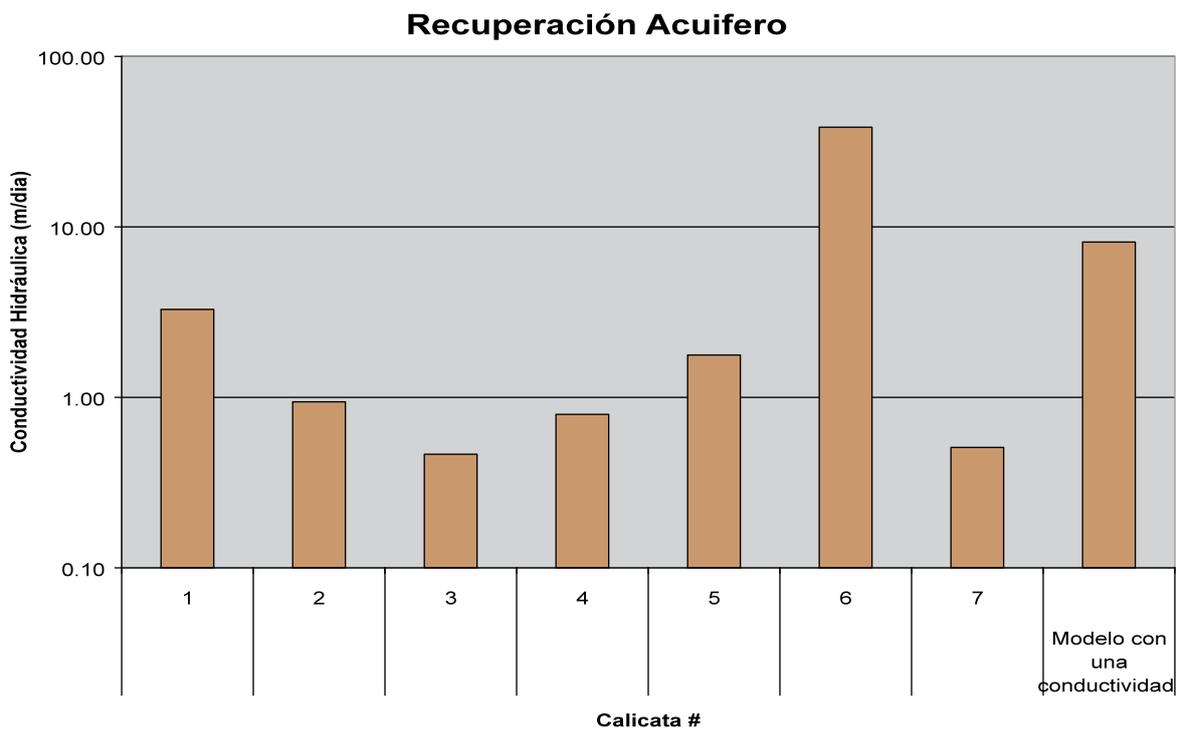


Figura 24 Resultados método de Recuperación de Acuífero

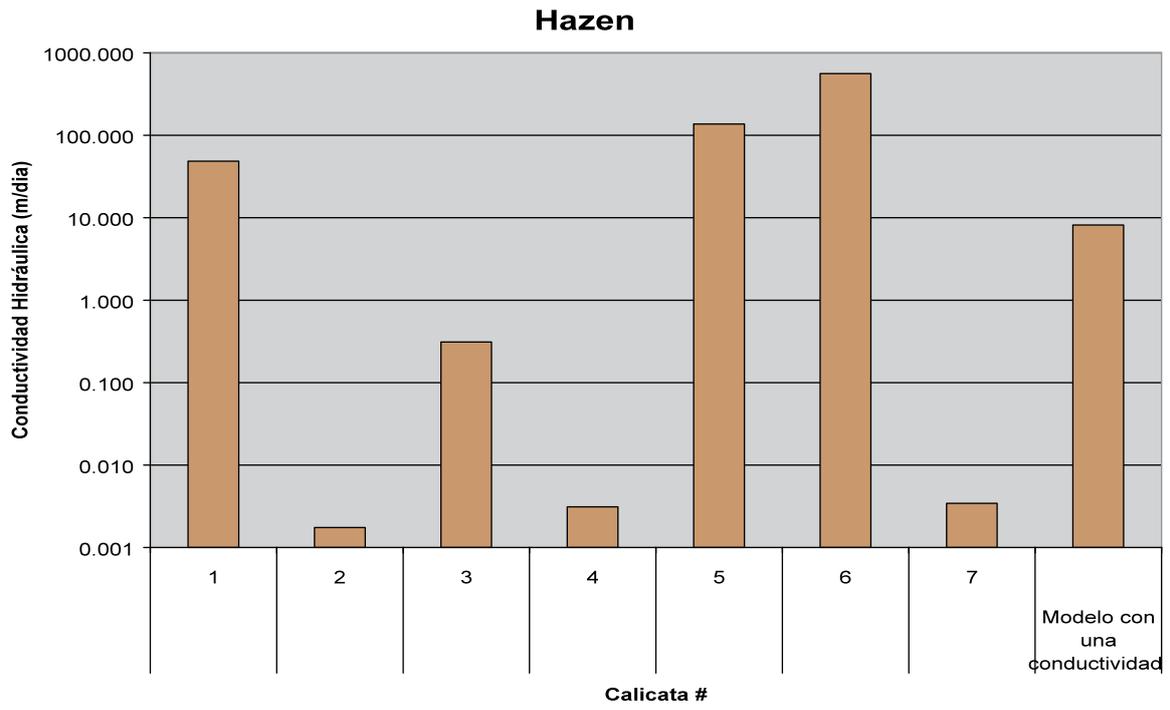


Figura 25 Resultados método de Hazen

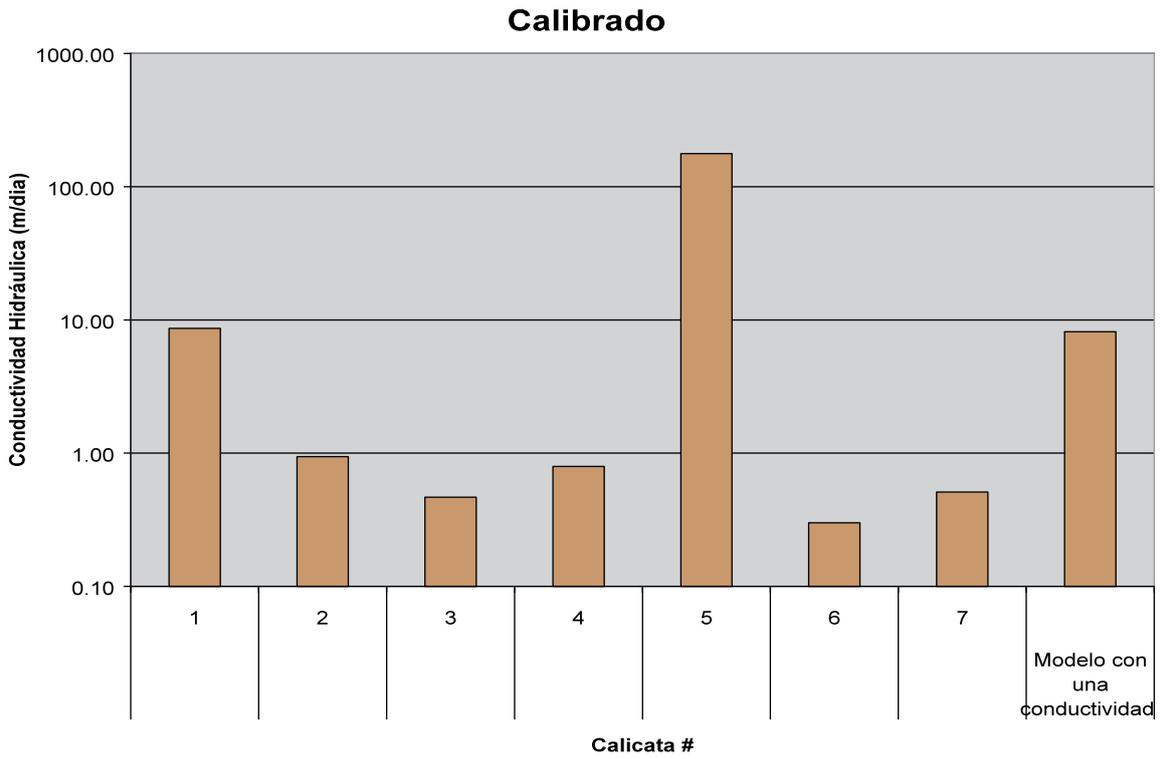


Figura 26 Resultados modelo calibrado

2.12. COEFICIENTES DE DISPERSIÓN RESPECTO A LAS CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS CALIBRADAS

De las figuras anteriormente mostradas se observa la necesidad de aplicar un coeficiente de dispersión para ver cual de los métodos aplicados en campo es el que muestra menor dispersión respecto a las conductividades hidráulicas calibradas en el modelo.

