

GE
JR
04-012

Estudio de Manejo de Saneamiento Ambiental en la Costa del Estado de Quintana Roo en los Estados Unidos Mexicanos

Listado de Volúmenes

Volumen I	Resumen
Volumen I (S)	Resumen (versión en español)
Volumen II	Informe Principal
Volumen II (S)	Informe Principal (versión en español)
Volumen III	Anexo I
Volumen III (S)	Anexo I (versión en español)
Volumen IV	Anexo II
Volume IV(S)	Anexo II (versión en español)

Este es el Anexo II

En este informe se estimaron los costos de los proyectos a precios de noviembre del 2003 y una tasa de cambio de US\$1.00 = 11.00 pesos Mexicano = 110 yenes de Japón.

Contenido

Anexo J	Generalidades de los Proyectos Modelo
Anexo K	Tratamiento de Aguas Residuales Tipo Urbano
Anexo L	Tratamiento de Aguas Residuales Tipo Villa
Anexo M	Establecimiento del Sistema de Información sobre la Gestión Integral de Residuos
Anexo N	Formación de la Capacidad de una Agencia Ejecutora en Othón P. Blanco
Anexo O	Mejoramiento del Sitio de Disposición Final en el Municipio de Othón P Blanco
Anexo P	Mejoramiento del Servicio de Recolección en Othón P. Blanco
Anexo Q	Mejoramiento del Servicio de Recolección en Felipe Carrillo Puerto
Anexo R	Establecimiento de un Nuevo Sistema de Manejo de Residuos Sólidos en Costa Maya
Anexo S	Educación Ambiental y Actividades de Reciclaje

Abreviaturas

AC	Asociación Civil
AMSLM	Promedio de Metros Sobre el Nivel del Mar (Average Mean Sea Level Meters)
APAS	Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento
B/C	Beneficio-Costo
BANOBRAS	Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos
BI/F	Borrador del Informe Final
C/P	Contraparte
CAPA	Comisión de Agua Potable y Alcantarillado
CECADESU	Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable
CELAC	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
CNA	Comisión Nacional del Agua
CNANP	Comisión Nacional de Aguas Naturales Protegidas
COESPO	Consejo Estatal de Población
CONAPO	Consejo Nacional de Población
COSEPRE	Costo de los Servicios Prestados
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
E/F	Estudio de Factibilidad
EC	Conductividad Eléctrica
ECOSE	Ecología y Compromiso Empresarial
ECOSUR	El Colegio de la Frontera Sur
EIA	Evaluación Inicial del Ambiental
EM	Electro Magnético
FCP	Felipe Carrillo Puerto
FIDECARIBE	Fideicomiso para el Caribe
FONATUR	Fondo Nacional para el Turismo
GIS	Sistema de Información Geográfica
I/A	Informe de Avance
I/F	Informe Final
I/I	Informe Inicial
IDH	Índice de Desarrollo Humano
IIRA	Instituto de Impacto y Riesgo Ambiental
IMSS	Instituto Mexicano de Seguro Social
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología de Agua
INB	Ingreso Nacional Bruto
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
INI	Instituto Nacional Indigenista
ISSSTE	Instituto de Seguro Social al Servicio de los Trabajadores del Estado
JICA	Agencia de Cooperación Internacional del Japón (Japan International Cooperation Agency)
LEEPA	Ley Estatal de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Manejo Integral de los Residuos
M/R	Minutas de Reuniones
MAR	Manejo de Aguas Residuales
MAS	Manejo de Aguas Subterráneas
MLSS	Licor Mezclado de Sólidos Volátiles en Suspensión (Mixed-Liquor Volatile Suspended Solids)
MPNISP	Modelo de Prácticas Nacionales e Internacionales de Servicio Público
MRS	Manejo de Residuos Sólidos
ND	Información No Disponible
NPV	Valor Presente Neto

O&M	Operación y Mantenimiento
OCD	Demanda Química de Oxígeno (Chemical Oxygen Demand)
OD	Demanda de Oxígeno
OMSP	Oficina Municipal de Servicios Públicos
ONG	Organización No Gubernamental
OPB	Othón Pompeyo Blanco
P/M	Plan Maestro
PDSD	Desarrollo por Etapas del Sitio de Disposición Final (Phased Disposal Site Development)
PEA	Población Económicamente Activa
PEDI	Plan Estratégico de Desarrollo Integral
PEDU	Programa Estatal de Desarrollo Urbano
PEMEX	Petroleos Mexicanos
PIB	Producto Interno Bruto
PMDU	Programas Municipales de Desarrollo Urbano
PNB	Producto Nacional Bruto
PND	Plan Nacional de Desarrollo
PNDU	Programa Nacional de Desarrollo Urbano
Po/Mo	Proyectos Modelo
POET	Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial
PROFEPA	Procuraduría Federal para la Protección al Ambiente
PTAR/PTAN	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
R/I	Reporte Inicial
RS	Residuos Sólidos
SARH	Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos
SEANAP	Sistema Estatal de Areas Naturales Protegidas
SECTUR	Secretaría de Turismo
SEDEMAR	Secretaría de Marina
SEDENA	Secretaría de la Defensa Nacional
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEDUE	Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología
SEDUMA	Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente, Gobierno del Estado de Quintana Roo
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEPLADER	Secretaría de Planeación y Desarrollo
SESA	Secretaría Estatal de Salud
SIGIR	Sistema de Información para el Manejo Integral de los Residuos
SOL	Solidaridad
SS	Sólidos Suspendidos
SVI	Índice de Volumen de Lodos (Sludge Volume Index)
TDEM	Método Electromagnético de Tiempo-Dominio
TDS	Sólidos Totales Disueltos
TEM	Método de Transferencia Electromagnética
TIRE	Tasa Interna de Retorno Económica
TS	Total de Sólidos
TSS	Total de Sólidos Suspendidos
UNEP	Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USAID	Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos de América
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
USMN	Unidad para el Servicio Meteorológico Nacional
VES	Sondeo Eléctrico Vertical (Vertical Electric Sounding)
VSS	Sólidos Volátiles Suspendidos (Volatile Suspended Solid)

Capítulo J

*Generalidades de
los Proyectos Modelo*

Contenido

Página:

J	Generalidades de los Proyectos Modelo	J-1
J.1	Papel del proyecto modelo	J-1
J.2	Los proyectos modelo seleccionados	J-2
J.3	Programación de los Proyectos Modelo	J-3

Listado de Figuras

Página:

Figura J-1:	Mapa de Ubicación de los Proyectos Modelo	J-2
Figura J-2:	Programación de los Proyectos Modelo	J-3

J Generalidades de los Proyectos Modelo

J.1 Papel del proyecto modelo

Primero, un proyecto modelo debe implementar en la realidad una de las actividades listadas en el plan maestro y evaluar su factibilidad.

Segundo, el proyecto modelo sería la etapa inicial para la implementación del plan maestro; además, tiene la función de iniciar dicha implementación exitosamente. La agencia ejecutora y las organizaciones relacionadas pueden en la realidad observar los efectos ventajosos obtenidos por el proyecto modelo. Entonces, podrían implementar con confianza el proyecto modelo y el plan maestro.

Con el fin de alentar a la agencia ejecutora para que sienta como propio el plan maestro, es necesario inspirar cambios dentro de la agencia, teniendo en cuenta que plan maestro mismo es una manera de reforma del sistema existente. En general, el sistema existente se resiste a cualquier cambio; sin embargo, los proyectos modelos son una buena herramienta para traer cambios dentro del sistema existente, teniendo en cuenta que los miembros pueden experimentar nuevos retos y efectos por medio de la implementación de dichos proyectos.

El proyecto modelo no es sólo un acto de realizar algo; sino que forma parte de un proceso para lograr una meta. Al transitar por dicho proceso, se establece el sistema requerido y se obtienen las capacidades necesarias para la implementación del plan maestro.

Resumiendo todo lo anterior, se pueden establecer cuatro puntos como funciones del proyecto modelo.

- Evaluar la factibilidad de las actividades listadas en el plan maestro.
- Iniciar la implementación del plan maestro
- Promover una agencia ejecutora para que se asuma como propio el plan maestro.
- Fomentar el establecimiento del sistema requerido y la adquisición de capacidades necesarias para implementar el plan maestro.

J.2 Los proyectos modelo seleccionados

La Contraparte mexicana y el Equipo de Estudio seleccionaron algunas actividades enlistadas en el Plan Maestro y las desarrollaron como Proyectos Modelo. Los títulos y ubicación de los sitios de los proyectos se indican a continuación.

No.	Título
1	Tratamiento de Aguas Residuales Tipo Urbanas
2	Tratamiento de Aguas Residuales Tipo Villa
3	Establecimiento del SIGIR
4	Formación de la Capacidad de la Agencia Ejecutora en Othón P. Blanco
5	Mejoramiento del sitio actual de disposición final en OPB
6	Mejoramiento de la Recolección en OPB
7	Mejoramiento de la Recolección en FCP
8	Establecimiento de un Sistema de MRS en Costa Maya
9	Educación Ambiental y Actividades de Reciclaje

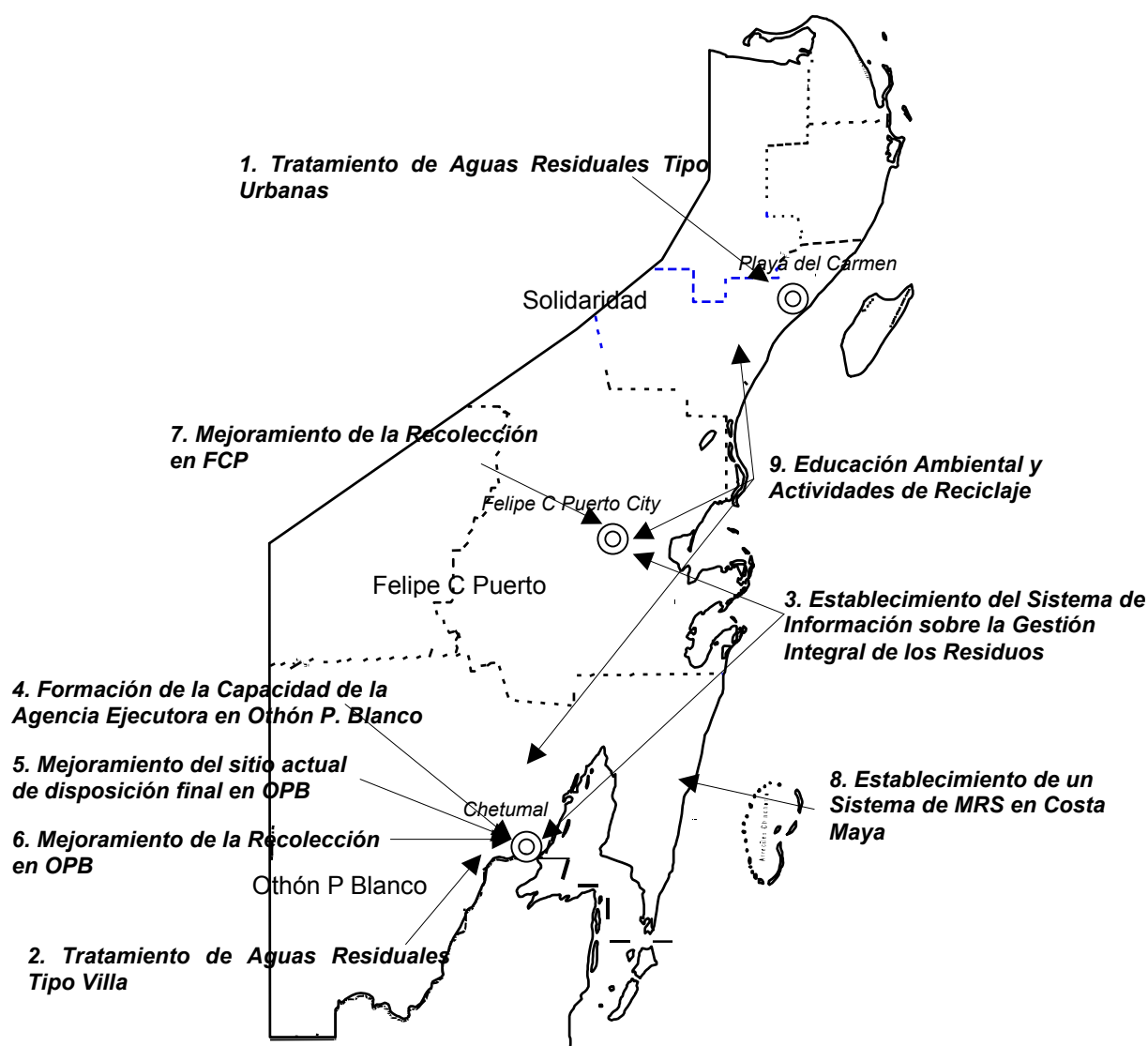


Figura J-1: Mapa de Ubicación de los Proyectos Modelo

J.3 Programación de los Proyectos Modelo

La Figura J-2 muestra el programa para los Proyectos Modelo. La etapa de preparación tomó alrededor de dos meses, en los cuales se analizó la situación actual y se elaboraron los planes para los Ps/Mo. Así mismo, se consideraron dos meses más para la etapa de implementación, en los que la contraparte y el equipo de estudio trabajaron estrechamente. De Marzo a Junio de 2004, se llevaron a cabo tanto los Ps/Mo como su monitoreo por los contrapartes mismo de acuerdo con los manuales preparado. Finalmente, los Ps/Mo fueron evaluados tomando como base los datos obtenidos a través del monitoreo.

Este es el programa de los Proyectos Modelo.

Proceso	2003			2004						
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Preparación										
Implementación										
Monitoreo										
Evaluación										

Figura J-2: Programación de los Proyectos Modelo

Capitulo K

*Tratamiento de Aguas
Residuales Tipo Urbano*

Contenido

Página:

K	Tratamiento de Aguas Residuales Tipo Urbano.....	K-1
K.1	Sondeo Electromagnético.....	K-1
K.1.1	Propósito del Sondeo.....	K-1
K.1.2	Generalidades del Sondeo	K-1
K.1.3	Interpretación de los Resultados.....	K-6
K.2	Construcción de los Pozos de Monitoreo	K-11
K.2.1	Lugares de Perforacion.....	K-11
K.2.2	Resultados de la Perforación	K-13
K.2.3	Prueba de Dilución Puntual	K-19
K.3	Análisis de la Calidad del Agua	K-23
K.3.1	Propósito.....	K-23
K.3.2	Muestreo y Analisis del Agua Subterranea	K-23
K.3.3	Resultados del Análisis de Laboratorio	K-24
K.4	Estudios para la Simulación del Agua Subterránea.....	K-32
K.4.1	Modelo Regional de Flujo	K-32
K.4.2	Flujo del Agua Inyectada en un Modelo Conceptual	K-63
K.4.3	Modelo Dependiente de la Densidad en Playa del Carmen.....	K-70
K.5	Resumen y Recomendaciones	K-76
K.5.1	Resumen del Estudio Hidrogeológico	K-76
K.5.2	Recomendaciones	K-78

Listado de Cuadros

Página:

Cuadro K-1: Area de Sondeo y Cantidad de Estaciones	K-2
Cuadro K-2: Clasificación de las Unidades Geofísicas	K-6
Cuadro K-3: Construcción de los Pozos de Monitoreo	K-11
Cuadro K-4: Velocidad y Conductividad Hidráulica Derivadas de la Prueba de Dilución	K-20
Cuadro K-5: Ubicación y Fecha del Muestreo.....	K-24
Cuadro K-6: Concentración de los Iones Principales en los Pozos de Monitoreo	K-25
Cuadro K-7: Resultados del Análisis de la Calidad del Agua.....	K-26
Cuadro K-8: Resultados del Monitoreo de la Calidad del Agua para los Muestreos Realizados en Febrero y Abril del 2004	K-31
Cuadro K-9: Resultados de Pruebas de Permeabilidad Previas en la Península de Yucatán.....	K-36
Cuadro K-10: Datos Procesado de CAPA para Establecer el Nivel Freático	K-40
Cuadro K-11: Precipitación Promedio dentro y en los alrededores del Area del Modelo ..	K-42
Cuadro K-12: Tasa de Evaporación	K-45
Cuadro K-13: Balance Hídrico en el Estado de Quintana Roo	K-51
Cuadro K-14: Balance Hídrico de los Municipios en el Área de Estudio.....	K-52
Cuadro K-15: Valores Asignados de Conductividad Hidráulica por el Modelo de Simulación.....	K-66

Listado de Figuras

Página:

Figura K-1: Equipo TEM (SIROTEM-S)	K-2
Figura K-2: Plan Esquemático de las Líneas de Sondeo TEM	K-3
Figura K-3: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	K-4
Figura K-4: Sitio de Disposición Final	K-4
Figura K-5: Nueva Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	K-5
Figura K-6: Esquema de los Sondeos sobre la Línea 1000.....	K-6
Figura K-7: Perfil de Resistividad de la Línea 400.....	K-9
Figura K-8: Mapa de Resistividad (a una Profundidad de 20 metros).....	K-9
Figura K-9: Perfil de Resistividad en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	K-10
Figura K-10: Perfil de Resistividad en L1000	K-10
Figura K-11: Ubicación de los Sitios de Perforación.....	K-12
Figura K-12: Diseño del Pozo de Monitoreo	K-12
Figura K-13: Registros de las Perforaciones en la PTAR.....	K-14
Figura K-14: Registros de las Perforaciones en la Casa Ejidal.....	K-16
Figura K-15: Registro de las Perforaciones en el Sitio de Disposición Final	K-17
Figura K-16: Registro de las Perforaciones en el Reservorio para Agua Potable de CAPA.....	K-19
Figura K-17: Pruebas de Dilución en las Perforaciones de la PTAR.....	K-21
Figura K-18: Prueba de Dilución en las Perforaciones de Casa Ejidal, Reservorio de CAPA, y Sitio de Disposición Final	K-22
Figura K-19: Diagrama Trilineal de las Muestras de Agua Subterráneas.....	K-29
Figura K-20: Ubicación y Extensión del Modelo	K-34
Figura K-21: Distribución de los Pozos de Monitoreo de la CNA	K-37
Figura K-22: Líneas de Contorno Isofreático en los Alrededores de Playa del Carmen	K-39
Figura K-23: Nuevo Mapa de Contornos.....	K-41
Figura K-24: Mapa de Contornos de Precipitación (mm).....	K-44
Figura K-25: Reubicación de los Coordenadas de los Pozos.....	K-46
Figura K-26: Mapa de Extracciones (m ³ /año)	K-47
Figura K-27: Resultados de la Calibración	K-49

Figura K-28: Distribución de la Dirección y Velocidad del Flujo	K-50
Figura K-29: Pozos de Monitoreo de la Calidad del Agua de la CNA	K-55
Figura K-30: Estado General de Topografía del USGS	K-57
Figura K-31: Profundidad Máxima de los Pozos en Cada Celda del Modelo	K-58
Figura K-32: Elevación de los Pozos más Profundos en Cada Celda	K-59
Figura K-33: Distribución de la Interfase Salina	K-60
Figura K-34: Secciones para Observar la Interfase Salina	K-61
Figura K-35: Secciones Transversales que Muestran la Interfase Salina	K-62
Figura K-36: Celdas de Diferencia Finita en el Plano	K-63
Figura K-37: Celdas de Diferencia Finita en la Sección Transversal	K-64
Figura K-38: Condiciones límites del Modelo de Flujo (Plano)	K-64
Figura K-39: Condiciones Límites del Modelo de Transporte (Sección Transversal)	K-65
Figura K-40: Extensión Areal de la Pluma de Agua Residual en la Décima Capa	K-67
Figura K-41: Vista de la Sección Transversal de la Pluma	K-68
Figura K-42: Movimiento de la Pluma en la Capa de Mayor Permeabilidad	K-69
Figura K-45: Parámetros y Condiciones de Límite para el Modelo	K-74
Figura K-46: Resultados de la Simulación de Flujo Dependiente de la Densidad	K-75
Figura K-47: Diseño del Pozo de Inyección (izquierda: diseño ideal, derecha: diseño práctico)	K-82
Figura K-48: Sello con Empaque (izquierda) Material de Empaque (derecha)	K-83
Figura K-49: Sello con Canasta Metálica tipo Pétalo (izquierda) y Canasta Metálica (derecha)	K-84

K Tratamiento de Aguas Residuales Tipo Urbano

K.1 Sondeo Electromagnético

K.1.1 Propósito del Sondeo

En Playa del Carmen se realizó un sondeo geofísico por el método electromagnético con base en el tiempo (TEM). El objetivo primordial del sondeo fue determinar en el área de estudio la composición y la distribución del acuífero calizo, así como definir la interfase entre el agua dulce y la salina.

K.1.2 Generalidades del Sondeo

K.1.2.1 Sobre el TEM

Al TEM se le conoce a menudo como un método electromagnético con base en el tiempo. En este método, el terreno se energiza artificialmente por un campo magnético y se mide su respuesta en función del tiempo para determinar la resistividad del terreno en función de la profundidad. Una corriente continua se hace circular a través del circuito que se ubica en la superficie del terreno que se encuentra inducidamente enlazado al terreno. El método TEM es particularmente apto para superficies de alta resistividad, tales como desiertos, dunas de arena o materiales volcánicos extrusivos, etc. donde el método convencional de corriente directa es difícil de aplicar. La Resonancia eléctrica vertical (REV) es uno de los métodos directos y también que también es aplicable en el área de estudio, sin embargo, el TEM fue empleado teniendo en consideración la alta densidad de construcción en Playa del Carmen porque aplicar el método REV hubiese requerido instalar una línea larga de sondeo a lo largo de un camino no pavimentado. El equipo TEM utilizado en el sondeo fue un sistema Sirotem-S (Mark 3) con capacidad de apagado rápido del acelerador, circuitos con dimensiones de 50x50 y 25x25 en un modo de configuración de circuito coincidente (sencillo) ver Figura K-1. Los sondeos TEM fueron confiados al subcontratista Moro Ingeniería S.C. y se realizaron bajo la supervisión del Equipo de Estudio desde agosto hasta septiembre del 2003.



Figura K-1: Equipo TEM (SIROTEM-S)

K.1.2.2 Area de Estudio

El sondeo TEM se dividió en cinco zonas en Playa del Carmen: *a)* zona urbana, *b)* zona de la planta de tratamiento actual, *c)* zona de la nueva planta de tratamiento (en construcción), *d)* zona del sitio del disposición final del municipio, y *e)* zona de la tubería de impulsión de los pozos. Se establecieron 10 líneas de sondeo y se totalizan 217 estaciones de TEM como se muestra en el Cuadro K-1 y la Figura K-2.

Cuadro K-1: Area de Sondeo y Cantidad de Estaciones

LINEA	Número de Estaciones	ZONA
L100	27	Zona Urbana
L200	23	Zona Urbana
L300	16	Zona Urbana
L400	30	Zona Urbana
L500	25	Zona Urbana
L600	27	Zona Urbana
L700	19	Zona Urbana hacia la nueva PTAR
L800	16	PTAR existente
L900	16	Sitio de Disposición Final
L1000	18	Zona Urbana hacia el campo de pozos
Total	217	

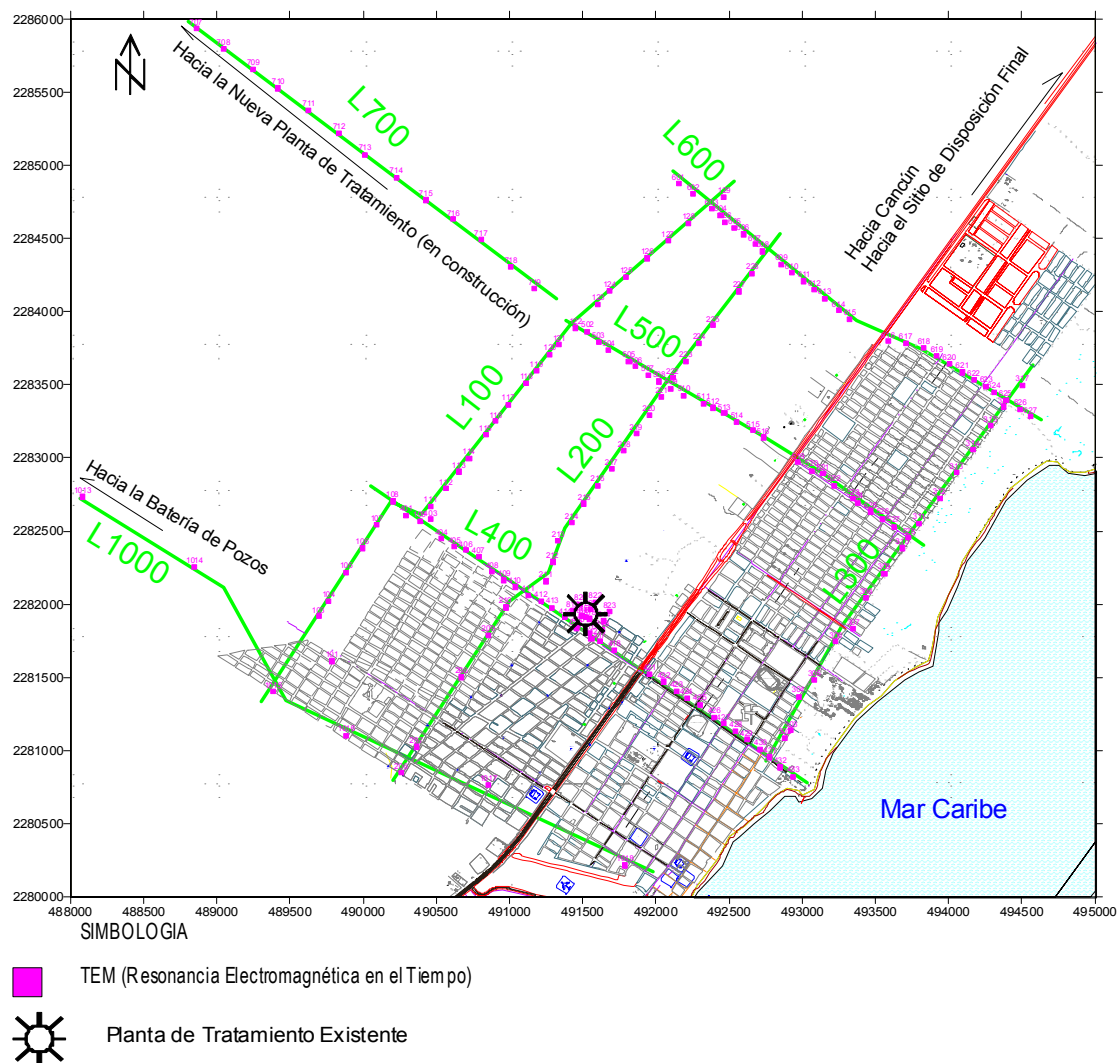


Figura K-2: Plan Esquemático de las Líneas de Sondeo TEM

Con el propósito de obtener información sobre la estructura de resistividad del sub-suelo en detalle, se establecieron líneas de sondeo en las áreas aledañas a la planta existente de tratamiento de aguas residuales, sitio de disposición final, y la nueva planta que se encuentra en construcción, como se muestra en la Figura K-3, Figura K-4, y Figura K-5.

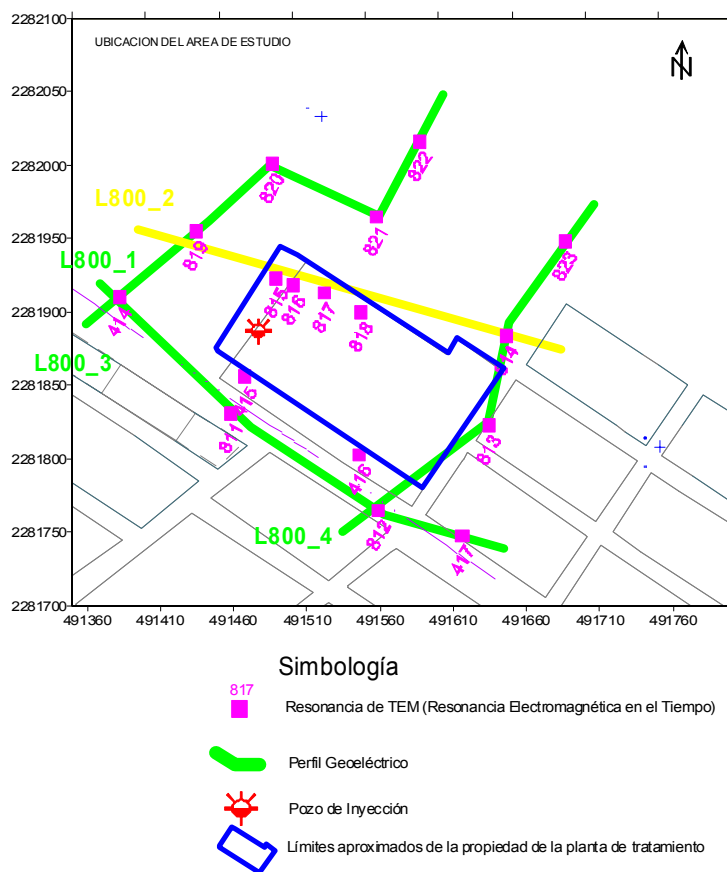


Figura K-3: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

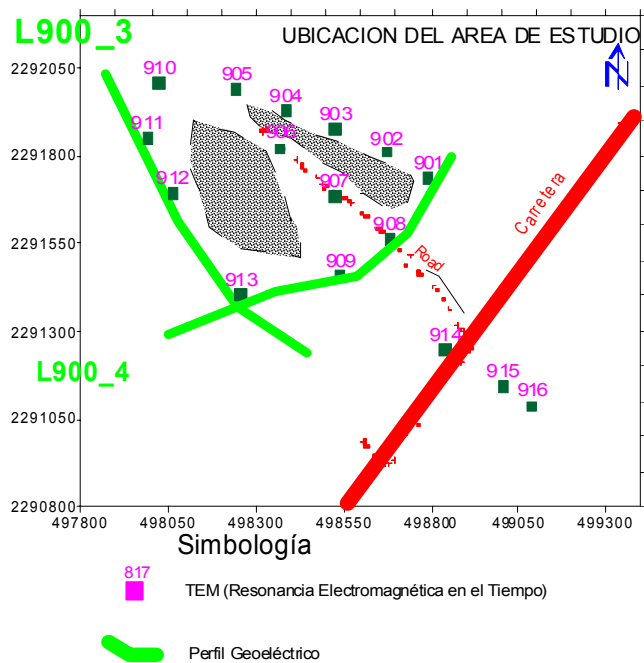


Figura K-4: Sitio de Disposición Final

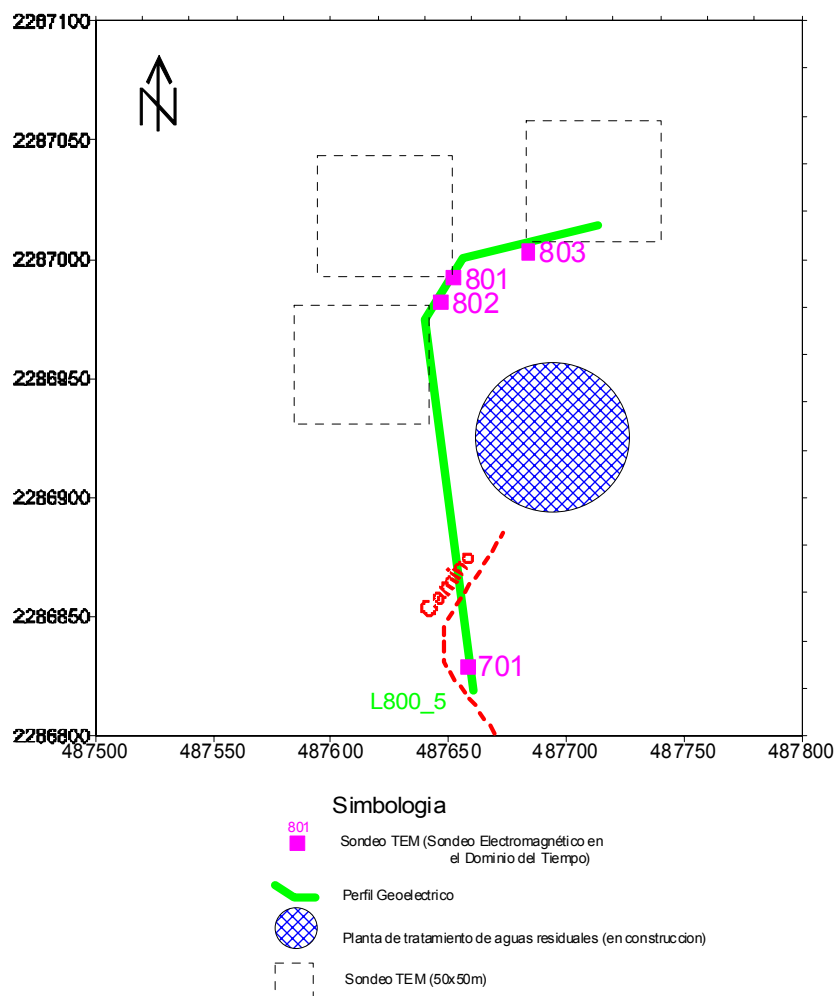


Figura K-5: Nueva Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

Además de lo anterior, la línea 1000 fue extendida desde la costa hasta el campo de pozos de CAPA (batería de pozos), los sondeos se ubicaron a un intervalo de 1000 metros con el fin de explorar la resistividad estructural en el corte perpendicular a la costa de Playa del Carmen (Ver Figura K-6).

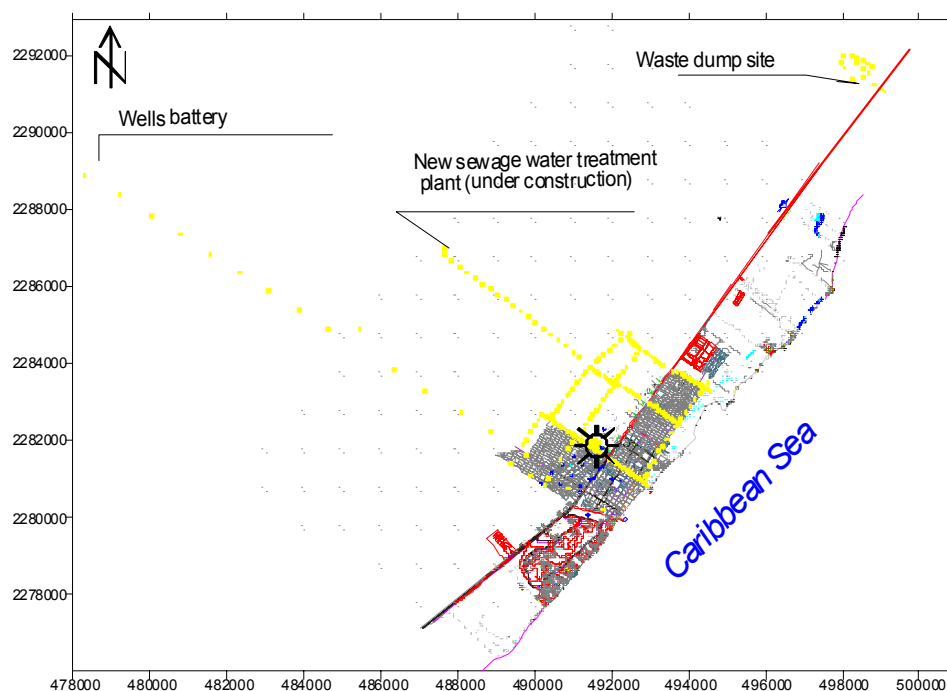


Figura K-6: Esquema de los Sondeos sobre la Línea 1000

K.1.3 Interpretación de los Resultados

K.1.3.1 Unidades de Resistividad

Con base en los resultados del sondeo, las capas de resistividad pueden ser divididas en tres unidades principales, U1, U2, y U3, en las partes limítrofes de las capas el valor de resistividad es de 4 ohm-m. Las capas U1 y U3 pueden ser subdivididas a su vez en dos unidades más con un valor en sus partes limítrofes de 25 ohm-m como se muestra en el Cuadro K-2.

Cuadro K-2: Clasificación de las Unidades Geofísicas

UNIDAD DE RESISTIVIDAD	INTERVALO DE RESISTIVIDAD [ohm-m]	INTERPRETACION GEOFISICA
U1a	Mayor de 25	Calizas o areniscas calcáreas, parcialmente saturadas con agua dulce
U1b	De 4 a 25	Calizas o areniscas calcáreas, saturadas con agua dulce
U2	Menor de 4	Calizas con alto desarrollo cárstico, con agua salina y/o agua de mar.
U3a	De 4 a 25	Calizas con desarrollo cárstico variable, con agua de mar
U3b	De 25 a 100	Calizas con bajo desarrollo cárstico, con agua de mar

K.1.3.2 Distribución de Resistividades

a. Zona Urbana

Esta zona representa la mayor parte del área del estudio geofísico. Los perfiles de resistividad que son paralelos a la costa son L100, L200, y L300, mientras que los perpendiculares son los L400, L500, y L600.

En general, la zona U1 presenta una resistividad entre 4 y 100 ohm-m con un espesor de 25 metros. La resistividad indica que existe la presencia de agua dulce terrestre en la parte superior y de agua salina (mezclada con agua de mar) en la parte inferior. Su espesor tiende a disminuir en la dirección de la parte continental.

La zona U2 se encuentra ampliamente distribuida en todos los perfiles con un espesor de 50 metros. Generalmente, el espesor de la zona U2 aumenta en los alrededores de la costa. Se puede inferir que un gran volumen de agua marina llena las cavidades o fisuras en las calizas que han sido creadas como resultado de la disolución.

La capa U3, que se encuentra bajo la capa U2, muestra resistividades relativamente altas y un espesor de aproximadamente 90 metros. Las resistividades varían desde 15 hasta 50 ohm-m. Teniendo en cuenta que el agua marina se encuentra contenida en las fisuras o cavidades de la capa U3, la alta resistividad observada puede indicar un cambio en composición en la litología de la roca. Un aumento de la resistividad puede ser debida a un menor desarrollo de la disolución en la caliza en la que las propiedades físicas de la roca originalmente tuvieron lugar durante el período de deposición. La Figura K-7 muestra el perfil L400 como ejemplo. Los otros perfiles se incluyen en los Apéndices.

Es posible ver la distribución horizontal de las resistividades a diferentes profundidades. Los planos de distribución horizontal de la resistividad a 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100, y 150 metros fueron elaborados e incluidos en los Apéndices.

La Figura K-8 muestra el plano de resistividad horizontal a una profundidad de 20 metros. Como se puede ver en el plano, el área nor-oeste de Playa del Carmen que se encuentra delimitada por la autopista nacional muestra resistividades que van de 10 hasta 20 ohm-m, lo que es un indicativo de una zona de agua dulce. De cualquier manera, todavía ocupa un área extensa. Sin embargo, desde la costa hacia el área este de la ciudad, se extiende un área de baja resistividad tipo valle de baja resistividad que es menor a 4 ohm-m. Esta zona indica que podría haber intrusión marina a una profundidad de 20 metros.

b. Zona de la Planta Existente de Tratamiento de Aguas Residuales

El espesor de la capa de agua dulce (U1a) tiene un rango entre 10 y 20 metros y varía de lugar en lugar en los alrededores de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). El espesor de la capa de agua salina (U1b) también tiene un rango entre 10 y 20 metros. Por otra parte, el espesor de la capa de agua salina (U2) es variable a lo largo del camino de la ciudad que pasa frente a la PTAR; su rango va de 30 a 90 metros. El pozo de inyección se estima que penetre la capa U2 y alcance la capa U3a como se muestra en la Figura K-9.

c. Zona de la Nueva Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (en Construcción)

El espesor de la capa de U1 es de 20 metros y la capa de U1b es de 15 metros. Estas capas son aproximadamente planas; el espesor de la capa U2 subyacente es de 80 metros en promedio e intercala con una U3a de un espesor de entre 10 y 15 metros. La resistividad del basamento se localiza a aproximadamente 100 o 110 metros. Un nuevo pozo de inyección está siendo perforado en la actualidad por CAPA. Los registros de perforación podrían ser correlacionados con la distribución de resistividad encontrados.

d. Zona del Relleno

En esta área, la capa U1 tiene un espesor de 20 metros y muestra altos valores de resistividad, lo anterior indica que podría tratarse de una caliza muy compacta y de menor desarrollo de la disolución. El espesor de la capa U2 varía de lugar en lugar, teniendo un rango entre 40 y 80 metros.

e. Zona de Batería de Pozos

Los pozos de abastecimiento de CAPA se ubican a unos 17 kms. de la ciudad. La Figura K-10 muestra el perfil a lo largo del camino desde la costa hasta el campo de pozos. Como se puede ver claramente en este perfil, el espesor de la capa U1a es superior a los 40 metros en el campo de pozos, por otra parte, se reduce a 20 metros en los alrededores de la zona costera de la ciudad. La capa U1b es generalmente delgada en la dirección del campo de pozos. Debe notarse que la profundidad del pozo de abastecimiento es de alrededor de 25 metros con una producción alta de alrededor 25 litros/segundo.

El agua de mar se interna muy adentro del continente como se observa claramente en el perfil. El espesor varía de lugar en lugar, pero su rango va de 40 metros hasta más de 80 metros. La capa U3a de relativamente alta resistividad y la capa U3b se encuentran en el basamento rocoso que se extiende desde el campo de pozos hasta la costa a profundidades entre 60 y 110 metros.