Coeficiente 1C

$$D_{1C} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{cali_i} - K_{meto_i})^2}{n}}$$

Donde:

D_{1C} = Coeficiente de dispersión "1C"

K_{cali_i} = Conductividad hidráulica del modelo calibrado en los entornos de la calicata i

K_{meto_i} = Conductividad hidráulica encontrada con los diferentes métodos en los entornos de la calicata i

n = Número de calicatas implantadas en el área de estudio

Tabla 3 Coeficientes de dispersión "1C" para los diferentes métodos

D _{1c}	Descripción
213.31	Calibrado vs Hazen
198.59	Calibrado vs HazenMod
67.85	Calibrado vs Recuperación Acuífero
66.98	Calibrado vs Carga Variable
67.14	Calibrado vs Hooghoudt
67.01	Calibrado vs Bower Rice's
67.01	Calibrado vs Hvorslev's
64.18	Calibrado vs 1 Sola Conductividad

Coeficiente 2C

$$D_{2C} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(K_{cali_i} - K_{meto_i})^2}{K_{cali_i}} \right)}{n}}$$

Donde:

D_{2C} = Coeficiente de dispersión "2C"

K_{cali_i} = Conductividad hidráulica del modelo calibrado en los entornos de la calicata i

K_{meto_i} = Conductividad hidráulica encontrada con los diferentes métodos en los entornos de la calicata i

n = Número de calicatas implantadas en el área de estudio

Tabla 4 Coeficientes de dispersión "2C" para los diferentes métodos

D2c	Descripción
387.42	Calibrado vs Hazen
360.01	Calibrado vs HazenMod
26.76	Calibrado vs Recuperación Acuífero
5.50	Calibrado vs Carga Variable
14.54	Calibrado vs Hooghoudt
9.22	Calibrado vs Bower Rice's
9.01	Calibrado vs Hvorslev's
10.22	Calibrado vs 1 Sola Conductividad

El coeficiente 2C es una variante del coeficiente 1C. En el coeficiente 2C se le da un cierto peso a la conductividad hidráulica calibrada respecto al cuadrado de la diferencia entre la conductividad calibrada y la conductividad calculada por los diferentes métodos.

Coeficiente 3C

$$D_{3C} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{K_{cali_i} - K_{meto_i}}{K_{cali_i}} \right)^2}{n}}$$

Donde:

D_{3C} = Coeficiente de dispersión "3C"

K_{cali_i} = Conductividad hidráulica del modelo calibrado en los entornos de la calicata i

K_{meto_i} = Conductividad hidráulica encontrada con los diferentes métodos en los entornos de la calicata i

n = Número de calicatas implantadas en el área de estudio

Tabla 5 Coeficientes de dispersión "3C" para los diferentes métodos

D3c	Descripción
707.08	Calibrado vs Hazen
657.06	Calibrado vs HazenMod
47.98	Calibrado vs Recuperación Acuífero
3.51	Calibrado vs Carga Variable
24.84	Calibrado vs Hooghoudt
13.97	Calibrado vs Bower Rice's
13.50	Calibrado vs Hvorslev's
13.77	Calibrado vs 1 Sola Conductividad

La El coeficiente 3C es adimensional ya que la conductividad hidráulica calibrada está en directa relación con la diferencia entre la conductividad calibrada y la conductividad calculada.

2.13. COEFICIENTES DE DISPERSIÓN RESPECTO A LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA ÚNICA

Aplicando el coeficiente de dispersión para la resultante de la modelación con una sola conductividad hidráulica tenemos lo siguiente:

Coeficiente 1U

$$D_{1U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{uni} - K_{meto_i})^2}{n}}$$

Donde:

- D_{1U} = Coeficiente de dispersión "1U"
 K_{uni} = Conductividad hidráulica única
 K_{meto_i} = Conductividad hidráulica encontrada con los diferentes métodos en los entornos de la calicata i
 n = Número de calicatas implantadas en el área de estudio

Tabla 6 Coeficientes de dispersión "1U" para los diferentes métodos

D _{1U}	Descripción
64.18	Unica conduc vs Calibrado
215.50	Unica conduc vs Hazen
200.00	Unica conduc vs HazenMod
13.11	Unica conduc vs Recuperación Acuífero
7.71	Unica conduc vs Carga Variable
8.46	Unica conduc vs Hooghoudt
7.49	Unica conduc vs Bower Rice's
7.47	Unica conduc vs Hvorslev's

En la tabla 6 se ve que los coeficientes de dispersión más bajos son de los métodos de Hvorslev, Bower Rice y Carga variable respectivamente, pero también se observa que los métodos de Hooghoudt y Recuperación de Acuífero tienen un coeficiente de desviación muy próximo.

Coeficiente 2U

$$D_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(K_{uni} - K_{meto_i})^2}{K_{uni}} \right)}{n}}$$

Donde:

- D_{2U} = Coeficiente de dispersión "2U"
 K_{uni} = Conductividad hidráulica única
 K_{meto_i} = Conductividad hidráulica encontrada con los diferentes métodos en los entornos de la calicata i
 n = Número de calicatas implantadas en el área de estudio

Tabla 7 Coeficientes de dispersión “2U” para los diferentes métodos

D2U	Descripción
22.47	Unica conduc vs Calibrado
75.46	Unica conduc vs Hazen
70.03	Unica conduc vs HazenMod
4.59	Unica conduc vs Recuperación Acuífero
2.70	Unica conduc vs Carga Variable
2.96	Unica conduc vs Hooghoudt
2.62	Unica conduc vs Bower Rice's
2.62	Unica conduc vs Hvorslev's

Coeficiente 3U

$$D_{3U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{K_{uni} - K_{meto_i}}{K_{uni}} \right)^2}{n}}$$

Donde:

D_{3U} = Coeficiente de dispersión “3U”

K_{uni} = Conductividad hidráulica única

K_{meto_i} = Conductividad hidráulica encontrada con los diferentes métodos en los entornos de la calicata i

n = Número de calicatas implantadas en el área de estudio

Tabla 8 Coeficientes de dispersión “3U” para los diferentes métodos

D3U	Descripción
7.87	Unica conduc vs Calibrado
26.42	Unica conduc vs Hazen
24.52	Unica conduc vs HazenMod
1.61	Unica conduc vs Recuperación Acuífero
0.95	Unica conduc vs Carga Variable
1.04	Unica conduc vs Hooghoudt
0.92	Unica conduc vs Bower Rice's
0.92	Unica conduc vs Hvorslev's

Lo primero que se concluye es que las tres ecuaciones de coeficientes de dispersión no presentan grandes diferencias con respecto a los resultados.

De la tabla 3 se puede concluir que los métodos que más aproximan sus resultados a los obtenidos en el modelo calibrado son los de Carga Variable seguido por el método de Hvorslev, Bower Rice y Hooghoudt.

Los métodos de Bower Rice y Hvorslev fueron procesados en el paquete Acuífer Test, (Anexo 3).

En la tabla 4 se ve que el método de Carga Variable presenta el coeficiente de dispersión más bajo, seguido de los métodos de Hvorslev y Bower Rice; además se ve que los métodos de Hazen y Hazen modificada son los que mayor dispersión presentan respecto a la conductividad hidráulica calibrada.

En la tabla 11.3 se observa que los métodos con menor coeficiente de dispersión son el de Carga Variable seguidos de Hvorslev y Bower Rice; de igual manera, los métodos de Hooghoudt y Recuperación de Acuífero no se encuentran muy lejanos. Sin embargo, se ve nuevamente que los métodos más alejados son los de Hazen y Hazen modificado.

En la tabla 6 se ve que los coeficientes de dispersión más bajos son de los métodos de Hvorslev, Bower Rice y Carga variable respectivamente, pero también se puede decir que los métodos de Hooghoudt y Recuperación de Acuífero tiene un coeficiente de desviación no muy elevado.

Los métodos menos aconsejados y los que presentan mayor dispersión son los de Hazen, ya que este es un método empírico elaborado para otras condiciones, pero bastante aplicado en nuestro medio.

2.14. SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD

Una vez analizados los diferentes métodos, para obtener el coeficiente de permeabilidad ya sea por los métodos de laboratorio o los de campo, estos tienen sus limitaciones debido a diferentes factores que inciden en la obtención de los resultados. Así, los ensayos de permeabilidad en los laboratorios pueden alcanzar un alto grado de precisión en lo que respecta a la muestra ensayada, sin embargo; como consecuencia de la gran dificultad que supone tomar muestras (inalteradas) verdaderamente representativa en campo, pocas veces se llega a un acuerdo satisfactorio entre los ensayos de campo y los de laboratorio.

Por otra parte, las pruebas de campo, si bien representan al material del acuífero en su forma tal como están acomodados, pero tampoco son totalmente representativos del total del acuífero por la heterogeneidad de granulometrías que pueden tener las diferentes capas del acuífero.

Si bien, los métodos actuales para medir el coeficiente de permeabilidad en el terreno, son un poco toscos, definen no obstante, la permeabilidad promedio de los materiales de un área determinada, mejor que los ensayos aislados de laboratorio.

Los métodos, para la determinación de la conductividad hidráulica, que dan mejor resultado son los de campo. Entre los métodos de laboratorio que se pueden aconsejar para su aplicación están:

- Carga Variable
- Hooghoudt
- Hvorslev
- Bower Rice

Entre los métodos de campo, el de bombeo y recuperación de pozos es el más utilizado, pues, es el que da los resultados más veraces. Sin embargo, la duración de la prueba, está sujeta al tipo de material que compone el acuífero, así en un acuífero muy permeable la prueba de bombeo durará menor tiempo que en uno con materiales de granulometría fina.

En los casos en que la galería tenga que construirse en el lecho de masas de agua superficiales, es imposible hacer una prueba de bombeo. Lo que se impone es realizar pruebas de laboratorio a muestras tomadas en puntos distintos y a diferentes profundidades. El valor del coeficiente sería el promedio de los valores obtenidos en las pruebas individuales.

Las pruebas de bombeo en campo (in situ), se recomienda realizarlos al final de la época de estiaje, para hallar valores del coeficiente de permeabilidad que garanticen un mínimo de caudal en el diseño de la galería filtrante.

Es importante utilizar el equipo de bombeo adecuado, para cada caso y en función a la capacidad del acuífero.