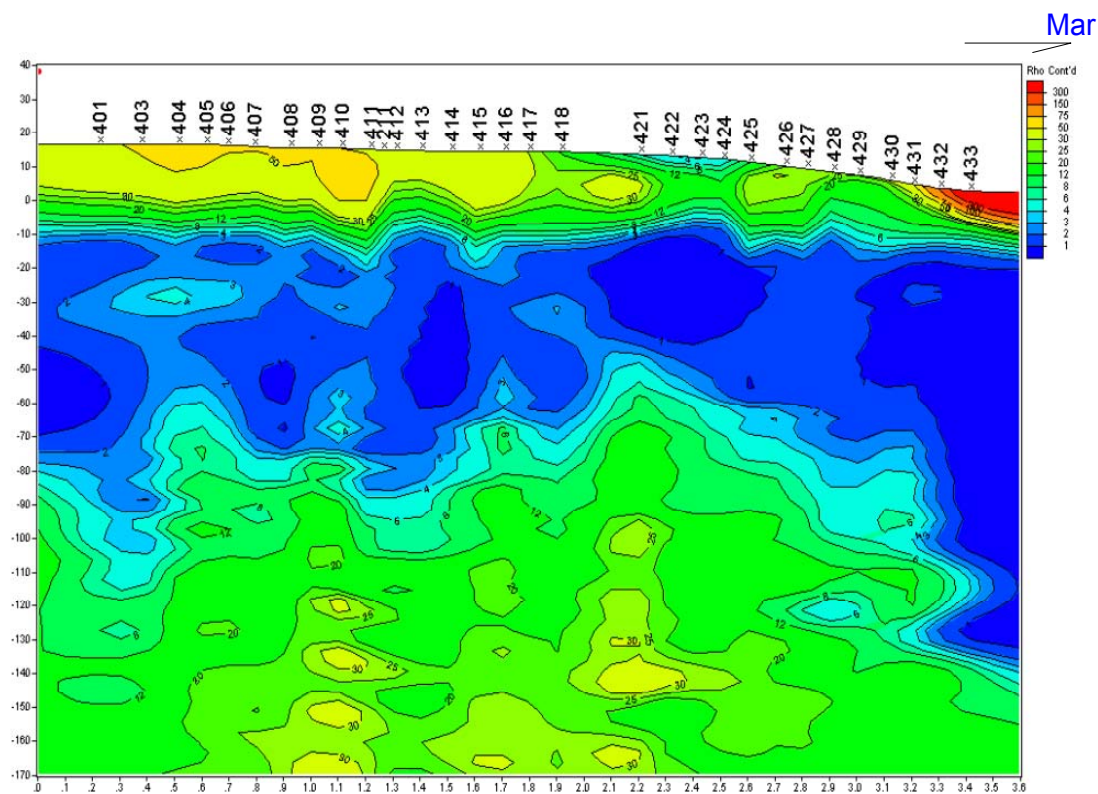


Figura K-7: Perfil de Resistividad de la Línea 400

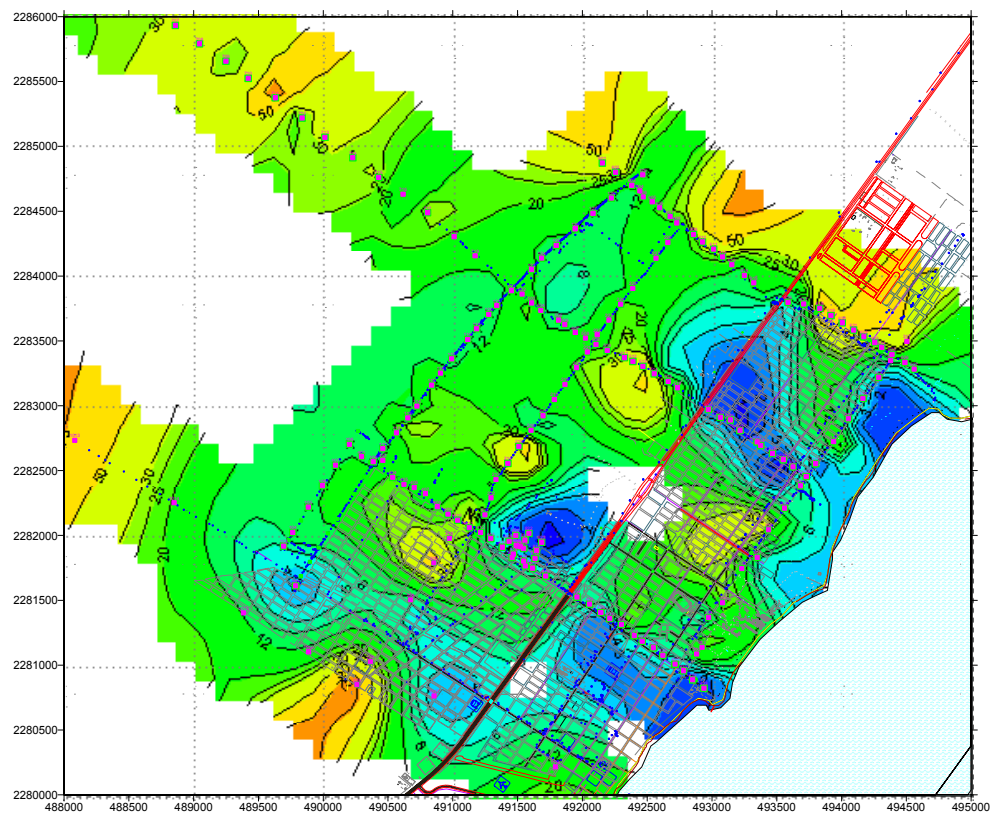


Figura K-8: Mapa de Resistividad (a una Profundidad de 20 metros)

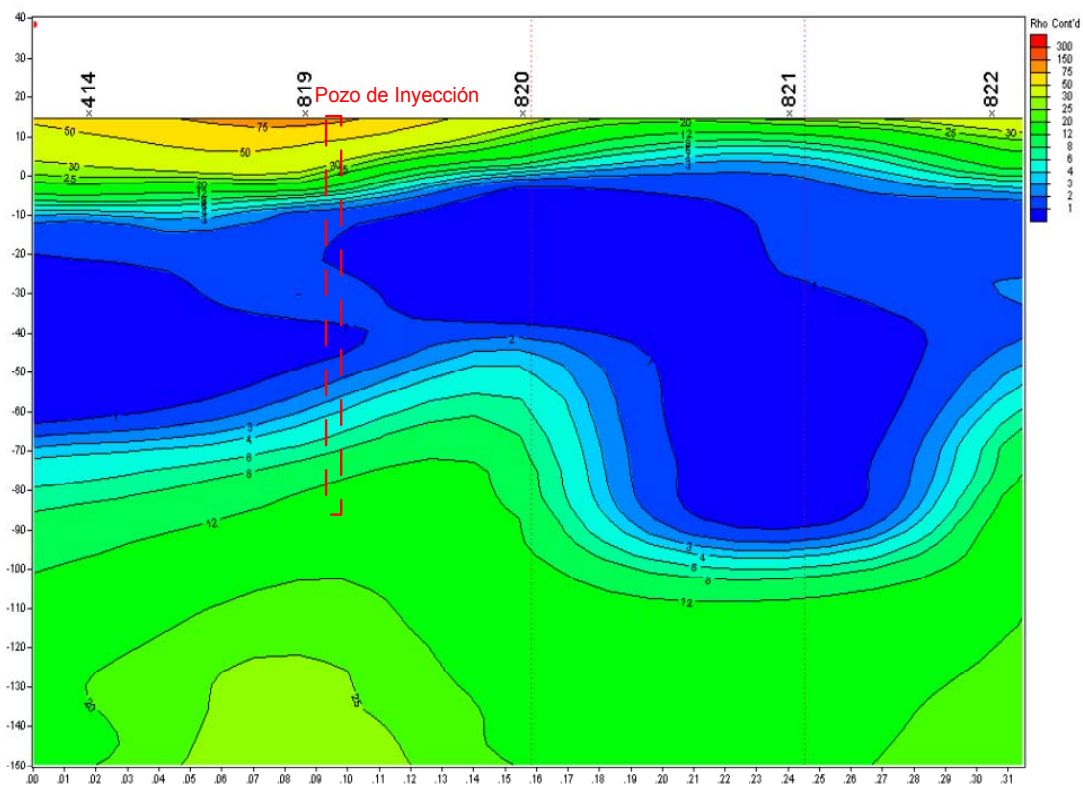


Figura K-9: Perfil de Resistividad en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

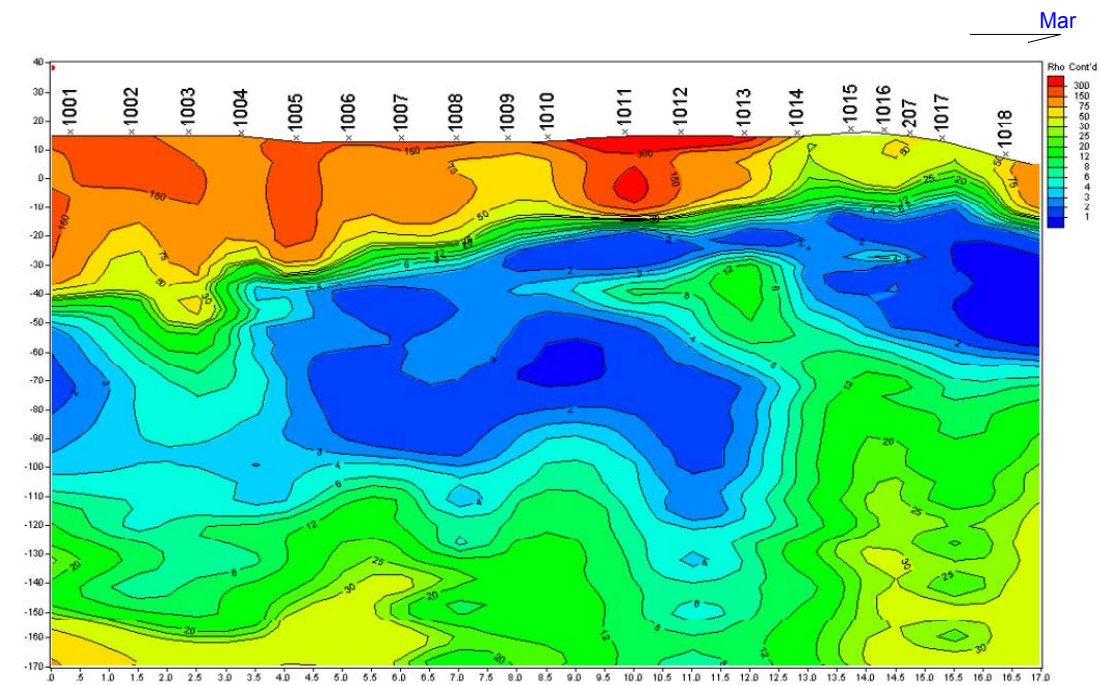


Figura K-10: Perfil de Resistividad en L1000

K.2 Construcción de los Pozos de Monitoreo

K.2.1 Lugares de Perforación

Con base en el estudio geofísico, se procedió a construir los pozos de monitoreo gradiente abajo de los pozos de producción de CAPA en dirección del área costera de la ciudad; dicha construcción se realizó a diferentes profundidades con el fin de confirmar la litología del acuífero, la distribución de las fracturas, la presencia de cavidades, la interfase agua dulce-agua salina, la calidad de las aguas, etc.

Los pozos en mención fueron construidos a las profundidades y acuíferos como se muestra en el Cuadro K-3.

Cuadro K-3: Construcción de los Pozos de Monitoreo

Sitio	Ubicación	Código del pozo	Acuífero	Profundidad (m)
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	20 38' 16N 87 04' 53W	1'	Agua dulce superior	15.0
		2'	Agua dulce inferior	17.65
		3	Agua salada superior	35.0
		4	Agua salada inferior	100.0
Sitio de Disposición de Residuos	20 43' 41N 87 00' 58W	1'	Agua dulce superior	15
		2'	Agua dulce inferior	20.45
Casa Ejidal	20 37' 57N 87 05' 07W	1'	Agua dulce superior	15.40
		2'	Agua dulce inferior	17.35
Reservorio para Abastecimiento de CAPA	20 38' 51N 87 03' 52W	1'	Agua dulce superior	14.75
		2'	Agua dulce inferior	17.00

Las ubicaciones de los sitios de monitoreo se muestran en la Figura K-11. Una vez finalizada la perforación, se realizaron registros geofísicos; además, se ejecutaron pruebas de dilución con el fin de determinar la permeabilidad del acuífero.

Después que finalizaron los trabajos de perforación y las pruebas en las mismas se realizaron, se procedió a colocar la tubería ciega y la ranurada. Sin embargo, debido a la gran cantidad de cavidades y fracturas en las formaciones calizas, fue imposible llenar el espacio anular con cemento o bentonita. Por lo tanto, dicho espacio anular se mantuvo sin rellenarlo para el diseño real (diseño del pozo finalizado). Además, se colocó tubería ranurada a toda la profundidad del pozo. Si el agua subterránea fluye lateralmente hacia la parte ranurada, entonces la muestra se puede extraer adecuadamente en la posición donde el muestreador es colocado. Sin embargo, existe la posibilidad que ocurra una mezcla del agua subterránea como resultado de algún flujo ascendente o descendente. La Figura K-12 muestra los diseños propuesto y real para los pozos de monitoreo.

Una vez el pozo fue finalizado, los niveles estáticos y la calidad del agua fueron monitoreados mensualmente entre marzo y junio del 2004. Las muestras de agua subterránea fueron recolectadas y analizadas en el laboratorio.

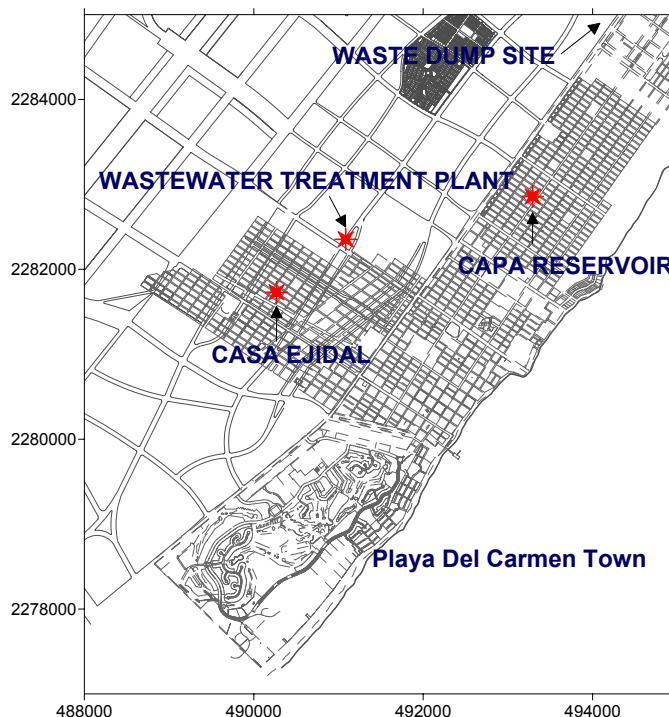


Figura K-11: Ubicación de los Sitios de Perforación

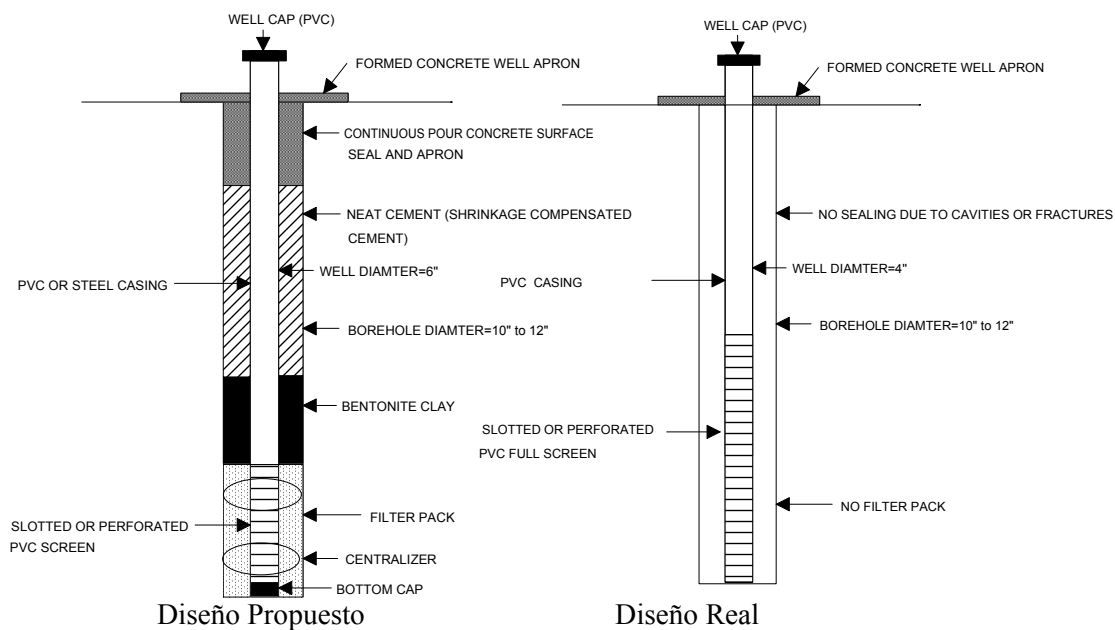


Figura K-12: Diseño del Pozo de Monitoreo

K.2.2 Resultados de la Perforación

K.2.2.1 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

a. Litología

La litología de la PTAR puede ser dividida en 8 formaciones como se muestra en la Figura K-13 y como es descrita a continuación:

1. Arenas calcáreas que van de finas a medianas y de color café oscuro. En promedio, contiene gravas moderadamente angular o redondeadas en 5% de las arenas (0-1 m).
2. Arenas calcáreas de medianas a gruesas. Contienen de 2% a 5% de gravas moderadamente angulares o redondeadas. El tamaño de las gravas no excede 1 cm (1-6 m).
3. Gravas de color café claro, moderadamente angulares o redondeadas y que están constituidas por granos calcáreos finos. El tamaño de estas gravas es menor a 1 cm (5-6 m).
4. Arenas gruesas calcáreas de color café claro con gravas moderadamente angulares o redondeadas y que están constituidas por calizas; el porcentaje de gravas es de 10%. Su tamaño varía de 4 mm a 1.5 cm (6-10 m).
5. Arenas gruesas calcáreas de color café claro con gravas calcáreas; en promedio, el porcentaje de gravas moderadamente angular o redondeadas es de 30%. Su tamaño varía de 4 mm a 1.5 cm (10-16 m).
6. Arenas gruesas color café claro con gravas calcáreas; el porcentaje de las gravas es de 5% (16-19 m).
7. Fragmentos de calizas arenosas de color café claro y constituidos por granos finos. Con contenidos de conchas. Los fragmentos son angulares. Su tamaño varía de algunos milímetros hasta 1.5 cm. Esta formación se encuentra pobremente cementada (19-28 m).
8. Las calizas de color blanco están constituidas por corales y fragmentos fósiles (28-35 m).

El registro de velocidad de perforación muestra que las formaciones pueden ser rápidamente penetradas. Estas secciones son abundantes en fracturas; sin embargo, se pueden observar parcialmente formaciones delgadas y duras a profundidades que van desde 5 hasta 10 m. Por otra parte, a partir de los 65 m bajo el nivel del terreno, se encontró una formación dura de color café claro; en dicha formación, la velocidad de perforación resultó ser muy lenta. La formación en mención está compuesta principalmente de calizas y dolomitas. Esta formación había sido detectada con anticipación por el sondeo electromagnético como se mencionó en el capítulo anterior. Es muy probable que esta formación se encuentre ampliamente extendida a lo largo del sub-suelo del área de Playa del Carmen.

b. Interfase de Agua Fresca / Salina

La Figura K-13 muestra un perfil de Conductividad Eléctrica (CE). La CE incrementa gradualmente con la profundidad a partir del nivel estático del agua (aprox. unos 7.8 m) hasta los 17 m. Su rango varía de 2,940 hasta 8,710 micro S/cm. A partir de los 21 m, se puede observar un incremento drástico como lo indica la lectura de 43,200 micro S/cm a la profundidad mencionada. La zona que va desde los 17 hasta 21 m, se puede considerar la zona de transición a la zona de agua marina y está constituida por agua salobre. El espesor del agua dulce va de los 9 hasta los 10 m. El agua marina se encuentra a partir de los 21 m.

c. Pozo de Monitoreo

Se construyeron cuatro pozos de monitoreo a diferentes profundidades en la PTAR. El pozo de mayor profundidad (No. 4) alcanza una profundidad de 100 m. Los pozos fueron ademados con tubería PVC de 4 pulgadas; sin embargo, el pozo No. 4 fue una excepción y se además con tuberías de 2 pulgadas con el propósito de poder insertar la tubería en una perforación de menor diámetro desde los 64 m hasta los 100 m, en cuyo tramo fue encontrada una formación muy dura.

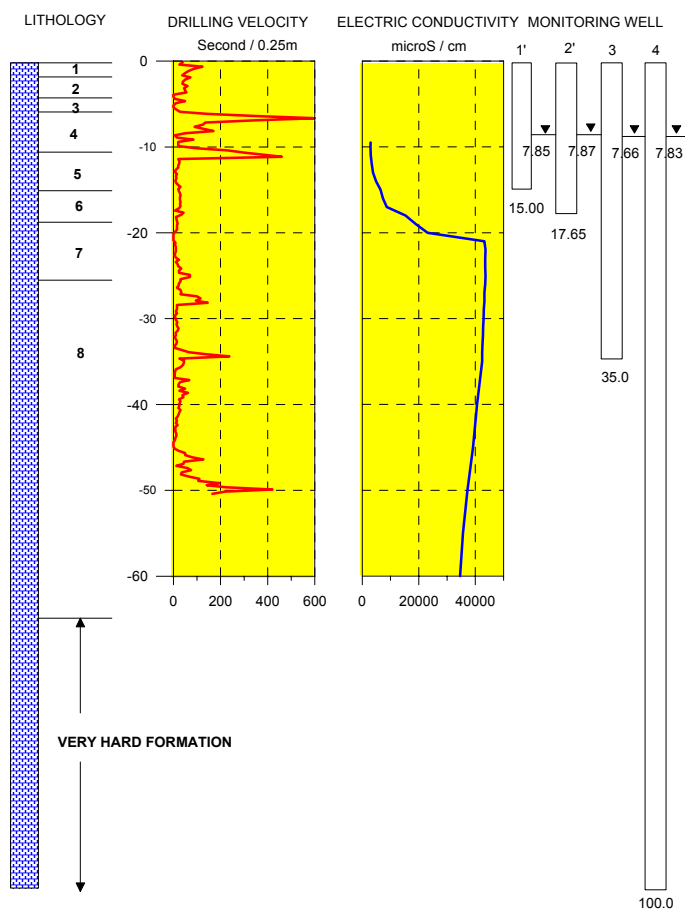


Figura K-13: Registros de las Perforaciones en la PTAR

K.2.2.2 Casa Ejidal

a. Litología

La litología de la Casa Ejidal puede ser dividida en 3 formaciones en la parte superior, así como se muestra en la Figura K-14. Debido a la ausencia de cavidades y fracturas, no se pudo obtener el registro de las perforaciones a partir los 7 m. La descripción litológica de la parte superior puede ser descrita de la siguiente manera:

1. Arenas calcáreas de finas a medianas de color café oscuro con gravas. Las gravas están contenidas en aproximadamente 5% de las arenas. El tamaño de las gravas es menor a 1 cm (0-1 m).
2. Arenas calcáreas de finas a medianas de color café claro hasta amarillento, constituidas por calizas arenosas de grano fino. El tamaño no excede 1 cm; por otra parte, en promedio, contienen entre 2% y 5% de gravas (1-5 m).
3. Arenas calcáreas muy finas de color blanco con 2% de gravas de color también blanco (5m -). A partir de los 7 m bajo la superficie, se encontraron cavidades de manera tal que no se pudieron obtener registros.

Las velocidades de perforación varían de 0 hasta 160 sec/0.25m. No se encuentra ninguna formación dura, a excepción del tramo que va de 0 hasta los 5 m. Esto indica abundancia en fracturas y cavidades en la formación más superficial (0-25 m).

b. Interfase de Agua Fresca / Salina

En la Figura K-14 se muestra un perfil de CE de los pozos de la Casa Ejidal. La CE aumenta gradualmente a medida que se profundiza a partir del nivel estático (8.3 m) hasta los 19 m. El valor de CE varía desde 3,610 hasta 8,420 micro S/cm. Se ubica una zona de transición a agua marina entre los 11 y 12 m. El agua marina se encuentra a partir de los 23 m.

c. Pozos de Monitoreo

Se construyeron dos pozos de monitoreo a diferentes profundidades en el sitio de la Casa Ejidal. El pozo profundo alcanza 17.35 m y el más somero llega a tener 15.40 m. Los pozos fueron ademados con tubería PVC de 4 pulgadas.

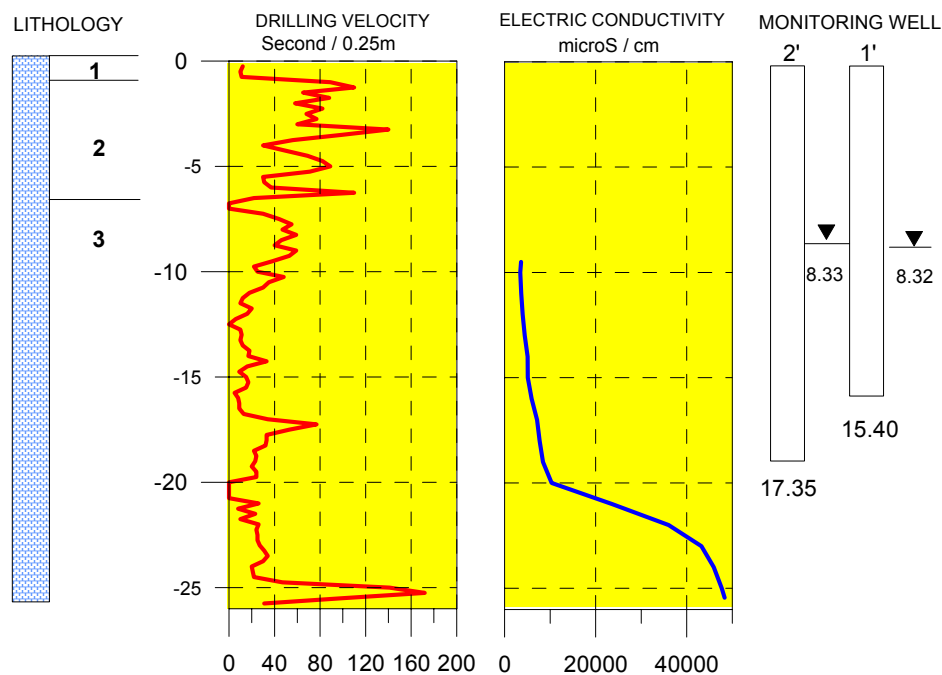


Figura K-14: Registros de las Perforaciones en la Casa Ejidal

K.2.2.3 Sitio de Disposición de Residuos

a. Litología

La litología del sitio de disposición puede ser dividido en 7 formaciones como se muestra en la Figura K-15. La descripción litológica de la formación es la siguiente:

1. Arenas calcáreas de finas a medianas de color café con gravas. Las arenas tienen un contenido de 5% de gravas. Las gravas en mención son moderadamente angulares o redondeadas (0- 1 m).
2. Las arenas son finas o de finas a medianas de color café claro. Tienen un contenido entre 30 y 45 % de gravas. Las gravas son moderadamente angulares o redondeadas. Su tamaño varía entre 4 mm y 1 cm (1-3 m).
3. Arena gruesa calcárea de color café claro compuesta en un 20% por gravas de calizas arenosas (3- 7 m).
4. Arenas calcáreas de color blanco compuestas entre un 20% y 30% de gravas. Las gravas son calcáreas y no muy bien redondeadas (7-9 m).
5. Arenas de medianas a gruesas de color blanco a amarillento compuesta en un promedio por 30% de gravas. Las gravas se encuentran constituidas por granos finos no bien redondeados de características arenosa calcárea. (9-13 m)

6. Astillas de calizas arenosas de granos finos con fragmentos de conchas y corales; la formación se encuentra pobremente cementada. Las astillas son de color café claro y angulares. Su tamaño varía entre 1 mm y 1.5 cm. (13-19 m)

7. Astillas de roca calcárea constituidas principalmente por corales que tienen en menor proporción fragmentos de conchas. Las astillas son irregulares y angulares, su tamaño varía entre 0.5 y 1.5 cm (19-22 m).

La velocidad de perforación se encuentra en un rango entre 0 y 190 seg/0.25 cm. Un lecho de roca dura se encuentra entre los 10 y 25 m; sin embargo, la formación comprendida entre los 0 y 5 m es más dura que la formación inferior. Lo anterior indica una abundancia de fracturas y cavidades en la formación inferior (5-25 m).

b. Interfase de Agua Fresca / Salina

En la Figura K-15 muestra un perfil de CE del Sitio de Disposición de Residuos. La CE aumenta gradualmente con la profundidad a partir del nivel estático del agua (3.95 m) hasta los 19 m; dicho valor varía entre 1,121 y 3,820 micro S/cm. La CE aumenta drásticamente a una profundidad de 20 m, lo anterior indica la presencia de agua marina al registrar un valor de 46,500 micro S/cm. No se pudo observar la presencia de una zona de transición. El espesor del agua dulce es de 15 m. El agua marina existe a partir de los 20 m.

c. Pozo de Monitoreo

Los pozos de monitoreo fueron construidos a diferentes profundidades en el Sitio de Disposición de Residuos. El pozo profundo (No. 2) alcanza 20.45 m, mientras que el pozo somero (No. 1) alcanza los 15.0 m. Los pozos fueron ademados con tubería PVC de 4 pulgadas.

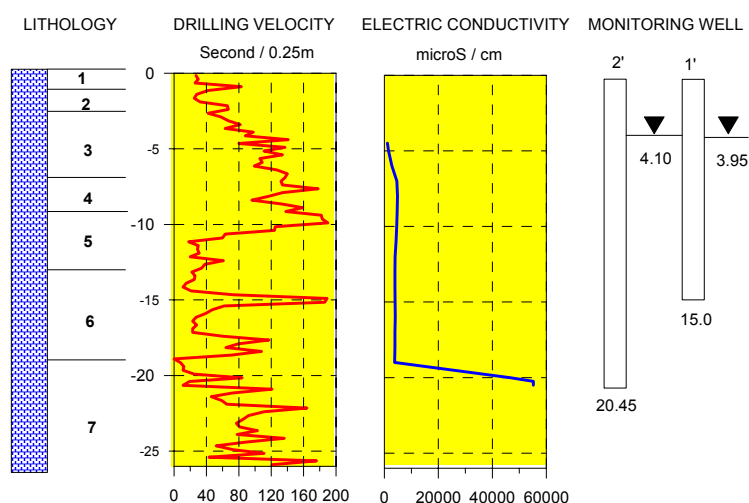


Figura K-15: Registro de las Perforaciones en el Sitio de Disposición Final

K.2.2.4 Reservorio de Agua Potable de CAPA

La litología en el lugar donde se ubica el reservorio de abastecimiento de agua de CAPA se puede dividir en 7 formaciones como se muestra en la Figura K-16. La descripción litológica de las formaciones es la siguiente:

1. Arenas de finas a medianas de características calcáreas de color café oscuro con gravas de color amarillento. Las gravas son moderadamente angulares o redondeadas, su tamaño varía entre 5 mm y 1 cm. En promedio, el contenido de gravas llega ser de 10% (0-1 m).
2. Arenas de finas a medianas calcáreas de color café claro con gravas. El porcentaje de gravas varía de 2 a 4% en promedio y su tamaño es inferior a 1 cm (1 – 7 m).
3. Arenas gruesas calcáreas de color café claro con presencia de gravas. El porcentaje de gravas moderadamente angular o redondeado varía de 30 hasta 50%, en promedio. Su tamaño varía entre 0.5 y 1 cm (7 – 11 m).
4. Arenas calcáreas de finas a medianas de color café grisáceo con gravas conteniendo fragmentos de conchas. El porcentaje de gravas llega ser de 40% (11 – 15 m).
5. Astillas de calizas constituidas principalmente por fragmentos de coral, conteniendo pequeñas cantidades de conchas y sus fragmentos (15 – 16 m).
6. Arenas calcáreas de medianas a gruesas de color café grisáceo con gravas pobremente cementadas de color blanco amarillento; su tamaño varía entre 0.6 y 3.5 cm. La presencia de gravas llega a ser del 30% (16 – 20 m).
7. Astillas de calizas constituidas principalmente de corales, fragmentos de conchas y muy poca arena. Las astillas son irregularmente angulares (20 m -).

La velocidad de perforación es menor a 100 seg/0.25m de 0 m hasta los 13 m, lo que indica una abundancia de fracturas. Se observa la presencia de una formación dura a partir de los 20 m. Sin embargo, las formaciones muestran una presencia abundante de fracturas en este sitio.

a. Interfase de Agua Fresca / Salina

En la Figura K-16 se muestra un perfil de CE tomada en el lugar del Reservorio de Abastecimiento de Agua de CAPA. La CE aumenta gradualmente con la profundidad, a partir del nivel estático del agua (6.18 m) hasta los 19 m. El valor de la CE varía de 3,950 hasta 8,280 micro S/cm. A los 21 m, la CE aumenta drásticamente hasta 48,300 micro S/cm, lo que indica la existencia de agua marina. La zona de transición va de los 19 hasta los 21 m. El espesor del agua dulce es de 13 m. Por otra parte, se puede considerar que el agua marina existe a partir de los 21 m.

b. Pozos de Monitoreo

Dos pozos de monitoreo fueron construidos en el lugar del Reservoirio de Abastecimiento de Agua de CAPA; dichos pozos fueron perforados a diferentes profundidades. El pozo más profundo (No.2) alcanzó los 17.0 m y el más somero (No. 1) llegó a los 14.75 m. Los pozos fueron adomados con tubería PVC de 4 pulgadas.

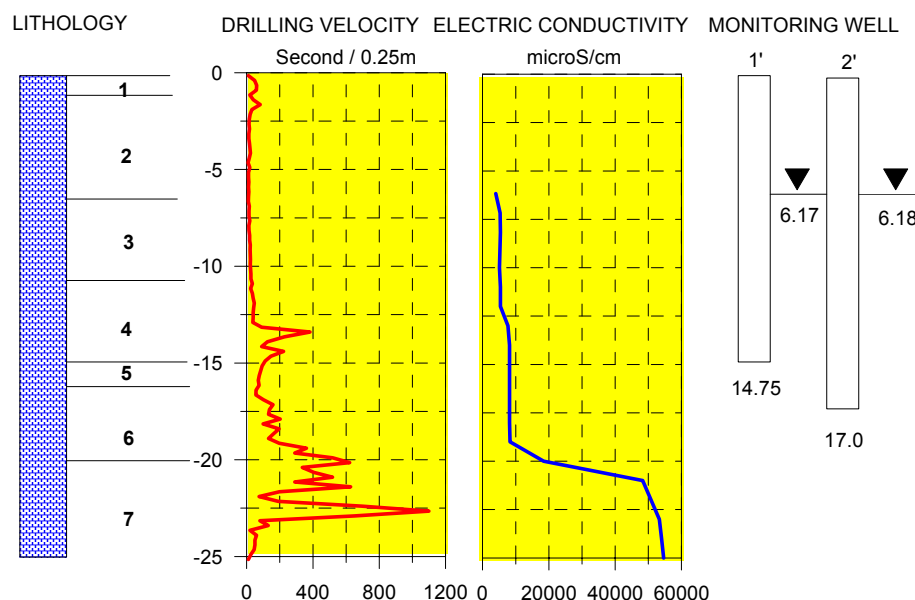


Figura K-16: Registro de las Perforaciones en el Reservoirio para Agua Potable de CAPA

K.2.3 Prueba de Dilución Puntual

Con el propósito de medir las velocidades del agua subterránea en el acuífero calizo, se aplicó un método de dilución puntual (Drost et al, 1968)¹ para las 10 (diez) perforaciones.

Tres litros de agua marina fueron introducidos a unos 30-50 cm bajo el nivel freático del agua. Después de la inyección, se monitoreó el declive o aumento de la CE.

De acuerdo con Drost, la velocidad “v” se computa de la siguiente manera:

$$v = -(\pi r^2 f / 2t) \ln[(c - c^*) / (c^0 - c^*)]$$

donde;

v : velocidad del agua subterránea

r : radio de la perforación

f : corrección empírica debido a la influencia del pozo en el flujo del agua subterránea

c : conductividad en el tiempo “t”

c⁰ : conductividad cuando “t” es igual a cero, inmediatamente después de la inyección

¹ Es un método de dilución puntual para investigar el flujo del agua subterránea por medio de radioisotopos, Water Resources Research, v.4, pp. 125-146

c^* : conductividad base antes de la inyección

“ f ” fue definida como uno (1) porque la perforación no se encontraba ademada durante la prueba. La CE fue observada, posteriormente $\ln\{(c-c^*)/(c^0-c^*)\}$ fue calculado para estimar la gradiente de los gráficos (Figura K-17 y Figura K-18).

El Cuadro K-4 muestra las velocidades calculadas en las perforaciones. La conductividad hidráulica fue computada por medio de la Ley de Darcy.

$$v_x = -K/n_e \cdot (dh/dl)$$

donde v_x es la velocidad lineal promedio, K es la conductividad hidráulica (coeficiente de permeabilidad), n_e es la porosidad efectiva y (dh/dl) es la gradiente hidráulica.

(dh/dl) se asume, con base a los niveles freáticos manejado por el INEGI, que es de 1/5000 o menor. Por otro lado, no existen datos disponibles sobre la porosidad efectividad de las calizas. Por lo tanto, se asume un valor de 0.2, tomando en cuenta la abundancia de fracturas y/o cavidades.

Cuadro K-4: Velocidad y Conductividad Hidráulica Derivadas de la Prueba de Dilución

Sitio	Pozo No.	Diámetro (cm)	Velocidad (cm/sec)	Conductividad (cm/sec)
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	1	20.32	0.0040	4.0
	2	20.32	0.0052	5.2
	3	20.32	0.0220	22.0
	4	20.32	0.0206	20.6
Sitio de Disposición de Residuos	1	10.0	***	***
	2	10.0	0.0005	0.5
Casa Ejidal	1	25.4	0.0207	20.7
	2	25.4	0.0065	6.5
Reservorio para Abastecimiento de Agua de CAPA	1	25.4	0.0035	3.5
	2	25.4	0.0011	1.1

*** no fue analizado

Para los cálculos de velocidad, se supuso que la conductividad dentro de la perforación es constante a lo largo del diámetro de la misma y que no tienen lugar ni flujo ni dispersión en la dirección vertical del punto de monitoreo. Sin embargo, dicha suposición podría no ser valida; por ejemplo, un declinación anticipada de la CE no fue incluida en la gráfica con el propósito de ajustar de manera linear la relación entre el tiempo y $\ln\{(c-c^*)/(c^0-c^*)\}$. Además, la gradiente hidráulica y la porosidad efectiva podrían ser meramente suposiciones. Por lo tanto, la velocidad y la conductividad eléctrica en el Cuadro K-4 pueden servir sólo de referencia.

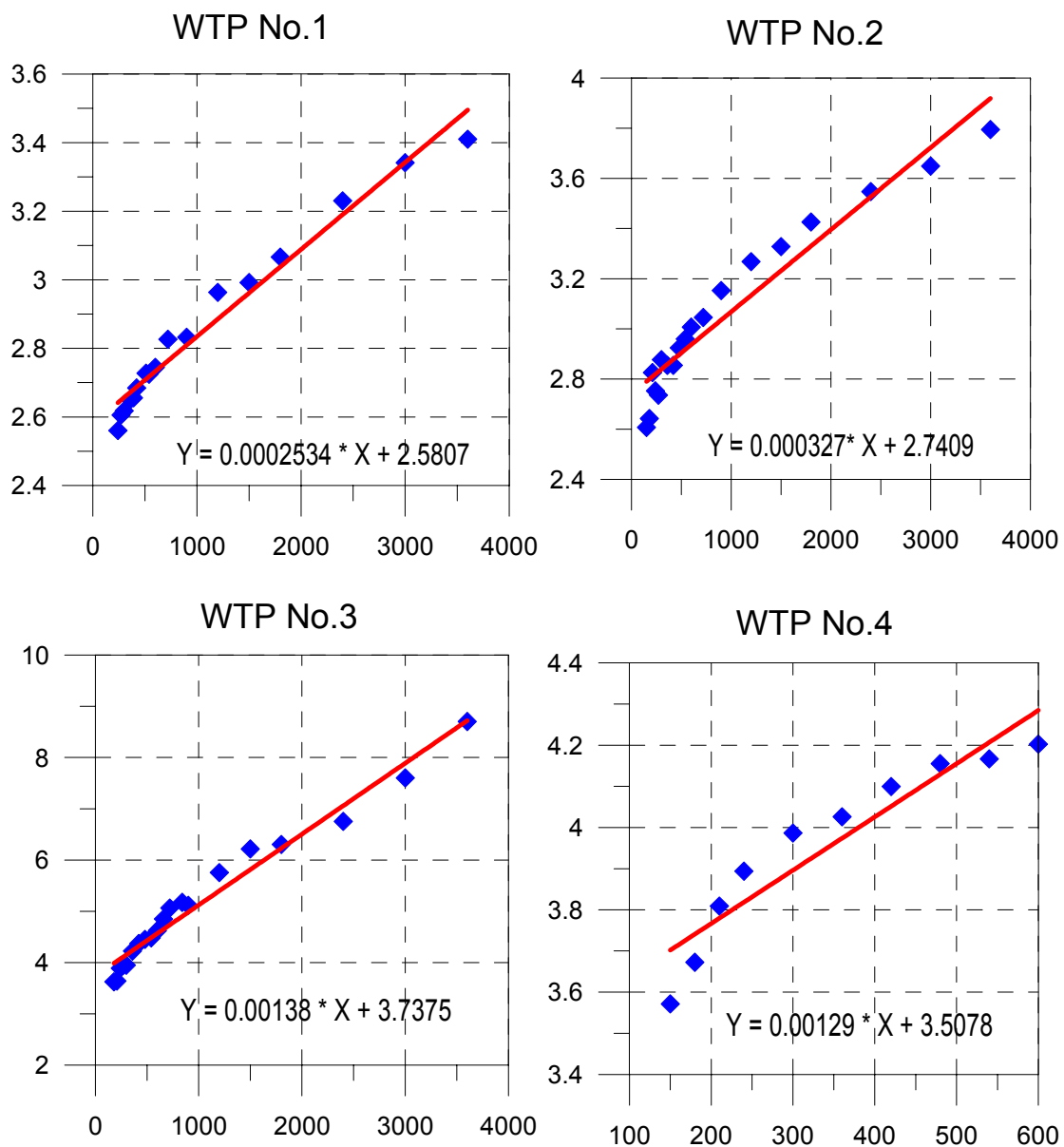


Figura K-17: Pruebas de Dilución en las Perforaciones de la PTAR

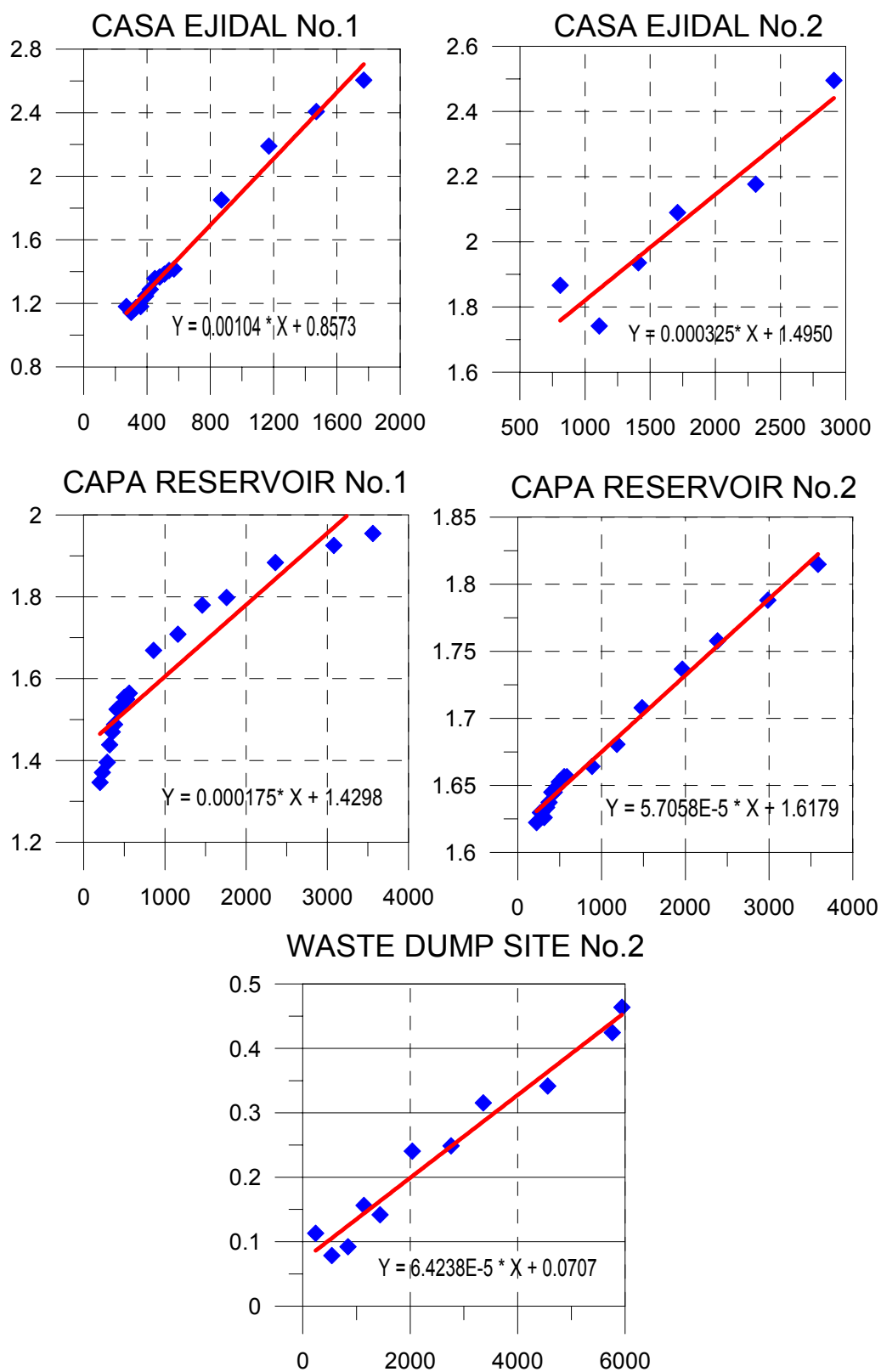


Figura K-18: Prueba de Dilución en las Perforaciones de Casa Ejidal, Reservorio de CAPA, y Sitio de Disposición Final

K.3 Análisis de la Calidad del Agua

K.3.1 Propósito

La calidad del agua subterránea es un factor de suma importancia para suplir de agua potable a los tres municipios del área de estudio. Si el agua subterránea se contamina, el área costera cercana puede también ser afectada porque el agua contaminada podría fluir en dirección a dicha área costera por medio de acuíferos subterráneos. Sin embargo, las condiciones reales del acuífero subterráneo no pudieron ser definidos claramente con anticipación al estudio de JICA. Es conocido ampliamente que la calidad del agua subterránea varía con la ubicación del pozo muestreado, profundidad del mismo, y tipo de acuífero. En la península de Yucatán, el agua salina se encuentra debajo del espesor del lente de agua dulce; además, los pozos de abastecimiento de agua municipales se encuentran ubicados en el interior del área rural a unos 15 o 40 kms. de la costa. El agua subterránea de dichos pozos no se encuentra contaminada aún, sin embargo, el agua dulce podría contaminarse debido al mal manejo de las aguas residuales, en particular, en las áreas urbanas donde el sistema de alcantarillado no ha sido implementado ampliamente.

Por lo tanto, en este estudio se hace énfasis en que la investigación de la calidad del agua subterránea es muy importante para evaluar la contaminación de la misma desde la perspectiva del medio ambiente acuático. Los resultados del análisis del agua pueden proveer de información importante relacionada a la calidad del agua subterránea que serviría para formular un futuro manejo de la inyección del agua residual en el área de estudio.

K.3.2 Muestreo y Análisis del Agua Subterránea

La calidad del agua subterránea de los pozos de monitoreo recientemente construidos fue monitoreada durante el período que va desde Febrero has Junio del 2004, una vez que finalizó la construcción de dichos pozos. Las muestras fueron enviadas a laboratorios en Mérida.

K.3.2.1 Parámetros y Muestreo realizado en Febrero del 2004

a. Parámetros

En Febrero del 2004, las muestras del agua subterránea fueron recolectadas por el equipo de estudio y los siguientes parámetros físicos, biológicos, y químicos fueron analizados aplicando la Norma Mexicana para Agua Potable (NOM-127-SSA1-1994). La cantidad de parámetros es de treinta y siete (37).

Los parámetros muestreados fueron: Temperatura, Color, pH, bacteria general, coliformes, conductividad eléctrica, Dureza (CaCO_3), Sólidos Disueltos Totales, Arsénico (As), Aluminio (Al), Amonia (NH_4), Bario (Ba), Bicarbonato (HCO_3), Cadmio (Cd), Calcio (Ca),

Carbonato (CO₃), Cloruro (Cl), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Cianuro (Cn), Fluoruro (F), Hierro (Fe), Plomo (Pb), Magnesio (Mg), Manganeseo (Mn), Mercurio (Hg), Nickel (Ni), Nitrato (NO₃), Nitrito (NO₂), Fenol, Fosfato (PO₄), Potasio (K), Sílice (SiO₂), Sodio (Na), Sulfato (SO₄), Tricloroetileno (CHCl=CCl₂), Zinc (Zn).

b. Muestreo

Las muestras de agua subterránea fueron recolectadas de los pozos de monitoreo como se presenta en el siguiente cuadro. Además del muestreo del agua subterránea, fue tomada una muestra del agua tratada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en Playa del Carmen.

Cuadro K-5: Ubicación y Fecha del Muestreo

No.	Ubicación	Código del Pozo	Profundidad del Pozo	Profundidad del Muestreo	Fecha
1	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	P1	15.0	9.0	28-Feb-04
2	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	P2	17.6	16.0	28-Feb-04
3	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	P3	35.0	30.0	28-Feb-04
4	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	P4	100.0	61.0	28-Feb-04
5	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	Agua Tratada	-	-	28-Feb-04
6	Sitio de Disposición Final	P1	15.0	8.0	29-Feb-04
7	Sitio de Disposición Final	P2	20.45	8.0	29-Feb-04
8	Reservorio de CAPA	P1	14.7	10.0	29-Feb-04
9	Reservorio de CAPA	P2	17.0	16.0	29-Feb-04
10	Casa Ejidal	P1	15.4	10.0	29-Feb-04
11	Casa Ejidal	P2	17.3	16.0	29-Feb-04

K.3.2.2 Parámetros y Muestreo en el Período de Monitoreo

Los análisis y muestreos del agua subterránea fueron realizados cuatro (4) veces por el equipo de la CNA desde Marzo hasta Junio del 2004. Los siguientes diez (10) parámetros fueron analizados en el laboratorio de Mérida: Temperatura, pH, Color, Nitratos (NO₂), Nitritos (NO₃), Conductividad eléctrica (CE), Sulfatos (SO₄), Sólidos disueltos totales (TDS), bacteria general, Coliformes.

K.3.3 Resultados del Análisis de Laboratorio

Los resultados del análisis de laboratorio de las muestras de agua subterránea que fueron recolectadas de los pozos de monitoreo se muestran tabuladas en el Cuadro K-7.

K.3.3.1 Análisis de los 37 Parámetros

a. Iones Disueltos Principales

El Cuadro K-6 muestra la concentración de los principales iones en meq/L. Todas las muestras reflejan que se trata un tipo de agua (Na+K)-Cl, lo anterior significa que se trata de agua de mar salinizada. Las muestras de los pozos P3 y P4 muestran de manera particular una alta concentración de Cl, (Na+K), Ca y Mg debido a que dichos pozos alcanzan a penetrar el acuífero de agua salina. La cantidad total de aniones y cationes del agua tratada (No.5) es la menor de entre las once (11) muestras tomadas. Sin embargo, como se presenta en el Cuadro K-7, la concentración de Cl en los pozos P3 y P4 refleja cifras que llegan a 11,834 mg/L and 11,457 mg/L, respectivamente. Generalmente, la concentración de Cl en el agua de mar es superior a 30,000 mg/L. Cuando se compara la concentración de las dos muestras antes mencionadas con el agua salina, verifica que tienen valores inferiores a la misma. Lo anterior puede indicar que el agua subterránea de los dos pozos se encuentra mezclada con agua salina más superficial o agua dulce, como resultado de la estructura del pozo, más específicamente, debido a un pozo construido completamente con tubería ranurada.

Cuadro K-6: Concentración de los Iones Principales en los Pozos de Monitoreo

No.	Na	K	(Na+K)	Ca	Mg	Cationes Totales	Cl	HCO ₃	SO ₄	Aniones Totales
	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L
1	14.78	0.48	15.26	6.38	3.51	25.14	17.16	6.35	2.22	25.73
2	56.68	1.08	57.76	7.93	20.49	86.19	60.38	9.40	6.46	76.24
3	282.18	6.64	288.83	20.89	65.70	375.42	333.83	4.93	37.59	376.35
4	245.85	5.46	251.31	17.30	58.35	326.97	323.19	4.95	37.36	365.50
5	10.54	0.48	11.02	5.42	2.77	19.22	10.85	2.78	2.22	15.85
6	19.98	0.31	20.30	4.84	5.47	30.61	21.15	5.45	2.19	28.78
7	25.07	0.47	25.54	5.42	8.53	39.49	32.19	5.52	3.52	41.22
8	18.17	0.56	18.72	6.09	7.06	31.88	17.02	4.48	2.25	23.76
9	38.51	0.87	39.39	6.33	10.86	56.58	52.93	5.42	5.12	63.47
10	18.29	0.44	18.72	5.28	5.35	29.35	23.41	5.62	2.48	31.51
11	24.95	0.56	25.51	4.94	6.33	36.78	32.98	5.55	3.61	42.15

La Figura K-19 muestra un diagrama trilinear de las aguas subterráneas para los pozos de monitoreo. Casi todas las muestras se ven graficadas en la parte derecha del diagrama, lo que indica una concentración alta de (Na+K) y Cl. Las muestras No.3 y No.4 se grafican en la parte derecha del diagrama, lo que indica características típicas de agua de mar; además, su radio definido por el círculo iones totales es el mayor, aunque puede que se encuentren mezcladas con agua fresca o salina y la cantidad de cloruros disueltos puede ser menor que para el agua salina normal.

Cuadro K-7: Resultados del Análisis de la Calidad del Agua

No.	Ubicación	Nombre del pozo	Temperatura del agua ° C	pH	CE	Color	Olor	Materia Flotante	Alcalinidad total	Cloruros	Dureza total	Dureza (Calcio)	Dureza (Magnesio)	Color
	WHO Guide Line				mS/cm	-	-		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	-
	Mexican Standard									250				
1	Carmen STP	P1	23	7.26	2,570	Aqua Clara	Fétido	Ausencia	387.60	608.22	509.95	305.94	204.01	20
2	Carmen STP	P2	24	7.08	7,240	Aqua Clara	Fétido	Ausencia	573.24	2,140.54	1,059.89	337.72	722.17	33
3	Carmen STP	P3	28	7.31	30,800	Aqua Clara	Fétido	Ausencia	300.90	11,834.27	4,265.45	750.92	3,514.33	13
4	Carmen STP	P4	27	6.82	24,300	Aqua Clara	Fétido	Ausencia	301.92	11,457.08	3,886.74	691.34	3,195.40	10
5	Carmen STP	Treated water	25	7.36	1,950	Aqua Sucia	Fétido	Ausencia	169.32	384.73	434.52	246.34	188.18	29
6	Carmen Landfill	P1	20.5	7.23	3,150	Aqua Clara	Fétido	Ausencia	332.52	749.66	613.91	325.80	208.11	0
7	Carmen Landfill	P2	20.8	6.96	4,420	Aqua Turbia	Fétido	Ausencia	336.60	1,140.99	733.50	-	-	0
8	PDC reservoir	P1	25.5	7.33	2,630	Café Claro	Fetidez baja	Ausencia	273.36	603.50	478.37	-	-	200
9	PDC reservoir	P2	25.5	7.18	6,930	Aqua Clara	Fétido	Ausencia	330.48	1,876.51	976.67	-	-	15
10	Colonia ejidal	P1	27	7.26	3,440	Aqua Clara	Fetidez baja	Ausencia	342.72	829.81	589.99	-	-	43
11	Colonia ejidal	P2	26	7.05	4,600	Aqua Clara	Fetidez baja	Ausencia	338.64	1,169.28	707.23	-	-	9

No.	Ubicación	Nombre del pozo	Sólidos disueltos totales	Sulfatos (SO4)	Cloro Residual	Turbidez	Nitrito (NO2)	Nitrato (NO3)	Nitrógeno amoniacal	N In-org	Fosfatos	Fluoruro (F)	Sustancia Activa al Azul de Metileno (MPAS)	Bicarbonatos
	WHO Guide Line		mg/L	mg/L	mg/L		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Mexican Standard		1000	250			3	50	1.5			1.50		
1	Carmen STP	P1	1,461.00	106.85	0.07	57	0.001	0.2	15.34	179.46	1.86	0.44	3.930	387.60
2	Carmen STP	P2	4,272.50	310.40	0.07	25	0.004	2.1	33.81	371.38	9.98	0.68	7.550	573.24
3	Carmen STP	P3	23,111.25	1,805.40	0.1	18	0.005	5.0	8.24	1836.75	3.11	1.43	3.120	300.90
4	Carmen STP	P4	23,541.00	1,794.30	0.17	5	0.003	3.4	13.64	1816.51	4.18	1.47	3.930	301.92
5	Carmen STP	Treated water	1,391.50	106.85	0.02	13	0.018	8.7	0	128.59	23.47	1.14	0.325	169.32
6	Carmen Landfill	P1	1,976.50	105.07	0.07	2	0.004	0.5	0	107.64	N.D	0.29	0.042	332.52
7	Carmen Landfill	P2	2,529.50	169.07	0.02	6	0.004	0.6	0	175.69	N.D	0.37	0.108	336.60
8	PDC reservoir	P1	1,318.00	108.18	0	2519	0.004	8.1	0	2635.28	N.D	4.00	0.088	273.36
9	PDC reservoir	P2	3,878.00	245.68	0	321	0.004	1.2	0	567.88	N.D	0.82	0.056	330.48
10	Colonia ejidal	P1	1,694.00	119.13	0.09	138	0.018	0.5	4.83	262.57	N.D	0.39	0.180	342.72
11	Colonia ejidal	P2	2,712.00	173.51	0.05	14	0.003	0.2	1.98	189.74	N.D	0.39	0.062	338.64

No.	Ubicación	Código del pozo	Carbonatos	Salmonella	Sptaphilobacter	Coliformes totales	Coliformes fecales	Hierro (Fe)	Zinc (Zn)	Plomo (Pb)	Arsénico (As)	Cromo total (Cr)	Cadmio (Cd)	Magnesio (Mg)
			mg/L		Aureus	NMP/100mL	NMP/100mL	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	WHO Guide Line							0.3	3	0.01	0.01		0.003	
	Mexican Standard													
1	Carmen STP	P1	0	Ausente	0	>2400	>2400	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	42.65
2	Carmen STP	P2	0	Ausente	0	<3	<3	10.85	<L.D	<L.D	<L.D	0.034	<L.D	249.18
3	Carmen STP	P3	0	Ausente	0	460	460	<L.D	0.093	<L.D	<L.D	0.034	<L.D	798.97
4	Carmen STP	P4	0	Ausente	0	240	93	0.07	<L.D	<L.D	<L.D	0.034	<L.D	709.58
5	Carmen STP	Treated water	0	Ausente	0	>2400	>2400	<L.D	0.097	<L.D	<L.D	0.013	<L.D	33.71
6	Carmen Landfill	P1	0	Ausente	0	43	9	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	0.013	<L.D	66.49
7	Carmen Landfill	P2	0	Ausente	0	460	75	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	103.73
8	PDC reservoir	P1	0	Ausente	0	9	<3	1.92	0.079	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	85.86
9	PDC reservoir	P2	0	Ausente	0	460	240	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	0.011	132.04
10	Colonia ejidal	P1	0	Ausente	0	1100	1100	27.40	0.05	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	65.00
11	Colonia ejidal	P2	0	Ausente	0	240	93	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	0.013	<L.D	76.92

No.	Ubicación	Código del pozo	Bario (Ba)	Cobre (Cu)	Aluminio (Al)	Sodio (Na)	Calcio (Ca)	Potasio (K)	Manganeso (Mn)	Silice (SiO2)	Fenol	Tricloroetileno (CHCL=C ₂)	Cianuro (CN)	Mercurio (Hg)
			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	WHO Guide Line			2		200			0.1				0.01	0.001
	Mexican Standard													
1	Carmen STP	P1	<L.D	<L.D	<L.D	339.83	127.87	18.80	0.03	5.14	<L.D	N.D	<L.D	<L.D
2	Carmen STP	P2	<L.D	<L.D	<L.D	1303.62	158.99	42.35	0.112	7.05	<L.D	N.D	<L.D	<L.D
3	Carmen STP	P3	<L.D	<L.D	<L.D	6490.25	418.71	259.66	0.041	4.19	<L.D	N.D	<L.D	<L.D
4	Carmen STP	P4	<L.D	<L.D	<L.D	5654.60	346.76	213.49	<L.D	4.19	<L.D	N.D	<L.D	<L.D
5	Carmen STP	Treated water	<L.D	<L.D	<L.D	242.34	108.68	18.92	<L.D	9.91	<L.D	N.D	<L.D	<L.D
6	Carmen Landfill	P1	<L.D	<L.D	<L.D	459.61	97.03	12.24	<L.D	<L.D	<L.D	N.D	<L.D	<L.D
7	Carmen Landfill	P2	<L.D	<L.D	<L.D	576.60	108.68	18.31	<L.D	<L.D	<L.D	N.D	<L.D	<L.D
8	PDC reservoir	P1	0.162	<L.D	<L.D	417.83	122.11	21.84	<L.D	11.33	<L.D	N.D	<L.D	<L.D
9	PDC reservoir	P2	<L.D	<L.D	<L.D	885.79	126.91	34.11	0.03	<L.D	<L.D	N.D	<L.D	<L.D
10	Colonia ejidal	P1	<L.D	0.074	<L.D	420.61	105.80	17.10	0.041	<L.D	<L.D	N.D	<L.D	<L.D
11	Colonia ejidal	P2	<L.D	<L.D	<L.D	573.82	99.09	21.96	0.123	<L.D	<L.D	N.D	<L.D	<L.D

b. Comparación con los valores guías de la OMS

Aunque México tiene sus propias normas para agua potable, los resultados del laboratorio fueron comparados con los valores guías de la OMS² para agua potable. Todas las once (11) muestras de agua subterránea (más una de agua tratada) no pudieron superar los valores guías de la OMS en relación a los cloruros (Cl), SDT, sodio (Na) y otros parámetros.

(a) Na

El valor guía de la OMS para Na es de 200 mg/L. Ningún pozo de monitoreo se encontró bajo dicho valor guía.

(b) Fe

El valor guía para el Fe es de 0.3 mg/L. La concentración máxima de Fe es de 27.4 mg/L, dicho valor excede el detectado en el pozo P1 de la colonia Ejidal.

² WHO (1996): Guías para la calidad del agua potable, 2da edición, Volumen 2, criterios de salud y otra información de apoyo, OMS, Ginebra

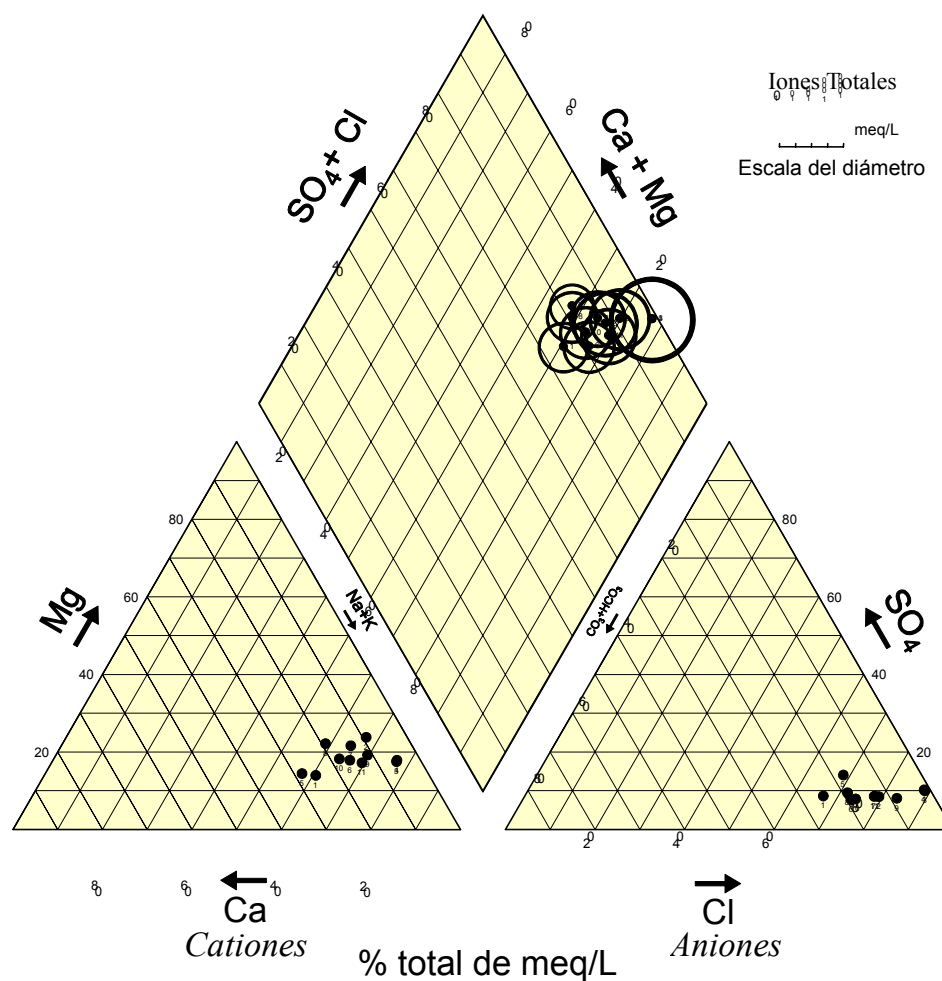


Figura K-19: Diagrama Trilineal de las Muestras de Agua Subterráneas

(c) Mn

El valor guía de la OMS para el Mn es 0.1 mg/L. De acuerdo con la OMS (1996), el nivel de quejas sobre el sabor, olor, y color por parte de los usuarios se puede establecer en 0.5 mg/L. Existen 2 pozos que tienen más de 0.1 mg/L en Mn de concentración.

(d) As

El valor guía de la OMS para el As es de 0.01 mg/L. Todas las muestras se encuentran debajo de dicho limite.

(e) Cl

El valor guía de la OMS para Cl es de 250 mg/L. Todos los pozos exceden dicho valor guía.

(f) NO_3 , NO_2

El valor guía para el NO_3 es de 50 mg/L y para el NO_2 3 mg/L, respectivamente. Ningún pozo excede los valores guías antes mencionados.

(g) F

El valor guía de la OMS para F es de 1.5 mg/L. El pozo P1 del reservorio de PDC excede el valor guía antes definido.

(h) SDT

El valor guía de SDT es de 1,000 mg/L. Todos los pozos de monitoreo exceden el valor guía establecido.

(i) NH_4 y SO_4

Los valores guías de la OMS para NH_4 y SO_4 son 1.5 mg/L y 250 mg/L, respectivamente. Todos los pozos de monitoreo en la planta de tratamiento de aguas residuales y la Colonia Ejidal exceden los valores guías para NH_4 lo que indica una posible contaminación por actividades humanas. La concentración de SO_4 en todos los pozos se encuentra por debajo del valor guía con excepción de los pozos P2, P3, y P4 de la planta de tratamiento de aguas residuales. Esta contaminación es causada por la inyección de aguas residuales crudas dentro de la instalación de la planta de tratamiento de aguas residuales. Los pozos de monitoreo se encuentran ubicados a una distancia de unos 100 m del pozo de inyección.

(j) Otros Parámetros

Tricloroetileno, cianuro, cadmio, mercurio, y otros minerales pesados no han sido detectados o sus valores se encuentran por debajo del valor guía.

K.3.3.2 Análisis de los Parámetros de Monitoreo

El presenta los resultados de los análisis realizados entre Febrero y Abril del 2004 para comparar los 10 parámetros. Ningún cambio significativo sucedió entre dichos meses, aunque se puede observar un aumento y una reducción de dichos iones. Los cambios en mención deberían ser evaluados en el largo plazo. NH_4 y otros parámetros que indican una contaminación inducida por el hombre deberán ser monitoreados entre Mayo y Junio del 2004.

Cuadro K-8: Resultados del Monitoreo de la Calidad del Agua para los Muestreos Realizados en Febrero y Abril del 2004

Ubicación	Código del Pozo	Temperatura del Agua		pH		CE		Cloruros		Sólidos Disueltos Totales	
		Febrero	Abril	Febrero	Abril	Febrero	Abril	Febrero	Abril	Febrero	Abril
		° C				mS/cm		mg/L		mg/L	
PTAR de Playa del Carmen	P1	23	32	7.26	7.20	2.570	3.523	608	933	1.461	1.951
PTAR de Playa del Carmen	P2	24	32	7.08	7.07	7.240	4.137	2.141	928	4.273	2.291
PTAR de Playa del Carmen	P3	28	32	7.31	7.16	30.800	36.300	11.834	15410	23.111	30.742
PTAR de Playa del Carmen	P4	27	32	6.82	6.94	24.300	27.467	11.457	10217	23.541	20.996
PTAR de Playa del Carmen	Aqua tratada	25		7.36		1.950		385		1.392	
Relleno de Playa del Carmen	P1	20.5	31	7.23	7.03	3.150	3.120	750	785	1.977	1.959
Relleno de Playa del Carmen	P2	20.8	31	6.96	6.93	4.420	2.930	1.141	730	2.530	1.890
Reservorio de PdC	P1	25.5	31	7.33	7.09	2.630	1.478	604	284	1.318	1.020
Reservorio de PdC	P2	25.5	31	7.18	7.15	6.930	4.420	1.877	1206	3.878	2.809
Colonia ejidal	P1	27	30	7.26	7.14	3.440	2.967	830	742	1.694	1.746
Colonia ejidal	P2	26	30	7.05	7.06	4.600	4.310	1.169	1103	2.712	2.637

Ubicación	Código del Pozo	Sulfatos (SO4)		Nitrito (NO2)		Nitrato (NO3)		Coliformes Fecales		Coliformes Fecales	
		Febrero	Abril	Febrero	Abril	Febrero	Abril	Febrero	Abril	Febrero	Abril
		mg/L		mg/L		mg/L		NMP/100mL		NMP/100mL	
PTAR de Playa del Carmen	P1	107	168	0.001	<0.011	0.2	<0.078	>2400	240	>2400	<3
PTAR de Playa del Carmen	P2	310	224	0.004	<0.011	2.1	<0.078	<3	>2400	<3	>2400
PTAR de Playa del Carmen	P3	1.805	2.750	0.005	<0.011	5.0	<0.078	460	>2400	460	>2400
PTAR de Playa del Carmen	P4	1.794	1.661	0.003	<0.011	3.4	<0.078	240	>2400	93	>2400
PTAR de Playa del Carmen	Aqua tratada	107		0.018		8.7		>2400		>2400	
Relleno de Playa del Carmen	P1	105	73	0.004	0.02	0.5	1.25	43	9	9	9
Relleno de Playa del Carmen	P2	169	347	0.004	<0.011	0.6	1.07	460	23	75	23
Reservorio de PdC	P1	108	150	0.004	<0.011	8.1	15.05	9	>2400	<3	1100
Reservorio de PdC	P2	246	156	0.004	0.02	1.2	6.6	460	<3	240	<3
Colonia ejidal	P1	119	140	0.018	0.02	0.5	0.82	1100	240	1100	43
Colonia ejidal	P2	174	278	0.003	<0.011	0.2	<0.078	240	93	93	21

K.4 Estudios para la Simulación del Agua Subterránea

K.4.1 Modelo Regional de Flujo

Con el propósito de entender el movimiento regional del flujo del agua subterránea y analizar el balance hídrico en los acuíferos del área de estudio, se realizó un modelaje computacional del agua subterránea. El modelo cubre el Estado de Quintana Roo. Los parámetros que inicialmente se le introdujeron al modelo se estimaron con base a los datos existentes de los pozos y otras referencias. El programa utilizado fue MODFLOW que fue originalmente desarrollado por el USGS (Servicio Geológico de Estado Unidos) en los años 1970's. El resultado de la simulación se aplicó a un modelo local del agua subterránea en Playa del Carmen y sus alrededores.

K.4.1.1 Conceptos para Modelar

a. Propósito del Modelo Regional de Flujo

En concordancia con el propósito de la simulación del agua subterránea, se ejecutaron varios tipos de modelos. Usualmente, tres de ellos son realizados 1) un modelo regional de 2-D o 3-D; 2) un modelo de sección de 2-D o 3-D; y 3) un modelo de 3-D detallado.

El primero, un modelo regional de 3-D es usualmente utilizado para dejar claro de una manera comprensible las características generales de la cuenca de aguas subterráneas donde se ubica el área de estudio. Por lo tanto, este tipo de modelo se aplica principalmente como un primer paso en la simulación de las aguas subterráneas, y el modelo regional cubre no sólo el área de estudio, sino también el área aledaña.

Un resultado esencial del modelo regional es la distribución de los niveles freáticos o cargas hidráulicas, y, de manera subsiguiente, la dirección y cantidad de flujo del agua subterránea en cada parte del dominio del modelo, de manera tal que el balance hídrico puede ser calculado. El modelo regional también puede ser utilizado, en muchos casos, para confirmar la estructura de la cuenca del agua subterránea y calibrar el coeficiente del acuífero para proveer la información necesaria para la creación de un modelo detallado.

b. Selección del Método

La simulación del agua subterránea puede ser realizada por medio de la utilización de diversos métodos. De manera simple, el flujo del agua subterránea puede ser calculada por medio de la manipulación de formulas o por medido de modelos a escalas como columnas de suelo. Películas de caucho y modelos eléctricos fueron también utilizadas para la simulación del agua subterránea hace aproximadamente veinte o treinta años.

El modelo digital con base en sistemas computacionales, como el método de simulación más reciente, fue desarrollado tan sólo en las décadas anteriores y se ha tornado en el enfoque más popular con el progreso rápido de las técnicas computacionales. En la actualidad, para casi toda simulación del agua subterránea a nivel práctico, especialmente en cuencas de aguas subterráneas con condiciones complicadas, el modelo digital se ha tornado en un método indispensable.

Se han dado a conocer varias aplicaciones para la simulación por computadoras, desde las más sencillas para un modelaje de flujo de aguas subterráneas en 2-D hasta una comprensiva para todo tipos de propósitos que incluye el flujo del agua subterránea, transporte de contaminantes, asentamiento del suelo, etc.

Una aplicación comprensiva para modelar aguas subterráneas se compone de varios módulos. Las aplicaciones de más reputación utilizan MODFLOW, como fuente para los cálculos de flujo del agua subterránea. MODFLOW es un programa creado en los 1970's que puede generar modelos de diferencia finita de dos y tres dimensiones; este programa ha sido mejorado y usado de manera extensa por el Servicio Geológico de los Estados Unidos y otros para la simulación con computadoras. Por lo tanto, aunque cualquier aplicación de las existentes sea utilizada, no deberá existir una diferencia considerable en los resultados de la simulación, incluso si se establecen las mismas condiciones de simulación. La diferencia entre las diversas aplicaciones redunda principalmente en su facilidad de uso, versatilidad para presentar resultados, y compatibilidad con otros tipos de programas.

PMwin (Processing MODFLOW para Windows), una de las aplicaciones más populares, fue adoptada para crear el modelo regional en este estudio. PMwin se desarrolló en 1989 como una de las primeras aplicaciones para poder utilizar el módulo MODFLOW en un ambiente windows, fue el programa más popular a inicios de los 1990's. Sin embargo, PMwin es usualmente seleccionado como programa favorito por varios usuarios, no tanto por su historia o divulgación, sino porque los parámetros pueden ser ajustados y especificados a nivel de celda una por una.

c. Extensión del Modelo Regional de Flujo

Un modelo regional de flujo que cubre todo el Estado de Quintana Roo y áreas aledañas fue creado en este estudio. La Figura K-20 muestra la ubicación y extensión del modelo.

El modelo cubre una extensión de 285 km en la dirección este-oeste, de la longitud oeste $89^{\circ}21'30.3''$ a la $86^{\circ}39'42.2''$, correspondiendo a coordenadas UTM Este desde 250,000 hasta 535,000, y se extiende por 425km en la dirección norte-sur, de la latitud este $17^{\circ}48'12''$

hasta $21^{\circ}39'28.4''$, correspondiendo a coordenadas UTM Norte desde 1,970,000 hasta 2,395,000.

El dominio del modelo se divide en cuadrículas homogéneas de 5 km x 5 km que generan 57 columnas en la dirección de la longitud y 85 filas en la dirección de la latitud. A lo largo del límite norte y este del dominio del modelo, las celdas se ubican en el área del océano, incluyendo las islas que se muestran en color azul las que se establecen como celdas de carga hidráulica constante con un valor de carga hidráulica igual a 0 metros.

En la dirección de la profundidad, el modelo fue dividido en 20 capas. La parte superior de la capa más superficial se encuentra por sobre el nivel freático y la parte inferior se encuentra a una elevación de -3 msnm (metros sobre el nivel del mar). A todas las capas, con excepción de la superior y la inferior, se les asignó un espesor uniforme de 5 metros. El espesor de la capa inferior se estableció en 7 metros, de manera tal que el modelo llega a tener una profundidad total de -100 metros.

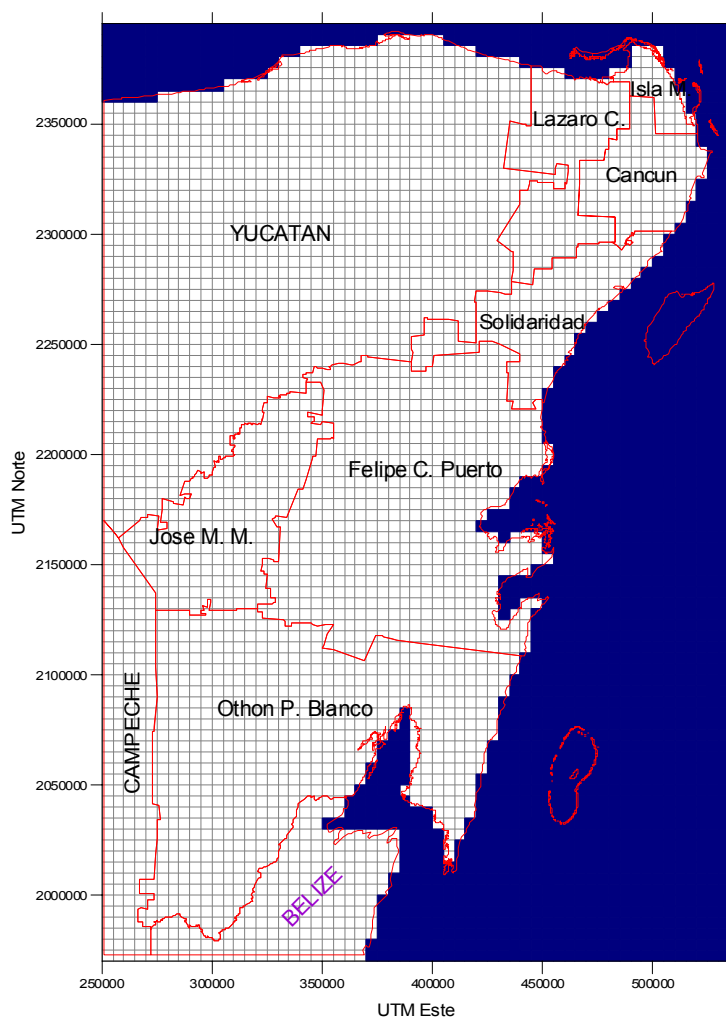


Figura K-20: Ubicación y Extensión del Modelo

K.4.1.2 Especificación de los Parámetros

a. Clasificación del Acuífero

La estructura de la cuenca de agua subterránea es un factor esencial para restringir el flujo de agua subterránea. La llamada estructura de la cuenca del agua subterránea significa principalmente la división del acuífero que incluye acuicludos, sus características y distribución. Se ha indicado claramente por los datos recopilados que la cuenca del agua subterránea en el área de estudio se caracteriza por un grupo acuífero grueso compuesto de calizas. Sin embargo, varios registros tomados adecuadamente, como algunos registros de la ciudad de Chetumal, reveló la existencia de una capa de arcilla o calizas arcillosas en medio de los acuíferos calizos.

Investigaciones pasadas han señalado que estas capas arcillosas y/o calizas arcillosas apenas pueden ser tomadas como capas impermeables significativas que puedan separar los acuíferos superiores e inferiores a la misma. Sin embargo, se puede llegar a una inferencia importante: la caliza que conforma el acuífero más importante en el área de estudio no es una formación homogénea en la dirección de la profundidad. Por lo tanto, se debe tomar consideración substancial para las variaciones de la conductividad hidráulica en la dirección horizontal y la vertical (en la dirección de la profundidad).

En general, la permeabilidad en la dirección horizontal se establece como 10 veces mayor a la que se establece en la dirección de la profundidad para rocas sedimentarias similares a la del área de estudio, incluyendo depósitos cuaternarios, aunque no se consideran condiciones especiales de heterogeneidad en ninguna de las direcciones, la especificación antes mencionada se ha adoptado como valor predeterminado para la mayoría de programas de modelaje de aguas subterráneas. Por lo tanto, se considera razonable establecer la permeabilidad en la dirección horizontal como 100 veces el valor de la permeabilidad en la dirección de la profundidad para el área de estudio.

b. Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica es el parámetro más importante para la simulación de las aguas subterráneas y es, generalmente, obtenido como resultado de pruebas de bombeo. Sin embargo, estos tipos de datos son muy escasos en el área a ser simulada. Dos razones podrían ser la causa de esta deficiencia de datos; una es que las pruebas de bombeo son difíciles de ser realizadas en el área de estudio porque el abatimiento debido al bombeo es usualmente muy pequeño debido a que la permeabilidad del acuífero de calizas es muy alta en la dirección horizontal, el otro motivo tiene que ver con la poca investigación en el área de estudio que haya tomado a la permeabilidad del acuífero como tema principal.

El material más útil en relación a la conductividad hidráulica puede considerarse el resumen de investigaciones previas que se muestra en el siguiente cuadro obtenido de un informe de la CNA. Este informe presenta resultados de varias pruebas de permeabilidad realizadas con anterioridad en toda la península de Yucatán. De acuerdo a los resultados previos, el acuífero calizo de toda la península de Yucatán, incluyendo el área de estudio, se considera que tiene características geológicas similares, por lo tanto, el valor en el cuadro presentado puede tomarse como referencia para definir la conductividad hidráulica para este modelo.