ANEXO 3

ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y ECUACIONES EMPÍRICAS

3.1. INTRODUCCIÓN

Para el presente trabajo se elaboró una base de datos con las principales galerías de nuestro país, para este propósito se elaboraron fichas, las cuales están divididas en trece preguntas como se verá a continuación. Con la información que se obtuvo se generaron parámetros adimensionales con los cuales se hizo un análisis estadístico para proponer ecuaciones empíricas.

3.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

- Revisión de la información existente acerca de cada uno de los sistemas de riego seleccionados de forma general, y de forma específica de cada uno de los elementos integrantes de los sistemas analizados.
- Recopilación de datos en las instituciones elaboradoras de los proyectos de riego, ejecutoras y los propios usuarios.
- Revisión de cada una de las memorias de cálculo generadas en el periodo de diseño de todos los sistemas de riego a analizar, para conocimiento de los criterios de cálculo y todas las consideraciones realizadas para la solución del problema.

Trabajo de campo

Realización de trabajo de campo para el llenado de las fichas técnicas de cada uno de los sistemas a ser analizados.

Trabajo de gabinete

- Con los datos recabados durante el trabajo de gabinete y de campo, y apoyado por bibliografía especializada, se realizó el análisis estadístico.
- Se agruparon las principales variables en una tabla de la cual se escogieron los datos más representativos y confiables, para su posterior estudio.
- Se realizó un análisis dimensional para poder relacionar todas estas variables.
- Con los parámetros adimensionales obtenidos del paso anterior, se aplicó un ajuste de funciones para poder generar una ecuación, con la cual se pueda predecir el caudal que llegaría a captar una galería en proyecto.
- Se verificaron las ecuaciones planteadas con los datos de las galerías filtrantes ya estudiadas.

3.3. ANÁLISIS DIMENSIONAL

3.3.1. Introducción

El análisis dimensional es una forma de organización del conocimiento de los fenómenos físicos. No persigue el conocimiento de los fenómenos como tales, sino más bien, la relación funcional de

las variables que los gobiernan ^[1].

La teoría del análisis dimensional considera aquellas partes del universo físico relacionadas con la modelación en términos de un número limitado de “*dimensiones fundamentales*”, tales como: masa, longitud y tiempo.

La técnica del análisis dimensional considera básicamente dos pasos importantes:

- Identificación de todas las variables importantes.
- Determinación de grupos adimensionales de estas variables.

Establecer todas las variables no siempre es una tarea sencilla en vista de que es necesaria mucha experiencia y no siempre es posible verificar la validez de la selección. El segundo paso, puede ser verificado muy fácilmente si se posee una metodología matemática rigurosa de control.

Tabla 1 Dimensiones de las variables que intervienen en el estudio ^[2]

Variable	Símbolo	Dimensiones [M, L, T]
Longitud	L	[L]
Tiempo	T	[T]
Masa	M	[M]
Área	A	[L] ²
Volumen	V	[L] ³
Descarga	Q	[L] ³ / [T]
Descarga unitaria	Q	[L] ² / [T]
Viscosidad cinemática	ν	[L] ² / [T]
Viscosidad dinámica	μ	[M] / ([L][T])
Peso específico	γ	[M] / ([L] ² [T] ²)

3.4. PRINCIPIO DE FOURIER

Fourier plantea el “*principio de homogeneidad dimensional*”, cuyo enunciado señala que:

“Una ecuación es dimensionalmente homogénea, solamente si todos sus términos tienen las mismas unidades.”

Como las dimensiones derivadas están siempre en términos de las dimensiones fundamentales [M], [L] y [T] (o algún otro grupo fundamental), el principio indica que el exponente de cada una de estas dimensiones debe ser el mismo en todos los términos de la ecuación.

La aplicación principal del “*Principio de homogeneidad*”, es la determinación de la forma general de los términos de una ecuación que gobierna un determinado fenómeno físico.

La elección de la solución más apropiada, cae fuera del campo de acción del análisis dimensional. Es en esta parte, donde el análisis y el conocimiento profundo de los principios físicos que intervienen en el problema juegan un papel crucial. ^[1]

1 Fuente Rocabado O. I.; **Análisis Dimensional**; LHUMSS 1996, Pág 4-6

2 Fuente: V. L. Streeter, E.B. Wylie; **Mecánica de fluidos**; Mcgraw Hill 198; Pág. 223.

3.5. MÉTODO DE RAYLEIGH

Este método consiste básicamente en establecer la relación funcional de las variables consideradas, identificando combinaciones adimensionales de éstas. En otras palabras, consiste en estudiar las diferentes variables en su forma dimensional, utilizando el principio de Fourier para obtener una serie de ecuaciones dimensionalmente homogéneas. [1]

3.6. MÉTODO DE BUCKINGHAM

El teorema Pi(π) de Buckingham establece que en un problema físico en que se tengan n variables que incluyen m dimensiones, las variables se pueden agrupar en $n-m$ parámetros adimensionales independientes. En efecto, sean $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$, las variables consideradas tales como el caudal, velocidad, etc. Se supone que todas estas variables son esenciales para resolver el problema, el cual puede ser expresado mediante la siguiente relación funcional.

$$F(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = 0$$

Sí $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{(n-m)}$ representan parámetros adimensionales que agrupan a las variables A_1, A_2, A_3, \dots , todas estas incluyendo m dimensiones, el teorema de Buckingham establece la existencia de la ecuación:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0$$

El método para determinar los parámetros p consiste en seleccionar m de las n cantidades A , con diferentes dimensiones y emplearlas como variables repetitivas al combinarlas con las cantidades A restantes. Formando así cada parámetro adimensional π [3]

3.7. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES DE LA BASE DE DATOS

Con el propósito de establecer los parámetros adimensionales que relacionan las variables y parámetros considerados en el presente estudio, se recurre al método de Buckingham descrito anteriormente.

Primeramente, se considera que el caudal captado por la galería filtrante esta en función a su profundidad de implantación, a la precipitación en la cuenca, al área de la cuenca, al coeficiente de escurrimiento y a la conductividad hidráulica.

Seguidamente, se considera la relación funcional entre las variables presentadas en la Tabla 2

3 Fuente: Streeter V. L., E.B. Wylie; Mecánica de fluidos; Mcgraw Hill 198; Pág. 223.

Tabla 2 Dimensiones de las variables que interviene en el análisis dimensional.

Identificación variables y parámetros	Símbolo	Unidades	Dimensiones
Caudal captado	Q	m ³ /seg/m	L ³ /T/L
Conductividad hidráulica	K	m/seg	L/T
Precipitación	P	mm/año	L/T
Área cuenca	A	Km ²	L ²
Profundidad galería	hp	M	L
Longitud galería	hl	M	L
Coeficiente de Escurrimiento	C _e		

Por lo tanto, se tiene que:

$$n = 6 \quad \text{Variables.} \quad F(Q, K, P, A, hp, hl) = 0 \quad m = 2 \quad \text{Dimensiones.} \quad [L], [T]$$

$$m - n = 4 \quad \text{Parámetros adimensionales} \quad (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0$$

$$p_1 = Q^a \cdot K^b \cdot P^c \cdot A^d$$

$$p_2 = Q^a \cdot K^b \cdot P^c \cdot A^d \quad \pi_3 = P^a \cdot K^b \cdot A^c \cdot hp^d \cdot hl^e$$

$$\pi_4 = hp^a \cdot K^b \cdot A^c$$

Dimensionalmente:

$$\pi_1 = \left(\frac{L^3}{T}\right)^a \cdot \left(\frac{L}{T}\right)^b \cdot (L)^c \cdot (L)^d$$

De acuerdo al principio de Fourier, ambos miembros deberán tener un exponente apropiado que garantice la homogeneidad dimensional, para este efecto se tiene que:

$$[L]: \quad 3a + b + c + d = 0 \quad a = a$$

$$[T]: \quad -a - b = 0 \quad b = -a$$

$$c = -a$$

$$d = -a$$

$$\pi_2 = \left(\frac{L^3}{T}\right)^a \cdot \left(\frac{L}{T}\right)^b \cdot (L^2)^c$$

$$[L]: \quad 3a + b + 2c = 0 \quad a = a$$

$$[T]: \quad -a - b = 0 \quad b = -a$$

$$c = -a$$

$$d = a$$

$$\pi_3 = \left(\frac{L}{T}\right)^a \cdot (L^2)^b \cdot \left(\frac{L}{T}\right)^c \cdot (L)^d \cdot (L)^e$$

$$[L]: a + 2b + c + d + e = 0 \quad a = a$$

$$\begin{aligned}
 [\text{T}]: \quad -a-c &= 0 & c &= -a \\
 & & b &= -a \\
 & & d &= -a \\
 & & e &= -a
 \end{aligned}$$

$$\pi_4 = (L)^a (L)^b$$

$$\begin{aligned}
 [\text{L}]: \quad a+b &= 0 & a &= a \\
 & & b &= a
 \end{aligned}$$

Como consecuencia, se obtienen los siguientes números adimensionales:

$$f\left(\frac{Q}{Kh_p h_l}, \frac{Q}{PA} C, \frac{PA}{Kh_l h_p}, \frac{h_p}{h_l} C\right) = 0$$

3.8. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO

La evapotranspiración potencial es el límite superior de la cantidad de agua que vuelve a la atmósfera, de manera que para estimar la evapotranspiración real debe tomarse en cuenta la cantidad de agua que efectivamente existe en la zona para evapotranspirarse. Para una cuenca cualquiera la ecuación de balance hídrico para un intervalo determinado, será igual a:

$$P = ETR + Q + \Delta R$$

Donde:

- P = Precipitación, en milímetros
- ETR = Evapotranspiración real, en milímetros
- Q = Excedentes de agua, escurrimientos e infiltraciones, en milímetros
- ΔR = Incremento o decremento en la reserva de agua utilizable por la vegetación, en milímetros.