Cuadro K-9: Resultados de Pruebas de Permeabilidad Previas en la Península de Yucatán

Conductividad Hidráulica (m/s)	Referencia	Lugar donde se obtuvo
1.5 e - 3	Buckley & McDonald (1994)	Acuífero de la ciudad de Mérida
6.4 e - 2	Méndez Ramos (1991)	Acuífero de la ciudad de Mérida
De 1.0 e - 1 hasta 1.0 e 0	Marín Ponce (1990)	NW de la Península de Yucatán
De 5.0 e - 1 hasta 3.0 e - 4	Reeve & Perry (1990)	Norte de Mérida (Chuburná)
De 1.0 e - 2 hasta 1.0 e - 3	Martínez Guerra (1990)	Isla Cozumel
De 8.7 e - 3 hasta 3.2 e - 4	Villasuso Pino (1984,90)	Pozos pluviales ciudad de Mérida
De 5.0 e - 3 hasta 1.0 e - 6	González Herrera (1984)	Laboratorio ciudad de Mérida
1.0 e - 2	Back & Lesser (1981)	Balance Península de Yucatán

Fuente: CNA

Los rangos de permeabilidad pueden variar hasta en un factor de un millón de veces, desde una potencia a la menos 6 (10^{-6}) hasta 1. Sin embargo, este tipo de resultados no son inusuales, en ninguna manera, en zonas calizas. Es bien conocido que la permeabilidad del acuífero calizo es usualmente buena y el medio es heterogéneo. Los cambios de permeabilidad ocurren no sólo en la dirección de la profundidad, sino que también en la dirección horizontal. En concordancia con estas características, los resultados anteriores que se muestran en el cuadro podrían utilizarse para establecer los límites superiores, inferiores, y promedios para los valores de permeabilidad del acuífero calizo durante el proceso de ajuste que se realiza durante la calibración.

K.4.1.3 Condiciones Existentes

a. Nivel Freático

a.1 Monitoreo del Agua Subterránea

La distribución del nivel freático o la conformación del manto freático es necesario definirlo para establecer la carga hidráulica inicial para la simulación del modelo de aguas subterráneas. Por otra parte, es indispensable durante la creación del modelo realizar la calibración que es un proceso para hacer que los parámetros y todos los tipos de especificaciones del modelo se ajusten en lo posible a la cuenca simulada de aguas subterráneas. Normalmente, se utiliza para la calibración un resultado de monitoreo del agua

subterránea que haya sido realizado a largo plazo. Dentro del área a ser modelada, la CNA ha realizado el monitoreo del agua subterránea por 3 años, sin embargo, las actividades de monitoreo de la CNA se concentran en la parte norte del área de estudio, en los alrededores de Playa del Carmen, la extensa zona sur todavía no se encuentra cubierta. La Figura K-21 muestra la distribución de los pozos de monitoreo de la CNA.

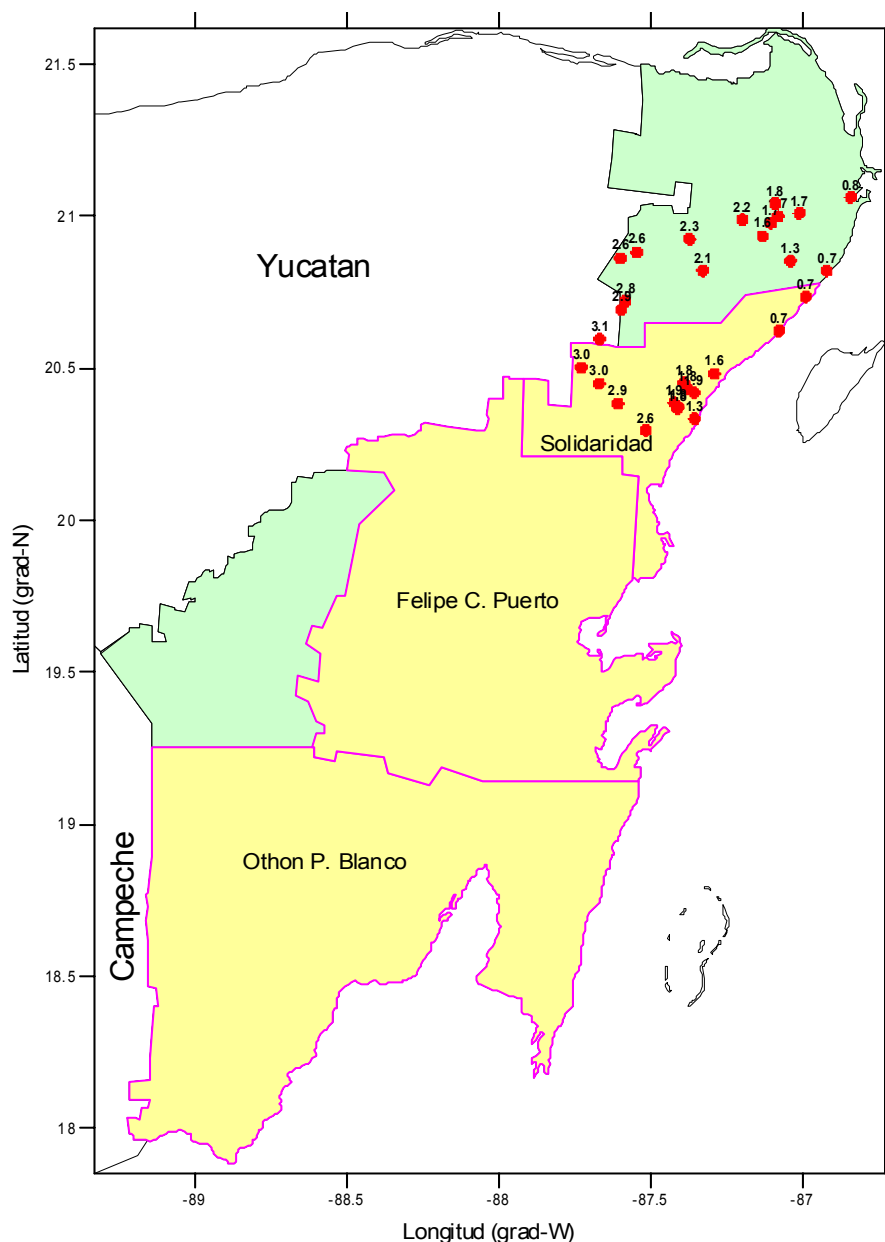


Figura K-21: Distribución de los Pozos de Monitoreo de la CNA

Por lo tanto, es mayor la importancia de confirmar la distribución de los niveles freáticos en el área de modelaje que especificar el nivel inicial del agua subterránea. Para la especificación de la conductividad hidráulica, la precisión apenas podría ser mejorada debido a la escasez de datos relevantes de pruebas de permeabilidad. Las investigaciones anteriores

dieron como resultado un rango amplio de valores de conductividad hidráulica. No existen datos adicionales que podrían ser utilizados para establecer valores adecuados en cada celda. Por lo tanto, se debe aplicar un método para ajustar la conductividad hidráulica, se considera al manto freático como el único material de ajuste teniendo en cuenta las condiciones actuales.

a.2 Mapa de Contornos del Manto Freático Elaborado por la SARH

Un mapa de contornos del manto freático fue publicado por un informe hidrogeológico elaborado por la SARH. El mapa fue elaborado hace como 10 años; sin embargo los datos originales que fueron utilizados para su elaboración son difíciles de encontrar. Por lo tanto, los datos y el mapa no pueden ser evaluados. Sin embargo, se considera que el mapa es una información muy valiosa porque no existen datos similares que sean más recientes. El mapa de la SARH cubre únicamente toda el área de modelaje.

Algunas deficiencias fueron encontradas cuando se estudió en mayor detalle el mapa del manto freático elaborado por la SARH. Como se muestra en la Figura K-22, las líneas de contorno de 1 metro y 2 metros confluyen hacia la costa en los alrededores de Playa del Carmen. Lo anterior implica que el nivel del agua subterránea en la costa es más alto que el nivel de mar en 1 o 2 metros. En casos especiales de acuíferos confinados, en vez de niveles, es más recomendable utilizar la carga hidráulica en análisis de flujo de aguas subterráneas porque la carga hidráulica se podría ubicar por sobre la parte superior del acuífero y, en ocasiones, por sobre el nivel del terreno. Sin embargo, como se mencionó en la sección anterior, no se puede identificar una capa impermeable continua que sea significativa en el área de estudio. En consecuencia, no se puede establecer la existencia de un acuífero confinado con base en evidencia confiable. Como resultado, se torna difícil explicar la razón por la que el nivel freático sea se encuentre a mayor altura que el nivel del terreno como lo sugiere el mapa de la SARH.

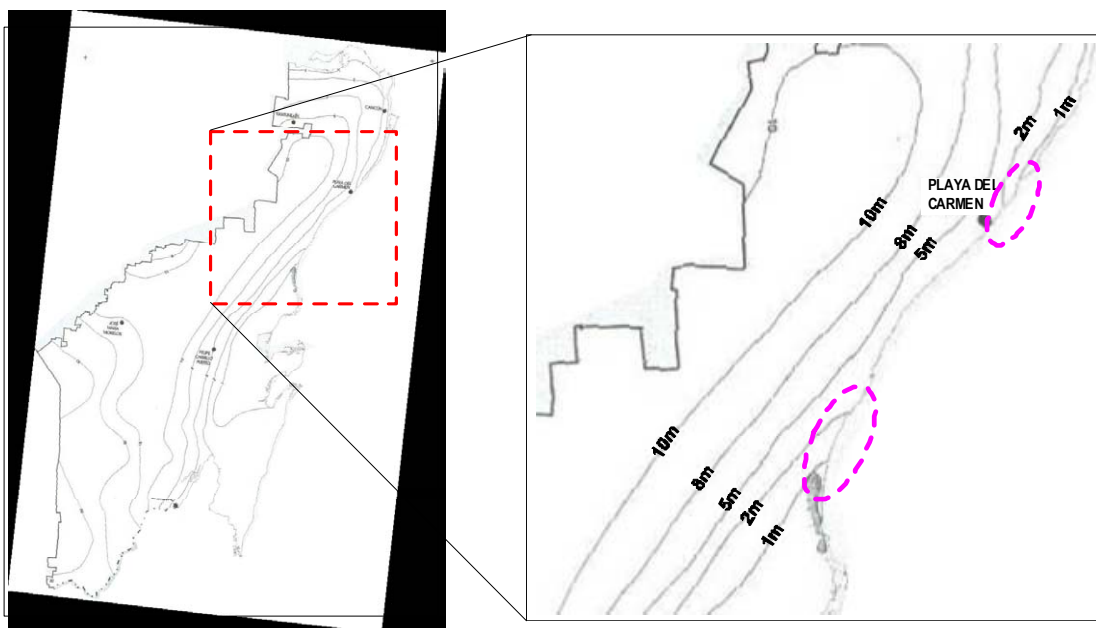


Figura K-22: Líneas de Contorno Isofreático en los Alrededores de Playa del Carmen

Por otra parte, cuando se compara el mapa el mapa de SARH con los datos de la CNA, se puede identificar que los niveles freáticos que resultantes del monitoreo de la CNA son menores que los mostrados en el mapa SARH. Cuando los niveles freáticos se grafican con los datos de la CNA, no existe ningún problema asociado con algún acuífero confinado. Los datos de la CNA son considerados como precisos, si se evalúa desde la perspectiva de su consistencia. Además, en los pozos de la CNA, se puede observar una tendencia clara relacionada con la evolución de los niveles freáticos desde la línea costera hacia la parte continental, más aún, la variación de niveles para pozos de monitoreos cercanos es muy poca, lo que resulta en líneas de contorno bastante regulares, sin quiebres exagerados. Por lo tanto, para los propósitos de este estudio, se utilizará el mapa de SARH que será modificado de acuerdo a los datos de monitoreo de la CNA donde existan.

a.3 Datos de Niveles del Manto Freático de CAPA

Otra fuente de datos de niveles freáticos es el registro de los pozos de producción de CAPA en Chetumal y Felipe C. Puerto. Sin embargo, los datos de los niveles freáticos de CAPA no podrían ser utilizados directamente para elaborar el gráfico de niveles porque las profundidades fueron tomadas a partir del nivel del terreno y no se disponen de datos de elevación de los pozos. Para poder utilizar los datos de CAPA para verificar o rectificar el mapa de SARH es necesario realizar cierto procesamiento para obtener la elevación de los pozos. Dicho procesamiento fue realizado por medio del uso de datos topográficos USGS 90 m que fueron obtenidos por medio de la INTERNET.

Los datos de los niveles freáticos de CAPA fueron transformados a unidades de MSNM (metros sobre el nivel del mar) como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro K-10: Datos Procesado de CAPA para Establecer el Nivel Freático

Ubicación	Profundidad del Pozo(m)	Elevación de la entrada del pozo	Nivel del agua medido desde la entrada del pozo	Nivel Promedio (MSNM)	Valor SARH
González Ortega	78.33	50.11	31.05	19.06	14
XUL-HA	55.2	52.54	37.99	14.55	10
Felipe C. Puerto	28	12.48	14.25	-1.77	5

Alrededor de 20 pozos se distribuyen en 3 sitios de producción, sin embargo, la variación de los valores del nivel freático es relativamente grande, lo que hace difícil dibujar líneas de contorno uniformes al utilizar estos datos. Por otra parte, las distancias entre los pozos son bastante pequeñas en comparación con el tamaño de la malla del modelo, en consecuencia, se tomó el promedio de los niveles freáticos para cada sitio de producción, como se muestra en el siguiente cuadro.

Para los sitios de producción en Chetumal, los promedios del nivel freático son de 19.06 y 14.55 m para González Ortega y XUL-HA respectivamente. Ambos valores son mayores que lo que refleja el mapa SARH. En contraste, el resultado de Felipe Carrillo Puerto no sólo refleja valores menores que el mapa SARH, sino incluso menores al nivel del mar. Este tipo de resultado es sospechoso; si fuese cierto, podría conllevar a la posibilidad de exista intrusión de agua marina, incluso si no considera alguna extracción por bombeo.

a.4 Definición del Nivel Freático

En correspondencia con su disponibilidad, los datos del nivel freático fueron recopilados tomando en cuenta los siguientes 3 aspectos: Primero, teniendo en cuenta que son los datos más recientes y confiables, se le deberían de dar mayor prioridad a los datos de la CNA.

Segundo, en las áreas donde la CNA no ha realizado ningún monitoreo de las aguas subterráneas, se deberán utilizar los datos de SARH.

Por ultimo, los datos de CAPA de Chetumal y Felipe Carrillo Puerto reflejan datos que difieren del mapa SARH, sin embargo, es difícil juzgar cual es más creíble, en consecuencia se toma el valor promedio simple.

De esta manera se elaboró un nuevo mapa de contornos, como se muestra en la siguiente figura. El contorno re-elaborado es considerablemente diferente al mapa SARH en el área de monitoreo de la CNA, un poco diferente al mapa de SARH en las partes aledañas a los pozos

de producción de Chetumal y Felipe Carrillo Puerto y apenas equivalente al mapa SARH en otras áreas.

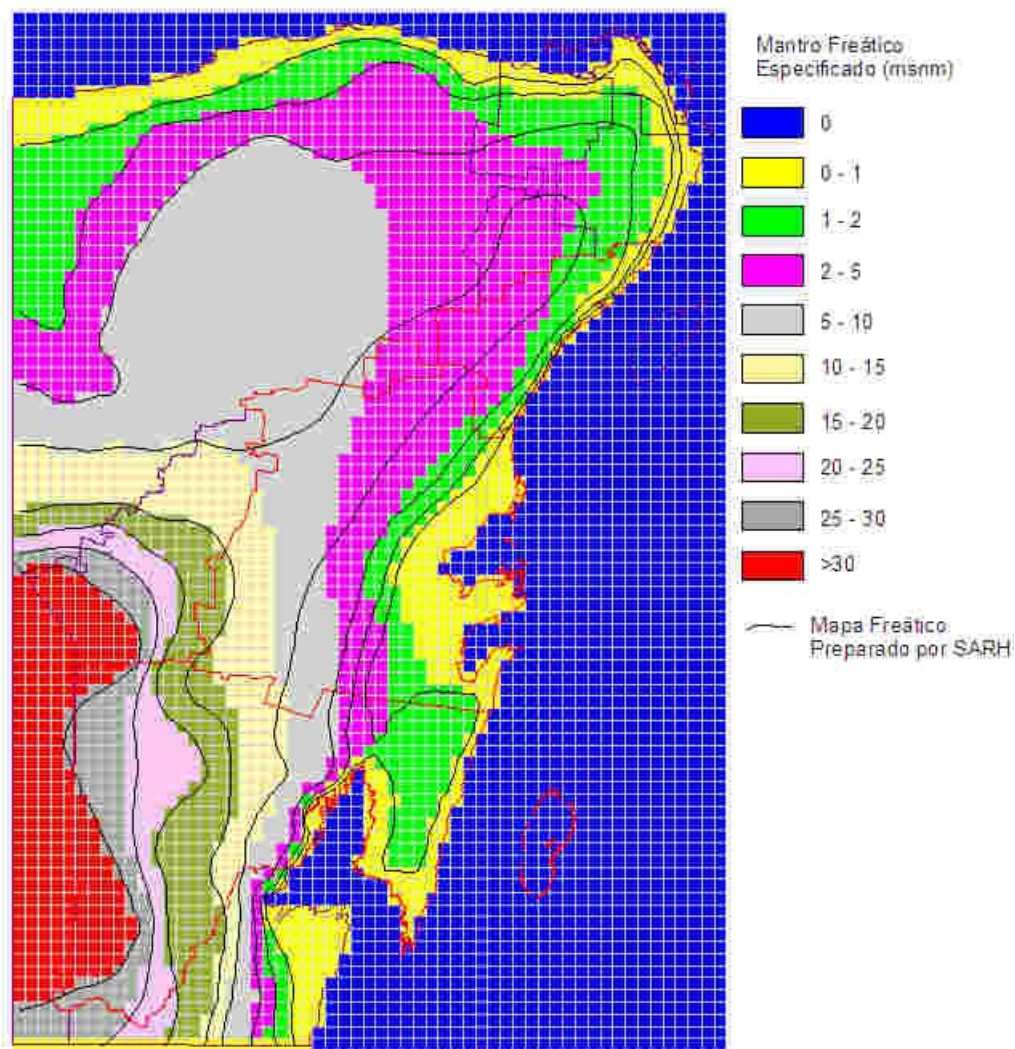


Figura K-23: Nuevo Mapa de Contornos

b. Precipitación

La precipitación es la fuente esencial de recarga para el agua subterránea en el área de estudio. Los datos de precipitación de las 30 estaciones meteorológicas dentro del Estado de Quintana Roo fueron proveídos como valores promedios de un período extenso por INEGI

(2002). Por otra parte en las áreas aledañas al Estado de Quintana Roo, los datos fueron bajados de la página web de Clima Mundial a través de la internet.

Cuadro K-11: Precipitación Promedio dentro y en los alrededores del Area del Modelo

Ubicación	Este	Norte	Precipitación (mm)	País	Período
Adolfo Lopez Mateos	323041	2171745	1366.0	MEXICO	1983-1998
Agua Blanca	306987	1991964	1364.0	MEXICO	1984-1998
Alvaro Obregon	326479	2023425	1338.0	MEXICO	1964-1998
Andres Q. Roo	384009	2118989	1461.7	MEXICO	1987-1998
Becanchen, Yucatan	251512	2186451	1074.0	MEXICO	1949-1982
Cancun - Capa	518661	2339509	1333.0	MEXICO	1988-1998
Chetumal Observatorio	359867	2046084	1295.0	MEXICO	1952-1998
Chetumal Tec	361867	2048065	1333.2	MEXICO	1984-1998
Coba	423095	2265719	1180.4	MEXICO	1987-1998
Cozumel	505615	2267920	1326.5	MEXICO	1951-1980
Dzitas, Yucatan	337241	2297185	1261.0	MEXICO	1948-1985
Dziuche	310324	2201571	1186.9	MEXICO	1983-1998
Felipe Carrillo Puerto Obs.	390404	2164835	1397.0	MEXICO	1952-1998
Ideal (Nuevo Xcan)	443180	2309221	1449.1	MEXICO	1989-1998
Izamal, Yucatan	282768	2307901	1096.0	MEXICO	1949-1982
Kantunilkin	449574	2332824	1450.1	MEXICO	1952-1996
La Presumida	316219	2190542	1419.9	MEXICO	1965-1998
Lazaro Cardenas	372261	2098931	1350.9	MEXICO	1972-1998
Leona Vicario	478747	2320857	968.1	MEXICO	1961-1996
Limones	383239	2103470	1480.7	MEXICO	1983-1998
Nicolas Bravo	295952	2041892	1225.5	MEXICO	1961-1998
Pedro A. Santos	377460	2096160	1518.0	MEXICO	1983-1996
Playa del Carmen	491902	2281705	1445.6	MEXICO	1988-2002
Pucte	323903	2016629	1364.5	MEXICO	1972-1998
Saban	338842	2216219	1125.1	MEXICO	1985-1998
Senor	380876	2194967	1304.3	MEXICO	1972-1998
Sergio Butron Casas	334406	2047331	1310.8	MEXICO	1983-1998
Solferino	455399	2360489	1248.0	MEXICO	1967-1998
Sotuta, Yucatan	272052	2274860	1162.0	MEXICO	1945-1987
Tekax, Yucatan	250619	2229316	1103.0	MEXICO	1948-1983
Telchaquillo, Yucatan	249726	2285576	1120.0	MEXICO	1950-1985
Tihosuco	357262	2233460	1179.0	MEXICO	1966-1998
Tulum	452152	2236504	1025.2	MEXICO	1972-1998
Valladolid	367604	2287362	1131.0	MEXICO	1969-1980
Vallehermoso	339780	2122415	1095.2	MEXICO	1972-1998
Victoria	470812	2298999	1417.3	MEXICO	1965-1998
X-Pichil	355763	2178068	1039.6	MEXICO	1961-1998
Belize/Int.Airport	364925	1936408	1890.0	BELIZE	1941-2000
Big Falls Ranch	331883	1935515	1934.0	BELIZE	1965-1978
Libertad_ Santa Cruz	352423	2023030	1449.0	BELIZE	1937-1977

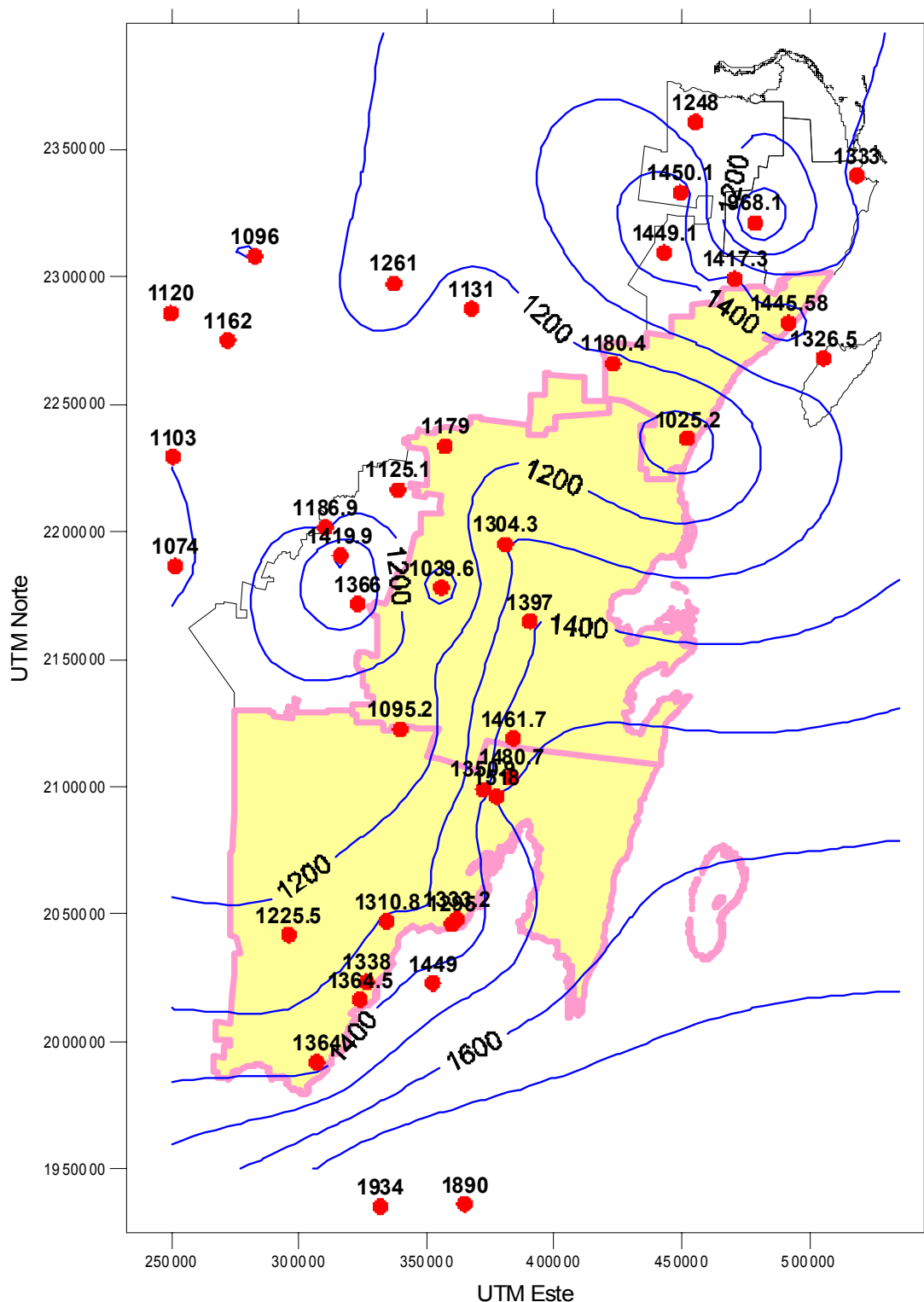


Figura K-24

Figura K-24 muestra los contornos de precipitación que han sido registrados por las 40 estaciones dentro y en los alrededores del Estado de Quintana Roo.

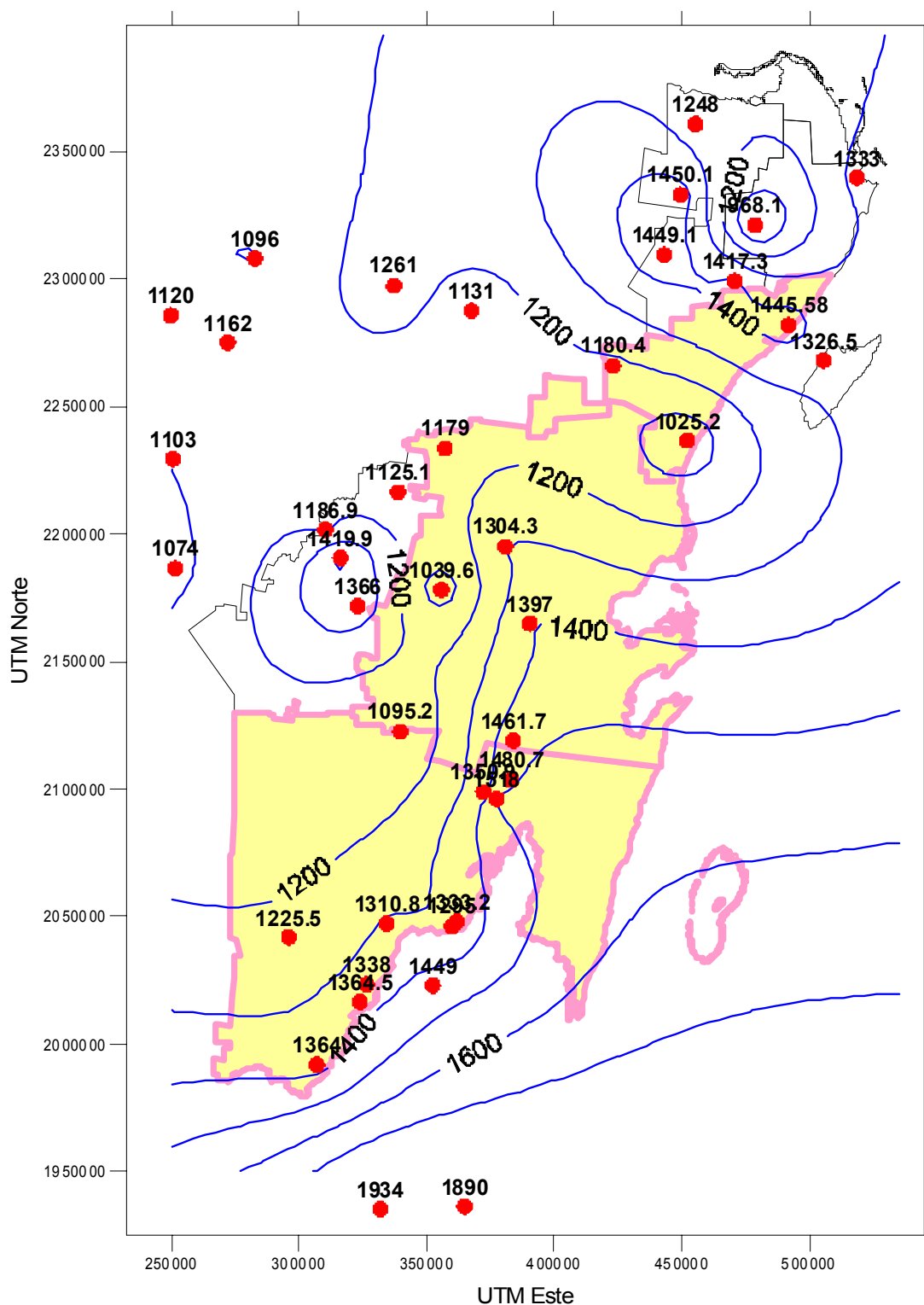


Figura K-24: Mapa de Contornos de Precipitación (mm)

c. Evaporación

La evaporación es tan importante como la precipitación porque representa una porción importante de la pérdida potencial del agua subterránea. Sin embargo, la evaporación del agua subterránea es uno de los factores más difíciles de cuantificar. En general, la cantidad de

evaporación para un modelo es especificada por medio de un valor empírico. Entre la información recopilada en este estudio, se reporta un coeficiente de evaporación que oscila entre el 77% y el 95% de la precipitación como lo muestra el siguiente cuadro.

Cuadro K-12: Tasa de Evaporación

Tasa de Evaporación	Fuente
0.777	INEGI,2002
0.88	SARH,1990
De 0.90 hasta 0.95	Anónimo,1983
0.91	Cruz-Cetina,1978
0.76	Gobierno,1984
0.85	Promedio

Es difícil evaluar cuál valor es más confiable, por lo tanto, se seleccionó el promedio de los valores anteriores (85%) como el valor inicial de la tasa de evaporación en el área del modelo.

d. Extracción del Agua Subterránea

d.1 Inventario de Pozos de la CNA

La extracción por medio de bombeo es uno de los factores más importantes relacionados con el consumo de agua subterránea. La cantidad de agua subterránea extraída es a menudo difícil de estimar debido a la existencia de pozos privados no-registrados. Sin embargo en el área de estudio, se cree que todos los pozos han sido ya registrados dentro del inventario de la CNA. En consecuencia, se puede esperar un estimado preciso del bombeo de extracción.

Sin embargo, cuando se revisó el inventario de pozos de la CNA se encontraron algunas incongruencias relacionadas con las coordenadas de los pozos. Alrededor de 10% de los pozos tienen coordenadas que los ubican fuera del Estado de Quintana Roo, y algunos de ellos se encuentran ubicados casi una docena de kilómetros alejados de la localidad que les da su nombre.

Se utilizó un archivo dBASE, denominado “Centro_poblados.dbf”, para modificar las coordenadas incongruentes. Dichos pozos fueron correlacionados con el archivo dBASE por medio del nombre del pozo y luego se modificó la coordenada con el dato correspondiente en el archivo dBASE. La ubicación original del pozo y el resultado modificado se muestran en la Figura K-25. La precisión de este tipo de modificación está limitada por el tamaño de la localidad y la magnitud de la villa. Sin embargo, se considera el tamaño de la malla, 5 km x 5 km, la variación en los valores de las coordenadas se considera que se encuentra dentro de un nivel aceptable.

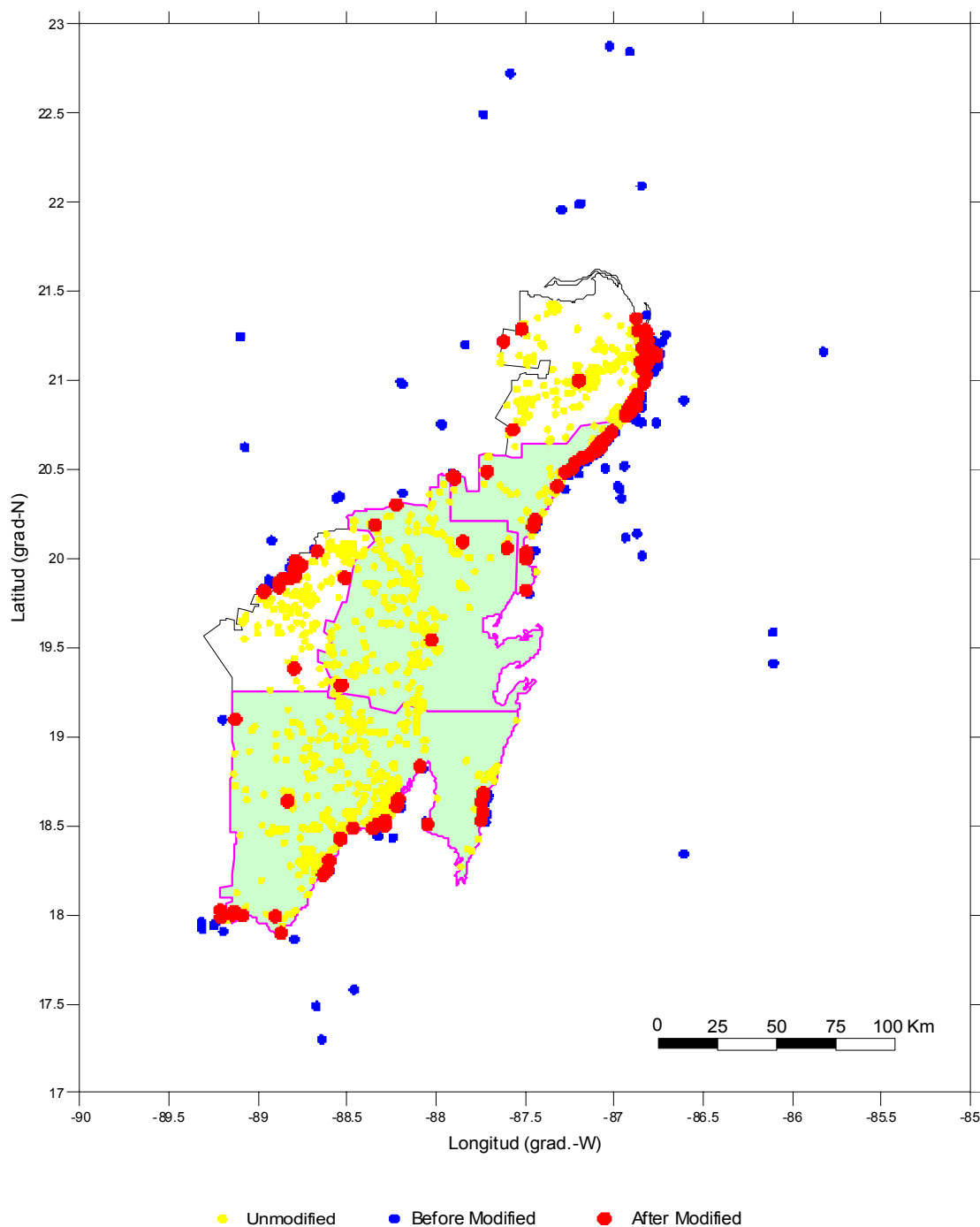


Figura K-25: Reubicación de los Coordenadas de los Pozos

d.2 Distribución de la Descarga de Bombeo

De acuerdo con los requerimientos de PMwin, la descarga de bombeo se asignó a una unidad de celda como se muestra en la Figura K-26. En diversas celdas donde los pozos de producción de CAPA se encuentran ubicados y concentrados, se obtuvo una descarga de bombeo que llegó a alcanzar 5 millones de $\text{m}^3/\text{año}$, este tipo de celdas se encuentran principalmente ubicadas en Cancún y Chetumal.

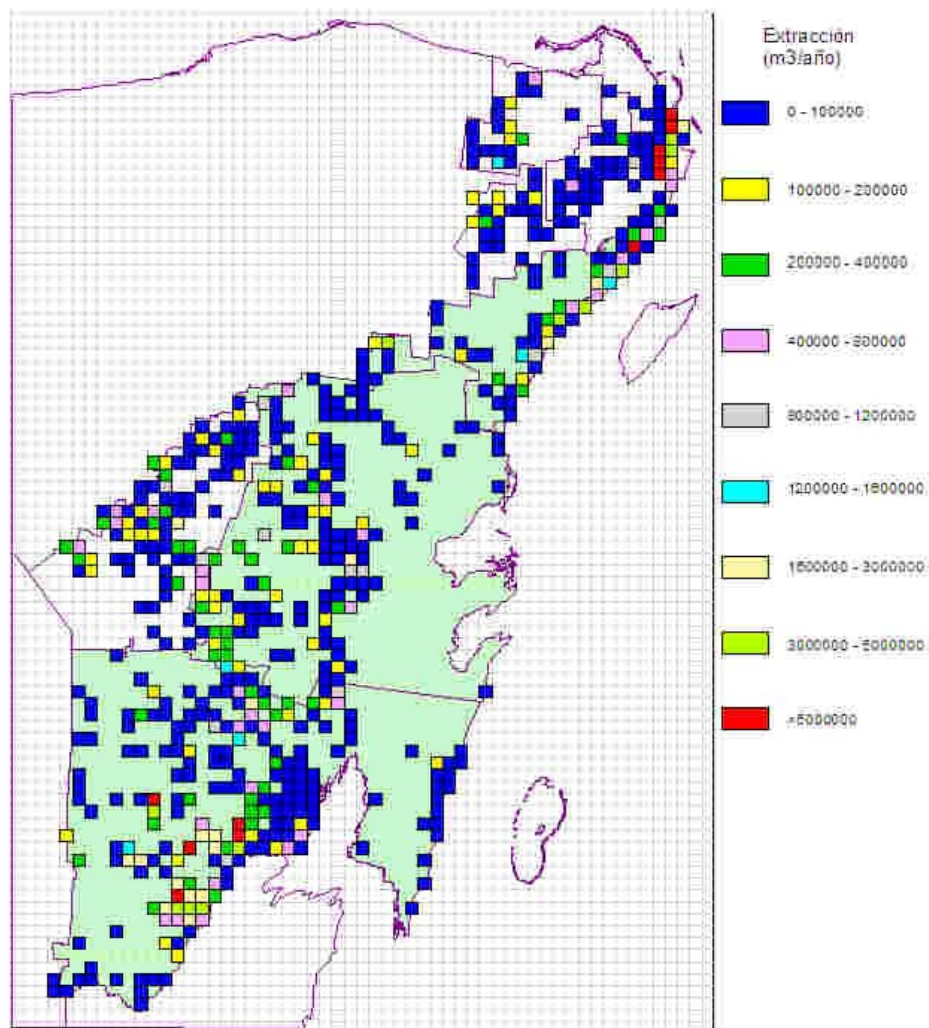


Figura K-26: Mapa de Extracciones (m³/año)

Sin embargo, la descarga de bombeo es pequeña en otras celdas, llegando a ser menor a 4,000 m³/año, incluso cuando se encuentran muchos pozos dentro de una misma celda.

K.4.1.4 Resultado de la Simulación

a. Manto Freático

Como se mencionó anteriormente, el acuífero calizo es heterogéneo y las pruebas existentes de permeabilidad no son suficientes para especificar la conductividad eléctrica a lo largo del área de modelaje. Los datos modificados del nivel freático, por lo tanto, se tornaron en el único material disponible para especificar la conductividad hidráulica.

Uno de los principios de flujo de aguas subterráneas más esenciales establece que la velocidad y/o cantidad de agua subterránea que fluye es proporcional a la conductividad y gradiente hidráulica. Dicha relación puede ser expresada por medio de la Ley de Darcy:

$$V = Ki \quad \text{o} \quad Q = Aki$$

donde, V y Q representan la velocidad y la cantidad de agua que fluye, respectivamente;

K es la unidad de conductividad hidráulica (distancia/tiempo)

i es la gradiente hidráulica (=(diferencia en carga hidráulica)/(distancia en la dirección del flujo del agua subterránea)).

A es el área seccional del flujo de agua subterránea

En consecuencia, en la misma capa o mismo acuífero, la conductividad hidráulica es inversamente proporcional a la gradiente hidráulica. En otras palabras, dentro de un mapa contorno de niveles de agua, la gradiente hidráulica es mayor en el área donde el intervalo entre líneas de contorno adyacentes es pequeño y, como resultado, la conductividad hidráulica debe ser menor.

El resultado de la calibración se muestra en la Figura K-27.