Si se considera que el valor de las reservas al comienzo y al final del periodo son muy similares, por lo tanto despreciable en comparación con los valores P y Q (intervalo de gran duración, por ejemplo, un año), se tiene:

$$ETR = P - Q$$

El término ETR también se conoce como Déficit de Escurrimiento (D) y su interés práctico reside en su valor medio anual que varía relativamente poco. Además se ha observado, que el déficit de escurrimiento anual (P-Q) varía mucho menos que el llamado coeficiente de escurrimiento (Q/P).⁴ Criterio de coeficiente de escurrimiento, con este criterio se supone que las pérdidas son proporcionales a la intensidad de la lluvia, esto es:⁵

$$R = C_e I$$

Donde:

- R = Escurrimiento directo acumulado
- I = Altura de lluvia acumulada

4 Fuente: D.F. Campos Aranda; **Procesos del Ciclo Hidrológico**; Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Pág 7-59

5 Fuente: Aparicio; **Fundamentos de Hidrología de Superficie**; Noriega Editores, Pág 182

El escurrimiento directo acumulado está en milímetros entonces es igual a Q, y la altura de lluvia acumulada también está en milímetros y es igual a P de aquí tenemos que:

$$C_e = \frac{Q}{P}$$

Si:

$$\frac{Q}{P} = \frac{P - ETR}{P}$$

De la ecuación anterior tenemos que:

$$C_e = \left(\frac{P - ETR}{P} \right)$$

Para poder determinar el coeficiente de escurrimiento necesitamos la evapotranspiración real, esta la estimamos con la formula empírica de M. Turc.

Turc a partir de observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas por todos los climas del mundo, reporta la siguiente expresión:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P^2}{L^2} \right)}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

La limitante teórica de esta formula es que para $P < 0.31L$ daría una evapotranspiración real mayor que la precipitación, por lo tanto, en tales casos habrá que considerar a $ETR = P$ ⁶

3.9 RESULTADOS

De la base de datos extractamos la siguiente información, tabla 3.

Para el análisis estadístico no se consideraron las obras de Potosí debido a que su implantación es superficial, y no se las considera como galerías sino como zanjas filtrantes.

Tampoco se considero la galería filtrante de Taquiña debido a que esta tiene características muy particulares en lo que respecta a una gran pendiente, material grueso en el lecho y su ubicación en un río de alta montaña.

Remplazando términos se tiene:

$$\pi_1 = \frac{Q}{K \cdot hp \cdot hl}$$

$$\pi_2 = \frac{Q}{P \cdot A} C_e$$

$$\pi_3 = \frac{P \cdot A}{K \cdot hp \cdot hl}$$

$$\pi_4 = \frac{hp}{hl} C_e$$

⁶ Fuente: D.F. Campos Aranda; Procesos del Ciclo Hidrológico; Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Pág 7-62

En la tabla se muestran todos los valores de los parámetros adimensionales, para un mejor uso de los paquetes estadísticos se denominaron Pi1, Pi2, Pi3 y Pi4.

Tabla 3 Resumen de la información extractada de la base de datos

	Nombre	Área Cuenca km ²	Precipitación mm/año	Profundidad m	Longitud m	Cantidad Alrededor litros	Ancho Eje m	Conductividad µmho	Q de diseño litros	Temperatura °C	ETR mm/año	C _o
Cochabamba	Tapiña	193	830	4.2	22	4	38	146.88		16	636.648	0.251
	Río Deco	22	441	4.5	188	1	1.50	8.15	30	16.8	418.140	0.052
Moque	Montecillos	110	566	6	108	133	1.50	24.39	25	20	534.238	0.056
	Tajra	110	538	4.68	308	30	300	10	30	20	528.158	0.053
	Tipa Tipa	15	408	7	43	57	98	64		20	466.217	0.029
	Tako Tako	120	588	2.8	73	45	2.50	96	150	20.22	546.479	0.058
Aiquile	Kjaruna	443	594	3.5	108	132.5	300	7.2576	36	18	536.637	0.097
	Tipejira	18	558.3	7.88	43	31	48	4.42	19	20	528.633	0.054
	Zamora	443	594	4	108	108	1.50	7.2577	36	18	536.637	0.097
	Tipepampa	37	594	4	108	102	2.50	5.1		19	546.287	0.088
	Loromayu	15	563.64	4.5	36	12.77	38	6.1	11.92	18	516.077	0.084
Oruro	Resolva	42.48	322.3	1.96	484	18	1.50	9.14	20	10.6	298.295	0.074
	Paco Pampa	23	322.3	3.42	96	25	700	18	8.96	10.6	298.295	0.074
	Huaylla Pasto	34	367	3	32.3	19	33	23.3	21.3	10.6	328.874	0.104
	Condor Chancos	56	388.2	3	33	45	35	25.3	12.3	10.6	288.211	0.063
Potosí	Maldonado	2465	354	8.8	58	35	168	864	65.83	14.9	340.874	0.037
	Buena Vista	4	294	1.2	158	2	1.50	21		14.9	298.660	0.011

Tabla 6.2 Parámetros dimensionales

	Nombre	Area mm ²	Precipi mm/año	lp mm	h mm	Q mm ³ /año	K mm/año	ETR mm/año	C _e	F ₁	F ₂	P ₀	P ₄
Cochabamba	Taquña	1.93E+13	550	4300	22000	1.26144E+14	53611200	636.648	0.25100	0.025	0.001910	3.3460	0.04792
	Río Seco	2.2E+13	441	4500	110000	2.52288E+14	2974750	418.143	0.05183	0.171	0.001348	6.5888	0.00212
Mizque	Montecillos	1.1E+14	566	6000	100000	4.19429E+15	2902350	534.231	0.05613	0.785	0.003781	11.6561	0.00337
	Tejas	1.1E+14	558	4600	300000	9.4688E+14	3650000	528.151	0.05349	0.185	0.000825	11.9775	0.00083
	Tipa Tipa	1.5E+13	480	7000	45000	1.79755E+15	23360000	466.217	0.02871	0.244	0.007169	0.9785	0.00447
	Tako Tako	1.2E+14	580	2000	75000	1.41912E+15	32850000	546.479	0.05779	0.206	0.001178	10.0091	0.00216
Ayacucho	Kjanana	4.43E+13	594	3500	100000	4.17852E+15	3649024	536.637	0.09657	4.507	0.015335	28.3816	0.00338
	Tiguaná	1.8E+13	558.7	7000	45000	9.77616E+14	1613300	528.685	0.05372	1.707	0.005222	17.5568	0.00942
	Zamora	4.43E+13	594	4000	100000	3.24821E+15	3648805	536.637	0.09657	3.066	0.011921	24.8359	0.00386
	Tiguanámpa	3.7E+13	594	4000	100000	3.21667E+15	2007500	546.287	0.08033	4.006	0.011756	27.3699	0.00321
	Lacmavero	1.5E+13	563.64	4500	50000	3.39643E+14	2263000	516.077	0.08439	0.667	0.003390	16.6045	0.00759
Oruro	Realenga	4.246E+13	322.1	1960	414000	5.67648E+14	3336100	298.295	0.07391	0.210	0.003068	5.0521	0.00035
	Paco Pampa	2.3E+13	322.1	3420	96000	7.884E+14	6570000	298.295	0.07391	0.365	0.007865	3.4344	0.00263
	Huayña Pasto	3.4E+13	367	3000	32500	5.99184E+14	3504500	328.874	0.10389	0.723	0.004969	15.0484	0.00959
	Condor Chazara	5.6E+13	308.2	3000	33000	1.41912E+15	9234500	288.211	0.06486	1.552	0.005333	18.8787	0.00590
Potosí	Maldonado	2.405E+13	354	800	98000	1.10376E+15	315360008	340.874	0.03708	0.075	0.000046	60.3600	0.00051
	Buena Vista	4E+13	294	1200	150000	6.3072E+13	3000000	290.660	0.01136	0.044	0.000609	0.8136	0.00009

Tabla 4 Parámetros dimensionales

Para relacionar los parámetros adimensionales se aplicaron dos metodologías:

- Hipótesis 1) Regresión lineal entre dos parámetros y encontrar intervalos de confianza del 95% y 99% para verificar valores máximos y mínimos.
- Hipótesis 2) Se buscó la combinación entre dos parámetros que presenten el mejor ajuste siguiendo el criterio de la correlación.