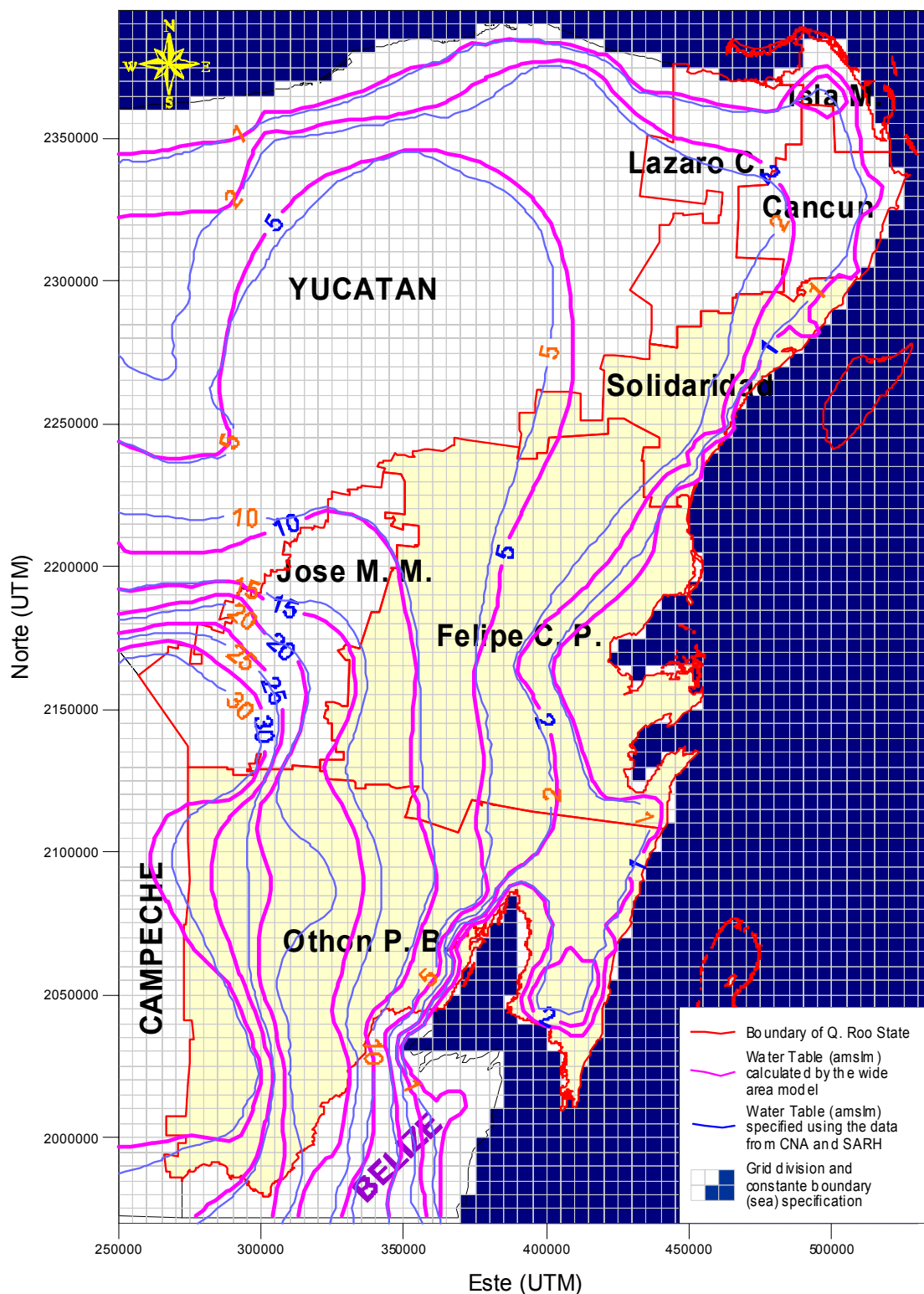


Figura K-27: Resultados de la Calibración

b. Flujo del Agua Subterránea

La Figura K-28 muestra la distribución del agua subterránea en la dirección del flujo y un esquema de la velocidad del flujo en el área del modelo.

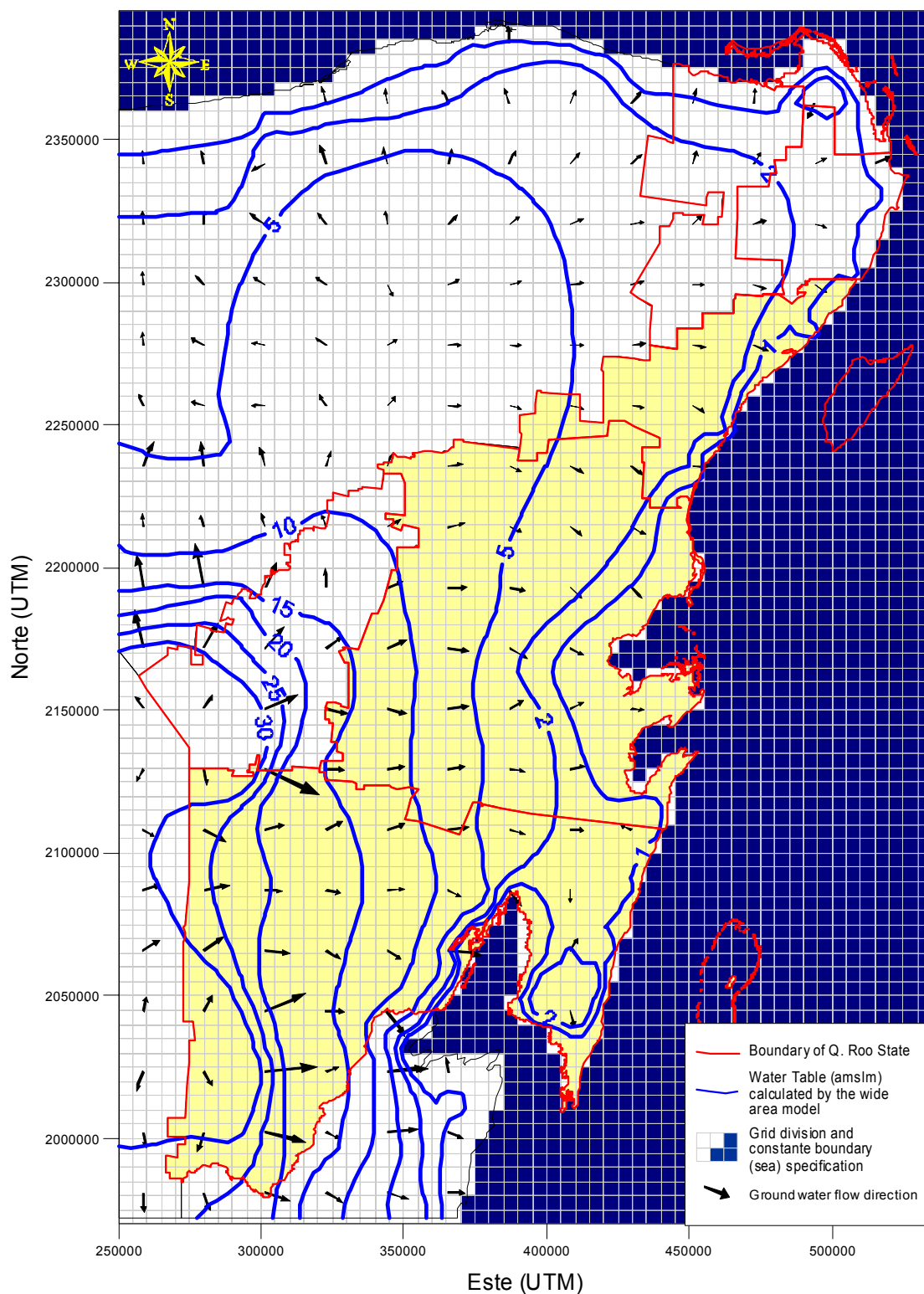


Figura K-28: Distribución de la Dirección y Velocidad del Flujo

c. Balance Hídrico

El Cuadro K-13 y el Cuadro K-14 muestran el balance hídrico en el Estado de Quintana Roo y los tres municipios del área de estudio. En el Estado de Quintana Roo, la principal fuente de recarga de la precipitación y el principal factor de pérdida es la evaporación. El promedio

total anual de precipitación en el Estado de Quintana Roo es de 56,449 Mm³, la que puede dividirse en porciones:

Una correspondiente a la evaporación de la superficie del terreno en la que parte de la precipitación regresa a la atmósfera antes de infiltrarse en el terreno;

Otra corresponde a la evaporación o evapotranspiración del agua subterránea, después de la infiltración de la precipitación;

La ultima parte puede considerarse como la cantidad de recarga neta derivada de la precipitación que sería la cantidad de agua subterránea que se descarga fuera del Estado de Quintana Roo. Esta porción representa un poco más de 5,000 millones de metros cúbicos, que representa alrededor del 78% de la cantidad de recarga total en el Estado de Quintana Roo.

Otra fuente de recarga puede ser el flujo que proviene de áreas adyacentes al Estado de Quintana Roo. La cantidad total que fluye es de alrededor de 1,433 millones de metros cúbicos, que representa alrededor del 22% de la cantidad total de recarga y un cuarto de la recarga por precipitación.

La principal descarga fluye hacia el mar, 5,035 millones de metros cúbicos que representan alrededor del 78% de la descarga total. La descarga por bombeo es de alrededor de 270 millones de metros cúbicos que sería sólo el 4% de la descarga total.

Cuadro K-13: Balance Hídrico en el Estado de Quintana Roo

Unidad: Mm³/año

Área de Estudio	Othon P. Blanco	Felipe C. Puerto	Solidad_ ridad	Otros	Total
Recarga por Precipitación	1,801.3	1,611.0	346.0	1,265.9	5,024.1
Fluye hacia el Estado de partes aledañas	366.6	211.3	124.1	731.3	1,433.2
Sub total	2,167.8	1,822.3	470.1	1,997.1	6,457.3
Hacia el Mar	-927.8	-2,428.6	-862.6	-815.6	-5,035
Descarga por bombeo	-124.0	-21.2	-30.0	-94.7	-270
Fluye fuera del Estado	-811.8	-31.0	0.0	-310.0	-1,153
Sub total	-1,863.6	-2,480.8	-892.6	-1,220.3	-6,457.3

Cuadro K-14: Balance Hídrico de los Municipios en el Área de Estudio

Othon P. Blanco		(Fluye desde)				unidad: m3
Recarga	Precipitación	Belice	Campeche	Felipe C.P.	Otros(N)	Sub Total
		6,635,269	359,936,743	141,590,009	46,452,032	2,355,875,403
Pérdida	Hacia el mar	(Fluye hacia)	(Extracción)	(Fluye hacia)		
		Belice		Felipe C.P.	Otros(N)	Sub Total
Felipe C. Puerto	-927,837,776	-811,771,379	-123,977,440	-481,786,978	-10,501,830	-2,355,875,403
Recarga	Recarga	(Fluye desde)	Othon P.B.	Solidaridad	Otros(W)	Sub Total
		Yucatán	481,786,978	213,610,567	225,206,455	2,742,859,774
Pérdida	Hacia el mar	(Fluye hacia)	(Extracción)	(Fluye hacia)		
		Yucatán		Solidaridad	Otros(W)	Sub Total
Solidaridad	-2,428,581,014	-30,986,790	-21,230,411	-253,959,433	-8,102,127	-2,742,859,774
Recarga	Recarga	(Fluye desde)		Felipe C.P.	Otros(N)	Sub Total
		Yucatán		253,959,433	384,361,957	1,108,406,197
Pérdida	Hacia el mar	(Fluye hacia)	(Extracción)	(Fluye hacia)		
		Yucatán		Felipe C.P.	Otros(N)	Sub Total
	-862,624,899	0	-29,973,482	-213,610,567	-2,197,249	-1,108,406,197

K.4.1.5 Interfase entre el Agua Dulce y el Agua Salina

La extracción del agua subterránea se considera generalmente segura cuando la cantidad extraída es menor a la recarga, y la descarga de bombeo es mucho menor que la recarga en el área de estudio y en todo el Estado de Quintana Roo. Sin embargo, como se muestra en la Figura K-26 descarga de bombeo no se encuentra distribuida homogéneamente, por lo tanto, es necesario verificar si es segura la extracción en el área donde se realiza a una tasa obviamente superior al valor promedio. La verificación es especialmente importante en el área costera donde la vulnerabilidad del acuífero es alta porque existe un alto riesgo de intrusión salina (agua de mar).

El agua salina usualmente se localiza bajo el agua dulce debido a su mayor densidad. En condiciones estáticas ideales, si se puede ignorar el efecto de la dispersión entre el agua dulce y el agua de mar, la profundidad de la interfase entre el agua dulce y el agua salina puede ser estimada en cerca de 40 veces el nivel del agua subterránea en MSNM. Sin embargo, lo anterior se basa en conceptos teóricos; en la realidad, la profundidad de la interfase cambia debido a varios factores.

En el área de estudio, todavía no existen informes sobre daños producidos como resultado de la intrusión salina. Sin embargo, algunos investigadores han revelado que en algunas áreas la influencia del agua de mar ha sido tan elevada que ha llevado a restringir la extracción del agua subterránea porque la profundidad de la interfase llega a ser tan sólo de 20 metros. En este trabajo, los cambios de la interfase no fueron simulados en el modelo regional porque no existen datos disponibles ni que confirmen algún cambio en la interfase ni de calibración para los parámetros necesarios como los coeficientes de dispersión y difusión molecular efectiva. Sin embargo, la interfase fue estimada.

a. Monitoreo de la Calidad del Agua Subterránea por la CNA

Cuando el problema de la intrusión del agua salina es tomada en consideración, su ocurrencia puede ser solamente confirmada por medio de la evaluación de la fluctuación de los niveles de la interfase. La evaluación se realiza generalmente por medio de la verificación del deterioro de la calidad del agua durante cierto período. Por lo tanto, el monitoreo de la calidad del agua subterránea es indispensable para tener una comprensión certera de la intrusión del agua marina.

La CNA ha realizado el monitoreo de la calidad del agua por alrededor de 3 años. Aunque los períodos de monitoreo no son lo suficientemente extensos para calibrar los parámetros relacionados a la intrusión salina ni el área del monitoreo cubre toda el área de estudio, los

datos obtenidos son muy valiosos para estimar la interfase en la actualidad y, seguramente, serán de mucha utilidad en el manejo del agua subterránea en el futuro.

La distribución de los pozos de monitoreo de calidad del agua de la CNA es casi la misma que la que monitorea los niveles freáticos mostrada en la Figura K-21. Los valores de SDT (sólidos disueltos totales) para la mayoría de los pozos se encuentra por debajo de los 1,000mg/l, lo que indica que el agua subterránea extraída arriba de la profundidad del fondo de los pozos de monitoreo es de buena calidad como agua potable desde el punto de vista de la salinidad. Sin embargo, el valor de SDT para uno de los pozos cercanos a la costa llega a ser de 37,309 mg/l, lo que equivale a un valor similar al agua de mar que indica que el fondo del pozo ha penetrado en la zona de agua de mar.

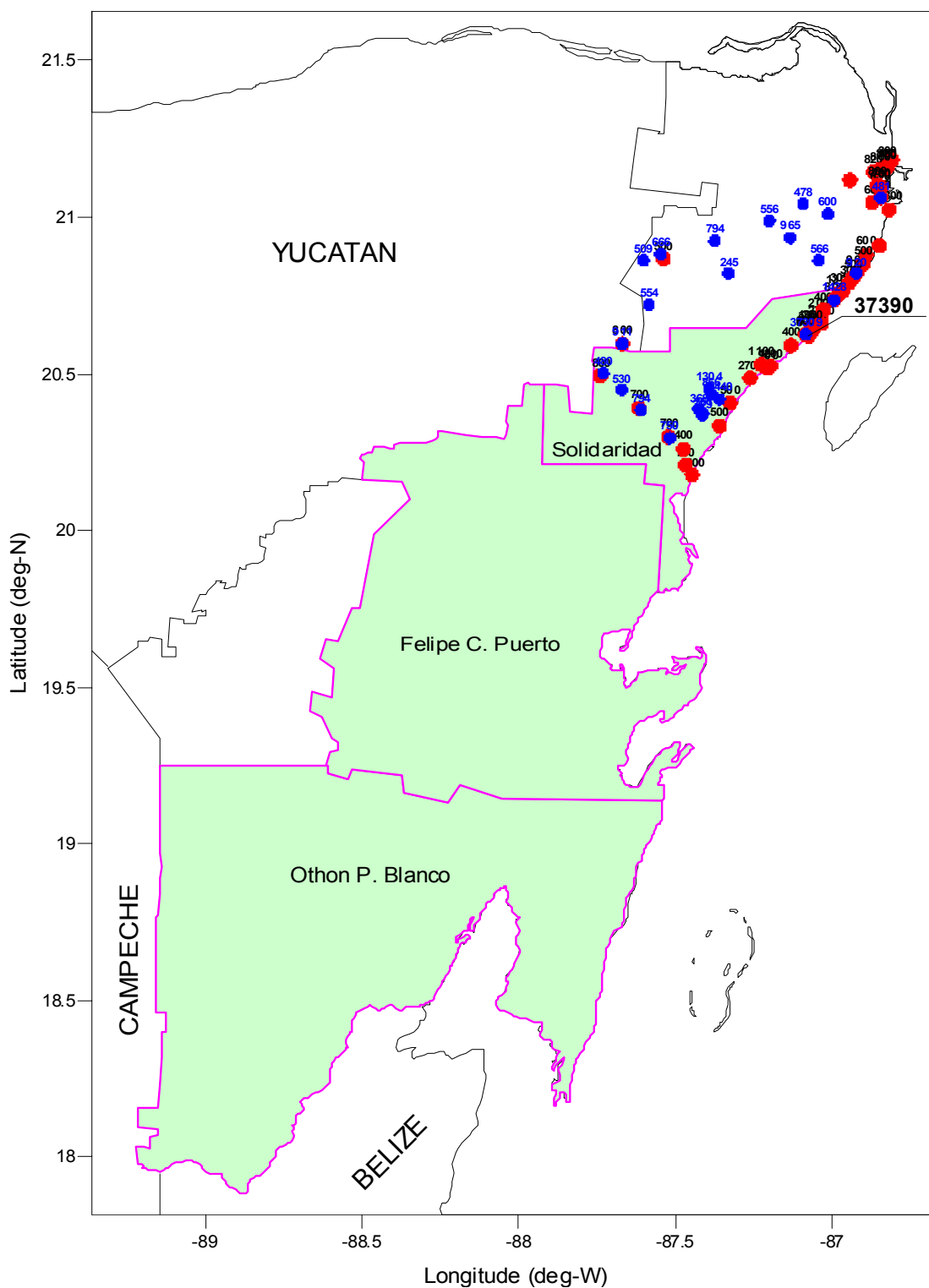


Figura K-29: Pozos de Monitoreo de la Calidad del Agua de la CNA

b. Distribución de la Profundidad de los Pozos

Teniendo en cuenta que los pozos de monitoreo de calidad del agua de la CNA, que se consideran ser los datos más confiables en el área de estudio, no cubren toda el área de estudio, se han utilizado también los datos de los pozos del inventario completo de la CNA a

manera de referencia para definir la interfase salina. Se asume que sólo agua dulce se puede extraer de los pozos que se encuentran en el inventario de la CNA, en consecuencia, la interfase salina debe estar ubicada debajo del fondo de dichos pozos. Por lo tanto, al tomar como referencia el fondo de la elevación del pozo más profundo en cada celda; es posible, cuando menos, confirmar que la interfase salina debe encontrarse por debajo de dicha elevación.

Además, teniendo en consideración que en el inventario de pozos no se incluyen los datos de elevación de los mismos, se utilizó la malla topográfica de 90 metros del USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos) con el propósito calcular su elevación, en un proceso similar al realizado para obtener dicha información de los pozos de producción de CAPA. La Figura K-30 muestra el estado general de los datos de topografía del USGS.

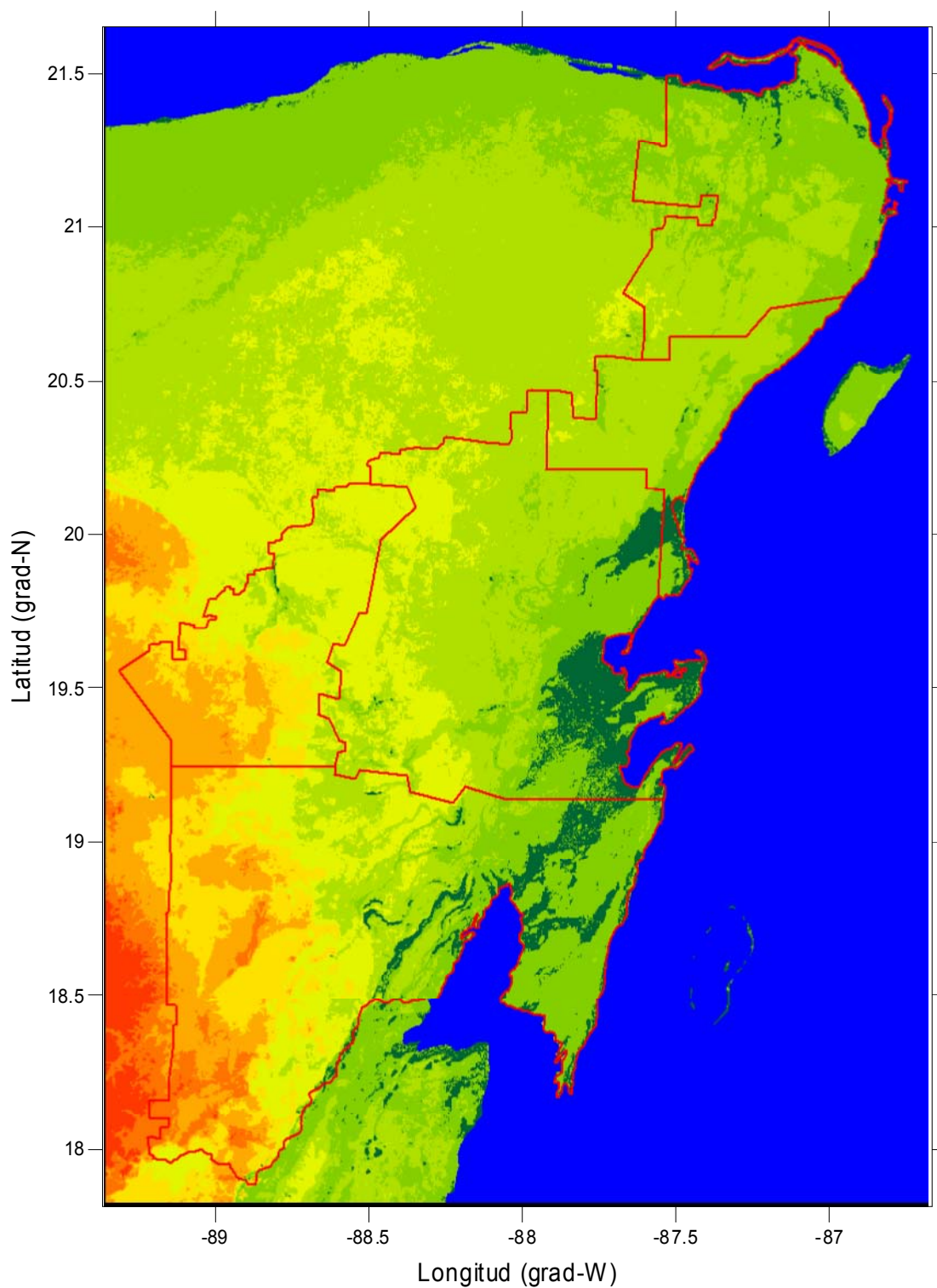


Figura K-30: Estado General de Topografía del USGS

La Figura K-31 muestra las profundidades máximas de los pozos para cada celda de la malla del modelo. En correspondencia con la topografía, los pozos profundos se concentran en el área montañosa en la parte suroeste del Estado de Quintana Roo, así como en otras áreas del

estado. Los cambios en la profundidad van de 5 metros a 60 metros. La Figura K-32 muestra la elevación del fondo de los pozos más profundos en cada celda del modelo.

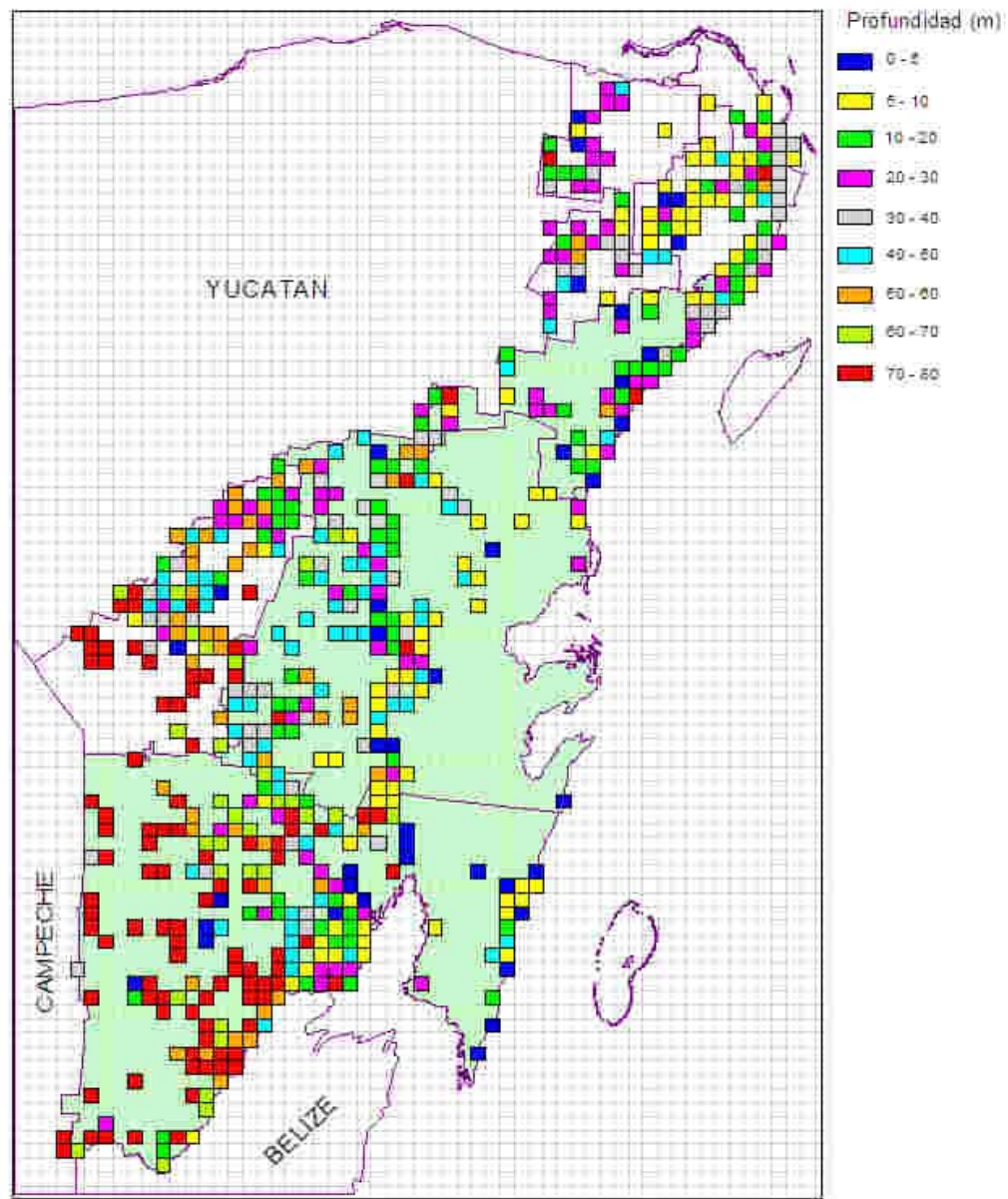


Figura K-31: Profundidad Máxima de los Pozos en Cada Celda del Modelo

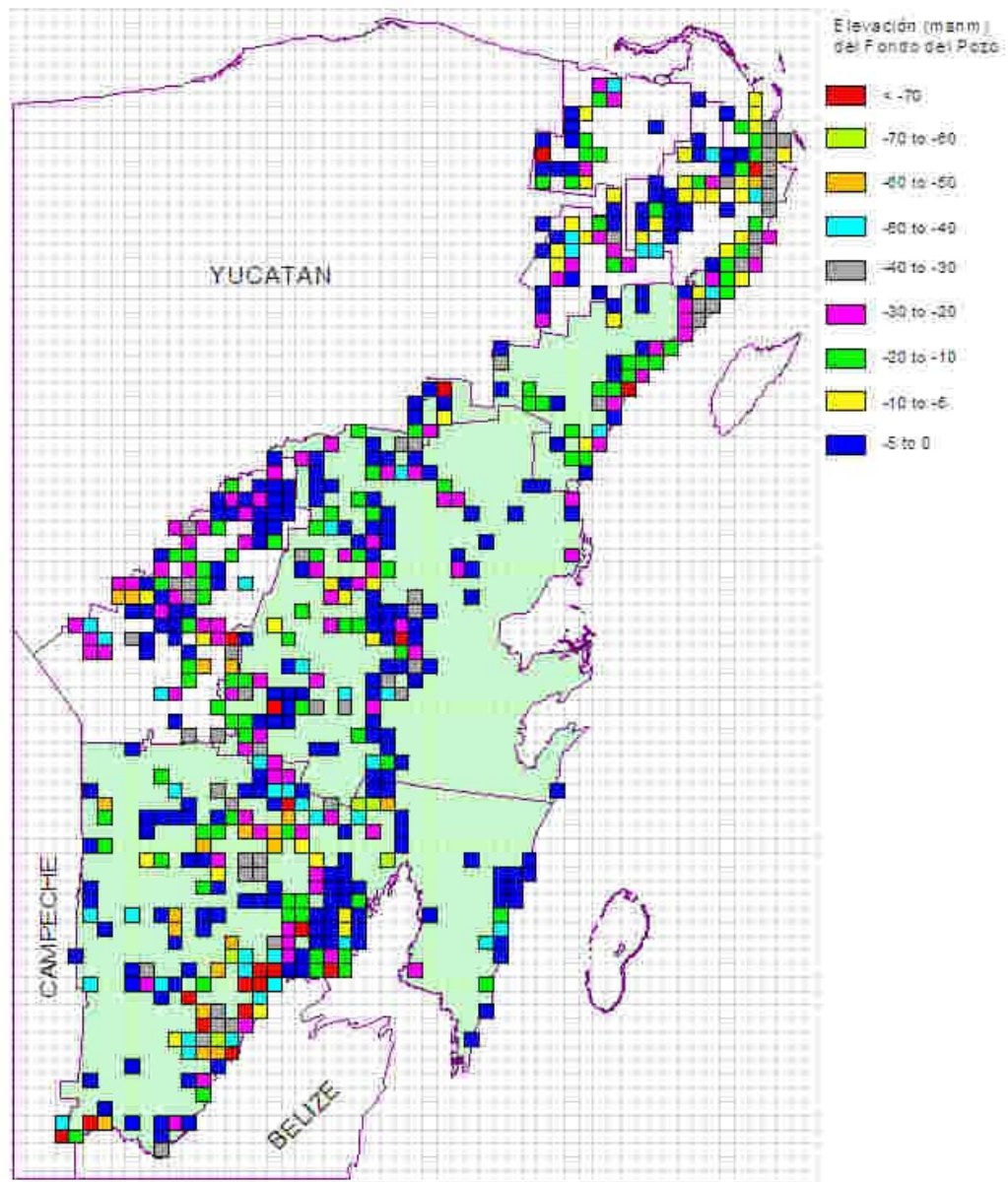


Figura K-32: Elevación de los Pozos más Profundos en Cada Celda

c. Definición de la Interfase entre el Agua Dulce y el Agua Salina

La Figura K-33 muestra la distribución estimada de la interfase entre el agua dulce y la salina. La interfase se profundiza desde la costa hacia el continente. A manera de ejemplo, a una distancia de 10 km desde la línea costera, la interfase podría encontrarse tan somera como a

The map displays the Yucatán Peninsula with a color-coded water table and a red boundary line. The legend indicates:

- Quintana Roo State (Red outline)
- Specified Water Table (Amslm) (Blue lines)
- Specified Boundary between Sea Water and Fresh Water (Red line)
- CNA Monitoring Wells with their TDS (ppm) and Depth (amslm) (Red dots with numbers)
- Minimum Depth of Wells Using for Water Supply (Blue dots with numbers)

A red circle highlights a specific area on the coast, likely indicating a point of interest or a specific well location.

Figura K-33: Distribución de la Interfase Salina

La Figura K-34 y la Figura K-35 muestran las secciones transversales que reflejan la distribución de la interfase entre el agua dulce y la salina. Estos gráficos deben ser evaluados con juicio crítico y deben ser tomados más que todo como referencia, teniendo en cuenta la insuficiencia e imprecisión de los datos utilizados, como ya se mencionó anteriormente.

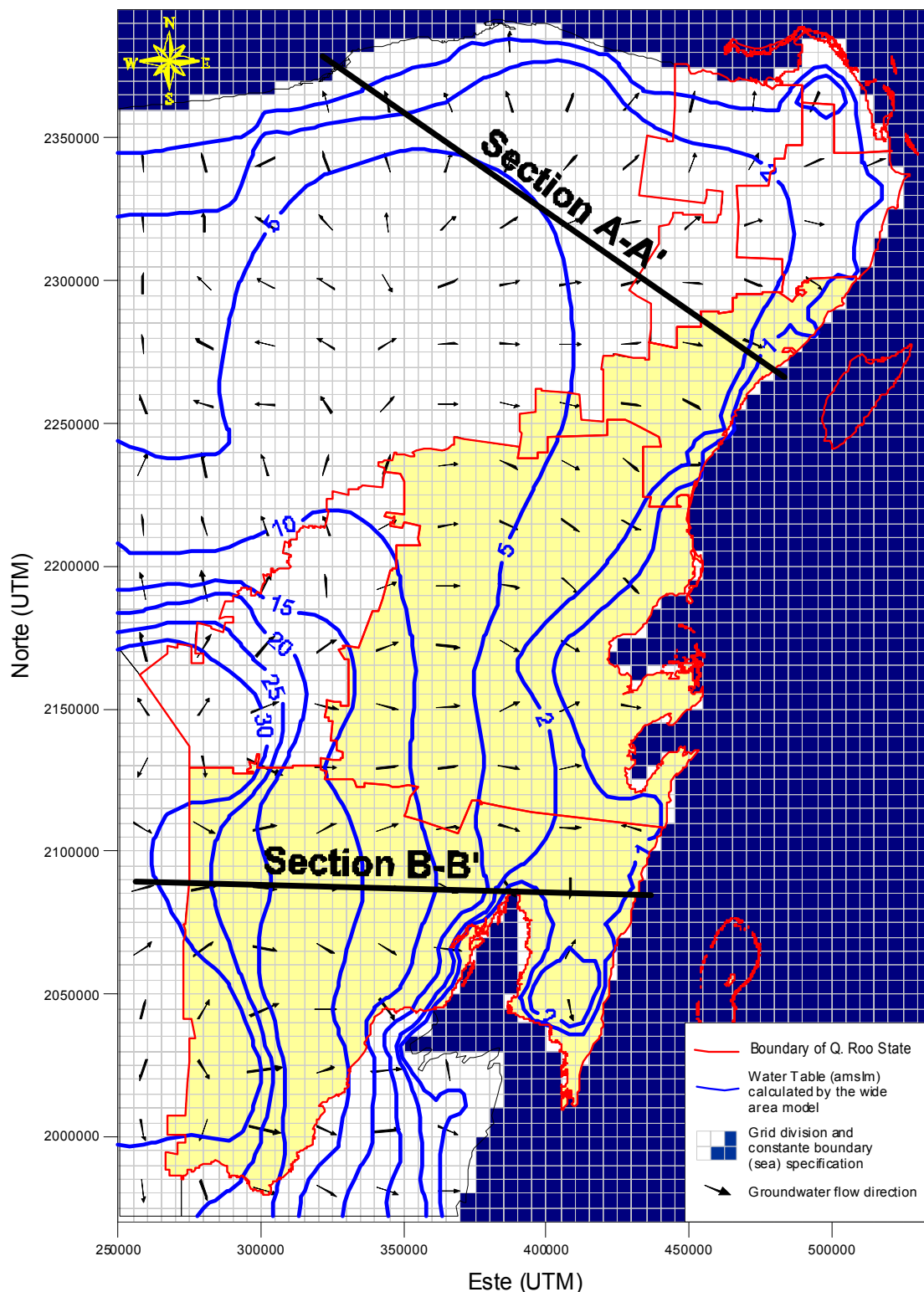


Figura K-34: Secciones para Observar la Interfase Salina

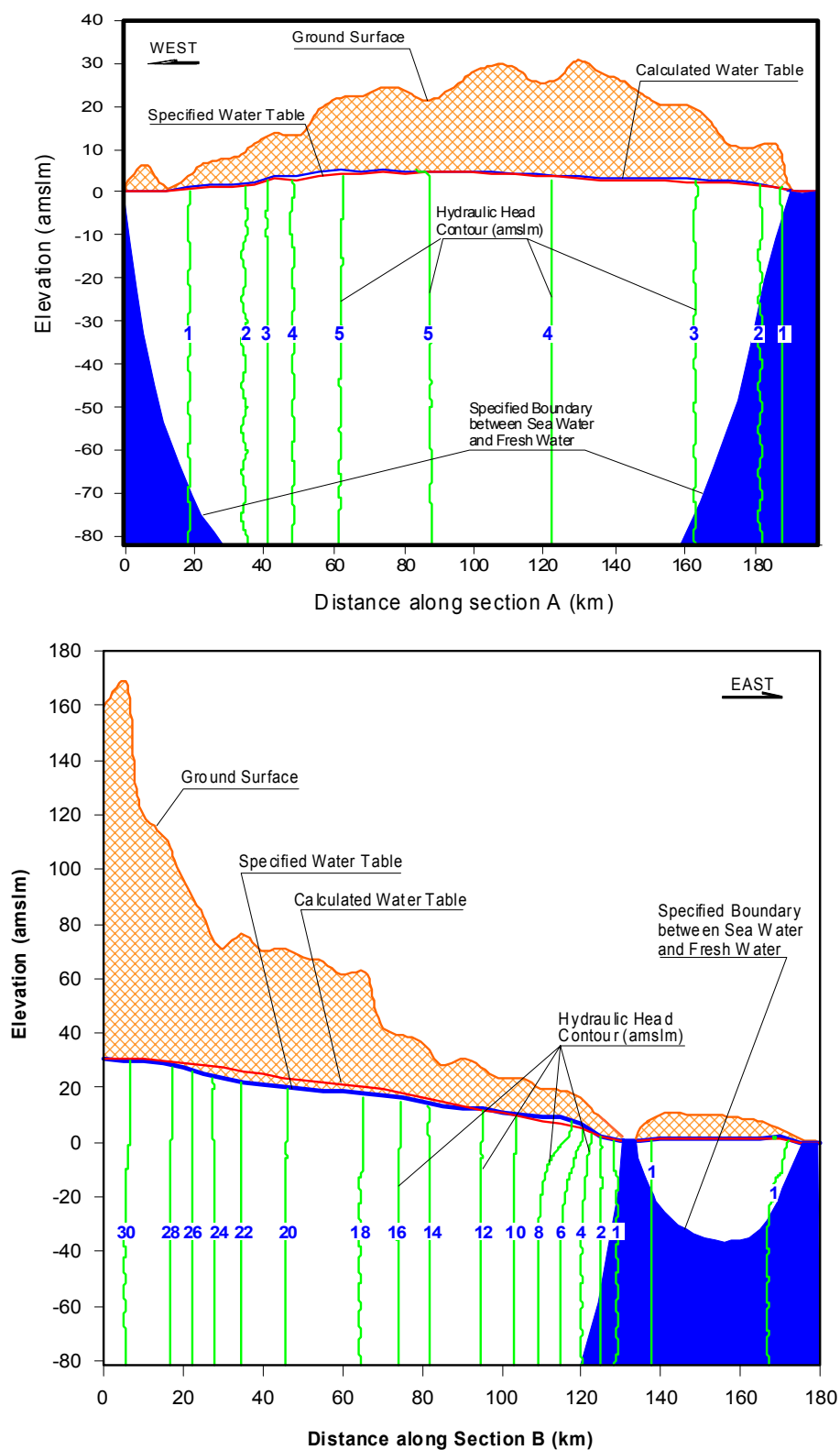


Figura K-35: Secciones Transversales que Muestran la Interfase Salina

K.4.2 Flujo del Agua Inyectada en un Modelo Conceptual

K.4.2.1 Modelo Conceptual

Con la finalidad de entender el flujo de las aguas residuales inyectadas en el acuífero salino se desarrolló un modelo conceptual del agua subterránea. El programa VISUAL MODFLOW que utiliza el método de diferencia finita, simula de manera tridimensional el flujo de las aguas subterráneas y el transporte de contaminantes. Este software fue usado para generar estados estables de las cargas hidráulicas y de concentración de contaminantes para cada parámetro de conductividades hidráulicas de los acuíferos. La concentración en el modelo se representa con mg/l de cloruro, en el cual 1mg/l representa el agua dulce y 100mg/l el agua salina. Sin embargo, el modelo no toma en consideración el flujo de densidad dependiente debido a que se busca simplificar el comportamiento de la pluma de aguas residuales.

a. Modelo de Malla y Pozos de Inyección

El modelo tiene un área rectangular de 2100 m por 2100 m y una profundidad de 300 m. Asimismo se compone de 14 estratos. La elevación de la superficie es de 5 m y el fondo de la catorceava capa es de -295 m. El modelo entero de dominio se divide en 50 filas, 50 columnas y 14 capas. El número total de celdas de diferencia finita es 35,000 como se muestra en la Figura K-36 y Figura K-37.

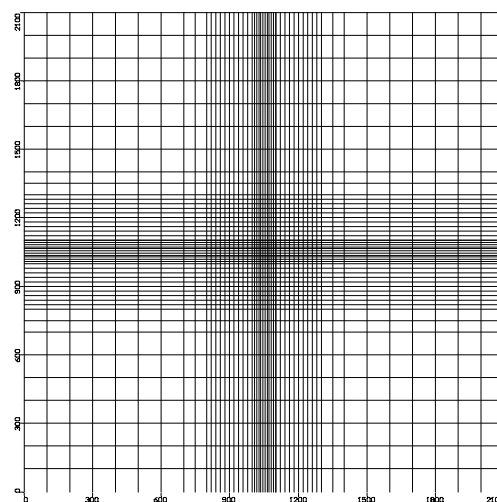


Figura K-36: Celdas de Diferencia Finita en el Plano

La línea costera se ubica en el margen derecho de la malla; en el centro del dominio del modelo se localiza un pozo de inyección. La profundidad del pozo es de 125 m y la parte ranurada se ubica desde los 110 m hasta los 120 m en la décima capa. El agua residual se inyecta en la décima capa en una proporción de 3,880 m³/día (45 l/s).