3.9.1. Hipótesis 1

Para la aplicación de la regresión lineal y las franjas de confiabilidad se utilizó el software MINITAB Aplicando entre los coeficiente Pi1 versus Pi2 para un intervalo de confianza de 95% se tiene la figura 1 y con un intervalo de confianza de 99% se tiene la figura 2

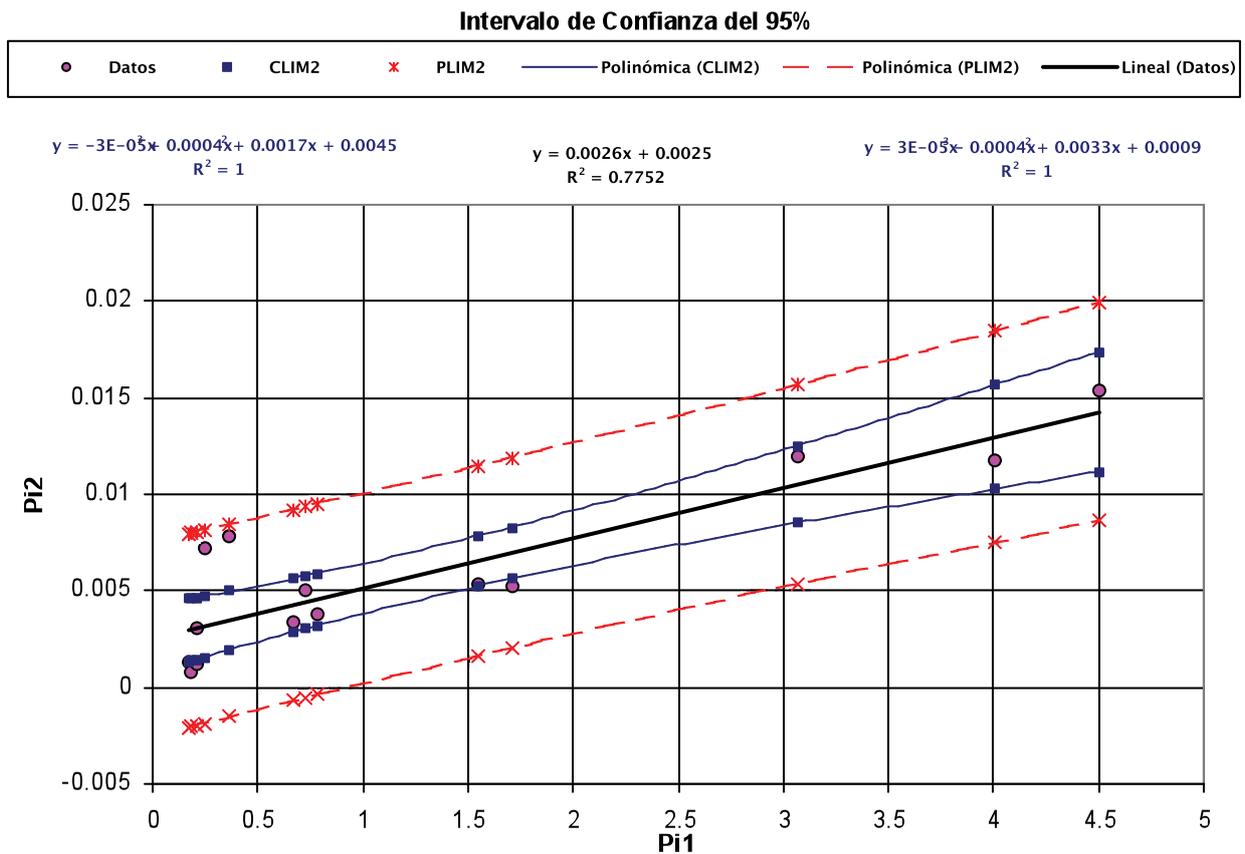


Figura 1 Intervalo de confianza del 95%

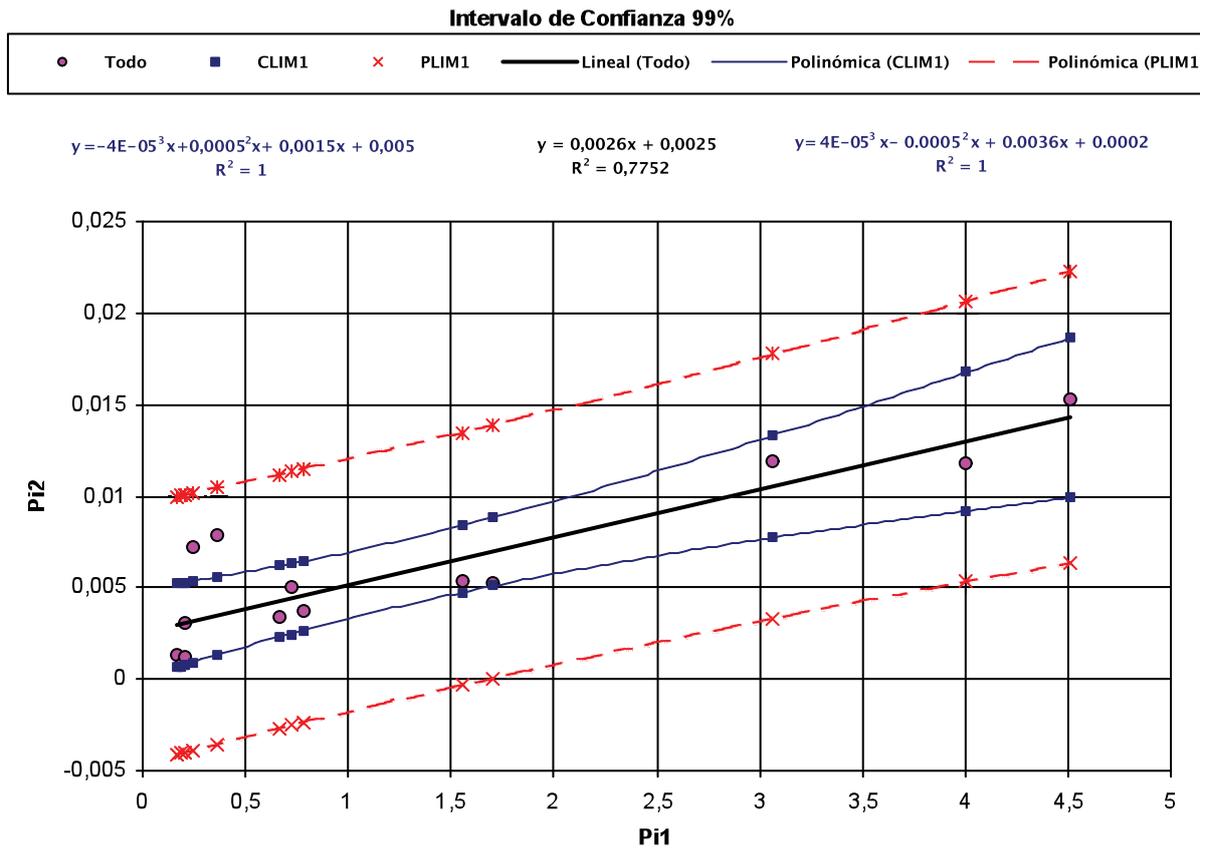


Figura 2 Intervalo de confianza del 99%

Donde:

- CLIM = Intervalo de confianza para el valor esperado.
- PLIM = Intervalo de confianza para el valor predecido.

De la regresión lineal tenemos la siguiente función:

$$\pi_2 = 0.0026\pi_1 + 0.0025$$

Con un coeficiente de correlación al cuadrado igual a 0.775.

De las figuras 1 y 2 se puede concluir que los puntos muestran cierta tendencia a excepción de las galerías de Pacopampa y Tipa Tipa. Dentro el intervalo de confianza del 99% no entran todos los puntos, esto indica que la función lineal no es la adecuada.

Aplicando la ecuación anterior para calcular caudales en base a los datos de la tabla 3, y comparándolos con los caudales aforado en campo se tiene la siguiente tabla 5 y figura 3.

Tabla 5 Resultados de la función lineal

	Q cal	Q cal l/s	Q obs l/s	Error	Error ²
Rio Seco	7.13423E+14	22.6	8	14.6	213.82
Montecillos	5.99795E+15	190.2	133	57.2	3271.13
Tajras	6.77698E+15	214.9	30	184.9	34186.73
Tipa Tipa	7.12655E+14	22.6	57	-34.4	1183.49
Tako Tako	5.55568E+15	176.2	45	131.2	17205.42
Kjaruma	2.6707E+15	84.7	132.5	-47.8	2286.05
Tipajara	2.65985E+15	84.3	31	53.3	2845.52
Zamora	1.98415E+15	62.9	103	-40.1	1606.64
Tipapampa	4.80153E+15	152.3	102	50.3	2525.63
Loromayu	5.12702E+14	16.3	10.77	5.5	30.11
Realenga	5.80299E+14	18.4	18	0.4	0.16
Paco Pampa	2.94878E+14	9.4	25	-15.6	244.91
Huayña Pasto	4.89589E+14	15.5	19	-3.5	12.08
Condor Chinoca	2.54115E+15	80.6	45	35.6	1265.88
				391.5	15485.41

Desv 33.258

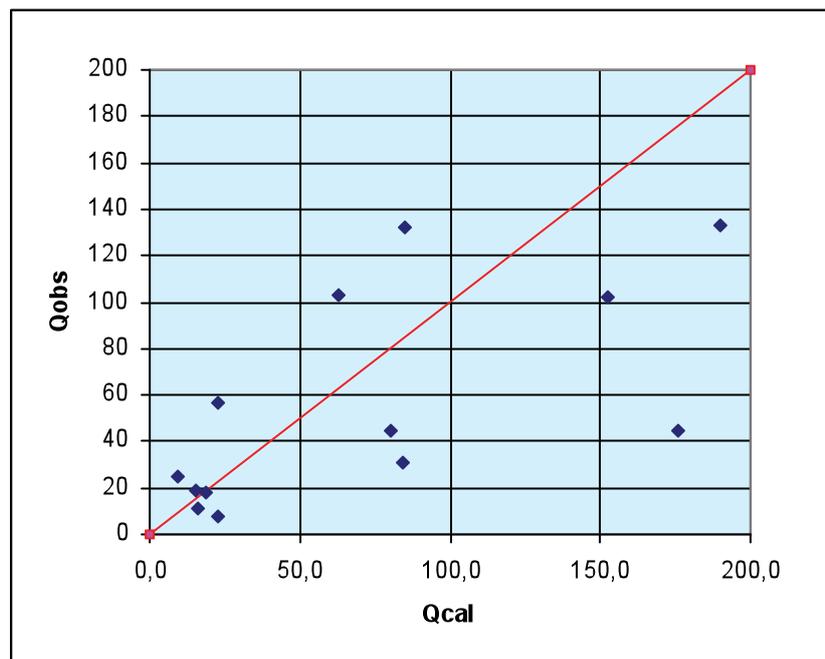


Figura 3 Grafica de Caudales calculados versus observados

Los resultados presentan cierta semejanza excepto en las galerías de Tajras y Taka Tako, la comparación de los caudales calculados con los observados presentan una desviación de 32.258. En la galería de Tajras se encuentra interferencia de conos de abatimiento ya que la galería de Montecillos se encuentra a escasos 50 metros de esta, y en la galería de Tako Tako existen problemas constructivos como ser: exagerada altura para la primera fila de barbacanas, erróneo lugar de implantación y falta de filtros bien gradados.