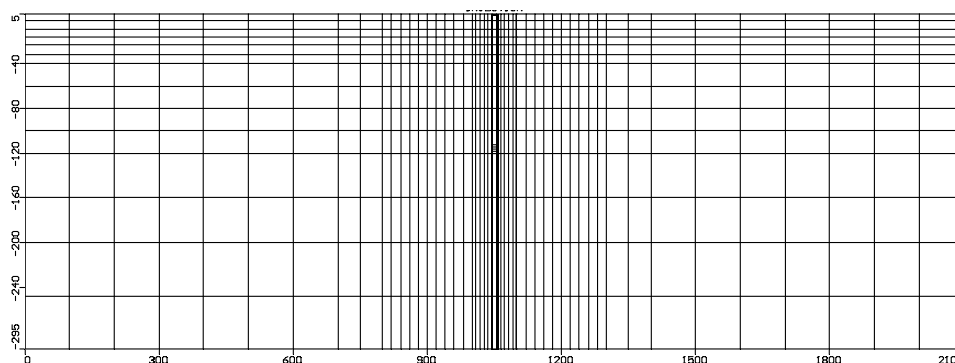


Figura K-37: Celdas de Diferencia Finita en la Sección Transversal

b. Condiciones de límite

b.1 Límite del Modelo de Flujo

Las condiciones de límite del modelo de flujo se muestran de forma esquemática en la Figura K-38. En dirección hacia el continente, en la columna izquierda, la carga hidráulica de 3.0 m se define como el límite constante. Por otra parte, en el área costera, la columna derecha o 0 m (que representa el nivel del mar) se especifica como límite constante. La fila superior y la fila inferior se consideran límites de no-flujo (límite impermeable). El límite de la capa inferior es considerado también límite de no-flujo.

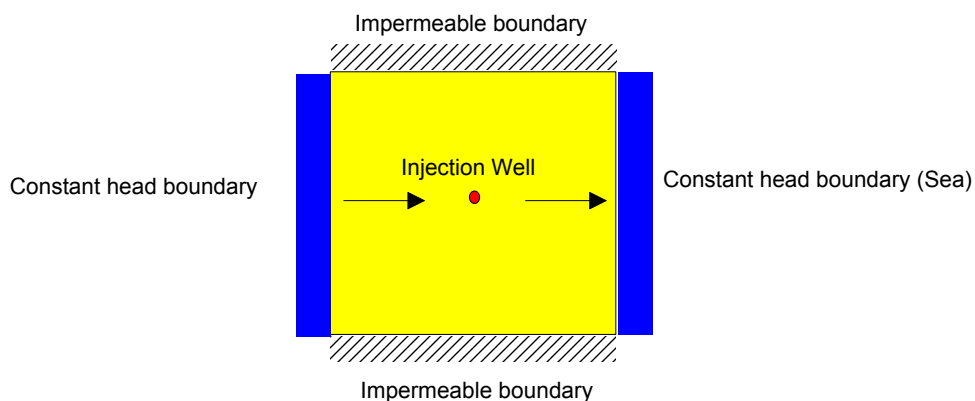


Figura K-38: Condiciones límites del Modelo de Flujo (Plano)

b.2 Límite del Modelo de Transporte

El agua dulce fluye hacia el área del modelo a partir de las cinco capas superiores en la columna izquierda y descarga fuera del modelo en las cinco capas superiores de la columna derecha. Por lo tanto, la concentración constante de 1mg/l se asignó a las primeras capas. Por otra parte, de la capa 6 a la 14, tanto de las columnas a la derecha y a la izquierda se les asignó una concentración de 100mg/l como concentración de agua marina. El límite inferior es un límite de no-transporte como se indica en la Figura K-39.

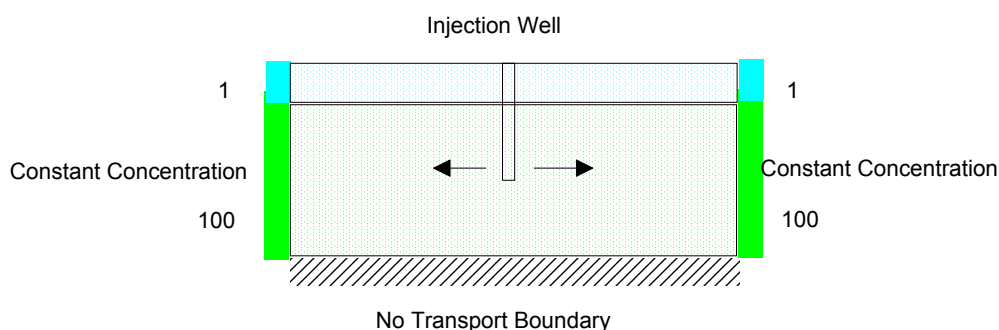


Figura K-39: Condiciones Límites del Modelo de Transporte (Sección Transversal)

b.3 Concentraciones Iniciales

Las concentraciones iniciales del modelo se establecieron en 1mg/l de la primera a la sexta capa y en 10 mg/l de la séptima a la catorceava capa. La concentración del agua inyectada se estableció en 1 mg/l y se mantuvo constante durante el periodo de simulación.

K.4.2.2 Parámetros del Modelo

a. Parámetros de Flujo

Las conductividades hidráulicas del modelo fueron definidas considerando los valores obtenidos del acuífero de piedra caliza de la península de Yucatán (Ver Cuadro 1-1). La combinación de valores de la conductividad horizontal y vertical del modelo de simulación se presenta en el Cuadro K-15.

El almacenamiento específico, rendimiento específico y la porosidad efectiva y total fueron establecidos en $1e-4$, 0.2, 0.15 y 0.15, respectivamente.

b. Parámetros para el Modelo de Transporte

Se asumieron los siguientes parámetros considerando los valores publicados. A la dispersión longitudinal se asignó un valor de 10 mientras que a la relación horizontal a longitudinal y la relación vertical a longitudinal se definió en 0.1 y 0.01 respectivamente. El coeficiente de difusión molecular fue definido en 0.0.

c. Recarga

No se consideró la recarga.

Cuadro K-15: Valores Asignados de Conductividad Hidráulica por el Modelo de Simulación

Simulación		Conductividad Horizontal (m/s)	Proporción Vertical a Horizontal
Modelo 2	Simulación 2-1	0.001	1/10
	Simulación 2-a	0.001	1/20
	Simulación 2-b	0.001	1/40
Modelo 3	Simulación 3-1	0.01	1/10
	Simulación 3-a	0.01	1/20
	Simulación 3-b	0.01	1/50
Modelo 4	Simulación 4-1	0.005	1/10
	Simulación 4-a	0.005	1/20
	Simulación 4-b	0.005	1/40
Modelo 5	Simulación 5-1	0.002	1/10
	Simulación 5-a	0.002	1/20
	Simulación 5-b	0.002	1/40
Modelo G	Simulación- g1	0.001 y 0.01*	1/10
	Simulación-g2	0.001 y 0.01*	1/50

* 0.01 se asignó a la décima capa.

K.4.2.3 Resultados del Modelo

El modelo se usó para evaluar el comportamiento de la pluma de agua residual inyectada al acuífero salino, correspondiente a la 7ma y a la 14va capas. La forma y tamaño de la pluma depende de la configuración de la capa, del flujo y parámetros de transporte, del flujo de inyección y de su continuidad. En este modelo de simulación, los efectos del valor de conductividad hidráulica y su relación vertical/horizontal fueron evaluados al examinar la extensión areal y vertical de la pluma.

a. Efectos de la permeabilidad horizontal

La extensión de área de la pluma de agua residual inyectada en la décima capa se muestra en la Figura K-40. La pluma muestra una forma elíptica y se extiende en dirección del flujo de agua subterránea dirigida hacia el mar. En correspondencia con el incremento de la conductividad horizontal, el ancho de la pluma disminuye en dirección-y y se alarga en dirección- x, mientras que el agua residual se extiende rápidamente en la capa de agua salina. En el caso de conductividad hidráulica baja, el agua subterránea tiene un movimiento relativamente lento y el agua residual tiende a extenderse lateralmente hasta formar una pluma más amplia, la cual llega a ser estable donde el agua residual es inyectada al acuífero a una velocidad constante ya que se compensa con el agua salina o llega al mar o a un acuífero somero y emerge del nivel subterráneo.

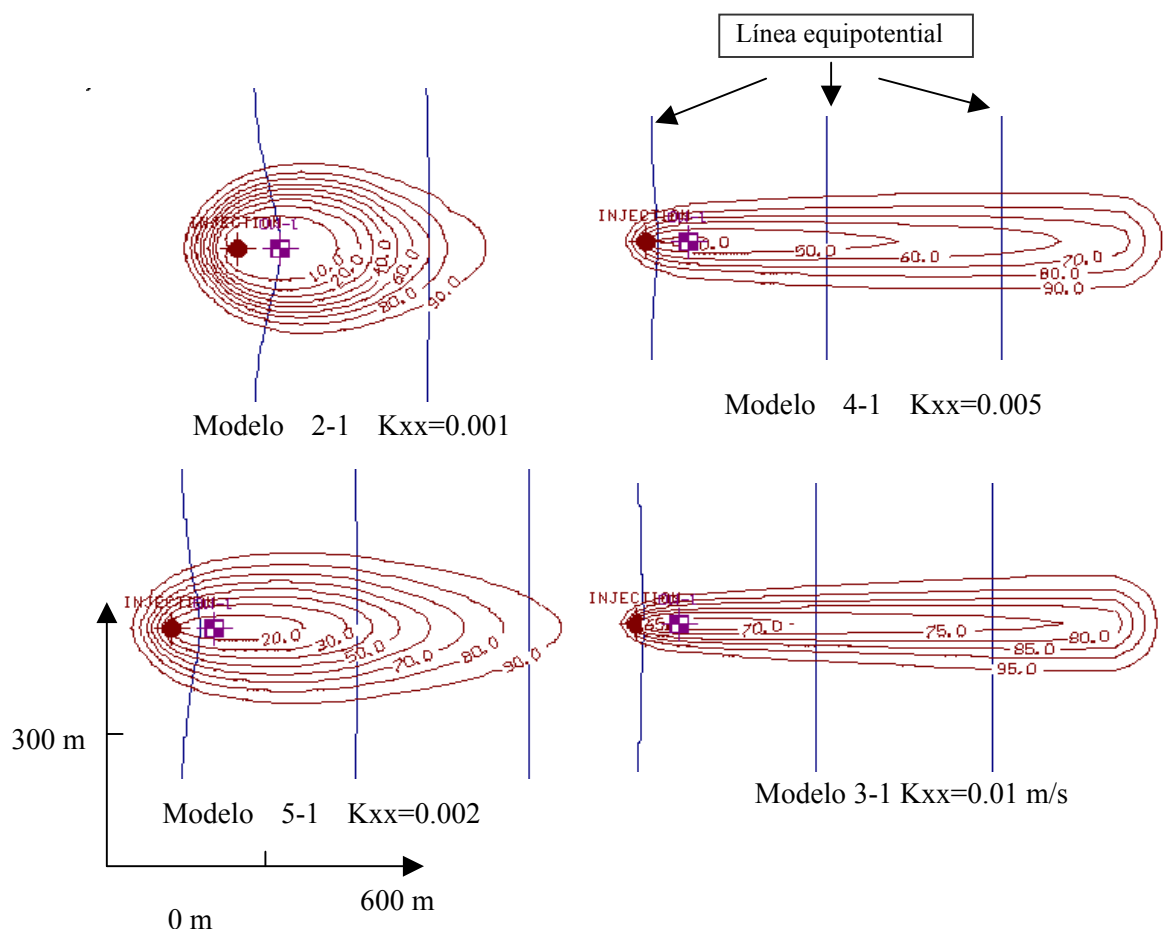


Figura K-40: Extensión Areal de la Pluma de Agua Residual en la Décima Capa

b. Efectos de la proporción de permeabilidad vertical a horizontal

La Figura K-41 indica la vista de sección transversal de la pluma a diferentes proporciones de conductividad vertical a horizontal en el Modelo 2. En el caso de $K_{zz}/K_{xx}=1/10$, la pluma llega ser más espesa y fluye no únicamente hacia el mar sino que también hacia los acuíferos poco profundos. El agua salina es impulsada hacia arriba y el agua residual emerge de los acuíferos donde se realizó la inyección. En el caso de $K_{zz}/K_{xx}=1/20$ y $1/40$, la pluma fluye lateralmente. Sin embargo la zona de transición sufre de perturbaciones debido a que el agua salina es impulsada ligeramente hacia arriba.

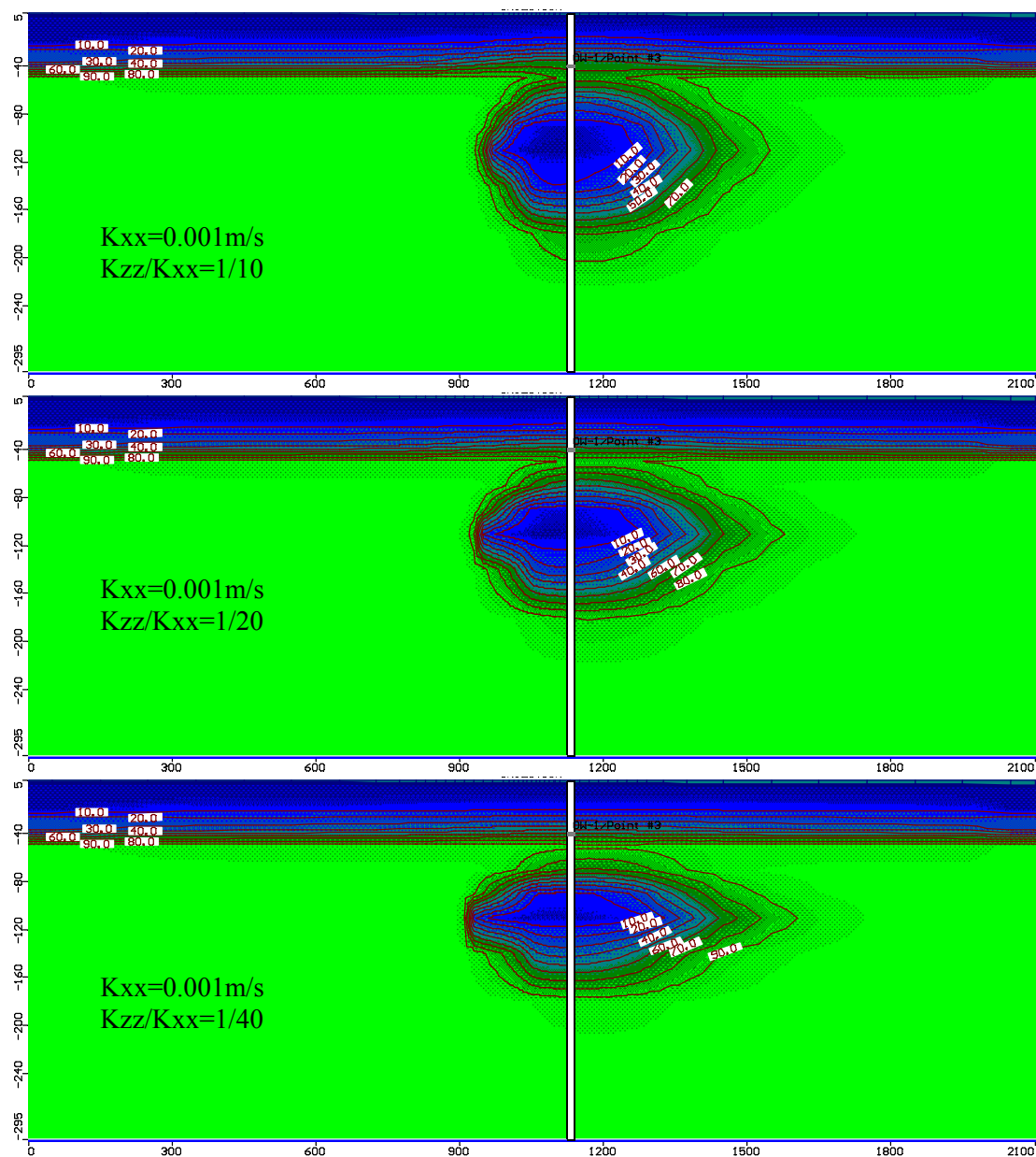


Figura K-41: Vista de la Sección Transversal de la Pluma

c. Efectos de la Capa de Alta Permeabilidad

En la Figura K-42 se muestra un panorama plano y de la sección transversal de la pluma en la capa de mayor permeabilidad. La pluma llega a ser llana cuando la permeabilidad aumenta. En caso que el contraste de permeabilidad entre dos capas, K_{xx1}/K_{xx2} se de 1/10 y $K_{zz}/K_{xx}=1/40$ (figura inferior), la pluma inyectada de aguas residuales no fluye de manera ascendente sino que fluye de manera lateral hacia el mar.

K.4.2.4 Sugerencias del Modelo Conceptual

Los resultados del modelo conceptual de simulación ofrecen sugerencias que aún siendo simples son importantes para la consideración del movimiento de aguas residuales en los acuíferos.

- La pluma de agua residual se mueve de manera lateral y rápida si la permeabilidad de la capa inyectada es mayor que la de las capas superiores y subyacentes. Por lo tanto, es importante conocer la permeabilidad de las capas y decidir cuál va a ser inyectada. La profundidad del punto de inyección debe ser lo más profundo posible y la parte ranurada deberá ser colocada en la capa de mayor permeabilidad subyaciendo la capa de menor permeabilidad
- Es importante conocer la anisotropía de la permeabilidad. El resultado del modelo conceptual indica que la pluma no fluye en dirección ascendente sino que afecta el acuífero poco profundo de agua dulce si K_{zz}/K_{xx} es menor que 1/40 o menos. Esta anisotropía de permeabilidad debe verificarse con las pruebas de campo.

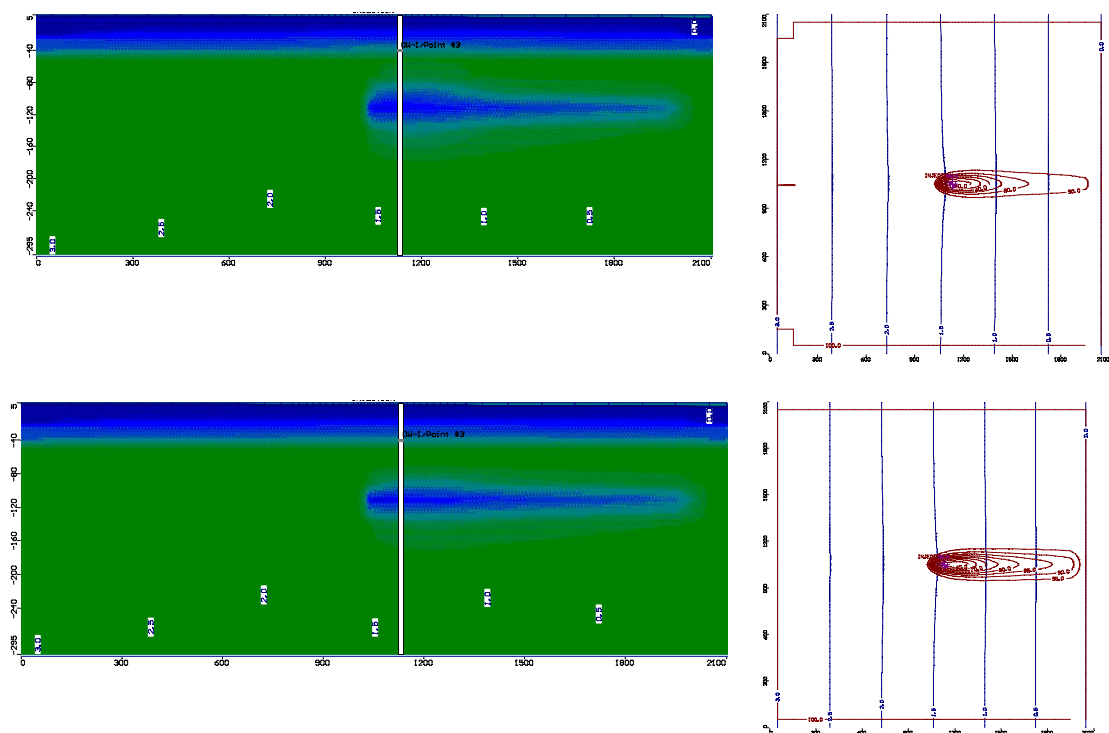


Figura K-42: Movimiento de la Pluma en la Capa de Mayor Permeabilidad

natural como lo representa la precipitación. Por lo tanto, se tornaría útil poder simular el flujo de agua subterránea y el movimiento del agua residual en el acuífero calizo, teniendo en cuenta el régimen de descarga y de recarga con el fin de poder evaluar la disposición de las aguas residuales y establecer una norma de inyección.

K.4.3.2 Flujo del Agua Subterránea y Modelo de Transporte de Solutos

La simulación de la inyección de las aguas residuales en el acuífero salino requiere de la solución parcial de ecuaciones diferenciales que describen “la conservación de masa de fluido” y “la conservación de masa de soluto”. Para simular el movimiento del agua residual, FEFLOW fue utilizado. FEFLOW emplea una aproximación de elementos finitos en dos dimensiones de la ecuación gobernante para el espacio y una aproximación de diferencia finita implícita para el tiempo. En esta simulación, la masa de soluto consiste de agua residual que tendría la densidad del agua dulce. El agua subterránea salina tiene la densidad del agua de mar. Teniendo en consideración este flujo dependiente de la densidad, se desarrolló la simulación de un modelo vertical de dos dimensiones a lo largo de una línea imaginaria perpendicular a la línea costera de Playa del Carmen.

a. Discretización y Condiciones de Límite

El modelo vertical de dos dimensiones, de 4,000 metros de largo y 200 m de profundidad fue discretizado a elementos rectangulares y 95 nodos en la dirección vertical y 1,001 nodos en la dirección horizontal (). Una condición de límite se especifica a lo largo del fondo del nodo a una profundidad de 200 m donde se discretizaron elementos rectangulares y 95 nodos en la dirección vertical y 1,001 nodos en la dirección horizontal (Figura K-46). Una condición de diseño se especifica a lo largo del fondo del nodo a una profundidad de 200 m, donde la caliza se supone impermeable. Un límite de recarga debido a la precipitación se especifica en la parte superior del acuífero. Además, a lo largo del límite costero la presión hidrostática se define de la siguiente manera:

$$p = \rho_s g d$$

donde p es la presión hidrostática, ρ_s es la densidad del agua de mar, g es la aceleración debido a la gravedad, y d es la profundidad. Por lo tanto, la presión en la parte superior del límite se puede considerar como cero y aumenta linealmente con la profundidad.

Las condiciones de límite para la simulación del transporte son dependientes en las condiciones de límite del flujo. Cf/Cs fue definido en 0% en la zona de recarga, donde Cs es la concentración del agua de mar, Cf es la concentración del agua dulce. Por otra parte, Cf/Cs fue definido en 100% en el límite costero.

b. Parámetros

Aunque el acuífero se encuentra bajo mucha presión, por ejemplo, bombeo e inyección, se supone que el bombeo no es factor importante porque el campo de pozos de abastecimiento municipal de agua se encuentra alejado considerablemente de la costa. La tasa de inyección es constante en el tiempo y el acuífero se encuentra en condición de estado constante.

Además, no se ha realizado ninguna medición de los parámetros hidráulicos en Playa del Carmen con excepción de las pruebas de dilución en los pozos de monitoreo. Sin embargo, la estimación de la conductividad por medio de pruebas de dilución no es confiable. Por lo tanto, los parámetros, tales como la conductividad hidráulica, anisotropía de la conductividad, dispersividad, etc. son asumidas, así como los parámetros utilizados en el modelo conceptual mencionado en la sección anterior. Diversos parámetros se muestran en la Figura K-45.

En adición a los parámetros mencionados con anterioridad, los siguientes valores fueron definidos para los calculos: densidad del agua dulce ρ (1,000 kg/m³) , densidad del agua marina ρ_s (1,025 kg/m³) , viscosidad del fluido μ (10⁻³kg/m/s), y el coeficiente de variación de densidad del fluido definido como $\partial C / \partial t$, donde C representa la concentración y t representa el tiempo.

La tasa de inyección de los pozos en la simulación del modelo fue asumida y se estableció como se presenta en la Figura K-45. Se definió una tasa de inyección de 0.1m³/día/m para el pozo de inyección de CAPA. Además, se asumió una tasa de inyección de 0.02 m³/día/m para cada pozo de inyección privado que se incluyó en el modelo vertical asumido.

K.4.3.3 Resultados de la Simulación

La Figura K-46 muestra los resultados de la simulación de transporte por medio de un modelo dependiente de la densidad. La figura superior muestra condiciones de estado constante de flujo, líneas equi-potenciales, interfase entre el agua dulce y la salina, y la dirección del flujo. Como se puede ver en la figura, el agua dulce fluye del interior del continente hacia la costa, mientras que el agua salina fluye desde la costa hacia el interior continental. Cerca de la costa, el agua salina fluye hacia arriba y retorna hacia la costa, lo anterior tiene lugar debido a la diferencia en densidades entre el agua dulce y la salina. En la zona de transición, la dirección del flujo se torna más complicada; el agua dulce fluye hacia abajo mientras que la salina fluye hacia arriba.

El espesor del agua dulce varía entre 50 m y 70 m, a una distancia de aproximadamente 2.0 y 4.0 km de la costa, respectivamente. Dicho valor es superior al valor real. Lo anterior se debe posiblemente a las diferencias en densidades que se le asignó al modelo y la densidad

verdadera. Sin embargo, prácticamente el comportamiento del agua inyectada puede ser examinada comenzando por las condiciones de estado constante definidas y establecidas como condiciones iniciales del modelo.

Tiempo después que tiene lugar la inyección de aguas residuales, el flujo y el transporte de masa alcanzan el equilibrio como se muestra en la figura de abajo. Como se puede ver en dicha figura, el agua residual inyectada fluye hacia arriba en el pozo de CAPA; el flujo tiene lugar casi de manera vertical. Posteriormente, fluye de manera horizontal a áreas gradiente abajo y arriba. Se torna interesante que el agua residual circula en el fondo del pozo. De hecho, se puede observar que parte del agua residual fluye hacia abajo del fondo del pozo y luego hacia arriba. Es obvio que el agua residual finalmente fluye hacia la parte del acuífero que contiene agua dulce y, posteriormente, descarga en la zona costera en caso que no exista una capa impermeable que separe al acuífero que contiene el agua dulce, aún tomando en cuenta alguna anisotropía de la conductividad hidráulica. En consecuencia, se sugiere que el agua residual sea inyectada en el acuífero sub-yacente bajo una capa impermeable y que la tubería ranurada sea colocada tan profundo como sea posible.

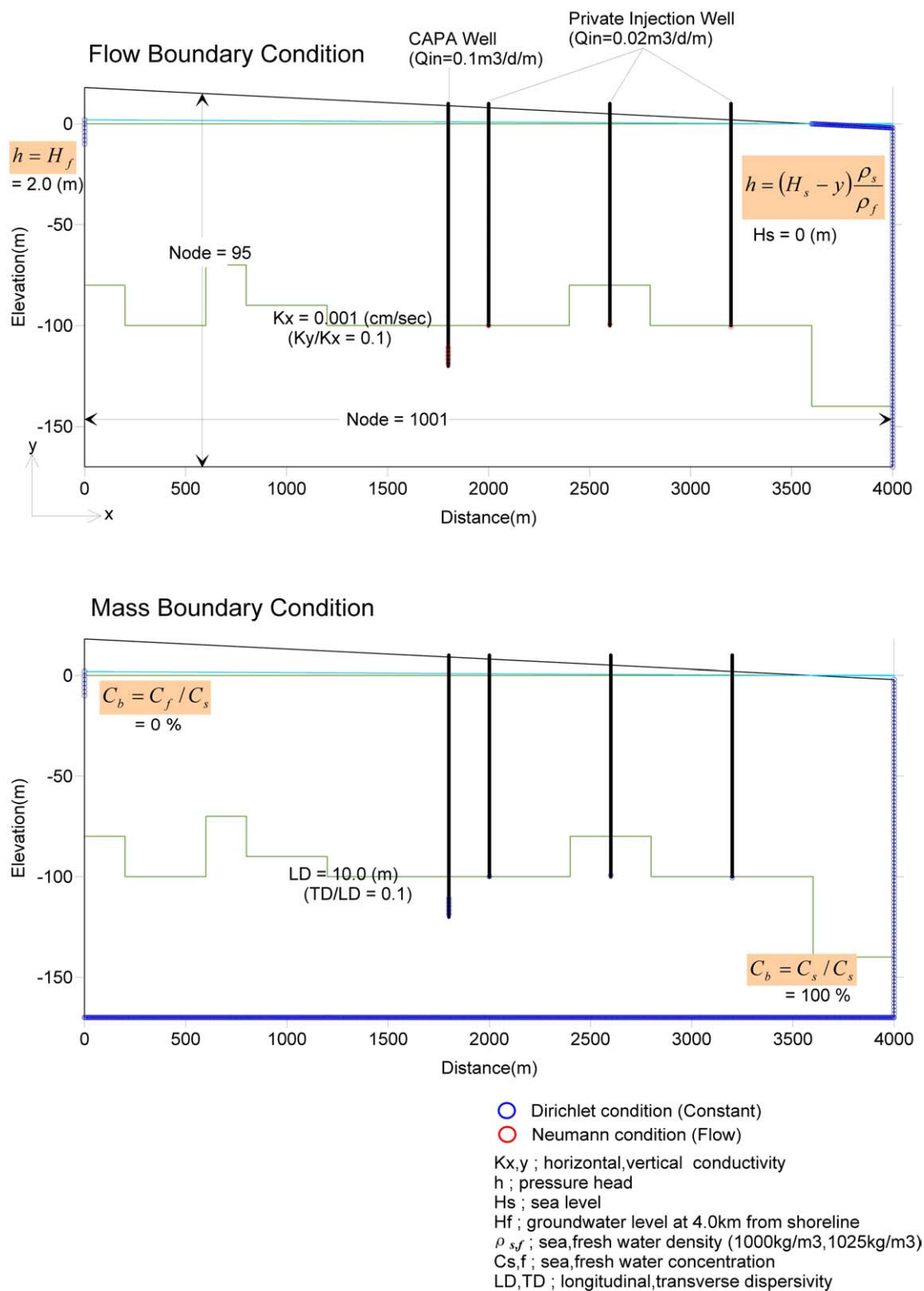


Figura K-45: Parámetros y Condiciones de Límite para el Modelo

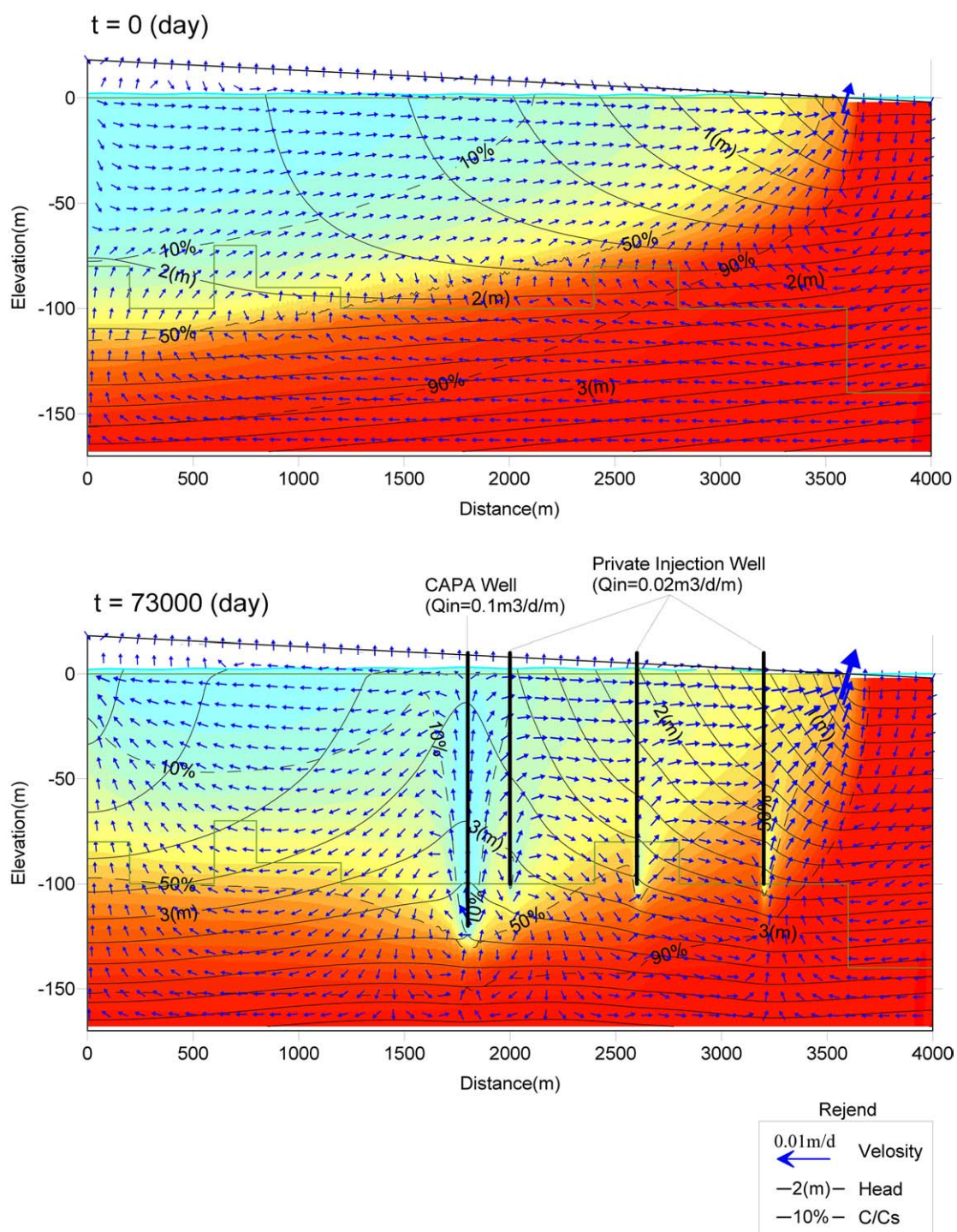


Figura K-46: Resultados de la Simulación de Flujo Dependiente de la Densidad

K.5 Resumen y Recomendaciones

K.5.1 Resumen del Estudio Hidrogeológico

K.5.1.1 Distribución y Características del Acuífero Calizo

1) La geología sub-terránea del área de estudio puede ser dividida en 3 capas de resistividad, en otras palabras, U1, U2, y U3; dicha denominación puede considerarse que va desde la superficie hasta la parte inferior que alcanza este estudio, ubicada a unos 200 m de profundidad. Las capas de resistividad se encuentran ampliamente distribuidas en el área de estudio.

2) La capa U1 tiene un espesor que va desde la superficie hasta una profundidad entre 20 – 25 metros. Esta capa esta compuesta de calizas de arrecife y arenisca calcárea. Esta formación es abundante en fracturas y cavidades y se torna en un acuífero de agua fresca si tenemos en cuenta el valor registrado de 3,000 μ S/cm de conductividad eléctrica. La velocidad de perforación de esta capa resultó en 40 seg/25cm en la zona de fractura. Sin embargo, dicha zona de fractura también se intercala con un lecho de piedra caliza dura que reflejó una velocidad entre 200~400seg/25cm.

2) La capa U2 está compuesta de calizas, fracturas abundantes, y cavidades producidas por un alto desarrollo cárstico. La resistividad de dicha capa es menor a 4 Ω m. Las fracturas y las cavidades se encuentran saturadas con agua de mar y dicha capa constituye lo que se considera el acuífero de agua de mar. La conductividad eléctrica va de 5,000 hasta 20,000 μ S/cm en la zona de transición mientras que se observó un valor mayor a 40,000 μ S/cm en la zona de agua marina. El espesor de la capa es de aproximadamente 50 m. La velocidad de perforación es igual a la experimentada en la capa U1. Además, parcialmente se intercala con un lecho de calizas duras.

4) La capa U3 está compuesta de calizas o calizas lodosas que presentan una resistividad cuyo rango va de 4 hasta 100 Ω m. Las facies de la capa de baja resistividad (4~ 25 Ω m) varían de lugar en lugar y consisten de una alternancia entre calizas duras y fracturadas. La capa de alta resistividad (más de 25 Ω m) no presenta mucho desarrollo cárstico y se encuentra compuesta principalmente de calizas lodosas algo duras. Esta alta resistividad se distribuye desde los 60 hasta los 110 m en el área de estudio. La perforación realizada en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) encontró la capa en mención a una profundidad de 62 m (Perforación P4). Esta capa es compacta y dura; la que representa un basamento hidrogeológico permeable o semi-permeable en el área de estudio. Las velocidades de perforación varían entre 400 y 1,200 seg/0.25m.

- 5) El nivel del agua subterránea en los sitios perforados varía entre 4 y 8 m bajo el nivel del terreno. El espesor del acuífero de agua dulce es de alrededor de 20 m, sin embargo, aumenta a más de 40 hacia el interior de la parte continental de acuerdo con el estudio geofísico. La presencia de agua salina bajo el agua dulce se observa a todo lo largo hacia el interior de la parte continental
- 6) De acuerdo con las pruebas de dilución, el rango estimado del coeficiente de permeabilidad en las capas U1 y U2 varía entre 1.1 y 22.0 cm/seg.

K.5.1.2 Comportamiento de la Pluma de Agua Residual

- 1) El inventario de pozos de inyección de la CNA muestra que el número de pozos en el municipio de Solidaridad es 184 con base a las notificaciones. El volumen diario de inyección alcanza 73,051 m³, lo que conlleva a tener aproximadamente un promedio de 397 m³/día por pozo.
- 2) El agua residual tratada está siendo inyectada en el pozo de inyección de CAPA en la PTAR de Playa del Carmen a una tasa de 3,880 m³ por día (45 l/s). Además del pozo antes mencionado, existe otro pozo de inyección que es utilizado para inyectar una cantidad una agua residual sin tratar que equivale al excedente de la capacidad de tratamiento de la PTAR. Se ha definido, en general, que la profundidad de estos pozos alcanza los 100 m. Sin embargo, no existen los registros de las perforaciones de los pozos. En general, si se consideran las condiciones geológicas de la PTAR, se puede inferir que el agua residual está siendo inyectada en la capa U2.
- 3) Casi todos los pozos de inyección en el área de estudio tienen sus tuberías ranuradas en la capa U2 (acuífero del agua salina), la misma situación debe ocurrir para los de la PTAR, tomando en consideración las condiciones geológicas. Por otra parte, no existe ninguna capa impermeable significativa entre la capa U2 y la capa sobreyacente U1 (acuífero de agua dulce). En consecuencia, se infiere que el agua residual migra hacia estratos superiores que contienen agua dulce. Además, el agua residual inyectada podría también fluir dentro del espacio anular hacia el acuífero de agua dulce, teniendo en cuenta que el pozo no se encuentra sellado.
- 4) Un modelo de transporte de masa que simule el comportamiento de la pluma de aguas residuales muestra que si la permeabilidad en la zona de inyección es mayor que las capas sobre-yacentes y subyacentes, entonces dicha pluma migra rápidamente en la dirección horizontal dentro del acuífero de agua salina. Por lo tanto, es importante conocer primero la permeabilidad de la capa en la que se inyectara y las capas adyacentes. La zona de inyección

debería ubicarse a la mayor profundidad posible y la tubería ranurada debería colocarse por debajo de la capa de baja permeabilidad.

5) También, es de mayor importancia conocer la anisotropía de la permeabilidad en la capa. Los resultados de la simulación sugieren que si la proporción entre la permeabilidad vertical y la horizontal es menor que 1/40, entonces la pluma de aguas residuales no fluiría hacia capas superiores ni tampoco afectaría el acuífero de agua fresca sobre-yacente.

6) De acuerdo con el modelo de flujo dependiente de la densidad, en el caso que la inyección se haga en un pozo construido a una profundidad de 100 m, entonces la pluma de agua residual inyectada en el acuífero de agua salina migraría hacia estratos superiores y afectaría el agua dulce.

K.5.1.3 Calidad del Agua y Contaminación

1) La calidad del agua subterránea en los pozos de monitoreo muestra que es agua tipo (Na+K)-Cl. La concentración de cloruros de los pozos de monitoreo instalados en el acuífero de agua dulce muestra que dicho valor se encuentra en el rango entre 600 y 1,800 mg/L. Lo anterior conlleva a concluir que se encuentran afectados por el agua de mar. Por otra parte, la concentración de cloruros en los pozos de monitoreo instalados en acuífero de agua de mar varía entre 11,400 y 11,800 mg/L. De lo antes expuesto, se infiere que dicha agua es una mezcla con agua dulce que se encuentra en acuíferos más someros, la mezcla se puede producir debido a que el pozo se construyó con tubería ranurada a todo lo profundo.

2) Al comparar la calidad del agua de los pozos de monitoreo con los valores guías para agua potable de la OMS, los valores de los parámetros Cl, Na y SDT exceden dichos valores guías en todos los pozos. Además, se encontró una alta concentración de NH_4 en los pozos de monitoreo de la PTAR; estos pozos podrían haberse contaminado como resultado de la inyección realizada por el pozo ubicado apenas gradiente arriba del lugar de monitoreo. Por otro lado, los pozos de monitoreo de la Colonia Ejidal, que es un área no cubierta con el sistema de alcantarillado, presenta altas concentraciones de NH_4 lo anterior indica cierto grado de contaminación como resultado de las actividades humanas. Además, se presentaron altas concentraciones de SO_4 en los pozos de monitoreo de la PTAR.

3) No se detectó contaminación de tricloroetileno ni de minerales pesados.

K.5.2 Recomendaciones

K.5.2.1 Necesidad de Establecer una Norma de Inyección

El abastecimiento municipal de agua potable en los 3 municipios del área de estudio se basa casi exclusivamente en las extracciones de los campos de pozos; los campos en mención se

encuentran en las áreas continentales al interior, aproximadamente a 15-40 km de la zona costera. Las áreas aledañas a los campos de pozos son en la actualidad bosques, pastizales y tierras agrícolas; debido a lo anterior los pozos no han sido contaminados todavía. Sin embargo, el agua subterránea podría ser contaminada en el futuro cercano debido a las descargas de aguas residuales domésticas hacia los Cenotes y como resultado de escorrentía superficial que arrastra fertilizantes y pesticidas, etc. Además, podrían existir una cantidad no especificada de cavernas en esta área; lo anterior conllevaría a crear un flujo preferencial a través de dichas cavernas y el acuífero en dirección al área que se encuentra gradiente abajo.

Por otra parte, el agua residual está siendo inyectada hacia el sub-suelo en el área de la zona costera urbana. En el área de Playa del Carmen, se encuentra una formación caliza lodosa, la que se encuentra ampliamente extendida a una profundidad entre 60 y 110 m. Por lo tanto, el agua residual está siendo inyectada hacia el acuífero calizo sobre-yacente (acuífero salino) que es abundante en fracturas y cavidades. Habría que mencionar que no se pudo establecer la presencia de una capa semi-permeable o impermeable entre el acuífero salino y el acuífero de agua dulce; por lo tanto, la pluma de agua residual inyectada se mueve relativamente fácil hacia las partes superiores y podría contaminar el acuífero de agua dulce.

La estructura del pozo de inyección es simple en la actualidad porque no se ha establecido una norma para pozos de inyección. Teniendo en cuenta que existe una gran cantidad de fracturas y cavidades en las rocas calizas, el espacio anular del pozo (espacio establecido entre la pared del pozo y el ademe) no se ha previsto que sea sellado con cemento y arcilla (por ejemplo, bentonita). En consecuencia, el agua residual podría filtrarse a través de dicho espacio anular y contaminar el acuífero de agua dulce.

Como se mencionó con anterioridad, la contaminación del agua subterránea en lo que se define como acuífero de agua dulce se encuentra avanzando en las áreas urbanas costeras como resultado de la inyección de aguas residuales. Además, teniendo en cuenta que el agua subterránea es finalmente descargada en la zona costera, el medio ambiente de agua salina podría contaminarse en el futuro. En el futuro cercano, el sistema de alcantarillado será desarrollado de acuerdo con el plan maestro propuesto en este estudio. Sin embargo, podría tomar algún tiempo hasta que el área urbana se encuentre completamente cubierta por el sistema de alcantarillado. Mientras tanto, la inyección de agua residual deberá continuar en correspondencia con lo realizado hasta el momento. Por otra parte, con el propósito de reducir la carga contaminante hacia el medio ambiente, es necesario establecer una norma de inyección y esta inyección debe ser controlada adecuadamente.

La siguiente sección presenta las recomendaciones sobre los aspectos a ser considerados para el establecimiento de una norma de inyección.

K.5.2.2 Zona de Inyección

El agua residual debería ser inyectada en una formación subyacente a la formación encontrada a mayor profundidad y que está caracterizada por lodos, una capa densa y dura que se considera es una capa confinante impermeable o semi-permeable. La zona de inyección, por el contrario, debe ser lo suficientemente permeable, porosa y gruesa para aceptar agua residual inyectada a la tasa de inyección propuesta, sin necesidad de requerir presión excesiva. Idealmente, la zona de inyección debería ser homogénea, debería tener la suficiente extensión de área para minimizar el aumento de la presión y prevenir que el agua residual fluya hacia capas superiores donde se encuentra el acuífero de agua dulce. En el caso que exista dicha zona de inyección, el agua residual podría ser contenida en la estructura geológica.

En el área de estudio, la parte de alta resistividad de la capa U3 (calizas lodosas) que se encuentra subyacente entre 60 y 110 m es semi-permeable o impermeable y cumple con las condiciones antes mencionadas. Sin embargo, la presencia de una capa porosa y permeable subyacente a la capa U3 no ha podido ser confirmada. Si existe una capa o lecho calizo permeable y poroso bajo o dentro de la capa U3, debería ser utilizado como zona de inyección. En el caso antes mencionado, la profundidad del pozo de inyección llegaría a alcanzar más de 200 m y los costos de perforación se podrían duplicar o tornarse más caros. Este aspecto debería de ser analizado/discutido en mayor detalle, en especial lo relacionado a los costos para la expansión del sistema de alcantarillado.

K.5.2.3 Estudio Geológico Regional para la Selección de la Zona de Inyección

Con el propósito de seleccionar una zona apropiada de inyección, el estudio geológico regional debería ser realizado en las áreas urbanas de los 3 municipios del área de estudio. El estudio debería consistir de los siguientes aspectos:

1) Recopilación de datos, arreglo y mapeo hidrogeológico

Datos e informes del estudio geológico, trabajos de perforación, nivel del agua subterránea y calidad del agua, etc. deben ser recopilados y arreglados. Es aconsejable que las compañías perforadoras asistan en la recopilación de datos. Con base en dichos datos, el mapa hidrogeológico de cada área urbana deberá ser preparado.

2) Estudio Geofísico

El estudio geofísico debe ser realizado para explorar la estructura de la resistividad y la interfase salina entre el agua dulce y la salina para cada área urbana. El método TEM de exploración debe ser realizado para hacer sondeos a profundidades mayores a los 400m. En Playa del Carmen, el perfil de resistividad a 200 m de profundidad fue confirmado; por lo

tanto, un estudio suplementario debería ser realizado para explorar la estructura de la resistividad a profundidades mayores a los 400 m.

3) Perforación y Registro Exploratorio

Con base en el arreglo de los datos existentes (mapas hidrogeológicos) y los resultados del estudio geofísico, se deben realizar perforaciones exploratorias en cada área urbana para investigar la velocidad de perforación, resistividad, potencial espontáneo de las formaciones, temperatura y conductividad eléctrica del agua subterránea, etc. La meta de perforación es de 400 m. Las facies y las características de las calizas son confirmadas por medio de la observación de los testigos y los registros geofísicos. La profundidad y extensión de área de la zona de inyección más adecuada se confirma por medio del análisis de las características de las rocas en comparación con la resistividad de la capa. La prueba *in-situ*, como la prueba de permeabilidad, se lleva a cabo y, posteriormente, son definidos los coeficientes de permeabilidad y la porosidad de la formación.

La profundidad y la ubicación del pozo de inyección para cada área urbana se estandariza de acuerdo con el análisis de los resultados del estudio geológico antes mencionado.

K.5.2.4 Estructura y Construcción del Pozo de Inyección

El pozo de inyección debe ser diseñado y construido de manera tal que no permita que ningún fluido escape del flujo de inyección o que ningún fluido migre dentro de la perforación hacia el acuífero de agua dulce.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los E.E.U.U. está implementando un programa denominado “Control de Inyección Subterránea” denominado UIC por sus siglas en inglés; dicho programa clasifica los pozos en 5 categorías. La Figura K-47 muestra el diseño idealizado del pozo de inyección, utilizando como ejemplo un pozo de inyección Clase I de acuerdo con la UIC. En el pozo Clase I se pueden inyectar aguas residuales municipales, residuos peligrosos, y líquidos industriales no-peligrosos. Para el caso de aguas residuales peligrosas, el ademe del pozo se triplica, en otras palabras, se considera un ademe superficial, el ademe del pozo, y la tubería de inyección; dichos ademes se encuentran adecuadamente cementados en la parte externa. El empaque se coloca en el fondo de la tubería.

En el programa UIC, la zona de inyección se define como la formación subyacente del acuífero más profundo de agua dulce (Fuente Subterránea de Agua Potable: USDW por sus siglas en inglés).

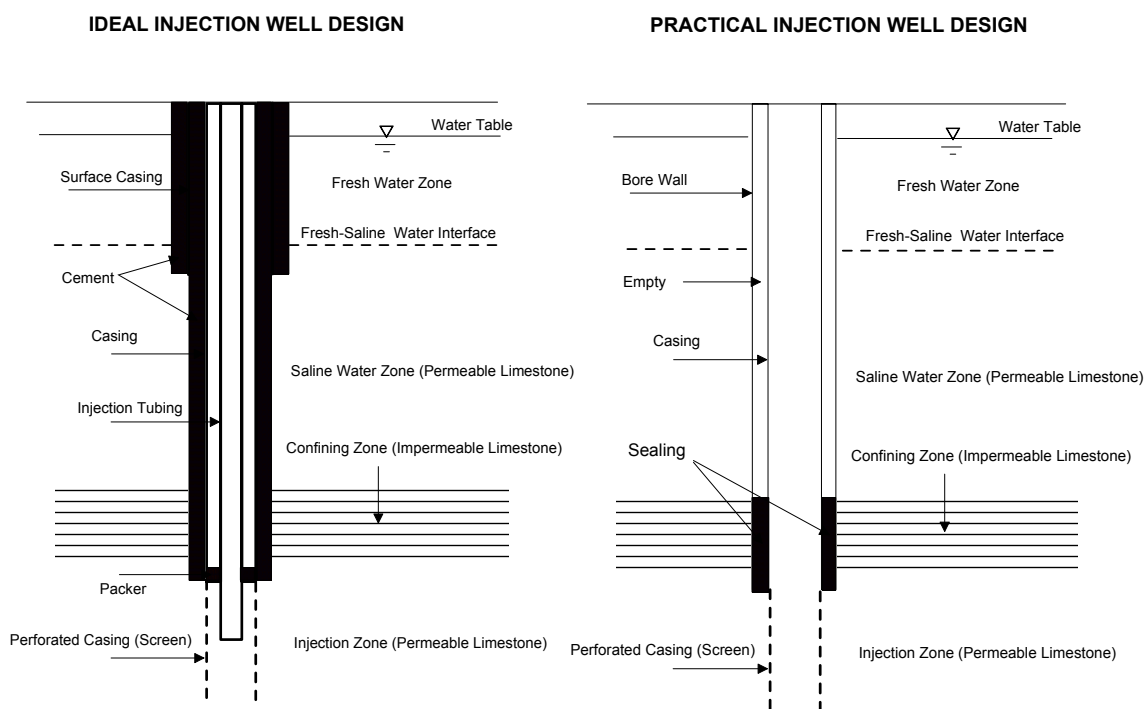


Figura K-47: Diseño del Pozo de Inyección (izquierda: diseño ideal, derecha: diseño práctico)

Además, la Figura K-47 muestra el diseño práctico del pozo de inyección. El mismo ha sido diseñado simple y práctico teniendo en cuenta las condiciones geológicas y el uso del agua subterránea en el área de estudio. Es muy importante colocar la tubería ranurada en una zona porosa y permeable que se encuentre bajo una capa impermeable confinante. Si la capa subyacente inferior que se ubica sobre la zona de inyección es permeable, el agua residual inyectada muy posiblemente migraría hacia capas superiores, a pesar del sello de cemento alrededor del ademe.

Además de la migración del agua residual dentro del acuífero después de la inyección, existen otras dos posibles fallas en los pozos que podrían causar filtraciones del mismo. Una de ellas es la filtración a través de un orificio en el ademe y el otro es movimiento del fluido dentro del espacio anular. El ademe raramente es dañado; sin embargo, existe la posibilidad de que eso ocurra cuando se coloca inapropiadamente dentro de la perforación. Con el propósito de evitar dicho daño, el tipo de material y espesor del ademe debe ser cuidadosamente seleccionado y las tuberías deben ser almacenadas y utilizadas apropiadamente. En el espacio anular del pozo, se debe colocar suficiente cemento con el fin de evitar que ocurra un puente y cavidades en el espacio anular.

En el área de estudio, las capas de calizas (U1 y U2) presentan gran cantidad de fracturas y cavidades, dichas ocurrencias se distribuyen extensamente en el sub-suelo a una profundidad entre 60 y 110 m. Sin embargo, es casi imposible sellar el espacio anular porque el cemento es arrastrado dentro de dichas cavidades en las formaciones antes mencionadas. Teniendo en

cuenta esta situación, se diseña sin ningún tipo de sello en la formación superior como se muestra en la Figura K-48. Si existiese una capa semi-permeable o permeable bajo la capa permeable, para el propósito de la inyección, debería existir una capa permeable bajo la capa confinante. El sello debería ser colocado en la zona de la capa confinante.

De hecho, es muy difícil sellar la sección anular de la perforación. Las compañías perforadoras deberán llevar a cabo un taller sobre los materiales y métodos de construcción de los pozos de inyección bajo la guía de la CNA, evaluarlos, consensuarlos, y proceder a establecer un método estándar de construcción.

La Figura K-48 muestra el diseño conceptual del sello por medio del uso de un empaque. En la parte derecha de la Figura K-48 se muestra el material de empaque.

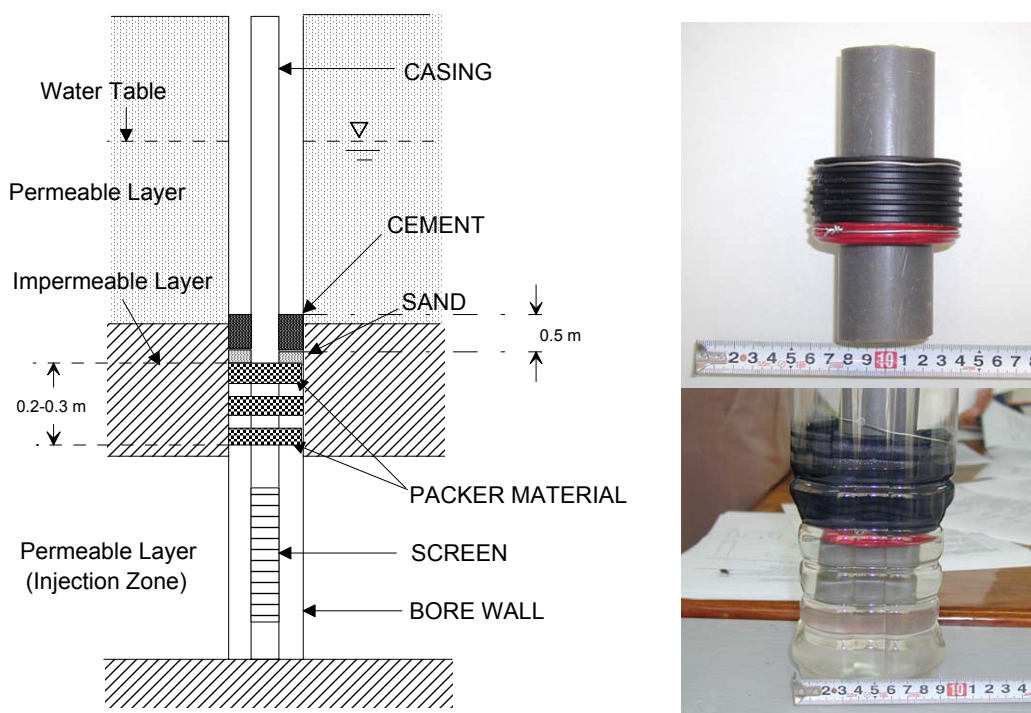


Figura K-48: Sello con Empaque (izquierda) Material de Empaque (derecha)

El material de empaque está hecho de éster de ácido acrílico y caucho sintético. Se incha cuando absorbe agua como se muestra en la foto. El material de empaque envuelve la parte superior de la tubería ranurada en tres pasos y es colocada en la parte superior del límite entre la zona de inyección y la capa impermeable. Uno o dos días posterior a la instalación del ademe, la parte superior del empaque se llena con arena y cemento.

La Figura K-49 (izquierda) muestra el diseño conceptual del sello por medio del uso de una canasta metálica. La Figura K-49 muestra un ejemplo de una canasta metálica hecha a mano de pequeño diámetro.

La canasta metálica fue originalmente utilizada para monitorear por medio de pozos asentamientos del terreno en Niigata, Japón con el propósito de medir el nivel estático del agua de un acuífero específico en acuíferos de capas múltiples. Se cree que este concepto de canastas metálicas es aplicable para los pozos de inyección en el área de estudio.

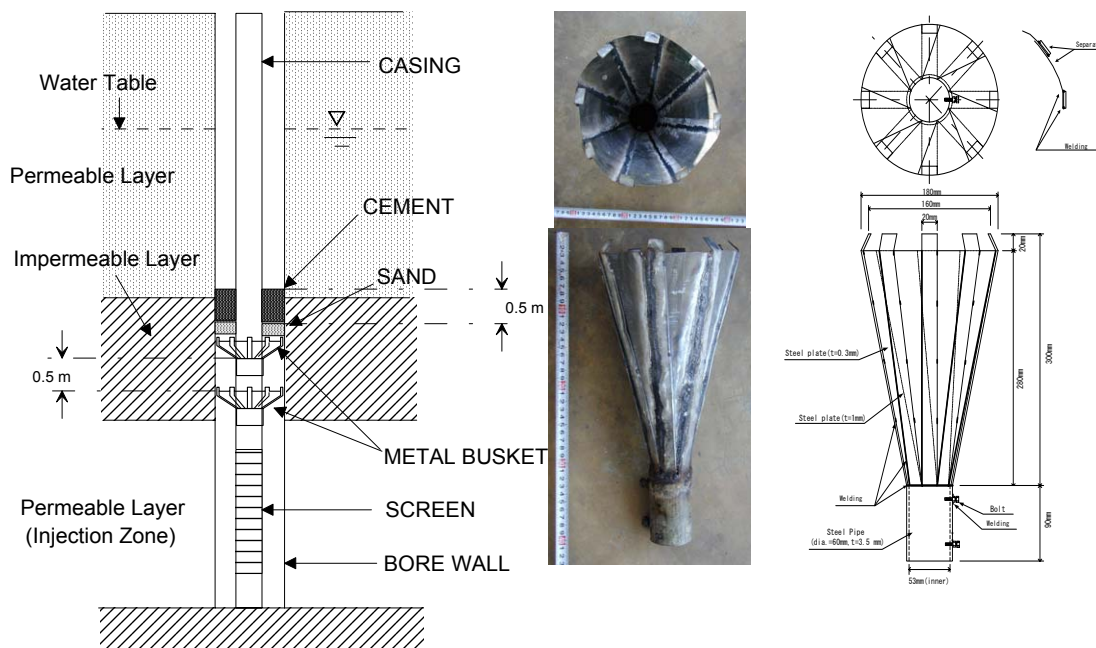


Figura K-49: Sello con Canasta Metálica tipo Pétalo (izquierda) y Canasta Metálica (derecha)

Las dos canastas metálicas son instaladas en la parte superior de la tubería ranurada a un intervalo de 0.5 m y colocadas en la zona impermeable. Hojas de coco o una red es extendida sobre la canasta y se llena su interior de arcilla. La canasta de metal se abre como pétalos dentro de la perforación y evita que pase arena y cemento con el que se ha rellenado la parte superior de la canasta. La zona de relleno de arena y cemento se define al considerar el espesor de la capa impermeable.

K.5.2.5 Operación, Manejo y Monitoreo

Primeramente, se debe notificar a la CNA sobre la necesidad en la actualidad de un pozo de inyección. Los detalles de la notificación deben incluir el nombre del dueño, código del pozo, ubicación del pozo (asiento) y la tasa propuesta de inyección, etc. Sin embargo, la estructura del pozo (profundidad, diámetro, material del ademe, ubicación de la tubería ranurada, sello, etc.), la columna geológica, calidad del agua inyectada, etc. no son registrados. Además, bajo un régimen flexible, no se obliga a la elaboración de informes sobre la operación y mantenimiento de los pozos autorizados. En este sentido, la CNA debería inmediatamente establecer un sistema para la elaboración de informes y de monitoreo de la operación y

manejo de los pozos de inyección; así como el establecimiento de una norma relacionada a la zona de inyección, estructura del pozo, tasa de inyección, calidad del agua inyectada, etc.

1) Operación y Mantenimiento

La CNA debería obligar al dueño del pozo como a manera de responsabilidad llevar un registro sobre la presión de inyección (en caso de inyección por gravedad, deberá reportarse el nivel del agua), la tasa de inyección, y el volumen total de inyección. Además de todo lo anterior, el dueño del pozo deberá trimestralmente registrar el resultado de los análisis de los parámetros físicos, químicos y biológicos asociados al agua inyectada.

2) Informe e Inspección

La CNA debe recibir un informe del dueño del pozo cada tres meses y realizar inspecciones en el sitio para la operación y el manejo del pozo de inyección, en caso que sea necesario. Con el propósito de abrir el camino para la inspección y la provisión de directrices sobre el mejoramiento de las instalaciones de inyección, se debe mejorar la operación y el manejo, el sistema legal e institucional, así como debe establecerse una norma de inyección.

3) Clausura del Pozo

Una vez clausurados los pozos de inyección, el dueño debe entregar un informe sobre sello y abandono del pozo, dicho informe indicaría que el pozo fue sellado en concordancia con la norma y regulaciones que serán puestas en vigor por la CNA en el futuro. Al clausurar el pozo, el mismo debe ser limpiado con un flujo intenso de fluido no-reactivo. Cada tapón de cemento debe ser probado como sello con anterioridad a la finalización de la clausura.

4) Red de Monitoreo

La CNA estableció una red de monitoreo de agua subterránea en el área norte de la Península de Yucatán, limitado por la línea imaginaria que va de Cancún a Mérida. Dicha red debe expandirse a las áreas urbanas en el área de estudio. Los pozos de monitoreo que han sido construidos en Playa del Carmen, como parte del proyecto modelo, deberán ser incorporados a esta red.

Además de esta red, deben de construirse pozos de observación profundos en las áreas urbanas con el fin de monitorear la calidad del agua y los niveles del agua en el acuífero que se ubica sobre la zona de inyección; lo anterior deberá realizar, de manera especial, una vez que se establezca una norma de inyección y el agua residual sea inyectada en un acuífero a mayor profundidad que la capa U2, con vistas hacia el futuro.

Capitulo L

Tratamiento de Aguas

Residuales Tipo Villa

Contenido

Página:

L	Tratamiento de Aguas Residuales Tipo Villa.....	L-1
L.1	Generalidades	L-1
L.2	Trabajos de conexión al interior de la vivienda.....	L-5
L.2.1	Concepto	L-5
L.2.2	Selección de Usuarios para el Proyecto Modelo	L-7
L.3	Evaluación Previa de las Instalaciones de Tratamiento.....	L-8
L.3.1	Generalidades de la Planeación	L-8
L.3.2	Evaluación del Diseño de la Instalación.....	L-10
L.4	Implementación	L-15
L.4.1	Trabajos de Conexión Intra domiciliaria	L-15
L.4.2	Instalación de Tratamiento de Aguas residuales	L-16
L.5	Resultados	L-21
L.6	Evaluación	L-22
L.6.1	Conexión intra-domiciliaria.....	L-22
L.6.2	Instalación de Tratamiento	L-23
L.7	Conclusión y Recomendaciones.....	L-24
L.7.1	Trabajos de Conexión Intra-domiciliaria.....	L-24
L.7.2	Instalación de Tratamiento	L-24

Listado de Cuadros

Página:

Cuadro L-1: Condiciones del Diseño	L-8
Cuadro L-2: Generalidades de las Instalaciones	L-8
Cuadro L-3: Verificación del Diseño del Reactor Anaerobio	L-11
Cuadro L-4: Diseño de Parámetros del Filtro Aerobio	L-11
Cuadro L-5: Correlación entre la concentración de DBO y la carga de DBO por unidad de área	L-12
Cuadro L-6: Cantidad Requerida de Oxígeno	L-13
Cuadro L-7: Cantidad Requerida de Ventilación	L-13
Cuadro L-8: Potencia Requerida del Difusor	L-14
Cuadro L-9: Parámetros de Diseño del Tanque de Sedimentación	L-14
Cuadro L-10: Desempeño del Bombeo	L-18

Listado de Figuras

Página:

Figura L-1: Carga Compartida en la Conexión a las Viviendas	L-5
Figura L-2: Concepto del Proyecto Modelo y del Fondo de Conexión al Interior de las Viviendas	L-6
Figura L-3: Mapa de Ubicación de los 99 Usuarios del Proyecto Modelo	L-7
Figura L-4: Hoja de Tratamiento de Flujos	L-9
Figura L-5: Planos de la instalación de Tratamiento	L-9
Figura L-6: Nivel Estático de Agua y Nivel Dinámico de Agua	L-17
Figura L-7: Nivel Inicial del Agua del Cárcamo de Bombeo	L-18
Figura L-8: Cantidad Actual Descargada en el Bombeo (Bomba #1)	L-19
Figura L-9: Cantidad Actual Descargada en el Bombeo (Bomba #2)	L-19

L Tratamiento de Aguas Residuales Tipo Villa

L.1 Generalidades

a. Antecedentes

Aunque la CAPA ha operado el sistema de aguas residuales en grandes ciudades como Chetumal y Playa del Carmen, ésta no tiene sistema alguno para comunidades pequeñas. Sin embargo, incluso en ciudades con instalación de sistemas de tratamiento, la conexión de las viviendas al sistema público de alcantarillado no ha sido extensa debido a razones económicas y a la existencia de tanques sépticos.

Lo mencionado anteriormente ha llevado a la situación en que inclusive una mayor inversión no causa efectos y el agua subterránea continúa estando constantemente contaminada. Con la finalidad de solucionar estos problemas, se planeó y llevó a cabo el Proyecto Modelo “Tratamiento de Aguas Residuales Tipo Villa” en Subteniente López, Chetumal en el Municipio de Othón P. Blanco.

CAPA está construyendo una planta de tratamiento de aguas residuales y tuberías de drenaje en Subteniente López. El proyecto modelo pretende apoyar el proyecto de CAPA y asimismo pretende ganar experiencia que permita expandir posteriormente este sistema de tratamiento de aguas residuales a otras poblaciones.

b. Matriz para el Diseño del Proyecto

Nombre del proyecto: Tratamiento de Aguas residuales tipo villa	Periodo: Enero 2004- Finales de Julio 2004	Versión: No. 1
Área meta: Subteniente López en Othón P. Blanco	Grupo meta: Personal de CAPA, residentes en el área meta	Fecha: Diciembre 2003

Resumen del proyecto	Indicadores	Medios de verificación	Suposiciones importantes
Meta general Establecimiento de un sistema pequeño de drenaje	1. Número de conexiones 2. Respuesta de la comunidad 3. Efecto del tratamiento	1. Observación del número de conexiones 2. Audiencia pública 3. Registro de operaciones de la planta de tratamiento	Esfuerzos continuos de las partes interesadas para reducir los impactos ambientales ocasionados por el manejo de las aguas residuales
Propósito del proyecto 1. Establecimiento de un fondo para apoyar a los residentes en la conexión del sistema de drenaje 2. Obtener datos para el diseño y operación de un sistema pequeño de tratamiento de aguas residuales	1. Cantidad de fondos utilizados para las conexiones 2. Comparación entre datos del diseño original y datos medidos actuales	1. Cantidad actual de conexiones y fondos de apoyo utilizados 2. Observación y recolección de datos de la planta de tratamiento	Finalización de los trabajos de construcción del sistema de drenaje en las fechas establecidas
Resultados 1. Una manera de alentar la introducción del sistema de drenaje en una comunidad rural 2. La tecnología del diseño, construcción y operación del sistema de drenaje se establece.	1. Cantidad de fondos de apoyo usados para las conexiones 2. Comparación entre datos del diseño original y datos actuales medidos	1. Cantidad actual de conexiones y fondos de apoyo utilizados 2. Investigaciones cubiertas (consumo, calidad del agua tratada, cantidad consumida y fluctuación por hora, etc.)	Finalización de los trabajos de construcción del sistema de drenaje en las fechas establecidas
Actividades Ver la siguiente tabla	Aportaciones Consultar la siguiente tabla		Condiciones previas Finalización de los trabajos de construcción del sistema de drenaje en las fechas establecidas

Tabla de actividades

Actividades	Resultados	Período	Aportaciones del E/E	Aportaciones de la C/P
1. Planeación del diagnóstico	Plan de diagnóstico	Enero 2004	Colaboración	
2. Implementación del diagnóstico	Resultados del diagnóstico	Ditto	Colaboración	
3. Diseño de los trabajos de conexión	Diseño y plano de los trabajos de conexión	Ditto	Colaboración	
4. Preparación del orden	Contrato, documentos, características técnicas	Ditto	Preparación del orden	- Adquisición de los permisos requeridos - Asamblea para explicarle a los residentes locales
5. Trabajos	Registro de los trabajos		- Trabajos de construcción - Supervisión	- Supervisión
6. Trabajos realizados	Datos actuales		Colaboración	

7. Evaluación previa	Reporte previo de la evaluación		Colaboración	
8. Diseño del manual (borrador)	Manual (borrador)		- Preparación del manual (borrador)	- Distribución del manual
9. Operación	Registro de operaciones		- Consejo y asistencia	- Operación
10. Monitoreo	Registro del monitoreo			- Monitoreo
1. Evaluación	Informe de la evaluación		Colaboración	
12. Diseño del manual (final)	Manual (final)		- Copia del manual (final)	- Distribución y uso del manual

Aportaciones

Aportaciones	Equipo de Estudio	Contraparte
Personal	- Principal: HiK - Asistente: - Apoyo: IcK, MaK	- Principal: Uno - Asistente: alguien - Participantes: a ser aclarado
Material	- Manual (borrador): 30 copias - Medidor de flujo ultrasónico - Análisis de la calidad del agua - Manual (final): 30 copias	- Personal a cargo - Suministro de electricidad a los equipos de medición

Tabla de tareas

Actividades	Tareas
1. Planeación del diagnóstico	- Reuniones para discutir con la C/P el propósito del Proyecto Modelo - C/P: Preparación de datos para el diseño de la planta de tratamiento - Investigaciones de campo - Diagnóstico del diseño original de la planta de tratamiento
2. Implementación del diagnóstico	E/E: Preparación del plan analítico
3. Diseño de los trabajos de conexión	- Diseño y plan de los trabajos de conexión - Implementación del plan
4. Preparación del orden	- Especificaciones técnicas - Selección de Contratistas - Contrato
5. Trabajos	- Control de calidad - Control del programa
6. Trabajos realizados	- Datos del registro del flujo de aguas residuales por hora - Análisis de la calidad del agua al inicio, en el proceso y en el desagüe - Tecnología de transferencia para la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales
7. Evaluación previa	- Condiciones de diseño - Método de O & M
8. Diseño del manual (borrador)	- Preparación de una guía de asesoramiento en la ejecución y diseño de la planta - Preparación de una guía de operación y mantenimiento
9. Operación	Seguir métodos de operación recomendados
10. Monitoreo	Conservar registros de operación
11. Evaluación	Evaluación basada en la MDP
12. Diseño del manual (final)	Modificaciones hechas de acuerdo a la evaluación del proyecto modelo

c. Plan de Trabajo

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Construcción del sistema de drenaje (CAPA)							
Trabajos de conexión al interior de las viviendas							
Evaluación previa de las instalaciones							
Borrador de monitoreo y manual de O&M							
Trabajos de campo							
Monitoreo							
Diagnóstico							
Evaluación							
Manual (diseño, planeación y O&M)							

L.2 Trabajos de conexión al interior de la vivienda

L.2.1 Concepto

Uno de los mayores problemas respecto al manejo de las aguas residuales es que en la mayoría de las viviendas se utilizan tanques sépticos de tipo infiltración (sumideros) que contaminan en gran medida las aguas subterráneas. Debido a que los servicios públicos de alcantarillado están construyendo los drenajes principales, es recomendable que los residentes paguen por los costos



de conexión de los tanques sépticos al alcantarillado. Sin embargo, los residentes a menudo titubean en cuanto a la realización del pago. Los costos de conexión oscilan entre 3,000 y 5,000 pesos por vivienda dependiendo de diversos factores. Consecuentemente, el porcentaje de conexión al alcantarillado permanece bajo.

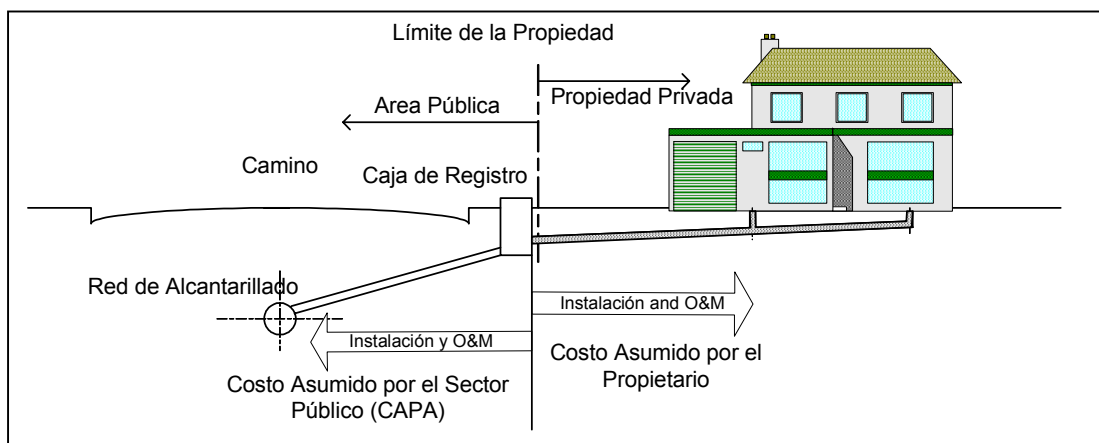


Figura L-1: Carga Compartida en la Conexión a las Viviendas

Con la finalidad de solucionar este problema se llevarán a cabo las siguientes actividades:

- De acuerdo con el proyecto modelo, 99 viviendas serán conectadas al sistema de alcantarillado gracias al apoyo financiero de JICA.
- En cuanto al pago de instalación, CAPA recaudará la cuota de conexión de los residentes, aparte del cobro de la tarifa ordinaria de alcantarillado.
- Se establecerá un fondo para la conexión dentro de las viviendas y el dinero recolectado se depositará en el fondo.

- Además del dinero recolectado, fondos de CAPA, subsidios de CNA y otros fondos serán reunidos. Por lo tanto, la conexión al sistema de alcantarillado se alentará a través del fondo existente.

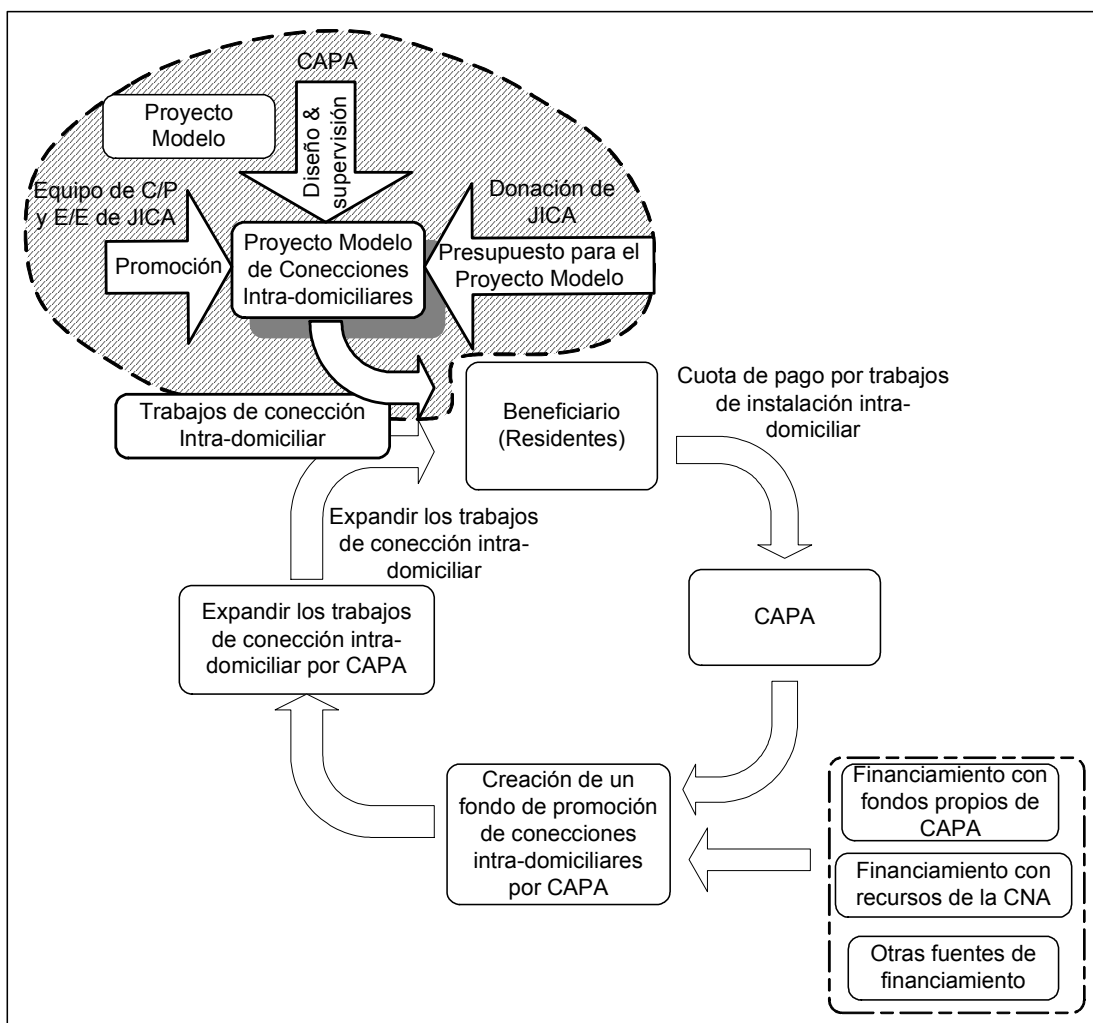


Figura L-2: Concepto del Proyecto Modelo y del Fondo de Conexión al Interior de las Viviendas

L.2.2 Selección de Usuarios para el Proyecto Modelo

En la actualidad hay cerca de 390 viviendas en el área del proyecto, es decir, en la comunidad de Subteniente López en el municipio de Othón P Blanco. Algunas de ellas son asentamientos ilegales y no tienen contrato con CAPA para el abastecimiento de agua.

Antes de implementar el Proyecto Modelo, se llevó a cabo un sondeo en el área del proyecto con el propósito de investigar la disponibilidad de conexión al sistema de drenaje por parte de los residentes que tenían un contrato con CAPA. Un total de 99 viviendas mostraron disponibilidad de conectarse. El Proyecto Modelo se realizará dirigiéndose a ellos.



Trabajos de Instalación de la
Línea de Drenaje

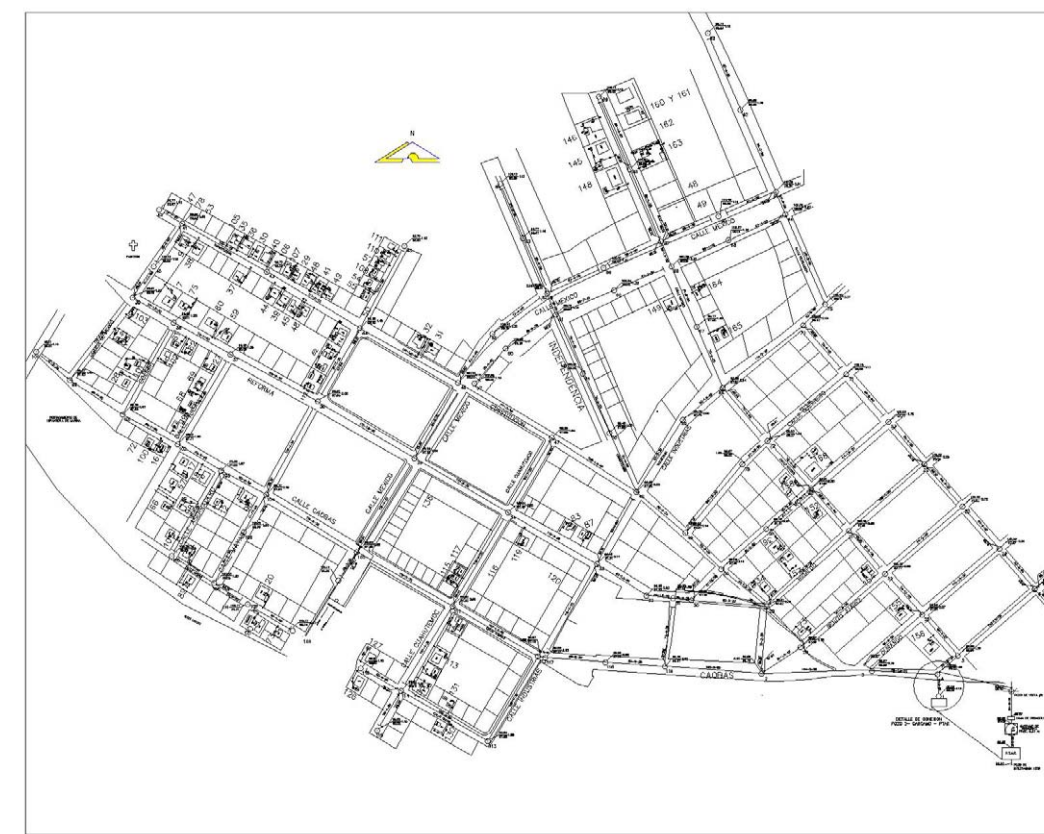


Figura L-3: Mapa de Ubicación de los 99 Usuarios del Proyecto Modelo

L.3 Evaluación Previa de las Instalaciones de Tratamiento

L.3.1 Generalidades de la Planeación

La instalación de tratamiento fue planeada y diseñada por CAPA. Los cuadros siguientes indican las condiciones y generalidades del diseño. Se planea que la instalación se desarrolle en dos etapas, es decir, los años meta serán 2008 y 2023, con la finalidad de poder enfrentar incertidumbres en el futuro, tal como cambios demográficos.