Aplicando las funciones polinómicas ajustadas al intervalo de confianza para el valor esperado, se encuentran los caudales máximos y mínimos para todas las galerías filtrantes tabla 5; se ve que

estos presentan una gran variación y generan problemas en la resolución de dichas ecuaciones; llevando a descartar la hipótesis de usar intervalos de confianza para predecir valores máximos y mínimos de caudal.

Tabla 6 Resultados máximos y mínimos para intervalos de confiabilidad del 95%

Maximos $\pi_2 = -3E - 05\pi_1^3 + 0.0004\pi_1^2 + 0.0017\pi_1 + 0.0045$

Minimos $\pi_2 = 3E - 05\pi_1^3 - 0.0004\pi_1^2 + 0.0033\pi_1 + 0.0009$

	Maximos		Minimos		Delta l/s
	Q cal	Q cal l/s	Q cal	Q cal l/s	
Rio Seco	9,21831E+14	29,2	2,9484E+14	9,3	19,9
Montecillos	7,59665E+15	240,9	5,2417E+15	166,2	74,7
Tajras	1,08874E+16	345,2	3,9325E+15	124,7	220,5
Tipa Tipa	1,08183E+15	34,3	3,1373E+14	9,9	24,4
Tako Tako	8,54413E+15	270,9	2,8691E+15	91,0	180,0
Kjaruma	1,23635E+16	392,0	8,4077E+15	266,6	125,4
Tipajara	7,11966E+15	225,8	5,9913E+15	190,0	35,8
Zamora	3,67205E+15	116,4	1,331E+15	42,2	74,2
Tipapampa	9,69799E+15	307,5	8,7369E+15	277,0	30,5
Loromayu	6,36063E+14	20,2	4,3888E+14	13,9	6,3
Realenga	7,81093E+14	24,8	2,2652E+14	7,2	17,6
Paco Pampa	4,85544E+14	15,4	1,4081E+14	4,5	10,9
Huayña Pasto	6,36063E+14	20,2	2,109E+14	6,7	13,5
Condor Chinoca	7,57122E+15	240,1	1,5333E+15	48,6	191,5

3.9.2. Hipótesis 2

Como segunda alternativa se ajustaron diferentes funciones a todas las combinaciones entre los parámetros adimensionales, los resultados de estas regresiones se obtuvieron con la aplicación del paquete computacional Curxpt ver 3.0.

De todas las combinaciones posibles las funciones que presentaron mejores resultados son las siguientes:

Pi3 versus Pi1

3 vs 1

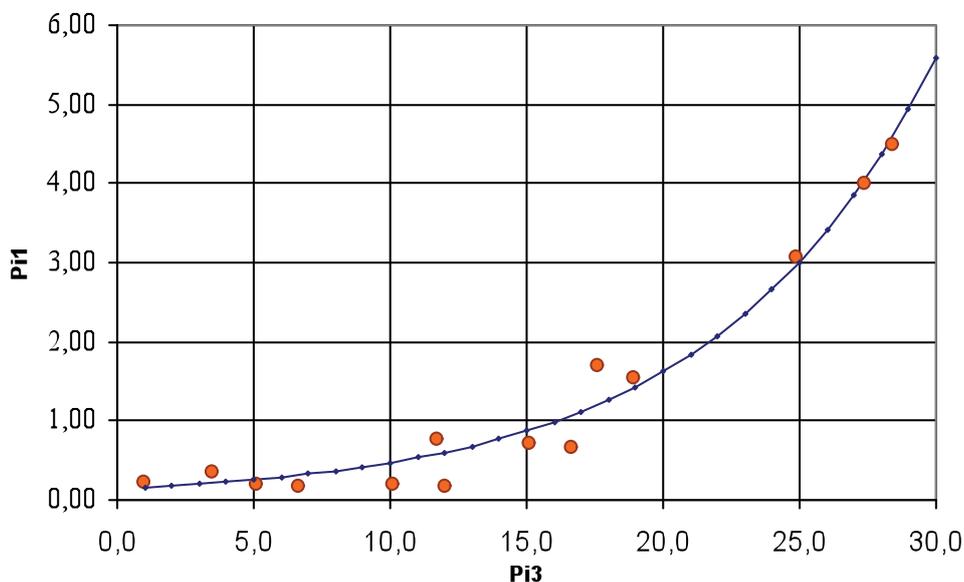


Figura 4 Parámetros adimensionales Pi3 versus Pi1 con su función.

Tabla 7 Pi3 versusu Pi1 caudales calculados y observados

Pi3 versus Pi1

$$\frac{Q}{K \cdot h_L \cdot h_P} = a \cdot b \left(\frac{P \cdot A}{K \cdot h_L \cdot h_P} \right)$$

a = 0.13697341
b = 1.131572

Nombre	Objetivo	Qcal	Qcal l/s	Qobs l/s	Delta	Error^2
Rio Seco	0.30926937	4.554E+14	14.4	8	6	41.48
Montecillos	0.57857702	3.09042E+15	98.0	133	-35	1225.25
Tajras	0.60202678	3.08515E+15	97.8	30	68	4600.82
Tipa Tipa	0.15458341	1.13749E+15	36.1	57	-21	438.09
Tako Tako	0.47669868	3.28851E+15	104.3	45	59	3513.86
Kjaruma	4.57320359	4.24008E+15	134.5	132.5	2	3.81
Tipajara	1.19984822	6.87276E+14	21.8	31	-9	84.76
Zamora	2.9504124	3.12603E+15	99.1	103	-4	15.01
Tipapampa	4.03562241	3.2406E+15	102.8	102	1	0.58
Loromayu	1.06660257	5.43087E+14	17.2	10.77	6	41.62
Realenga	0.25576796	6.92375E+14	22.0	18	4	15.64
Paco Pampa	0.20941342	4.51718E+14	14.3	25	-11	113.98
Huayña Pasto	0.87997373	7.29664E+14	23.1	19	4	17.12
Condor Chinoca	1.41281816	1.29162E+15	41.0	45	-4	16.35
					67	2013.68

Des 12.9540199

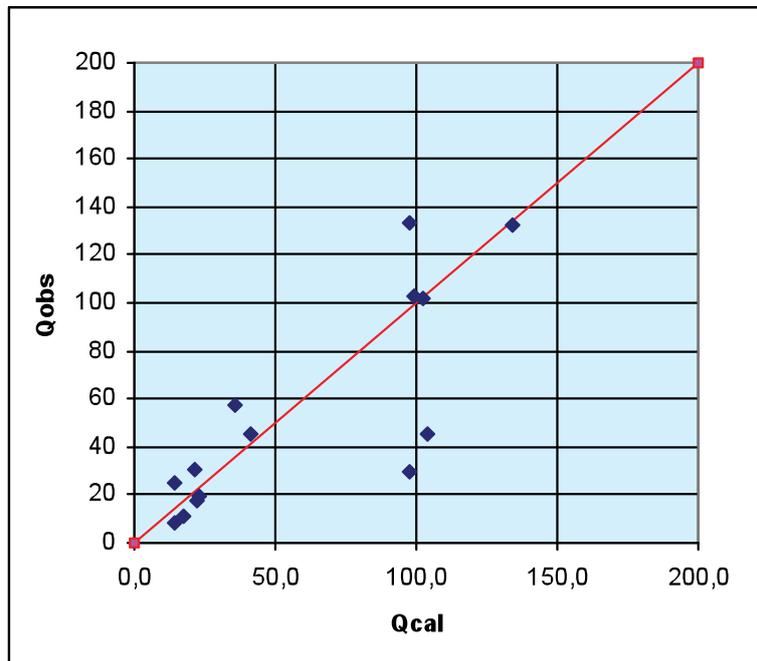


Figura 5 Caudales calculados versus observados Pi3, Pi1

Para el cálculo de la desviación no se tomaron en cuenta las galerías de Tajras y Tako Tako, debido a los problemas mencionados anteriormente.