Cuadro L-1: Condiciones del Diseño

	Tiempo de vida 5 años	Tiempo de vida 20 años
Población en el 2003	1,678	
Población en el 2023	2,320	
Año meta	2008	2023
Población meta	1,872	2,360
Porcentaje de generación de aguas residuales (litro/persona/día)	116.3	116.3
Cantidad de tratamiento (m3/día)	212.5	274.5
Afluencia de concentración de DBO (mg/litro)	220	220
Calidad del agua tratada (BOD mg/litre)	60	60
Porcentaje de generación de lodos (m3/persona/año)	0.04	0.04
Método de tratamiento	Filtro anaeróbico + filtro aeróbico + desinfección	

Cuadro L-2: Generalidades de las Instalaciones

Artículo	Descripción
Caja de desazolve	
Dimensión	1.5m ancho / 1.5m largo /
Cárcamo de bombeo	
Dimensión	3.0 m diámetro / 7.3 m profundidad
Bomba de impulsión de aguas residuales	GORMAN-RUPP T4AS-B
Capacidad de flujo	111 US gpm (420 litro/min)
Carga hidráulica	Total 42.3 pies (12.9 m)
Dimensión	succión 4in (100mm), descarga 4in (100mm)
Reactor anaerobio	
Cantidad de reactores	2
Dimensión	
Primaria	4.5m ancho/ 10.0m largo / 2.15m profundidad
Secundaria	4.5m ancho/ 5.0m largo / 2.15m profundidad
Volumen vigente	Primario:85.5 m3, Secundario:42.8 m3 (total 128.3m3)
Total del volumen vigente	256.6 m3
Reactor aerobio	
Número de reactor	1
Dimensiones	4.5 m ancho/ 4.5 m largo/ 2.05 m profundidad
Ventilador aeróbico	COMPETITOR modelo 3006
Capacidad de flujo	160 FCM (4.5 m3/min)
Presión	5 psi (0.35 kg/cm2)
Tanque de sedimentación	
Dimensiones	4.5 m ancho/ 4.5 m largo / 1.95 m profundidad
Volumen vigente	35.3 m3
Área superficial	20.3 m2
Longitud total del flujo de la presa	11.5 m
Tanque de desinfección	
Dimensión	0.8 m ancho/ 1.75 m largo / 1.29m profundidad
Volumen vigente	1.8 m3

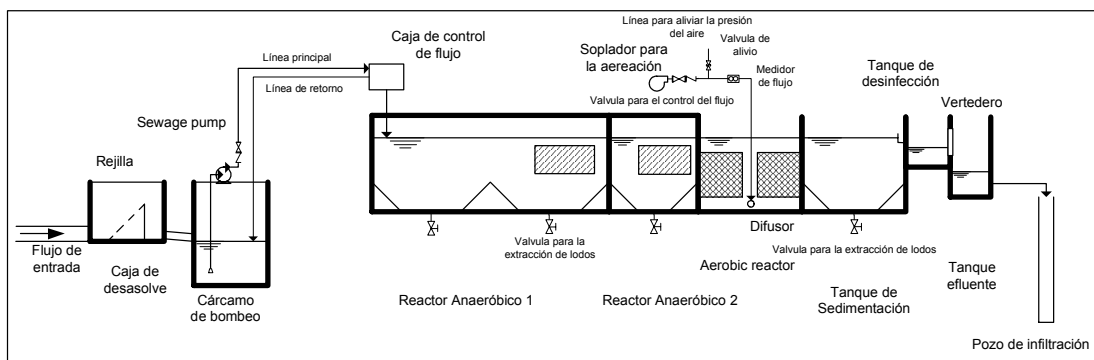


Figura L-4: Hoja de Tratamiento de Flujos

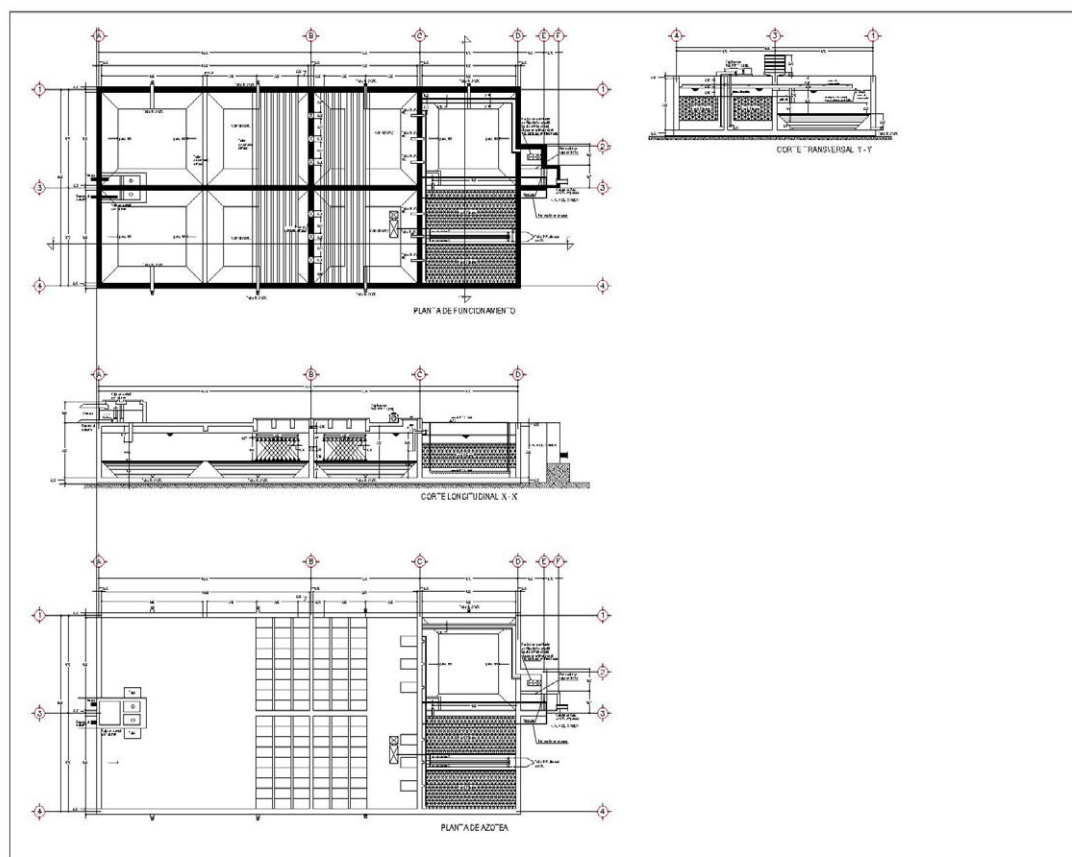


Figura L-5: Planos de la instalación de Tratamiento

L.3.2 Evaluación del Diseño de la Instalación

Esta sección presenta una evaluación del desempeño de la planta con base en las condiciones del diseño y en las generalidades de la instalación.

a. Reactor Anaerobio

El tiempo de retención hidráulico y la descarga volumétrica de DBO son importantes factores de diseño. El siguiente cuadro muestra la correlación entre el tiempo hidráulico de retención y el porcentaje esperado de eliminación de DBO proveniente de aguas residuales domésticas a 20 grados Celsius.

Tiempo de retención hidráulico (días)	Porcentaje esperado de eliminación de DBO (%)
1.0	50%
1.5	60%
5.0	70%

Fuente: Environmental Health Engineering in the Tropics, Second Edition, Sandy Cairncross and Richard Feachem, JOHN WILEY & SONS

En general, la afluencia máxima de carga volumétrica de DBO a los reactores anaerobios es de 400gramos/m³/día y el valor recomendado es de 250gramos/m³/día¹. Tomando en consideración estos valores, en el siguiente cuadro se presentan la evaluación y los resultados obtenidos. En el caso de cinco años de vida, se obtendría un 50% de porcentaje de eliminación de DBO, extrayendo lodos una o dos veces al año; el tiempo de detención es 1.06. Por otra parte, en el caso de 20 años de vida, el tiempo de retención de 0.83 no puede alcanzar el tiempo de retención del 50% del porcentaje de eliminación, incluso si se realiza extracción de lodos tres veces al año.

Los valores varían de acuerdo a factores como temperatura, por lo tanto el Proyecto Modelo verificará la existencia de tales factores en el sitio.

¹ Environmental Health Engineering in the Tropics, Second Edition, Sandy Cairncross and Richard Feachem, JOHN WILEY & SONS

Cuadro L-3: Verificación del Diseño del Reactor Anaerobio

Aspecto		Tiempo de vida 5 años	Tiempo de vida 20 años
Cantidad tratada (m ³ /día)		212.5	274.5
Población meta		1,872	2,360
Flujo concentrado de DBO (mg/litro)		220	220
Flujo de la cantidad de DBO (gramo/día)		46,750	60,390
Volumen del lodo (m ³ /año)		74.9	94.4
Volumen total efectivo		256.6 m ³	256.6 m ³
Carga del volumen de DBO (gramo/m ³ /día)			
Caso 1	Frecuencia de extracción de lodos: una vez al año	257.3	372.3
Caso 2	Frecuencia de extracción de lodos: dos veces al año	213.3	288.4
Caso 3	Frecuencia de extracción de lodos: tres veces al año	-	268.3
Tiempo de retención hidráulico (días)			
Caso 1	Frecuencia de extracción de lodos: una vez al año	0.86	0.59
Caso 2	Frecuencia de extracción de lodos: dos veces al año	1.03	0.76
Caso 3	Frecuencia de extracción de lodos: tres veces al año	1.06	0.83

b. Filtro aerobio

Se espera una afluencia de 110mg/litros en la concentración de DBO en la entrada del filtro aerobio si el reactor anaerobio alcanza un porcentaje de eliminación del 50%. La carga volumétrica de DBO en proporción al área de yacimiento fijo y al volumen de ventilación, los cuales mantienen las condiciones aerobias, son factores de diseño importantes respecto a la eliminación de DBO. Por lo tanto en el cuadro siguiente de esta sección, se evalúan estos dos factores basándose en el diseño de parámetros del filtro aerobio.

Cuadro L-4: Diseño de Parámetros del Filtro Aerobio

Aspecto	Tiempo de vida 5 años	Tiempo de vida 20 años
Cantidad tratada (m ³ /día)	212.5	274.5
Afluencia en la concentración de DBO(mg/litro)	110	110
Afluencia en la cantidad de DBO (gramo/día)	23,375	30,195
Volumen total efectivo (m ³)	40.1	40.1
Carga del volumen de DBO (gramo/m ³ /día)	583	753
Volumen medio del filtro (m ³)	19	19
Unidad del área superficial (m ² /m ³)	100	100
Total del área superficial media (m ²)	1,900	1,900
Carga superficial del filtro medio de DBO (gramo/m ² /día)	12.3	15.9
Volumen suministrado de aire (m ³ /min)	4.5	4.5
Volumen suministrado de aire / Cantidad afluente de agua	30.5	23.6

b.1 Carga de DBO por unidad de área

Hasta la fecha se han concebido varias medidas para determinar la carga de DBO por unidad de área. La formula siguiente se utiliza en Japón² y muestra la correlación entre la afluencia

² Criterio de diseño y guía práctica para JOKASO, Edificio Céntrico de Japón, 1984.

en la calidad del agua, la calidad del agua tratada y la carga de DBO por unidad de área. La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos a través de la fórmula.

$$\frac{Le}{Lo} = 0.176 \left(\frac{45.455}{Lo} \right) \bullet L^{0.707}$$

Donde:

- Le : concentración de DBO en agua tratada (mg/litro)
- Lo : concentración de DBO en la afluencia del agua (mg/litro)
- L : carga de DBO por unidad de área (gramo/m²/día)

Cuadro L-5: Correlación entre la concentración de DBO y la carga de DBO por unidad de área

Lo (mg/litro)	Le(mg/litro)	L (g/m ² /día)
110	105	27.9
110	100	26.0
110	95	24.2
110	90	22.4
110	85	20.7
110	80	19.0
110	75	17.3
110	70	15.7
110	65	14.1
110	60	12.6
110	55	11.2
110	50	9.8
110	45	8.4
110	40	7.1
110	35	5.9
110	30	4.7
110	25	3.7
110	20	2.7
110	15	1.8
110	10	1.0
110	5	0.4

La carga diseñada de DBO por unidad de área es de 12.3 gramos/m²/día en caso de un tiempo de vida de 5 años y de 15.9 gramos/m²/día en caso de 20 años. Esto induce una calidad del agua tratada de 60mg/litro y 70mg/litro respectivamente. La fórmula utilizada es empírica y asume una temperatura del agua de aproximadamente 20 grados Celsius. La instalación espera una temperatura del agua de entre 25 y 30 grados Celsius. Por lo tanto, podría deducirse que se espera una mejor calidad del agua tratada.

b.2 Volumen de ventilación

El tratamiento aeróbico biológico requiere que las concentraciones de oxígeno en un reactor no sean menores a 1mg/litro. La cantidad de oxígeno requerida puede obtenerse a través de la siguiente fórmula.

$$O_2 = aLr + bSa$$

Donde:

O_2	:	demanda de oxígeno (kg/día)
a	:	coeficiente para la eliminación de DBO (kg O_2 /kg BOD)= 0.5
Lr	:	cantidad eliminada de DBO (kg/día)
b	:	coeficiente de la demanda de oxígeno por micro organismos = 0.07
Sa	:	cantidad de micro organismos (kg)

El Cuadro L-6 indica la cantidad de oxígeno que demandan las instalaciones. El Cuadro L-7 presenta la capacidad requerida de ventilación tomando en cuenta la cantidad de oxígeno demandada a la temperatura y presión atmosféricas, la eficiencia del difusor y al factor seguridad.

Cuadro L-6: Cantidad Requerida de Oxígeno

	Tiempo de vida 5 años	Tiempo de vida 20 años
Eliminación de DBO (mg/litro)	50	50
Cantidad de agua (m ³ /día)	212.5	274.5
Cantidad eliminada de DBO (Kg./día)	10.6	13.7
Cantidad de unidades de micro organismos (mg/cm ²) ³	1.42	1.42
Área superficial total (m ²)	1900	1900
Cantidad total de micro organismos (Kg.)	27.0	27.0
Demanda de oxígeno (Kg./día)	7.19	8.74

Cuadro L-7: Cantidad Requerida de Ventilación

	Tiempo de vida 5 años	Tiempo de vida 20 años
Demanda de oxígeno (Kg./día)	7.19	8.74
Concentración de oxígeno (Kg./m ³)	0.277	0.277
Volumen de aire requerido (m ³ /día)	26.0	31.6
Eficiencia del difusor (%)	2	2
Factor seguridad	1.5	1.5
Capacidad requerida de ventilación (m ³ /min)	1.4	1.6

Los resultados indican que la capacidad de 4.5 m³/min. es insuficiente, ya que la capacidad de ventilación es de 1.6 m³/min. Entretanto, la potencia del difusor se representa como K_{La} , o

³ Diseño de datos de CAPA

sea, coeficiente de transferencia de masa volumétrica. La potencia del difusor es de 1.5 K_{La} y más como se indica a continuación.

$$K_{La} = \frac{Rr}{Cs - Cl}$$

Donde:

K_{La}	:	coeficiente de transferencia de masa volumétrica (t^{-1})
Rr	:	demanda de oxígeno (gramo/ m^3 /hora)
Cs	:	concentración saturada de oxígeno (gramo/ m^3) = 8
Cl	:	concentración requerida de oxígeno (gramo/ m^3) = 1

Cuadro L-8: Potencia Requerida del Difusor

Aspecto	Tiempo de vida 5 años	Tiempo de vida 20 años
Demanda de oxígeno (Kg./día)	7.19	8.74
Demanda de oxígeno (gramo/hora)	299.6	364.2
Volumen del Depósito (m^3)	35.3	35.3
Rr (gramo/hora)	8.5	10.3
Kla (hora-1)	1.2	1.5

b.3 Tanque de Sedimentación

Algunos de los parámetros recomendados en el diseño del tanque de sedimentación para el porcentaje de carga de la superficie hidráulica y la carga de la presa hidráulica son $25m^3/m^2/día$ y $30m^3/m^2/día$ respectivamente. En adición, el tiempo de retención recomendable fluctúa entre tres horas o más.

Cuadro L-9: Parámetros de Diseño del Tanque de Sedimentación

Aspecto	Tiempo de vida 5 años	Tiempo de vida 20 años
Cantidad de tratamiento ($m^3/día$)	212.5	274.5
Volumen total efectivo (m^3)	35.3	35.3
Área superficial (m^2)	20.3	20.3
Longitud total del flujo de la presa (m)	11.5	11.5
Carga hidráulica superficial ($m^3/m^2/día$)	10.5	13.5
Carga hidráulica de la presa ($m^3/m/día$)	18.5	23.9
Tiempo hidráulico de retención (hora)	4.0	3.1

L.4 Implementación

L.4.1 Trabajos de Conexión Intra domiciliaria

L.4.1.1 Contrato de Conexión Intra domiciliaria

De acuerdo al contrato establecido entre los residentes y CAPA, los primeros aceptaron pagar el 10% de los costos de construcción (de 200 a 400 pesos dependiendo del tamaño de la construcción) requeridos para la conexión intra domiciliaria, para iniciar con el proyecto. El resto sería cargado al recibo del agua durante los próximos 12 meses, cuando empiece la operación de la planta de tratamiento. Sin embargo, hasta mediados de junio únicamente 40 viviendas habían aceptado firmar el contrato. Al final, CAPA decidió distribuir el primer pago durante 12 meses con la finalidad de animar a los residentes a aceptar el contrato. Como resultado, 99 viviendas aceptaron firmar el contrato el 23 de junio de 2004. De esta experiencia CAPA ha ganado habilidad para resolver problemas difíciles tal como la aceptación del contrato en el proyecto de conexión intra domiciliaria por parte de los residentes.

L.4.1.2 Trabajos de Construcción

La construcción de la conexión intra domiciliaria empezó a finales de enero de 2004, antes de finalizar la construcción de la planta de tratamiento. Para marzo, la conexión intra domiciliaria para 10 viviendas inició. Sin embargo, debido a que las líneas de alcantarillado y la planta de tratamiento no han sido instaladas ni construidas, la conexión final no se llevó a cabo.

A finales de mayo de 2004 la construcción de la conexión intra domiciliaria se restableció, al igual que el contrato entre los residentes y CAPA. Desde entonces, el Equipo de Estudio ha continuado con la construcción de la conexión intra domiciliaria, pero surgieron algunos problemas como el que en las viviendas en que se firmaron los acuerdos los dueños estuvieron ausentes al momento de visitarlos.

Aun cuando hay algunos problemas por solucionar, las plantas estuvieron listas a principios de julio para el agua residual entrante debido a las vigorosas operaciones de CAPA. Por consiguiente, la conexión al alcantarillado público inició con las viviendas en las que la construcción de la conexión intra domiciliaria se completó consecutivamente.

L.4.2 Instalación de Tratamiento de Aguas residuales

L.4.2.1 Generalidades

La construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales finalizó en junio de 2004. Sin embargo, se encontró filtración del agua subterránea/agua de lluvia en la tubería de alcantarillado así como también se observó gran entrada de agua a la planta de tratamiento. CAPA inmediatamente llevó a cabo una investigación y tomó las medidas necesarias para solucionar el problema. Para principios de julio, aunque todavía hay agua subterránea mezclada, la planta de tratamiento se encuentra en condiciones favorables para iniciar las operaciones.

La conexión intra domiciliaria final se terminará más o menos el 10 de julio y las aguas residuales empezarán a entrar a la planta después de su finalización. Por esta razón, la cantidad actual de aguas residuales no refleja la evaluación del desempeño actual. Esto lleva al Equipo de Estudio a evaluar el desempeño hidráulico de la instalación de tratamiento con agua en lugar de su evaluación con aguas residuales y a hacer comentarios y sugerencias para su mejoramiento simultáneo. En adición, el Equipo de Estudio prepara el manual de monitoreo y capacita a la C/P con el manual. La C/P por si misma es capaz de conducir el monitoreo de las plantas con las aguas residuales actuales.

L.4.2.2 Evaluación de la Instalación de Tratamiento

No puede evaluarse actualmente la efectividad del tratamiento debido a que no hay entrada de aguas residuales. Por lo tanto, las condiciones hidráulicas de la actual planta de tratamiento se evaluarán aquí.

a. Nivel Estático de Agua y Nivel Dinámico de Agua

Antes de aplicar medidas de prevención a la filtración del agua subterránea en las tuberías del alcantarillado, gran cantidad de agua entró a la planta de tratamiento, causando que las bombas del alcantarillado se activaran y desactivaran repetidamente (cada 90 segundos). De acuerdo con los resultados de medidas en el sitio, las bombas tienen una capacidad de bombeo de cerca de $1.1\text{m}^3/\text{min}$. ($1,584\text{ m}^3/\text{día}$), lo cual es 7.5 veces mayor que la capacidad designada de $212\text{ m}^3/\text{día}$. Debido a que la frecuencia de bombeo es cada 90 segundos, se encontró que más agua residual de la designada estuvo entrando en la planta, causando así un desbordamiento.

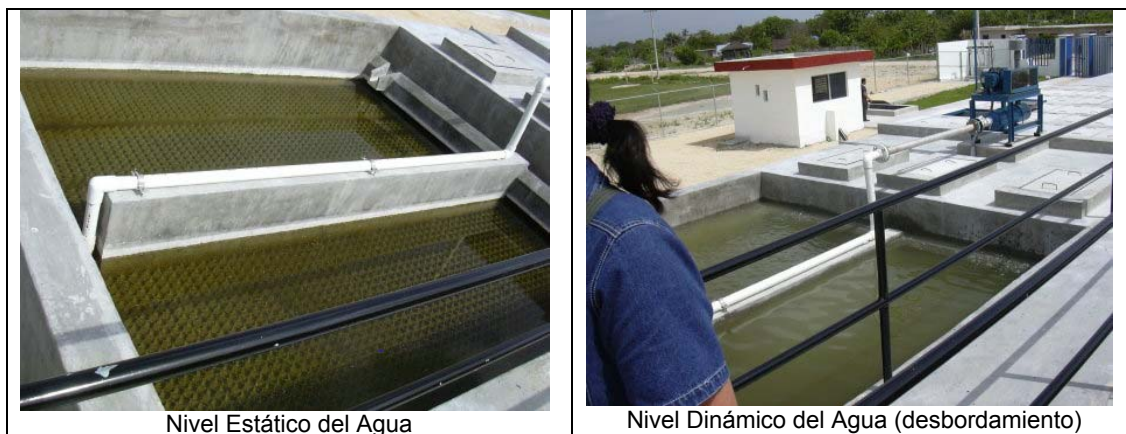


Figura L-6: Nivel Estático de Agua y Nivel Dinámico de Agua

Aunque la caja de control de flujos se instaló en la planta de acuerdo a las sugerencias hechas por el Equipo de Estudio, ésta no funciona adecuadamente debido a la cantidad excesiva de flujo.

Con la finalidad de solucionar este problema, se sugiere lo siguiente;

- Prevenir la entrada de aguas subterráneas dentro de la tubería de aguas residuales como primera prioridad.
- Ajustar el porcentaje de descarga de la bomba.

Lo primero se ha finalizado como resultado de la renovación de tuberías que llevó a cabo CAPA, aunque algunos problemas permanecen. La segunda sugerencia ha sido instalar una válvula en la salida o en la bomba.

b. Cárcamo de Bombeo

El cárcamo de bombeo tiene una forma cilíndrica con un diámetro interior de 3 m. Los niveles del agua se muestran a continuación.

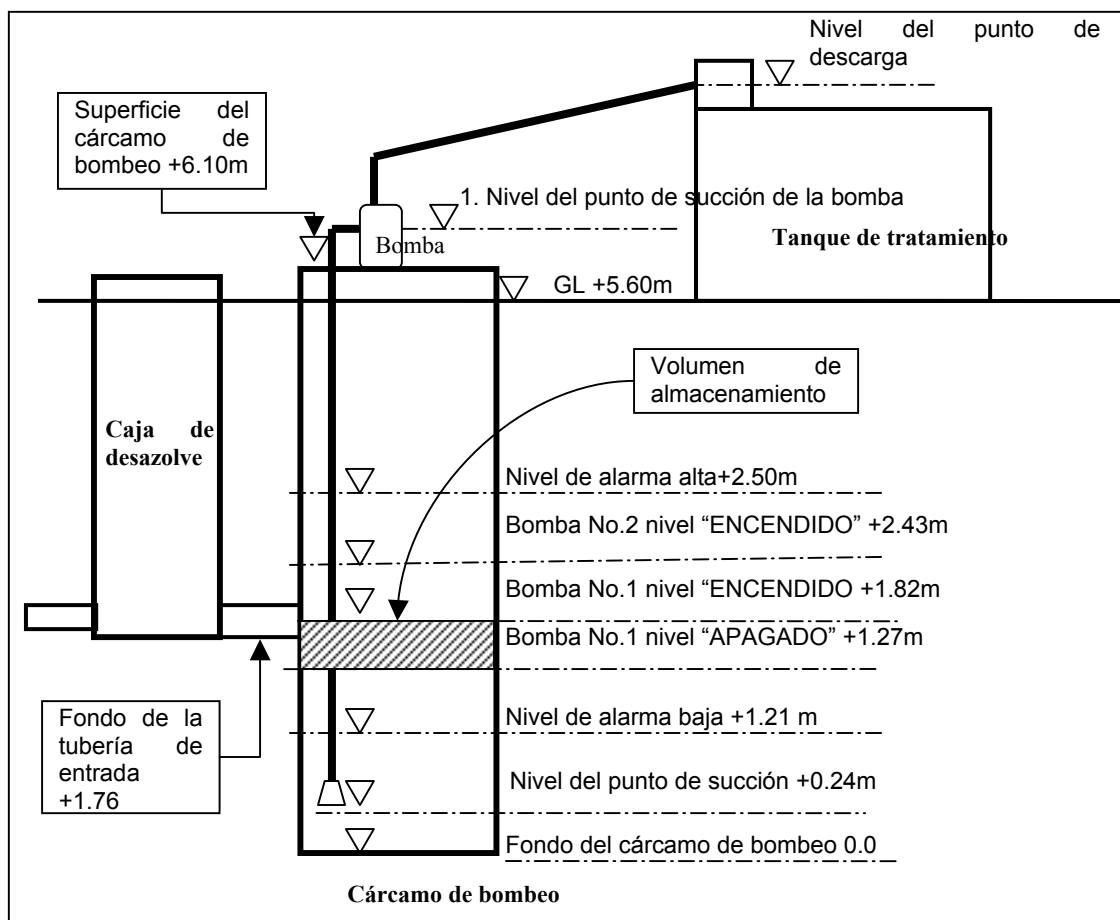


Figura L-7: Nivel Inicial del Agua del Cárcamo de Bombeo

Se instalaron dos equipos de bombeo. La información del desempeño del bombeo se muestra en el cuadro posterior. La cantidad de flujo de 111 gpm (14.8 m³/min.) se toma como el valor de diseño.

Cuadro L-10: Desempeño del Bombeo

Cantidad de flujo		Altura total		Efectividad de bombeo	Energía requerida
US gpm	Litro/min.	pies	m	%	bhp
133	503	41.6	12.7	29	4.48
111	420	42.5	13.0	24	4.96
88.8	336	43.5	13.3	29	5.07
66.6	252	44.5	13.6	24	5.18

De manera contraria, la cantidad actual de descarga de la bomba es de 1.1m³/min., lo cual es más del doble del valor diseñado. Esto se debe probablemente a que la cantidad en exceso de la capacidad de bombeo se especificó en la etapa de diseño.

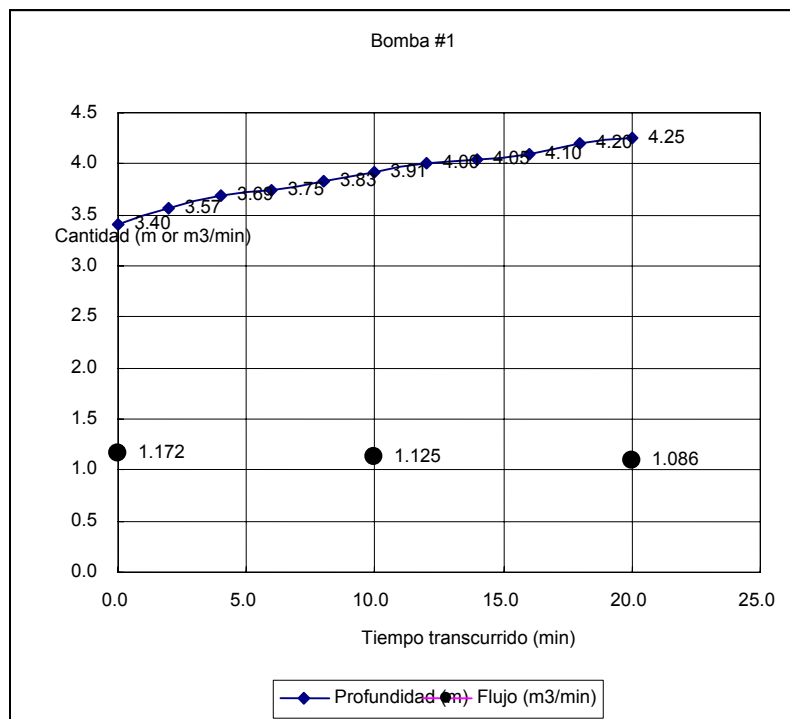


Figura L-8: Cantidad Actual Descargada en el Bombeo (Bomba #1)

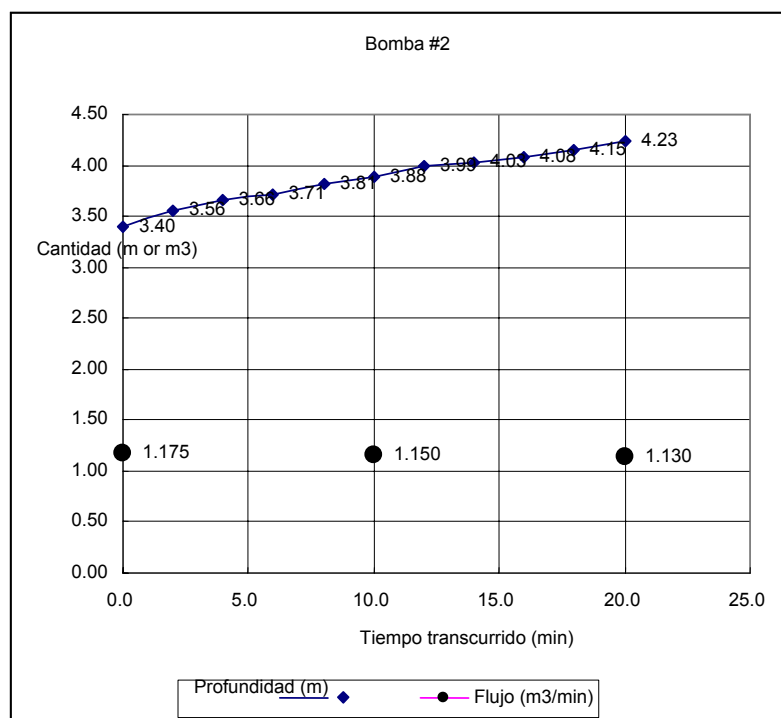


Figura L-9: Cantidad Actual Descargada en el Bombeo (Bomba #2)

Por otra parte, la capacidad efectiva de almacenamiento del cárcamo de bombeo es de casi 3.9 m^3 , con un tiempo de retención de 26 minutos. Esto significa que si la cantidad de diseño es de $212 \text{ m}^3/\text{día}$ de entrada, entonces la frecuencia de encendido y apagado de la bomba es de 26 minutos máximo. Si la cantidad pico de entrada se considera ser el doble de la media

diaria de entrada, se requiere entonces una frecuencia de encendido y apagado tan baja como 13 minutos. Cuando la planta de tratamiento se operó con base en estas sugerencias, no ocurrieron desbordamientos.

Por lo tanto, el desbordamiento se puede prevenir si se aplica la suposición anterior. Pero con la finalidad de alcanzar una operación de tratamiento más estable, es posible ajustar la descarga a la salida del equipo de bombeo. Asimismo, si es posible, el espacio de las tuberías de agua de la bomba de los niveles “ENCENDIDO” y “APAGADO” debería extenderse, lo cual conlleva al incremento de la capacidad efectiva de almacenamiento de flujos en el cárcamo.

c. Caja de Control de Flujos

La caja de control de flujos se instala con el propósito de descargar cierta cantidad de aguas residuales en la planta de tratamiento. La cantidad excesiva de flujos de la operación de bombeo se regresa al cárcamo de bombeo.

Sin embargo, la situación actual es:

- Como se expuso anteriormente, la capacidad de bombeo actual es 7 veces mayor que el diseño.
- Debido a la gran descarga en el bombeo, el flujo se vuelve turbulento en la caja de control.
- La presa triangular instalada es únicamente una hoja de acero cortada en triángulo, el cual no está actuando como distribuidor de flujo.
- Debido a la gran descarga proveniente de la presa triangular y del equipo de bombeo, el flujo de aguas residuales no se distribuye de manera equitativa en los dos depósitos de tratamiento.



Inside of Flow Control BOX

El Equipo de Estudio ha hecho diversas sugerencias, como por ejemplo remplazar la presa triangular y en su lugar instalar una pared de retención frente a la entrada de los depósitos, que están a menor alcance de la presa, con la finalidad de distribuir la cantidad de flujo de manera equitativa en los dos depósitos.

L.5 Resultados

a. Logros

Síntesis narrativa	Logros
1. Meta general Establecimiento de un sistema pequeño de drenaje	CAPA ha adquirido conocimiento y habilidades en cuanto a aspectos sociales; Ej. ha alentado a los residentes a conectarse al alcantarillado público. También en cuanto a aspectos técnicos ha ganado conocimiento, Ej. la filtración del agua subterránea en la alcantarilla y la operación de las instalaciones de tratamiento. Asimismo, un manual de operación de las instalaciones ha sido preparado. Por lo tanto, CAPA está listo para operar las instalaciones y expandir el mismo tipo de sistema pequeño de drenaje en toda el Área de Estudio.
2. Propósito del proyecto Establecimiento de un fondo para apoyar a los residentes en la conexión del sistema de drenaje. Obtener datos para el diseño y operación de un sistema pequeño de tratamiento de aguas residuales	• CAPA obtuvo 99 contratos para la conexión intra domiciliaria • Se establecieron las condiciones básicas para construir las conexiones intra domiciliarias. • Se confirmaron las condiciones hidráulicas; sin embargo, las condiciones biológicas no fueron confirmadas debido a los retrasos en los trabajos de construcción de CAPA.
3. Resultados Una manera de alentar la introducción del sistema de drenaje en una comunidad rural La tecnología del diseño, construcción y operación del sistema de drenaje se establece.	• Cantidad usada del fondo para conexiones: 99 viviendas fueron conectadas. • CAPA aprendió a cómo obtener el contrato para conexión intra domiciliaria. • Se hicieron claras las condiciones apropiadas del contrato para la conexión intra domiciliaria. • Comparación del diseño de datos originales y los datos actuales medidos: la cantidad actual de bombeo es excesiva. • La caja de control de flujo no trabajó apropiadamente. Se han hecho sugerencias en cuanto a este problema. • CAPA apoyó con conocimiento para el desarrollo del nuevo tipo de instalaciones (diseño, construcción, operación, etc.).
4. Inversión 1) Personal 2) Trabajos de construcción 3) Equipo	• Equipo de Estudio: Sr. Hiroshi Kato y Sr. Ichiro Kono • C/P : Sr. Juventino Castillo Pinzón, Sr. Jaime Ricardo Quiñones Baas, Sr. Jorge A. Dzul Chin, Sr. Ximenes • Trabajos de conexión para 99 viviendas • Material supersónico de flujo • Oxígeno disuelto, pH, Material de la temperatura del agua

b. Otros Resultados

Debido a los retrasos en la construcción de las plantas (en las de tratamiento y bombeo) y al retraso en la administración de los acuerdos del contrato con los residentes, ahora es imposible verificar el desempeño actual de la planta en cuanto a la carga porcentual de aguas residuales dentro de los plazos del estudio. Por lo tanto, únicamente se examinaron las condiciones hidráulicas.

L.6 Evaluación

L.6.1 Conexión intra-domiciliaria

La construcción de las conexiones intra domiciliarias así como el desarrollo del sistema de tratamiento de aguas residuales, juegan un papel importante en la prevención de la contaminación del agua subterránea causada por las aguas residuales en el Área de Estudio. La responsabilidad de CAPA se redujo a la instalación de cajas públicas de registro. Los trabajos de conexión intra domiciliaria se dejaron a la decisión de cada vivienda. Sin embargo, incluso cuando el sistema de tratamiento fue desarrollado, muchas viviendas en la región escogieron utilizar el tanque séptico debido a razones económicas y a la falta de comprensión sobre el impacto en sus viviendas y en el medio ambiente. Como resultado, la inversión en el área de manejo de aguas residuales no trajo un beneficio real en cuanto a la protección de la salud humana y al medio ambiente.

Aunque CAPA es consciente de que la falta de comprensión acerca del sistema de tratamiento y el bajo presupuesto de los residentes es una de las razones principales que causaron el retraso en los efectos de la inversión, no se implementaron medidas prácticas. Asimismo, CAPA no ha establecido ningún sistema o plan para promover los trabajos de conexión intra domiciliaria.

El proyecto modelo ha:

- Establecido una nueva fundación para alentar la conexión intra domiciliaria.
- Establecido un nuevo sistema en el que CAPA se involucra más para la conexión intra domiciliaria.
- Establecido un método de Préstamos-de-Cero-pago-al-contado.

De ahora en adelante, se requiere que CAPA cobre la tarifa y ponga en operación el fondo de manera transparente, con la finalidad de continuar y expandir la Sustentabilidad del trabajo.

Los trabajos de conexión intra domiciliaria empiezan normalmente después de que finalice el desarrollo del sistema de tratamiento de aguas residuales (instalaciones de tubería y de tratamiento); sin embargo, debido a limitantes de tiempo, ambos se promovieron de manera simultánea en este proyecto modelo. Como resultado surgieron algunos problemas durante la operación pero CAPA ha fortalecido su capacidad para resolver los problemas. Por lo tanto, el agua subterránea contaminada y los riesgos a la salud de los residentes, que están utilizando el agua subterránea en el Área de Estudio, se pueden reducir en el futuro.

L.6.2 Instalación de Tratamiento

La construcción del alcantarillado (tubería y planta de tratamiento) dentro del área de estudio en el Proyecto Modelo es jurisdicción de CAPA. La fecha límite de construcción se estableció para finales de diciembre de 2003; sin embargo, se extendió para principios de julio de 2004. Los trabajos finales de conexión intra domiciliaria del Equipo de Estudio se retrasaron también. A finales de junio la instalación no tenía entrada de aguas residuales. Considerando el periodo de crecimiento de bacterias, es imposible conducir una evaluación de la planta de tratamiento. Por lo tanto sólo se hicieron sugerencias para el mejoramiento de la planta.

El Equipo de Estudio ha estado siguiendo el progreso de la construcción; sin embargo el proyecto experimentó un gran retraso debido a:

- Las características de la región (existe un nivel muy alto de aguas subterráneas), no se consideraron como factores importantes para el diseño y construcción de las instalaciones.
- La capacidad de los contratistas fue baja.

Asimismo, respecto al equipo de bombeo,

- Debido a la falta de experiencia en el diseño de las instalaciones de suministro de agua, no se instaló un equipo de bombeo con capacidad apropiada.
- Como consecuencia, se redujo el rango ajustable de la potencia de bombeo.

En el futuro, cuando se planee y diseñe una instalación similar, se recomienda el uso de bombas sumergibles para las aguas residuales debido a que tienen baja succión y son relativamente económicas.

CAPA ha acumulado considerables experiencias y ahora es capaz de resolver los problemas mencionados previamente.

Otra recomendación consiste en que la persona a cargo evite la entrada a la planta de personal no autorizado. La planta de tratamiento está rodeada de cercas y puertas, pero las puertas están abiertas y cualquiera puede entrar al área. Esto puede causar serios accidentes o pérdida de propiedad. Algunas medidas, como asegurar las puertas, podrían tomarse con el fin de que tercer personal no entre a áreas prohibidas.

L.7 Conclusión y Recomendaciones

Debido a los grandes retrasos en el sistema de alcantarillado, las metas iniciales no fueron alcanzadas. Sin embargo, parece que ahora CAPA es capaz de solucionar los problemas. Se espera que CAPA expanda el proyecto siguiendo el P/M en el Área de Estudio, utilizando esta experiencia.

L.7.1 Trabajos de Conexión Intra-domiciliaria

CAPA está ahora en la etapa de utilizar los recursos provistos por la JICA, al practicar de manera efectiva los métodos para alcanzar los acuerdos de contrato mencionados en el Proyecto Modelo. Esto lleva a la sugerencia de que los trabajos de conexión intra domiciliaria deben ser procesados no solamente dentro del área objetivo del Proyecto Modelo sino que en un área más amplia del Área de Estudio, con el propósito de mejorar el sistema de tratamiento de aguas residuales.

La conexión intra domiciliaria fue diseñada por CAPA en este proyecto modelo. Sin embargo, hay algunos desacuerdos respecto a los planes entre CAPA y los residentes, lo cual causa problemas en los tiempos de construcción. Estos problemas podrían solucionarse a través de la promoción de mayor diálogo con los residentes y al mismo tiempo estableciendo una nueva sección que esté a cargo de los contratos de conexión intra domiciliaria y diseño/construcción, todo esto de manera conjunta con CAPA.

L.7.2 Instalación de Tratamiento

Es imposible para el Equipo de Estudio llevar a cabo la evaluación del rendimiento de la planta de tratamiento debido al gran retraso en la construcción del sistema de alcantarillado bajo la jurisdicción de CAPA. El Equipo de Estudio recomienda en gran medida que CAPA ejecute el monitoreo de acuerdo al manual preparado por el Equipo de Estudio y luego siga con la evaluación del rendimiento y revisión del diseño de la planta.

Con la finalidad de evitar retrasos en los trabajos de construcción, se deberían tomar varias consideraciones o medidas; no solo por la habilidad de los constructores pero para los tipos y métodos de encuestas precede el diseño y la construcción; también cómo reflejar los resultados de las entrevistas en el sitio en el diseño y la construcción; finalmente la estimación de costos basados en la planeación de la construcción y en la inspección del sitio después del contrato. Esto puede mejorarse a través de la práctica repetitiva del ciclo PDCI (por sus siglas en inglés), que significa Planea, Haz, Verifica, Mejora).