Pi3 versus Pi2

3 vs 2

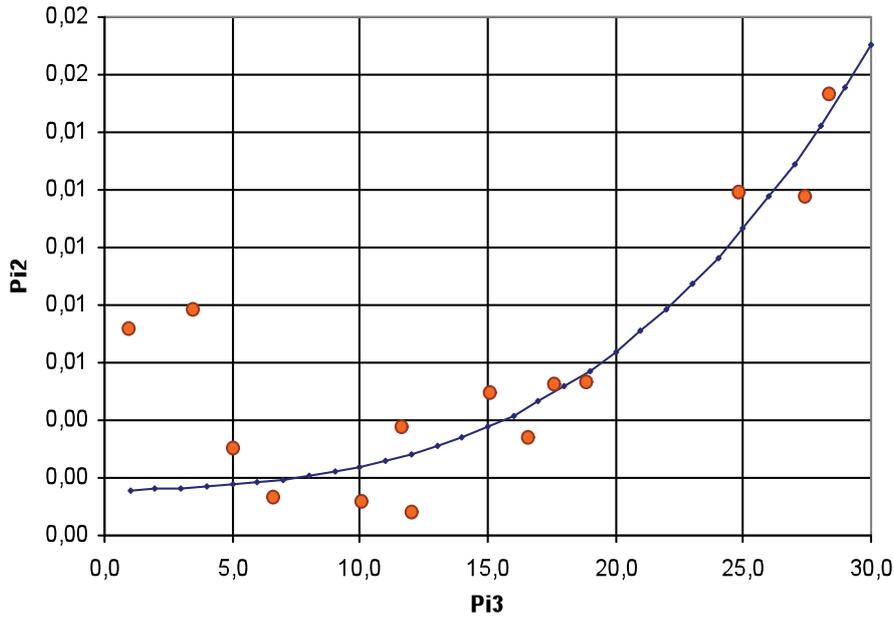


Figura 6. Parámetros adimensionales Pi3 versus Pi2

Tabla 8 Pi3 versus Pi2 caudales calculados y observados

Pi3 versus Pi2

$$\frac{Q}{K \cdot h_p \cdot h_L} = a + b \cdot \left(\frac{P \cdot A}{K \cdot h_p \cdot h_L} \right) + c \cdot \left(\frac{P \cdot A}{K \cdot h_p \cdot h_L} \right)^2 + d \cdot \left(\frac{P \cdot A}{K \cdot h_p \cdot h_L} \right)^3$$

a = 0.00153395
 b = 4.09E-05
 c = -1.49E-06
 d = 5.78E-07

Nombre	Objetivo	Qcal	Qcal l/s	Qobs l/s	Delta	Error^2
Rio Seco	1.90E-03	3.56E+14	11.3	8	3	10.90
Montecillos	2.72E-03	3.02E+15	95.8	133	-37	1384.49
Tajras	2.80E-03	3.22E+15	102.0	30	72	5182.52
Tipa Tipa	1.57E-03	3.94E+14	12.5	57	-44	1979.57
Tako Tako	2.39E-03	2.88E+15	91.2	45	46	2134.81
Kjaruma	1.47E-02	4.01E+15	127.1	132.5	-5	29.62
Tipajara	4.92E-03	9.21E+14	29.2	31	-2	3.22
Zamora	1.05E-02	2.86E+15	90.6	103	-12	154.31
Tipapampa	1.34E-02	3.66E+15	116.1	102	14	199.63
Loromayu	4.45E-03	4.46E+14	14.1	10.77	3	11.29
Realenga	1.78E-03	3.29E+14	10.4	18	-8	57.35
Paco Pampa	1.68E-03	1.68E+14	5.3	25	-20	386.49
Huayña Pasto	3.78E-03	4.54E+14	14.4	19	-5	21.14
Condor Chinoca	5.66E-03	1.51E+15	47.8	45	3	7.78
					9	4245.79

Des 18.810

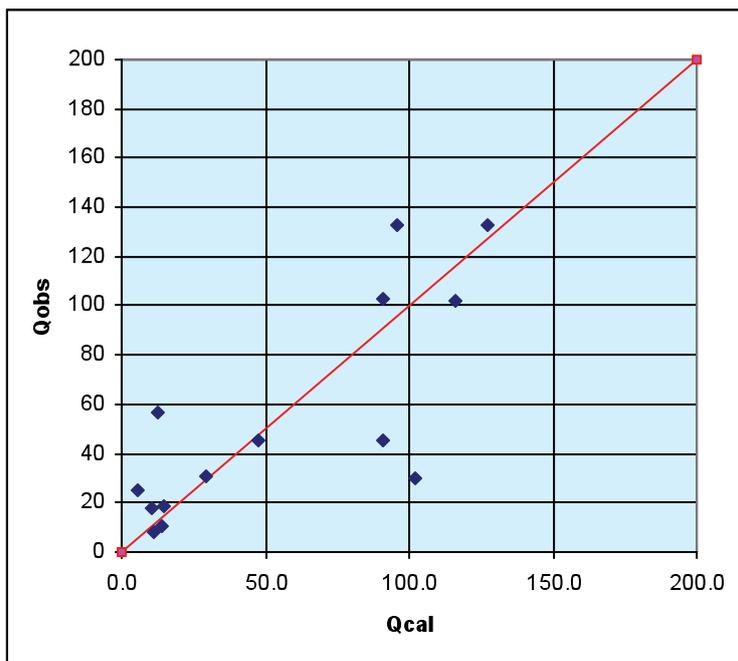


Figura 7 Caudales calculados versus observados Pi3, Pi2

3.10. CONCLUSIONES

Después de aplicar los métodos estadísticos se llega a la conclusión de que la hipótesis 1, regresión lineal y aplicación de franjas de confiabilidad no colmó las expectativas propuestas dando resultados con un rango de error muy grande.

Sobre la hipótesis 2 se puede decir que es válida para el cálculo de caudales, y que dará una buena aproximación para galerías proyectadas.

Se probaron otras alternativas de combinación de parámetros adimensionales, de las cuales se extractaron las mostradas en este anexo. El criterio de decisión fue el coeficiente de correlación.

Las presentes ecuaciones empíricas serán de gran ayuda en diseños preliminares, ya que fueron desarrolladas con datos de galerías en funcionamiento y situadas en diversos lugares de nuestro país. Sacando un error medio en porcentaje se tiene

$$100 * \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|Q_{cal_i} - Q_{obs_i}|}{Q_{obs_i}} \right)}{n}$$

En la ecuación Pi3 versus Pi1 se tiene que:

Para caudales menores a 50l/s un error porcentual de 36.8%

Para caudales mayores a 50l/s un error porcentual de 13.8%

En la ecuación Pi3 versus Pi2 se tiene que:

Para caudales menores a 50l/s en error porcentual de 32.1%

Para caudales mayores a 50l/s un error porcentual de 27.2%.

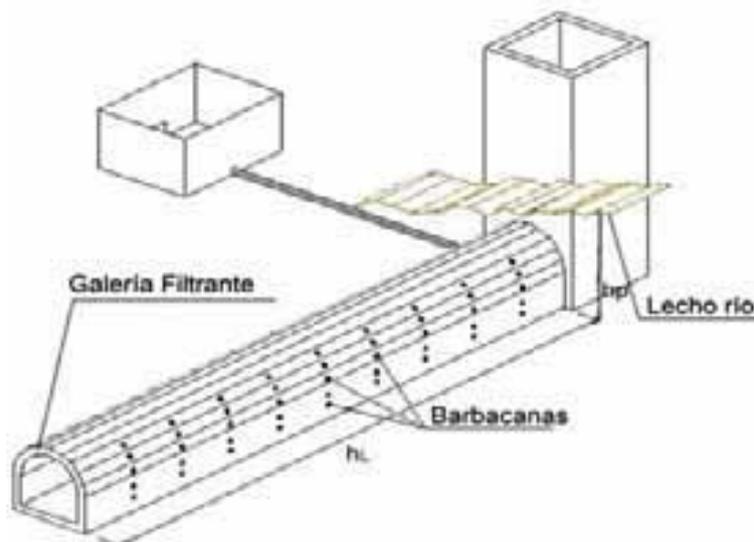


Figura 8 Esquema galería filtrante con parámetros para la aplicación de las ecuaciones

Las unidades para la aplicación de estas ecuaciones empíricas son las siguientes:

Para

- Área (mm^2)
- Precipitación (mm/año)
- Profundidad de implantación "hp" (mm)
- Largo galería "hl" (mm)
- Caudal ($\text{mm}^3/\text{año}$)
- Conductividad hidráulica (mm/año)
- Coefficiente de escurrimiento (adimensional)

COMPENDIO DE CRITERIOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE GALERÍAS FILTRANTES

Una galería filtrante cumple una misión importante en la supervivencia y desarrollo de una comunidad, por ello, el diseño y construcción de la infraestructura de captación debe ser tal que se cumpla con el objetivo de políticas estatales en materia de riego, y que no defraude las expectativas y esfuerzos de la población beneficiaria.

Durante el desarrollo de la investigación se han podido distinguir dos etapas diferentes en el proceso de diseño de galerías filtrantes:

- La recolección de información y evaluación del potencial hídrico subterráneo
- El diseño ingenieril en sí

El énfasis en la distinción radica en que la recolección de información de aguas subterráneas, necesaria para el diseño, demanda mayor esfuerzo y recursos económicos si se lo compara con obras de toma superficiales (determinación de niveles freáticos vs. precipitaciones o caudales) pero también marca el éxito del diseño.

Por ello una de las labores de mayor importancia que se debe realizar desde la etapa de concepción del proyecto es el de instalar piezómetros en el lecho del río (aguas arriba y aguas abajo del futuro sitio de emplazamiento) para el monitoreo de niveles de la napa freática. Ello más una gráfica como en la Fig. 1 permitirán fijar un nivel de referencia para la ubicación de la obra.

Otro de los elementos que determina la evaluación del potencial hídrico del subálveo del río es la cuantificación correcta de la conductividad hidráulica. Debe omitirse la práctica de apelar a valores que consigna la literatura, pues este parámetro tiene un amplio margen de variabilidad; por el contrario, se recomienda realizar pruebas de bombeo en sitios selectos del lecho del río.

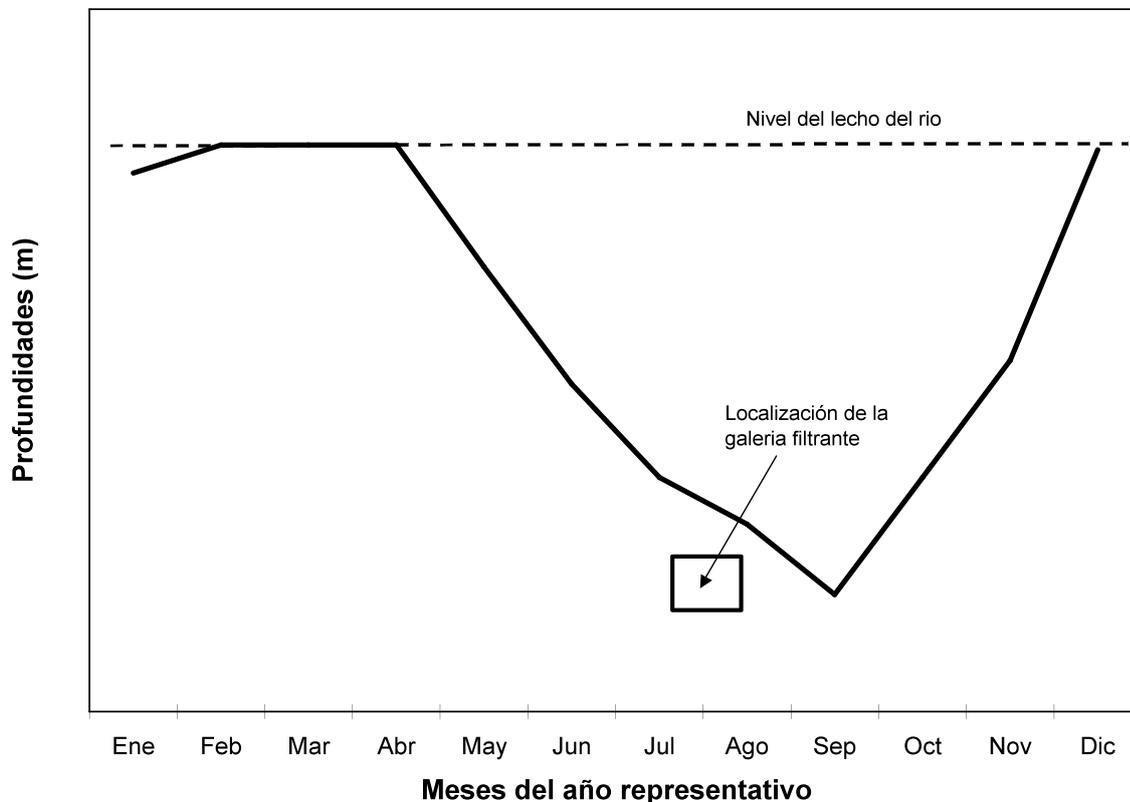


Figura. 9 Variación mensual hipotética de la napa freática que permite disponer de un valor de referencia para emplazar en vertical una galería filtrante

DEL EMPLAZAMIENTO DE LA GALERÍA

a) De la localización en planta

Si se trata de un río de quebrada, debe procurarse emplazar la galería transversalmente al río, en un sitio en que se identifiquen flancos rocosos en el cauce a fin de aprovechar el máximo caudal. Si un río discurre sobre una amplia llanura aluvial, la ubicación es más problemática. Un elemento útil es recurrir a mapas IGM, o si es posible, a fotos satelitales para identificar antiguos paleocauces e implantar apropiadamente la obra.

Otro factor que juega papel importantísimo son los derechos de agua y de territorio de terceros dentro de la zona de aprovechamiento y que deben ser bien definidos tanto aguas arriba como aguas abajo.

b) De la profundidad

En principio, cuan más profunda se emplace la galería, mayor caudal subterráneo se captará. Sin embargo, el diseño debe sujetarse a restricciones físicas como la presencia de la roca madre o estratos de baja permeabilidad. En este documento se adjunta una metodología que en términos de beneficio-costos calcula la profundidad de implante balanceando los costos de sobre excavación, entibado y achique frente al caudal incremental captado y monetizado.

DE LA ORIENTACIÓN DE LA GALERÍA

Para obtener el máximo rendimiento, la obra debe orientarse perpendicularmente al flujo subterráneo. Entre otras razones la red de piezómetros permite determinar la dirección del flujo y construir la obra captando un caudal dado con la menor longitud de galería posible (mínimo costo de inversión).

En el trabajo de campo realizado se halló orientaciones diversas; algunas de ellas justificables por razones de derechos de agua, y otras porque los usuarios tenían el propósito de aprovechar las aguas superficiales del río introduciéndolas a la galería.

DE LAS PARTES COMPONENTES DE UNA GALERÍA

a) Cámara de la Galería

Referida al conducto por cuyas paredes percola el agua captada por las barbacanas. Debe ser construida de dimensiones suficientes que permita la limpieza y mantenimiento cómoda de la obra. Se observó por ejemplo que en el río Vitiche, en aras de economía, se le proporcionaron dimensiones tan pequeñas que los usuarios la abandonaron por la dificultad de limpieza ante una colmatación de sedimentos producto de una crecida del río.

Para cauces muy amplios y cuando el río es divagante, una opción es tender tuberías de PVC perforadas a manera de galería filtrante que permita colectar el agua subterránea y conducirla a una cámara receptora. Un buen filtro alrededor de la tubería garantizará la vida útil del sistema. Como ejemplo de experiencia positiva se señala la captación del río Calicanto en Tarata – Cochabamba que contribuye a satisfacer la demanda de agua potable de la población.

b) Barbacanas

El número, distribución y diámetro de las barbacanas debe ser tal que no se constituyan en un obstáculo para las líneas de corriente (porosidad efectiva del subálveo y de la pared de la obra) y no produzcan una disminución del caudal captado (mayores pérdidas de energía).

c) Filtros

Una información valiosa recogida del trabajo de campo ha sido la poca dedicación destinada a la construcción de filtros para las galerías. En casi todo los casos o se han omitido filtros o su conformación se ha limitado al acomodo de material grueso extraído durante la excavación. Las fotos colectadas muestran como resultado de ello barbacanas colmatadas y material fino en el piso de la obra.

Es indispensable que durante la fase de diseño se destinen suficientes recursos para su construcción y que la Supervisión de la obra vea que las especificaciones técnicas sean cumplidas cabalmente. Recuérdese que un buen filtro habrá de satisfacer las recomendaciones de Terzaghi.

DE LAS GALERÍAS CONSTRUIDAS CON GAVIONES

Habitualmente se encuentran galerías filtrantes construidas con muros de hormigón armado, hormigón ciclópeo y mampostería de piedra; pero también mampostería de piedra acomodada. La Fig. 2 muestra un resumen gráfico comparando caudales de diseño frente a los aforados durante mayo y junio del 2001. Se evidencia la divergencia notable entre lo proyectado y lo medido.

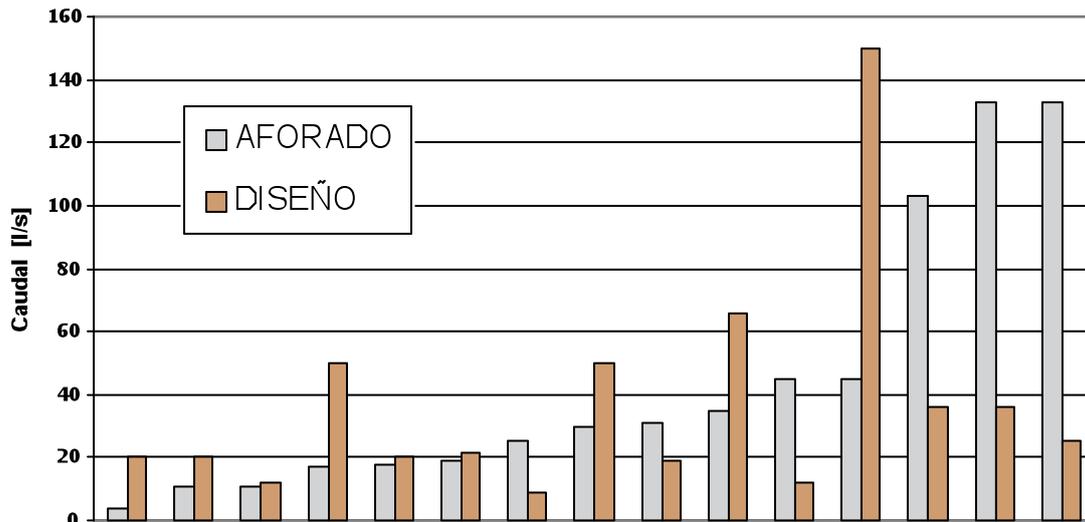


Figura 10 Comparación entre caudales aforados y los de diseño en 15 galerías filtrantes estudiadas

En la zona de Mizque – Aiquile se ha introducido un recurso constructivo para galerías filtrantes: el gavión. Gaviones han utilizado las galerías filtrantes de Montecillo y Tipa Tipa captando un caudal muy expectable, mayor al de diseño; pero no debe atribuirse este hecho al uso de gaviones si no al potencial del acuífero que tiene el subálveo del río. En todo caso, este tópico debe ser más ampliamente investigado sobre todo en lo concerniente a su vida útil.

LITERATURA REFERENCIADA

- Saenz R.; ***Hidraulica de las Aguas Subterráneas***; O.P.S., O.M.S 1984.
- Wang H. F. Anderson M. P.; *Introduction to Groundwater Modeling*; Freeman & company 1982.
- U.S. Geological Survey; ***The Official U.S.G.S. MODFLOW used in Visual MODFLOW***; U.S. Geological Survey; 1996.
- Waterloo hydrogeologic Inc; ***Visual MODFLOW User`s Manual***; Waterloo hydrogeologic Inc. 1997
- ***SEEPAGE, DRAINAGE, AND FLOW NETS***, Harry R. Cedergren
- ***Physical and Geotechnical Properties of Soil***; Joseph E. Bowles
- AquiferTest ***Users Manual***
- Modflow (Modular Three Dimensional Finite Difference Ground Water Flow Model)
- Kruseman G., Ridder N. *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. ILRI publication 47.